



**Universidad de Concepción**  
**Dirección de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería – Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería, con mención en**  
**Ingeniería Civil**

**ESTIMACIÓN DE ASENTAMIENTOS INDUCIDOS POR LICUACIÓN EN ARENAS,  
MEDIANTE UN MÉTODO BASADO EN EL PARÁMETRO DE ESTADO A PARTIR DE  
ENSAYOS CPT**



**MARÍA FERNANDA MOLINA PANTOJA**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil

Profesor Guía  
Gonzalo Montalva

Enero, 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 María Fernanda Molina Pantoja

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



## DEDICATORIA



*“Empieza haciendo lo necesario, después lo posible y de repente te encontrarás  
haciendo lo imposible”  
... Para mis padres Dagoberto y Ximena por su apoyo incondicional*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto FONDEF ID16I20157 por el financiamiento necesario para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a mi Profesor guía Gonzalo Montalva, por su tiempo e interés en esta investigación. A la profesora Daniella Escribano por ser parte de mi comisión evaluadora y por sus comentarios útiles en esta investigación. A Francisco Ruz por sus comentarios y contribución a esta investigación. A Vicente San Martín, Javiera Calderón y al grupo de geotecnia de la Universidad de Concepción por la información compartida, comentarios y discusión en los resultados de esta investigación.



## RESUMEN

El fenómeno de licuación es un peligro importante en muchas regiones del mundo y sus daños pueden ser catastróficos. El nivel de daño asociado al fenómeno de licuación dependerá de la magnitud de la deformación que puede experimentar el suelo licuado, como lo son los asentamientos inducidos por la licuación. Por lo que es de gran interés para la práctica de la ingeniería poder estimar estos asentamientos de manera correcta. Los métodos existentes basados en CPT generalmente sobreestiman los asentamientos inducidos por la licuación, dando resultados inexactos, por lo que es necesario buscar nuevos métodos con mayor importancia física. Este trabajo propone un método simplificado para estimar los asentamientos inducidos por licuación basado en el parámetro de estado ( $\psi$ ) a partir de datos CPT y resultados de laboratorio obtenidos recientemente por Olaya y Bray (2022). Se compiló una base de datos de casos históricos de zonas de subducción y otra de casos de zonas de no subducción, con datos de asentamiento medido y se utilizan para ajustar el modelo simplificado propuesto. La metodología propuesta muestra una mejora interesante frente a los métodos existentes de asentamiento post-terremoto inducidos por licuación, evaluando un enfoque de parámetro de estado y un modelo de activación "verdadero" propuesto recientemente, junto con el modelo de asentamiento postlicuación basado en el parámetro de estado. Con base en los resultados, se propone el uso de la metodología de estimación de asentamientos basada en el parámetro de estado junto con la curva de activación "verdadera" de Upadhyaya et al. (2023), utilizando Been y Jefferies (1992) o Plewes et al. (1992) para la estimación del parámetro de estado. Esta propuesta es importante porque mejora la precisión de la estimación del asentamiento inducido por licuación con respecto a las metodologías existentes, aborda los casos de subducción y no subducción y utiliza un parámetro mecánicamente correcto ( $\psi$ ).

## ABSTRACT

The liquefaction phenomenon is a major hazard in many regions of the world and can cause catastrophic damage. The level of damage associated with the liquefaction phenomenon depends on the magnitude of the deformation that the liquefied soil may experience such as liquefaction-induced settlements. It is of great interest to engineering practice to be able to estimate these settlements correctly. Existing CPT-based methods usually overestimate the liquefaction-induced settlements, giving inaccurate results, so seeking new methods with greater physical significance is necessary. This work proposes a simplified method to estimate liquefaction-induced settlements based on the state parameter ( $\psi$ ) from CPT data and laboratory results recently obtained by Olaya and Bray (2022). A historical subduction and non-subduction cases database was compiled with measured settlement data and used to fit the proposed simplified model. The proposed methodology shows a relevant improvement over existing liquefaction-induced post-earthquake settlement methods by using a state parameter approach and a recently proposed "true" triggering model together with post-earthquake settlement models. Based on our results we propose the use of a state parameter methodology together with the "true" triggering curve by Upadhyaya et al. (2023), using Been and Jefferies (1992) or Plewes et al. (1992) for the state parameter estimation. The proposal is significant because it improves liquefaction settlement accuracy over existing methodologies, addresses subduction and non-subduction cases, and uses a mechanically correct parameter ( $\psi$ ).

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación.....	1
1.2. Hipótesis .....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4. Planificación de trabajo .....	3
1.5. Principales resultados y conclusiones.....	4
1.6. Estructura del informe .....	5
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. Introducción.....	6
2.2. Licuación cíclica.....	6
2.3. Evaluación del potencial de licuación .....	8
2.3.1 Solicitud cíclica: CSR.....	9
2.3.2 Resistencia cíclica: CRR.....	9
2.4. Asentamientos inducidos por licuación .....	10
2.5. Métodos simplificados para estimar asentamientos inducidos por licuación.....	14
2.5.1 Métodos simplificados basados en CPT.....	15
2.6. Conclusiones.....	16
<b>CAPÍTULO 3: PARÁMETRO DE ESTADO .....</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción.....	17
3.2. Teoría de estado crítico.....	17
3.3. Parámetro de estado como medida de estado .....	18
3.4. Relación $\varepsilon_v$ - $\psi$ a partir de pruebas de laboratorio .....	19
3.5. Determinación del parámetro de estado con CPT .....	20

3.6. Conclusiones.....	21
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA.....</b>	<b>22</b>
4.1. Introducción.....	22
4.2. Cálculo de asentamiento.....	22
4.3. Introducción de una función en profundidad.....	24
4.4. Conclusiones.....	25
<b>CAPÍTULO 5: COMPILACIÓN DE CASOS HISTÓRICOS .....</b>	<b>26</b>
5.1. Introducción.....	26
5.2. Recopilación de casos históricos .....	26
5.2.1 Casos históricos en Zonas de No Subducción.....	28
5.2.2 Casos históricos en Zonas de Subducción.....	28
5.3. Conclusiones.....	28
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
6.1. Introducción.....	29
6.2. Desempeño del método propuesto.....	29
6.2.1 Desempeño del método propuesto sin función de ponderación.....	30
6.2.2 Desempeño del método propuesto incluyendo una función de ponderación en profundidad .....	32
6.3. Conclusiones.....	35
<b>CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>38</b>
<b>ANEXO 4.1 EVALUACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO EN CASOS HISTÓRICOS SIN MANIFESTACIÓN .....</b>	<b>44</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.2 Resumen de los casos históricos de asentamientos postlicuación .....	26
Tabla 6.2 Resumen indicadores de desempeño según método para base de datos de no Subducción	34
Tabla 6.1 Resumen indicadores de desempeño según método para base de datos de Subducción ...	35



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Resumen del comportamiento de un suelo granular en compresión triaxial monotónica no drenada .....	7
Figura 2.2 Comportamiento cíclico no drenado en arenas correspondiente a licuación cíclica .....	8
Figura 2.3 Ejemplo de curvas CRR con datos CPT propuesta por Idriss y Boulanger (2014) .....	10
Figura 2.5 Asentamiento volumétrico inducido por un terremoto .....	11
Figura 2.6 Falla parcial del apoyo debido al ablandamiento del suelo y desplazamiento del edificio inducido por SSI durante la carga sísmica .....	13
Figura 2.7 Formación de capas intermedias de agua y <i>sand boil</i> .....	14
Figura 2.8 Curvas para estimar la deformación volumétrica para arenas limpias .....	15
Figura 2.9 Curvas que relacionan la deformación volumétrica postlicuación y la resistencia de punta equivalente y normalizada CPT propuesta por: (a) Zhang et al. (2002) y (b) Idriss y Boulanger (2008) .....	16
Figura 3.1 Definición del parámetro de estado .....	19
Figura 3.2 Comparación entre el modelo de Olaya y Bray (2022) en términos del parámetro de estado y las curvas para arenas limpias de Ishihara y Yoshimine (1992) .....	20
Figura 4.1 Comparación entre curvas CRR propuestas por Robertson y Wride (1998), Jefferies & Been (2016) y Upadhyaya et al. (2023) con (a) $Fr=0.5\%$ and (b) $Fr=2.0\%$ .....	24
Figura 6.1 Asentamiento observado vs predicho calculando CRR usando Jefferies y Been (2016) y comparación con los métodos del estado de la práctica: (a) para casos históricos de No Subducción, (c) para casos históricos de Subducción. Calculando CRR con Upadhyaya et al., 2023 y comparación con los métodos del estado de la práctica: (b) para casos históricos de No Subducción y (d) para casos históricos de Subducción.....	31
Figura 6.2 Asentamiento observado vs predicho incluyendo la función de ponderación en profundidad. Calculando CRR con Jefferies y Been (2016) y comparación con los métodos del estado de la práctica: (a) para casos históricos de No Subducción, (c) para casos históricos de Subducción. Calculando CRR con Upadhyaya et al., 2023 y comparación con los métodos del estado de la práctica: (b) para casos históricos de No Subducción y (d) para casos históricos de Subducción. ....	33
Figura A. 1 Histograma del asentamiento predicho vs el número de casos para a) Zhang et al. (2002), b) Idriss and Boulanger (2008), c) método propuesto usando CRR con JB16 y parámetro de estado	

con BJ92, d) método propuesto usando CRR con JB 2016 y parámetro de estado con PEA92, c) método propuesto usando CRR con UEA23 y parámetro de estado con BJ92, c) método propuesto usando CRR con UEA23 y parámetro de estado con BJ92 ..... 45



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

El fenómeno de licuación de suelos granulares ha causado daños significativos a la infraestructura civil, siendo un peligro importante en muchas regiones del mundo. El nivel de daño asociado a este fenómeno dependerá de las deformaciones que pueda experimentar el suelo licuado, como lo son los asentamientos inducidos por licuación. Además, para la ingeniería práctica, estimar correctamente el asentamiento inducido por licuación, puede ser incluso más relevante que predecir su activación.

Dada la dificultad asociada a la obtención de muestras inalteradas en suelos granulares, el enfoque mayormente utilizado en la práctica ingenieril para la estimación de asentamientos es el uso de pruebas *in situ* junto con modelos semi empíricos. Los modelos basados en la prueba de penetración de cono (CPT) ampliamente utilizados en la práctica (e.g. Zhang et al., 2002; Idriss y Boulanger, 2008) se basan en las curvas desarrollados por Ishihara y Yoshimine (1992), que relacionan la deformación volumétrica post licuación con el Factor de Seguridad contra la licuación a diferentes niveles de densidad relativa y la deformación cortante máxima.

Estudios previos han demostrado que estos métodos presentan errores significativos en sus predicciones (Geyin y Maurer, 2019; Pyke, 2020; Taylor et al., 2021; Van Ballegooy et al., 2015), entregando resultados comúnmente sobrestimados en comparación a las observaciones de terreno. Por otro lado, la mayoría de los casos históricos utilizados para la validación y calibración de los modelos populares son de eventos superficiales que difieren de los grandes terremotos de subducción, principalmente en su duración y contenido de frecuencia (Montalva et al., 2017), siendo cuestionable su aplicabilidad.

Inicialmente los estudios de licuación analizaban el estado del suelo en términos de su densidad relativa (e.g. Seed e Idriss, 1971; Ishihara y Yoshimine, 1992), sin embargo, este parámetro ignora el efecto de las tensiones de confinamiento efectivas en la respuesta del suelo (Duan et al., 2022; Macedo et al., 2021). Los modelos posteriores de *triggering* y estimación de asentamientos por licuación (e.g. Robertson y Wride, 1998; Idriss y Boulanger, 2008; Zhang et al., 2002), superan esta limitación mediante el uso de índices de estado normalizados, propuestos a partir de mediciones *in situ* (*i.e.*

N160cs, Qtncs). Sin embargo, al ser índices de estados de origen netamente empírico, su aplicabilidad en datos fuera del rango con el cual fueron calibrados son más inciertos y no han sido totalmente verificados (NASEM, 2016) (e.g. para eventos de subducción, profundidades mayores a 15 m, suelos con finos no plásticos).

Un índice alternativo para representar el comportamiento del suelo es el parámetro de estado ( $\psi$ ), que se enmarca dentro de la teoría de estado crítico y se define como la diferencia del índice de vacíos actual del suelo y el índice de vacíos en estado crítico a un mismo esfuerzo efectivo medio (Been y Jefferies, 1985). Su valor se relaciona tanto con la Densidad relativa (relación de vacíos) como con el esfuerzo efectivo, relacionándose más directamente con la mecánica del problema (Jefferies y Been, 2016; Robertson, 2010). Por lo anterior, el parámetro de estado se utiliza en este estudio para representar el estado in situ de los suelos arenosos. Además, existen correlaciones basadas en CPT (e.g. Been y Jefferies, 1992; Plewes et al., 1992) con un uso aceptado dentro de la ingeniería geotecnia, que entregan una estimación razonable del comportamiento in situ (e.g., Reid, 2015).

Estudios recientes han incluido al parámetro de estado como indicador del estado del suelo para evaluar el *triggering* (Duan et al., 2021, Macedo et al., 2022, Moss, 2014) y las deformaciones volumétricas inducidas por licuación (Olaya y Bray, 2022), sin embargo, esta última metodología no ha sido verificadas con datos de casos históricos. Por lo tanto, este estudio propone un método para la estimación de asentamientos inducidos por licuación, basado en el parámetro de estado, a partir de mediciones CPT realizadas en diferentes casos históricos de licuación. Se evalúa el desempeño del método propuesto en comparación a los modelos del estado de la práctica, se discuten sus resultados y limitaciones.

## 1.2. Hipótesis

Un método que incluya el parámetro de estado en la estimación de asentamientos inducidos por licuaciones entregará estimaciones similares o mejores que los métodos existentes

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Postular un método simplificado para la estimación de asentamientos inducidos por licuación basado en el parámetro de estado del suelo

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar y procesar una base de datos de casos históricos basada en mediciones CPT con evidencia de licuación y datos de asentamiento medido
- Evaluar los métodos simplificados basados en mediciones CPT existentes en la estimación de asentamientos inducidos por licuación
- Proponer un método simplificado para la estimación de asentamientos inducidos por licuación basado en el parámetro de estado

## 1.4. Planificación de trabajo



El plan de trabajo realizado para cumplir con los objetivos propuestos se resume en las siguientes cuatro etapas:

- 1) Revisión bibliográfica: Se realizó en primer lugar una rigurosa revisión del estado del arte sobre los diferentes mecanismos involucrados en los asentamientos inducidos por licuación, las metodologías simplificadas disponibles para estimar tanto la resistencia cíclica como el asentamiento inducido por licuación a partir de datos CPT y respecto al uso del parámetro de estado dentro del estudio de licuación de los suelos.
- 2) Recopilación de base de datos: Posteriormente se compilaron dos bases de datos basadas en CPT, la primera compuesta por casos históricos de Zonas de No Subducción y otra de casos históricos de subducción. Los sitios seleccionados corresponden a sitios donde se evidenció licuación y con dato de asentamiento medido bien documentado. Esta recopilación de datos se utilizó para evaluar y ajustar el modelo propuesto.
- 3) Evaluación de los métodos simplificados existentes: Con base en los ensayos de terreno recopilados en la etapa anterior, se evaluaron las metodologías existentes basadas en CPT para

la estimación de asentamientos inducidos por licuación. Esto para comparar los resultados obtenidos por dichos métodos con la nueva propuesta.

- 4) Propuesta del nuevo método simplificado: Se propuso un nuevo método simplificado basado en el parámetro de estado ( $\psi$ ) a partir de datos CPT y resultados de laboratorio recientemente obtenidos. Se evaluó el desempeño del método propuesto utilizando como indicadores de desempeño al residual promedio y a la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y se compararon con los métodos existentes basados en CPT. Se realizó un análisis crítico y discusión de los resultados obtenidos, se formularon conclusiones y se presentaron líneas de investigación futura.

## 1.5. Principales resultados y conclusiones

La presente investigación propone una metodología simplificada para la estimación de asentamientos basada en el parámetro de estado a partir de datos CPT, junto con la curva de activación “verdadera” propuesta recientemente y un enfoque de parámetro de estado. Se compiló una base de datos compuesta de 9 casos históricos de zonas de subducción y otra compuesta por 22 casos históricos de zonas de no subducción, para la evaluación y ajuste del modelo.

La metodología propuesta considera la incorporación de una función de ponderación en profundidad con valores de  $\alpha$  mayores a la unidad, lo que indica una amplificación de las deformaciones volumétricas. Esto se podría justificar con que la mayoría de los casos evaluados presentan cargas (casos Tipo B) que podrían inducir deformaciones por corte, aumentando el asentamiento total. Siendo más relevante en eventos de larga duración (*i.e.* Subducción).

Los resultados obtenidos para las bases de datos de subducción y no subducción sugieren que el uso de la metodología de parámetro de estado junto con la curva de activación "verdadera" de Upadhyaya et al. (2023), utilizando Been y Jefferies (1992) o Plewes et al. (1992) para la estimación del parámetro de estado, es una forma plausible de reducir la incertidumbre en los asentamientos inducidos por licuación, entregando estimaciones más precisas que los métodos usualmente utilizados en la práctica.

Por lo anterior, el uso de un parámetro mecánicamente correcto ( $\psi$ ) mejora la precisión de la estimación del asentamiento inducido por licuación respecto a las metodologías existentes, verificándose la hipótesis planteada en este estudio.

## **1.6. Estructura del informe**

El documento se compone de seis capítulos además del capítulo introductorio. En el Capítulo 2, se introducen los conceptos generales relacionados con la licuación de los suelos, se presentan los métodos disponibles para la estimación de asentamientos inducidos por licuación a partir de datos CPT y se incluye una descripción cualitativa de los mecanismos involucrados en los asentamientos inducidos por licuación. En el Capítulo 3, se definen los conceptos generales de la teoría de estado crítico y se presenta la justificación teórica de la inclusión del parámetro de estado en la estimación de asentamientos. Posteriormente, en el Capítulo 4 se describe la metodología propuesta para la estimación de asentamientos inducidos por licuación basada en el parámetro de estado a partir de datos CPT y los criterios considerados. En el Capítulo 5 se presenta la base de datos compilada, basada en datos CPT para la evaluación y ajuste del modelo propuesto. En el Capítulo 6 se analizan los resultados de las diferentes variantes del método propuesto y se compara el desempeño del método con el desempeño de los métodos usualmente utilizados en la práctica ingenieril basados en CPT. Finalmente, en el capítulo 7, se presenta la discusión y conclusiones del trabajo de investigación.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Introducción

Los terremotos de Alaska ( $M_w=9.2$ ) y Niigata ( $M_w=7.5$ ) en 1964, dejaron en evidencia lo catastrófico que pueden ser los efectos atribuibles al fenómeno de licuación despertando interés en diversos investigadores en estudiar y entender este complejo fenómeno. Pasando a ser uno de los principales focos de estudio dentro de la ingeniería geotécnica sísmica durante los últimos 50 años, donde se han propuesto diferentes métodos para considerar su activación y efectos en la práctica ingenieril.

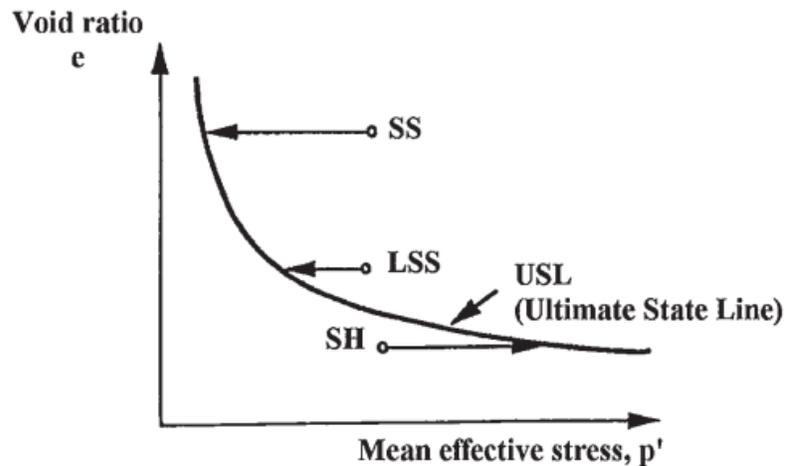
El objetivo de este capítulo es definir los términos utilizados para explicar el fenómeno de licuación de los suelos, para luego presentar los métodos disponibles tanto para la evaluación del potencial de licuación como para la estimación de asentamientos inducidos por licuación a partir de datos CPT, se incluye una descripción cualitativa de los mecanismos involucrados y los aspectos más relevantes del estado del arte.



### 2.2. Licuación cíclica

La licuación de un suelo se define como la pérdida significativa de resistencia al corte y rigidez debido a un aumento en la presión de poros, teniendo como consecuencia una disminución en los esfuerzos efectivos producto de sollicitaciones cíclicas (e.g. un terremoto), generando el potencial de experimentar grandes deformaciones. Según Robertson y Fear (1997) la licuación del suelo se puede distinguir entre licuación de flujo y ablandamiento cíclico, donde este último se divide en licuación cíclica y movilidad cíclica.

La Figura 2.1 muestra un resumen del comportamiento de un suelo granular cargado en compresión triaxial monotónica sin drenaje, en el espacio de la relación de vacíos ( $e$ ) y la tensión efectiva normal media ( $p'$ ). Un suelo con una relación de vacíos inicial más alta que la línea de estado final (USL) se ablandará por deformación (SS) a grandes deformaciones, alcanzando eventualmente una condición final a menudo referida como estado crítico o estacionario. Sin embargo, un suelo con una relación de vacío inicial más baja que la USL se endurecerá por deformación (SH) a grandes deformaciones hacia su estado final.



**Figura 2.1** Resumen del comportamiento de un suelo granular en compresión triaxial monotónica no drenada

Fuente: Robertson y Wride (1998)

Durante una carga cíclica sin drenaje (e.g. carga sísmica), casi todos los suelos saturados sin cohesión desarrollan presiones intersticiales positivas debido a la respuesta contractiva a pequeñas deformaciones. Si el suelo se está ablandando por deformación, la licuación del flujo es posible si se puede provocar el colapso del suelo y si los esfuerzos cortantes gravitacionales son mayores que la resistencia última o mínima. El mecanismo desencadenante puede ser monótono o cíclico

Si el suelo se está endureciendo por deformación, por lo general no ocurrirá la licuación del flujo, sin embargo, puede ocurrir ablandamiento cíclico. La magnitud de las deformaciones durante la carga dependerá de la densidad del suelo, el tamaño (magnitud y duración) de la carga cíclica y si se produce o no la inversión del esfuerzo cortante.

Si se produce una gran inversión del esfuerzo cortante, en condiciones de suelo generalmente niveladas o pendiente suave, es posible que los esfuerzos efectivos lleguen a cero y, por lo tanto, puede tener lugar una licuación cíclica (Figura 2.2). Las deformaciones de licuación cíclica, tienden a ocurrir durante la carga cíclica, ya que son las fuerzas de inercia las que impulsan el fenómeno. Cuando se logra la condición de esfuerzo efectivo esencialmente cero, pueden resultar grandes deformaciones. Si la carga cíclica continúa, las deformaciones pueden aumentar progresivamente. Si no se produce la inversión del esfuerzo cortante, generalmente no es posible alcanzar la condición de esfuerzo efectivo cero y las deformaciones serán limitadas, es decir, se producirá movilidad cíclica.

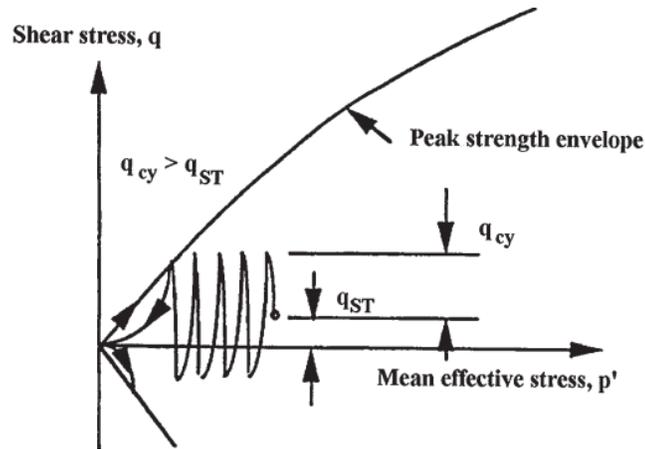


Figura 2.2 Comportamiento cíclico no drenado en arenas correspondiente a licuación cíclica

Fuente: Robertson y Fear (1997)

La forma más común de licuación del suelo observada en el campo ha sido el ablandamiento cíclico debido a la carga sísmica (Robertson y Wride, 1998). Este estudio se centra en la licuación cíclica y su evaluación utilizando los resultados de mediciones CPT.

### 2.3. Evaluación del potencial de licuación

Para estimar el potencial de licuación en términos del Factor de Seguridad contra la licuación ( $FS_{liq}$ ), Seed e Idriss (1971) a partir de observaciones en terrenos llanos o con leve pendiente (*e.g. sand boils, lateral spreading*) y datos de ensayos (*in situ* y laboratorio), proponen un método ampliamente utilizado, conocido como “Método simplificado” definido según la Ecuación 2.1 como la razón entre la resistencia cíclica (CRR: *Cyclic Resistance Ratio*) y la sollicitación cíclica (CSR: *Cyclic Stress Ratio*).

$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR} \tag{2.1}$$

Si la demanda es mayor a la resistencia ( $FS_{liq} < 1$ ) es posible la ocurrencia de licuación, mientras que si  $FS_{liq} > 1$ , el suelo no es potencialmente licuable. En la práctica se considera que un suelo es no licuable a partir de  $FS_{liq} > 1.2$ .

### 2.3.1 Solicitación cíclica: CSR

La razón de sollicitación cíclica (CSR) corresponde a la medida de intensidad de las cargas cíclicas inducidas por el sismo y se define como la razón entre el esfuerzo de corte inducido por el sismo ( $\tau_{cyc}$ ) y el esfuerzo vertical efectivo inicial ( $\sigma'_{vo}$ ). Seed e Idriss (1971) determinan la demanda sísmica mediante la expresión simplificada presentada en Ecuación 2.2.

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (2.2)$$

Donde,  $(\tau_{cyc}/\sigma'_{vo})$  es el esfuerzo de corte cíclico normalizado inducido por el sismo,  $a_{max}$  la aceleración horizontal máxima en superficie,  $g$  la aceleración de gravedad,  $\sigma_{vo}$  y  $\sigma'_{vo}$  la tensión vertical total y efectiva respectivamente y  $r_d$  el factor de reducción del esfuerzo cortante que tiene como objetivo reducir la demanda sísmica en profundidad, dando flexibilidad al perfil de suelo y explicar de mejor manera su respuesta dinámica. Para la estimación de este factor existen diferentes propuestas (e.g. Iwasaki et al., 1978; Liao y Whitmann, 1986; Idriss, 1999; Youd *et al.*, 2001; Cetin *et al.*, 2004).

### 2.3.2 Resistencia cíclica: CRR

La razón de resistencia cíclica (CRR) describe la capacidad del suelo para resistir la licuación, generalmente se determina mediante ensayos de laboratorio o de terreno. Este último método presenta como ventaja el no requerir muestras inalteradas de suelo, que son altamente costosas y difíciles de obtener especialmente en suelos granulares. Por lo que el uso de pruebas *in situ* (e.g SPT, CPT, Vs) ha tomado cada vez mayor importancia dentro del estudio de la licuación. La curva CRR separa los sitios susceptibles a licuar (sobre la curva) de los no susceptibles a licuar (bajo la curva), como se presenta en la Figura 2.3.

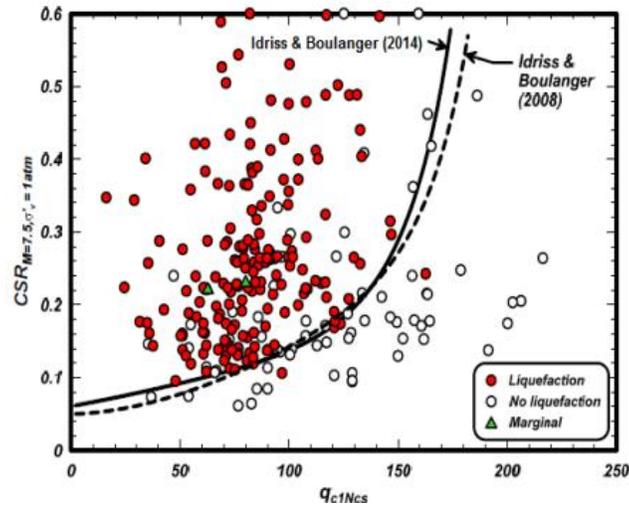


Figura 2.3 Ejemplo de curvas CRR con datos CPT propuesta por Idriss y Boulanger (2014)

Fuente: Idriss y Boulanger (2014)

La propuesta inicial de Seed e Idriss (1971) determina la resistencia de un estrato a licuar utilizando el número de golpes SPT. Sin embargo, dadas las limitaciones del ensayo SPT y la rápida popularización del ensayo de penetración de cono (CPT) por sus ventajas (*e.g.* Mayor repetibilidad entre ensayos, perfil continuo, mayor precisión, mayor consistencia de resultados). Diversos autores han propuesto modificaciones del método simplificado basándose en datos de ensayos CPT, con el fin de ampliar su uso y mejorar sus predicciones (*e.g.* Robertson y Wride, 1998; Moss et al., 2006; Idriss y Boulanger, 2008; Boulanger e Idriss, 2014).

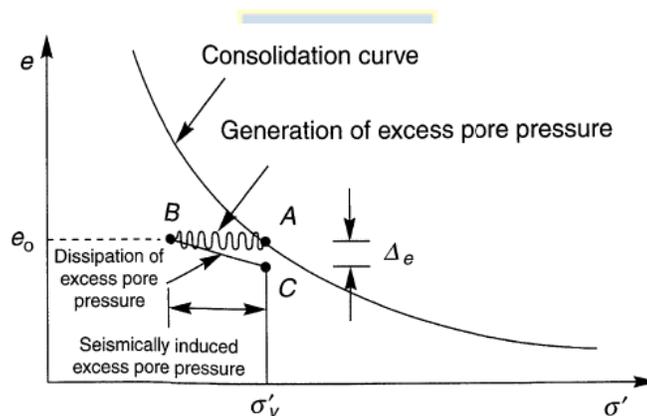
Para el cálculo de la resistencia cíclica CRR, generalmente se aplican factores de corrección por confinamiento  $K_\sigma$ , corte estático  $K_a$ , y además un factor de escala por magnitud MSF, ya que la mayoría de los estudios realizados son considerando un sismo de magnitud  $M_w=7.5$ .

#### 2.4. Asentamientos inducidos por licuación

El nivel de daño asociado al fenómeno de licuación dependerá de la magnitud de la deformación que pueda experimentar el suelo licuado, como lo son los asentamientos inducidos por licuación. El asentamiento total de una estructura con cimientos poco profundos en un terreno nivelado o con pendiente suave, es el resultado de una combinación de mecanismos complejos que ocurren tanto en el suelo como en la estructura, durante y después del sismo. Se considera que son tres las componentes

principales que contribuyen al asentamiento total: Asentamiento volumétrico, asentamiento por corte, y asentamiento relacionado a la eyecta de material. (Dasthi *et al.*, 2010; Bray y Dashti, 2014)

- Asentamiento volumétrico: Incluye tanto la sedimentación como la re consolidación de los suelos licuados, la contribución de este mecanismo en el asentamiento total dependerá de la conductividad hidráulica de las capas de suelo y de la magnitud del gradiente hidráulico. La sedimentación del suelo licuado, ocurre cuando se alcanza una relación de presión de poro alta (*i.e.*  $r_u \sim 1$ ). La arena licuada, que se encuentra en estado de dispersión comienza a sedimentar, acumulándose en el fondo de la capa licuada formando una zona solidificada que aumenta de espesor con el tiempo y a su vez se consolida con su peso propio. Dando paso a la consolidación del suelo licuado, una vez que el exceso de presión de poros se disipa, aumentando la fuerza de contacto de las partículas, que se traduce en un aumento de la tensión efectiva.



**Figura 2.4 Asentamiento volumétrico inducido por un terremoto**

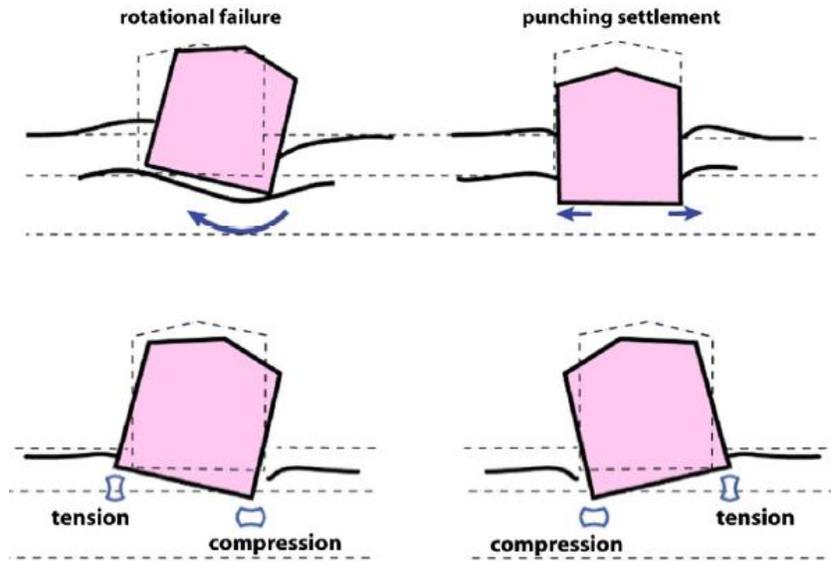
Fuente: Kramer (1996)

En la Figura 2.4 el punto A, se observa que el elemento de suelo está en equilibrio drenado (sin exceso de presión de poro). La ocurrencia de un sismo induce la acumulación de un exceso de presión de poro en condiciones no drenadas, reduciendo la tensión efectiva (punto B). El exceso de presión de poro produce un gradiente hidráulico que expulsa el agua intersticial, el flujo de agua reduce el gradiente hidráulico hasta que el exceso de presión de poro se ha disipado por completo (punto C). A medida que el agua fluye de los vacíos, el volumen del elemento disminuye produciendo el asentamiento, la magnitud del cambio de volumen aumenta con la magnitud del exceso de presión de poro inducido sísmicamente.

- Asentamiento por corte: La presencia de edificios puede generar mayor asentamiento en comparación con el campo libre como resultado del esfuerzo cortante inducido sobre el suelo por las cargas del edificio que se ven afectadas por la respuesta dinámica del edificio y la interacción suelo-estructura durante el sismo (*i.e.* balanceo). Pudiendo desarrollar fallas de capacidad de carga, por la pérdida de resistencia del suelo bajo la carga estática de la estructura, resultando en asentamientos por punzonamiento (*punching failure*) o inclinación de la estructura. Y desplazamientos por el mecanismo progresivo interacción suelo estructura (SSI *ratcheting*) inducido por la carga cíclica (Figura 2.5).

Estas deformaciones son en función del ancho y presión de contacto de la base y el espesor de la capa del suelo licuado, entre otros factores (Yoshimi y Tokimatsu, 1977; Liu y Dobry, 1997). Por lo general, los asentamientos son más relevantes en edificios altos y pesados que en edificios bajos y livianos (Bray y Macedo, 2017; Bray y Dashti, 2014).

A través de análisis no lineales dinámicos de interacción suelo-estructura, utilizando un modelo constitutivo de suelo avanzado debidamente calibrado, es posible capturar de manera efectiva el asentamiento por corte (*e.g.* Travasarou *et al.*, 2006; Bray y Macedo, 2017; Luque y Bray, 2020), sin embargo, estos análisis sólo se recomiendan para la evaluación del desempeño de estructuras importantes.



**Figura 2.5** Falla parcial del apoyo debido al ablandamiento del suelo y desplazamiento del edificio inducido por SSI durante la carga sísmica

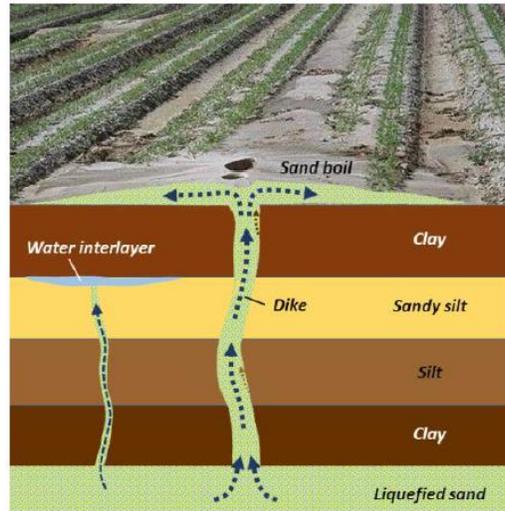
Fuente: Modificado de Bray y Dashti (2014)

- Asentamiento por eyecta de material: El fenómeno de licuación, puede ir acompañado del desarrollo de *sand boils*, donde las partículas de suelo bajo los cimientos son transportadas a través de grietas o canales localizados y expulsadas a la superficie como eyecta de arena, producto de un alto exceso de presiones de poro y de gradientes hidráulicos importantes. Siendo un indicador útil de la generación de altas presiones de poros en el suelo.

La cantidad de eyecta de material hacia la superficie depende de la magnitud del exceso de presión de poro y del grosor, permeabilidad e integridad de las capas de suelo sobre la zona licuada. Por ejemplo, la licuación a grandes profundidades o capas delgadas puede no desarrollar *sand boils*, mientras que el exceso de presiones de poro a poca profundidad o capas gruesas si puede hacerlo.

Por otro lado, la migración y disipación de la presión de poros puede impedirse si una capa de suelo de baja permeabilidad se encuentra sobre la capa de suelo licuable. En tal caso, el agua de los poros que fluye puede acumularse bajo la capa poco permeable, formando capas intermedias de agua. Dichas capas pueden producir una redistribución de las partículas en la base de la capa de baja permeabilidad, disminuyendo notablemente su densidad (Figura 2.6).

El asentamiento producido por este mecanismo es el resultado de la deformación volumétrica desarrollada a medida que se disipan las presiones de poro inducidas sísmicamente. Dado que el agua puede seguir fluyendo después del sismo, la condición más crítica producto de la eyecta de sedimento puede ocurrir una vez finalizado el sismo. Estas deformaciones pueden gobernar el asentamiento del edificio y sus efectos pueden ser devastadores.



**Figura 2.6 Formación de capas intermedias de agua y sand boil**

Fuente: National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016)

## 2.5. Métodos simplificados para estimar asentamientos inducidos por licuación

El poder predecir de manera asertiva los asentamientos inducidos por licuación, es de gran importancia dentro de la ingeniería civil para una comprensión del desempeño anticipado de estructuras y aplicar medidas de mitigación ante futuros sismos. Es por esto que, paralelo al desarrollo de los métodos para estimar la activación de la licuación, se han propuesto procedimientos simplificados basados en pruebas *in situ* para predecir los asentamientos inducidos por licuación, asociando el asentamiento observado con la deformación volumétrica ( $\epsilon_v$ ) (e.g. Tokimatsu y Seed, 1984; Ishihara y Yoshimine, 1992; Shamoto *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2002; Wu y Seed, 2004; Cetin *et al.*, 2009).

Sin embargo, es difícil determinar cuánto del asentamiento observado es realmente producto de la deformación volumétrica del suelo ( $\epsilon_v$ ). Pese a esta limitación, estos métodos siguen siendo los mayormente utilizados en la práctica ingenieril para estimar de manera simple y directa las

deformaciones del suelo para proyectos de bajo a mediano riesgo y entregar estimaciones preliminares para proyectos de mayor riesgo (Youd *et al.*, 2001).

Las pruebas *in situ* mayormente utilizadas en la práctica ingenieril son el Ensayo de penetración estándar (SPT: *Standar Penetration Test*, por sus siglas en inglés), la prueba de penetración de cono (CPT: *Cone Penetration Test*, por sus siglas en inglés) y las mediciones de velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ). El ensayo CPT ha ido reemplazando de manera progresiva a otros ensayos de penetración durante los últimos años, dada las ventajas que este presenta. Entregando resultados más consistentes y permitiendo una interpretación más detallada de los estratos de suelo (Youd *et al.*, 2001).

### 2.5.1 Métodos simplificados basados en CPT

Los métodos simplificados para estimar la deformación volumétrica postlicuación ( $\epsilon_v$ ) a partir de datos CPT se basan en el trabajo de Nagase e Ishihara (1988), que realizaron pruebas de corte simple cíclico en arenas limpias del río Fuji reconstituidas a tres densidades relativas (47%, 73%, 93%) para un esfuerzo efectivo vertical (196kPa). A partir de estos resultados, Ishihara y Yoshimine (1992) propusieron una serie de curvas presentadas en Figura 2.7, que permiten estimar la deformación volumétrica ( $\epsilon_v$ ) en función de la densidad relativa ( $D_r$ ), el factor de seguridad frente a la activación de licuación ( $FS_{liq}$ ) y la deformación cortante máxima ( $\gamma_{max}$ ).

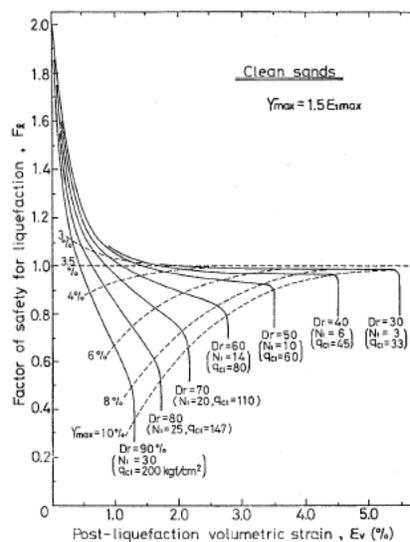
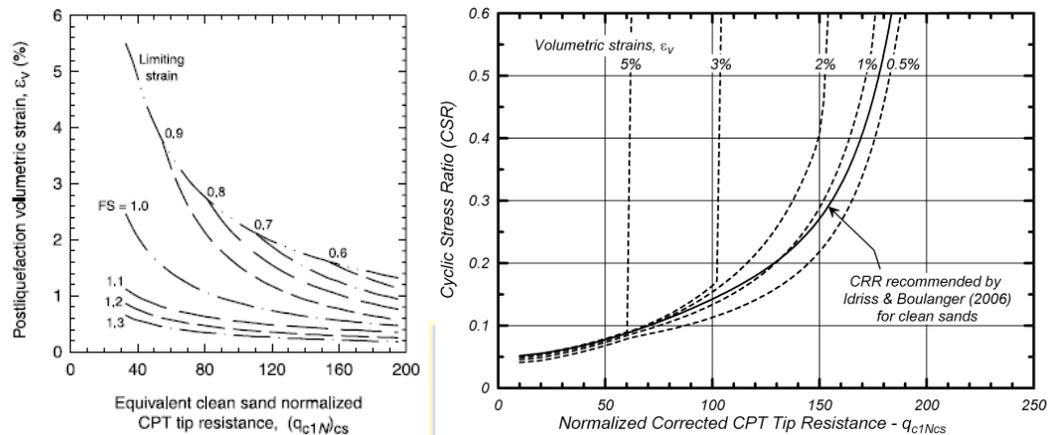


Figura 2.7 Curvas para estimar la deformación volumétrica para arenas limpias

Fuente: Ishihara y Yoshimine (1992)

Dada la popularización del CPT para la caracterización de sitios, Zhang *et al.* (2002) e Idriss y Boulanger (2008), convierten las curvas de Ishihara y Yoshimine (1992) a una forma más adecuada para utilizarlas con procedimientos basados en datos CPT. Estableciendo correlaciones entre la resistencia a la penetración normalizada ( $q_{c1N}$ )<sub>cs</sub> (Robertson y Wride, 1998) y la deformación volumétrica post licuación ( $\varepsilon_v$ ) para diferentes  $FS_{liq}$  según Figura 2.8. El método de Zhang et al. (2002) ha sido ampliamente utilizado y es el enfoque basado en CPT más popular en la práctica de la ingeniería.



**Figura 2.8** Curvas que relacionan la deformación volumétrica postlicuación y la resistencia de punta equivalente y normalizada CPT propuesta por: (a) Zhang et al. (2002) y (b) Idriss y Boulanger (2008)

Fuente: Zhang et al. (2002) y Idriss y Boulanger (2008)

## 2.6. Conclusiones

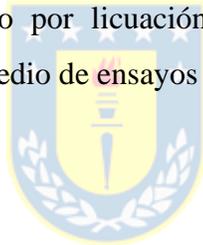
En el presente capítulo se expusieron los principales mecanismos involucrados en el asentamiento inducido por licuación y una breve revisión del estado del arte de los métodos simplificados compatibles con datos CPT para la estimación de dichos asentamientos. Se presentó, además, las metodologías disponibles para evaluar el potencial de licuación con datos CPT.

## CAPÍTULO 3: PARÁMETRO DE ESTADO

### 3.1. Introducción

La estimación del estado del suelo es el primer requisito para caracterizar el comportamiento de la arena frente al fenómeno de licuación. Un índice alternativo para representar el comportamiento del suelo es el parámetro de estado, que se enmarca dentro de la teoría de estado crítico y se define como la diferencia del índice de vacíos actual del suelo y el índice de vacíos en estado crítico a un mismo esfuerzo efectivo medio (Been y Jefferies, 1985). Su valor se relaciona tanto con la Densidad relativa (relación de vacíos) como con el esfuerzo efectivo, relacionándose más directamente con la mecánica del problema (Jefferies y Been, 2016; Robertson, 2010).

El objetivo de este capítulo es definir los conceptos generales de la teoría de estado crítico, presentar la justificación teórica de la inclusión del parámetro de estado como indicador del estado del suelo en la estimación del asentamiento inducido por licuación y mencionar las metodologías para la estimación del parámetro de estado por medio de ensayos CPT.



### 3.2. Teoría de estado crítico

A partir de ensayos de caja de corte, Casagrande (1936) demostró que las arenas sueltas se contraían y las arenas densas se dilataban hasta alcanzar aproximadamente la misma relación de vacíos a grandes deformaciones. A esta relación de vacíos la denominó como el índice de vacíos crítico, donde el suelo ya no presenta deformaciones volumétricas. Taylor (1984) señaló que esta relación de vacíos se veía afectada por el nivel de tensión y que a mayor nivel de tensión el índice de vacíos crítico disminuía.

Roscoe et al. (1958) formaliza la idea de Casagrande y define el estado crítico, como el estado en que el suelo continúa deformándose a una tensión y relación de vacíos constante. El lugar geométrico que representa los puntos en dicho estado se denomina Locus de estado crítico (CSL: *Critical State Locus*). Por otro lado, Poulos (1981) define al *steady state* como el estado en el que el suelo se deforma continuamente con un volumen, esfuerzo normal efectivo, esfuerzo de corte y velocidad constante. El lugar geométrico que representa las relaciones de vacío en estado estacionario con la tensión efectiva media se denomina Locus de estado estacionario (SSL: *Steady State Locus*). Matemáticamente, no

hay diferencias entre la definición de *steady state* y *critical state*, por lo que usualmente se consideran equivalentes (Jefferies y Been, 2016). El Locus de estado crítico se define tanto para el espacio  $e-p'$  como  $q-p'$ , según la Ecuación 3.1, y Ecuación 3.2.

$$q = Mp' \quad (3.1)$$

$$e = \Gamma - \lambda \ln(p') \quad (3.2)$$

Donde  $M$ ,  $\Gamma$ , y  $\lambda$  son propiedades intrínsecas del suelo,  $q$  corresponde al esfuerzo desviador,  $p'$  a la presión efectiva media, y  $e$  el índice de vacíos.

### 3.3. Parámetro de estado como medida de estado

Un índice alternativo para caracterizar el estado in situ de suelos arenosos es el parámetro de estado ( $\psi$ ) propuesto por Been & Jefferies (1985). Este parámetro, enmarcado dentro de la teoría del estado crítico, se define como la diferencia de la relación de vacíos actuales del suelo ( $e$ ) y la relación de vacíos del estado crítico ( $e_c$ ) al mismo esfuerzo efectivo medio ( $p'$ ), como se muestra en la Figura 3.1. Por lo tanto, un valor positivo o negativo se relacionará con su comportamiento al corte monótono no drenado, es decir, una arena con una relación de vacíos por encima de la línea de estado crítico (CSL) ( $\psi > 0$ ) tiende a contraerse, mientras que una relación de vacíos por debajo de la CSL ( $\psi < 0$ ) tiende a dilatarse.

En contraste con el comportamiento al corte monótono, desde la perspectiva de las cargas cíclicas, tanto los suelos contractivos como dilatantes pueden experimentar licuación cíclica, siempre y cuando la carga cíclica sea lo suficientemente grande en tamaño y duración (Robertson y Fear, 1997). Sin embargo, incluso si la licuación no se desencadena por completo ( $r_u < 1$ ), se pueden esperar deformaciones volumétricas (p. ej., Mesri et al., 2018; Chiaradonna et al., 2019) y dependerán en gran medida del estado inicial del suelo. En consecuencia, cuanto mayor sea el parámetro de estado, mayor será el potencial de deformación del suelo.

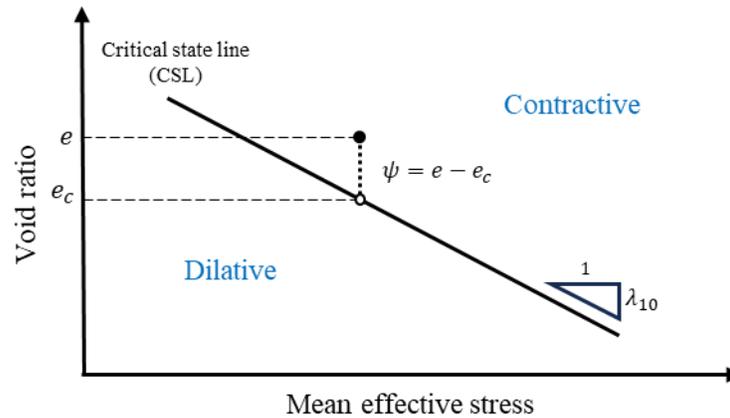
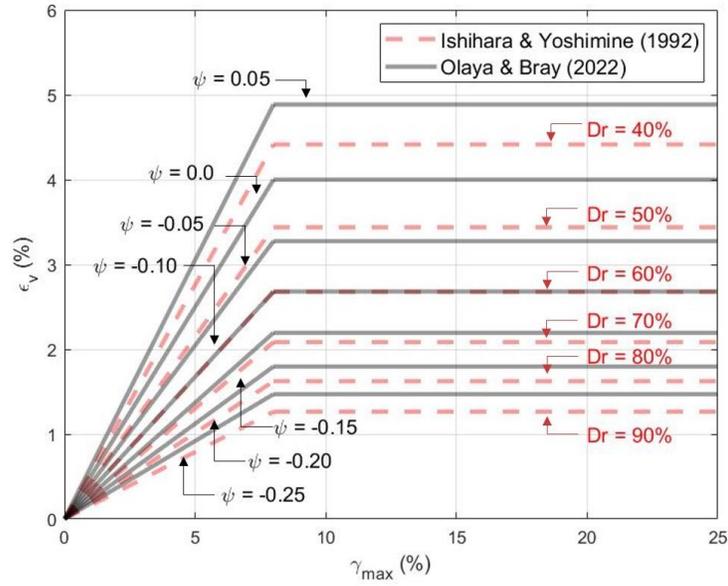


Figura 3.1 Definición del parámetro de estado

### 3.4. Relación $\varepsilon_v$ - $\psi$ a partir de pruebas de laboratorio

Las relaciones propuestas por Ishihara y Yoshimine (1992) han sido fundamentales para el desarrollo de procedimientos para estimar la deformación cortante inducida por licuación y la deformación volumétrica postlicuación en depósitos de arena limpia que responden como la arena del río Fuji. Sin embargo, se desconoce su aplicabilidad en arenas limpias con diferente granulometría, así como en arenas limosas no plásticas o limos no plásticos (Bray et al., 2017). Con base en lo anterior, Olaya y Bray (2022) ampliaron la base de datos de laboratorio proporcionada originalmente por Ishihara y Yoshimine (1992) y evaluaron las tendencias de variación de la deformación volumétrica postlicuación, la deformación por corte máxima y  $FS_{liq}$ , con otros parámetros incluido el parámetro de estado como un índice de estado del suelo.

En la Figura 3.2, se muestran los contornos del modelo de Olaya y Bray (2022) para parámetros de estado de -0,25 a 0,05, junto con curvas de arena limpia de Ishihara y Yoshimine (1992) para comparar. Observamos que el modelo propuesto por Olaya y Bray (2022) produce deformaciones volumétricas en el rango de 1,5 a 5,0%, similar a las curvas basadas en  $D_r$  de Ishihara y Yoshimine (1992).



**Figura 3.2 Comparación entre el modelo de Olaya y Bray (2022) en términos del parámetro de estado y las curvas para arenas limpias de Ishihara y Yoshimine (1992)**

### 3.5. Determinación del parámetro de estado a partir de datos CPT



Los métodos más utilizados para estimar  $\psi$  a partir de datos CPT se basan en el procedimiento de inversión propuesto originalmente por Been et al. (1986, 1987), que fue desarrollado a partir de datos de pruebas de cámara de calibración. La expresión desarrollada, se presentada en Ecuación 3.4 hasta Ecuación 3.5.

$$q = q_p \cdot (1 - B_q) = k \cdot \exp(-m \cdot \Psi) \tag{3.3}$$

$$\bar{k} = \left(3 + \frac{0.85}{\lambda_{10}}\right) \cdot M_{tr} \tag{3.4}$$

$$\bar{m} = 11.9 - 13.3 \cdot \lambda_{10} \tag{3.5}$$

Donde  $M_{tr}$  es la relación de fricción de estado crítico que se puede obtener a partir de ensayos triaxiales y se supone que es 1.2 cuando no hay información adicional (Duan et al., 2022),  $\lambda_{10}$  es la pendiente de base 10 de la línea de estado crítico, Been y Jefferies (1992) y Plewes et al. (1992) presentan correlaciones para estimarla a partir de datos CPT, presentadas en Ecuación 3.6 y Ecuación 3.7 respectivamente.

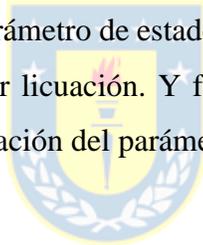
$$\lambda_{10} = \frac{1}{(34 - 10 \cdot I_{c,BJ})} \quad (3.6)$$

$$\lambda_{10} = \frac{F_r}{10} \quad (3.7)$$

Además, se han desarrollado diversos métodos simplificados para estimar el parámetro de estado a partir de los resultados de CPT (e.g. Robertson, 2010; Duan et al., 2022). Sin embargo, este estudio sólo considera las correlaciones ya presentadas.

### 3.6. Conclusiones

En este capítulo se definen los conceptos generales de la teoría de estado crítico, junto con la justificación teórica de la inclusión del parámetro de estado como indicador del estado del suelo en la estimación del asentamiento inducido por licuación. Y finalmente se mencionan las metodologías consideradas en este estudio para la estimación del parámetro de estado por medio de ensayos CPT.



## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se describe la metodología propuesta y los criterios considerados para la estimación de asentamientos inducidos por licuación basada en el parámetro de estado a partir de datos CPT.

### 4.2. Cálculo de asentamiento

Para un sitio con terreno nivelado, distante de cualquier superficie libre, como riberas de río o costas, es razonable suponer que hay poco o ningún desplazamiento lateral después de un terremoto. Por lo que, la deformación volumétrica por reconsolidación del suelo licuado será aproximadamente igual a la deformación vertical. De esta manera, el asentamiento inducido por licuación, se puede estimar según Ecuación 4.1.

$$S = \sum_{i=1}^j (\varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i) \quad (4.1)$$



Donde,  $\varepsilon_{vi}$  es la deformación volumétrica postlicuación de la subcapa  $i$ ,  $\Delta z_i$  el espesor de la subcapa  $i$ ,  $j$  el número de subcapas del suelo y  $S$  es el asentamiento del suelo en superficie inducido por licuación. La deformación volumétrica se estima utilizando las relaciones propuestas por Olaya y Bray (2022), en función del parámetro de estado ( $\psi$ ) y la deformación cortante máxima ( $\gamma_{max}$ ) como se indica en Ecuación 4.2.

$$\varepsilon_v = 0.50 \cdot \exp(4.0 \cdot \Psi) \cdot \min(\gamma_{max}, 8\%) \quad (4.2)$$

El parámetro de estado ( $\psi$ ) se estima según la propuesta de Been y Jefferies (1992) y Plewes et al. (1992) (PEA92). Mientras que para  $\gamma_{max}$  se utilizó la estimación de Olaya & Bray (2022), según la Ecuación 4.3, en términos de  $D_r$  y el  $FS_{liq}$ .

$$\gamma_{max} = 3.5 \cdot \left[ \frac{2^A - FS_L^A}{2^A - 1} \right] \quad (4.3a)$$

$$\gamma_{max} = 0, \text{ para } FS_L \geq 2.0 \quad (4.3b)$$

$$A = \begin{cases} -2.8 \cdot D_r^2 + 10.2 \cdot D_r - 9.8, & FS_L \geq 1.0 \\ -257 \cdot \exp(-6.6 \cdot D_r), & FS_L < 1.0 \end{cases} \quad (4.3c)$$

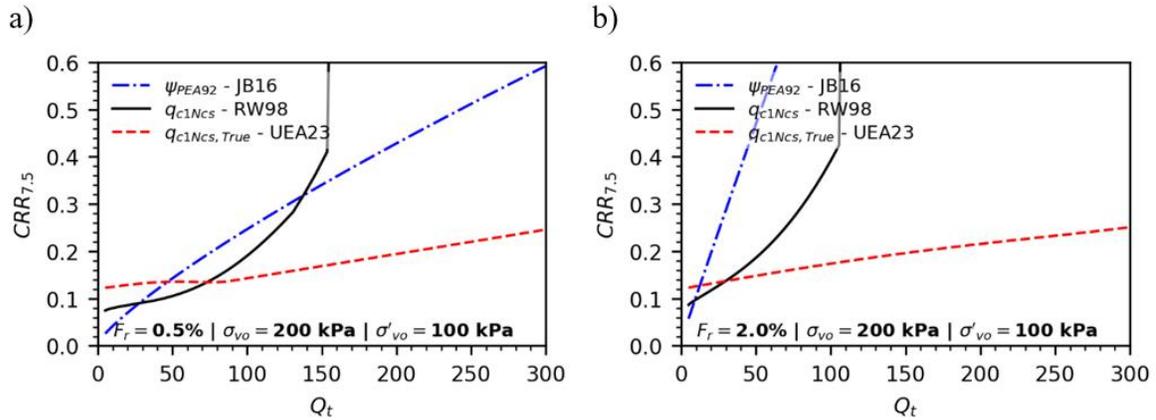
La densidad relativa se puede estimar utilizando correlaciones  $D_r - q_{c1Ncs}$  (e.g., Tatsuoka et al., 1990; Salgado et al., 1997; Idriss & Boulanger, 2015). Para este estudio se seleccionaron las correlacion propuesta por Idriss & Boulanger (2015), descrita en Ecuación 4.4.

$$D_r = 0.478 \cdot Q_{tn}^{0.264} - 1.063 \quad (4.4)$$

Los valores de  $FS_{liq}$  requeridos para la estimación de la deformación máxima por corte se calcularon utilizando la propuesta de Jefferies & Been (2016) (JB16) para la resistencia cíclica (CRR) a partir del parámetro de estado del suelo (Ecuación 4.5). La CRR también se calculó a partir de la curva de *triggering* "verdadera" propuesta por Upadhyaya et al. (2023) (UEA23) (Ecuación 4.6). Upadhyaya et al. (2023) desarrollaron un modelo de activación de la licuación con una mayor coherencia entre el modelo de manifestación LSNish y las observaciones de historias de casos, lo que da como resultado CRR más bajos incluso para suelos más densos. La comparación entre ambos modelos de *triggering* se muestra en la Figura 4.1.

$$CRR_{7.5} = 0.06 \cdot \exp(-9 \cdot \Psi) \quad (4.5)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{Q_{tncs}}{1919.2} + 0.09 \quad (4.6)$$



**Figura 4.1 Comparación entre curvas CRR propuestas por Robertson y Wride (1998), Jefferies & Been (2016) y Upadhyaya et al. (2023) con (a) Fr=0.5% and (b) Fr=2.0%**

La relación de tensiones cíclicas (CSR) se determinó utilizando Green et al. (2019), que estima el coeficiente de reducción de tensiones,  $r_d$ , según Lasley (2016). Si bien todas las relaciones para  $r_d$  tienen inherentemente algún sesgo, se puede argumentar con fuerza que Lasley tiene el menor sesgo de las relaciones  $r_d$  propuestas anteriormente (Green et al. 2019).

Se utilizó el índice de comportamiento del suelo ( $I_c$ ), como criterio de susceptibilidad a la licuación con base en CPT.  $I_c=2,6$  se considera el valor de corte dividiendo el comportamiento arcilloso de los suelos, según Robertson & Wride (1998), es decir, inicialmente se asumió que los suelos con  $I_c > 2,6$  no eran licuables.

### 4.3. Introducción de una función en profundidad

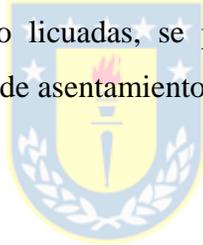
Debido a la existencia de posibles heterogeneidades laterales de la estratigrafía del suelo (*i.e.*, bolsas de licuación discontinuas) y posibles efectos de arco entre zonas no licuadas, entre otras razones, la suma de todas las capas licuables puede sobreestimar significativamente los asentamientos observados (Geyin y Maurer, 2019; Taylor et al., 2021). Debido a lo anterior, se introdujo una ponderación en profundidad con una forma funcional lineal, siguiendo otros modelos de manifestación (e.g., Cetin et al., 2009). Por lo tanto, el asentamiento podría estimarse con Ecuación 4.7 (modificada de Zhang et al., 1992).

$$S = \sum_{i=1}^j \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i \cdot \left( \alpha - \frac{\alpha}{\beta} \cdot z_i \right) \quad (4.7)$$

Donde  $\alpha$  es el factor de amplificación de la deformación volumétrica,  $\beta$  la profundidad a la que se considera que las capas contribuyen al asentamiento superficial y  $z_i$  la profundidad de la subcapa  $i$ .

#### 4.4. Conclusiones

En el presente capítulo, se detalla la metodología propuesta basada en el parámetro de estado a partir de datos CPT y resultados de laboratorio recientemente obtenidos. Se mencionan los criterios considerados y los parámetros de entrada requeridos. Se destacan las diferencias entre los diferentes modelos de *triggering* que afectarían directamente en el cálculo de asentamientos y se mencionan las variantes del modelo a evaluar en este estudio. Además, debido a la existencia de posibles heterogeneidades laterales de la estratigrafía del suelo (*i.e.*, bolsas de licuación discontinuas) y posibles efectos de arco entre zonas no licuadas, se propone la inclusión de una función de ponderación en profundidad en el cálculo de asentamiento.



## CAPÍTULO 5: COMPILACIÓN DE CASOS HISTÓRICOS

### 5.1. Introducción

Dado el carácter semi empírico del modelo propuesto es necesario compilar una base de datos para la evaluación y ajuste del modelo. En el presente capítulo se describe la base de datos compilada basada en datos CPT y con dato de asentamiento medido.

### 5.2. Recopilación de casos históricos

Para la evaluación del modelo propuesto se compilaron y analizaron dos bases de datos de CPT realizados en casos históricos, una compuesta por casos históricos de Zonas de No Subducción y otra de casos históricos de Zonas de Subducción.

Los CPT considerados en este estudio, corresponden a ensayos realizados en sitios donde se midió la deformación del suelo inducida por licuación de manera confiable. Se rechazaron aquellos sondajes (1) que se creen terminaron prematuramente en gravas poco profundas y (3) que fueron realizados en sitios donde se evidencio *lateral spreading*, con el fin de eliminar asentamientos causados o aumentados por dicho fenómeno. Al final de este proceso se compilaron un total de 31 casos de licuación, resumidos en Tabla 5.1. Análogo a la categorización realizada por Juang et al., 2013, estos casos se dividen en dos tipos: Tipo A para casos históricos de asentamiento inducido por licuación de campo libre y Tipo B para asentamientos inducidos por licuación de alguna estructura como puente, vivienda o edificio.

**Tabla 5.1 Resumen de los casos históricos de asentamientos postlicuación**

CPT designation	Earthquake	$a_{max}$ (g)	GW (m)	$M_w$	Observed Settlement (cm)	Type	Reference
FDF022-1	Maule, 2010	0.39	1	8.8	21.5	B	Montalva et al. (2022)
FDF022-2	Maule, 2010	0.39	1	8.8	17.5	B	Montalva et al. (2022)
FDF022-3	Maule, 2010	0.39	1	8.8	37.5	B	Montalva et al. (2022)

FDF070-3	Maule, 2010	0.29	3.6	8.8	20	B	Montalva et al. (2022)
FDF071	Maule, 2010	0.37	4.3	8.8	17.5	B	Montalva et al. (2022)
FDF118	Maule, 2010	0.38	3.7	8.8	15	B	Montalva et al. (2022)
FDF179	Maule, 2010	0.39	0.4	8.8	20	B	Montalva et al. (2022)
FDF186	Melinka, 2016	0.35	0.5	7.6	21	A	Montalva et al. (2022)
MYG013	Tohoku, 2011	0.6	0.9	9.0	12	A	Greenfield (2017)
TK-E1	Kocaeli, 1999	0.4	0.34	7.4	20	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-E3	Kocaeli, 1999	0.4	0.34	7.4	20	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-E4	Kocaeli, 1999	0.4	0.34	7.4	5	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-G2	Kocaeli, 1999	0.4	0.41	7.4	10	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-H1	Kocaeli, 1999	0.4	1.72	7.4	32	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-H2	Kocaeli, 1999	0.4	1.72	7.4	32	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-H3	Kocaeli, 1999	0.4	1.72	7.4	32	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-I2	Kocaeli, 1999	0.4	0.71	7.4	17	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-I4	Kocaeli, 1999	0.4	0.71	7.4	12	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-J1	Kocaeli, 1999	0.4	0.41	7.4	26	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-J2	Kocaeli, 1999	0.4	0.41	7.4	26	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-J3	Kocaeli, 1999	0.4	0.41	7.4	21	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-J4	Kocaeli, 1999	0.4	0.41	7.4	21	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-L1	Kocaeli, 1999	0.4	0.68	7.4	25	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TK-L2	Kocaeli, 1999	0.4	0.68	7.4	25	B	Sancio (2003); PEER (2000)
TW-NT-C7	Chi-Chi, 1999	0.43	3.6	7.6	15	B	NCREE (2000)
TW-NT-C15	Chi-Chi, 1999	0.43	3.4	7.6	12	B	NCREE (2000)
TW-YL-C19	Chi-Chi, 1999	0.19	0.8	7.6	5	B	Su et al. (2000); NCREE (2000)
TW-YL-C22	Chi-Chi, 1999	0.19	0.71	7.6	5	B	Su et al. (2000); NCREE (2000)

TW-YL-C24	Chi-Chi, 1999	0.19	2	7.6	5	B	Su et al. (2000); NCREE (2000)
TW-YL-C25	Chi-Chi, 1999	0.19	2.3	7.6	10	B	Su et al. (2000); NCREE (2000)
TW-YL-C32	Chi-Chi, 1999	0.19	0.7	7.6	10	A	Su et al. (2000); NCREE (2000)

### 5.2.1 Casos históricos en Zonas de No Subducción

Los datos de asentamiento inducido por licuación se obtuvieron del trabajo realizado por Juang et al. (2013), que compila una base de datos de 64 casos históricos de terremoto importantes de todo el mundo con asentamiento observado y sondeos CPT. Para esta investigación, se seleccionaron 22 sitios que tenían datos CPT disponibles de Next Generation Liquefaction, NGL (Zimmaro et al., 2019), donde se obtuvieron 15 casos del terremoto de Kocaeli, Turquía de 1999 y 7 del terremoto de Chi-Chi, Taiwán de 1999.

### 5.2.2 Casos históricos en Zonas de Subducción

Se compiló una base de datos compuesta por 9 historias de casos con datos de asentamiento medidos, donde seis casos son del terremoto de Maule Mw 8.8 de 2010, uno del terremoto de Melinka Mw 7.6 de 2016 y uno del terremoto de Tohoku Mw 9.0 de 2011. La información de daños post-terremoto para los casos históricos chilenos, incluyendo la magnitud de los asentamientos y las mediciones de CPTu, se obtuvieron del trabajo de Montalva et al. (2022). Los datos de asentamiento correspondientes a la historia del caso de Japón se extrajeron del trabajo de Greenfield (2017) y la medición CPTu de la base de datos NGL.

## 5.3. Conclusiones

Se presentaron las dos bases de datos a evaluar en este estudio, donde la primera corresponde a casos históricos de zonas de no subducción y la segunda a casos históricos de zonas de no subducción. Se presentaron los principales parámetros correspondientes a cada sitio, requeridos para la estimación de asentamientos, incluyendo la magnitud del asentamiento observado y el evento sísmico asociado. Además, se clasifica cada caso según corresponden a casos de asentamiento de campo libre o asentamiento de alguna estructura.

## CAPÍTULO 6: RESULTADOS

### 6.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del método propuesto basado en el parámetro de estado para la estimación de asentamientos inducidos por licuación, descrito en capítulo 4. Se evalúa su desempeño y se compara con los métodos usualmente utilizados en la práctica basados en CPT para su posterior análisis y discusión.

### 6.2. Desempeño del método propuesto

Para evaluar el desempeño del método propuesto, se utilizó el residual promedio ( $\mu_{avg}$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), donde un valor más bajo indica un modelo más preciso. El residual se define como la diferencia entre el asentamiento observado y el asentamiento predicho (Ecuación 6.1), por lo que un residual positivo indica una subestimación del asentamiento observado, y un residual negativo indicaría una predicción excesiva del asentamiento observado.

$$\mu = S_{obs} - S_{pred} \quad (6.1)$$

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) se define en Ecuación 6.2. Donde  $\mu_i$  es el residual definido por la Ecuación 6.1 para el  $i$ -ésimo caso y  $N$  es el número total de casos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \mu_i^2}{N}} \quad (6.2)$$

Dadas las grandes diferencias observadas entre los modelos de *triggering* (Figura 4.1) se evaluaron cuatro variantes del método propuesto, para determinar qué modelo, tanto para la activación como para la estimación del parámetro de estado, proporciona estimaciones más precisas cuando se utilizan con un modelo de estimación de asentamientos basado en el parámetro estado. Las cuatro variantes evaluadas son: 1) CRR estimada según JB16,  $\psi$  estimada según BJ92; 2) CRR estimado según JB16,

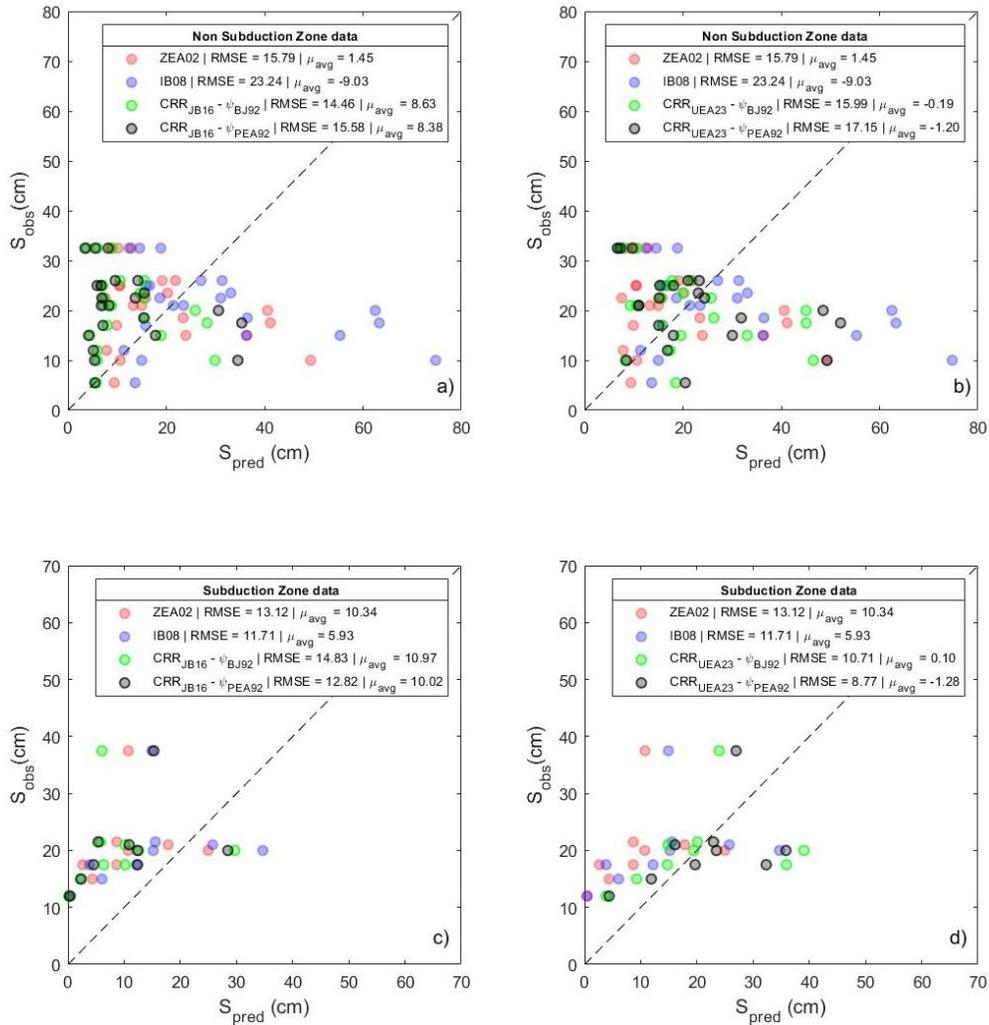
$\psi$  estimado según PEA92; 3) CRR estimado según UEA23,  $\psi$  estimado según BJ92; y 4) CRR estimado según UEA23,  $\psi$  estimado según PEA92.

### 6.2.1 Desempeño del método propuesto sin función de ponderación

La Figura 6.1 presenta el asentamiento observado versus el asentamiento predicho junto con los indicadores de desempeño para la base de datos de No Subducción y Subducción. Además, con fines comparativos, se muestran los resultados obtenidos con los métodos basados en CPT comúnmente utilizados en la práctica de ingeniería (*i.e.*, Zhang et al., 2002; Idriss & Boulanger, 2008).

Para los datos de no subducción, al calcular CRR con JB16 (Figura 6.1(a)) da como resultado un  $\mu_{avg}$  positivo, lo que indica una subestimación del asentamiento observado en la mayoría de los casos. Al calcular CRR con UEA23 (Figura 6.1(b)), la predicción de la mayoría de los casos se subestima, sin embargo, los pocos casos que se sobreestiman tienen residuales mayores, lo que resulta en un  $\mu_{avg}$  cercano a cero y negativo. Además, se obtienen RMSE más bajos calculando el CRR con JB16, lo que indicaría que la magnitud de los errores en promedio es menor. Respecto al método basado en CPT utilizado para estimar el parámetro de estado, se observan mayores diferencias sólo cuando el asentamiento predicho resulta en una sobreestimación del asentamiento observado y es mayor a 20cm, resultando en un valor menor y por tanto un error menor al utilizar el método de BJ92.

Las Figura 6.1 (a) y (b) comparan las metodologías evaluadas en este estudio con los métodos comúnmente utilizados en la práctica basados en CPT. Se observa a partir de los residuales promedios, una sobreestimación del asentamiento observada en la mayoría de los casos al utilizar Idriss & Boulanger (2008) y una subestimación al utilizar el método de Zhang et al. (2002). Presentando este último método valores de los indicadores de desempeño ( $\mu_{avg}$  y RMSE) cercanos e incluso mejores que las metodologías evaluadas, mientras que IB08 en su mayoría entrega asentamientos sobreestimados y un RMSE más alto que los otros métodos, siendo el menos preciso para los casos de no subducción.



**Figura 6.1** Asentamiento observado vs predicho calculando CRR usando Jefferies y Been (2016) y comparación con los métodos del estado de la práctica: (a) para casos históricos de No Subducción, (c) para casos históricos de Subducción. Calculando CRR con Upadhayaya et al., 2023 y comparación con los métodos del estado de la práctica: (b) para casos históricos de No Subducción y (d) para casos históricos de Subducción.

Para los datos de subducción, al calcular la CRR con JB16, de la Figura 6.1 (c) se observa un residual promedio positivo mayor que para los datos de no subducción, lo que indicaría una subestimación aún mayor del asentamiento observado. Al calcular el CRR con UEA23, en la Figura 6.1 (d) se observa un residual cercano a cero y un valor de RMSE mucho menor que al estimar el CRR con JB16, siendo más preciso para la base de datos de Subducción.

En cuanto al método para estimar el parámetro de estado, en la mayoría de los casos se observa un asentamiento predicho menor cuando se utiliza el método BJ92, aumentando aún más la subestimación y obteniendo mayores errores ( $\mu_{avg}$  y RMSE) que al utilizar PEA92.

En las la Figura 6.1 (c) y (d), las metodologías evaluadas se comparan con los métodos basados en CPT comúnmente utilizados en la práctica, para los datos de Subducción. Se obtuvo una subestimación del asentamiento observado tanto con IB08 como con ZEA02. Se observa que el método propuesto que estima CRR con UEA23 es más preciso para la base de datos de Subducción incluso al compararlo con los métodos del estado de la práctica, mientras que cuando se usa BJ16-CRR, se obtiene un mejor rendimiento que el método ZEA02 sólo al estimar el parámetro de estado con PEA92.

### **6.2.2 Desempeño del método propuesto incluyendo una función de ponderación en profundidad**

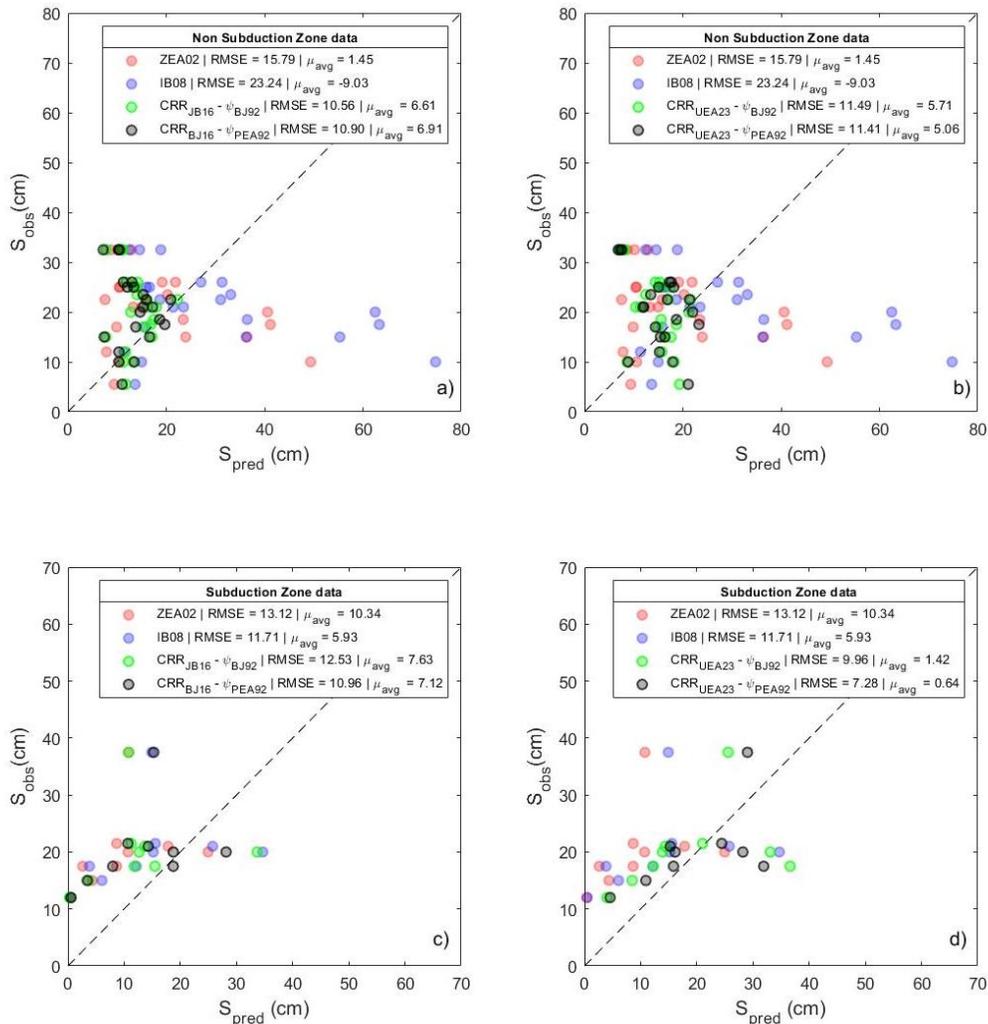
Luego de varias evaluaciones del desempeño del modelo, los valores óptimos para el método que estima CRR con UEA23 fueron  $\alpha=1.4$  y  $\beta=20$ , mientras que para el método que estima CRR con JB16 fueron  $\alpha=3.0$  y  $\beta=15$ , es decir, las deformaciones volumétricas amplificadas en un factor de 1.4 y 3.0 se reducen con la profundidad y se supuso que las capas a profundidades superiores a 15 y 20 m no contribuyen al asentamiento superficial. Se pueden observar resultados similares en otros índices de severidad de licuación (*e.g.* LPI, LPIsh), que consideran una contribución al daño en superficie hasta los 18-20 m de profundidad (Iwasaki et al., 1984; Cetin et al., 2009; Tonkin & Taylor, 2013).

Los resultados de incluir la función de ponderación se presentan en la Figura 6.2 para las bases de datos de No Subducción y Subducción. Además, a modo resumen se presenta en Tabla 6.1 y Tabla 6.2 la comparación entre los valores de los indicadores de desempeño del método propuesto al incluir o no la función de ponderación, para los datos de no subducción y subducción respectivamente,

La mejora de precisión en la predicción del asentamiento se observa fácilmente en los datos de no subducción, ya que los datos están notablemente más cerca de la línea de 45°. Para el método que estima CRR con JB16, de la Figura 6.2 (a) se observa una disminución máxima del 30% y 23% del RMSE y residual promedio respectivamente, mejorando la precisión del modelo. El método que

estima la CRR con UEA23, en la Figura 6.2 (b), da como resultado una disminución máxima del 33% en el RMSE, mejorando la precisión del modelo. Si bien el residual promedio aumenta, la magnitud de los residuales para cada caso individual es menor.

En cuanto al método utilizado para estimar el parámetro de estado, se observan diferencias comparativamente menores que cuando no se incluye el factor de ponderación de profundidad, entregando ambos métodos estimaciones razonables.



**Figura 6.2 Asentamiento observado vs predicho incluyendo la función de ponderación en profundidad. Calculando CRR con Jefferies y Been (2016) y comparación con los métodos del estado de la práctica: (a) para casos históricos de No Subducción, (c) para casos históricos de Subducción. Calculando CRR con Upadhayaya et al., 2023 y comparación con los métodos del estado de la práctica: (b) para casos históricos de No Subducción y (d) para casos históricos de Subducción.**

Para los casos de subducción, la inclusión de la función de ponderación muestra una mejora de las cuatro metodologías, pero es menos significativa que lo obtenido para la base de datos de no subducción. Para el método que calcula CRR con JB16, de Figura 6.2 (c), se tiene una disminución máxima del 16% en el RMSE y del 30% en el  $\mu_{avg}$ . Sin embargo, aún existe una subestimación del asentamiento observado. Para el método propuesto para calcular la CRR con UEA23, de Figura 6.2 (d), se tiene una disminución máxima del 17% del RMSE y del 58% del  $\mu_{avg}$ , disminuyendo el residual en los casos sobreestimados. En cuanto al método utilizado para estimar el  $\psi$ , se obtienen menores errores al utilizar PEA92.

Además, la Figura 6.2 muestra los resultados de incluir la función de ponderación de profundidad en los métodos basados en parámetros de estado propuestos, junto con los resultados de los modelos IB08 y ZEA02 para comparar. Para la base de datos de no subducción, los modelos propuestos proporcionan un RMSE más bajo que los métodos utilizados en la práctica, demostrando ser modelos más precisos. Para la base de datos de subducción, el método que estima CRR con UEA23 presenta un mejor rendimiento en comparación con los métodos actuales, con base en los valores de RMSE y  $\mu_{avg}$ . Cuando se utiliza JB16 para obtener CRR, el método propuesto presenta un mejor rendimiento sólo para  $\psi$  calculado con la estimación PEA92.

Por lo tanto, a medida que la inclusión de una función de ponderación de profundidad mejora la predicción del asentamiento observado, haciendo que los modelos sean más precisos, se espera que los métodos existentes también lo hagan (Geyin y Maurer, 2019).

**Tabla 6.1 Resumen indicadores de desempeño según método para base de datos de no Subducción**

Método	No Subducción			
	Sin ponderar		Con ponderar (*)	
	RMSE	$\mu_{avg}$	RMSE	$\mu_{avg}$
ZEA02	15.79	1.45	15.79	1.45
IB08	23.24	-9.03	23.24	-9.03
CRR (JB16) – $\psi$ (BJ92) (*)	14.46	8.63	10.56	6.61
CRR (JB16) – $\psi$ (PEA92) (*)	15.58	8.38	10.90	6.91
CRR (UEA23) – $\psi$ (BJ92) (*)	15.99	-0.19	11.49	5.71
CRR (UEA23) – $\psi$ (PEA92) (*)	17.15	-1.20	11.41	5.06

(\*) Sólo se ponderaron las variantes del método propuesto

**Tabla 6.2 Resumen indicadores de desempeño según método para base de datos de Subducción**

Método	Subducción			
	Sin ponderar		Con ponderar (*)	
	RMSE	$\mu_{avg}$	RMSE	$\mu_{avg}$
ZEA02	13.12	10.34	13.12	10.34
IB08	11.71	5.93	11.71	5.93
CRR (JB16) – $\psi$ (BJ92)	14.83	10.97	12.53	7.63
CRR (JB16) – $\psi$ (PEA92)	12.82	10.02	10.96	7.12
CRR (UEA23) – $\psi$ (BJ92)	10.71	0.1	9.96	1.42
CRR (UEA23) – $\psi$ (PEA92)	8.77	-1.28	7.28	0.54

(\*) Sólo se ponderaron las variantes del método propuesto

### 6.3. Conclusiones

Se evaluó el método propuesto en base a dos indicadores de desempeño ( $\mu_{avg}$  y RMSE) y los resultados se compararon con los obtenidos por los métodos usualmente utilizados en la práctica ingenieril basados en CPT. Se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del método propuesto sin incluir la función de ponderación y se obtuvo un desempeño similar al de los métodos usuales e incluso mejores desempeños al utilizar CRR-BJ16 para los datos de no subducción y CRR-UEA23 para los datos de subducción.



Al incluir una función de ponderación lineal, se obtienen mejoras importantes en todas las variantes de la metodología propuesta. Alcanzando mejores desempeños que los métodos usualmente presentados en la práctica a excepción del método que utiliza CRR-BJ16 para la base de datos de subducción. En cuanto al método utilizado para estimar el parámetro de estado, no se observan diferencias significativas, por lo que su elección no debería determinar el desempeño del método.

## CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en esta investigación, se tiene que modelos comúnmente utilizados en la práctica para estimar los asentamientos inducidos por licuación presentan grandes sesgos entre los asentamientos observados y pronosticados, tanto para datos en zonas de subducción como de no subducción (sobreestimaciones de hasta el 600% y subestimaciones de hasta el 97%). La incorporación del parámetro de estado a partir de datos CPT en la estimación de los asentamientos inducidos por licuación proporciona resultados comparables e incluso mejores que los métodos utilizados en la práctica de la ingeniería.

Los resultados obtenidos muestran que todas las variantes de los métodos de parámetro de estado sin una función de ponderación de profundidad subestiman los asentamientos observados para las bases de datos de las zonas de no subducción y de subducción. Sin embargo, estos métodos muestran rendimientos similares en comparación con los modelos actuales, lo que da como resultado predicciones aún mejores cuando se utiliza CRR de BJ16 para datos que no son de subducción y CRR de UEA23 para datos de subducción.

La incorporación de una función de ponderación de profundidad en el método propuesto mejora significativamente la predicción del asentamiento observado. Sin embargo, se observan diferencias en la magnitud de la mejora al comparar ambas bases de datos. En particular, si bien los métodos de CRR con BJ16 muestran mejoras en ambas bases de datos, el método resultante tiene un menor rendimiento en la base de datos de subducción en comparación con IB08. Además, los métodos de CRR con UEA23 muestran una mejora significativa en el rendimiento en ambas bases de datos en comparación con IB08 y ZEA02, mejorando los ya buenos rendimientos obtenidos en el modelo no ponderado para la base de datos de subducción.

El método propuesto considera un valor de  $\alpha=1,4$  y 3, lo que indica que existe una amplificación de las deformaciones volumétricas. Esto podría explicarse porque la mayoría de los sitios a pesar de estar nivelados, presentan pequeñas cargas (sitios Tipo B) que podrían inducir deformaciones por corte aumentando el asentamiento total (Dashti et al., 2010; Bray & Dashti, 2014). Esto es concordante con Juang et al. (2013), donde el modelo para los casos de asentamientos con edificios, presentan un factor de amplificación más alto que para los casos de campo libre. Lo anterior sería más relevante en

terremotos de subducción, donde las deformaciones de corte que ocurren durante un terremoto podrían ser mayores en eventos de larga duración (Saldaña et al., 2024), lo que se refleja en la subestimación del asentamiento para la mayoría de los casos de subducción.

En Anexo 1, se presentó un breve análisis de la predicción de asentamientos en sitios sin manifestaciones superficiales, para la extensa base de datos de casos históricos de terremotos de Canterbury (Geyin et al., 2020). La Figura A. 1 muestra que el método propuesto que estima la CRR con UEA23 sobreestima significativamente el asentamiento observado (asumido  $S_{obs}=0$ ) dada la mayor cantidad de estratos licuables que estima la curva de activación “verdadera”, lo que responde claramente a las grandes diferencias en las curvas de activación utilizadas para cada método.

Sin embargo, el hecho de que el desempeño del modelo de asentamiento mejoró significativamente con respecto a los datos de las historias de casos (todos clasificados como sitios de manifestación) está directamente relacionado con el uso únicamente de casos de licuación en la regresión de los modelos. En consecuencia, se sugiere que, dado que existen modelos que son más adecuados para predecir la manifestación de licuación en sitios (e.g. LSNish), estos se pueden usar junto con la metodología propuesta en un Análisis Probabilístico de Peligros de Licuación (PLHA) para tener una mejor estimación del asentamiento esperado. De lo contrario, el uso de la metodología propuesta en sitios que es poco probable que presenten manifestaciones de licuación podría sobreestimar los asentamientos.

Finalmente, la metodología propuesta muestra una mejora interesante frente a los métodos existentes de asentamiento post-terremoto inducidos por licuación, al evaluar el *triggering* con un enfoque de parámetro de estado y un modelo de activación "verdadero" propuesto recientemente, junto con el modelo de asentamiento postlicuación basado en el parámetro de estado. Los resultados para las bases de datos de subducción y no subducción sugieren que el uso de la metodología de parámetro de estado junto con la curva de activación "verdadera" de Upadhyaya et al. (2023), utilizando Been y Jefferies (1992) o Plewes et al. (1992) para la estimación del parámetro de estado, es una forma plausible de reducir la incertidumbre en los asentamientos inducidos por licuación. Esta metodología se validó con una base de datos empírica, lo que sin duda permitirá mejores modelos cuando se complemente con nuevos casos históricos.

## REFERENCIAS

- Been, K., & Jefferies, M. G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2), 99– 112. doi:10.1680/geot.1985.35.2.99.
- Been, K., Crooks, J. H. A., Becker DE, Jefferies, M.G. (1986). The cone penetration test in sands: Part I, state parameter inteerpretation. *Geotechnique*, 36(2): 239–249. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.239>
- Been, K., Crooks, J. H. A., Jefferies, M. G., & Rothenburg, L. (1987). The cone penetration test in sands: Part II, general inference of state. *Geotechnique*, 37(3), 285–299.
- Been, K. and Jefferies, M. G. (1992). “Towards systematic CPT interpretation.” Predictive soil mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium, Oxford, 121–134.
- Boulanger, R. W., y Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures* (Issue UCD/CGM-14/01).
- Bray, J. D., & Dashti, S. (2014). Liquefaction-induced building movements. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), 1129-1156.
- Bray, J.D., y Macedo J. (2017). 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement. *Soil Dyn. & Earthq. Eng* 102: 215 – 231.
- Bray, J. D., R.W. Boulanger, M. Cubrinovski, K. Tokimatsu, S. L. Kramer, T. O'Rourke, E. Rathje, R. A. Green, P. Robertson, and C. S. Beyzaei. 2017. U.S.–New Zealand–Japan international workshop, *liquefactioninduced ground movements effects*. Rep. No. 2017/02. Berkeley, CA: Univ. of California.
- Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earth fills. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 23, 231–255.
- Chiaradonna, A., d’Onofrio, A., & Bilotta, E. (2019). Assessment of post-liquefaction consolidation settlement. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 5825-5848.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B. (2009). Probabilistic Model for the Assessment of Cyclically Induced Reconsolidation (Volumetric) Settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(3), 387–398. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2009\)135:3\(387\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2009)135:3(387)).
- Dashti, S., Bray, J., Pestana, J., Riemer, M., and Wilson, D. (2010). Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 151-164.

- Duan, W., Congress, S. S. C., Cai, G., Liu, S., Dong, X., Chen, R., and Liu, X. (2021). “A hybrid GMDH neural network and logistic regression framework for state parameter-based liquefaction evaluation.” *Canadian Geotechnical Journal*, 11(January), 1–11.
- Duan, W., Congress, S.S.C., Cai, G. et al. Prediction of in situ state parameter of sandy deposits from CPT measurements using optimized GMDH-type neural networks. *Acta Geotech.* 17, 4515–4535 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01540-6>.
- Geyin, M. & Maurer, B.W. (2019). An analysis of Liquefaction-induced free-field ground settlement using 1,000+ Case Histories: Observations vs. State-of-Practice Predictions. *GeoCongress 2019*. ASCE GSP 308: 489 – 498.
- Geyin, M., B. Maurer, B. Bradley, R. Green, S. van Ballegooy. (2020) “CPT-Based Liquefaction Case Histories Resulting from the 2010-2016 Canterbury, New Zealand, Earthquakes: A Curated Digital Dataset (Version 2).” DesignSafe-CI. <https://doi.org/10.17603/ds2-tygh-ht91> v1.
- Green, R.A., Cubrinovski, M., Cox, B., Wood, C., Wotherspoon, L., Bradley, B, and Maurer, B. (2014). “Select Liquefaction Case Histories from the 2010–2011 Canterbury Earthquake Sequence.” *Earthquake Spectra*, 30(1): 131–153.
- Green, R. A., Bommer, J. J., Rodriguez-Marek, A., Maurer, B. W., Stafford, P. J., Edwards, B., Kruiver, P. P., de Lange, G., and van Elk, J. (2019). “Addressing limitations in existing ‘simplified’ liquefaction triggering evaluation procedures: application to induced seismicity in the Groningen gas field.” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(8), 4539–4557.
- Greenfield, M. W. (2017). “Effects of long-duration ground motions on liquefaction hazards.” Phd dissertation, University of Washington, University of Washington.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, EERI, Oakland, CA, 261 pp.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2015). 2nd Ishihara Lecture: SPT-and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68, 57-68.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during Earthquakes. *Soils and Foundations*, 32 (1), 173–188.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., & Tokida, K. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49–58. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5).
- Jefferies, M. G., & Been, K. (2016). *Soil liquefaction – a critical state approach* (2nd ed.). CRC Press.

- <https://doi.org/10.1680/geot.2008.b.002>.
- Juang, C. H., Ching, J., Wang, L., Khoshnevisan, S., and Ku, C. S. (2013). Simplified procedure for estimation of liquefaction-induced settlement and site-specific probabilistic settlement exceedance curve using cone penetration test (CPT). *Canadian Geotechnical Journal*, 50(10), 1055-1066.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Pearson Education India.
- Liu, L., y Dobry, R. (1997). Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(6), 557-567.
- Lasley, S. J., Green, R. A., and Rodriguez-Marek, A. (2016). "New stress reduction coefficient relationship for liquefaction triggering analyses." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11), 1–8.
- Luque, R., y Bray, J. D. (2020). Dynamic soil-structure interaction analyses of two important structures affected by liquefaction during the Canterbury earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133(December 2019), 106026. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106026>
- Macedo, J., Vergaray, L., Jensen, C., Cornejo, R., and Jefferies, M. (2022). "Harbor Bay Business Park liquefaction during Loma Prieta earthquake - A critical state perspective." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107280.
- Mesri, G., Shahien, M., & Kane, T. (2019). Seismically induced settlement of ground experiencing undrained shaking and laterally constrained compression. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(2), 155-172.
- Montalva, G., and Ruz, F. (2017). Liquefaction evidence in the Chilean subduction zone. *The 3rd International Conference on Performance Based Design (PBD-III)*, July.
- Montalva, G. Ruz, F. Escribano, D. Bastias Tejos, N. Espinoza, D. Paredes, F. (2021) "Field SPT, CPT, Vs, Tsite along with surface evidence of liquefaction", in *Liquefaction Triggering in Subduction Zones*. DesignSafe-CI. <https://doi.org/10.17603/ds2-g3yc-6z20>.
- Montalva, G., Ruz, F., Escribano, D., Bastías, N., Espinoza, D., and Paredes, F. (2022). Chilean liquefaction case history. *Earthquake Spectra*, 87552930211070313.
- Moss, R. (2014). "A Critical State framework for seismic soil liquefaction triggering using CPT." *International Symposium on Cone Penetration Testing*, 477–486.
- Moss, R., Seed, R. B., Kayen, R., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., y Cetin, K. O. (2006). CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential. *Journal*

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1032–1051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:8\(1032\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:8(1032))
- Nagase, H. and Ishihara, K. (1988). Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *Soils and Foundations*, 28(1):66–76.
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2016). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23474>.
- NCREE. (2000). “Reconnaissance Report of the Geotechnical Hazards Caused by Chi-Chi Earthquake.” *National Center for Research in Earthquake Engineering (NCREE)*, Taipei, Taiwan (in Chinese).
- Olaya, F. R. and Bray, J. D. (2022). “Strain Potential of Liquefied Soil.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(11), 1–16.
- PEER. (2000). “Documenting incidents of ground failure resulting from the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake.” *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)*, <http://peer.berkeley.edu/publications/turkey/adapazari/index.html>.
- Plewes, H., Davies, M. P., and Jefferies, M. G. (1992). “CPT based screening procedure for evaluating liquefaction susceptibility.” *Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference*, 518 41–49.
- Poulos, S. J. (1981). The Steady State of Deformation. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 107(5), 553–562.
- Pyke R. 2020. Updated and Expanded – Limitations of Simplified Methods for Estimating Seismic Settlements. *Unpublished pre-print*. DOI: 10.13140/RG.2.2.19422.66880.
- Reid, D. (2015). Estimating slope of critical state line from cone penetration test—an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(1), 46-57.
- Robertson, P. K. (2010). Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT. *In 2nd International symposium on cone penetration testing*, Huntington Beach, CA, USA.
- Robertson, P. K., and Fear, C. E. (1997). “Liquefaction of sands and its evaluation.” IS-Tokyo ‘95, Proc., *1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, K. Ishihara, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1253–1289.
- Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 442–459. <https://doi.org/10.1139/t99-102>.

- Roscoe, K. H., Schofield, A. N., & Wroth, C. P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique*, 8(1), 22–53. <https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.1.22>
- Seed, H. B., y Idriss, I. M. (1971). A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97 (9)(November), 1249–1273.
- Saldaña H., Montalva G., Escribano D., Tiznado J.C., Nuñez S. Two-Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis of a Liquefaction Case History Considering Spatial Variability and Long-Duration Megathrust Earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, submitted.
- Salgado R, Mitchell J.K., and Jamiolkowski, M. (1997). “Cavity expansion and penetration resistance in sands.” *J Geotech Geoenviron Eng*, 123(4): 344–354.
- Sancio, R. B. (2003). “Ground failure and building performance in Adapazari, Turkey.” PhD thesis, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1971). A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97 (9)(November), 1249–1273.
- Su, T.C., Chiang, K.W., Lin, S.J., Wang, F.G., and Duann, S.W. (2000). “Field reconnaissance and preliminary assessment of liquefaction in Yuanlin area.” *Sino-Geotechnics*, 77, 29-38 (in Chinese).
- Shuttle, D. A. and Jefferies, M. G. (1998). “Dimensionless and unbiased CPT interpretation in sand.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(5), 545 351–391.
- Shuttle, D. A., & Cunning, J. (2007). Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1), 1–19. <https://doi.org/10.1139/T06-086>.
- Tatsuoka, F., Zhou, S., Sato, T., and Shibuya, S. (1990). “Evaluation method of liquefaction potential and its application.” *Report on seismic hazards on the ground in urban areas. Ministry of Education of Japan*, Tokyo, Japan.
- Taylor, D. W. (1948). Fundamentals of soil mechanics. In *New York: John Wiley*. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2\\_\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2__4)
- Taylor, M., Clayton, P., & Chin, C. Y. (2021). The Assessment of Liquefaction induced Settlement-application within Engineering Practice.
- Tonkin and Taylor. (2013). *Liquefaction vulnerability study. Tonkin and Taylor Report 52020.0200/v1.0. February*, 52 and 14 appendices.
- Upadhyaya, S., Green, R. A., Rodriguez-Marek, A., and Maurer, B. W. (2023). “True Liquefaction

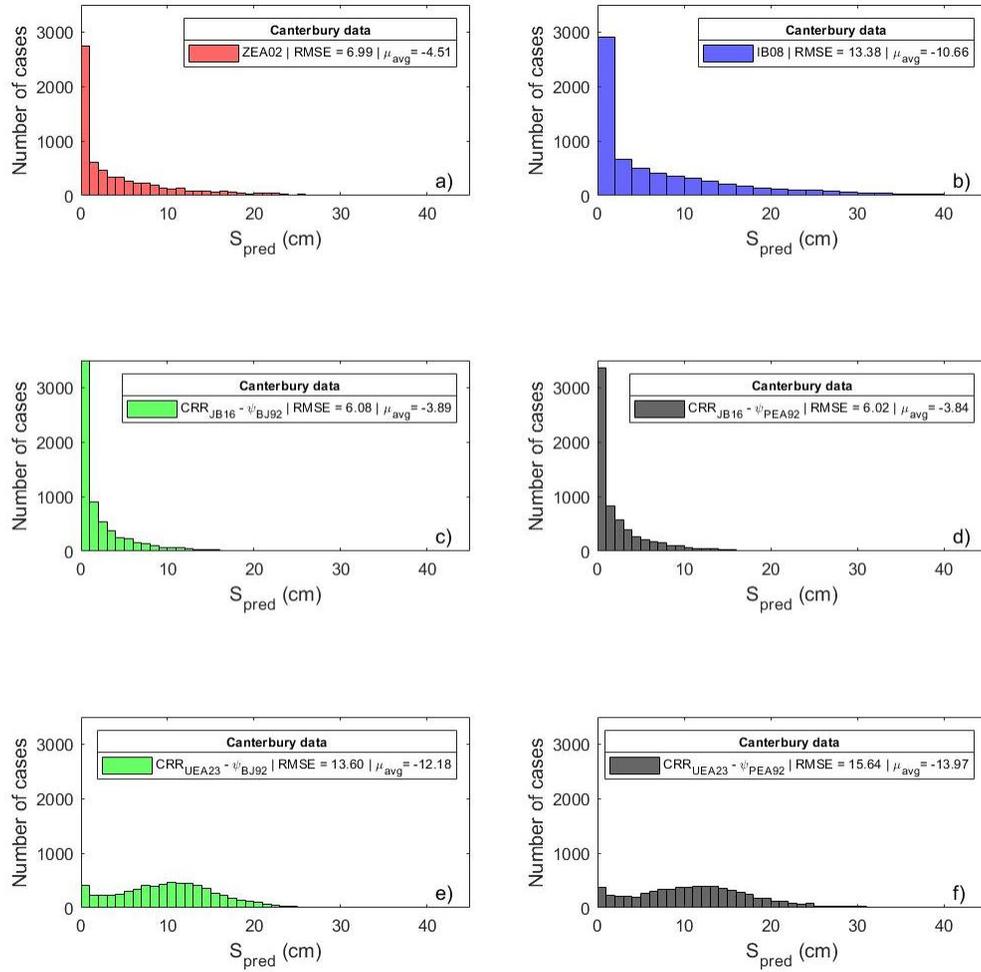
- Triggering Curve.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(3).
- Van Ballegooy, S., Green, R.A., Lees, J., Wentz, F., and Maurer, B.W. (2015). “Assessment of various CPT based liquefaction severity index frameworks relative to the Ishihara (1985) H1- H2 boundary curves.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 347–364.
- Yoshimi, Y., y Tokimatsu, K. (1977). Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes. *Soils and Foundations*, 17(1), 23-38.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., ... Stokoe II, K. H. (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297–313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))
- Zimmaro P., Brandenberg S.J., Steadfast J.P., Kwak D.Y., Franke K.W., Moss R.E.S., Cetin K.O., Can G., Ilgac M., Stamatakos J., Juckett M., Mukherjee J., Chicane Z., Ybarra S., Weaver T., Bozorgnia Y., Kramer S.L. (2019). Next-Generation Liquidization Data. Next-Generation Reaction Consortium. DOI: 10.21222/C2J040.
- Zhang, G., Robertson, P. K., and Brachman, R. W. I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1168–1180. <https://doi.org/10.1139/t02-047>.

## ANEXO 1 EVALUACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO EN CASOS HISTÓRICOS SIN MANIFESTACIÓN

La secuencia de terremotos (CES) de Canterbury, Nueva Zelanda, ocurridos durante la última década (2010-2016), han dado como resultados datos históricos de casos de licuación, entregando una oportunidad para avanzar en la predicción de la ocurrencia de licuación y sus consecuencias. Geyin et al. (2020) compila una base de datos de aproximadamente 15,000 casos históricos de licuación basada en CPT, disponible en DesignSafe. Además, realizaron observaciones del fenómeno y asignaron clasificaciones de la severidad de la manifestación en superficie para cada ubicación del CPT post terremoto, descrita en Green et al. (2014).

En este estudio se evalúa el modelo propuesto, utilizando la base de datos descrita. Dado que la base de datos compilada no cuenta con el dato de asentamiento medido en los casos históricos, se consideraron sólo aquellos sitios donde no se evidenció licuación en superficie (*i.e.* ID severity 0), con el fin de evaluar la no manifestación del método propuesto y se seleccionaron aquellos sitios que contaran con sondajes CPT a profundidades mayores a los 10m. Del filtrado anterior, se obtuvo una base de datos de 6,625 casos históricos para la evaluación del modelo.

Los resultados de evaluar los métodos populares y los métodos propuestos se presentan en la Figura A. 1 por medio de un histograma que indica el número de casos versus el asentamiento predicho junto con los indicadores de desempeño de cada método. De lo anterior, se observa que el método propuesto que estima CRR según BJ16 predice en la mayoría de los casos un asentamiento cercano a cero y que, además, al compararse con los métodos populares presentan menor RMSE y menor  $\mu_{avg}$ , demostrando ser un método más exacto en predecir la no manifestación en superficie. Respecto al método que estima CRR con UEA23, es posible observar una sobrestimación considerable en del asentamiento observado, por lo que, al compararse con los métodos populares, este sería menos confiable para predecir la no manifestación.



**Figura A. 1** Histograma del asentamiento predicho vs el número de casos para a) Zhang et al. (2002), b) Idriss and Boulanger (2008), c) método propuesto usando CRR con JB16 y parámetro de estado con BJ92, d) método propuesto usando CRR con JB 2016 y parámetro de estado con PEA92, e) método propuesto usando CRR con UEA23 y parámetro de estado con BJ92, f) método propuesto usando CRR con UEA23 y parámetro de estado con PEA92