



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL INDUCIDO POR LICUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN DE GRAN MAGNITUD

WILLIAM SEGUNDO ARAUJO NAVARRO

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

CHRISTIAN LEDEZMA

Santiago de Chile, Marzo, 2023

© 2023, William Araujo



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL INDUCIDO POR LICUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN DE GRAN MAGNITUD

WILLIAM SEGUNDO ARAUJO NAVARRO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

CHRISTIAN LEDEZMA	<i>Christian Ledezma</i>
YOLANDA ALBERTO	<i>Yolanda Alberto</i>
JORGE CREMPIEN	<i>Jorge Crempien</i>
ESTEBAN SÁEZ	<i>ES</i>
JORGE MACEDO	<i>Jorge Macedo</i>
HÉCTOR JORQUERA	<i>Hector Jorquera</i>

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería
Santiago de Chile, Marzo, 2023

Agradezco a Dios por todas las experiencias vividas en esta etapa. A mis seres queridos: madre y novia que siempre estuvieron para darme su apoyo, al igual que mi profesor supervisor de quién he aprendido mucho.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento hacia mi tutor supervisor Prof. Christian Ledezma por su asesoría y apoyo continuo durante esta investigación. Me siento muy agradecido de haber sido uno de sus alumnos y de que haya tenido siempre la disposición para atender cada una de mis consultas y poderme guiar de la mejor manera en la parte del desarrollo de la tesis y en la escritura de la misma. El tiempo es el recurso más valioso que todos tenemos por lo que mi agradecimiento hacia él es infinito.

Este camino no ha sido fácil por lo que me gustaría también agradecer a mis familiares, a mi madre en especial y amigos de doctorado del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile que siempre estuvieron alentándome para llegar a la meta, dándome confianza y soporte a lo largo de este camino. Agradezco también al Prof. Jorge Macedo por su asesoría durante la pasantía realizada en donde puede recibir mucha retroalimentación de su experiencia en modelación numérica y análisis estadístico de datos en el estudio de los terremotos de subducción de gran magnitud. Agradezco también a los miembros del jurado por la paciencia para revisar mi manuscrito y entregarme su retroalimentación. De igual forma, agradezco a todo el personal administrativo de postgrado de esta casa de estudios por todas las gestiones realizadas durante mi etapa de doctorando.

Finalmente, me gustaría agradecer a la Vicerrectoría de Investigación (VRI) de la Pontificia Universidad Católica de Chile por su financiamiento durante agosto 2017 - agosto 2019 con la Beca Ayudante Becario; también a la Escuela de Ingeniería de la misma por su financiamiento durante septiembre 2019 – enero 2020 con la Beca Ayudante Doctorando y finalmente a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile por su financiamiento durante febrero 2020 - julio 2021 con la Beca de Doctorado Nacional y sus beneficios complementarios como gastos de instalación, gastos operacionales y de pasantía.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	4
INDICE GENERAL.....	5
INDICE DE TABLAS	8
INDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Problema de Investigación	20
1.2 Objetivos	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos	22
1.3 Hipótesis.....	23
1.4 Metodología	23
Etapa I. Selección de una metodología numérica del desplazamiento lateral ..	23
Etapa II. Modelación numérica paramétrica de desplazamiento lateral.	24
Etapa III. Análisis estadístico de los datos de la modelación paramétrica.	24
Etapa IV. Validación de la nueva ecuación propuesta.....	25
1.5 Contenido	25
1.6 Alcance.....	27
1.7 Pasantía de Investigación	27
1.8 Lista de Publicaciones.....	28
1.9 Descargo de Responsabilidad.....	28
2. ESTADO DEL ARTE	30
2.1 Introducción	30
2.2 Mecanismo de Desplazamiento Lateral	31
2.3 Casos Históricos de Desplazamiento Lateral	33
2.4 Modelos de Evaluación.....	36

Modelos analíticos	37
Modelos empíricos.....	40
Modelos constitutivos	45
Modelos en base a resultados experimentales	49
Modelos de predicción con <i>machine learning</i>	51
2.5 Normativas Internacionales de Desplazamiento Lateral	53
2.6 Desplazamiento Lateral en Terremotos de Subducción	55
2.7 Resumen y conclusiones	58
3. MODELACIÓN NUMÉRICA	61
3.1 Introducción	61
3.2 Descripción de la plataforma numérica.....	62
3.3 Descripción del modelo constitutivo	63
Función de fluencia.....	64
Regla de flujo.....	65
Regla de endurecimiento	66
3.4 Parámetros de calibración del modelo numérico	67
Descripción de cada parámetro del modelo	68
Rangos de valores de los parámetros del modelo	69
3.5 Validación de la metodología numérica con ensayos centrífuga	70
Descripción general de los ensayos	70
Parámetros del modelo.....	74
Comparación de resultados	75
3.6 Comparación con casos históricos	78
Descripción de condiciones del terreno	78
Registros sísmicos seleccionados	80
Comparación de resultados	81
3.7 Resumen y conclusiones	83
4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO NUMÉRICO	85
4.1 Introducción	85
4.2 Perfiles sintéticos de suelo	86
4.3 Base de datos sísmica	86
4.4 Procedimiento de modelación	88
4.5 Resultados paramétricos.....	90
Verificación de ocurrencia de licuación	90

	Influencia de los parámetros del suelo.....	92
	Influencia de los parámetros del sismo.....	94
	4.6 Resumen y conclusiones	99
5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	101
5.1	Introducción	101
5.2	Modelos de regresión usados	102
	Regresión <i>LASSO</i>	102
	Regresión <i>Random Forest</i>	102
	Regresión <i>Forward Stepwise Selection</i>	103
5.3	Desempeño de los modelos de regresión en la predicción sísmica.....	103
5.4	Importancia relativa de las variables en los diferentes <i>machine learning</i>	104
5.5	Nuevo modelo propuesto de predicción.....	105
5.6	Validación del modelo de predicción.....	108
	Comparación con resultados de experimentos centrífugas.....	108
	Comparación con casos históricos.....	109
5.7	Ejemplo ilustrativo de la ecuación propuesta.....	113
5.8	Resumen y conclusiones	124
6.	RESUMEN, CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	126
6.1	Resumen.....	126
6.2	Conclusiones	127
6.3	Futuras investigaciones	128
	BIBLIOGRAFIA.....	130
	APÉNDICE A LISTA DE REGISTROS DE ACELERACIÓN USADOS PARA ANÁLISIS PARAMÉTRICOS	142

INDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1	Parámetros de calibración y rangos recomendados por Elgamal et al. (2002) ..	69
Tabla 3. 2	Parámetro de calibración de ensayo VELACS M2-2c y LEAP RPI-02	75
Tabla 3. 3	Parámetros utilizados para el sitio Lo Rojas	79
Tabla 3. 4	Parámetros de utilizados para el sitio Matanuska	79
Tabla 3. 5	Comparación de resultados simulados con casos históricos	83
Tabla 4. 1	Terremotos y registros utilizados en el estudio paramétrico numérico.....	87
Tabla 4. 2	Medidas de intensidad consideradas en la investigación	96
Tabla 4. 3	Coefficientes de correlación entre medidas de intensidad y desplazamiento lateral (ordenados de mayor a menor).....	99
Tabla 5. 1	Parámetros considerados en el análisis paramétrico	106
Tabla 5. 2	Valores medidos en casos de ensayos centrífugos	109
Tabla 5. 3	Valores medidos en casos históricos.....	110

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Esquema del fenómeno de licuación y desplazamiento lateral: a) Mecanismo de licuación b) Desplazamiento lateral c) Daño en muro de contención por desplazamiento lateral inducido en licuación (Hamada, 2014)	20
Figura 1. 2 Comparación de valores de desplazamiento lateral medidos en Lo Rojas versus desplazamiento lateral calculado con modelo de Youd <i>et al.</i> , 2002 usando un R de 0.5 km (Williams, 2015).....	21
Figura 1. 3 Limitaciones relacionadas a los modelos existentes: a) Tipo de sismos usados (corticales) en la base de datos de Youd <i>et al.</i> (2002) (Astroza <i>et al.</i> , 2019) b) Histograma de magnitud de sismos usados en la base de datos de Youd.....	22
Figura 2. 1 Desplazamientos laterales observados en el terremoto 2011 Christchurch Mw 7.1 obtenido con correlación de imágenes óptimas (Durante y Rathje, 2021).....	32
Figura 2. 2 Resumen de principales tópicos de desplazamiento lateral inducido por licuación	33
Figura 2. 3. Casos históricos de desplazamiento lateral: a) Grietas longitudinales en el estribo sur del puente Rio Estrella en el terremoto de 1991 Costa Rica 7.5 Mw (Youd, 2003). b) Desplazamiento lateral en el estribo del puente Muzoi durante el terremoto 2005 Nias Island 8.6 Mw (Aydan <i>et al.</i> , 2005) c) Desplazamiento lateral observado en el estribo noreste del puente Mataquito durante el terremoto de 2010 Maule 8.8 Mw (FHWA, 2011) d) Desplazamiento horizontal en el estribo noreste del puente Llacolén en 2010 Maule 8.8 Mw (FHWA, 2011) e) Deformaciones laterales en el Muelle Molo durante el terremoto del 2014 Iquique 8.2 Mw (Franke and Rollins, 2017) f) Desplazamiento lateral en dique oeste del Canal Principal Westside durante el terremoto del 2010 Sierra El Mayor 7.1 Mw (Mccrink <i>et al.</i> , 2011).....	36
Figura 2. 4 Representación del modelo analítico de Byrne (1991) a) Perfil de suelo del modelo de Byrne: representación de costra y capa licuable en perfil inclinado, b) Modelo de un grado de libertad para predicción de desplazamientos laterales de suelos licuables.	37
Figura 2. 5 Representación del modelo de Baziar <i>et al.</i> (1992): a) Perfil de suelo del modelo de Baziar <i>et al.</i> 1992 b) Variación de la forma de la función sinusoidal ay/ap (Baziar <i>et al.</i> 1992).....	40
Figura 2. 6 Correlaciones obtenidas del modelo de Hamada <i>et al.</i> (1987) a) Correlación del desplazamiento lateral acumulado inducido por licuación y el espesor de la capa licuable b) Comparación del desplazamiento acumulado estimado con fórmula de Hamada <i>et al.</i> (1987) y desplazamientos observados	41
Figura 2. 7. Desplazamientos medidos versus desplazamientos estimados con el modelo de Youd <i>et al.</i> 2002	42
Figura 2. 8 . Superficies de fluencias múltiples en el espacio de los esfuerzos principales y plano desviador del modelo constitutivo <i>PDMY02</i> (Elgamal <i>et al.</i> 2002).....	47
Figura 2. 9 . Superficie de fluencia, crítica, dilatancia y límites del modelo constitutivo <i>PM4Sand</i> (Dafalias & Manzari, 2004) en el plano de tensiones r_{yy} - r_{xy}	48
Figura 2. 10 . Superficies de fluencia en el espacio 3D de esfuerzos principales del modelo constitutivo de <i>UBC3D-PLM</i> (Puebla <i>et al.</i> 1997) implementado por Petalas and Vahid (2013) en PLAXIS	49

Figura 2. 11 . Ensayos de centrífugas LEAP-UCD-2017 en NCU: a) Centrífuga geotécnica en CNU b) Contenedor laminar de longitud 767 mm, ancho de 355 mm, alto de 400 mm y peso neto de caja vacía de 106,8 kg Kutter and Manzari (2020).	51
Figura 2. 12 . Ensayos de mesas vibratorias realizados en la Universidad de San Diego para estudiar el desplazamiento lateral a) Mesa vibratoria para estudiar el desplazamiento lateral en pendiente suave b) Vista en planta del ensayo donde se aprecian las distorsiones causadas por el sismo.	51
Figura 2. 13. Distancias desde la fuente sísmica al sitio de interés. Adaptado de Joyner and (Boore 1988)	56
Figura 2. 14. Vista en <i>Google Earth</i> de los sitios donde ocurrió desplazamiento lateral durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw usando el modelo de distribución de deslizamiento co-sísmico de Moreno et al. (2010)	58
Figura 2. 15. Desplazamiento lateral observado versus desplazamiento lateral estimado usando a) Distancia original R de Youd <i>et al.</i> (2002) b) Distancia a la zona de mayor elevación c) Distancia definida por De la Maza <i>et al.</i> (2017).....	58
Figura 3. 1 Esquema ilustrativo del elemento FourNodeQuadUP.....	63
Figura 3. 2. Representación gráfica de múltiples superficies de fluencias en el plano de esfuerzos principales y en el plano de desviadores (Elgamal et al., 2002)	64
Figura 3. 3. Regla de endurecimiento del desviador (Mróz, 1967).....	66
Figura 3. 4 Aparato de centrífuga y contenedor de caja laminar (Boulanger, 2009).....	71
Figura 3. 5 Contenedor de caja laminar de VELACS modelo 2 (Taboada y Dobry, 1998)	72
Figura 3. 6 Input del modelo 2 de VELACS a) Aceleración lateral en la base de la caja laminar de VELACS modelo 2 b) Pseudoaceleración espectral con 5% de amortiguamiento en la base de la caja laminar.....	72
Figura 3. 7 a) Esquema del modelo de centrífuga de LEAP-2017 en unidades del prototipo b) Modelo físico antes de la saturación en <i>Ehime University</i> (Kutter et al., 2020).....	73
Figura 3. 8 <i>Input</i> del prototipo de RPI de LEAP-2017 a) Aceleración lateral en la base de la caja laminar de RPI-02 de LEAP-2017 b) Pseudoaceleración espectral con 5% de amortiguamiento en la base de la caja laminar	74
Figura 3. 9 Comparación de resultados numéricos y experimentales a) exceso de presión de poro b) aceleración horizontal c) desplazamiento horizontal en diferentes profundidades del ensayo M2-2 VELACS	76
Figura 3. 10 Comparación de resultados numéricos y experimentales a) exceso de presión de poro b) aceleración horizontal c) desplazamiento horizontal en diferentes profundidades del ensayo RPI-02 LEAP	77
Figura 3. 11 Registro de Rapel a) Historial de tiempo de aceleración Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW) para la estación Rapel, (b) aceleración espectral (5% de amortiguamiento) de los mismos.....	81
Figura 3. 12 Registro de Anchorage a) Historial de tiempo de aceleración Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW), (b) aceleración espectral (5% de amortiguamiento) de los mismos.....	81
Figura 3. 13 Resultados numéricos de Lo Rojas usando ambas componentes horizontales de Rapel a) Tiempo historia de desplazamiento en superficie b) Tiempo historia de ratio de exceso de presión de poro a 5 m de profundidad c) Tiempo historia de aceleración en la base del modelo.....	82

Figura 3. 14 Resultados numéricos de Matanuska usando ambas componentes horizontales de Anchorage a) Tiempo historia de desplazamiento en superficie b) Tiempo historia de ratio de exceso de presión de poro a 13 m de profundidad c) Tiempo historia de aceleración en la base del modelo.....	83
Figura 4. 1 Perfil de suelo sintético usado en el análisis paramétrico de desplazamiento lateral.....	86
Figura 4. 2 Histograma de medidas de intensidad sísmica de la base de datos usada en esta investigación.....	88
Figura 4. 3 Tiempo historia de ratio de presión de poro y deformaciones de corte para un perfil de suelo de Hcrust=5m, Hliq=5m, Dr=50%, i=0.5% para a) Registro sísmico MOQ001_20010623153300NS de Moquegua 2001 Mw 8.4 b) Registro sísmico T05A_EW_P1_100Hz de Iquique 2014 Mw 8.2.....	91
Figura 4. 4 Tiempo historia de ratio de presión de poro y deformaciones de corte para un perfil de suelo de Hcrust=5m, Hliq=5m, Dr=50%, i=0.5% para a) Registro sísmico CHBH121103111446NS1de Tohoku 2011 Mw 7.9 b) Registro sísmico APAT8509191EW de Michoacán 1985 Mw 8.0.....	92
Figura 4. 5 . Desplazamiento lateral versus parámetros del suelo a) Densidad relativa para un perfil Hcrust=5m, Hliq=5m, i=0.5° , b) Espesor de costra para un perfil Hliq=5m, Dr =70%, i=0.5°,c) Espesor de capa licuable para un perfil Hcrust=5m, Dr =70%, i=0.5° y d) Inclinación del terreno para un perfil Hcrust=5m, Hliq=5m, Dr =70%. *El número indicado en la leyenda hace referencia al número de sismo usado indicado en el anexo 1.....	94
Figura 4. 6 Correlaciones individuales simples entre las medidas de intensidad seleccionadas (IM) y el desplazamiento máximo lateral en superficie (LD).....	98
Figura 5. 1 Desempeño de los modelos de ML: a) LASSO, b) RF y c) FSS.....	104
Figura 5. 2 Importancia relativa de las variables predictoras por método: a) LASSO, b) RF y c) FSS.....	105
Figura 5. 3 Cambio en la precisión de la predicción con el aumento del número de variables (Desarrollo por Liu y Macedo).....	106
Figura 5. 4 Residuales del modelo predictivo versus a) Sa (1s), b) CAV, c) Dr, d) H _{liq} , e) i (Desarrollo por Liu y Macedo).....	108
Figura 5. 5 Validación del nuevo modelo propuesto: comparación del desplazamiento lateral calculado con la nueva ecuación versus resultados de pruebas centrífugas, casos históricos y base de datos de simulaciones numéricas.....	111
Figura 5. 6 Localización, información geotécnica y sísmica de casos históricos utilizados en la nueva ecuación de predicción a) Puente Mataquito b) Puerto Coronel c) Puente Juan Pablo II d) Hospital Curanilahue e) Lebú f) Puente Llacolén.....	112
Figura 5. 7 a) Vista en planta del puente de Mataquito b) Vista en alzado del estribo del puente de Mataquito (Ledezma et al., 2012).....	115
Figura 5. 8 Desplazamiento lateral en puente Mataquito (a) Google Earth® del puente Mataquito y dirección del desplazamiento lateral en el estribo norte (b) Desplazamiento lateral hacia el río, estribo norte del puente (c) Desplazamiento lateral en el extremo norte del puente (Bray y Frost, 2010).....	116
Figura 5. 9 a) Tiempo-historia de aceleración y pseudo-aceleración espectral amortiguado al 5% en la estación Concepción b) Perfil SPT del sondaje SA-2 en el estribo norte del puente Mataquito.....	116

Figura 5. 10 (a) Vista en planta del puente Llacolén (b) Longitudes y ubicación de los sondajes a lo largo del puente Llacolén (Serrano, 2014)	118
Figura 5. 11 Desplazamiento lateral en el puente Llacolén (a) Google Earth® del puente Llacolén y dirección del desplazamiento lateral en el tablero norte y sur (b) Vista al sur del tablero desalojado (c) Vista al norte del tablero desalojado (d) Subestructura del acceso norte (Bray y Frost [64]).....	119
Figura 5. 12 a) Tiempo-historia de aceleración y aceleración espectral amortiguado al 5% en la estación San Pedro de la Paz b) Perfil SPT del sondaje S6 en acceso noreste del Puente Llacolén.....	120
Figura 5. 13 Cabezal de pilotes con pilotes inclinados antes y después del corrimiento lateral en el muelle norte del Puerto de coronel (a) Sección longitudinal (b) Sección transversal (Bray et al., 2010)	122
Figura 5. 14 Desplazamiento lateral en el Puerto de Coronel (a) Ubicación de la línea de medición del desplazamiento lateral en el pilar de soporte en el Puerto de Coronel (b) Rotación del pilar en Puerto de Coronel debido al desplazamiento lateral (c) Desplazamiento lateral reflejado en el pavimento destruido y pared agrietada (Bray et al. 2010)	123
Figura 5. 15 a) Tiempo-historia de aceleración y aceleración espectral amortiguado al 5% de la estación San Pedro de la Paz b) Perfil SPT del sondaje ST-2 en el acceso noreste .	124

ESCUELA DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL INDUCIDO POR LICUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN DE GRAN MAGNITUD

Tesis enviada a la Dirección de Investigación y Postgrado en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería

WILLIAM SEGUNDO ARAUJO NAVARRO

RESUMEN

Dentro de las fallas inducidas por la licuación sísmica de suelos, los daños más significativos son los generados por el desplazamiento lateral del suelo (Youd, 2018). Algunos casos observados en el mundo han sido: Niigata, Japón en 1964 con 8 m de corrimiento lateral a lo largo del río Shinano (Hamada et al., 1987), Maule, Chile en el 2010 con 2.9 m de desplazamiento acumulado medido como la suma de los anchos de grietas en una distancia de 85 m cerca del muelle Lo Rojas (De la Maza et al., 2017), y Edgecumbe, Nueva Zelanda en 1987 con 1.5 m de corrimiento lateral en la orilla interna izquierda (aguas abajo) del río Whakatame hacia el canal del mismo, cerca del puente Landing (Bastin et al., 2020). Este fenómeno puede generar deformaciones significativas y daños en estructuras existentes como carreteras, puentes, muros de contención, tuberías subterráneas, etc. (Javdanian, 2019). Diversos modelos empíricos y numéricos han sido propuestos para la predicción del desplazamiento lateral. No obstante, en la mayoría de los casos, estos modelos fueron desarrollados para sismos de magnitudes menores a 7.5 Mw con mecanismo focal cortical. Recientemente, De la Maza et al., (2017) sugirieron calibrar esas ecuaciones y modelos para sismos de gran

magnitud con la finalidad de obtener una mejor predicción en el caso de sismos de subducción en donde la distancia R entre el sitio en cuestión y la proyección de la fuente sísmica se vuelve demasiado pequeña para aplicarla en los modelos existentes. Una mejor comprensión del fenómeno evitaría dar recomendaciones costosas de medidas de prevención del desplazamiento lateral inducido por licuación (Youd, 2018).

La investigación propuesta tuvo como objetivo principal desarrollar un nuevo modelo que estime la predicción del desplazamiento lateral para condición de campo libre (sin estructuras en o sobre el suelo) usando características sísmicas, geometría y propiedades del suelo no incluidas en modelos anteriores de manera que las predicciones estén en un rango aproximado de 0.5 a 1.5 veces el valor real. Se realizó una investigación dividida en 4 etapas: (1) selección de una metodología numérica; (2) análisis numérico paramétrico para generación de nueva base de datos; (3) análisis estadístico de la nueva base de datos y (4) generación y validación de una nueva relación multivariable.

Como resultado final de esta investigación se determinaron los factores de mayor influencia en la predicción del desplazamiento lateral inducido por licuación para el caso de sismos de subducción de gran magnitud (mayor a M_w 7.5) que en este caso fueron la velocidad absoluta acumulada (CAV), el espectro de pseudoaceleración para el período de 1 s ($S_a(T=1s)$), el espesor de capa licuable (H_{liq}), la densidad relativa de la capa licuable (D_r) y la inclinación del terreno (i). El modelo propuesto en función a los factores de mayor significancia logra una razonable precisión en el cálculo de desplazamiento lateral inducido por licuación para sismos de gran magnitud en comparación con modelos tradicionales.

Palabras Claves: Desplazamiento lateral, sismos de subducción, análisis paramétrico, machine learning

Miembros de la Comisión de Tesis Doctoral

Christian Ledezma Araya
Yolanda Alberto Hernández
Jorge Crempien de la Carrera
Esteban Sáez Robert
Jorge Macedo escudero
Héctor Jorquera Gonzales

Santiago, Marzo de 2023

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA**

**EVALUATION OF LIQUEFACTION-INDUCED LATERAL SPREADING
FOR LARGE SUBDUCTION EARTHQUAKES**

Thesis submitted to the Office of Research and Graduate Studies in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor in Engineering Sciences by

WILLIAM SEGUNDO ARAUJO NAVARRO

ABSTRACT

Lateral spread has been the most damaging consequence of liquefaction (L. Youd, 2018). Some cases observed in the world have been: Niigata, Japan in 1964 with 8 m of lateral movement along the Shinano River (Hamada et al., 1987), Maule, Chile in 2010 with 2.9 m of accumulated displacement measured as the sum of crack widths over a distance of 85 m near Lo Rojas pier (De la Maza et al., 2017), and Edgecumbe, New Zealand in 1987 with 1.5 m of lateral shift on the left inner bank (downstream) from the Whakatame River to the river channel, near the Landing Bridge (Bastin et al., 2020). This phenomenon can generate significant deformations and damage to existing structures such as roads, bridges, retaining walls, underground pipes, etc. (Javdanian, 2019). Various empirical and numerical models have been proposed for the prediction of lateral displacement. However, in most cases, these models were developed for earthquakes with magnitudes less than 7.5 Mw with a cortical focal tectonic setting. Recently, De la Maza et al. (2017) suggested calibrating these equations and models for large earthquakes in order to obtain a better prediction in the case of subduction

earthquakes where the distance R between the site in question and the projection of the seismic source becomes too small, or negligible, to apply it in existing models. A better understanding of the phenomenon would avoid giving costly recommendations for mitigation damages (Youd, 2018).

The proposed research had as main objective to develop a new model that captures the prediction of lateral displacement for free field condition (without structures in or on the ground) using seismic characteristics (intensity characteristics, specific energy density, Housner intensity, acceleration maximum sustained, uniform duration, among others), geometry and properties of the soil (thickness of liquefiable layer with $N < 20$ strokes / foot, content of fines in those liquefiable layers, among others) not included in previous models so that the predictions are in an approximate range of 0.5 to 1.5 times the real value. In this sense, an exhaustive investigation was proposed which was divided into 4 stages: (1) selection of a numerical methodology; (2) parametric numerical analysis for the generation of a new database; (3) statistical analysis of the new database and (4) generation and validation of a new multivariate relationship.

As a final result of this research, it was possible to know the factors with the greatest influence in the prediction of the lateral displacement induced by liquefaction for the case of subduction earthquakes of great magnitude (greater than $M_w 7.5$) such as the accumulative absolute velocity (CAV) and the Arias Intensity (I_a). The proposed model, based on the most significant factors, achieves a reasonable precision in the calculation of lateral displacement induced by liquefaction for large earthquakes in comparison with traditional models.

Key words: Lateral displacement, subduction earthquakes, parametric analysis

Members of the Doctoral Thesis Committee:

Christian Ledezma Araya

Yolanda Alberto Hernández

Jorge Crempien de la Carrera

Esteban Sáez Robert

Jorge Macedo escudero

Héctor Jorquera Gonzales

Santiago, March 2023

1. INTRODUCCIÓN

La licuación es un fenómeno que ocurre típicamente en arenas sueltas y saturadas, que, al ser excitadas por un sismo, cambian su comportamiento de sólido a visco-líquido. El sismo induce deformaciones cíclicas de corte que generan contracción de la matriz de granos sólidos y aumentos en la presión de poros (Figura 1. 1a). En consecuencia, disminuye el esfuerzo efectivo hasta ser nulo y disminuye drásticamente su resistencia y rigidez (Youd, 2018). Las deformaciones inducidas generan daños en estructuras y pérdidas de vidas. Existen dos categorías de deformaciones: horizontales y verticales. De éstas, el desplazamiento lateral es el más peligroso (Youd, 2018). Cuando un suelo licúa, la capa no licuable que se apoya sobre éste tiende a fracturarse en grandes bloques que se desplazan horizontalmente por la pendiente del terreno (Figura 1. 1b). Se presenta, por ejemplo, en zonas costeras ocasionando destrucción de puertos, pavimentos, y muros de contención (Figura 1. 1c).

Hamada (2014) describe tres hipótesis explicando el fenómeno. La primera es debido a grandes caídas de la rigidez del suelo que se desplaza debido a la gravedad. La segunda hipótesis es que los grandes desplazamientos son causados por el compartimiento líquido del suelo. Finalmente, la tercera hipótesis es que el suelo se desliza sobre una película de agua que se forma entre el límite de la capa de suelo permeable e impermeable. La mayoría de los métodos de evaluación del desplazamiento lateral son basados en la primera hipótesis.

Se han formulados numerosos modelos (analíticos, empíricos y numéricos) para estudiar la licuación y predecir desplazamientos laterales en sismos. Los modelos analíticos incluyen aspectos del mecanismo del desplazamiento lateral, mientras que los empíricos son ajustes directos de observaciones históricas. Los numéricos están basados en cálculos numéricos validados con modelación física del desplazamiento lateral inducido por licuación. La finalidad ha sido recomendar diseños sísmicos seguros en fundaciones (Javdanian, 2019). En el capítulo 2 se muestra una revisión de literatura de estos modelos desde Hamada *et al.*, (1987) hasta Pirhadi *et al.*, (2019).

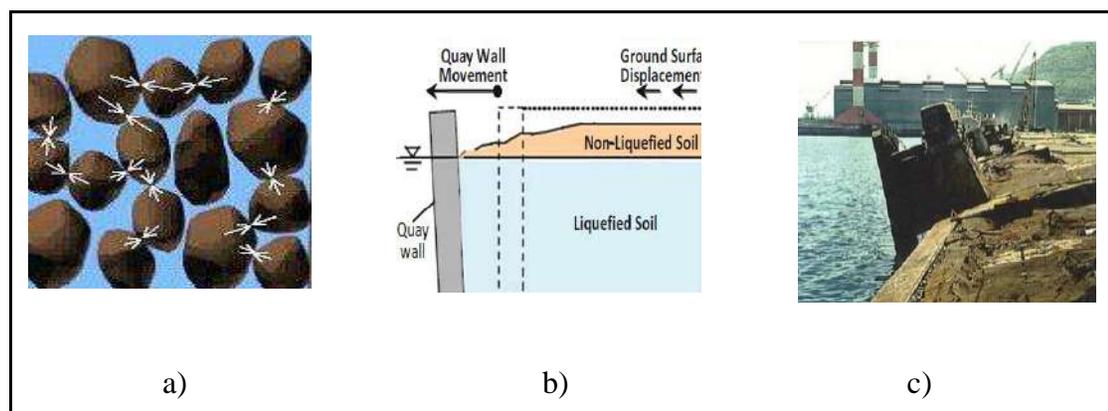


Figura 1. 1 Esquema del fenómeno de licuación y desplazamiento lateral: a) Mecanismo de licuación b) Desplazamiento lateral c) Daño en muro de contención por desplazamiento lateral inducido en licuación (Hamada, 2014)

1.1 Problema de Investigación

Actualmente, no existe modelo predictivo validado del desplazamiento lateral específico para sismos de subducción. El principal problema es que el uso de los modelos existentes entrega resultados sobreestimados (muy conservadores) debido a la dificultad de definir una distancia R apropiada del sitio a la fuente sísmica para casos de subducción, ya sea una epicentral, Joyner-Boore, hipocentral, de ruptura o a la zona de mayor esfuerzo en el plano de falla que pueda entregar resultados dentro de un rango aceptable en geotecnia (Tryon, 2014, Williams, 2015, De la Maza *et al.*, 2017, Little *et al.*, 2019).

La Figura 1. 2 muestra una comparación realizada para Williams (2015) entre valores medidos en terreno para el caso de Lo Rojas de Maule 2010 Mw 8.8 con valores calculados con la ecuación de Youd *et al.* (2002). Se puede apreciar que los valores de predicción de ese modelo son totalmente irreales para el caso analizado. Esto se explica debido a la extrapolación del uso para el cual fue ajustado el modelo: sismos corticales y de magnitudes menores a 8 Mw (Figura 1. 3). De la Maza *et al.*, (2017) sugirieron calibrar modelos para casos de subducción y proponen usar R como la distancia a la proyección de la fuente a la zona más áspera (donde se encuentra el 50% de la energía liberada proyectada en la superficie durante el evento). Esta propuesta se evalúa en el capítulo 2, apartado 2.6.

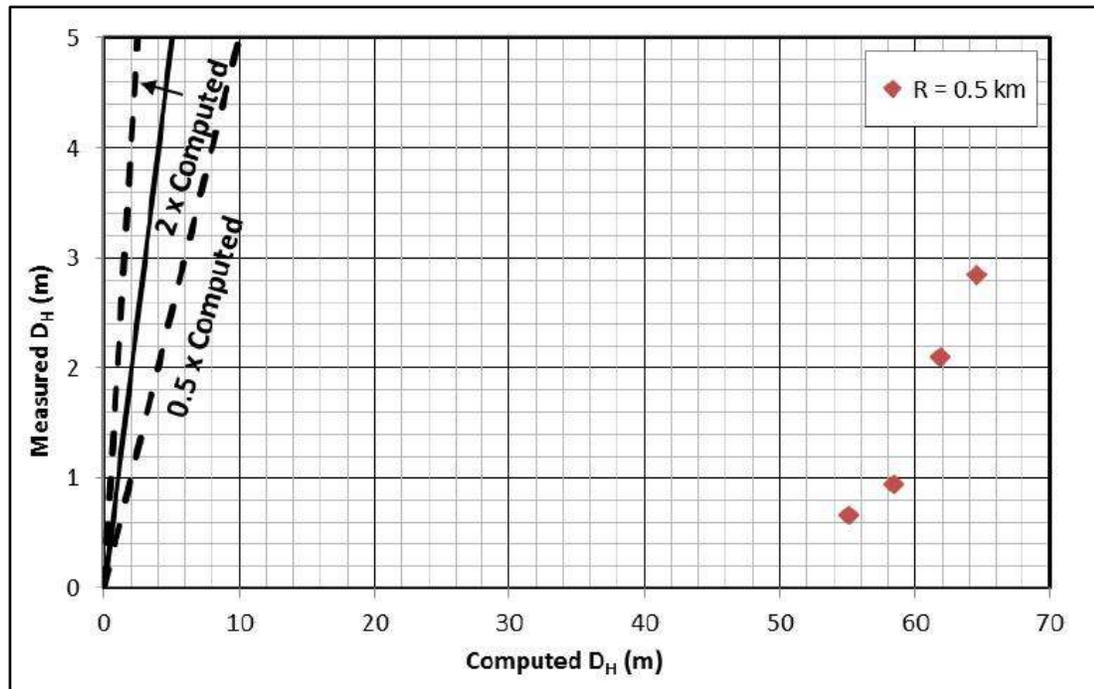


Figura 1. 2 Comparación de valores de desplazamiento lateral medidos en Lo Rojas versus desplazamiento lateral calculado con modelo de Youd *et al.*, 2002 usando un R de 0.5 km (Williams, 2015)

En relación con lo anterior, otro problema es la carencia de registros históricos de estos terremotos para la generación de un modelo empírico robusto basado en el ajuste directo a eventos reales. Frente a este problema, la solución brindada por algunos autores (Travasarou (2003), Valsamis *et al.* (2010), Ghasemi-Fare y Pak (2016), Macedo (2017), Dashti *et al.* (2018), Rajeswari and Sarkar (2021), Sadeghi *et al.* (2021)) en otros temas de investigación ha sido la generación de una base de datos simulada con modelación del fenómeno para lograr un ajuste de un modelo que sea de uso práctico en ingeniería. En esta investigación, se propone una modelación paramétrica numérica del desplazamiento lateral inducido por licuación en casos de terremotos de subducción de gran magnitud en condición de campo libre para generar una nueva ecuación o modelo que incluya variables sísmicas y de suelo no evaluadas anteriormente. Las variables estudiadas se muestran en la hipótesis. La introducción de estas nuevas variables radica principalmente en medidas de intensidad sísmica predecibles con leyes de atenuación existentes.

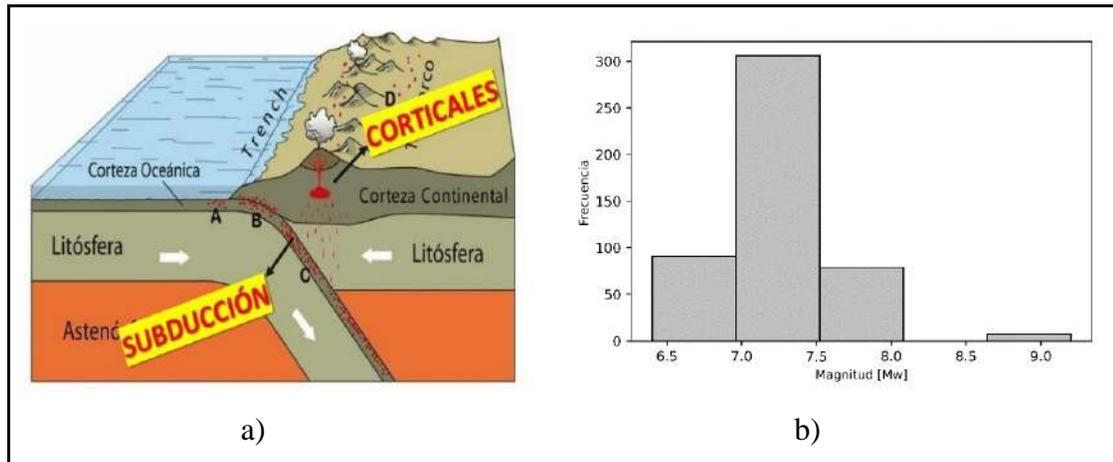


Figura 1. 3 Limitaciones relacionadas a los modelos existentes: a) Tipo de sismos usados (corticales) en la base de datos de Youd et al. (2002) (Astroza et al., 2019) b) Histograma de magnitud de sismos usados en la base de datos de Youd.

1.2 Objetivos

Objetivo General

El objetivo general de esta investigación fue identificar variables predictoras del desplazamiento lateral para sismos de subducción interplaca de magnitud mayor a 7.5 M_w y generar una nueva ecuación de predicción validada con casos de centrífuga y casos históricos.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo fueron:

- Validar una metodología numérica tomando en cuenta características de simplicidad en modelación del suelo para generar una base de datos simulada de desplazamiento lateral para sismos de subducción mayor a 7.5 M_w mediante modelación paramétrica para rangos de variables definidos.
- Analizar estadísticamente una amplia familia de variables predictoras de desplazamiento lateral en sismos de subducción de gran magnitud (mayor a 7.5

Mw.) para seleccionar las más relevantes y proponer una nueva ecuación de predicción validada.

1.3 Hipótesis

La incorporación de características sísmicas (e.g, densidad de energía específica, intensidad de Housner, aceleración máxima sostenida, duración uniforme, aceleración efectiva de diseño, entre otras), geometría y propiedades del suelo (espesor de capa licuable, densidad relativa de la capa licuable, pendiente del terreno, entre otras) no incluidas en modelos anteriores mejorarán la predicción del desplazamiento lateral para casos de subducción, de manera que las predicciones estén en un rango aproximado de 0.5 a 1.5 veces el valor real.

1.4 Metodología

Esta investigación se realizó en cuatro etapas cada una ligada a objetivos específicos. Como se mencionó anteriormente, esta metodología, con ciertas variaciones, ha sido usada y validada en investigaciones anteriores por Travasariou (2003), Valsamis *et al.* (2010), Ghasemi-Fare y Pak (2016), Macedo (2017) y Dashti *et al.* (2018), Rajeswari and Sarkar (2021) y Sadeghi *et al.* (2021).

Etapas I. Selección de una metodología numérica del desplazamiento lateral

En esta etapa se realizaron dos actividades: 1) Recopilación de una base de datos de ensayos centrífugos, casos históricos de desplazamiento lateral en subducción interplaca mayor a 7.5 Mw y registros sísmicos cercanos al lugar de ocurrencia de estos eventos. Los datos de ensayos centrífugos fueron recopilados del proyecto VELACS (Arulanandan y Scott (1993), Taboada y Dobry (1998)) y LEAP (Kutter *et al.* (2018), Ziotopoulou (2018)). Los casos históricos fueron recopilados de tesis (Gonzalez (2014), Connor (2014) y Serrano (2014)) y artículos científicos (De la Maza *et al.* (2017), Bray *et al.* (2012) y Ledezma *et al.* (2012)) encontrados en la literatura. Para el caso de los datos sísmicos se usaron base de datos de Kit-NET (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/>),

CISMID (<http://www.cismid.uni.edu.pe/>), SIBERRISK (<https://www.siberrisk.cl/>), UNAM (<https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Registro.aspx>). Se filtraron los registros sísmicos para magnitudes mayores a 7.5 Mw, distancias a la fuente sísmica (R) menor a 100 km, ubicados en sitios geotécnicos en roca, con frecuencias entre 0.25 a 40 Hz. 2) Validación de la herramienta numérica en OpenSees (McKenna, 2011) mediante simulación numérica de casos de centrífuga e históricos. Las estrategias de calibración fueron en función a ensayos disponibles y correlaciones usando los parámetros sugeridos por Elgamal *et al.* (2002).

Etapa II. Modelación numérica paramétrica de desplazamiento lateral.

En esta etapa también se realizaron dos actividades: 1) Selección de los rangos de parámetros en la modelación numérica y definición de la cantidad de análisis paramétricos por realizar. Se evaluó la intercalación de capas licuable y no licuable. Los parámetros para variar fueron: *geometría y propiedades del suelo* (espesor de capa licuable, espesor de capa no licuable, inclinación, densidad relativa del suelo) y *carga sísmica* (cada sismo tuvo diferentes medidas de intensidad (IM)). Los rangos de parámetros para modelar se muestran en el capítulo 5. 2) Generación de una base de datos simulados de desplazamiento lateral mediante los perfiles de suelo definidos en los rangos de la actividad anterior y sismos de subducción de la etapa I. Se realizaron un total de 7344 modelaciones automatizadas *OpenSees*.

Etapa III. Análisis estadístico de los datos de la modelación paramétrica.

En esta etapa se realizaron 3 actividades: 1) Análisis de relación entre variables predictoras y desplazamiento lateral. Evaluación de correlación de cada variable con el desplazamiento lateral con el Coeficiente de Pearson (ρ), Coeficiente de Correlación (R) y Coeficiente de Spearman (r_s). Se determinó si la relación era lineal o no lineal y si las tendencias fueron crecientes o decrecientes. En esta actividad se tuvieron en consideración los umbrales de desplazamiento lateral moderados o significativos para diseño. Se despreciaron los pequeños (<30cm) y grandes desplazamientos (>1m) según

la clasificación de Durante and Rathje (2021) y Cubrinovski and Robinson (2016) 2) Selección de métodos de regresión. Se escogieron 3 métodos de *Machine Learning* (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (LASSO), regresión *Random Forest* (RF) y regresión *Forward Selection* (FS)) para encontrar las variables óptimas predictoras. Estos métodos entregaron una forma funcional del modelo. 3) Evaluación de la nueva ecuación de predicción: precisión, predictibilidad y sentido físico.

Etapa IV. Validación de la nueva ecuación propuesta.

En esta etapa también se realizaron 3 actividades: 1) Selección de casos de centrífuga e históricos para introducir datos en la nueva ecuación. Se tomó una base de datos de casos históricos de desplazamiento lateral ocasionados en sismos de subducción para ser usados en la nueva ecuación propuesta. 2) Evaluación de la ecuación de predicción mediante medidores de sesgo de la nueva ecuación: Coeficiente de Correlación (CC), Error Principal Absoluto (MAE) y Raíz Cuadrada del Error Principal (RMSE), así como su comparación con el modelo de mayor uso en ingeniería práctica: Youd *et al.* (2002). 3) Recomendación de uso de la nueva ecuación mediante ejemplo ilustrativo evaluando casos históricos.

1.5 Contenido

El enfoque de esta tesis estuvo dirigido en determinar una ecuación de predicción del desplazamiento lateral para sismos de subducción de gran magnitud. Para este estudio se validó una metodología numérica de elementos finitos, la cual fue usada para el análisis paramétrico numérico en la generación de la nueva base de datos de la cual se realizó un análisis estadístico para obtener la nueva ecuación de predicción.

La organización de la tesis se realizó en los capítulos del 2 al 6 donde se plasman la validación numérica, modelaciones paramétricas y análisis estadístico de los datos simulados. A continuación, se describe cada uno de los capítulos de la tesis.

Capítulo 2- Estado del arte. En este capítulo se presenta una revisión exhaustiva del concepto de desplazamiento lateral, sus diferentes modelos de evaluación y de predicción y el uso de estos en casos de terremotos de subducción de gran magnitud validando la necesidad de un nuevo modelo de predicción de uso en la ingeniería geotécnica práctica con una razonable precisión entre el valor de predicción y el valor esperado en campo.

Capítulo 3- Metodología numérica. En este capítulo se explica el programa de uso libre OpenSees utilizado para modelación en elementos finitos, el modelo constitutivo de múltiples superficies de fluencia usado para suelos licuables y sus parámetros calibrados. Se valida la metodología numérica con experimentos centrífugos y casos históricos recopilados de la literatura para ser usado en el siguiente capítulo de la investigación.

Capítulo 4- Análisis paramétrico numérico. En este capítulo se muestran los diferentes perfiles de suelo sintéticos y registros sísmicos a utilizar para la generación de la nueva base de casos de desplazamiento lateral en terremotos de subducción de gran magnitud. La selección de los rangos de variación de los parámetros se realiza de acuerdo con los casos documentados en campo de casos históricos.

Capítulo 5- Análisis estadístico. En este capítulo se utilizan diferentes índices de medidas de correlación para analizar la relación entre el máximo desplazamiento lateral medido en superficie y las variables usadas en el análisis paramétrico (de suelo y sismo). Métodos de regresión de *Machine Learning* (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (LASSO), regresión *Random Forest* (RF) y regresión *Forward Selection* (FS)) fueron usados para generar el nuevo modelo de predicción. La validación de éste se realizó con casos de centrífuga e históricos no considerados en la base de datos inicial. Un ejemplo ilustrativo del uso de la nueva ecuación es mostrado.

Capítulo 6- Resumen, conclusiones e investigaciones futuras: En este capítulo se hace un resumen general, se repasan las principales conclusiones encontradas en el proyecto de

investigación doctoral y se dan recomendaciones para investigaciones futuras. Se verifica el cumplimiento de la hipótesis de la investigación doctoral en función a los resultados finales.

1.6 Alcance

La modelación numérica fue unidimensional evaluada en casos de desplazamiento lateral en campo libre para sismos de subducción interplaca entre 7.5 a 9 Mw. Los rangos de variación de cada parámetro se encuentran especificados en la metodología. El desarrollo del modelo de predicción se hizo en un ambiente determinístico, dejando para futuros estudios la evaluación de la base de datos generada para un ambiente probabilístico. Los parámetros calibrados de estudio pertenecen a arenas sin contenido de finos debido a que en la literatura solo se han realizado ensayos en arenas finas. Efectos 2D y 3D son omitidos, así como la distribución espacial del desplazamiento lateral inducido por licuación para terremotos de subducción de gran magnitud.

1.7 Pasantía de Investigación

Como parte del programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica de Chile, exige como requisito la realización de una pasantía de investigación en una universidad de prestigio del mundo que aporte al desarrollo de la tesis doctoral.

En el contexto de la pandemia, ésta se realizó de forma virtual en tutoría del profesor Jorge Macedo de *Georgia Institute of Technology*. Esta pasantía ayudó a cumplir con el Objetivo Específico 2 de esta tesis (etapa III y etapa IV). Los resultados de esta estancia de investigación se muestran en el capítulo 6 y en el artículo 2 enviado a revista indexada.

1.8 Lista de Publicaciones

Como resultado de la presente tesis, se planificaron las siguientes publicaciones en revistas indexadas *Web Of Science* (WOS) y en conferencias especializadas como parte de los requisitos de egreso del programa de doctorado:

Artículos en revista

- Araujo, W. and Ledezma, C. *Factors That Affect Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Large Subduction Earthquakes*. Appl. Sci. 2020, 10, 6503. (Publicado - Septiembre 2020).
- Araujo, W., Ledezma C. Macedo, J. and Liu, C., *On the prediction of liquefaction- induced lateral spreading for large-magnitude subduction earthquakes*. Soil Dyn. Earthq. Eng. 2022, 10, 6503. (En levantamiento de observaciones).

Artículos en conferencias

- Ledezma C. and Araujo W. (2020). Liquefaction induced lateral spreading for large magnitude subduction earthquakes in areas with short source to site distances, 2nd Kenji Ishihara Colloquium Series on Earthquake Geotechnical Engineering, San Diego California, United States, August 20-23, 2019.
- Araujo W. and Ledezma C. (2020). Liquefaction- induced lateral spreading for large-magnitude subduction earthquakes. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September 13-18, 2020.

1.9 Descargo de Responsabilidad

La tesis fue realizada para cumplir con uno de los requisitos para alcanzar el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Las opiniones y conclusiones que se presentan en

esta tesis son las del autor y no reflejan necesariamente las de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, previo a direccionar la investigación al objetivo específico 1, se realiza una breve recopilación del estado del arte o revisión bibliográfica de los modelos predictivos del desplazamiento lateral desarrollados hasta la actualidad. Se muestra un resumen de los métodos analíticos, empíricos, numéricos y físicos de diferentes autores. Este capítulo también presenta información detallada de normativas internacionales que incluyen el cálculo del desplazamiento lateral inducido por licuación. Finalmente, se realiza una evaluación de nuevos casos históricos recopilados de desplazamiento lateral ocurridos en sismos de subducción en los modelos de mayor uso en ingeniería práctica.

2.1 Introducción

La importancia del estudio de este fenómeno de desplazamiento lateral radica en la necesidad de anticiparse a éste para así realizar diseños de estructuras geotécnicas que lo resistan, evitando pérdidas económicas materiales o humanas (Valsamis et al., 2010, Javdanian, 2019). En países como Chile, Perú, México, Japón y otros localizados en zonas altamente sísmicas es necesario la existencia de un modelo robusto de predicción para anticiparse a los potenciales daños ocasionados por este fenómeno.

Para estudiar esta consecuencia de la licuación de suelos, muchos métodos de evaluación se han propuesto, los que se pueden clasificar en analíticos, empíricos y numéricos. Estos últimos siempre acompañados de modelos físicos para su validación. En este capítulo cada uno de estos métodos es estudiado en detalle. Así mismo, este estudio del estado del arte nos ayudará a identificar aquellos parámetros que afectan el desplazamiento lateral identificados por diferentes autores de la literatura. Una breve descripción de esas investigaciones se muestra en la sección 2.4.

2.2 Mecanismo de Desplazamiento Lateral

Durante más de 50 años, desde el extenso daño inducido por licuación durante el terremoto de 1964 Niigata Mw 7.6, la predicción del fenómeno de licuación y sus consecuencias más significativas como el desplazamiento lateral ha sido esencial para la evaluación de riesgos en la infraestructura civil. Cubrinovski et al., (2012) define el desplazamiento lateral inducido por licuación como un fenómeno que ocurre cuando las cargas cíclicas actúan en la masa de suelo durante un evento sísmico, el cuál naturalmente se moverá en dirección de la pendiente del terreno hasta alcanzar el equilibrio. El desplazamiento lateral ocurre típicamente en áreas a lo largo de vías fluviales como ríos, arroyos, zonas costeras, etc. Las grandes distorsiones en el suelo, grietas y fisuras son signos de este fenómeno. Los máximos desplazamientos observados se encuentran en el rango de decenas de centímetros hasta 2 o 3 m o más.

Hay dos tipos de investigaciones del desplazamiento lateral: mediciones locales e inspecciones globales aéreas. Dentro de las mediciones locales se encuentran las inspecciones de campo y levantamientos de terreno. Por otro lado, las inspecciones globales aéreas involucran LiDAR, topografía espacial e imagen satelital. Las inspecciones de campo son las más comunes formas de medición, éstas se basan en técnicas simples de topografía donde se identifican los anchos de grietas. Finalmente, el desplazamiento lateral es calculado mediante la superposición de estos anchos a lo largo de un transecto orientado de manera perpendicular a la vía fluvial donde ocurrió el fenómeno.

En cuanto a la magnitud del desplazamiento lateral, Cubrinovski & Robinson (2016) de acuerdo a la experiencia de los desplazamientos laterales observados en Avon River durante el sismo de 2010-2011 Darfield Mw 7.1 los clasificaron en: a) desplazamientos grandes: igual o mayores a 1m, b) desplazamiento moderados: de máximo 0.50 m y c) desplazamientos pequeños: menores a 0.30 m incluyendo no desplazamientos. Por otro lado, Durante and Rathje (2021) consideraron la ocurrencia y no ocurrencia de desplazamiento lateral inducido por licuación configurado para valores de 0.3 m (<0.30

m fueron considerados como no ocurrencia de desplazamiento lateral, mientras que valores >0.30 m fueron considerados como sí ocurrencia), mediante un modelo de *machine learning*, clasificaron 7300 casos de desplazamiento lateral medidos en el sismo de 2011 Christchurch Mw 7.1. La Figura 2. 1 muestra los desplazamientos laterales observados durante 2011 Christchurch Mw 7.1 obtenido con correlación de imágenes óptimas de Durante y Rathje (2021).

Hay muchos factores que generan el desplazamiento lateral. Estos parámetros o factores analizados por modelos tradicionales han sido: sísmicos como magnitud momento, distancia horizontal del sitio a la fuente sísmica; topográficos o geométricos como pendiente del terreno y razón de cara libre; geotécnicos como el grosor de la capa la capa licuable, contenido de finos, tamaño de grano en esa capa crítica, profundidad desde la superficie a la capa licuable y de resistencia como resistencia al corte no drenada post-licuación. La Figura 2. 2 muestra un resumen de los principales tópicos del desplazamiento lateral inducido por licuación.

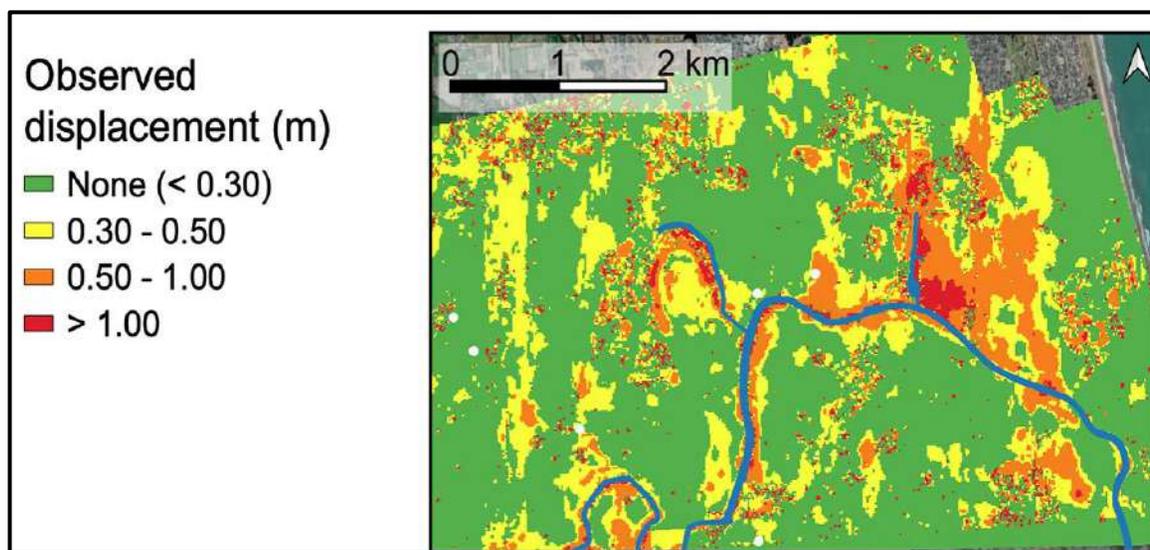


Figura 2. 1 Desplazamientos laterales observados en el terremoto 2011 Christchurch Mw 7.1 obtenido con correlación de imágenes óptimas (Durante y Rathje, 2021)

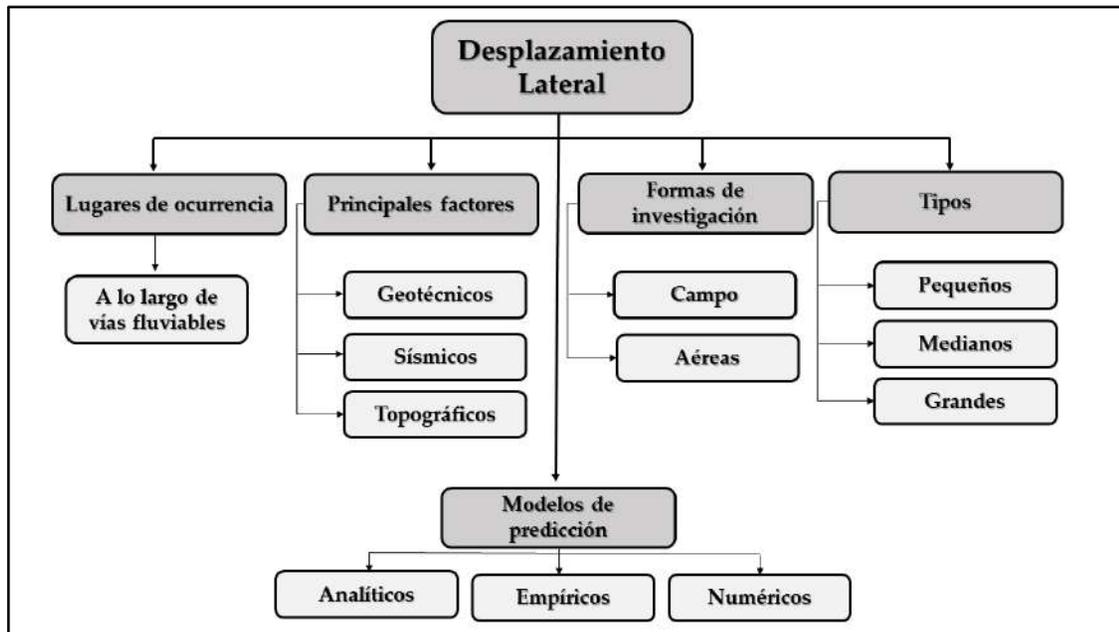


Figura 2. 2 Resumen de principales tópicos de desplazamiento lateral inducido por licuación

2.3 Casos Históricos de Desplazamiento Lateral

En la siguiente sección se muestran algunos ejemplos de casos representativos de desplazamiento lateral inducido por licuación recopilados de la literatura y de motivación en esta investigación (ver Figura 2. 3).

La Figura 2. 3a muestra el desplazamiento lateral ocurrido en el estribo sur del puente Rio Estrella durante el terremoto del 1991 Costa Rica 7.5 Mw. El desplazamiento observado fue de 2 m (Youd, 2003). El puente (9.7876° N, 82.9134° W) está ubicado al norte de Penhurst en la Ruta Nacional 36 y es el más al sur cruce de río entre Limón y Bribri. Todas las actividades de investigación del subsuelo para su caracterización geotécnica se centraron en el estribo este. Los suelos encontrados durante esa investigación generalmente consistieron en depósitos aluviales compuestos de limos de alta plasticidad sustentados por grava limpia y arenas limosas (Franke and Rollins, 2017). Ocurrieron fallas localizadas de hasta 3 m de asentamiento vertical en los terraplenes del puente. Adicionalmente se informaron asentamientos inducidos por licuefacción en campo libre de hasta 1.5 m en los suelos que rodean el terraplén de aproximación.

La Figura 2. 3b muestra el desplazamiento lateral ocurrido en el puente Muzoi durante el terremoto del 2005 Nias Island 8.6 Mw. Se midió un movimiento lateral de más de 4 m en dirección hacia el río en ambos lados del puente (Aydan et al., 2005). La investigación del sitio indicó que hay una capa similar a lutita y las capas de suelo superpuestas consisten en arena, grava y limo arenoso de abajo hacia arriba. Estas capas están inclinadas hacia el lado aguas arriba con una inclinación de 5 a 10 grados. Los pilares del puente Muzoi se inclinaron y asentaron debido a la capacidad de carga y los problemas de corrimiento lateral asociados con la licuación del suelo. Los ingenieros del Departamento de Obras Públicas señalaron que los pilares tienen pilotes que llegan a formaciones rocosas. Parece que los pilotes se diseñaron contra cargas verticales y no se consideraron las cargas horizontales. El suelo se desplazó lateralmente hacia el río, lo que se infirió claramente debido a los postes eléctricos inclinados junto al puente.

La Figura 2. 3c muestra el desplazamiento lateral ocurrido cerca del estribo noreste del puente Mataquito durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw (Bray y Frost 2010). El corrimiento lateral desde el borde del muro del contrafuerte a la primera fila de pilares era de aproximadamente 54 cm y el corrimiento lateral total desde el borde del muro de apoyo a la orilla del río fue de unos 180 cm (en una distancia de unos 65 m). Según la información geotécnica disponible, el perfil geotécnico del estribo sur consiste en 5 m de material licuable encima de uno no licuable de 15 m. Cada estribo de este puente estaba sostenido por dos filas de cuatro pozos perforados de sección circular. El estribo norte mostró daños insignificantes, y dado que los daños más notables se produjeron cerca del estribo sur. Dado que las pilotes tenían una longitud de aproximadamente 17 m, aproximadamente dos tercios de la longitud de los pilotes estaban bien empotrados. Esto probablemente proporcionó suficiente soporte vertical y lateral para que los pilotes resistieran la vertical y cargas laterales, a pesar de la ocurrencia de licuefacción a poca profundidad.

La Figura 2. 3d muestra el desplazamiento lateral ocurrido en la orilla oriental del río Bio Bio, en el estribo noreste del puente Llacolén se informó que ocurrió un desplazamiento lateral entre 8 a 23 cm en dirección hacia el río durante el terremoto del 2010 Maule 8.8

Mw (Olsen et al., 2012). Según Gonzalez (2014) el estribo norte del puente tiene la siguiente estratigrafía: un relleno de 3.8 m por encima de una secuencia de estratos licuables y no licuables aproximadamente: 2 m, 4 m, 3 m, 3.5 y 7.5 m.

La Figura 2. 3e muestra el desplazamiento medido entre 0.5 a 2 m observados en el Muelle Molo durante el terremoto del 2014 Iquique 8.2 Mw (Franke and Rollins , 2017). El muelle consta de grandes muros de bloques de hormigón, aproximadamente de 14 m de altura colocado sobre montículos de grava y cantos rodados, y con relleno de suelos de grano grueso con poco o ningún esfuerzo de compactación. También se registraron asentamientos posteriores a la licuefacción medidos detrás del muro del muelle entre 0,8 y 1.1 m. Es importante mencionar que la deformación lateral no estuvo controlada por la licuación, sino más bien por el giro del muro producto de la compactación dinámica del relleno granular del relleno granular grueso en el fondo marino.

Finalmente, en la Figura 2. 3f se muestra el desplazamiento medido en el dique oeste del Canal Principal Westside durante el terremoto del 2010 Sierra El Mayor 7.1 Mw, donde un desplazamiento horizontal acumulado fue de más de 1 m fue observado (McCrink et al. , 2011). El perfil del suelo se caracteriza por arena, arena limosa y limo arenoso al suroeste del dique, principalmente a lo largo de una fisura con tendencia al sur.

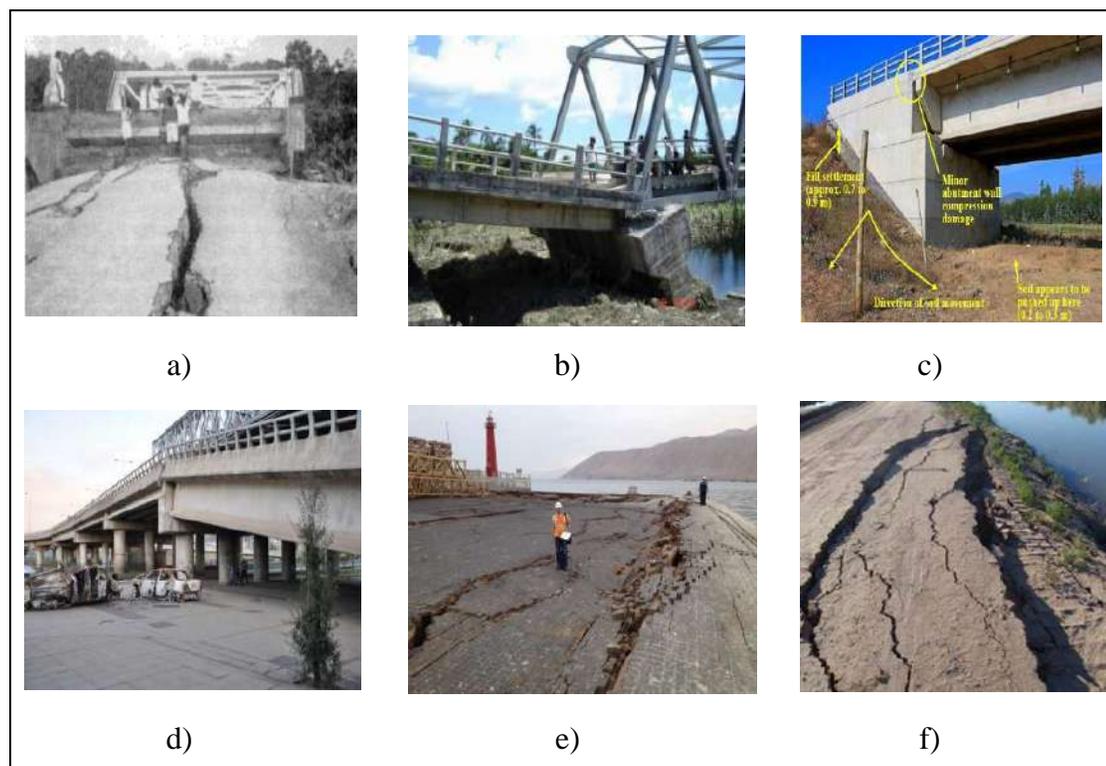


Figura 2. 3. Casos históricos de desplazamiento lateral: a) Grietas longitudinales en el estribo sur del puente Rio Estrella en el terremoto de 1991 Costa Rica 7.5 Mw (Youd, 2003). b) Desplazamiento lateral en el estribo del puente Muzoi durante el terremoto 2005 Nias Island 8.6 Mw (Aydan et al., 2005) c) Desplazamiento lateral observado en el estribo noreste del puente Mataquito durante el terremoto de 2010 Maule 8.8 Mw (FHWA, 2011) d) Desplazamiento horizontal en el estribo noreste del puente Llacolén en 2010 Maule 8.8 Mw (FHWA, 2011) e) Deformaciones laterales en el Muelle Molo durante el terremoto del 2014 Iquique 8.2 Mw (Franke and Rollins, 2017) f) Desplazamiento lateral en dique oeste del Canal Principal Westside durante el terremoto del 2010 Sierra El Mayor 7.1 Mw (McCrink et al., 2011)

2.4 Modelos de Evaluación

En esta sección, una descripción concisa de cada modelo de evaluación del desplazamiento lateral inducido por licuación es mostrada. Tres formas o modelos han sido utilizados principalmente por diferentes investigadores: modelos analíticos, empíricos y numéricos. Cabe mencionar que otras clasificaciones consideran: modelos semiempíricos, físicos y paramétricos.

Modelos analíticos

Algunos investigadores han propuesto versiones modificadas del modelo de Newmark (Newmark, 1965) para estimar el desplazamiento lateral de un bloque de suelo superficial sobre suelo licuable. Por ejemplo, el modelo analítico de Byrne (1991), consiste en un modelo de un sistema de un grado de libertad que simula una columna de suelo con dos estratos inclinados (no licuable y licuable), incorporando el concepto de resistencia al corte residual y un resorte no lineal para representar la rigidez de la capa licuable (Figura 2.4). Según Youd (2003) este método analítico fue ampliamente utilizado en importantes proyectos para estimar desplazamientos del suelo en casos de licuación sísmica.

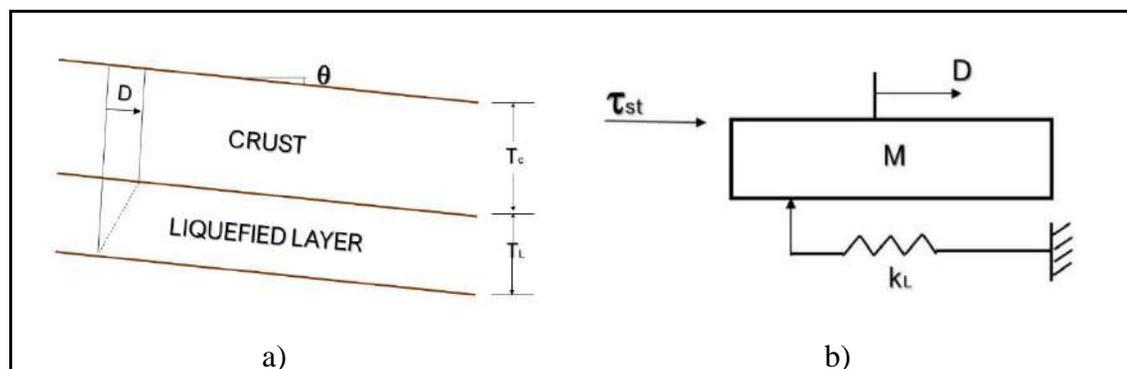


Figura 2.4 Representación del modelo analítico de Byrne (1991) a) Perfil de suelo del modelo de Byrne: representación de costra y capa licuable en perfil inclinado, b) Modelo de un grado de libertad para predicción de desplazamientos laterales de suelos licuables.

La ecuación desplazamiento del modelo analítico de Byrne (1991) es la siguiente (Ec. 2.1):

$$D = D_{st} + D_{dy} \quad (2.1)$$

donde:

$$D_{st} = \frac{\tau_{st}}{K_L} \quad (2.2)$$

$$D_{dy} = \left(\frac{M}{K_L} V_0^2 + D_{st}^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \text{ cuando } D_{dy} < (D_{lim} - D_{st}) \quad (2.3)$$

$$D_{dy} = \frac{1}{2} \left[D_{lim} - D_{st} + \frac{D_{st}^2 + \frac{M V_0^2}{K_L}}{D_{lim} - D_{st}} \right]; \text{ cuando } D_{dy} > (D_{lim} - D_{st}) \quad (2.4)$$

$$D_{lim} = \gamma_{lim} T_L \quad (2.5)$$

siendo:

D : desplazamiento total de la capa de suelo no licuable sobre la capa de suelo licuable [m]

D_{st} : desplazamiento de la capa de suelo no licuable debido al esfuerzo de corte estático aplicado en la capa licuable [m]

D_{dy} : desplazamiento permanente de la capa de suelo no licuable [m]

D_{lim} : desplazamiento máximo en la zona elástica [m]

γ_{lim} : la deformación angular máxima

T_L : espesor de la capa licuable [m]

τ_{st} : esfuerzo de corte inducido en la capa no licuable [kPa]

K_L : rigidez del resorte que representa a la capa de suelo licuable [kN/m]

M : masa del modelo que representa la capa no licuable [kg]

V_0 : velocidad inicial del suelo [m/s²]

Así mismo, otro caso de modificación del modelo de Newmark fue el modelo de Baziar *et al.* (1992) quienes para la predicción del desplazamiento lateral incorporaron relaciones de atenuación para el cálculo de aceleración y velocidad en superficie para su modelo. Los autores mencionan que experimentos de laboratorio (triaxiales cíclicos) validaron las condiciones del suelo bajo el modelo de Newmark y condujeron a una buena estimación del desplazamiento lateral inducido en licuación (Figura 2. 5).

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$d = N \cdot \frac{v_{max}^2}{a_{max}} \cdot f\left(\frac{a_y}{a_{max}}\right) \quad (2.6)$$

donde:

d : desplazamiento lateral [m]

N : número de ciclos equivalentes para generar licuación ($N=2$, recomendado)

a_{max} : aceleración máxima en superficie [m/s^2]

V_{max} : velocidad máxima en superficie [m/s]

$f\left(\frac{a_y}{a_{max}}\right)$: valor de la función obtenida de la correlación de a_{max} con la proporción de a_y/a_p

donde:

a_y : aceleración de fluencia [m/s^2]

a_p : aceleración máxima de sismo sinusoidal [m/s^2]

Las leyes de atenuación usadas fueron las de Joyner and Boore (1988)

$$\log a_{max} = 0.49 + 0.23(M_w - 6) - \log r - 0.0027r \quad (2.7)$$

$$\log v_{max} = 2.17 + 0.23(M_w - 6) - \log r - 0.0026r + 0.17 \quad (2.8)$$

$$r = (R^2 + 64)^{0.5} \text{ para } \log a_{max} \quad (2.9)$$

$$r = (R^2 + 16)^{0.5} \text{ para } \log v_{max} \quad (2.10)$$

donde:

M_w : magnitud momento del sismo [M_w]

R : distancia de la fuente sísmica al sitio en cuestión [Km]

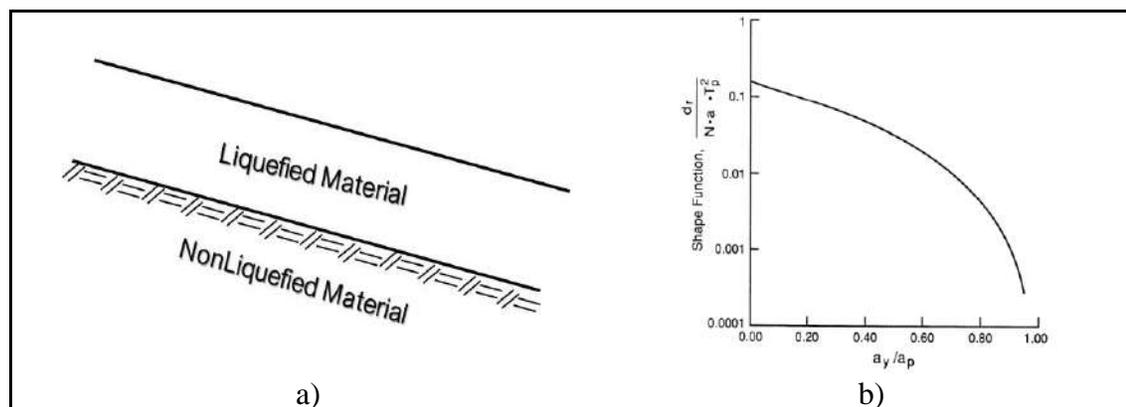


Figura 2. 5 Representación del modelo de Baziar et al. (1992): a) Perfil de suelo del modelo de Baziar et al. 1992 b) Variación de la forma de la función sinusoidal a_y/a_p (Baziar et al. 1992)

Modelos empíricos

Hamada *et al.* (1987) plantearon un modelo basado en correlaciones empíricas simples entre el espesor de la capa licuable (Figura 2. 6) y la pendiente del terreno basados en terremotos de Japón: 1964 Niigata 7.5 Mw y 1983 Noshiro 7.8 Mw. La ecuación propuesta fue la siguiente:

$$D = 0.75\sqrt{H^3}\sqrt{\theta} \quad (2.11)$$

Donde:

D : desplazamiento total de la capa de suelo [m]

H : espesor de la capa licuable [m]

θ : pendiente del terreno [%]

Esta ecuación fue uno de los primeros modelos empíricos para la estimación de la magnitud del desplazamiento lateral inducido por licuación sísmica (Figura 2. 6).

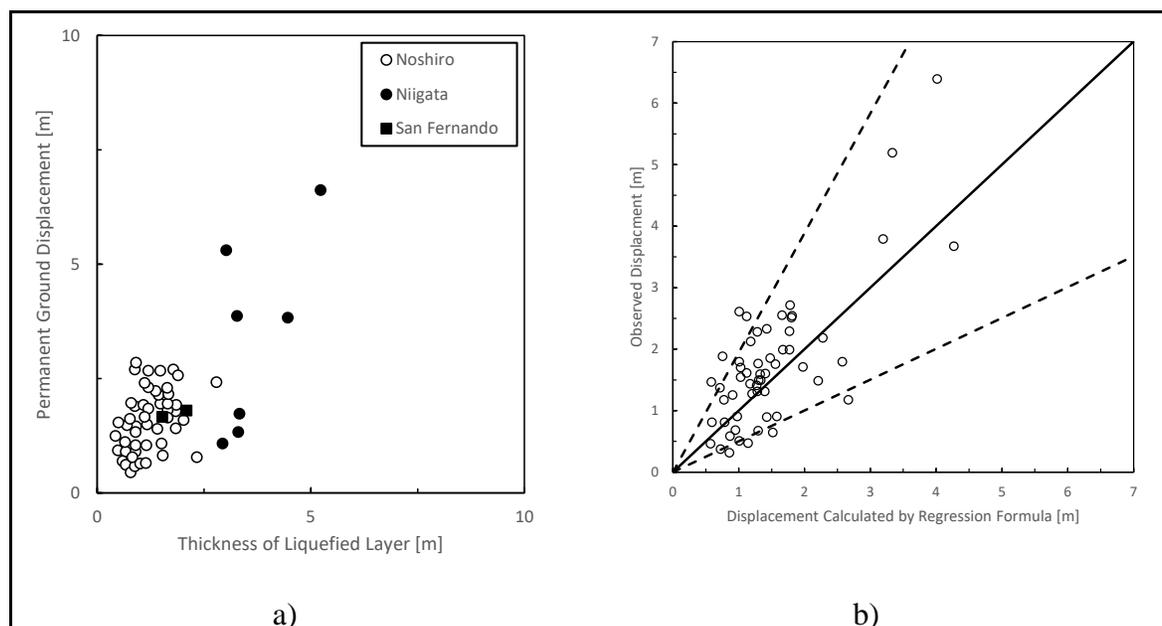


Figura 2. 6 Correlaciones obtenidas del modelo de Hamada et al. (1987) a) Correlación del desplazamiento lateral acumulado inducido por licuación y el espesor de la capa licuable b) Comparación del desplazamiento acumulado estimado con fórmula de Hamada et al. (1987) y desplazamientos observados

De igual forma pero con una base de datos más amplia, Bartlett y Youd (1995) usaron correlaciones múltiples de regresión lineal (Figura 2. 7) de medidas de desplazamientos del suelo inducidos por licuación, datos topográficos y perfiles de suelo (467 casos observados: 337 de terremotos japoneses, 111 de terremotos estadounidenses y 19 de la base de datos de Ambraseys (1988). Este modelo considera como variables de alta significancia en la predicción del desplazamiento lateral (D_H): la magnitud del sismo (M), la distancia del sitio en cuestión a la fuente de energía sísmica (R), el grosor de la capa licuable (T_{15}) con el valor del $(N_1)_{60}$ del ensayo de penetración estándar (SPT) menor a 15 golpes/pie, el tamaño de grano promedio en la capa licuable (D_{50}) y el contenido de finos en la capa licuable (F_{15}). Es importante mencionar que los autores hacen una diferencia en su modelo para el caso de corrimiento lateral en cara libre y en pendiente suave.

Más adelante, Youd *et al.* (2002) corrigieron y mejoraron ese modelo con las siguientes consideraciones: 1) eliminaron de la base de datos sitios donde el corte en la condición de borde impedía el desplazamiento lateral libre, 2) añadieron datos de casos de tres

sismos adicionales, 3) cambiaron la forma lineal a logarítmica del D_{50} con la finalidad de mejorar la predicción en sitios de suelo grueso y 4) modificaron el $\log R$ por $\log R^*$, donde R^* es la función de la magnitud del sismo (M) con la finalidad de evitar sobreestimación cuando R era pequeño.

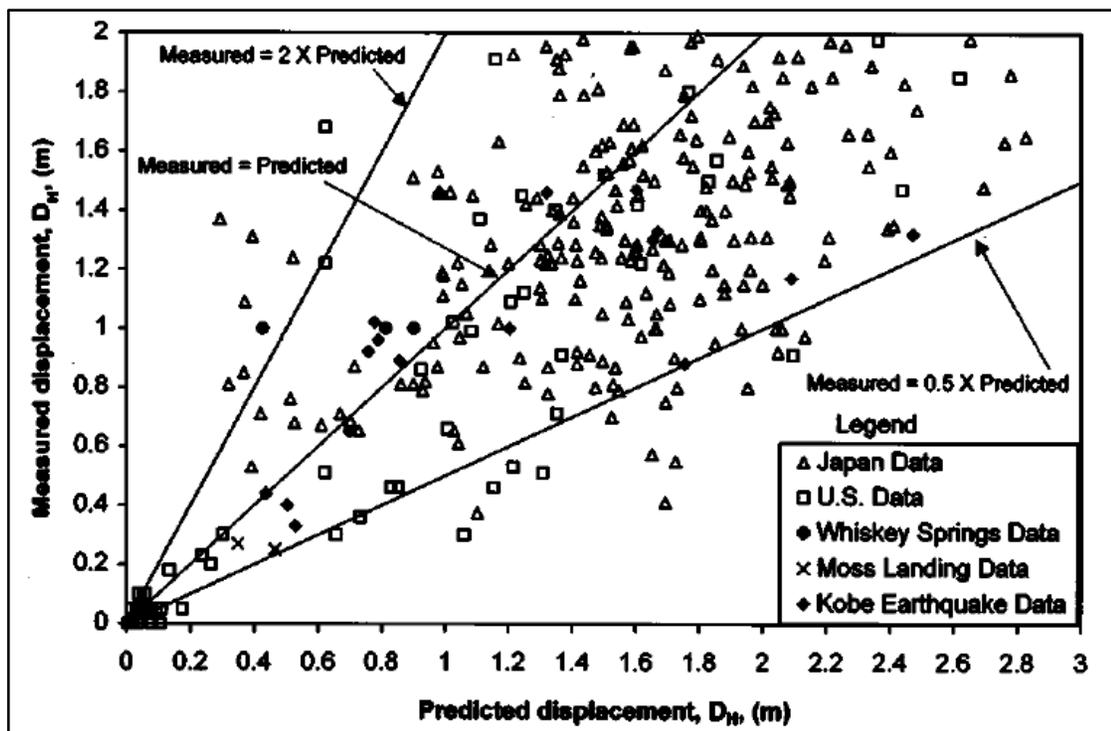


Figura 2. 7. Desplazamientos medidos versus desplazamientos estimados con el modelo de Youd et al. 2002

Las ecuaciones de Youd *et al.* (2002) modificadas del modelo de Bartlett y Youd (1995) son las siguientes:

Para condición de cara libre:

$$\begin{aligned} \log D_H = & -16.713 + 1.532M - 1.46 \log R^* - 0.012R + 0.592 \log W \\ & + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(1000 - F_{15}) \\ & - 0.795 \log (D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Para condición de pendiente no pronunciada:

$$\begin{aligned} \log D_H = & -16.213 + 1.532M - 1.46 \log R^* - 0.012R + 0.338S \\ & + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(1000 - F_{15}) \\ & - 0.795 \log (D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Siendo:

$$R^* = R_0 + R \quad (2.14)$$

$$R_0 = 10^{(0.89M-5.64)} \quad (2.15)$$

donde:

M : magnitud del sismo [M_w]

R : distancia entre el sitio en cuestión y la fuente de energía sísmica [Km]

W : proporción ente la altura de cara libre del estrato licuable (H) y la distancia de la base de la cara libre al sitio en cuestión (L).

S : inclinación del suelo [%]

T_{15} : espesor acumulado de capas de suelo cuyo $(N_1)_{60}$ es menor a 15 [m]

F_{15} : contenido promedio de finos en la capa licuable de espesor acumulado con $(N_1)_{60}$ menor a 15 [%]

D_{50} : tamaño de partícula de suelo promedio en T_{15} [mm]

Por otro lado, Zhang *et al.* (2004) debido a la repetibilidad y fiabilidad de los resultados del Ensayo de Penetración del Cono (CPT) plantearon un modelo empírico para ser usado como primera estimación del desplazamiento lateral en casos de ingeniería práctica. Este método se basa en el cálculo de un Índice de Desplazamiento Lateral (LDI) resultado de la integración de la máxima deformación cíclica al corte en función de la profundidad:

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} dz \quad (2.16)$$

donde:

z_{max} : máxima profundidad debajo de todas las capas potencialmente licuables [m]

γ_{max} : máxima deformación cíclica al corte.

Una vez calculado LDI y en función de la pendiente del terreno (S), altura de cara libre (H) y la distancia de cara libre (L), se obtiene el desplazamiento lateral (LD):

$$LD = (S + 0.2) LDI \text{ para } 0.2\% < S < 3.5\% \text{ (pendiente sin cara libre)} \quad (2.17)$$

$$LD = 6(L/H)^{0.8} LDI \text{ para } 4 < L/H < 40 \text{ (cara libre)} \quad (2.18)$$

Faris *et al.* (2006) presentaron un modelo semiempírico tomando como base de datos resultados de laboratorio y casos históricos. Usaron modelos de aproximaciones bayesianas para reducir las incertidumbres asociadas a los casos históricos. Su ecuación determinística es la siguiente:

$$H_{max} = \exp(1.0443 \ln(DPI_{max}) + 0.0046 \ln(\alpha) + 0.0029 M_w) \quad (2.19)$$

donde:

H_{max} : máximo desplazamiento horizontal [m]

DPI_{max} : máximo índice de desplazamiento horizontal

α : representa la carga estática

M_w : momento magnitud [M_w]

Otro modelo empírico que usó la base de datos de Youd *et al.* (2002) para desarrollar su modelo fue el de Zhang *et al.* (2012). Este modelo implementó ecuaciones para condición de cara libre y de pendiente suave como funciones de respuesta de aceleración espectral derivado de leyes de atenuación y de parámetros geotécnicos. Su modelo cuenta con efectos de sismos locales en los desplazamientos laterales. Sus ecuaciones son las siguientes:

Para condición de cara libre:

$$\begin{aligned} \log D_H = & 1.8619 \log(SD) + 0.6080 \log W_{ff} + 0.0342 \log T_{15} \\ & + 2.4643 \log(1000 - F_{15}) \\ & - 0.8382 \log (D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) - 3.4443 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Para condición de pendiente suave:

$$\begin{aligned} \log D_H = & 1.8619 \log(SD) + 0.459 \log S_{gs} + 0.0197 \log T_{15} \\ & + 2.4643 \log(1000 - F_{15}) - 0.8382 \log (D50_{15} + 0.1 \text{ mm}) \\ & - 2.7096 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Donde:

SD : pseudoespectro de desplazamiento [m]

Modelos constitutivos

Varios modelos numéricos se han desarrollado para simular el complejo fenómeno de desplazamiento lateral inducido por licuefacción de suelos. La precisión de estos modelos de comportamiento del suelo durante el fenómeno de licuación depende de la teoría de su modelo constitutivo, de la estrategia de resolución del modelo, entre otros. De igual forma, uno de los requerimientos importantes para su uso en la ingeniería práctica es la simplicidad con la que sus parámetros puedan ser obtenidos de ensayos de laboratorio o de campo. Algunos de esos son: *PressureDependMultiYield02* (PDMY02), *Sand Plasticity Model* (PM4Sand) y *University British Columbia 3D Plasticity Model* (UBC3D-PLM).

Prevost (1985) presenta un modelo constitutivo elástico-plástico simple para suelos sin cohesión. Su modelo refleja la fuerte dependencia de la dilatancia en la relación de tensión efectiva. La teoría es aplicable a condiciones generales de tensión-deformación tridimensionales, pero sus parámetros pueden derivarse de los resultados de ensayos de

suelo de laboratorio convencionales. Años después, Manzari y Dafalias (1997) combinan la formulación de plasticidad de dos superficies con el parámetro de estado para construir un modelo constitutivo para arenas en un espacio de tensión general. El modelo es capaz de simular de forma realista el comportamiento tensión-deformación de las arenas bajo condiciones de carga monótonas y cíclicas, drenadas y no drenadas. La calibración de las constantes del modelo se realiza directamente sobre la base de experimentos triaxiales y mediciones de características bien conocidas del comportamiento de la tensión y la deformación de la arena.

Elgamal *et al.* (2002) formularon un modelo constitutivo de arena licuable validado con ensayos de centrífuga con *Nevada Sand* para simular el fenómeno de movilidad cíclica basado en la plasticidad y asociado a deformaciones de corte acumuladas. Su modelo *PressureDependMultiYield02* (PDMY02) usa una función cónica de fluencia de superficies múltiples: muchas superficies de fluencia similares con igual eje hidrostático, pero con diferentes tamaños en la zona de endurecimiento (Figura 2. 8). Este modelo se encuentra principalmente implementado en la plataforma de *OpenSees*. Investigadores como Dashti *et al.* (2018) han usado este modelo para evaluar y validar asentamientos inducidos por licuación en fundaciones. De igual forma, pero en condición de campo libre Sadeghi *et al.* (2021) lo han usado obteniendo buenos resultados. Detalles de este modelo constitutivo son tratados en el capítulo 3.

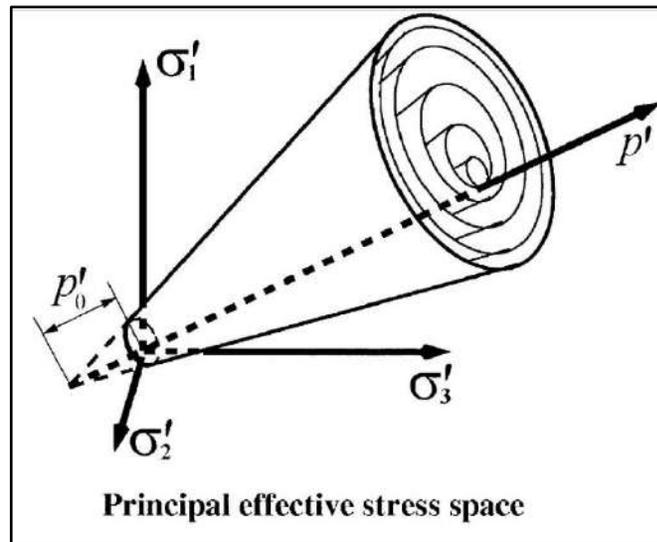


Figura 2. 8 . Superficies de fluencias múltiples en el espacio de los esfuerzos principales y plano desviador del modelo constitutivo *PDMY02* (Elgamal *et al.* 2002)

Dafalias and Manzari (2004) presentaron un modelo de plasticidad superficial para arenas limpias, compatible con estado crítico y controlado por la relación de esfuerzos. Este modelo fue mejorado por Boulanger and Ziotopoulou (2013), en su capacidad de aproximar respuestas de tensión-deformación importantes para ingeniería geotécnica sísmica. El *PM4Sand* es un modelo de plasticidad de arena (Figura 2. 9) que ha sido implementado principalmente en *FLAC* y especialmente desarrollado para aplicaciones de ingeniería geotécnica sísmica. Como ejemplos de su uso tenemos a Ziotopoulou (2018) en el estudio numérico de asentamientos y desplazamientos laterales inducidos por licuación y validados usando ensayos físicos del proyecto LEAP. De igual forma ElGhoraiby and Manzari (2020) utilizaron este modelo para analizar los efectos de la variabilidad inherente presente en la densidad del suelo y el desplazamiento lateral también simulando ensayos del proyecto LEAP.

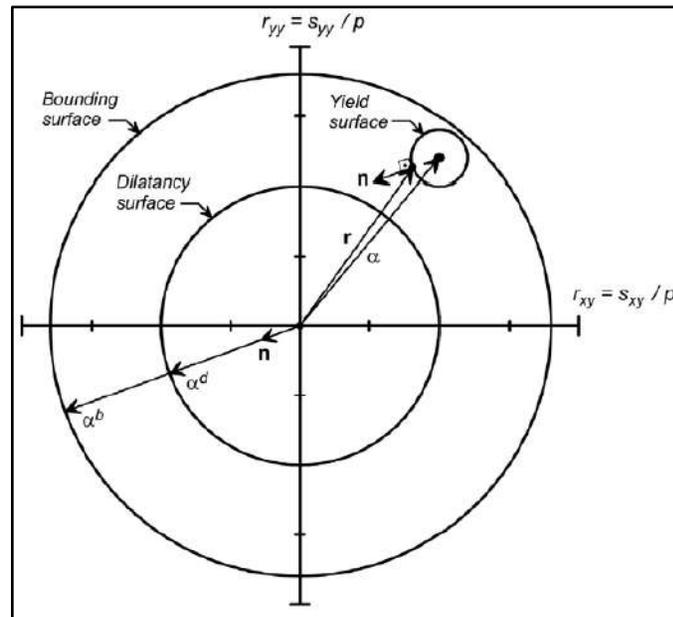


Figura 2. 9 . Superficie de fluencia, crítica, dilatancia y límites del modelo constitutivo *PM4Sand* (Dafalias & Manzari, 2004) en el plano de tensiones r_{yy} - r_{xy}

Puebla et al. (1997) propusieron un modelo constitutivo elastoplástico que utiliza una regla de endurecimiento cinemática simplificada e isotrópica con superficies de fluencia Mohr-Coulomb (Figura 2. 10) para tomar en cuenta el efecto de la densificación del suelo y predecir la transición suave a estado líquido durante los ciclos de carga no drenados. Posteriormente este modelo *UBC3D-PLM* fue implementado en *PLAXIS* por Petalas and Vahid (2013) y es el modelo de licuación más comúnmente usado en este *software*. Dentro de los ejemplos de uso de este modelo tenemos a: Souliotis and Gerolymos (2016) quienes reprodujeron el desplazamiento lateral inducido por licuación en un muro de contención observado durante el terremoto del 1995 Kobe 6.7 Mw. De igual forma, (Barrueto et al., 2017) usaron este modelo para simular el desplazamiento lateral inducido por licuación en los pilares de un puente durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw.

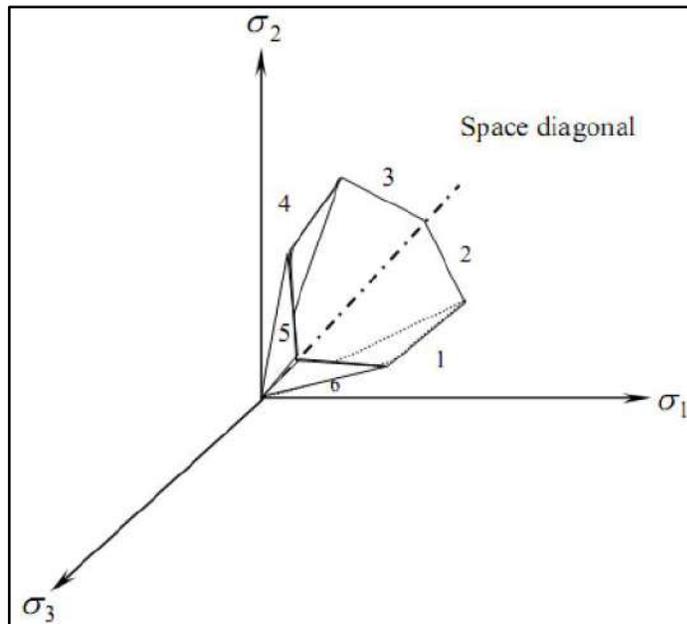


Figura 2. 10 . Superficies de fluencia en el espacio 3D de esfuerzos principales del modelo constitutivo de *UBC3D-PLM* (Puebla *et al.* 1997) implementado por Petalas and Vahid (2013) en PLAXIS

Modelos en base a resultados experimentales

En lo que respecta a modelación física del fenómeno de desplazamiento lateral inducido por licuación sísmica se ha estudiado mediante ensayos centrífugos y mesas vibratorias.

Dentro de los ensayos centrífugos más importantes para el estudio de este fenómeno, se encuentran los realizados en dos grandes proyectos de investigación: *Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies* (VELACS) y *Liquefaction Experiments and Analysis Project* (LEAP). Arena de Nevada y Arena de Ottawa fueron utilizadas respectivamente en esos proyectos para entender el fenómeno de desplazamiento lateral inducido por licuación. Detalles de estos proyectos se ven en el capítulo 3. La Figura 2. 11a muestra la centrífuga geotécnica usada por la *National Central University* (NCU) como parte del proyecto LEAP. Así mismo, en la Figura 2. 11b se muestra un contenedor rígido de aluminio dónde fue colocada la arena de Ottawa para uno de los estudios del desplazamiento lateral inducido por licuación (Kutter *et al.*, 2020).

Por otro lado, ensayos en mesa vibratoria también han sido realizados para el estudio del desplazamiento lateral inducido por licuación. Sato *et al.* (2004) con el fin de modelar de manera realista la licuación y el desplazamiento lateral de tablestacas en suelos arenosos saturados, emplearon una caja laminar de 12 mx 3,5 mx 6 m y una serie de ensayos en mesa vibratoria en el Instituto Nacional de Investigaciones para las Ciencias de la Tierra y la Prevención de Desastres en Japón (NIED). Recientemente, Ebeido *et al.* (2019) han modelado la respuesta dinámica de desplazamiento lateral en pilotes a escala en suelo con inclinación. Sus experimentos se centraron en replicar el comportamiento del suelo y de los pilotes variando perfiles del suelo, altura de capa licuable, materiales de los pilotes y secciones transversales. La Figura 2. 12 muestra los ensayos de mesa vibratoria realizados en la Universidad de San Diego para estudiar el desplazamiento lateral inducido por licuación.

Los resultados de Sato *et al.* (2004) mostraron la importancia del comportamiento post-licuación de un arena, lo cuál no se había visto en resultados a menor escala. La licuación en sus ensayos ocurrió después de unos pocos pulsos del sismo. La energía del suelo licuado causó la deformación de la tablestaca y desplazamientos laterales en pilotes segundos después de la sacudida del sismo. Los resultados de Ebeido *et al.* (2019) demostraron que la deformación del suelo se asoció a la reducción del momento en los pilotes. Así mismo, la rigidez del grupo de pilotes redujo el momento lateral en los pilotes vecinos. La presencia de costra en la estratigrafía del suelo generó momentos flectores mayores debido a la presión lateral alta asociada a ese estrato de suelo.



Figura 2. 11 . Ensayos de centrífugas LEAP-UCD-2017 en NCU: a) Centrífuga geotécnica en CNU b) Contenedor laminar de longitud 767 mm, ancho de 355 mm, alto de 400 mm y peso neto de caja vacía de 106,8 kg Kutter and Manzari (2020).



Figura 2. 12 . Ensayos de mesas vibratorias realizados en la Universidad de San Diego para estudiar el desplazamiento lateral a) Mesa vibratoria para estudiar el desplazamiento lateral en pendiente suave b) Vista en planta del ensayo donde se aprecian las distorsiones causadas por el sismo.

Modelos de predicción con *machine learning*

Avval and Derakhshani (2019) propusieron un nuevo modelo de predicción como resultado de un análisis con el algoritmo *M5 MT* usando la base de datos de Youd *et al.* (2002). Demostraron que la nueva ecuación es mejor en términos de precisión, simplicidad e interpretaciones física que los anteriores modelos. Algo debatible en su nuevo modelo es que no depende de las condiciones topográficas del terreno. Realizaron

un análisis sensitivo para determinar la significancia de cada parámetro. Finalmente, recomiendan usar su modelo para una estimación preliminar del desplazamiento lateral usando los parámetros de su modelo que son de fácil obtención. Su modelo para el cálculo del desplazamiento lateral es el siguiente:

$$D_H = \frac{M_W^{X1} S^{X2} W^{X3} T_{15}^{X4} (100 - F_{15})^{X5}}{10^{X6} R^{X7} (D_{5015} + 0.1)^{X8}} \quad (2.22)$$

donde $X1$ hasta $X8$ son coeficientes estimados de la regresión, los cuales son 18.025, 0.03, 0.255, 0.353, 3.821, -22.138, -1.274, -0.609 respectivamente. Las demás variables son las mismas del modelo de Youd *et al.* (2002).

Javdanian (2019) realizó un estudio en un amplio rango de datos de desplazamiento laterales reales inducidos por licuación sísmica. Este autor usó un sistema de inferencias *neuro-fuzzy* obteniendo como resultado un modelo robusto para predecir el desplazamiento lateral. El análisis de sensibilidad fue presentado para investigar el comportamiento del modelo bajo varias condiciones. Finalmente, el modelo propuesto fue comparado con las relaciones disponibles y la estimación del desplazamiento lateral en superficie. Los resultados calculados de desplazamiento lateral inducido por licuación fueron cercanos a los valores medidos en campo. Su modelo para el cálculo del desplazamiento lateral es el siguiente:

$$D_H = \frac{2.1414R^{0.5}W^{0.5}}{M_W^2 D_{5015}^{0.5}} - \frac{0.061863T_{15}F_{15}}{M_W^{0.5}W^{0.5}} - \frac{11.1201M^2}{RW^{0.5}F_{15}} + \frac{0.0017573M_W^2W^{0.5}T_{15}}{F_{15}^{0.5}D_{5015}} \quad (2.23)$$

Donde todas las variables son las mismas del modelo de Youd *et al.* (2002).

Pirhadi *et al.* (2019) proponen un nuevo método de predicción del desplazamiento lateral máximo en superficie usando *Artificial Neuronal Networks*. Para el desarrollo de su ecuación adicionan el parámetro de intensidad sísmica CAV_5 para predecir el desplazamiento lateral inducido por licuación. Toman en cuenta, la influencia del

contenido de finos (F_{15}) en la capa licuable por lo que plantean dos condiciones: la primera para rango entero de parámetros y la segunda limitando el rango de F_{15} bajo el 28%. Para mostrar la capacidad y eficiencia del modelo, los autores compararon los resultados de su modelo con los resultados de tres modelos usando datos del terremoto de Chichi. Concluyeron que el suyo es una buena herramienta para evaluar los desplazamientos horizontales causados por el fenómeno de licuación. Su modelo para el cálculo del desplazamiento lateral es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 D_H = & a_0 + a_1M_W + a_2W + a_3T_{15} + a_4F_{15} + a_5D_{50_{15}} + a_6CAV_5 + a_7M_W + a_8 \\
 & + a_9T_{15}^2 + a_{10}F_{15}^2 + a_{11}D_{50_{15}}^2 + a_{12}(CAV_5)^2 + a_{13}M_WT_{15} \\
 & + a_{14}M_WF_{15} + a_{15}M_WD_{50_{15}} + a_{16}WT_{15} + a_{17}WF_{15} + a_{18}WD_5 \\
 & + a_{19}T_{15}F_{15} + a_{20}T_{15}D_{50_{15}} + a_{21}F_{15}CAV_5
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

donde a_0 hasta a_{21} son coeficientes estimados de la regresión, los cuales son 0.9174, -1.6737, 2.6737, 2.6172, 0.7685, -1.0865, -1.8952, 1.3425, -0.36369, -0.3733, -0.0678, -0.7474, -0.4060, -0.4060, 0.0258, -0.3766, 0.2579, -0.59428, 0.3566, -0.4549, 0.4603, -0.6531, 0.6011, -0.5063 respectivamente. Las demás variables son las mismas del modelo de Youd *et al.* (2002).

2.5 Normativas Internacionales de Desplazamiento Lateral

Parte del estado del arte, también fue realizar una revisión de los principales códigos internacionales y manuales de diseño referentes al tema de amenaza de licuación sísmica y sus consecuencias como el caso de desplazamiento lateral inducido por este fenómeno. Como resultado de esta revisión se encontraron los siguientes documentos:

- **Japón:** En el Código Japonés de Diseño de Puentes Carreteros (Japan Road Association, 2002) la ocurrencia de licuación es evaluada para sismos corticales y de subducción. Este código no recomienda alguna fórmula en particular para predecir el desplazamiento horizontal del suelo. No obstante, considera el uso de coeficientes sísmicos para el diseño de pilotes en sismos moderados y severos.

- **Canadá:** En el Manual Canadiense de Fundaciones Ingenieriles (Canadian Geotechnical Society, 2006), se recomienda el uso del método del bloque deslizante de Newmark (1965).
- **Estados Unidos:** Normas como el Código de Edificaciones de California (California Building Standards Commission, 2010), exigen evaluar, las capas de suelo que tienen un conteo N_1 inferior a 15 golpes/pie por riesgo de desplazamiento lateral, en donde un desplazamiento lateral calculado de más de 12 pulgadas (0.3 m) requiere de alguna técnica de mejoramiento del suelo. Así mismo, el Manual Geotécnico de CalTrans (California Department of Transportation, 2020) recomienda en condición de campo libre el uso de los modelos de Hamada *et al.* (1986) y Youd *et al.* (2002).
- **Nueva Zelanda:** En el Manual de Puentes de la Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (New Zealand Transport Agency, 2016) se recomienda el uso de métodos empíricos como el Youd *et al.* (2002). De igual forma, en el *Building Code* (New Zealand Geotechnical Society, 2016) en el Módulo 3 de Identificación, evaluación y mitigación de amenaza sísmica el uso de métodos analítico como Newmark (1965) o empíricos como Youd *et al.* (2002) o Zhang *et al.* (2004).
- **Europa:** En el Eurocódigo 8 Estándar EN 1998 (European Committee for Standardization, 2004), para los desplazamientos laterales producidos por licuación se recomienda realizar cálculos con el método de Newmark (1965) para sismos entre 6.6 y 7.7.
- **Chile:** En el caso de Chile, no se cuenta aún con normativa de licuación de suelos y sus consecuencias. No obstante, la Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE) ha formado un comité y se viene trabajando en la elaboración de la Norma de Licuación. La presente investigación plantea un nuevo modelo de predicción del desplazamiento lateral para sismos subductivos mediante el empleo de machine learning para generar un modelo robusto con el uso de una nueva base de datos sintética generada con modelación paramétrica numérica.

2.6 Desplazamiento Lateral en Terremotos de Subducción

Tryon (2014) evaluó cinco modelos usados en la ingeniería práctica (Bartlett and Youd (1995), Youd *et al.* (2002), Zhang et al. (2004), Faris et al. (2006), Zhang et al. (2012)) con tres casos históricos de terremoto de subducción del 2010 Maule 8.8 Mw. Él encontró que la distancia medida desde el sitio a la fuente sísmica (R) es difícil de estimar con precisión para casos de terremotos de subducción debido a que éstas pueden variar significativamente entre regiones sísmicas, haciendo difícil la recomendación de un método de cálculo para el valor de R . La Figura 2. 13 muestra un resumen de las diferentes distancias que pueden ser consideradas: D_1 = distancia hipocentral, D_2 =distancia epicentral, D_3 =distancia más cercana a la zona de mayor esfuerzo, D_4 = distancia más cercana a la zona de ruptura, D_5 = distancia más cercana a la superficie de proyección de la ruptura o distancia de Joyner Boore.

El problema en los grandes terremotos de subducción es que aunque exista un área pequeña donde comienza el terremoto (hipocentro), existen múltiples zonas de contacto entre placas (“parches”) donde se libera energía en diferentes momentos y con diferentes intensidades. Por lo tanto, aunque las distancias D_1 , D_2 y D_3 podrían definirse, no necesariamente tienen una correlación razonable con la intensidad del movimiento del suelo en el sitio de interés. Además, para países sísmicamente activos, como Chile y Perú, D_4 y D_5 son muy pequeños o incluso nulos. Desde el punto de vista de diseño, estimar todas estas distancias antes de que ocurra un terremoto es muy difícil.

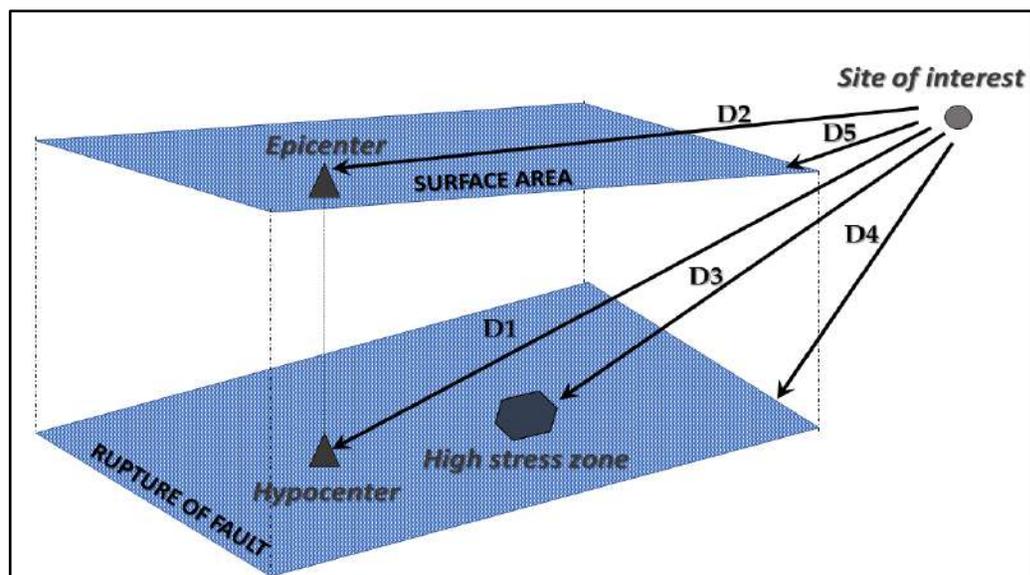


Figura 2. 13. Distancias desde la fuente sísmica al sitio de interés. Adaptado de Joyner and (Boore 1988)

De igual forma, Williams (2015) usó otros dos casos históricos del terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw para evaluar los modelos empíricos desarrollados por Bartlett and Youd (1995) y Youd *et al.* (2002), concluyendo que son extremadamente sensibles al término de distancia, R, y que la definición de R para estos dos métodos (distancia de Joyner Boore) resulta en predicciones que son de hasta más de dos veces los valores observados *in situ*. Los modelos semiempíricos de Zhang *et al.* (2004) y Faris *et al.* (2006) también predijeron en exceso el desplazamiento, pero en estos casos el motivo fue el factor de ponderación de profundidad de sus modelos que generaba un valor sobrestimado del desplazamiento. En particular, el modelo empírico Zhang *et al.* (2004) y Zhang *et al.* (2012) predijeron desplazamientos aproximadamente de seis a ocho veces mayores que los desplazamientos medidos. De la Maza *et al.* (2017) estudiaron el caso histórico de desplazamiento lateral en el puerto de Lo Rojas del terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw. Ellos utilizaron el modelo de Youd *et al.* (2002) probando diferentes distancias y encontraron que la distancia de sitio a la zona donde se genera el 10% de los deslizamientos más grandes en la proyección en superficie de la falla arroja valores satisfactorios cuando se compara con mediciones *in situ* posteriores al terremoto.

En esta investigación, se analizaron 6 sitios con 13 casos adicionales del desplazamiento lateral inducido por licuación de seis sitios afectados durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw. La Figura 2. 14 muestra un mapa de ubicación de esos sitios analizados. En la Figura 2. 15 se aprecia una comparación entre el desplazamiento lateral observado y calculado utilizando la metodología de Youd *et al.* (2002) con tres definiciones de valor R. La primera es la R original de la metodología de Youd *et al.* (2002), la segunda es la distancia al levantamiento costero máximo observado y la tercera es la distancia utilizada por De la Maza *et al.* (2017), que se define como la distancia a la zona donde se generan el 10% de los deslizamientos más grandes. Los desplazamientos laterales medidos en los sitios seleccionados fueron menores a 3 m. En todos los casos, la conclusión fue similar a la de Tryon (2014), Williams (2015) y De la Maza *et al.* (2017), es decir, en que el modelo de Youd *et al.* (2002) para terremotos de subducción de gran magnitud sobreestima los desplazamientos laterales inducidos por licuefacción en un factor de más de dos. La Figura 2. 15c muestra, sin embargo, que hay algunos sitios donde las predicciones estuvieron cerca de las mediciones. Esos sitios fueron aquellos donde el valor R fue el que proponen De la Maza *et al.* (2017) y donde el contenido promedio de finos en el espesor acumulado de la capa granular saturada fue menor al 5%. Esta es solo una observación inicial, y es necesario estudiar más casos históricos antes de generalizar esta conclusión.

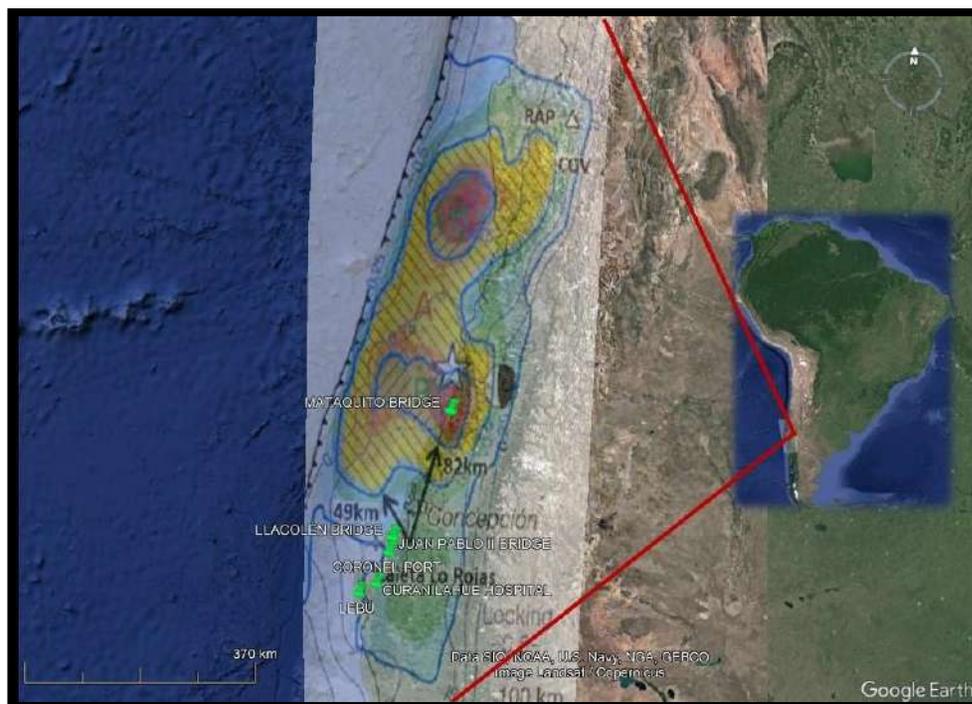


Figura 2. 14. Vista en *Google Earth* de los sitios donde ocurrió desplazamiento lateral durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw usando el modelo de distribución de deslizamiento cósmico de Moreno et al. (2010)

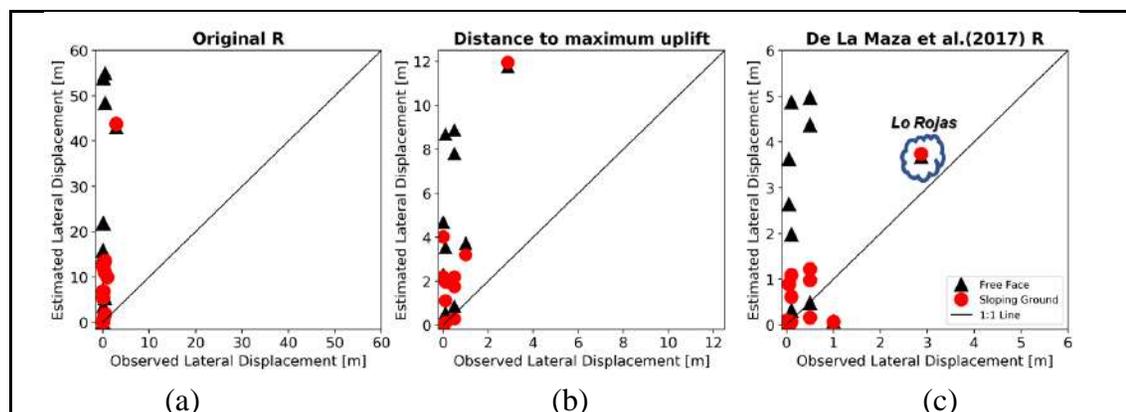


Figura 2. 15. Desplazamiento lateral observado versus desplazamiento lateral estimado usando a) Distancia original R de Youd *et al.* (2002) b) Distancia a la zona de mayor elevación c) Distancia definida por De la Maza *et al.* (2017)

2.7 Resumen y conclusiones

En este capítulo 2 de revisión del estado del arte, se estudió el mecanismo de desplazamiento lateral inducido por licuación, casos históricos representativos, modelos

de evaluación de este, normativas internacionales y evaluación de modelos más usados en ingeniería para estudiar casos observados en terremotos de subducción.

Las conclusiones más relevantes de este capítulo son listadas a continuación:

1. El desplazamiento lateral inducido por licuación puede ser medido *in situ* mediante inspecciones de campo o levantamiento de terreno. Una técnica común es la identificación del ancho grietas en el terreno con la finalidad de superponerla y estimar el desplazamiento permanente del suelo a lo largo de un transecto perpendicular a una vía fluvial que es donde suele originarse este fenómeno.
2. Los factores que generan el desplazamiento lateral se pueden agrupar en: sísmicos como magnitud momento, distancia horizontal del sitio a la fuente sísmica; topográficos o geométricos como pendiente del terreno y razón de cara libre; geotécnicos como el grosor de la capa la capa licuable, contenido de finos, tamaño de grano en esa capa crítica, profundidad desde la superficie a la capa licuable y de resistencia como resistencia al corte no drenada post-licuación.
3. Los métodos analíticos y empíricos más comunes fueron muy usados en ingeniería práctica hasta que se analizaron para comparaciones con valores observados en terremotos de subducción arrojando valores irreales fuera de la zona de tolerancia en ingeniería geotécnica (entre 50 y 200% del valor medido).
4. Los métodos numéricos y físicos han logrado reproducir parte del fenómeno de desplazamiento lateral. No obstante, aunque se cuente con ensayos y calibraciones, lograr la representatividad del fenómeno real no es tan obvia.
5. Los países altamente sísmicos como Japón, Canadá, Estados Unidos y Nueva Zelanda presentan algún código o manual dónde se hace recomendación de algún método de cálculo de desplazamiento lateral inducido por licuación.
6. El principal problema del uso del modelo más común en la ingeniería práctica: Youd *et al.* (2002) es la definición de una apropiada distancia R para eventos de subducción de gran magnitud. Si se toma la definición de ese modelo, los resultados calculados arrojan valores de desplazamiento lateral irreales. Por otro lado, al probar la definición de R de De la Maza *et al.* (2002), no se tuvo éxito en la mayoría los casos por lo que

se hace necesaria la incorporación de nuevas variables de predicción para un modelo aplicable en terremotos de subducción de gran magnitud.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se realiza una descripción de la plataforma numérica utilizada para las simulaciones, así como los elementos y modelos constitutivos del suelo seleccionados para la presente investigación. Finalmente, se valida el uso de esta herramienta numérica mediante la comparación con resultados experimentales y de casos históricos.

3.1 Introducción

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionó la plataforma numérica de *Open Source Earthquake Engineering Simulator* (OpenSees), dadas sus capacidades demostradas para capturar la respuesta del suelo sujeta a eventos sísmicos y su disponibilidad de modelos constitutivos avanzados capaces de reproducir la movilidad cíclica o licuación (Mazzoni et al., 2006). Así mismo, su licencia de uso libre y a la eficacia computacionales para modelaciones paramétricas hacen de OpenSees una plataforma atractiva de ser utilizada.

En el capítulo anterior, en el apartado 2.4, se indicaron tres modelos constitutivos que pueden reproducir el fenómeno de licuación y el desplazamiento lateral inducido por éste. Estos son formulaciones matemáticas que involucran coeficientes con parámetros representativos de un material dado (en este caso el suelo). Algunos de, estos coeficientes no son constantes, pero dependen de los niveles de esfuerzos y del estado del suelo. De esos tres modelos, se escogió el *PressureDependMultiYield02* (PDMY02) de Elgamal *et al.* (2002) por tres razones: 1) simplicidad con la que los parámetros de su modelo pueden obtenerse de ensayos de laboratorio o *in situ*, 2) el amplio uso exitoso que ha tenido por parte de otros autores: Gingery (2014) para la simulación de dos casos históricos de licuación (*Wildlife* y *Kobe Port Island*), Karimi and Dashti (2016) para evaluación de asentamientos de fundaciones superficiales en suelos licuables, Rajeswari and Sarkar (2021) para la investigación paramétrica validada con ensayos centrífugos en desplazamiento lateral inducido por licuación en un grupo de pilotes y Sadeghi et al.

(2021) para evaluación de asentamiento inducidos por licuación en campo libre, 3) se tiene acceso a la implementación de este modelo (códigos de libre acceso).

3.2 Descripción de la plataforma numérica

Todas las simulaciones de esta investigación se realizaron utilizando OpenSees, que es una plataforma de *software* de código abierto para análisis con elementos finitos y otros análisis de ingeniería (Mazzoni *et al.*, 2006). OpenSees utiliza técnicas explícitas e implícitas de integración del tiempo y varios algoritmos no lineales para resolver las ecuaciones de equilibrio. En un análisis totalmente acoplado, el modelo constitutivo interactúa con el elemento y responde a las condiciones no drenadas o parcialmente drenadas, así como a la demanda de disipación. La presión de poros es conducida por los nodos de los elementos similar a los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, mientras que las tensiones y deformaciones son conducidas y ajustadas por el modelo constitutivo en los puntos de Gauss dentro del elemento.

El elemento escogido para los elementos de suelo fue el *FourNodeQuadUP* (Figura 3. 1) el cuál es un elemento de formulación bilineal isoparamétrica. Este elemento es implementado para simular la respuesta dinámica del material con acoplamiento sólido-fluido basado en la teoría de Biot de medios porosos. Cada elemento tiene 3 grados de libertad (DOF): DOF 1 y 2 para desplazamientos de sólido (u) y DOF 3 para presión de poros (P). La razón para usar este tipo de elemento es que tiene un solo punto Gauss y reduce significativamente el tiempo de ejecución del análisis sin reducir la precisión en comparación con otros elementos (Sadeghi *et al.* (2021)).

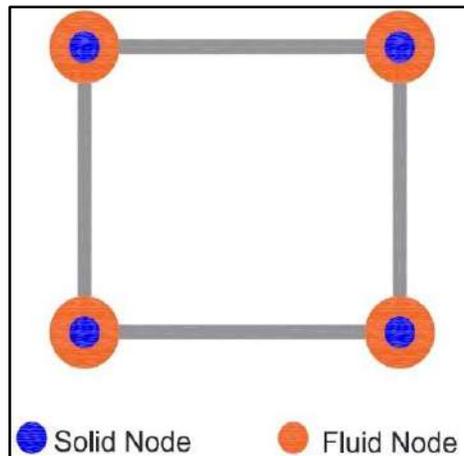


Figura 3. 1 Esquema ilustrativo del elemento FourNodeQuadUP

3.3 Descripción del modelo constitutivo

El suelo es simulado usando el modelo constitutivo *Pressure Dependent Multi-Yield* (PDMY02) disponible en OpenSees para predicción del desencadenamiento de la licuación y comportamiento post licuación.

El modelo constitutivo seleccionado es un modelo de plasticidad de Parra (1996) y Yang (2000) en el cual múltiples superficies de fluencia son adoptadas para respuestas cíclicas histeréticas (Prevost, 1985). Las fases contractivas y dilatantes son incorporadas mediante una regla de flujo para reproducir movilidad cíclica y tener un control directo de las deformaciones de corte acumuladas.

Función de fluencia

La función de fluencia en este modelo se define como múltiples superficies de forma cónica con un ápice común ubicado en el origen del espacio principal (Figura 3. 2). La superficie cónica más externa define el criterio de fluencia y las superficies internas definen la zona de endurecimiento. Se asume que la elasticidad del material es lineal e isotrópica, y que la no linealidad y la anisotropía resultan de la plasticidad.

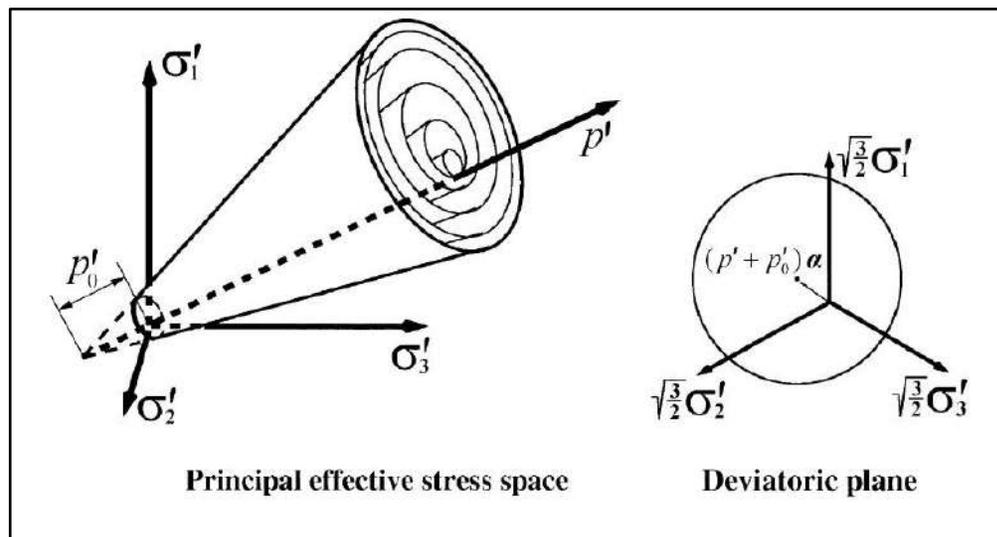


Figura 3. 2. Representación gráfica de múltiples superficies de fluencias en el plano de esfuerzos principales y en el plano de desviadores (Elgamal et al., 2002)

La función de fluencia f fue seleccionada de la siguiente forma de Prevost (1985):

$$f = \frac{3}{2}(s - (p' + p'_0)\alpha) : (s - (p' + p'_0)\alpha) - M^2(p' + p'_0) = 0 \quad (3.1)$$

En el dominio de $p' \geq 0$

donde:

s : tensor de esfuerzo desviador

p' : esfuerzo principal efectivo

p'_0 : constante positiva

α : tensor desviador cinemático de segundo orden definido por las coordenadas de las superficies de fluencia.

M : representa el tamaño de la superficie de fluencia.

$:$ (los dos puntos representan el doble producto punto o doble contracción entre tensores)

Regla de flujo

El modelo *PDMY02* utiliza una regla de flujo no asociativo que permite una respuesta volumétrica contractiva o dilatante como resultado de la carga de corte. Cuando se emplea con elementos finitos de fluido-sólido, la respuesta de contracción-dilatación provoca cambios en la presión intersticial (excluyendo la respuesta completamente drenada). El modelo emplea un mecanismo de espacio de deformación que controla la acumulación cíclica de deformación por cizallamiento en condiciones de movilidad cíclica. Estas características permiten modelar las características principales de la respuesta cíclica no drenada o parcialmente drenada de suelos licuables, como la contracción y dilatación inducidas por cizallamiento, el desarrollo de exceso de presión intersticial y la movilidad cíclica.

La dirección de la regla de flujo se denota con \mathbf{P} y su componente volumétrica se denota como P'' . Éste es el nivel deseado de dilatación o contracción en concordancia con las observaciones experimentales.

$$3P'' = \frac{1 - (n/\bar{n})^2}{1 + (n/\bar{n})^2} \psi \quad (3.2)$$

donde:

$$n : \text{razón de esfuerzo efectivo } n = \left(\frac{3}{2}s:s\right)^{1/2} / p$$

\bar{n} : parámetro material definido como la razón de la superficie de transformación o *Phase Transformation (PT)*. Éste se puede definir como el estado en el que el comportamiento del suelo cambia de contracción a dilatación.

ψ : función de valor escalar para controlar la magnitud de dilatación o contracción

Regla de endurecimiento

Este modelo emplea una regla de endurecimiento cinemática de Prevost (1985) para generar un respuesta cíclica histérica. En el contexto de las múltiples superficies de plasticidad, la traslación se rige generalmente por la consideración de que no se permite el solapamiento entre las superficies de fluencia (Mróz, 1967). Por lo tanto, el contacto entre superficies similares consecutivas (f_m y f_{m+1}) debe ocurrir solo en puntos conjugados con la misma dirección de la normal hacia afuera (Figura 3. 3).

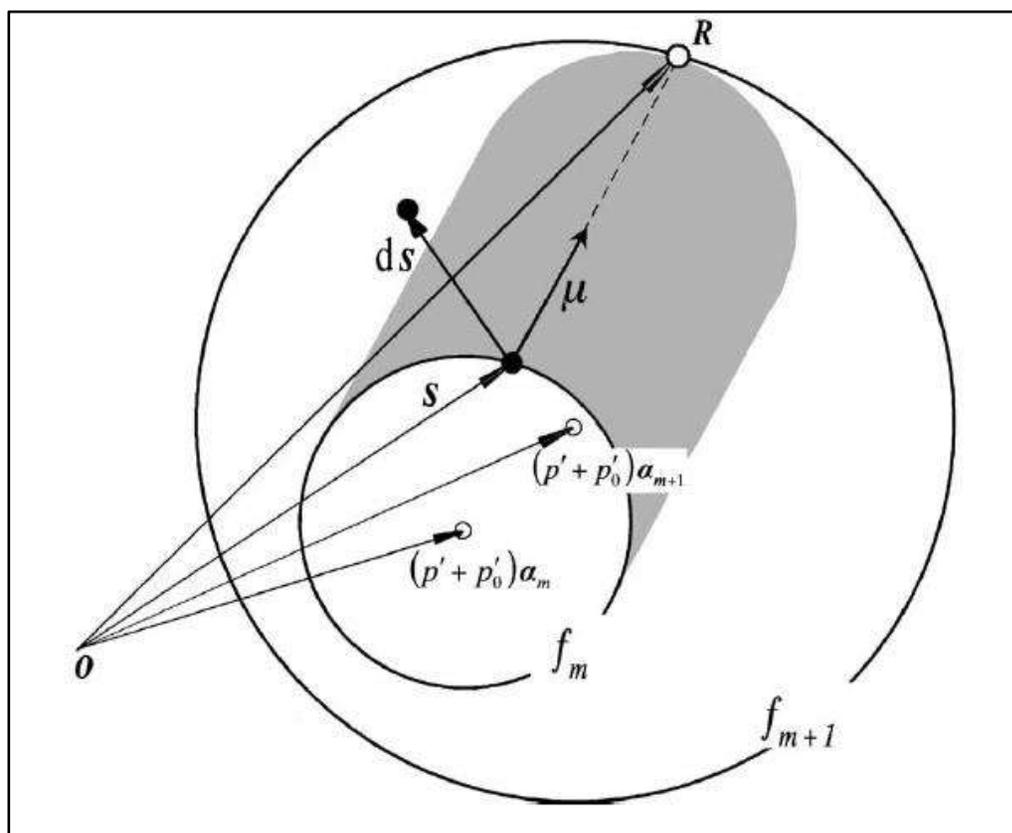


Figura 3. 3. Regla de endurecimiento del desviador (Mróz, 1967)

Mróz (1967) propuso usar el estado de tensión actual \mathbf{s} en la superficie activa f_m y su punto conjugado \mathbf{R} en la siguiente superficie externa f_{m+1} , para definir la dirección de traslación de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{M_{m+1}}{M_m} [s - (p' + p'_0)\alpha_m] - [s - (p' + p'_0)\alpha_{m+1}] \quad (3.3)$$

donde:

$(p' + p'_0)\alpha_m$: el centro de f_m en el plano desviatórico

$(p' + p'_0)\alpha_{m+1}$: el centro de f_{m+1} en el plano desviatórico

s : el estado de tensiones actual

3.4 Parámetros de calibración del modelo numérico

Elgamal *et al.* (2002) recomiendan valores para los parámetros de calibración de su modelo *PDMY02*. Sugieren rangos de valores para cada parámetro en función a calibraciones con ensayos triaxiales cíclicos no drenados y ensayos en centrífugas.

Su modelo requiere de 13 parámetros de calibración. El modelo se define principalmente para un módulo de corte referencial para bajas deformaciones (G_{ref}) y módulo volumétrico de referencia (B_{ref}). La curva esqueleto de tensión-deformación no lineal en este modelo es representado por segmentos lineales por partes con un cierto número de superficies de fluencia (*NYS*). El ángulo de fricción *peak* (ϕ) define la superficie de fluencia más externa y el ángulo de transformación de fase (ϕ_{PT}) establece el límite donde el suelo hace la transición desde la fase contractiva a la de dilatancia. La evolución del exceso de presión de poros a lo largo del tiempo y acoplamiento entre esfuerzos de corte y deformaciones volumétricas se define por parámetros de contracción (c_1 , c_2 y c_3) y parámetros de dilatación (d_1 , d_2 y d_3). Estos deben determinarse por calibración para cada densidad relativa del suelo (Dr) y

presión de referencia (p_r). Finalmente, las deformaciones de corte permanentes vienen definidas por el parámetro de licuación (Liq).

Descripción de cada parámetro del modelo

Elgamal *et al.* (2002) describen cada parámetro de calibración del *PDMY02* para suelos granulares con confinamiento dependiente de las propiedades de la respuesta al corte. Los parámetros se especifican en detalle a continuación:

1. Presión principal de confinamiento referencial (p'_r) en kPa: este es el nivel de confinamiento para las propiedades de un suelo con módulo de corte para pequeñas deformaciones (G_{ref}) y módulo Bulk referencial (B_r) especificadas. Para las calibraciones de este modelo se toma una presión de 101 kPa (1 atm).
2. Módulo de corte referencial para pequeñas deformaciones (G_{ref}) en MPa: es calculado de la velocidad de onda de corte ($V_{s_{ref}}$) para una presión de confinamiento referencial de 1 atm.
3. Módulo Bulk referencial (B_r) en MPa: es derivado del módulo de corte para pequeñas deformaciones $B_r = \left(\frac{B}{G}\right) G_{max}$.
4. Ángulo de fricción (φ) en grados: define el tamaño de las superficies de fluencia. Es obtenido del ensayo de corte simple: Direct Simple Shear (*DSS*).
5. Ángulo de transformación (φ_{PT}) en grados: es el ángulo sobre el cuál el suelo cambia de un comportamiento contractivo a dilatante. Usualmente de unos pocos grados menos que el ángulo de fricción.

6. Parámetros de contracción (c_1, c_2, c_3): controlan los cambios volumétricos de corte inducido, tendencias contractivas basadas en la historia de dilatación y los efectos de esfuerzos de sobrecarga respectivamente.

7. Parámetros de dilatación (d_1, d_2, d_3): reflejan la tendencia a la dilatación, historia de esfuerzos y esfuerzos de sobrecarga respectivamente.

8. Número de superficies de fluencia (NYS): determina la curva esqueleto tensión-deformación no lineal de un suelo representado por segmentos lineales. Un material elástico está dado por $NYS = 0$, mientras que un material perfectamente elasto-plástico posee $NYS = 1$.

9. Parámetro de licuación (liq): controla la cantidad de deformación de corte permanente en pendiente suave.

Rangos de valores de los parámetros del modelo

Típicos rangos de valores de los parámetros de calibración de suelo granular muy suelto a muy denso son presentados en la Tabla 3. 1.

Tabla 3. 1 Parámetros de calibración y rangos recomendados por Elgamal et al. (2002)

Parámetro	Unidad	Rango
Presión principal de confinamiento referencial (p'_r)	kPa	101
Módulo de corte referencial a bajas deformaciones (G_{ref})	MPa	70-110
Módulo de Bulk referencial (B_r)	MPa	203-250
Ángulo de fricción (ϕ)	°	5-55
Ángulo de transformación de fase (ϕ_{PT})	°	25-35

Parámetro de contracción 1 (c_1)	-	0-0.7
Parámetro de contracción 2 (c_2)	-	0.2-6
Parámetro de contracción 3 (c_3)	-	1.61-4.14
Parámetro de dilatación 1 (d_1)	-	0-0.6
Parámetro de dilatación 2 (d_2)	-	3-10
Parámetro de dilatación 3 (d_3)	-	0.21-1.05
Número de superficies de fluencia (NYS)	-	0-30
Parámetro de licuación (liq)	-	0-0.025

3.5 Validación de la metodología numérica con ensayos centrífuga

La metodología numérica fue primero validada con resultados de experimentos de centrifuga por otros investigadores como Elgamal *et al.* (2002) y con casos históricos por Gingery (2014). En este estudio, reproducimos uno de los resultados experimentales del proyecto VELACS (Arulanandan y Scott, 1993, Taboada y Dobry, 1998) y LEAP (Kutter *et al.*, 2018, Ziotopoulou, 2018).

Descripción general de los ensayos

El aparato de centrífuga consiste en un brazo con un contenedor al final de ésta, donde se coloca la caja laminar con la muestra de suelo (modelo a escala). El brazo rota alrededor de un soporte columna bajo la acción de fuerza centrífuga. El propósito de hacer girar los modelos en la centrífuga es aumentar las fuerzas g en el modelo para que las tensiones en el modelo sean iguales a las tensiones en el prototipo. Esta fuerza centrífuga actúa como una gravedad artificial asumiendo que el modelo de suelo posee una gravedad de $1g$ y la centrífuga genera N veces esa gravedad. Por ejemplo, la tensión debajo de una capa de suelo modelo de 0,1 metros de profundidad girada a una aceleración centrífuga de $50g$ produce tensiones equivalentes a las que se encuentran debajo de una capa prototipo de suelo de 5 metros de profundidad en el suelo. La Figura 3. 4 muestra un prototipo de aparato de centrífuga y contenedor con caja laminar. La ventaja de estos ensayos es que ofrecen la

habilidad de crear estados de esfuerzos relativamente realistas junto con propiedades de suelo medibles, condiciones de borde y condiciones de *input* específicas.



Figura 3. 4 Aparato de centrífuga y contenedor de caja laminar (Boulanger, 2009)

El proyecto *Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies* (VELACS) fue un esfuerzo cooperativo de investigación que involucró a ocho universidades (University of California at Davis and Berkeley, California Institute of Technology, Cambridge University, University of Colorado Boulder, Massachusetts Institute of Technology, Princeton University and Rensselaer Polytechnic Institute) para estudiar los problemas de licuación del suelo (Arulanandan y Scott , 1993) mediante 11 ensayos centrífugos. En ese proyecto, se realizó una serie de ensayos de centrifuga en una variedad de diferentes modelos de suelos saturados. En esta sección, presentamos la simulación numérica de la centrífuga modelo 2 del proyecto VELACS realizada en Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) de Taboada y Dobry (1998) y validado numéricamente por Elgamal *et al.* (2002). En esta prueba, el perfil del suelo consistió en arena de Nevada (ver más detalles en Taboada y Dobry (1998)) uniforme saturada de 20 cm de altura (modelo físico y simula 10 m de prototipo), de $D_r = 40\% - 45\%$, inclinado en 2° con respecto a la horizontal (más detalles en la Tabla 4). El experimento se llevó a cabo a 50 g de aceleración centrífuga esto corresponde a una

De manera similar, el proyecto *Liquefaction Experiments and Analysis Project* (LEAP) fue un esfuerzo cooperativo desarrollo entre el 2015 y 2017 entre varias universidades e institutos de investigación (UC Davis, University of Kyoto, George Washintong University, Kansai University, National Central University, University of Cambridge, Zhejiang University, Korea Advanced Institute of Science and Technology, K-Water Corporation, Instituto Politécnico Rennselaer, Ehime University) para investigar este fenómeno y sus efectos sobre geoestructuras (Kutter et al., 2018) mediante 24 ensayos centrífugos. La base de datos de los ensayos está disponible en la *Network for Earthquake Engineering Simulations* (NEES) (Carey et al., 2017). En esta sección, mostramos los resultados de de uno de los ensayos del proyecto LEAP de centrífuga realizada en el Instituto Politécnico Rennselaer (RPI) (Kutter et al., 2018). En este ensayo, la capa de suelo presenta 4.89 m de altura en el centro del modelo (dimensión de prototipo), y se utilizó arena uniforme de densidad media Ottawa F-65 (ver más detalles en Kutter *et al.* (2018)). El suelo tenía una densidad relativa de $D_r = 65\%$ y una pendiente de 5° . Un esquema de la caja laminar se muestra en la Figura 3. 7. La Figura 3. 7 muestra el sismo de entrada utilizado y aplicado a la base del modelo y así como su espectro de respuesta de pseudoaceleración con amortiguamiento correspondiente al 5%.

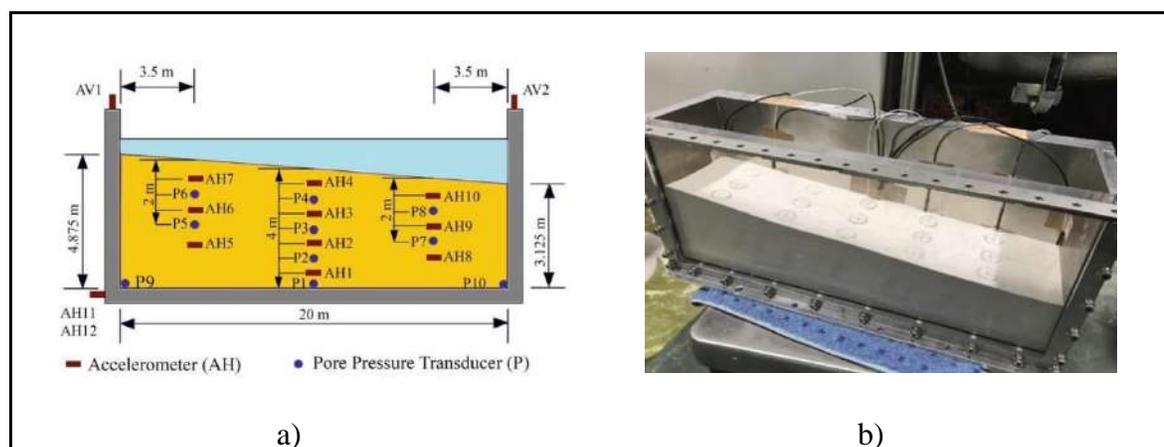


Figura 3. 7 a) Esquema del modelo de centrífuga de LEAP-2017 en unidades del prototipo b) Modelo físico antes de la saturación en *Ehime University* (Kutter et al., 2020)

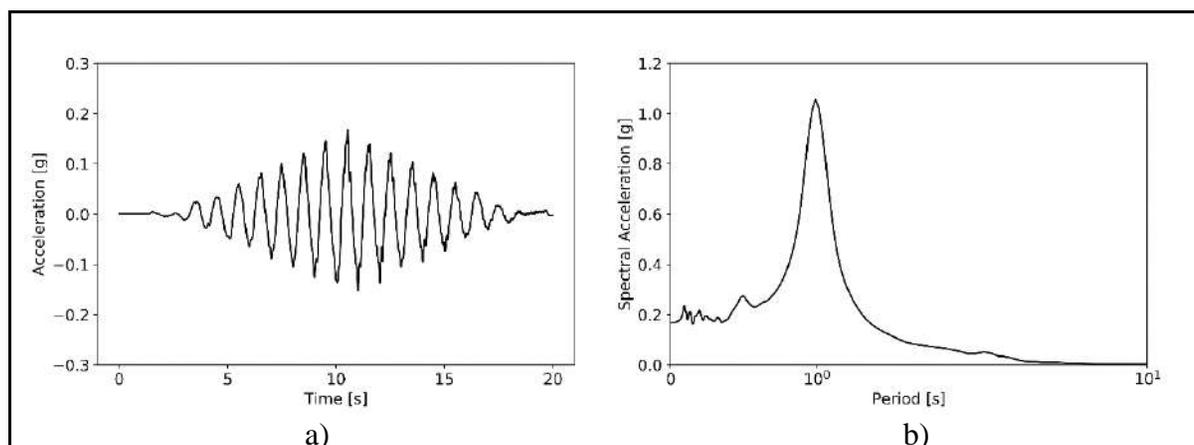


Figura 3. 8 *Input* del prototipo de RPI de LEAP-2017 a) Aceleración lateral en la base de la caja laminar de RPI-02 de LEAP-2017 b) Pseudoaceleración espectral con 5% de amortiguamiento en la base de la caja laminar

Parámetros del modelo

Como se mencionó anteriormente, el modelo constitutivo *PDMY02* tiene 13 parámetros de calibración para reproducir el fenómeno de licuación y de desplazamiento lateral. La Tabla 3. 2 muestra los parámetros utilizados para la arena Nevada ($D_r = 40\%$) y arena Ottawa F65 ($D_r = 65\%$). La calibración se realizó por ensayo y error partiendo de valores referenciales recomendados por Elgamal *et al.* (2002) para obtener un buen ajuste a las respuestas medidas en los ensayos de centrifugas. El ángulo de fricción (ϕ) y el ángulo de fase (ϕ_{PT}) se estimaron a partir de las pruebas triaxiales de VELACS (Arulmoli *et al.*, 1992) y LEAP (Kutter *et al.*, 2018) según Elgamal *et al.* (2002) y Ziotopoulou (2018). El módulo de corte referencial (G_{ref}) se estimó utilizando correlaciones de Seed *et al.* (1983) para la velocidad de onda de corte (V_s) y el módulo de Bulk (B_r) mediante correlación con la teoría de elasticidad ($B_r = 2G_{ref}(1 + \nu)/3(1 - 2\nu)$). Se utilizaron valores predeterminados para los parámetros de contracción, dilatación y licuación. ($c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3, liq$) y el número de superficies de fluencias (Elgamal *et al.*, 2015). La Tabla 3. 2 muestra los parámetros de calibración de VELACS M2-2c y de LEAP RPI-02.

Tabla 3. 2 Parámetro de calibración de ensayo VELACS M2-2c y LEAP RPI-02

Parámetro	Arena de Nevada	Arena de Ottawa
	Dr=40%	Dr=65%
p'_r (kPa)	101	101
G_{ref} (MPa)	90	110
B_r (MPa)	220	245
ϕ (°)	32	34
φ_{PT} (°)	26	32
c_1	0.67	0.21
c_2	3.1	5.2
c_3	2.24	4.14
d_1	0.06	2.48
d_2	3	3
d_3	0.27	0.45
NYS	20	20
liq	0.015	0.015

Comparación de resultados

Se verificó la confiabilidad de esta herramienta numérica comparándola con varias respuestas dinámicas de dos pruebas experimentales: M2-2 y RPI-02, de los proyectos VELACS y LEAP, respectivamente. La Figura 3. 9 y Figura 3. 10 muestran un buen ajuste (error menor al 10%) entre los valores experimentales y numéricos de exceso de presión de poros, aceleraciones horizontales y desplazamientos laterales de estas dos pruebas, evaluadas en diferentes profundidades.

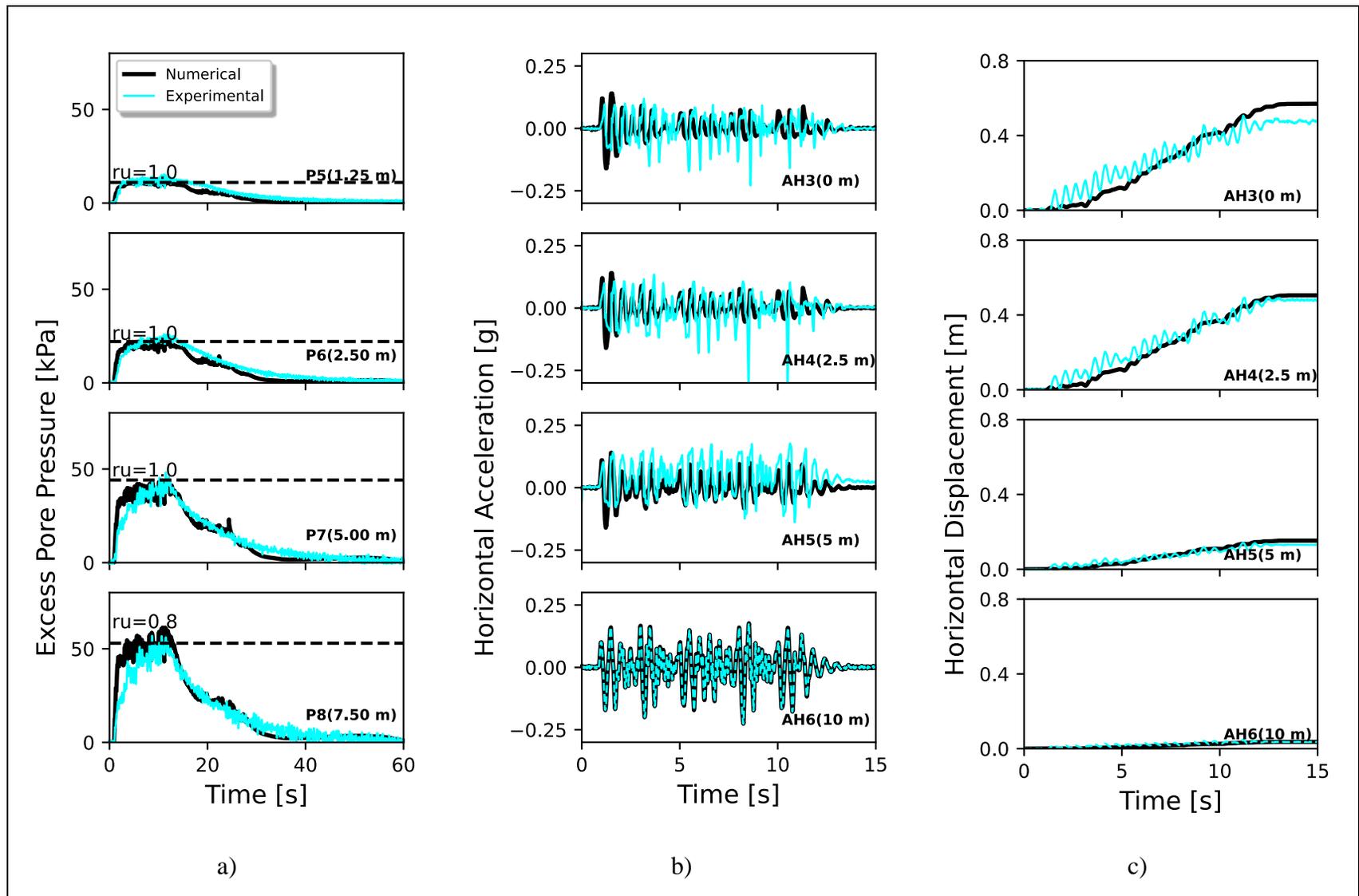


Figura 3.9 Comparación de resultados numéricos y experimentales a) exceso de presión de poro b) aceleración horizontal c) desplazamiento horizontal en diferentes profundidades del ensayo M2-2 VELACS

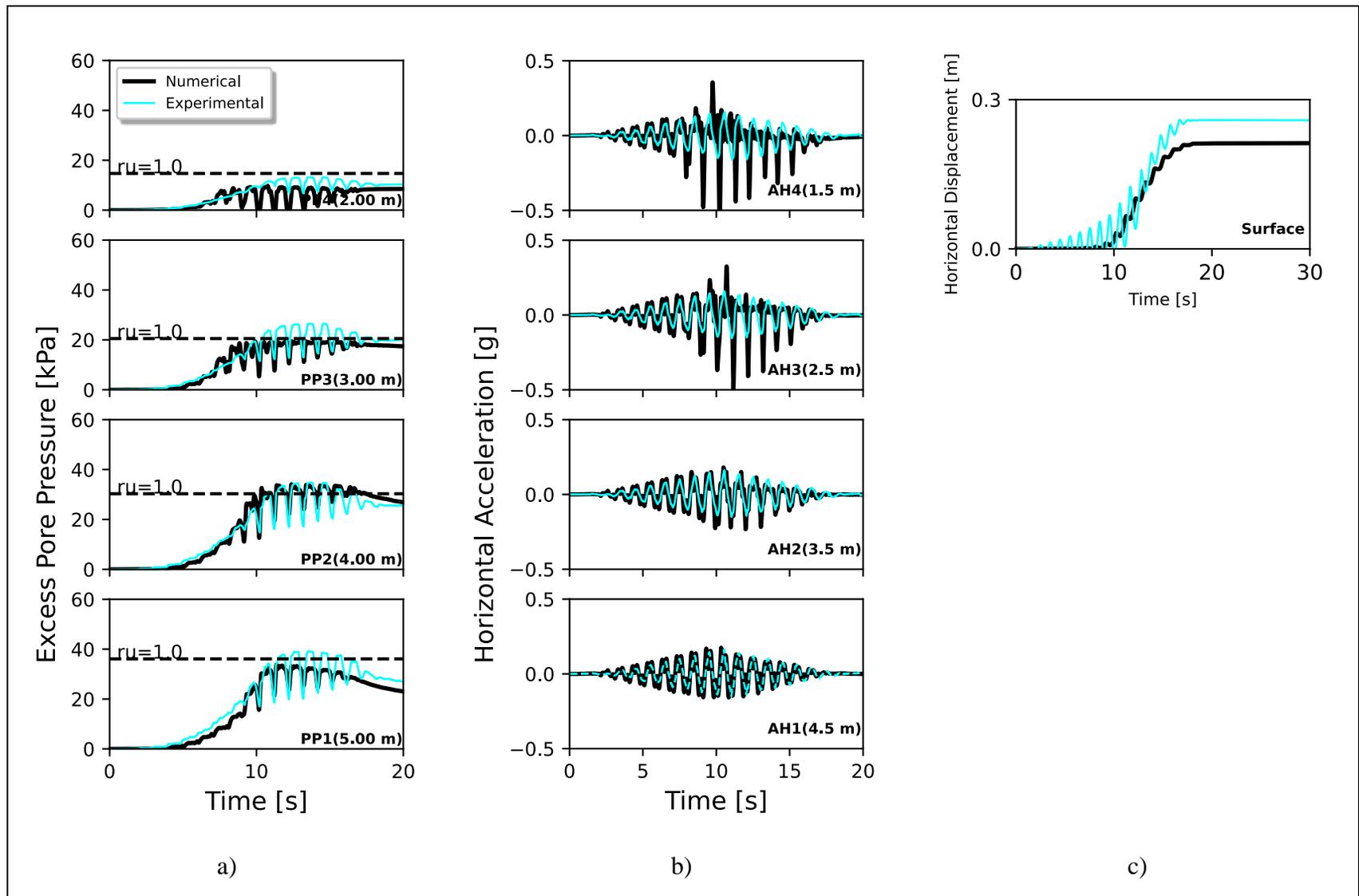


Figura 3. 10 Comparación de resultados numéricos y experimentales a) exceso de presión de poro b) aceleración horizontal c) desplazamiento horizontal en diferentes profundidades del ensayo RPI-02 LEAP

3.6 Comparación con casos históricos

La evaluación de la metodología seleccionada utilizando casos históricos es más desafiante debido a la variabilidad inherente de las propiedades del suelo y los terremotos, y al desconocimiento de todos los datos de entrada del problema. Se simuló la respuesta de dos casos de desplazamiento lateral registrados durante terremotos de subducción de gran magnitud: Puerto Lo Rojas, en el terremoto de Maule 2010 Mw 8.8, y el puente Matanuska en el terremoto de Alaska 1964 Mw 9.2. Dada la existencia de los efectos del sitio, solo los movimientos fuertes registrados en las estaciones de roca son adecuados para este tipo de estudio (De la Maza *et al.*, 2017). Para el caso de Chile, se usaron los registros de la Estación Rapel (34.0 S 71.6 W) de ambas componentes horizontales ($PGA_{NS} = 0.20$ g y $PGA_{EW} = 0.19$ g), donde PGA = Peak Ground Acceleration. Para el caso de Alaska, se utilizaron registros sintéticos estimados por Mavroeidis *et al.* (2008) para la ciudad de Anchorage en ambos componentes horizontales ($PGA_{NS} = 0,25$ g y $PGA_{EW} = 0,23$ g) debido a la falta de instrumentación sísmica en esa zona durante esa época.

Descripción de condiciones del terreno

Para el sitio de Lo Rojas, existe información bien documentada sobre estratificación del suelo, pruebas *in situ*, y pruebas de laboratorio documentadas en De la Maza *et al.* (2017) y Barrueto *et al.* (2017). Asimismo, Bartlett y Youd (1992) y Gillins y Bartlett (2014) muestran ensayos de campo del sitio de Matanuska. Para el sitio de Lo Rojas, la misma sección de modelado seleccionada por De la Maza *et al.* (2017) fue utilizada para la validación. Este modelo geotécnico fue desarrollado de acuerdo con la batimetría y prueba de campo, información proporcionada por la Departamento Portuario de Dirección de Obras Públicas. Según Barrueto *et al.* (2017), el perfil del suelo estaba compuesto por cuatro unidades de suelo, de arriba a abajo: arena mal graduada (~ 10 m de espesor), arena arcillosa (~ 9 m de espesor), arcilla de alta plasticidad (~ 5 m de espesor) y arcilla de baja plasticidad (hasta 70 m de profundidad antes de un suelo muy cementado). Se realizaron varias pruebas de laboratorio para obtener los parámetros mecánicos para las capas del suelo: triaxial

monotónico, triaxial cíclico y pruebas de columna resonante (detalles en De la Maza et al. (2017) y Barrueto et al. (2017)).

Para el sitio de Matanuska, la sección de modelado se desarrolló considerando los sondajes tomados en el Railroad Bridge Mile Post cerca del río Matanuska (Bartlett y Youd, 1992). De acuerdo a Gillins y Bartlett (2014), el perfil de suelo seleccionado, de arriba a abajo, está compuesto de grava arenosa (~ 6 m de espesor), grava bien graduada (~ 2 m de espesor), arena pobremente graduada (~ 5 m de espesor), arena arcillosa (~ 9 m de espesor) y arcilla de baja plasticidad (hasta 70 m de profundidad antes de un suelo altamente cementado).

La Tabla 3. 3 y Tabla 3. 4 muestran los parámetros utilizados en los modelos de los sitios de Lo Rojas y Matanuska, respectivamente.

Tabla 3. 3 Parámetros utilizados para el sitio Lo Rojas

SUCS	Prof.	G_{ref}	Br	ϕ	φ_{PT}	Su	NYS	liq
	(m)	(MPa)	(MPa)	(°)	(°)	(kPa)		
SP	0-10	78.5	240	31.4	26.5	-	25	0.015
SC	10-20	100	300	35	26	-	20	0.015
CH	20-35	60	300	-	-	150	20	-
CL	35-70	60	300	-	-	150	20	-

Tabla 3. 4 Parámetros de utilizados para el sitio Matanuska

SUCS	Prof.	G_{ref}	Br	ϕ	φ_{PT}	Su	NYS	liq
	(m)	(MPa)	(MPa)	(°)	(°)	(kPa)		
SM	0-6	78.5	240	31.6	26.5	-	25	0.015
GP	6-9	100	300	31.4	26	-	20	0.015
SM	9-17	78.5	240	31.4	24	-	25	0.010
SP	17-25	78.5	240	31.4	24	-	25	0.015
CL	25-70	60	300	-	-	150	20	-

Registros sísmicos seleccionados

El terremoto de Maule 2010 Mw 8.8 causó daños extensivos en puertos y puentes (Bray *et al.* 2012 y Ledezma *et al.* 2012). Desplazamientos laterales significativos fueron causados en el Puerto Lo Rojas en Coronel, Región del Bio Bio. En este caso, los registros de aceleraciones en estaciones sobre roca fueron: RAP (Rapel), COV (Convento) y USM (Universidad Santa María). Según el modelo de desplazamiento cosísmico de la USGS (Pollitz *et al.*, 2011) la distancia tridimensional a la estación Rapel y la falla entre placas es de 31 km. Esa distancia es muy similar al sitio de Lo Rojas, de aproximadamente 32 km. Por esa razón, De la Maza *et al.* (2017) seleccionaron el registro sísmico de la estación Rapel (RAP). En esta investigación se usó el mismo criterio para seleccionar la estación y simular el desplazamiento lateral en el sitio Lo Rojas. La Figura 3. 11 muestra el registro elegido (en ambas direcciones) con una duración significativa de aproximadamente 34 s y un PGA de 0.2 g.

El terremoto de Alaska 1964 Mw 9.2 causó fallas en el suelo y el colapso de estructuras por desplazamiento lateral y el tsunami asociado causaron alrededor de 130 muertes (Bartlett y Youd, 1995). Según Mavroeidis *et al.* (2008) no había ningún instrumento de registro sísmico operativo cuando se produjo el evento destructivo, por lo que no se realizaron mediciones directas de los movimientos del terreno disponible. En consecuencia, en esta investigación se usó un movimiento del suelo simulado en el sitio de Anchorage compartido por Mavroeidis *et al.* (2008) para reproducir el caso de desplazamiento lateral. La Figura 3. 12 muestra este registro (ambas direcciones) con una duración significativa de aproximadamente 152 s y un PGA de 0.25 g.

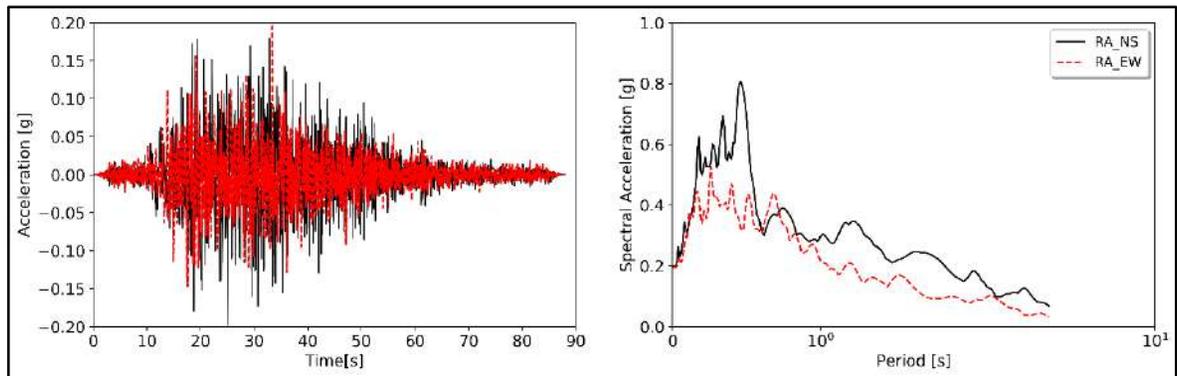


Figura 3. 11 Registro de Rapel a) Historial de tiempo de aceleración Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW) para la estación Rapel, (b) aceleración espectral (5% de amortiguamiento) de los mismos.

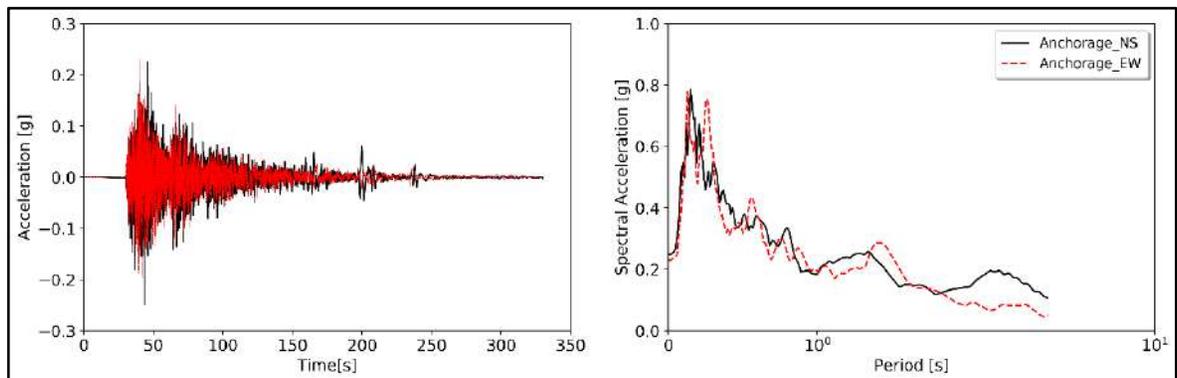


Figura 3. 12 Registro de Anchorage a) Historial de tiempo de aceleración Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW), (b) aceleración espectral (5% de amortiguamiento) de los mismos.

Comparación de resultados

Para cada sitio se analizaron y simularon los desplazamientos horizontales inducidos por licuación. La pendiente promedio del sitio de Lo Rojas se seleccionó de la sección transversal del modelo geotécnico de De la Maza *et al.* (2017). En el caso de Matanuska, Youd *et al.*, (2002) y Rauch (1997) registraron en su base de datos la pendiente del terreno de esa ubicación.

La Figura 3. 13 y la Figura 3. 14 muestran los resultados numéricos de los casos históricos en términos de aceleración, relación de exceso de presión de poros y desplazamiento lateral en tiempo historia. Para verificar el desencadenamiento de licuación se utilizaron los criterios de Ishihara (1993) basados en la presión de poro ($r_u = 1$) y deformaciones de

cortes ($\gamma > 3\%$). Los resultados numéricos muestran que la capa superior de arena pobremente graduada (SP) licuó con una relación de presión de poro (r_u) de 1.0 después de 20 segundos para el caso de Lo Rojas y de $r_u = 1$ a los 50 segundos para el caso de Matanuska. Los resultados de la Tabla 3. 5 demuestran la validez del modelo propuesto donde los desplazamientos simulados estuvieron razonablemente cerca de los medidos, con una diferencia máxima de alrededor del 30%.

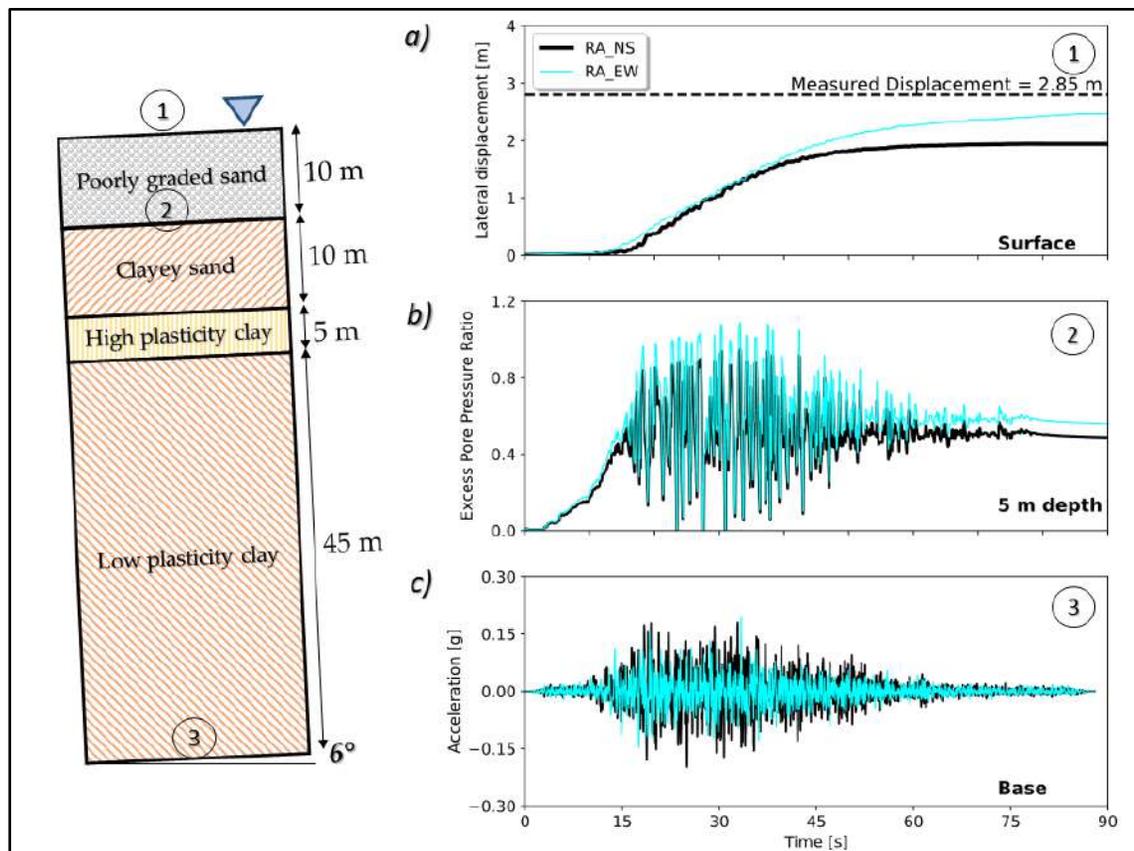


Figura 3. 13 Resultados numéricos de Lo Rojas usando ambas componentes horizontales de Rapel a) Tiempo historia de desplazamiento en superficie b) Tiempo historia de ratio de exceso de presión de poro a 5 m de profundidad c) Tiempo historia de aceleración en la base del modelo

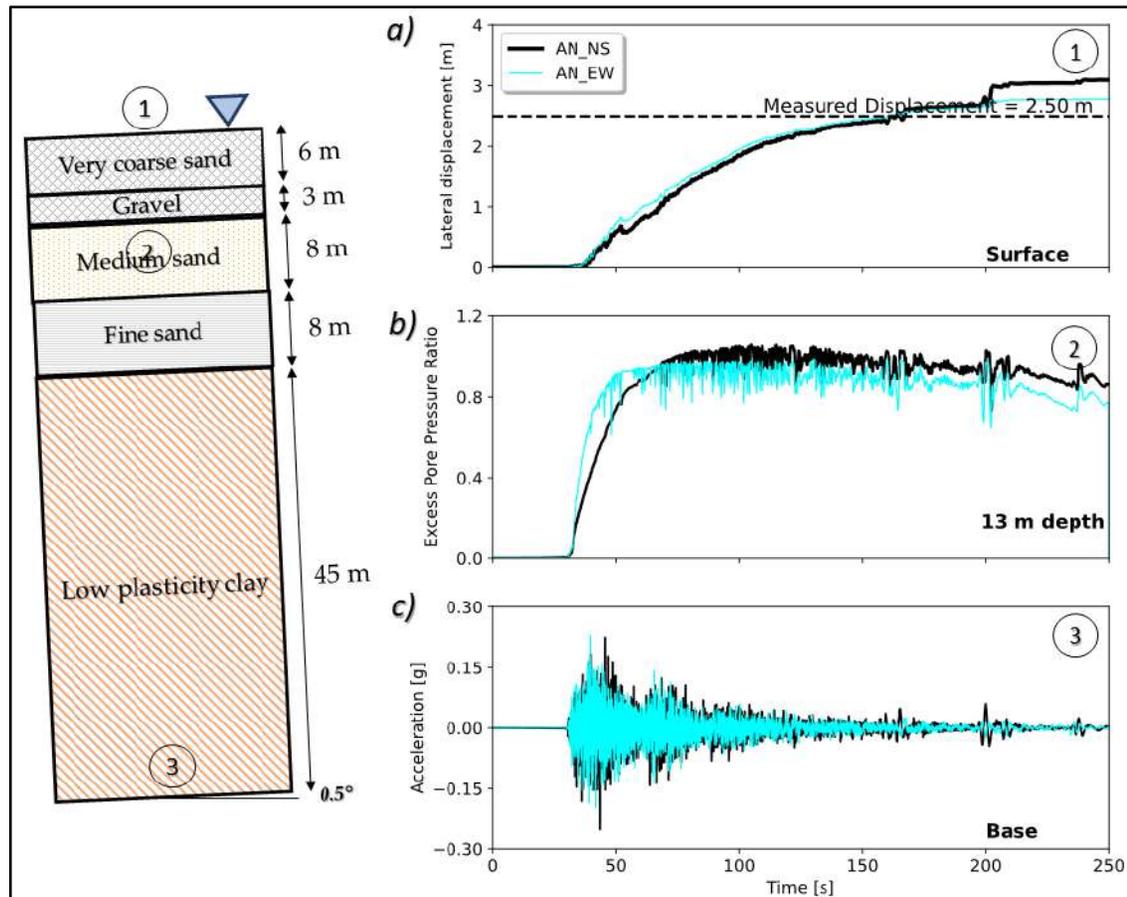


Figura 3. 14 Resultados numéricos de Matanuska usando ambas componentes horizontales de Anchorage a) Tiempo historia de desplazamiento en superficie b) Tiempo historia de ratio de exceso de presión de poro a 13 m de profundidad c) Tiempo historia de aceleración en la base del modelo

Tabla 3. 5 Comparación de resultados simulados con casos históricos

Caso Histórico	Desplazamiento máximo medido	Desplazamiento máximo simulado	Ratio
Lo Rojas	2.85 m	2.44 m	1.20
Matanuska	2.50 m	3.10 m	1.30

3.7 Resumen y conclusiones

En este capítulo, se describieron las razones de la elección tanto de la plataforma numérica, elemento y modelo constitutivo usado para la simulación del desplazamiento lateral inducido por licuación. Una breve descripción de cada uno de los parámetros de calibración del modelo, así como los rangos en lo que se deben encontrar para suelos arenosos

saturados desde muy sueltos a muy densos, es proporcionada en el capítulo. Finalmente, la validación de la metodología numérica escogida se realizó en comparación con resultados obtenidos en ensayos centrífugos o medidos durante casos históricos.

Las conclusiones más relevantes de este capítulo son:

1. La plataforma numérica *OpenSees* fue seleccionada en base a sus capacidades demostradas para capturar la respuesta del suelo (Mazzoni *et al.*, 2006) sujeta a eventos sísmicos y debido su disponibilidad de modelos constitutivos avanzados capaces de reproducir la movilidad cíclica o licuación. Otros motivos importantes fueron su licencia de uso libre y a la eficacia computacional para modelaciones paramétricas en cantidad.
2. El modelo constitutivo *PDMY02* fue elegido debido a la simplicidad con la que los parámetros pueden obtenerse a través de ensayos de laboratorio o in situ. Además, del amplio uso exitoso que ha tenido por parte de otros autores como Gingery (2014), Karimi y Dasthi (2016), Rajeswari y Sakar (2021) y Sadeghi *et al.* (2021).
3. El elemento *FourNodeQuapUP* fue seleccionado debido a que emplea un solo punto de Gauss lo cual reduce significativamente el tiempo de ejecución del análisis sin reducir la precisión de los resultados en comparación con otros elementos (Sadeghi *et al.*, 2021).
4. La herramienta numérica mostró un buen ajuste con ensayos centrífuga en términos de tiempo historia de aceleración, desplazamiento lateral y presión de poro en diferentes profundidades. El error registrado fue menor al 10%.
5. Finalmente, la comparación con casos históricos en términos de desplazamiento máximo lateral observado en superficie mostró una razonable simulación con una diferencia máxima de 20%.

4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO NUMÉRICO

La metodología numérica validada en el Capítulo 3 es usada con la finalidad de estudiar las variables que afectan el desplazamiento lateral en eventos de subducción de gran magnitud mediante un estudio paramétrico. Los perfiles de suelo usados en este capítulo son una idealización de pendientes infinitamente extensas excitadas por una serie de movimientos sísmicos (Figura 4. 1). El rango de sismos usados y los perfiles del suelo se seleccionaron tomando en cuenta una variedad de condiciones de casos de desplazamiento lateral observados en el campo. Todos los sismos de entrada pertenecen a registros de aceleración tiempo historia de terremotos de subducción de gran magnitud ($M_w > 7.5$).

4.1 Introducción

Los modelos empíricos (comúnmente usados en la ingeniería práctica) presentan un problema en cuanto a la limitación de datos de los registros históricos usados para su formulación: escasos datos medidos en campo de desplazamiento lateral para sismos de subducción de gran magnitud, por lo que la mayor base de datos es de casos de sismos corticales. Una forma de superar esta limitación es mediante un estudio paramétrico numérico que permita la generación de una base de datos sintética robusta para entender cómo las condiciones geotécnicas y sísmicas afectan a las respuestas de sitio. En el caso de este trabajo, la variable de respuesta es: el desplazamiento máximo horizontal en superficie.

La metodología mencionada ha sido ampliamente usada en geotecnia sísmica por diferentes autores como Valsamis et al. (2010) para la evaluación del desplazamiento lateral inducido por licuación en sismos corticales, Travasarou (2003) para cálculo de desplazamientos sísmicos en taludes, Karimi y Dashti (2016) en la estimación de asentamientos inducidos por licuación en cimentaciones superficiales, Olson et al. (2020) para la evaluación de factores que influyen en el potencial de licuación, y Rajeswari and Sarkar (2021) en el cálculo de desplazamiento lateral inducido por licuación en pilotes.

4.2 Perfiles sintéticos de suelo

Los 72 perfiles sintéticos de suelo (Figura 4. 1) se seleccionaron para representar variaciones de un depósito de arena aluvial de pendiente suave. Los perfiles usados se analizaron considerando la combinación de espesor de la costra no licuable ($H_{\text{crust}} = 2.5$ y 5 m), espesor de la capa licuable ($H_{\text{liq}} = 5, 10, 15$ y 20 m), densidad relativa de la capa licuable ($D_r = 30, 50$ y 70 %) y de inclinación del terreno ($i = 0.5, 1.5$ y 2.5°). El nivel del agua subterránea se asumió en la superficie en todos los casos y la base en la parte inferior del perfil se modeló como un lecho rocoso rígido. Se verificó la sensibilidad de usar diferente *bedrock*: *hard rock*, *medium rock* y *soft rock* y no hubo variaciones significativas en los resultados finales.

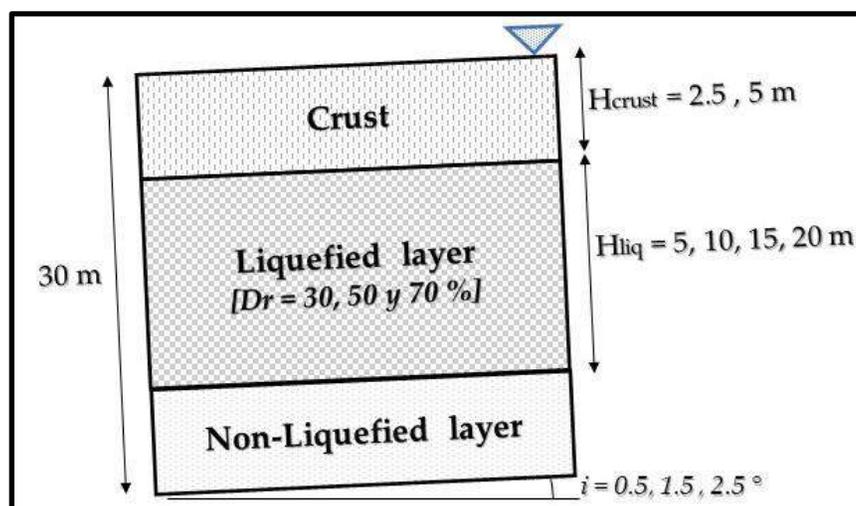


Figura 4. 1 Perfil de suelo sintético usado en el análisis paramétrico de desplazamiento lateral

4.3 Base de datos sísmica

Se obtuvo un conjunto de 102 registros de aceleración de diferentes bases de datos: KitNET (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/>), CISMID (<http://www.cismid.uni.edu.pe/>), SIBER-RISK (<https://www.siberrisk.cl/>) y, RAI-UNAM (<https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Registro.aspx>). Los registros fueron seleccionados de terremotos de subducción interplaca de magnitud $7.9 < M_w < 9.0$, medidos en sitios tipo A y B según NEHRP con $V_{s30} \geq 760$ m/s. Así mismo se

consideraron $PGA > 0.05g$. La Tabla 4. 1 muestra los terremotos considerados y la cantidad de registros por cada terremoto.

Tabla 4. 1 Terremotos y registros utilizados en el estudio paramétrico numérico

País	Terremoto	Magnitud (Mw)	Registros	Fuente
Chile	Maule 2010	8.8	17	SIBER-RISK
	Iquique 2014	8.2		
Perú	Lima 1966	8.1	12	CISMID
	Lima 1974	8.1		
	Moquegua 2001	8.4		
	Pisco 2007	7.9		
Japón	Tokachi-oki 2003	8.3	63	Kit-NET
	Tohoku 2011	9.0		
México	Michoacán 1985	8.0	10	UNAM

La Figura 4. 2 muestra un histograma de la distribución de valores de las medidas de intensidad obtenidas de los diferentes registros sísmicos de las bases de datos usadas. Las fórmulas y definiciones de cada medida de intensidad se muestran en el apartado 4.5 de este capítulo en la Tabla 4. 3.. Estas medidas de intensidad sísmica cuantifican las características del movimiento sísmico para describir su potencial destructivo. En los últimos años se han usado distintas medidas de intensidad sísmica, la medida de intensidad más usada para el análisis de estructuras geotécnicas es la pseudo-aceleración espectral medida en el periodo fundamental de vibración de la estructura de interés y se representa por $S_a(T_1)$. La finalidad de esta investigación ha sido buscar nuevas medidas de intensidad pero en este caso para predecir el desplazamiento lateral máximo inducido por licuación para sismos de subducción de gran magnitud.

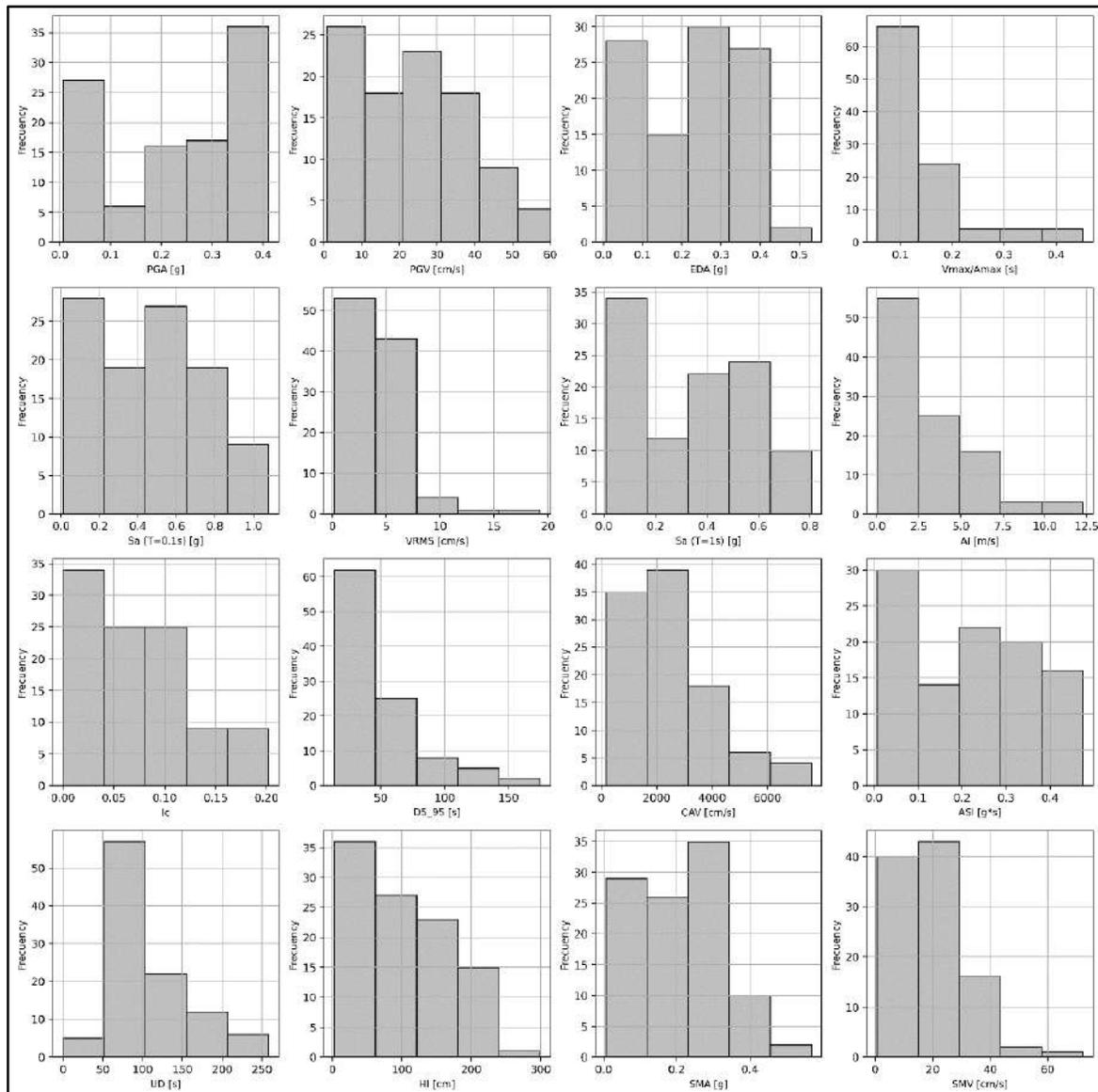


Figura 4. 2 Histograma de medidas de intensidad sísmica de la base de datos usada en esta investigación

4.4 Procedimiento de modelación

Se realizaron 7344 análisis de respuesta de sitio no lineal unidimensionales (1-D) utilizando una columna de elementos finitos cuadriláteros $u-p$ de cuatro nodos en deformación plana. Los registros de aceleración tiempo historia se aplicaron en los nodos de la base rígida de los modelos.

Los análisis realizados para este estudio utilizaron la amortiguación de Rayleigh para incorporar el amortiguamiento del suelo para deformaciones pequeñas. La integración numérica fue realizada usando el método de Newmark con $\gamma = 0.65$ y $\beta = 0.25(\gamma + 0.5)^2$ para introducir amortiguación y mantener la estabilidad numérica complementada con el amortiguamiento de Rayleigh.

Para evitar que tanto el contenido de frecuencia de la onda de entrada como las características de velocidad de la onda del sistema afecten la precisión numérica de la transmisión de la onda, la discretización del modelo se realizó de manera que el tamaño máximo del elemento finito sea menor que la décima parte de la longitud de la onda asociada con el componente de frecuencia más alto del sismo de entrada según Kuhlemeyer y Lysmer (1973).

Todos los análisis fueron realizados con posibilidad de generación de presión intersticial. Para las capas licuables, se utilizó el modelo PDMY2. Por otro lado, se usó el modelo PIMY ($D_r = 90\%$) para elementos por encima y por debajo de la capa potencialmente licuable.

El grado de libertad de la presión de poros en los elementos finitos se estableció libre en los nodos debajo de la superficie freática, incluidos los nodos base. Bajo esta condición, durante la fase inicial de consolidación por gravedad, se desarrolla una condición hidrostática desde la superficie freática hacia abajo, mientras que la presión de poros sobre la superficie freática es cero. Por otro lado, durante la carga dinámica en el caso de generación de presión de poros, se permite que éstas cambien debajo de la superficie freática como resultado de la contracción y dilatación del suelo.

Las simulaciones tienen dos etapas. La primera etapa es la aplicación de la carga de gravedad. En esta etapa el peso propio del suelo es aplicado para asegurar que el suelo se encuentre bajo el estado de esfuerzos adecuado. El efecto del terreno inclinado es simulado aplicando la gravedad en la dirección de la pendiente equivalente al seno del ángulo de inclinación multiplicado por el peso propio del suelo. La base del terreno se encuentra fija en las dos direcciones y los nodos de los bordes izquierdo y derecho pueden moverse en la

dirección vertical para simular las cargas por gravedad. Los otros nodos del modelo pueden moverse vertical y horizontalmente. La segunda etapa es la aplicación de la carga sísmica. Los bordes perpendiculares a la carga sísmica están unidos para imponer un desplazamiento igual de nodos a la misma profundidad. Por otro lado, los bordes paralelos a la carga sísmica no pueden moverse en la dirección perpendicular a su plano. Además, se emplean *dashpots* viscosos en los bordes laterales para simular la condición de borde absorbente (Lysmer y Kuhlemeyer, 1969). El *input* de aceleración se aplica en la base del modelo. Los modelos se corrieron hasta que el exceso de presión de poros se disipara por completo después del terremoto.

4.5 Resultados paramétricos

Se realizaron 7344 análisis de respuesta de sitio no lineal. El objetivo principal fue obtener, para cada modelo, el desplazamiento lateral máximo en la superficie y correlacionarlo con diferentes medidas de intensidad (IM) y parámetros de geometría o propiedades del suelo, previo a verificar la ocurrencia de licuación. El coeficiente de determinación: R^2 (Fisher, 1926), el coeficiente de correlación de Pearson: ρ (Pearson, 1895) y el coeficiente de correlación de rango de Spearman: r_s (Spearman, 1910) se utilizaron para cuantificar la correlación entre los desplazamientos laterales en la superficie (LD) y las variables predictoras. Estos coeficientes de correlación pueden variar de -1 a +1, donde -1 significa correlación negativa total, 0 significa que no hay correlación y +1 significa correlación positiva total.

Verificación de ocurrencia de licuación

Según Olson et al. (2020), los criterios más ampliamente usados para definir el desencadenamiento de la licuación son aquellos relacionados con el ratio de exceso de presión de poro ($r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_c}$) y las deformaciones de corte ($\gamma = \frac{\tau}{G}$). Donde Δu = exceso de presión de poros, σ'_c = esfuerzo inicial efectivo, τ = esfuerzo cortante y G = módulo de corte.

Para condiciones de campo, Kramer et al. (2015) menciona que una capa de arena suelta

superficial puede desarrollar licuación a un ratio de presión de poro de $r_u \sim 0.8$ con deformaciones significativas. En cuanto al criterio de deformaciones de corte, (Boulanger e Idriss, 2004) recomiendan verificar que éstas alcancen de 1.4 a 2.0 % de amplitud simple.

La Figura 4. 3 y Figura 4. 4 muestran el desencadenamiento de la licuación para algunos de los resultados de la modelación paramétrica por región: Chile y Perú (Figura 4. 3) y Japón y México (Figura 4. 4). En todos los casos se cumplen ambos criterios de licuación $r_u > 0.8$ y $\gamma > 1.4\%$ de amplitud simple.

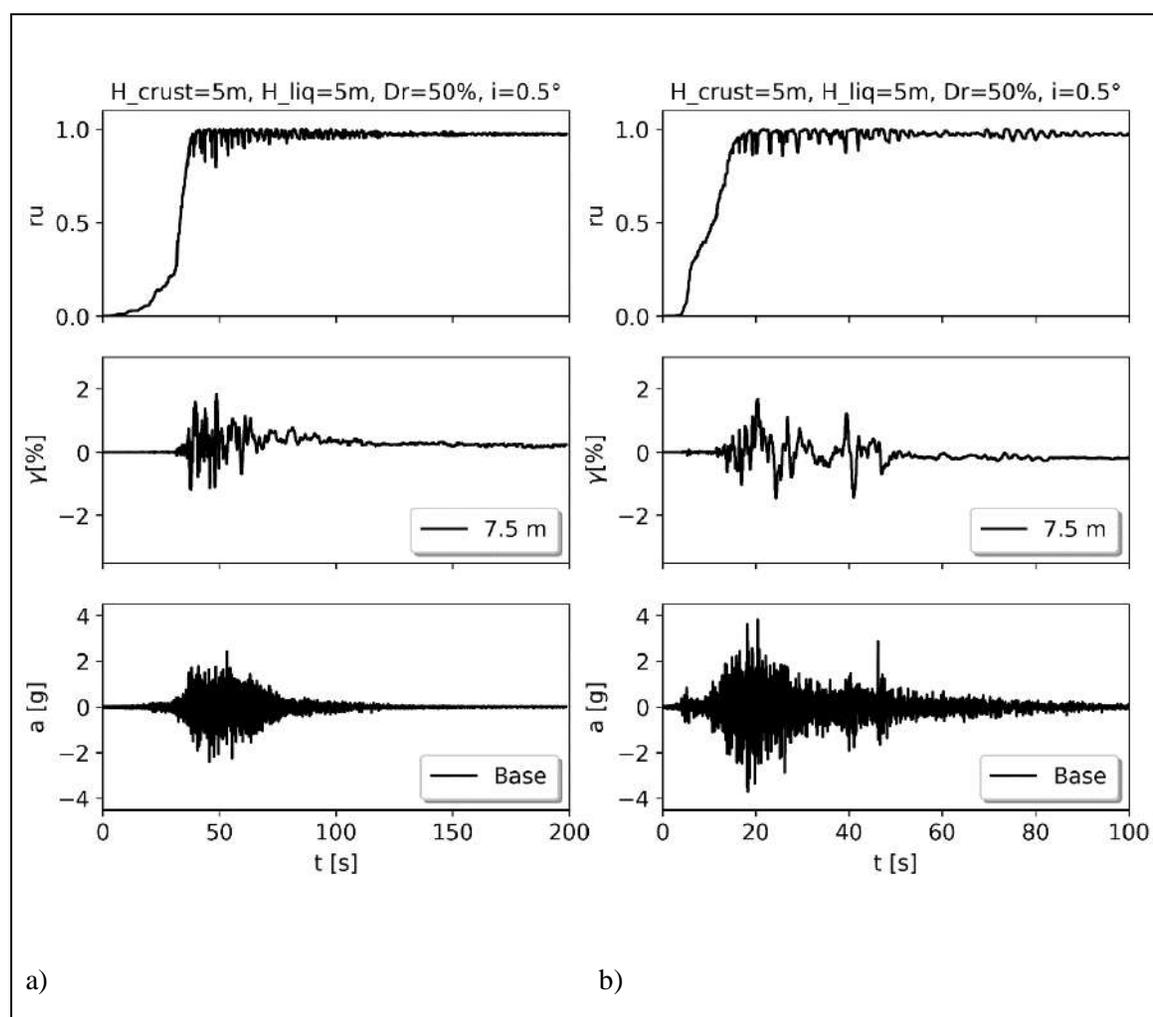


Figura 4. 3 Tiempo historia de ratio de presión de poro y deformaciones de corte para un perfil de suelo de $H_{crust}=5m$, $H_{liq}=5m$, $Dr=50\%$, $i=0.5\%$ para a) Registro sísmico MOQ001_20010623153300NS de Moquegua 2001 Mw 8.4 b) Registro sísmico T05A_EW_P1_100Hz de Iquique 2014 Mw 8.2

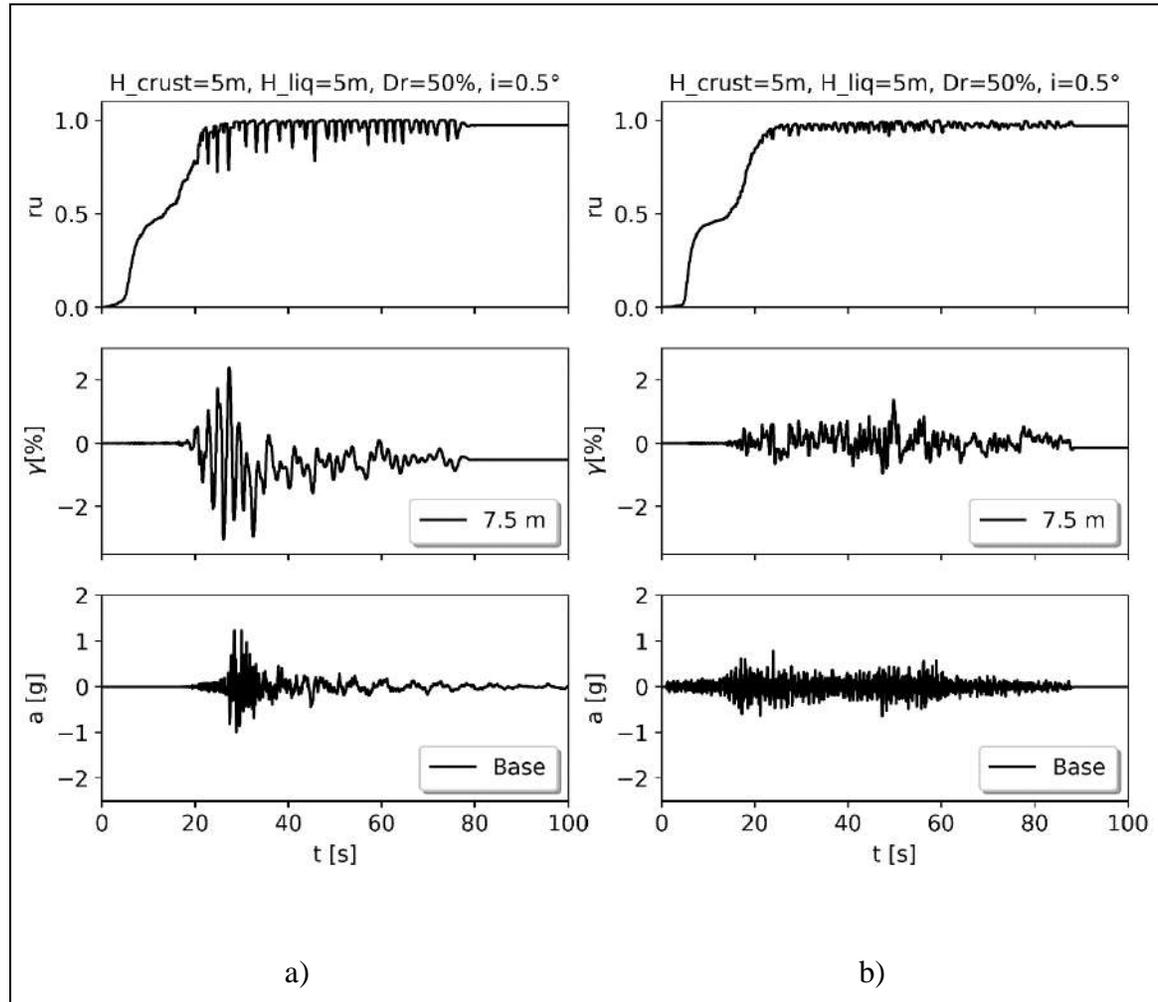


Figura 4. 4 Tiempo historia de ratio de presión de poro y deformaciones de corte para un perfil de suelo de $H_{crust}=5m$, $H_{liq}=5m$, $D_r=50\%$, $i=0.5^\circ$ para a) Registro sísmico CHBH121103111446NS1 de Tohoku 2011 Mw 7.9 b) Registro sísmico APAT8509191EW de Michoacán 1985 Mw 8.0

Influencia de los parámetros del suelo

A partir de los resultados del análisis paramétrico de respuesta de sitio no lineal en campo libre se identificaron parámetros influyentes del suelo y tendencias claves del máximo desplazamiento lateral en superficie inducido por licuación.

La Figura 4. 5 muestra, a modo de ejemplo, tendencias representativas de los desplazamientos laterales inducidos por licuefacción versus estos parámetros del sitio para un subconjunto de los análisis (20 registros de aceleración) en diferentes perfiles de suelo con variación paramétrica de la variable analizada. En la Figura 4. 5a se muestra que el

desplazamiento lateral inducido por licuación disminuye significativamente a medida que en la capa de suelo licuable aumenta la densidad. La reducción del desplazamiento lateral es más pronunciada para arenas de densidad media (D_r aumentando de 50% a 70%) que para las arenas de baja densidad (D_r aumentando del 30% al 50%). También se observa que para desplazamiento menores a 0.20 m la influencia con densidad media la variación es casi nula. Por otro lado, la Figura 4. 5b nos permite apreciar que la variación del espesor de la costra no influye en el comportamiento del desplazamiento lateral inducido por licuación.

Otros de los parámetros o variables de suelo evaluada fue el espesor de la capa licuable (H_{liq}) y la inclinación del terreno (i). El desplazamiento lateral inducido por licuefacción aumenta significativamente a medida que el espesor de la capa licuable crece (Figura 4. 5c). De igual manera, la Figura 4. 5d nos muestra incremento del desplazamiento lateral a medida que se incrementa la pendiente del terreno, lo cual era lo esperado. Por lo tanto, estos resultados muestran que estos dos últimos parámetros: espesor de capa licuable e inclinación del terreno (H_{liq} , i) junto con la densidad relativa de la capa licuable (D_r) influyen en gran medida en el desplazamiento lateral inducido por licuación. Es importante mencionar que para valores de desplazamiento lateral menos a 0.30 m las variables en todos los casos de la Figura 4. 5 no son influyentes ya que estos valores se mantienen relativamente constantes.

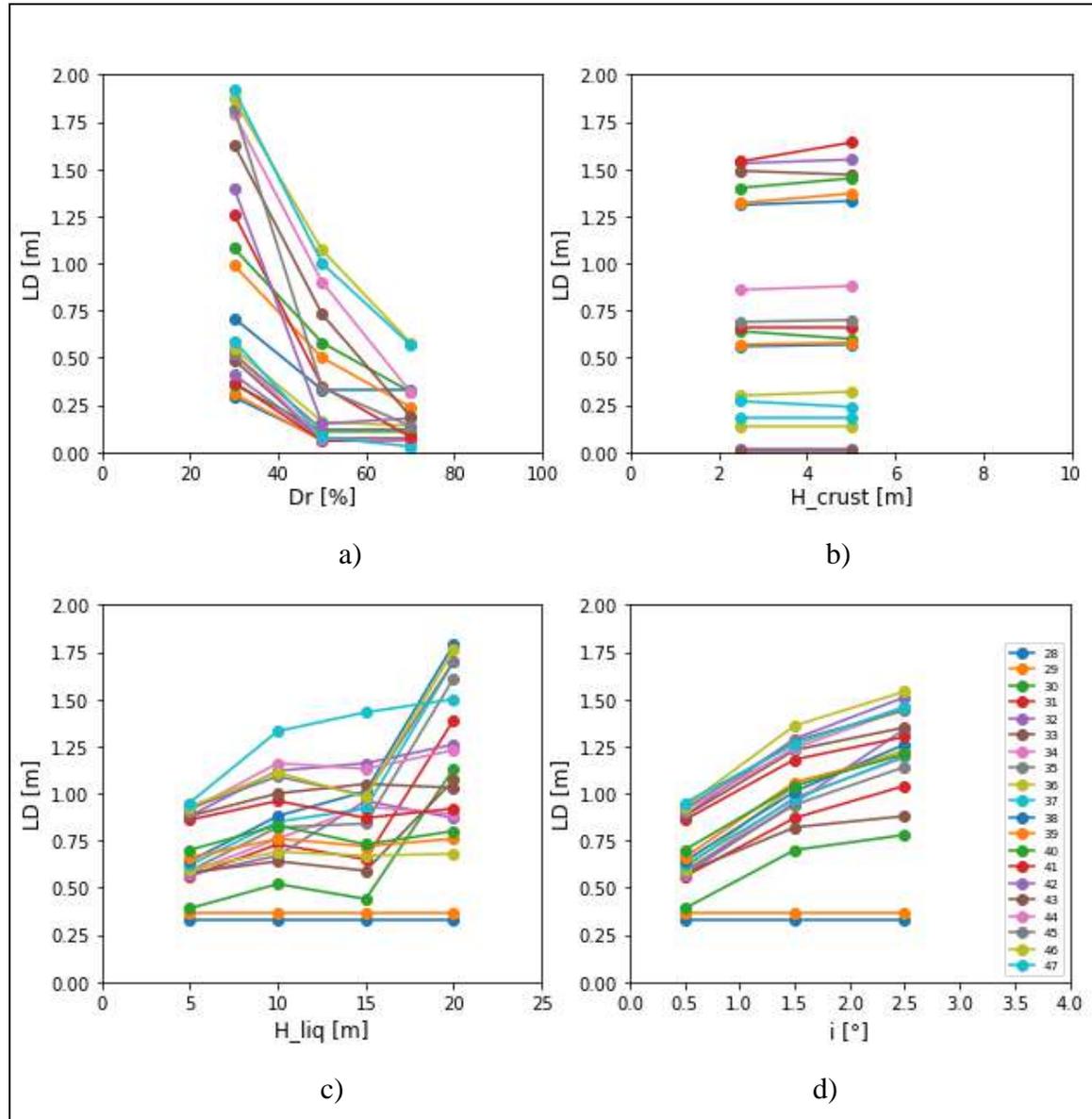


Figura 4.5 . Desplazamiento lateral versus parámetros del suelo a) Densidad relativa para un perfil $H_{crust}=5m$, $H_{liq}=5m$, $i=0.5^\circ$, b) Espesor de costra para un perfil $H_{liq}=5m$, $D_r =70\%$, $i=0.5^\circ$, c) Espesor de capa licuable para un perfil $H_{crust}=5m$, $D_r =70\%$, $i=0.5^\circ$ y d) Inclinación del terreno para un perfil $H_{crust}=5m$, $H_{liq}=5m$, $D_r =70\%$. *El número indicado en la leyenda hace referencia al número de sismo usado indicado en el anexo 1.

Influencia de los parámetros del sismo

El propósito general de esta investigación fue identificar aquellos parámetros que mejor caracterizan el desplazamiento lateral inducido por licuación para terremotos de subducción de gran magnitud. En este apartado, 21 medidas de intensidad (IM) candidatas se

investigaron para analizar su correlación con el desplazamiento lateral máximo en superficie. Se utilizaron cinco grupos de IM para analizar la relación (Hu y Liu, 2019): (i) *peak*, i.e.,; aceleración máxima del suelo, velocidad máxima del suelo, desplazamiento máximo del suelo, aceleración de diseño efectiva, aceleración máxima sostenida, velocidad máxima sostenida, (ii) *spectrum*, i.e.,; aceleración espectral, velocidad espectral, desplazamiento espectral, aceleración máxima, velocidad máxima efectiva, intensidad del espectro de aceleración, intensidad del espectro de velocidad, intensidad espectral de Housner, (iii) *integral*, i.e.,; intensidad de Arias, velocidad absoluta acumulada, (iv) *contenido de frecuencia*; i.e.,; período medio, período predominante y (v) *duración*, i.e.,; duración uniforme, *bracketed duration*, duración total y duración efectiva. Las medidas de intensidad examinadas en este estudio se seleccionaron de acuerdo con su uso previo en problemas de ingeniería geotécnica e ingeniería estructural y su nivel de conocimiento. Cada medida de intensidad tiene al menos uno de los tres atributos principales del movimiento fuerte del suelo: amplitud, contenido de frecuencia y duración. En la Tabla 4. 2 se muestran todas las intensidades medida utilizada en este estudio, sus fórmulas y definiciones.

La Figura 4. 6 muestra, a modo de ejemplo, las correlaciones encontradas entre las medidas de intensidad y el desplazamiento lateral inducido por licuación para un perfil de suelo de $H_{\text{crust}}=5\text{m}$, $H_{\text{liq}}=5\text{m}$, $Dr=70\%$ y 0.5° . Los resultados demostraron que el desplazamiento lateral inducido por licuación tiene una buena correlación con la velocidad absoluta acumulada ($R^2=0.83$, $\rho=0.91$, $r_s=0.91$), la intensidad de Arias ($R^2=0.66$, $\rho=0.81$, $r_s=0.84$), y la intensidad de Housner ($R^2=0.62$, $\rho=0.79$, $r_s=0.80$), en terremotos de subducción de gran magnitud. Por otro lado, los parámetros menos influyentes fueron la duración significativa ($R^2=0.04$, $\rho=-0.21$, $r_s=-0.12$), el desplazamiento máximo del suelo en la base ($R^2=0.01$, $\rho=0.11$, $r_s=0.20$) y el desplazamiento medio cuadrático ($R^2=0.00$, $\rho=0.04$, $r_s=0.08$). La Tabla 4. 3 muestra un resumen de los coeficientes de correlación obtenidos entre las variables predictoras y la variable de control.

Tabla 4. 2 Medidas de intensidad consideradas en la investigación

Medidas de Intensidad	Definición	Unidad
Aceleración máxima del suelo	$PGA = \max a(t) $	LT^{-2}
Velocidad máxima del suelo	$PGV = \max v(t) $	LT^{-1}
Desplazamiento máximo del suelo	$PGD = \max d(t) $	L
Aceleración efectiva de diseño	PGA de ondas de aceleración filtradas	LT^{-2}
Aceleración máxima sostenible	Tercer máximo valor absoluto de aceleración	LT^{-2}
Velocidad máxima sostenible	Tercer máximo valor absoluto de velocidad	LT^{-1}
Intensidad de Arias	$AI = \frac{\pi}{2} \int_0^{t_f} a^2(t) dt$	LT^{-1}
Velocidad absoluta acumulad	$CAV = \int_0^{t_f} a(t) dt$	LT^{-1}
Aceleración media cuadrática	$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_5}^{t_{95}} a^2(t) dt}$	LT^{-2}
Velocidad media cuadrática	$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_5}^{t_{95}} v^2(t) dt}$	LT^{-1}
Desplazamiento medio cuadrático	$d_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_5}^{t_{95}} d^2(t) dt}$	L
Intensidad característica	$I_c = a_{rms}^{1.5} \cdot (t_{95} - t_5)^{0.5}$	
Densidad de energía específica	$SED = \int_0^{t_f} [v(t)]^2 dt$	L^2T^{-1}

Intensidad de espectro de aceleración	$ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 5\%, T) dT$	LT^{-1}
Intensidad de espectro de velocidad	$VSI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi = 5\%, T) dT$	L
Intensidad de espectro de Housner	$HI = \int_{0.1}^{2.5} S_{pv}(\xi = 5\%, T) dT$	LT^{-2}
Periodo principal	$T_m = \frac{\sum_i C_i (1/f_i)}{\sum_i C_i^2}$	T
Periodo predominante	$T_p = T(\max(S_a))$	T
Duración uniforme	Tiempo total durante el cual la aceleración es mayor que un umbral de 5% de PGA	T
Duración significativa	$D_{5-95} = t(0.95I_a) - t(0.05I_a)$	T
Duración efectiva	Es la duración significativa basada en un criterio absoluto	T

*L: representa unidad de longitud, T: representa unidad de tiempo

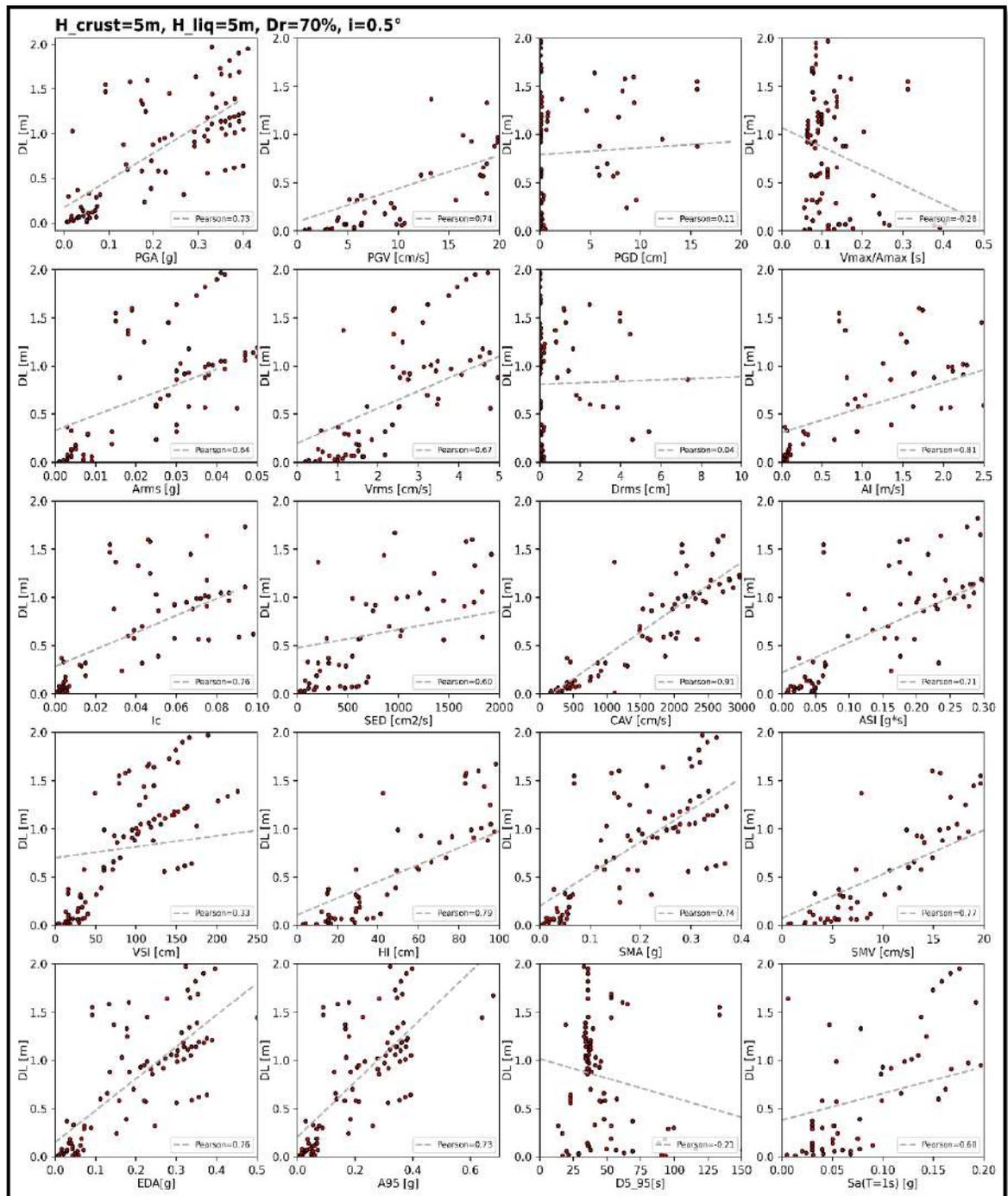


Figura 4. 6 Correlaciones individuales simples entre las medidas de intensidad seleccionadas (IM) y el desplazamiento máximo lateral en superficie (LD)

Tabla 4. 3 Coeficientes de correlación entre medidas de intensidad y desplazamiento lateral (ordenados de mayor a menor)

Medida de intensidad	R²	ρ	r_s
Velocidad absoluta acumulada	0.83	0.91	0.91
Intensidad de Arias	0.66	0.81	0.84
Intensidad Housner	0.62	0.79	0.80
Velocidad máxima sostenible	0.59	0.77	0.79
Intensidad característica	0.58	0.76	0.79
Aceleración espectral de diseño	0.58	0.76	0.76
Velocidad máxima del suelo	0.55	0.74	0.78
Aceleración máxima sostenible	0.55	0.74	0.76
Aceleración máxima del suelo	0.53	0.73	0.73
Parámetro A95	0.53	0.73	0.75
Intensidad de espectro de aceleración	0.50	0.71	0.73
Velocidad media cuadrática	0.45	0.67	0.73
Aceleración media cuadrática	0.41	0.64	0.68
Densidad de energía específica	0.36	0.60	0.79
Pseudoaceleración espectral T=1s	0.36	0.60	0.65
Intensidad de espectro de aceleración	0.11	0.33	0.80
(Velocidad /Aceleración) _{max}	0.08	-0.28	-0.19
Duración significativa	0.04	-0.21	-0.12
Máximo desplazamiento del suelo	0.01	0.11	0.20
Desplazamiento medio cuadrático	0.00	0.04	0.08

4.6 Resumen y conclusiones

En este capítulo de análisis paramétrico numérico, se describieron los perfiles sintéticos y base de datos de terremotos de subducción utilizados, el procedimiento de modelación numérica y la discusión de resultados en cuanto a la influencia de los factores geotécnicos

y sísmicos en la generación del máximo desplazamiento horizontal en superficie inducido por licuación. En este capítulo también se realizó una verificación de los resultados numéricos en concordancia con la evidencia histórica en cuanto a comportamiento del suelo licuable bajo cargas cíclicas.

Las conclusiones más relevantes de este capítulo son:

1. Los resultados de modelación numérica fueron comparados con evidencia histórica mostrando buenos resultados de comportamiento de suelo licuable ante cargas cíclicas.
2. Los parámetros de mayor influencia del suelo fueron la densidad relativa (D_r), el espesor de capa licuable (H_{liq}) e inclinación del terreno (i).
3. Los parámetros de mayor influencia del sismo fueron la velocidad absoluta acumulada (CAV) y la intensidad de Arias (I_a).

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para encontrar un modelo de predicción de desplazamientos máximos laterales en la superficie de un terreno, tres técnicas de *machine learning* (ML) fueron utilizadas para conocer las variables de suelo y sismo de mayor importancia en la predicción del *lateral spreading*. Así mismo, un modelo o ecuación con esas variables seleccionadas es propuesto para ser utilizado en la ingeniería práctica en puntos como la: verificación de las tolerancias de servicio, las deformaciones permitidas o la evaluación de la necesidad de medidas de mitigación según el estado de daño (Yang y Kavazanjian, 2021).

5.1 Introducción

Las técnicas de ML han evolucionado en los últimos años mejorando el papel de la ciencia de las bases de datos en una variedad de disciplinas (Xie *et al.*, 2020). Los métodos modernos ofrecen ventajas para manejar problemas complejos, proporcionar eficiencia y facilitar la toma de decisiones.

La implementación del ML en el dominio de la ingeniería sísmica se ha desarrollado en las áreas de amenaza sísmica, identificación y detección de daño, evaluación de la fragilidad sísmica y control estructural para la mitigación de terremotos (Wang *et al.*, 2021). Dentro de la amenaza sísmica se encuentra el tópico de licuación y desplazamiento lateral inducido por licuación.

El tipo de ML utilizado en esta investigación es de *supervise learning* del tipo *regression* o regresión. Se le conocen como *supervise learning* porque utilizan el conocimiento previo del base de datos para aprender y desarrollar una función que se aproxima mejor a la relación entre la entrada y la salida de datos. Por otro lado, se utiliza la regresión para obtener un valor numérico como resultado.

5.2 Modelos de regresión usados

Tres enfoques populares de ML del tipo *supervise learning* para desarrollo de regresión fueron utilizados. Estos métodos son: regresión *Least Absolute Shrinkage and Selection Operator* (LASSO), regresión *Random Forest* (RF) y regresión *Forward Selection* (FS). Estos enfoques han demostrado ser una gran promesa para la implementación en problemas de ingeniería civil y sísmica (Xie *et al.* 2020). En esta sesión se describen las características principales de estos enfoques.

Regresión LASSO

LASSO es una modificación de la regresión lineal múltiple (MLR) en términos de una función de pérdida (Tibshirani, 1996). Se caracteriza por ser un proceso de selección de variables basado en una penalización ponderada ($|w_i|$) para reducir la complejidad del modelo de regresión (solo considera las variables más relevantes e ignora las menos predictivas estableciendo sus coeficientes en cero) a un menor costo en términos de precisión del modelo. Este método minimiza la suma residual de cuadrados sujeto a que la suma del valor absoluto de los coeficientes sea menor que una constante (Tibshirani, 1996). La estimación LASSO está definida por la Ec 5.1:

$$\beta = \operatorname{argmin}\left\{\sum_i y_i - x_i\beta + \lambda \sum_j |w_j|\right\} \quad (5.1)$$

donde y_i es la respuesta observada, x_i es la variable predictora, w_j es un vector de coeficientes y λ es el parámetro de contracción (o regularización) que se aplica a las estimaciones. Un λ más grande se refiere a una mayor reducción en el número de coeficientes de peso. β cuantifica la importancia relativa de las variables de entrada.

Regresión *Random Forest*

Es una modificación del método de *bagging* (Breiman, 1996) que se construye de una gran colección de árboles sin correlación y luego se promedian (Breiman, 2001). *Random Forest*

construye muchos árboles de decisiones individuales durante el *training*. Las predicciones de todos los árboles se combinan para tomar la decisión final. *Random Forest* mejora la reducción de la varianza del *bagging* al reducir la correlación entre los árboles sin aumentar demasiado la varianza. *Random Forest* usa la Ec. 5.2 para hacer una predicción en un nuevo punto x :

$$\hat{f}_{rf}^B(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x) \quad (5.2)$$

donde B es el número de árboles y T_b es el árbol de regresión.

Regresión *Forward Stepwise Selection*

La regresión FSS (Hastie *et al.*, 1940) es un algoritmo que produce una secuencia anidada de modelos. Comienza con la intersección y luego agrega secuencialmente al modelo el predictor que más mejora el ajuste. Uno de los criterios para determinar qué variable corresponde, es encontrar el valor p (concepto estadístico asociado a la verificación de una hipótesis) más bajo de una validación cruzada. El modelo comienza con un Modelo Nulo que no contiene variables, luego empieza añadiendo las variables de mayor significancia una a una hasta que alcanza una regla preespecificada ($p < 0.05$ ó 0.2 ó 0.5) o hasta que todas las variables consideradas se incluyan en el modelo.

5.3 Desempeño de los modelos de regresión en la predicción sísmica

La Figura 5. 1 muestra el desempeño de los diferentes modelos de regresión usando diferentes métodos de ML. Esta parte del trabajo de investigación se desarrolló en manera conjunta con el profesor Jorge Macedo y su alumno Chenying Liu. Se comparan las respuestas observadas y las calculadas de desplazamiento lateral máximo en superficie (DL). Se usó el coeficiente de determinación R^2 para cuantificar en qué modelo los puntos quedan más cerca de la línea 1:1, es decir cuál de ellos es de mayor precisión. El mejor método es aquel que contiene la mayor cantidad de puntos dentro de las líneas 1:2 y 2:1. Para esta investigación el mejor R^2 fue de 0.97 perteneciente al método de RF. Los otros valores fueron 0.81 y 0.80 de FSS y LASSO respectivamente.

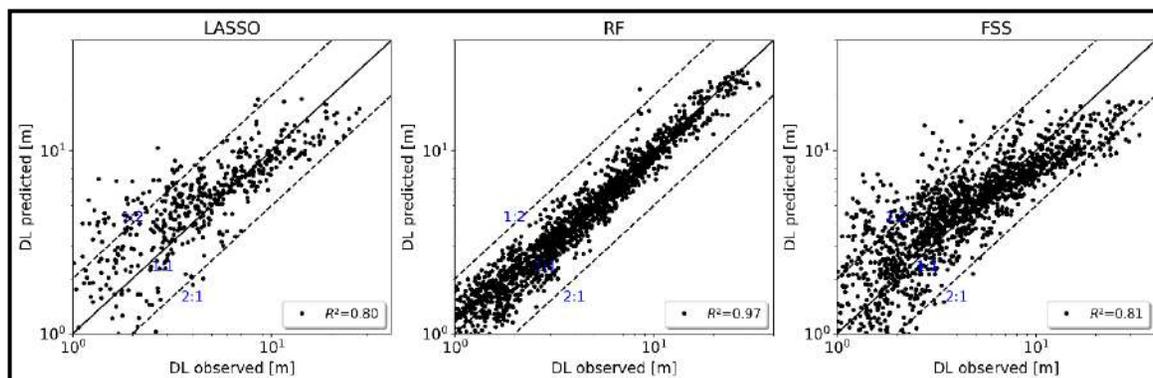


Figura 5. 1 Desempeño de los modelos de ML: a) LASSO, b) RF y c) FSS

5.4 Importancia relativa de las variables en los diferentes *machine learning*

La Figura 5. 2 muestra la importancia relativa de las variables de predicción en los diferentes métodos de ML. Para conveniencia de comparación, las importancias se normalizaron en el rango de 0 a 1. Las variables sísmicas resultaron ser las de mayor relevancia para la predicción del desplazamiento lateral en sismos de subducción de gran magnitud en comparación con las variables del suelo. Finalmente, cinco variables comunes fueron seleccionadas como las de mayor importancia: Velocidad acumulada absoluta (CAV), espectro de aceleración para el período de 1s (Sa (1s)), densidad relativa de la capa licuable (Dr), espesor de capa licuable (H_{liq}), e inclinación del terreno (i). Por otro lado, las variables no significativas fueron: velocidad máxima del suelo (PGV), periodo principal (T_p). De las variables del suelo las más importantes fueron: Dr, H_{liq} , i y de las variables sísmicas las más importantes fueron: CAV, Sa (1s).

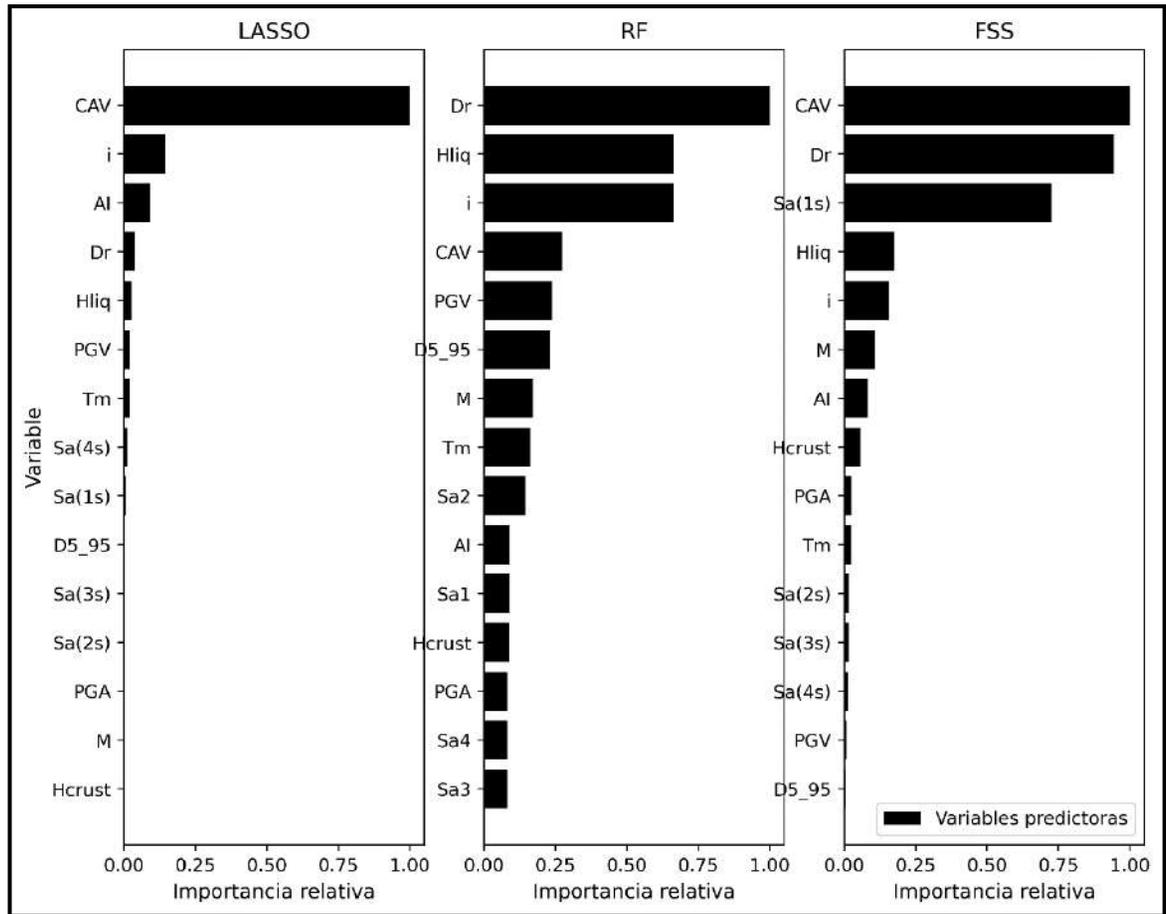


Figura 5. 2 Importancia relativa de las variables predictoras por método: a) LASSO, b) RF y c) FSS

5.5 Nuevo modelo propuesto de predicción

La Figura 5. 3 muestra la precisión de predicción (en términos de error cuadrático medio negativo) del modelo predictivo en función del número de parámetros de entrada obtenidos a partir de los resultados de FSS. Se puede observar que el aumento en la precisión de la predicción al incluir más de 5 características es mínimo, lo que indica que el número óptimo de elementos es alrededor de cinco. La Tabla 5. 1 presenta las cinco variables principales seleccionadas por las tres técnicas de selección de *machine learning*. A pesar de las ligeras diferencias en la selección de variables de los tres métodos, estos indican que tanto las medidas de intensidad como las propiedades del suelo son importantes para predecir el desplazamiento lateral.

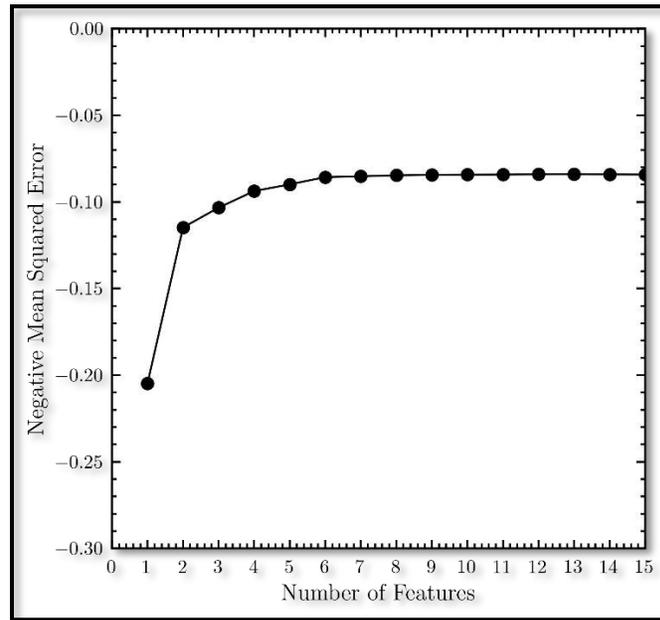


Figura 5. 3 Cambio en la precisión de la predicción con el aumento del número de variables (Desarrollo por Liu y Macedo)

Tabla 5. 1 Parámetros considerados en el análisis paramétrico

Técnica	Variables seleccionadas
RF	H _{liq} , Dr, i, CAV, Tm
FSS	CAV, Dr, Sa (1s), i, H _{liq}
LASSO	CAV, Dr, AI, H _{liq} , i

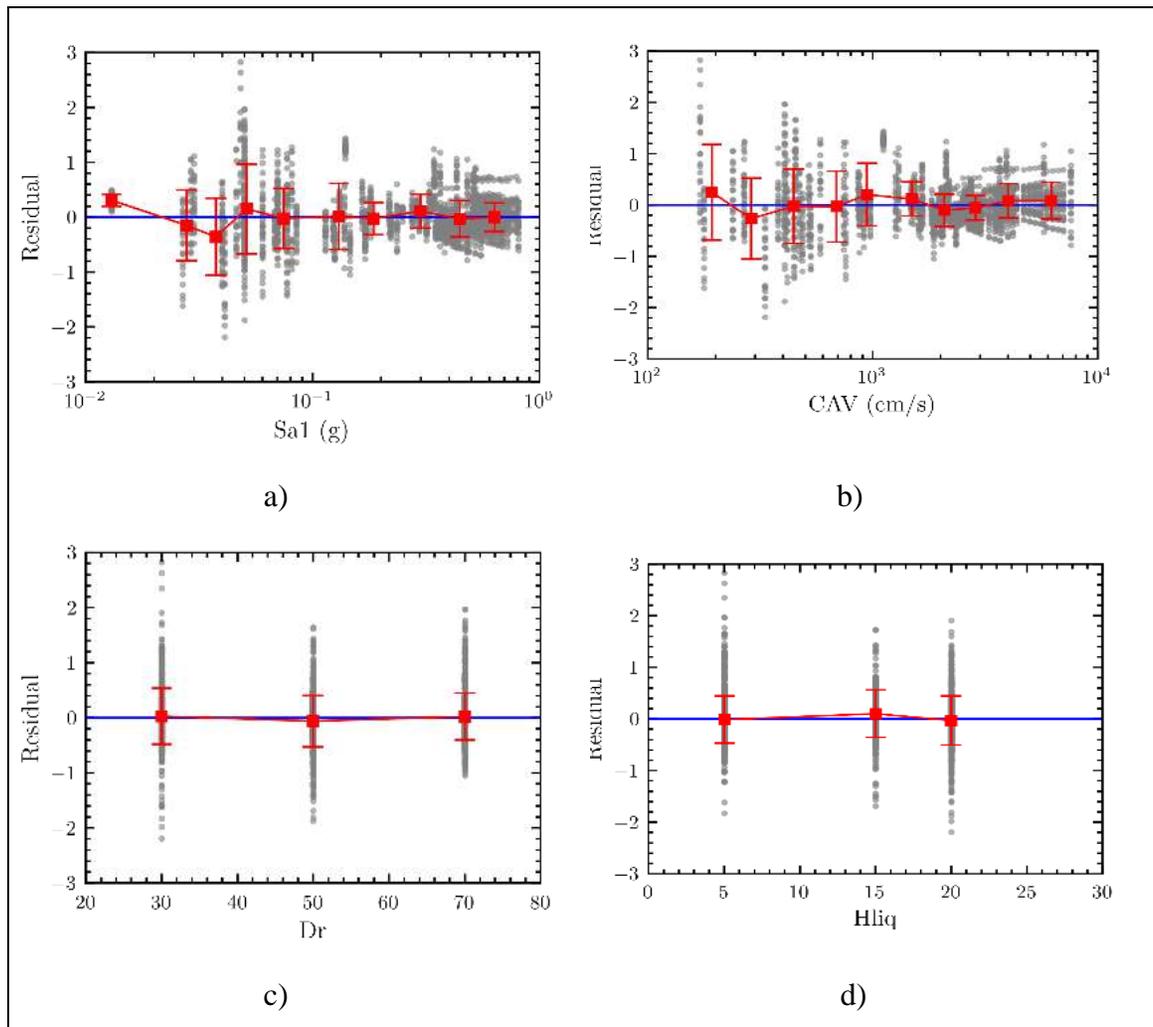
La forma funcional seleccionada fue la forma doble logarítmica. Esta forma ha sido usada en muchas leyes de atenuación para parámetros de movimiento sísmico:

$$\ln(y) = B_0 + B_1 \ln(x_1) + \dots + B_n \ln(x_n) + \epsilon \quad (5.1)$$

donde y es la variable dependiente o variable de predicción, x_1, x_2, \dots, x_n son las variables independientes, B_0, B_1, \dots, B_n son coeficientes del análisis de regresión y ϵ es el error asociado al modelo. Después de un examen exhaustivo de diferentes combinaciones de funciones, se identificó que CAV, Sa(1s), H_{liq}, Dr e i son las funciones más importantes que brindan el mejor desempeño de predicción e interpretación del modelo. Como resultado, se propone el siguiente modelo, Ec. 5.2, para predecir el desplazamiento lateral en sismo de subducción de gran magnitud:

$$\ln Dh = a_0 + a_1 \ln CAV + a_2 \ln Sa(1s) + a_3 H_{liq} + a_4 Dr + a_5 i + a_6 \ln Sa(1s) \ln CAV \quad (5.2)$$

donde a_0 a a_6 son los coeficientes estimados a partir del análisis de regresión, que son -5.14, 0.94, 2.17, 0.02, -0.03, 0.19 y -0.27, respectivamente. $Sa(1s)$ y CAV están en unidades de g y cm/s, respectivamente. La Figura 5. 4 muestra los residuos de los modelos predictivos frente a los parámetros utilizados en la ecuación. No se pueden encontrar tendencias en los residuos, lo que indica que el modelo predictivo no está sesgado.



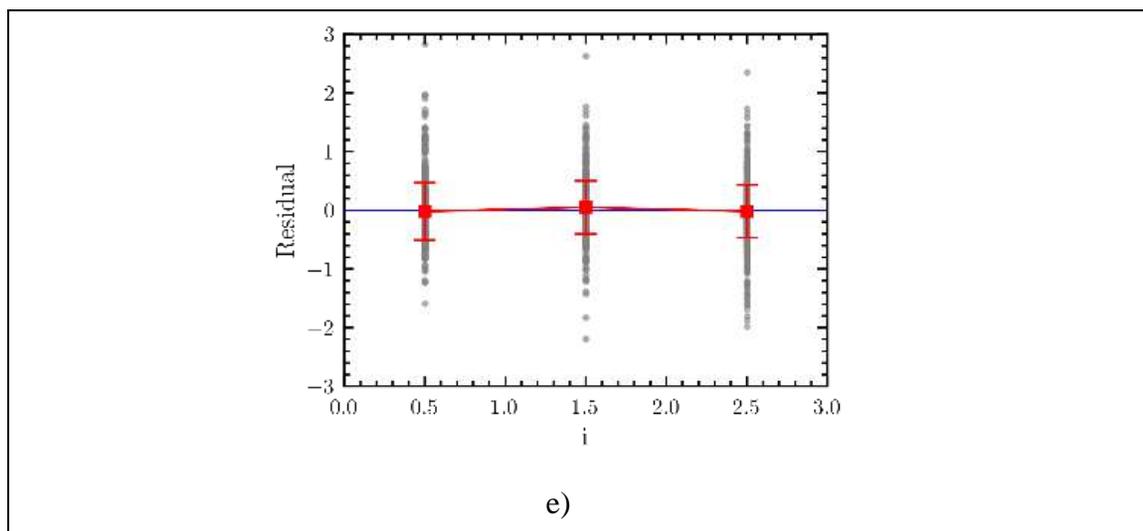


Figura 5. 4 Residuales del modelo predictivo versus a) S_a (1s), b) CAV, c) D_r , d) H_{liq} , e) i
(Desarrollo por Liu y Macedo)

5.6 Validación del modelo de predicción

La capacidad del modelo propuesto para predecir el desplazamiento lateral máximo en la superficie inducido por licuación se examinó mediante la comparación con los desplazamientos laterales observados medidos en experimentos centrífugos y en casos históricos. Los datos de centrífuga y de campo se usaron solo para validar la ecuación y no se incluyeron en el desarrollo del modelo predictivo del capítulo anterior.

Comparación con resultados de experimentos centrífugas

Los resultados de los ensayos centrífugos realizados por Taboada y Dobry (1998), *Sharp et al.* (2003) y Ziotopoulou (2018) se utilizaron para comparar las estimaciones de la Ec. 5.2 con los valores medidos en esos experimentos. Los registros tiempo-historia de aceleraciones usados como excitación de entrada en los ensayos centrífuga se utilizaron para estimar los parámetros de CAV y $S_a(T=1s)$. Se analizaron un total de 7 casos. La mayoría de los casos están dentro de las líneas 1H:2V y 2H:1V (más del 70%). Por lo tanto, se considera que el modelo propuesto produce resultados razonables en comparación con los ensayos centrífugos (ver Figura 5.3).

Tabla 5. 2 Valores medidos en casos de ensayos centrífugos

Ensayo	i [°]	Dr [%]	H [m]	a_{max} [g]	Dh_{medido} [cm]	Dh_{calculado} [cm]
M1-2	0	40-45	10	0.23	17	62
M2-2	1.94	40-45	10	0.23	47	89
M2c-6	3.95	40-45	10	0.17	72.5	73
L45V2-10	2	45	10	0.23	66	86
L65V2-10	2	65	10	0.20	28	38
L75V2-10	2	75	10	0.21	23	31
RPI-02	5	65	5	0.17	35	119

Comparación con casos históricos

El desempeño del modelo propuesto también se probó en casos históricos bien documentados ocurridos en el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw (Ver Tabla 5. 3). La Figura 5.3 compara el desplazamiento lateral observado para 13 casos históricos con los obtenidos del modelo propuesto. En el caso de Sa (1s), usamos Abrahamson *et al.* (2016) y Montalva *et al.* (2017) y para CAV, usamos ecuaciones de atenuación de Liu and Macedo (2021) y Foulser-Piggott y Goda (2015) en ambos casos para eventos de subducción. la Figura 5.4 muestra los datos utilizados en estas leyes de atenuación.

La Figura 5.3 se ha dividido en tres zonas: desplazamientos grandes, moderados y pequeños, según la clasificación usada por Cubrinovski y Robinson (2016). Para desplazamientos pequeños, el modelo propuesto sobrestima los valores reales. Por otro lado, el modelo puede capturar razonablemente bien los valores reales para desplazamientos moderados y grandes. La mayoría de los casos (aproximadamente 80 %) caen dentro de las líneas 1H:2V y 2H:1V.

Tabla 5.3 Valores medidos en casos históricos

Caso	CAV [cm/s]	Sa [s]	H_{liq} [m]	Dr [%]	i [°]	Dh_{medido} [m]	Dh_{calculado} [m]
Mataquito Brigde SA1	2788	0.30	5	53	0.5	0.00	1.70
Mataquito Brigde SA2	2788	0.30	12.5	53	1	1.80	1.70
Llacolén Brigde S6	1672	0.31	7	53	1	0.23	1.40
Llacolén Brigde S7	1672	0.31	2	72	1	0.23	0.76
Juan Pablo II Brigde Z3B1	1447	0.30	7	63	1	0.50	1.27
Juan Pablo II Brigde S14	1447	0.30	16	65	1	0.50	1.12
Juan Pablo II Brigde S15	1435	0.30	14	61	1	0.50	2.33
Coronel Port ST1	1451	0.25	10	65	6.3	2.89	1.78
Lebu ST1	1168	0.28	4.1	65	2	0.60	1.57
Lebu ST2	1168	0.28	4.1	65	2	0.00	1.57
Lebu ST3	1095	0.28	0.9	63	2	0.00	1.46
Curanilahue Hospital Z2B1	1293	0.31	1.8	61	2	0.05	1.50

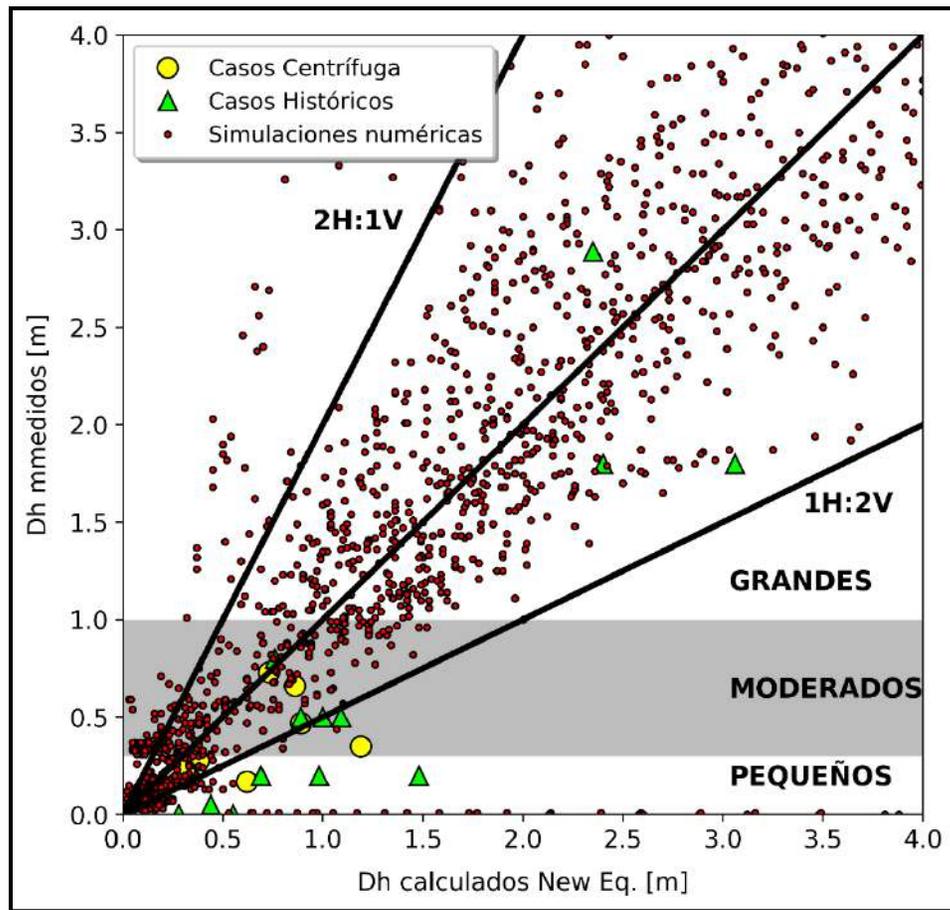


Figura 5. 5 Validación del nuevo modelo propuesto: comparación del desplazamiento lateral calculado con la nueva ecuación versus resultados de pruebas centrífugas, casos históricos y base de datos de simulaciones numéricas

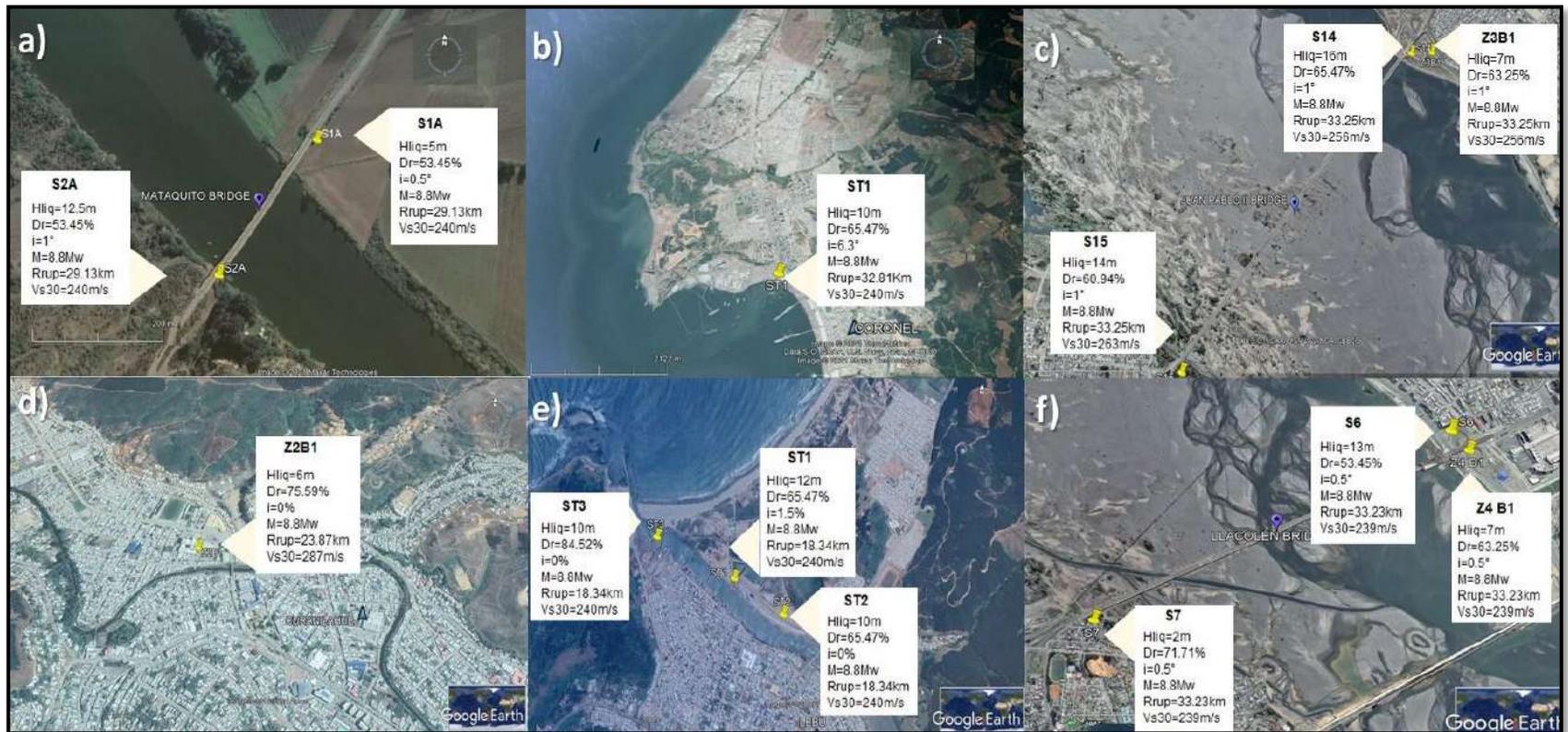


Figura 5.6 Localización, información geotécnica y sísmica de casos históricos utilizados en la nueva ecuación de predicción a) Puente Mataquito b) Puerto Coronel c) Puente Juan Pablo II d) Hospital Curanilahue e) Lebu f) Puente Llacolén.

5.7 Ejemplo ilustrativo de la ecuación propuesta

Tres casos históricos fueron analizados en detalle para ilustrar el uso de la nueva ecuación propuesta en la estimación de desplazamientos laterales inducidos por licuación para sismos de subducción de gran magnitud. Estos tres casos históricos ocurrieron durante el terremoto del 2010 Maule 8.8 Mw y se utilizan para explicar las ventajas y limitaciones del nuevo modelo propuesto.

El primer caso es el puente de Mataquito. Este puente es una estructura de hormigón armado de 320 m de largo y 8 vanos que cruza el río Mataquito cerca del Océano Pacífico. Los cimientos del puente son pilas, cada una de este puente consta de tres columnas de sección circular (ver Figura 5. 7). La longitud de los pilotes era de unos 17 m. Durante el terremoto del Maule de 8,8 Mw de 2010, el puente Mataquito sufrió daños debido al desplazamiento lateral inducido por la licuación. El desplazamiento lateral ocurrió cerca de las curvas norte y sur del puente, la deformación lateral del suelo detrás de los cimientos del puente era esencialmente cero, mientras que justo fuera de las cabezas de los pilotes estas deformaciones eran del orden de 1 m a 2 m. Los daños más notables se produjeron cerca del estribo sur. Las coordenadas de este caso histórico son 35.05123° S 72.16251° W (Bray y Frost, 2010). Según Bray y Frost (2010) el desplazamiento lateral desde el borde del muro estribo hasta la primera fila de pilares era de unos 54 cm y el desplazamiento lateral total desde el borde del muro estribo hasta el borde del río fue de unos 180 cm (ver Figura 5. 8).

El desplazamiento lateral inducido por licuación se estimó para un SPT representativo. Ledezma et al., (2012) muestran información geotécnica disponible de los SPT realizados a lo largo del puente en diferentes lugares. Nuestro análisis se concentró en el estribo norte (Illoca), cercano a la perforación S-2A. Los pilotes del puente de Mataquito se encuentran cimentados en un suelo arenoso fino saturado (≈ 14 m), encima de una capa de grava arenosa. La profundidad del nivel freático se estimó en 2,6 m de profundidad para el terremoto de Maule. El espesor total de la capa licuable ($H_{liq} = 4$ m) se calculó como el espesor acumulado de capas con $N_{1,60} < 20$ golpes/pie (ver Fig.25b), la densidad relativa de

la capa licuable ($D_r = 48\%$) se calculó usando la correlación de Idriss y Boulanger (2008) con $N_{1,60}$ (en este caso $N_{1,60}=8$) y la pendiente del terreno ($i = 0,5^\circ$) se estimó utilizando Google Earth y ASTER Global Digital Elevation Model V003 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>). Las medidas de intensidad de la superficie del suelo requeridas de la pseudoaceleración en un período de 1 s ($S_a(1\text{ s})$) y la velocidad absoluta acumulada (CAV) se estiman a partir de una ecuación empírica apropiada de predicción del movimiento del suelo (GMPE). En este caso, la velocidad absoluta acumulada ($CAV = 7885,47\text{ cm/s}$) del movimiento del suelo de entrada de roca aflorante se estimó a partir de Liu y Macedo (2021) usando $M = 8,8\text{ Mw}$ y $V_{S30} = 240\text{ m/s}$ y la pseudo aceleración en un período de 1 s ($S_a(1\text{ s})$) se estimó en $0,77\text{ g}$ usando la ley de atenuación de Abrahamson et al. (2016) para una distancia de ruptura: R_{rup} de $29,13\text{ km}$. Este valor de $S_a(1\text{ s})$ es del mismo orden de magnitud, pero un poco mayor al registrado en la estación Concepción: $0,4\text{g}$ (ver Figura 5. 9), respectivamente. De igual forma, este valor de CAV es del mismo orden de magnitud pero menor que el registrado en la estación Concepción: 8345 cm/s , que se encontraba a 210 km del sitio del Puente Mataquito.

Utilizando el nuevo modelo propuesto (Ec. 5.2), el desplazamiento lateral residual es de aproximadamente 170 cm , cerca del desplazamiento máximo medido de 180 cm en el lado norte del puente Mataquito. Esta precisión en la predicción podría deberse a que el desplazamiento lateral medido estaba fuera de las cabezas de los pilotes. En este caso, fue un desplazamiento medido del terraplén superficial y no de la estructura, y esa es una condición similar a la que se desarrolló el modelo para una condición de campo libre.

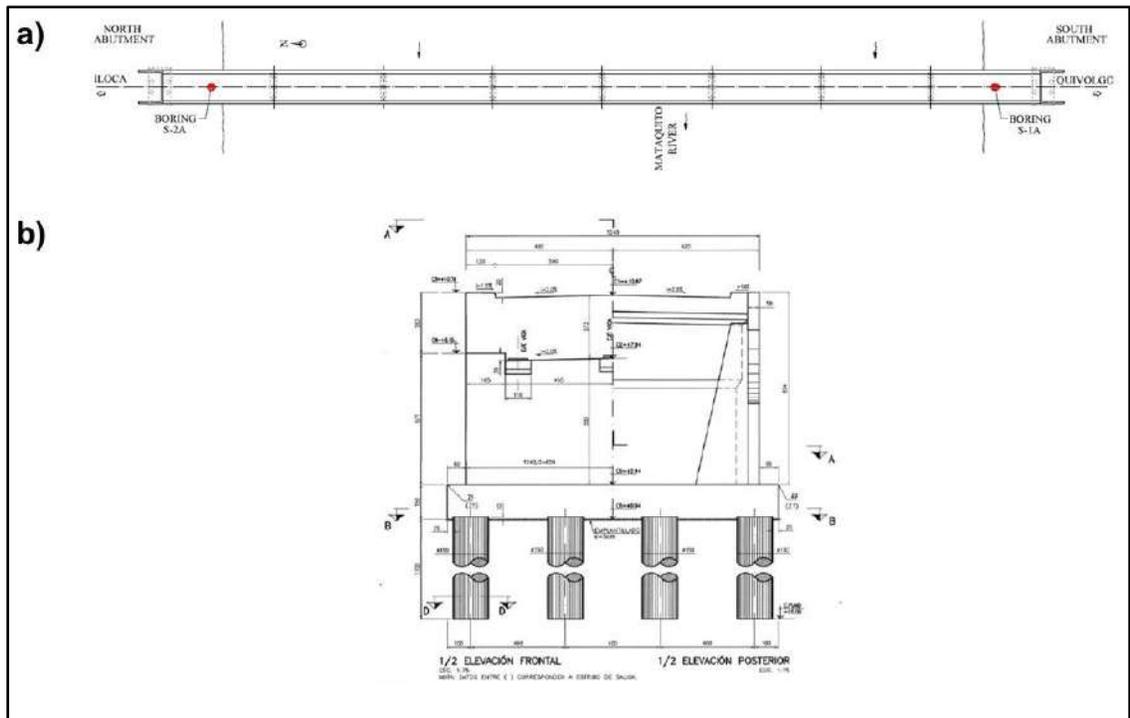


Figura 5.7 a) Vista en planta del puente de Mataquito b) Vista en alzado del estribo del puente de Mataquito (Ledezma et al., 2012)



Figura 5. 8 Desplazamiento lateral en puente Mataquito (a) Google Earth® del puente Mataquito y dirección del desplazamiento lateral en el estribo norte (b) Desplazamiento lateral hacia el río, estribo norte del puente (c) Desplazamiento lateral en el extremo norte del puente (Bray y Frost, 2010)

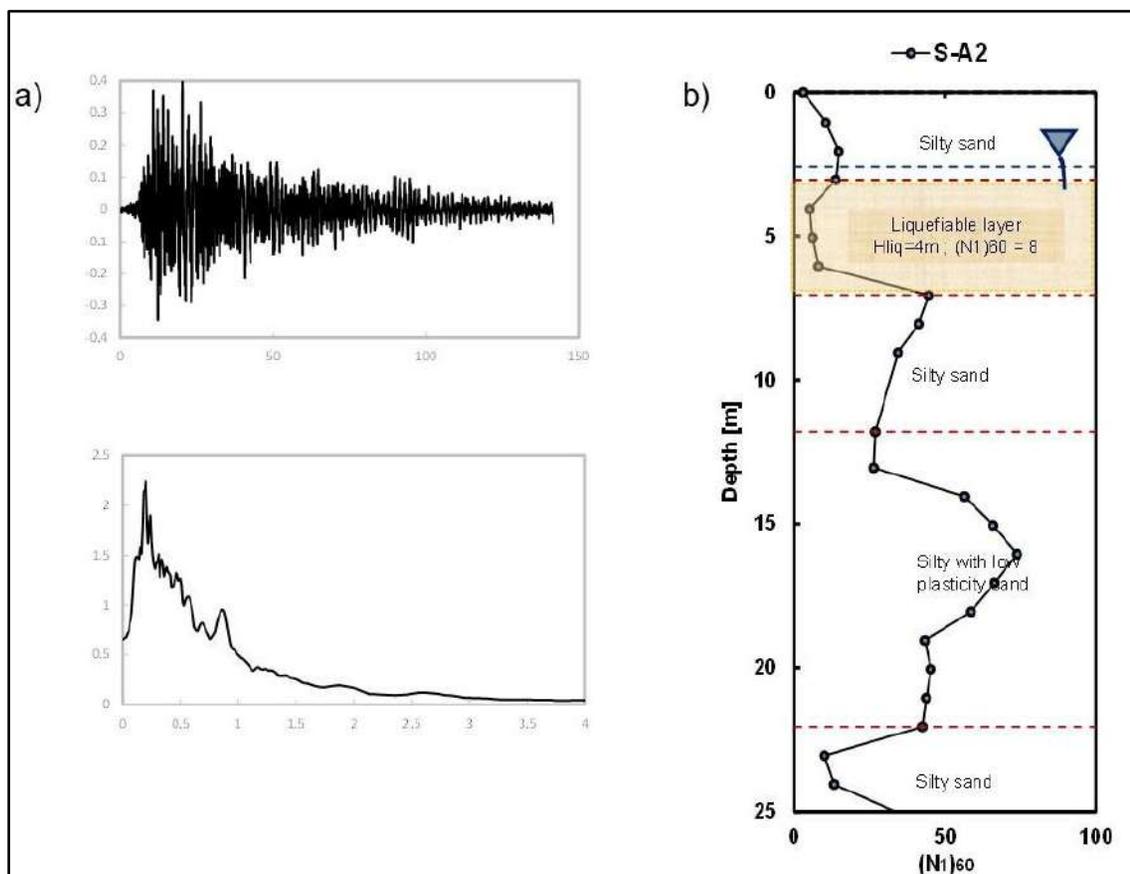


Figura 5. 9 a) Tiempo-historia de aceleración y pseudo-aceleración espectral amortiguado al 5% en la estación Concepción b) Perfil SPT del sondaje SA-2 en el estribo norte del puente Mataquito

El segundo caso es el puente Llacolén. Este puente fue construido en el año 2000 y es el segundo más largo de Chile. El puente Llacolén tiene una plataforma de 22 m de ancho y un vano de 2160 m sobre el río Bío Bío que une la ciudad de Concepción con San Pedro de la Paz. Los cimientos del puente son pilotes de hormigón armado (excavados y colocados en obra) de 1,5 m de diámetro y una longitud comprendida entre 13 y 22 m. Los más largos se encuentran en el sitio de Concepción (ver Figura 5. 10). Durante el terremoto del Maule de 8,8 Mw de 2010, el puente Llacolén sufrió daños debido al desplazamiento lateral inducido por licuación en el acceso noreste que provocó el colapso de una plataforma. Las coordenadas de este caso histórico son 36.829372° S 73.068283° W (Bray y Frost, 2010).

Según Olsen et al., (2012) se observaron y midieron varios desniveles laterales entre 8 cm y 23 cm en la separación del pavimento de las columnas de la cubierta norte hacia el río (ver Figura 5. 11).

El desplazamiento lateral inducido por licuefacción se estimó para un SPT representativo. Verdugo y Peters [67] muestran detalles de los SPT realizados a lo largo del puente en diferentes lugares. Nuestro análisis se centró en el acceso noreste, cerca del sondaje S-6. Los pilotes del puente Llacolén están cimentados en suelo arenoso pobremente graduada y saturada. Se estimó que el nivel freático estuvo en superficie para el terremoto del Maule. El espesor total de la capa licuable ($H_{liq} = 7$ m) se calculó como el espesor acumulado de las capas con $N_{1,60} < 20$ golpes/pie (ver Figura 5. 9), la densidad relativa de la capa licuable ($D_r = 53\%$) se calculó usando con la correlación de Idriss y Boulanger (2008) con un $N_{1,60}$ (en este caso $N_{1,60}=10$) y la pendiente del terreno ($i = 0,5^\circ$) se estimó utilizando Google Earth y ASTER Global Digital Elevation Model V003 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>). Las medidas de intensidad de la superficie del suelo requeridas de la pseudoaceleración en un período de 1 s ($S_a(1\text{ s})$) y la velocidad absoluta acumulada (CAV) se estiman a partir de una ecuación empírica de predicción apropiada del movimiento del suelo (GMPE). En este caso, la velocidad absoluta acumulada ($CAV = 7468,26$ cm/s) del movimiento del suelo de entrada de roca aflorante se estimó a partir de la ley de atenuación de Liu y Macedo (2021) usando $M = 8,8$ Mw y $v_{s30} = 208$ m/s y la pseudo aceleración en un período de 1 s ($S_a(1\text{ s})$) se estimó en 0.70 g usando la ley de atenuación de Abrahamson et al. (2016) para una distancia de ruptura: R_{rup} de 33,23 km. Este valor de $S_a(1s)$ es del mismo orden de magnitud, pero un poco mayor que los registrados en las estaciones Concepción y San Pedro de la Paz: 0.4g y 0.5g (ver Figura 5. 12), respectivamente. Asimismo, este valor de CAV es del mismo orden de magnitud, pero menor que los registrados en las estaciones Concepción y San Pedro de la Paz: 8345 cm/s y 5842 cm/s, respectivamente, que fueron 2 km y a 4 km del sitio del Puente Llacolén.

Usando el nuevo modelo propuesto (Ec. 5.2), el desplazamiento lateral residual es de aproximadamente 140 cm, mucho mayor que el desplazamiento máximo medido de 23 cm en el puente Llacolén. Además de la incertidumbre sobre los parámetros de intensidad del movimiento del suelo y sobre algunas características del suelo, la razón principal detrás de

esta diferencia es que nuestro modelo fue desarrollado para una condición de campo libre y, en este caso, el puente sobre pilotes probablemente restringió el lateral desplazamientos de suelos. Al mismo tiempo, la extensión lateral se midió como el movimiento del pavimento y no como el movimiento del suelo.

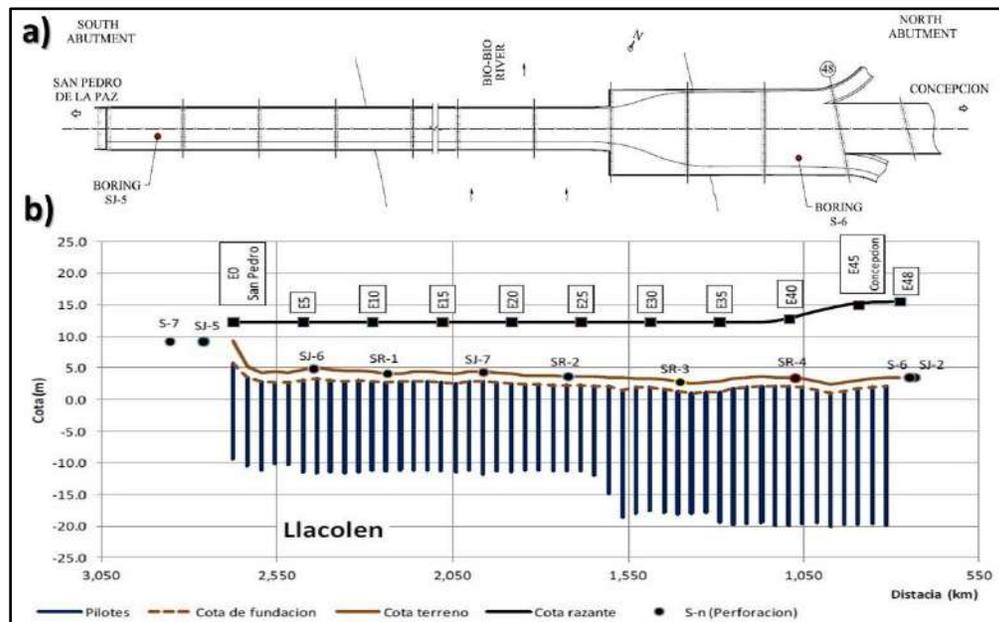


Figura 5. 10 (a) Vista en planta del puente Llacolén (b) Longitudes y ubicación de los sondajes a lo largo del puente Llacolén (Serrano, 2014)



Figura 5. 11 Desplazamiento lateral en el puente Llacolén (a) Google Earth® del puente Llacolén y dirección del desplazamiento lateral en el tablero norte y sur (b) Vista al sur del tablero desalojado (c) Vista al norte del tablero desalojado (d) Subestructura del acceso norte (Bray y Frost [64])

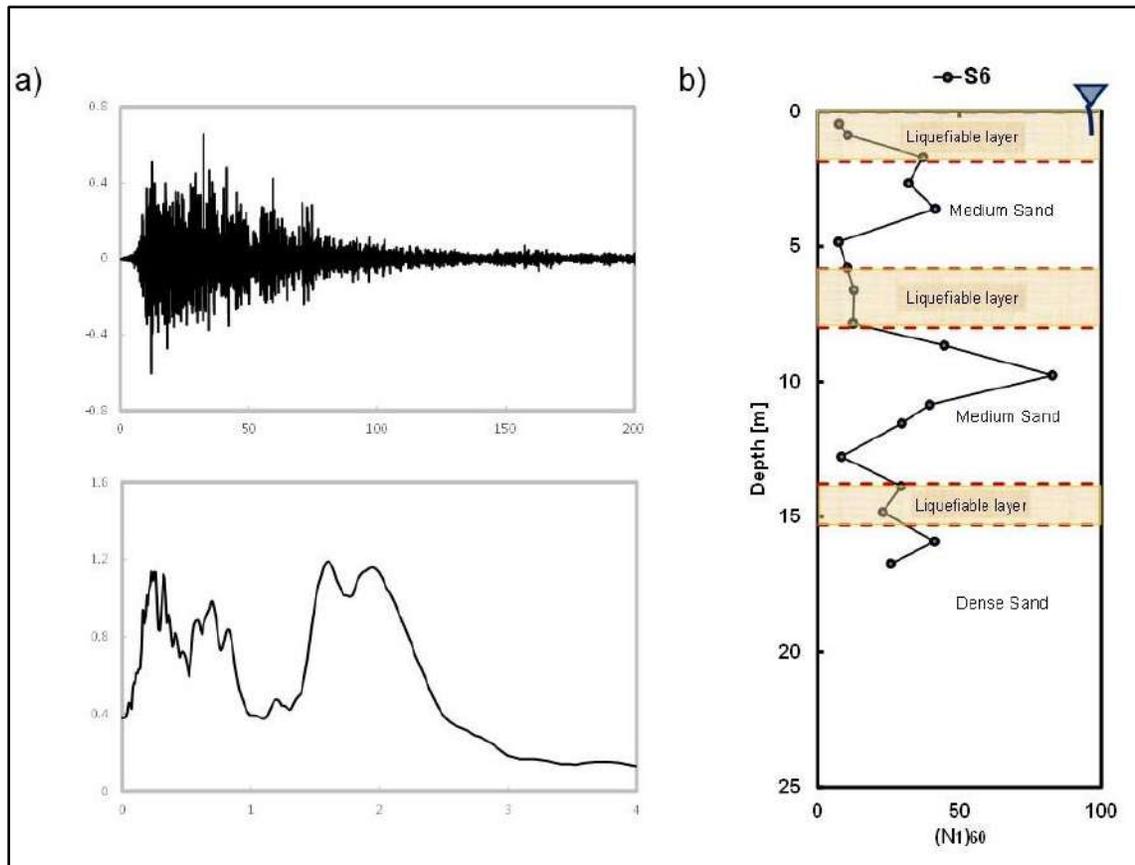


Figura 5. 12 a) Tiempo-historia de aceleración y aceleración espectral amortiguado al 5% en la estación San Pedro de la Paz b) Perfil SPT del sondaje S6 en acceso noreste del Puente Llacolén

El tercer caso es el Puerto Coronel. Este puerto está ubicado en la localidad de Coronel, en la Región del Bio-Bio, Chile, a 30 km al sur de la ciudad de Concepción ya 545 km de Santiago, la capital de Chile. La superficie del puerto cubre un área de 3 hectáreas, aproximadamente 200 m de largo paralelo a la costa, con un ancho que varía de 90 a 160 m. El muelle norte se construyó en 1998 y está soportado por pilotes de tubería de acero convencionales circulares (diámetro = 50 cm) inclinados y verticales (ver Figura 5. 13). Durante el terremoto del Maule de 8,8 Mw de 2010, el puerto experimentó daños significativos debido a la expansión lateral inducida por la licuefacción que provocó el agrietamiento del pavimento en la parte norte del puerto donde la superficie se pavimentó con asfalto. Las coordenadas de este caso clínico son 37.027832° S 73.149502° W (Bray y Frost (2010)). De acuerdo con Bray y Frost (2010) se realizaron mediciones del desplazamiento horizontal acumulativo detrás del muro de tablestacas sumando los anchos de las grietas en el pavimento a lo largo de dos líneas, el movimiento máximo en el muro

fue entre aproximadamente 1 y 1,20 m y se produjo un movimiento relativamente pequeño. más allá de una distancia de 25 m detrás de la pared (ver Figura 5. 14).

La dispersión lateral inducida por licuefacción se estima para un SPT representativo. Bray y Frost [64] tienen detalles de los SPT realizados a lo largo del puente en diferentes lugares. Nuestro análisis se centró en el muelle norte, cerca de la perforación ST-2. Los pilotes de acero se están asentando en suelo saturado de arena fina. Las condiciones del suelo en el muelle norte consisten en 10 m de arena fina que a su vez está sustentada por arcilla de alta plasticidad de aproximadamente 10 m de espesor. La profundidad del agua subterránea se estima en 3,5 m de profundidad para el evento del Maule. El espesor total de la capa licuable ($H_{liq} = 7$ m) se calculó como el espesor acumulativo con $N_{1,60} < 20$ golpes/pie (ver Fig. 31b), la densidad relativa de la capa licuable ($D_r = 56$ %) se calculó usando la correlación de Idriss y Boulanger (2008) con $N_{1,60}$ (en este caso $N_{1,60}=11$), y la pendiente del terreno ($i = 2^\circ$) se estimó usando Google Earth y ASTER Global Digital Elevation Model V003 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>). Las medidas de intensidad de la superficie del suelo requeridas de la pseudoaceleración en un período de 1 s ($S_a(1\text{ s})$) y la velocidad absoluta acumulada (CAV) se estiman a partir de una ecuación empírica de predicción del movimiento del suelo (GMPE) apropiada. En este caso, la velocidad absoluta acumulada ($CAV = 7628.84$ cm/s) del movimiento del suelo de entrada de roca aflorante se estimó a partir de Liu y Macedo (2021) utilizando $M = 8,8$ Mw y $V_{s30} = 240$ m/s y la pseudo aceleración en un período de 1s ($S_a(1s)$) se estimó en 0,74 g usando la correlación de Abrahamson et al. (2016) para una distancia de ruptura: R_{rup} de 32,81 km. Este valor de $S_a(1s)$ es del mismo orden de magnitud, pero un poco mayor que los registrados en las estaciones de Concepción, San Pedro de la Paz y Angol: 0.4g, 0.5g y 0.7g (ver **Figura 5. 15**, respectivamente. De igual forma, este valor de CAV es del mismo orden de magnitud, pero menor que los registrados en las estaciones Concepción, San Pedro de la Paz y Angol: 8345 cm/s, 5842 cm/s y 7097 cm/s (ver Figura 5. 15), respectivamente, que se encontraban a 4 km, 6 km y 87 km del sitio de Puerto Coronel.

Usando el nuevo modelo propuesto (Ec. 5.2), el esparcimiento lateral residual es de aproximadamente 178 cm, un poco más grande que el desplazamiento máximo medido de

120 cm en el Puerto Coronel. Además de la incertidumbre sobre los parámetros de intensidad del movimiento del suelo y sobre algunas características de los suelos, en este caso, los efectos de restricción o fijación de los pilotes y la superestructura del pilar pueden reducir los desplazamientos laterales del suelo cerca de los pilotes.

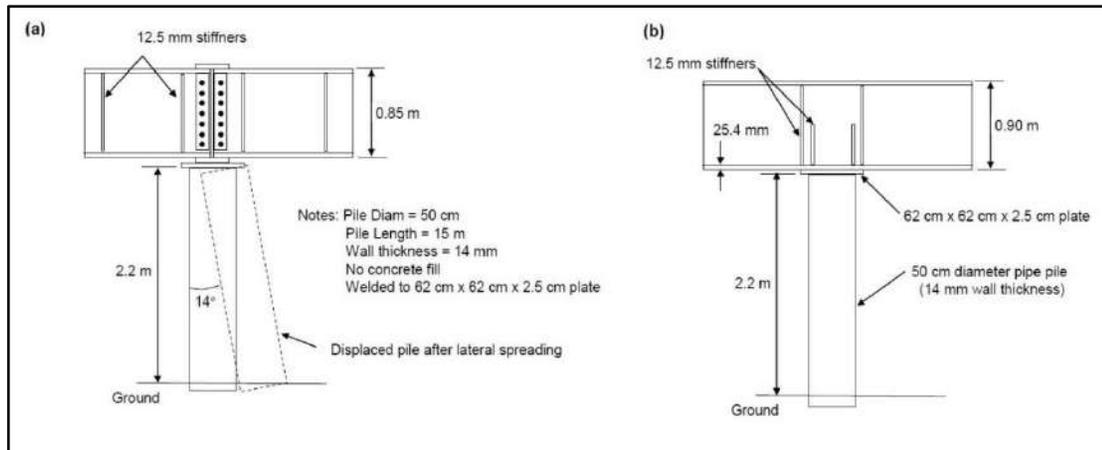


Figura 5. 13 Cabezal de pilotes con pilotes inclinados antes y después del corrimiento lateral en el muelle norte del Puerto de coronel (a) Sección longitudinal (b) Sección transversal (Bray et al., 2010)



Figura 5. 14 Desplazamiento lateral en el Puerto de Coronel (a) Ubicación de la línea de medición del desplazamiento lateral en el pilar de soporte en el Puerto de Coronel (b) Rotación del pilar en Puerto de Coronel debido al desplazamiento lateral (c) Desplazamiento lateral reflejado en el pavimento destruido y pared agrietada (Bray et al. 2010)

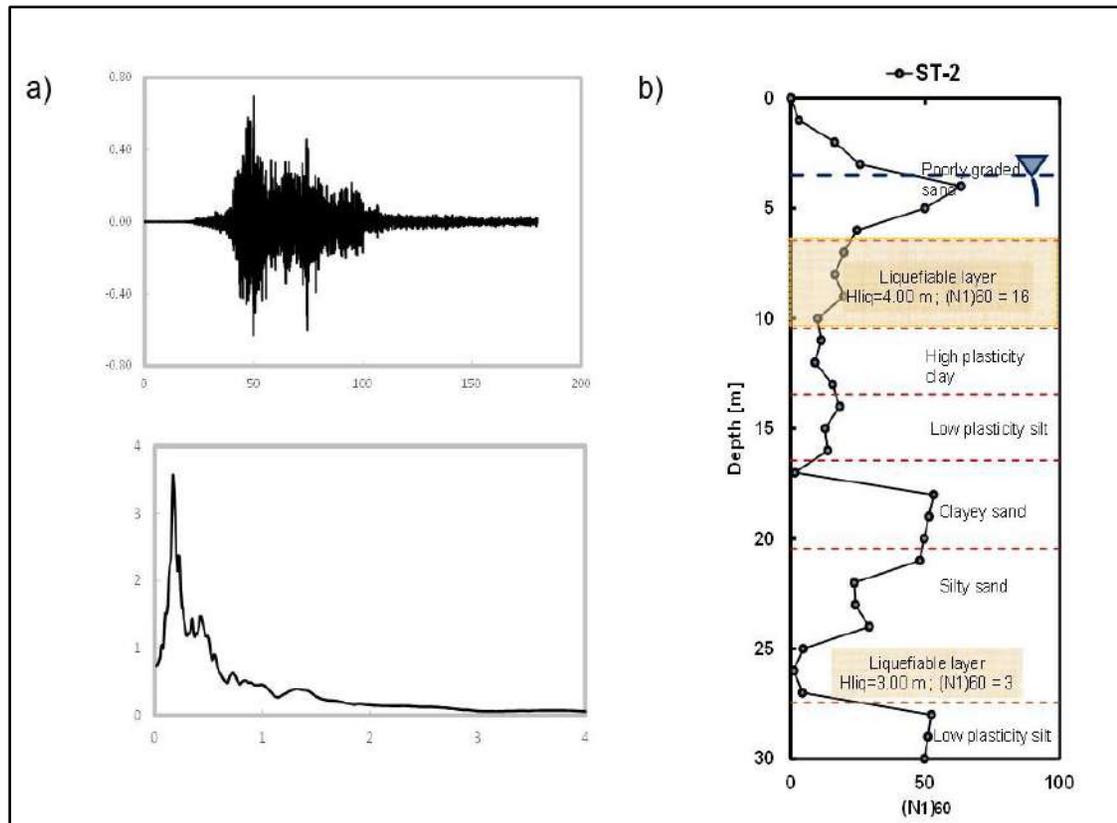


Figura 5.15 a) Tiempo-historia de aceleración y aceleración espectral amortiguado al 5% de la estación San Pedro de la Paz b) Perfil SPT del sondaje ST-2 en el acceso noreste

5.8 Resumen y conclusiones

En este capítulo de Análisis Estadístico, se describieron los modelos de regresión de *machine learning* usados: LASSO, RF y FS. Los modelos son comparados en función al grado de precisión de sus resultados de desplazamiento lateral calculado. Así mismo, estos modelos evaluaron la importancia relativa de cada variable para luego establecer una nueva ecuación de predicción de desplazamiento lateral inducido por licuación con la base de datos generada en el capítulo 4. Finalmente, el modelo es validado con casos de centrífuga e históricos y se realiza un análisis detallado de algunos casos a modo de ejemplos ilustrativos del nuevo modelo de predicción propuesto.

Las conclusiones más relevantes de este capítulo son listadas a continuación:

1. Los resultados del análisis estadístico con *machine learning* muestran que la Velocidad Absoluta Acumulativa (CAV) y la Pseudoaceleración para período de 1s ($S_a(1s)$) son

las variables sísmicas que tienen la correlación más alta con el desplazamiento lateral máximo en superficie inducido por licuación para casos de subducción.

2. Los análisis con *machine learning* también muestran que la densidad relativa (D_r), el espesor de la capa licuable (H_{liq}) y la inclinación del suelo (i) son los parámetros más importantes del suelo que afectan el desplazamiento lateral. Esto se debe a que los métodos de *machine learning* también usan criterios estadísticos de regresión que ponderan variables para darles mayor o menor importancia.
3. Los resultados demuestran una precisión razonable del modelo propuesto en comparación con los resultados de ensayos centrífugos y casos históricos.

6. RESUMEN, CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Este capítulo presenta: 1) Un resumen de la investigación incluyendo sus principales contribuciones, 2) Conclusiones importantes de la investigación y 3) Áreas identificadas para futuros trabajos relacionados.

6.1 Resumen

El foco de esta investigación fue evaluar los factores que influyen en el desplazamiento lateral inducido por licuación durante terremotos de subducción de gran magnitud y plantear un modelo de predicción. Los objetivos específicos cumplidos en esta investigación fueron:

1. Seleccionar una metodología numérica tomando en cuenta características de simplicidad en modelación del suelo para generar una base de datos simulada de desplazamiento lateral para sismos de subducción mayor a $M_w 7.5$ mediante modelación paramétrica para rangos de variables definidos.
2. Analizar estadísticamente una amplia familia de variables predictoras de desplazamiento lateral en sismos de subducción para seleccionar las más relevantes y proponer una nueva ecuación de predicción y validación de la misma.

Las principales contribuciones de esta investigación incluyen: 1) Modelo validado para predicción del desplazamiento lateral inducido por licuación en terremotos de subducción de gran magnitud. 2) Incremento de confiabilidad del uso de los métodos estadísticos de selección de variables en el campo de la geotecnia sísmica.

6.2 Conclusiones

Las siguientes importantes observaciones y conclusiones fueron hechas de esta investigación. Es importante mencionar que las conclusiones se limitan a los modelos numéricos, material usado y los supuestos adaptados en la modelación utilizados en esta investigación.

En esta investigación se propuso un nuevo modelo para estimar el desplazamiento lateral inducido por licuación en grandes terremotos de subducción. Sobre la base de 7344 análisis de respuesta de sitio no lineal, se realizó un análisis paramétrico utilizando una respuesta de análisis de sitio no lineal con el modelo constitutivo PDMY02. El nuevo modelo ha sido validado utilizando experimentos centrífugos del proyecto VELACS y LEAP e historias de casos de campo observados en el terremoto del Maule de 2010 Mw 8.8. Después de realizar un mayor número de análisis dinámicos no lineales, los resultados muestran las tendencias importantes de varios parámetros que afectan el desplazamiento lateral inducido por la licuación en terremoto de subducción de gran magnitud. El nuevo modelo utiliza la velocidad absoluta acumulada (CAV) y la aceleración amortiguada al 5% de un segundo ($S_a(T=1s)$) para describir la característica del movimiento del suelo sísmico. La densidad relativa, el espesor de la capa licuable y la pendiente del suelo son usados para describir los parámetros importantes del perfil del suelo. La forma de la ecuación también se basa en conceptos de ingeniería sísmica ampliamente aceptados y usados en otros modelos. Este modelo presenta precisión, simplicidad e interpretabilidad física en cuanto a parámetros de suelo y de sismo. Sus parámetros son fáciles de obtener con pruebas de campo y el uso de ecuaciones existentes de predicción del movimiento del suelo (GMEP) en caso de no contar con un registro de aceleración cercano en roca o suelo duro (tipo A y B según NEHRP).

Esta investigación tuvo como objetivo el desarrollo de un modelo de predicción del desplazamiento lateral inducido por licuación para casos de eventos de subducción. El modelo es de fácil uso para la ingeniería práctica e incluye parámetros que describen el comportamiento físico del fenómeno. Sin embargo, varias limitaciones deben reconocerse y mejorarse en estudios futuros. El modelo propuesto se aplicó a casos históricos y

demuestra que proporciona buenas estimaciones en casos de grandes desplazamientos laterales (mayores a 1 m), consistentes con los observados en campo. También captura bien los resultados de los experimentos de centrífuga y proporciona estimaciones de desplazamiento lateral consistentes con las observadas en el laboratorio. No obstante, en el caso de desplazamientos laterales nulos o pequeños (menores a 30 cm) tiene una limitación si se desea estimar el desplazamiento en la estructura debido a que el nuevo modelo fue desarrollado para una condición de campo libre, y esa es la principal razón por la que se sobreestima el desplazamiento lateral dónde están presentes estructuras cimentadas por pilotes u otro tipo de cimentación rígida. Otra importante limitación es el uso de arena limpia, sin contenido de finos (en la modelación) ya que en condición real según la evidencia histórica, arenas con finos han sufrido licuación

El modelo propuesto es una simplificación de un fenómeno intrínsecamente complejo. Los experimentos de modelos centrífugos usados para la validación de la herramienta numérica en este estudio son una representación simplificada de un fenómeno complejo en campo. El modelo se basa en los resultados de un conjunto particular de movimientos sísmicos del suelo (grandes terremotos de subducción) y un conjunto limitado de condiciones del suelo. Por lo tanto, se justifica el cuidado en su uso, especialmente para los casos no considerados en esta investigación.

6.3 Futuras investigaciones

El foco principal de esta investigación fue el de desarrollar un modelo simple y validado para uso de ingeniería práctica sobre el desplazamiento lateral inducido por licuación para terremotos de subducción de gran magnitud. En futuras investigaciones se recomienda lo siguiente:

- Campaña de instrumentación en diferentes zonas donde hubo desplazamiento lateral inducido por licuación para recolección de datos in situ para comparar y calibrar las herramientas numéricas.
- Consideración de efectos 2D o 3D de esfuerzos en deformaciones en la herramienta numérica.

- Medición de efecto de rigidez del suelo por considerar estructura dentro de él.
- Evaluación probabilista de la base de datos sintética para estudio del fenómeno y generación de un nuevo modelo de predicción.

BIBLIOGRAFIA

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Kofi, A. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations For Subduction Earthquakes Norman. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44.
- Ambraseys, N. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 17, 1–105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eqe.4290170101>
- Arulanandan, K., & Scott, R. F. (1993). Project VELACS—Control test results. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1276–1292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:8\(1276\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:8(1276))
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., & Fruth, L. S. (1992). *VELACS: Verifications of Liquefaction Analyses by Centrifuge Studies. Laboratory Testing Program. Soil Data Report* (p. 394).
- Astroza, R., Iturriaga, A., Ureta, S., Carrasco, M., & Astroza, M. (2019). *Curvas de atenuación de intensidades para Chile considerando grandes terremotos ocurridos entre 1906 y 2016. 1*, 1–16.
- Avval, Y. J., & Derakhshani, A. (2019). New formulas for predicting liquefaction-induced lateral spreading: model tree approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3649–3661. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1319-1>
- Aydan, Ö., Miwa, S., Komada, H., & Tomoji, S. (2005). *The M8.7 Nias Earthquake of March 28, 2005 in Nias Island, Indonesia* (Issue 2009).
- Barrueto, C., Saez, E., & Ledezma, C. (2017). Seismic demand on piles in sites prone to liquefaction-induced lateral spreading. *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017*, 12.
- Bartlett, S. F., & Youd, T. L. (1992). Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spreads. *National Center for Earthquake Engineering Research*, 1–118. <http://desastres.unanleon.edu.ni/pdf2/2005/julio-agosto/parte2/pdf/eng/doc3309/doc3309-0.pdf>
- Bartlett, S. F., & Youd, T. L. (1995). Empirical Prediction of Liquefaction Induced Lateral Spread. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 316–329.

- Bartlett, S., & Youd, L. (1995). Empirical Prediction of Liquefaction Induced Lateral Spread. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 316–329. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:4\(316\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(316))
- Bastin, S., van Ballegooy, S., Mellsop, N., & Wotherspoon, L. (2020). Liquefaction case histories from the 1987 Edgumbe earthquake, New Zealand – Insights from an extensive CPT dataset and paleo-liquefaction trenching. *Engineering Geology*, 271(August 2018), 105404. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105404>
- Baziar, M., Dobry, R., & Elgamal, A. (1992). Engineering Evaluation of Permanent Ground Deformations Due to Seismically Induced Liquefaction. In *National Center for Earthquake Engineering Research*. Technical Report NCEER-92-0007.
- Boulanger, R., & Idriss, I. (2004). Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays. In *Neuroscience Letters* (Vol. 339, Issue December). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=12614910%5Cnhttp://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.3827&rep=rep1&type=pdf
- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2013). Formulation of a sand plasticity plane-strain model for earthquake engineering applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.006>
- Boulanger, Ross W. (2009). *Soil Liquefaction During Earthquakes – The Cliffs Notes Version Fundamentals of liquefaction behavior* (Vol. 1, pp. 1–27).
- Bray, J., & Frost, D. (2010). Geo-Engineering Reconnaissance of the 2010 Maule, Chile Earthquake. In *Geo-Engineering Extreme Events Reconnaissance (GEER) Association* (Vol. 2).
- Bray, Jonathan, Rollins, K., Hutchinson, T., Verdugo, R., Ledezma, C., Mylonakis, G., Assimaki, D., Montalva, G., Arduino, P., Olson, S. M., Kayen, R., Hashash, Y. M. A., & Candia, G. (2012). Effects of ground failure on buildings, ports, and industrial facilities. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1), 97–118. <https://doi.org/10.1193/1.4000034>

- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 8(24), 123–140.
<https://doi.org/10.3390/risks8030083>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 1(45), 5–32.
- Byrne, P. (1991). A Model for Predicting Liquefaction Induced Displacement A Model for Predicting Liquefaction Induced Displacement. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1027–1035.
- California Building Standards Commission. (2010). 2010 California Building Code. In *California Code Of Regulations*.
- California Department of Transportation. (2020). *Caltrans Geotechnical Manual* (Issue 1).
- Canadian Geotechnical Society. (2006). *Canadian Foundation Engineering Manual* (Issue 4th Edition).
- Connor, P. (2014). *Liquefaction-Induced Building Performance and Near-Fault Ground Motions*.
- Cubrinovski, M., Robinson, K., Taylor, M., Hughes, M., & Orense, R. (2012). Lateral spreading and its impacts in urban areas in the 2010-2011 Christchurch earthquakes. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 55(3), 255–269.
<https://doi.org/10.1080/00288306.2012.699895>
- Cubrinovski, Misko, & Robinson, K. (2016). Lateral spreading: Evidence and interpretation from the 2010–2011 Christchurch earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91(October), 187–201.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.09.045>
- Dafalias, Y. F., & Manzari, M. T. (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 622–634.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2004\)130:6\(622\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:6(622))
- Dashti, S., Bullock, Z., Porter, K., Liel, A., & Karimi, Z. (2018). Key predictors of structure settlement on liquefiable ground: a numerical parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113(October), 286–308.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.001>

- De la Maza, G., Williams, N., Sáez, E., & Ledezma, C. (2017). Liquefaction-Induced Lateral Spread in Lo Rojas , Coronel , Chile : Field Study and Numerical Modeling. *Earthquake Spectra*, 33(1), 219–240. <https://doi.org/10.1193/012015EQS012M>
- Durante, M. G., & Rathje, E. M. (2021). An exploration of the use of machine learning to predict lateral spreading. *Earthquake Spectra*, March. <https://doi.org/10.1177/87552930211004613>
- Ebeido, A., Elgamal, A., & Zayed, M. (2019). Large Scale Liquefaction-Induced Lateral Spreading Shake Table Testing at the University of California San Diego. *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, March, 22–30. <https://doi.org/10.1061/9780784482100.003>
- Elgamal, A., Yang, Z., & Lu, J. (2015). *Cyclic1D User's Manual*. May, 1–28.
- Elgamal, A., Yang, Z., & Parra, E. (2002). Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 259–271. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00022-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00022-2)
- ElGhoraiby, M. A., & Manzari, M. T. (2020). The effects of base motion variability and soil heterogeneity on lateral spreading of mildly sloping ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135(March), 106185. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106185>
- European Committee for Standardization. (2004). *European Standard EN 1998-1: Design of structures for earthquake resistance* (Vol. 1, Issue 1).
- Faris, A. T., Seed, R. B., Kayen, R. E., & Wu, J. (2006). A semi-empirical model for the estimation of maximum horizontal displacement due to liquefaction-induced lateral spreading. *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, 3, 1323.
- Federall Highway Administration. (2011). *Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile* (Issue FHWA-HRT-11-030). <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/>

- Fisher, R. A. (1926). Statistical methods for research workers. In *Annals of Applied Biology* (Vol. 13, Issue 1). <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1926.tb04258.x>
- Foulser-Piggott, R., & Goda, K. (2015). Ground-motion prediction models for arias intensity and cumulative absolute velocity for Japanese earthquakes considering single- station sigma and within-event spatial correlation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 1903–1918. <https://doi.org/10.1785/0120140316>
- Franke, K. W., & Rollins, K. M. (2017). Lateral Spread Displacement and Bridge Foundation Case Histories from the 1991 Magnitude 7.6 Earthquake near Limón, Costa Rica. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 143(6), 05017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001653)
- Ghasemi-Fare, O., & Pak, A. (2016). Numerical investigation of the effects of geometric and seismic parameters on liquefaction-induced lateral spreading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89(April 2018), 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.014>
- Gingery, J. (2014). *UC San Diego UC San Diego Electronic Theses and Dissertations Effects of Channel Noise on Neural Networks*.
- Gonzalez, A. (2014). *Simplified Probabilistic Evaluation of the Seismic Pile-Supported Bridges Affected By Liquefaction Pile-Supported Bridges Affected By*.
- Hamada, M. (2014). Soil liquefaction and countermeasures. In *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering* (Issue 9784431548911). https://doi.org/10.1007/978-4-431-54892-8_3
- Hamada, M., Towhata, I., Yasuda, S., & Ioyama, R. (1987). Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction. *Computers and Geotechnics*, 4(4), 197–220. [https://doi.org/10.1016/0266-352X\(87\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0266-352X(87)90001-2)
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (1940). Elements of Statistical Reasoning. In *Journal of the Royal Statistical Society* (Vol. 103, Issue 2). <https://doi.org/10.2307/2980421>
- Hu, J., & Liu, H. (2019). Identification of ground motion intensity measure and its

application for predicting soil liquefaction potential based on the Bayesian network method. *Engineering Geology*, 248(June 2018), 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.11.006>

- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*.
- Ishihara, K. (1993). Stability of natural deposits during earthquakes. *La Stabilité Des Depots Naturels Lors Des Tremblements de Terre*, 1(7), 321–376.
- Japan Road Association. (2002). Design Specification for Highway Bridges, Part V: Seismic Design. In *Japan Road Association* (Issue 1).
- Javdanian, H. (2019). Field data-based modeling of lateral ground surface deformations due to earthquake-induced liquefaction. *European Physical Journal Plus*, 134(6), 1–10. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12630-2>
- Joyner, W., & Boore, D. M. (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. In *Geotechnical Special Publication* (pp. 43–102).
- Karimi, Z., & Dashti, S. (2016). Seismic Performance of Shallow Founded Structures on Liquefiable Ground: Validation of Numerical Simulations Using Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(6), 04016011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001479](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001479)
- Kramer, S. L., Astaneh Asl, B., Ozener, P., & Sideras, S. S. (2015). Effects of liquefaction on ground surface motions. In *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* (Vol. 37, pp. 285–309). https://doi.org/10.1007/978-3-319-10786-8_11
- Kuhlemeyer R., Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanis and Foundations Devisions*, 5(99), 421–427.
- Kutter, B. L., Carey, T. J., Hashimoto, T., Zeghal, M., Abdoun, T., Kokkali, P., Madabhushi, G., Haigh, S. K., Burali d'Arezzo, F., Madabhushi, S., Hung, W. Y., Lee, C. J., Cheng, H. C., Iai, S., Tobita, T., Ashino, T., Ren, J., Zhou, Y. G., Chen, Y. M., ... Manzari, M. T. (2018). LEAP-GWU-2015 experiment specifications, results, and comparisons. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113(October 2015), 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.018>

- Kutter, B. L., Manzari, M. T., & Zeghal, M. (2020). Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading. In *Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22818-7>
- Ledezma, C., Hutchinson, T., Ashford, S. A., Moss, R., Arduino, P., Bray, J. D., Olson, S., Hashash, Y. M. A., Verdugo, R., Frost, D., Kayen, R., & Rollins, K. (2012). Effects of ground failure on bridges, roads, and railroads. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1), 119–143. <https://doi.org/10.1193/1.4000024>
- Little, M., Rathje, E., Depascale, G., & Bachhuber, J. (2019). *Modeling Lateral Spread Displacements using Data from the 2011 Christchurch Earthquake*. 2011. <https://doi.org/10.1193/080816EQS127M.Youd>
- Liu, C., & Macedo, J. (2021). New conditional, scenario-based, and non-conditional cumulative absolute velocity models for subduction tectonic settings. *Earthquake Spectra*, November 2020. <https://doi.org/10.1177/87552930211043897>
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite Dynamic Model For Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 97(1), 129–131. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0001339>
- Macedo, J. (2017). Simplified Procedures for Estimating Earthquake-Induced Displacements. In *University of California, Berkeley* (Vol. 53, Issue 9).
- Manzari, M. T., & Dafalias, Y. F. (1997). A critical state two-surface plasticity model for sands. *Geotechnique*, 47(2), 255–272. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.2.255>
- Mavroeidis, G. P., Zhang, B., Dong, G., Papageorgiou, A. S., Dutta, U., & Biswas, N. N. (2008). Estimation of strong ground motion from the great 1964 Mw 9.2 Prince William Sound, Alaska, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5), 2303–2324. <https://doi.org/10.1785/0120070273>
- Mazzoni, S., Mckenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). *The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) User Command-Language*.
- Mccrink, T. P., Pridmore, C. L., Tinsley, J. C., Sickler, R. R., Brandenburg, S. J., & Stewart,

- J. P. (2011). Liquefaction and Other Ground Failures in Imperial County , California , from the April 4 , 2010 , El Mayor – Cucapah Earthquake. *Main*, 94.
- McKenna, F. (2011). OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science and Engineering*, 13(4), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>
- Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901–911. <https://doi.org/10.1785/0120160221>
- Moreno, M., Rosenau, M., & Oncken, O. (2010). 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 467(7312), 198–202.
- Mróz, Z. (1967). On the description of anisotropic workhardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 15(1), 163–175.
- New Zealand Geotechnical Society. (2016). Geotechnical Earthquake Engineering Practice - Module 3: Identification, Assessment and Mitigation of Liquefaction Hazards. In *MBIE Geotechnical Earthquake Engineering Practice* (Vol. 3). <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-1-4020-5893-6>
- New Zeland Transport Agency. (2016). *Highway structures design guide*.
- Newmark, N. (1965). Effect of earthquakes on dams and embankment. *Fifth Rankine Lecture Geotechnique*, 2(5), 139–160.
- Olsen, M. J., Cheung, K. F., Yamazaki, Y., Butcher, S., Garlock, M., Yim, S., McGarity, S., Robertson, I., Burgos, L., & Young, Y. L. (2012). Damage assessment of the 2010 Chile earthquake and tsunami using terrestrial laser scanning. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1). <https://doi.org/10.1193/1.4000021>
- Olson, S. M., Mei, X., & Hashash, Y. M. A. (2020). Nonlinear Site Response Analysis with Pore-Water Pressure Generation for Liquefaction Triggering Evaluation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(2), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002191](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002191)
- Parra, E. (1996). *Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation*

Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil System. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.

Pearson, K. (1895). *Note on regression and inheritance in the case of two parents* (pp. 240–242). University College.

Petalas, A., & Vahid, G. (2013). *PLAXIS LIQUEFACTION MODEL UBC3D-PLM*.

Pirhadi, N., Tang, X., & Yang, Q. (2019). New equations to evaluate lateral displacement caused by liquefaction using the response surface method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/jmse7020035>

Pollitz, F. F., Brooks, B., Tong, X., Bevis, M. G., Foster, J. H., Bürgmann, R., Smalley, R., Vigny, C., Socquet, A., Ruegg, J., Campos, J., Barrientos, S., Parra, H., Soto, J. C. B., Cimbaro, S., & Blanco, M. (2011). Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38(9), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011gl047065>

Prevost, J. H. (1985). A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(1), 9–17. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(85\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0261-7277(85)90030-0)

Puebla, H., Byrne, P. M., & Phillips, R. (1997). Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 641–657.

Rajeswari, J. S., & Sarkar, R. (2021). A three-dimensional investigation on performance of batter pile groups in laterally spreading ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141(May 2020), 106508. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106508>

Sadeghi, H., Pak, A., Pakzad, A., & Ayoubi, P. (2021). Numerical-probabilistic modeling of the liquefaction-induced free fields settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149(February), 106868. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106868>

Sato, M., Mohajeri, M., & Abe, A. (2004). Large Scale Shake Table Test on Lateral Spreading of. *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada*, 2516, 10.

- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 109(3), 458–482. <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?8300283>
- Serrano, C. (2014). Efectos de la licuefacción en puentes fundados en pilotes. In *Efectos de la licuefacción en puentes fundados en pilotes* (Vol. 0, Issue 0).
- Sharp, M. K., Dobry, R., & Abdoun, T. (2003). Liquefaction Centrifuge Modeling of Sands of Different Permeability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1083–1091. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2003\)129:12\(1083\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:12(1083))
- Souliotis, C., & Gerolymos, N. (2016). Seismic effective stress analysis of quay wall in liquefiable soil: the case history of Kobe. *International Journal of Geomate*, 10(2), 1770–1775.
- Spearman, C. (1910). Correlation calculated from faulty data. *British Journal of Psychology*, 3(3), 271–295. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1910.tb00206.x>
- Taboada, V., & Dobry, R. (1998). Centrifuge modeling of earthquake-induced lateral spreading in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(December), 1195–1206.
- Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1), 267–288. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x>
- Travasarou, T. (2003). *Optimal Ground Motion Intensity Measures for Probabilistic Assessment of Seismic Slope Displacements*.
- Tryon, G. E. (2014). *Evaluation of Current Empirical Methods for Predicting Lateral Spread-Induced Ground Deformations for Large Magnitude Earthquakes Using Maule Chile 2010 Case Histories*. Master's Thesis, Brigham Young University, Provo, UT, USA.
- Valsamis, A., Bouckovalas, G., & Papadimitriou, A. (2010). Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground. *Soil Dynamics and Earthquake*

- Engineering*, 30(6), 490–508. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.01.005>
- Valsamis, A. I., Bouckovalas, G. D., & Papadimitriou, A. G. (2010). Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), 490–508. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.01.005>
- Wang, X., Li, Z., & Shafieezadeh, A. (2021). Seismic response prediction and variable importance analysis of extended pile-shaft-supported bridges against lateral spreading: Exploring optimized machine learning models. *Engineering Structures*, 236(August 2020), 112142. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112142>
- Williams, N D. (2015). *Evaluation of Empirical Prediction Methods for Liquefaction-Induced Lateral Spread from the 2010 Maule, Chile, Mw 8.8 Earthquake in Port Coronel*. Master's Thesis, Brigham Young University, Provo, UT, USA.
- Williams, Nicole D. (2015). *Evaluation of Empirical Prediction Methods for Liquefaction-Induced Lateral Spread from the 2010 Maule , Chile , M w 8 . 8 Earthquake in Port Coronel*.
- Xie, Y., Ebad Sichani, M., Padgett, J. E., & DesRoches, R. (2020). The promise of implementing machine learning in earthquake engineering: A state-of-the-art review. *Earthquake Spectra*, 36(4), 1769–1801. <https://doi.org/10.1177/8755293020919419>
- Yang, Y., & Kavazanjian, E. (2021). Numerical evaluation of liquefaction-induced lateral spreading with an advanced plasticity model for liquefiable sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149(March 2020), 106871. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106871>
- Yang, Z. (2000). *Numerical Modeling of Earthquake Site Response Including Dilation and Liquefaction*. Columbia University, New York.
- Youd, L. (2003). Liquefaction Mechanisms and Induced Ground Failure. *International Geophysics*, 81, 1159–1173. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(03\)80184-5](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(03)80184-5)
- Youd, L. (2018). Application of MLR Procedure for Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

Engineering, 144(6), 04018033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001860](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001860)

Youd, L., Hansen, C., & Bartlett, S. (2002). Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(December), 1007–1017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:12\(1007\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1007))

Youd, L. T., Hansen, C. M., & Bartlett, S. F. (2002). Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, 1007–1017.

Youd, T. L. (2003). Liquefaction-Induced Damage to Bridges. In *Transportation Research Record 1411*.

Zhang, G., Robertson, P., & Brachman, R. (2004). Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130, 861–871.

Zhang, J., Yang, C., Zhao, J. X., & McVerry, G. H. (2012). Empirical models for predicting lateral spreading considering the effect of regional seismicity. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(1), 121–131.

Ziotopoulou, K. (2018). Seismic response of liquefiable sloping ground: Class A and C numerical predictions of centrifuge model responses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113(January 2017), 744–757. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.038>

APÉNDICE A
LISTA DE REGISTROS DE ACELERACIÓN USADOS PARA ANÁLISIS
PARAMÉTRICOS

	REGISTRO	nptos	dt
IQUIQUE 2014 Mw8.2	T05A_EW_P1_100Hz	10001	0.01
	T06A_EW_P1_100Hz	10001	0.01
	T08A_EW_P1_100Hz	10001	0.01
MAULE 2010 Mw8.8	CerroElRoble_100NS	19997	0.01
	CerroElRoble_100WE	19997	0.01
	CerroSantaLucia_100NS	14892	0.01
	CerroSantaLucia_100WE	14892	0.01
	ConventoViejo_100NS	29997	0.01
	ConventoViejo_100WE	29997	0.01
	LasTortolas_200NS	59997	0.005
	LasTortolas_200WE	59997	0.005
	Melado_200NS	16996	0.005
	Melado_200WE	16996	0.005
	Pangue_100NS	19196	0.01
	Pangue_100WE	19196	0.01
	Rapel_100NS	8796	0.01
	Rapel_100WE	8796	0.01
LIMA 1966 Mw 8.1	PRQ_19661017164100NS	3283	0.02
	PRQ_19661017164100WE	3283	0.02
LIMA 1974 Mw8.1	SCO_19741003092134NS	4879	0.02
	SCO_19741003092134WE	4879	0.02
MOQUEGUA 2001 Mw8.4	MOQ001_20010623153300NS	19892	0.01
	MOQ001_20010623153300WE	19892	0.01
PISCO 2007 Mw7.9	AQP002_20070815184321NS	31400	0.005
	AQP002_20070815184321WE	31400	0.005
	ICA002_20070815184058WE	21807	0.01
	ICA002_20070815184058NS	21807	0.01
TOHOKU 2011 Mw 7.9	CHBH101103111446NS1	30002	0.01
	CHBH101103111446EW1	30002	0.01
	FKSH141611220559NS1	30000	0.01
	FKSH141611220559EW1	30000	0.01
TOHOKU 2011 Mw 9.0	CHBH041103111446EW1	30000	0.01
	CHBH041103111446NS1	30000	0.01
	CHBH121103111446EW1	30000	0.01
	CHBH121103111446NS1	30000	0.01
	CHBH131103111446EW1	30000	0.01
	CHBH131103111446NS1	30000	0.01
	CHBH141103111446EW1	30000	0.01
	CHBH141103111446NS1	30000	0.01
	FKSH161103111446EW1	30000	0.01
	FKSH161103111446NS1	30000	0.01
MICHOACÁN 1985 Mw 8.0	APAT8509191EW	4418	0.02
	APAT8509191NS	4418	0.02
	ATYC8509191EW	8423	0.005
	ATYC8509191NS	8423	0.005
	TACY8509191EW	17517	0.01
	OCTT85091910NS	8596	0.01
	OCTT85091910EW	8596	0.01
	SXVI8509191EW	12916	0.01
	SXVI8509191NS	12916	0.01
CHI18509191EW	4233	0.02	
LIMA 1974 Mw8.1	PRQ_19741003092100NS	4899	0.02
	PRQ_19741003092100WE	4899	0.02

BASE DE DATOS PROF. MACEDO	P7411E01	9565	0.005
	P7411N01	19515	0.005
	P7411N02	19515	0.005
	P7411E02	19892	0.01
	P7410E03	19892	0.01
	P7410N03	19892	0.01
	P7410N01	19892	0.01
	P7410E01	12670	0.005
	P7401E04	12670	0.005
	P7401N04	12670	0.005
	P6610N01	12670	0.005
	P6610E01	10001	0.01
	P7005E01	10001	0.01
	P7005N01	10001	0.01
	P0106N05	10001	0.01
	P0106E05	10001	0.01
	P0106E19	10001	0.01
	P0106N19	10001	0.01
	P0106E20	10001	0.01
	P0106N20	10001	0.01
	P0106E21	10001	0.01
	P0106N21	10001	0.01
	P0106E22	10001	0.01
	P0106N22	19997	0.01
	P0106E23	19997	0.01
	P0106N23	19997	0.01
	P0708E13	19997	0.01
	P0708N13	29997	0.01
	P0708N10	29997	0.01
	P0708E10	29997	0.01
	P0708N09	29997	0.01
	P0708E09	29997	0.01
	P0708E11	29997	0.01
	P0708N11	29997	0.01
	P0708E14	29997	0.01
	P0708N14	8796	0.01
	P0708N12	8796	0.01
	P0708E12	8796	0.01
	P0708N19	8796	0.01
	P0708E19	8796	0.01
P0708E12	8796	0.01	
P0708N19	8796	0.01	
P0708E19	8796	0.01	
P0106E19	10001	0.01	
P0106N19	10001	0.01	
P0106E20	10001	0.01	
P0106N20	10001	0.01	
P0106E21	10001	0.01	
P0106N21	10001	0.01	