UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

EVALUACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS INDUCIDOS POR LICUACIÓN EN EDIFICIOS MEDIANTE MÉTODOS SIMPLIFICADOS APLICADOS A UN CASO DE ESTUDIO

Memoria de Título presentada por

Lukas Matías Mery Valencia

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Felipe Kuncar García

Junio 2021

EVALUACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS INDUCIDOS POR LICUACIÓN EN EDIFICIOS MEDIANTE MÉTODOS SIMPLIFICADOS APLICADOS A UN CASO DE ESTUDIO

Lukas Mery Valencia[1], Felipe Kuncar García[2], Gonzalo Suazo Fuentealba[1]

1 UTFSM.
2 Ferrara.

Resumen

La existencia de un edificio con fundaciones superficiales sobre un suelo licuable genera diferencias de asentamiento considerablemente superiores a las que se generarían en ese mismo terreno si no existiera el edificio sobre este. En la actualidad existen métodos de cálculo simplificado para estimar dicho asentamiento, pero aún no se conocen ni se han estudiado lo suficiente, lo que provoca que en la práctica nacional estos métodos no sean implementados comúnmente.

Con la intención de mejorar las prácticas actuales de la ingeniería en Chile, este trabajo de memoria busca entregar un estudio detallado de los tres métodos simplificados de cálculo de asentamiento para edificios con fundaciones superficiales. Para lograrlo, se realiza una revisión bibliográfica que entrega los parámetros y procedimientos que cada método necesita para su correcta implementación. A partir de lo anterior, se implementan los tres métodos, y son aplicados sobre un caso de estudio del que se tiene información real, para comparar los resultados obtenidos y realizar diversos análisis.

Este trabajo concluye con la entrega de recomendaciones para que, dependiendo de los requerimientos del proyecto y la disponibilidad de información, se tome la mejor decisión sobre qué método implementar.

Palabras claves: asentamiento, licuación, simplificado

1 Introducción

A partir de lo sucedido con el terremoto del Maule en el año 2010, se volvieron evidentes, la relevancia del fenómeno de licuación en territorio nacional y la necesidad de mejorar las metodologías de estimación de asentamientos producto de este. Actualmente en Chile sigue siendo común que el cálculo de asentamiento inducido por la licuación se realice mediante el supuesto de campo libre, lo que va en contra del sentido común, ya que, existen estudios que demuestran la importancia de considerar la estructura sobre el terreno, y a su vez, existen métodos simplificados que permiten el cálculo de dichos asentamientos. Algunos de esos métodos incluso fueron formulados en base a registros de edificios de Chile.

Ante la gran diferencia en asentamientos que se producen debido a la presencia de un edificio fundado superficialmente, surge la necesidad de incorporar el cálculo de estos efectos a las prácticas comúnmente desarrolladas por los ingenieros en Chile. Con el fin de promover el avance en las metodologías actuales, se espera entregar la implementación de tres de los modelos simplificados más recientes, acompañados de un análisis y comparación de estos, para proveer a los ingenieros una base técnica sólida que permita guiar la selección y utilización de estos métodos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

- El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de tres métodos simplificados de cálculo de asentamiento inducidos por licuación en edificios, mediante la implementación de estos y el análisis de resultados obtenidos.

2.2 Objetivos específicos

- Estudiar en detalle los parámetros y características de los 3 métodos a utilizar.
- Implementar los 3 métodos de evaluación de asentamiento usando los datos correspondientes a un caso de estudio, donde la información del edificio y fundaciones proviene de un proyecto en Valdivia y los datos geotécnicos corresponden a un proyecto en Viña del Mar.
- Analizar los resultados obtenidos. Tanto análisis de sensibilidad para cada método, como comparación entre los resultados arrojados por cada método.

3 Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos específicos mencionados en la sección anterior, se presentan en la Figura 1 las actividades y la metodología con la que se trabajó.

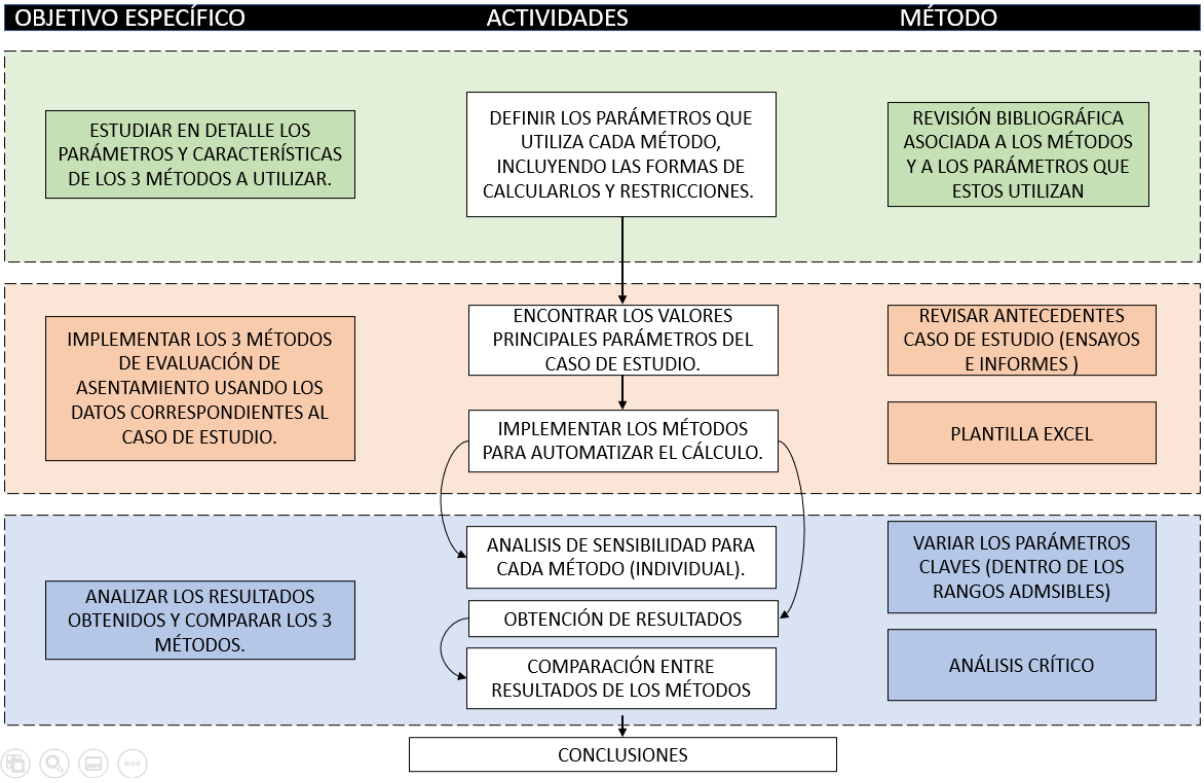

Figura 1. Metodología planteada para el cumplimiento de los objetivos.

4 Marco teórico

4.1 Licuación

Es un fenómeno en el cual la rigidez y la resistencia del suelo, saturado o parcialmente saturado, se pierden producto de una carga cíclica, generalmente inducida por un episodio sísmico. Esto provoca que el suelo, antes sólido, ahora se comporte como un líquido.

Esto ocurre debido a que la carga cíclica provoca un aumento en la presión de poros, y ante tal aumento, disminuyen las fuerzas de contacto entre las partículas del suelo, haciéndolo más deformable, llegando incluso a perder completamente el contacto entre ellas.

En la Figura 2 se aprecia el mecanismo idealizado de la licuación, donde se tiene que antes del sismo las partículas del suelo se mantienen en su lugar producto de las fuerzas de contacto friccionales o adhesivas creando una estructura sólida del suelo, con agua llenando los espacios entre partículas (Figura 2 (a)). Una vez iniciada la licuación el reacomodamiento de partículas sin cambio de volumen causa que las partículas pierdan contacto y queden suspendidas, aumentando la presión de poros debido a que la carga de gravedad se transfiere de la estructura del suelo al agua de poros (Figura 2 (b)). Finalmente, el agua fluye fuera del suelo, provocando un asentamiento de las partículas en una configuración más densa, volviendo a ser la estructura del suelo quien resiste la carga, por lo que disminuye la presión de poros (Figura 2 (c)).

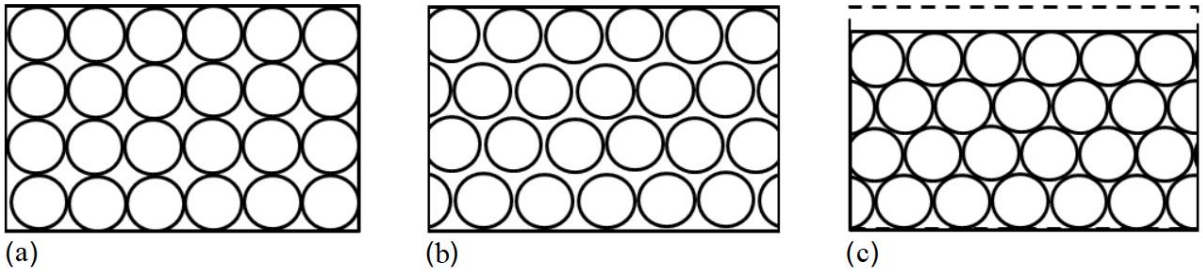

Figura 2. Mecanismo idealizado de licuación. (a) Situación inicial - estructura sólida del suelo. (b) Luego de iniciada la licuación - partículas en suspensión sin cambio de volumen. (c) Situación final – el agua fluye fuera del suelo y las partículas se reacomodan en una configuración más densa. (Guerrero, 2020)

4.2 Casos internacionales

A nivel internacional existe un número considerable de ejemplos en los que producto de la licuación se experimentaron asentamiento en edificios y daños graves. En esta revisión se presentarán los dos más emblemáticos del último tiempo, ocurridos en Turquía en 1999 y en Nueva Zelanda en 2011.

4.2.1 Kocaeli, Turquía. 1999.

El 19 de agosto de 1999 Kocaeli, Turquía fue azotada por un terremoto de Mw=7.4, que dejó más de 20000 muertos y provocó un gran daño estructural. Dentro de las zonas más afectadas, se encuentra la ciudad de Adapazari, ubicado sobre sedimentos de lecho de río joven con arenas y limos blandos y licuables. En esta ciudad, cientos de edificios sufrieron asentamientos e inclinaciones producto de fallas de corte asociadas a la licuación, en la Figura 3 a) se puede apreciar un edificio que se ha volcado debido a la licuación del terreno donde está fundado. Se tiene evidencia de volcanes de arena y lateral spreading en la Figura 3 b). Se aprecia, además de un asentamiento considerable, que el material desplazado por el edificio termina levantando el pavimento.

Figura 3. Evidencias de licuación en Adapazari producto del terremoto de 1999. a) edificio volcado debido a licuación en la fundación; b) asentamiento de un edificio por licuación generando levantamiento del pavimento. (Erdik, 2001)

4.2.2 Christchurch, Nueva Zelanda. 2011.

Entre el 2010 y el 2011 Christchurch, la segunda ciudad más grande del país fue afectada por una serie de sismos, siendo el más devastador el de 22 de febrero de 2011 Mw=6.2. El terremoto causó 185 muertes y generó la pérdida de cerca de 3000 edificios del distrito financiero que fueron dañados más allá de lo que permite recuperar el dinero, por lo que fueron demolidos, al igual que cerca de 8000 casas. Como se puede apreciar en la Figura 4 cerca de un tercio de la ciudad se vio afectada por la licuación.

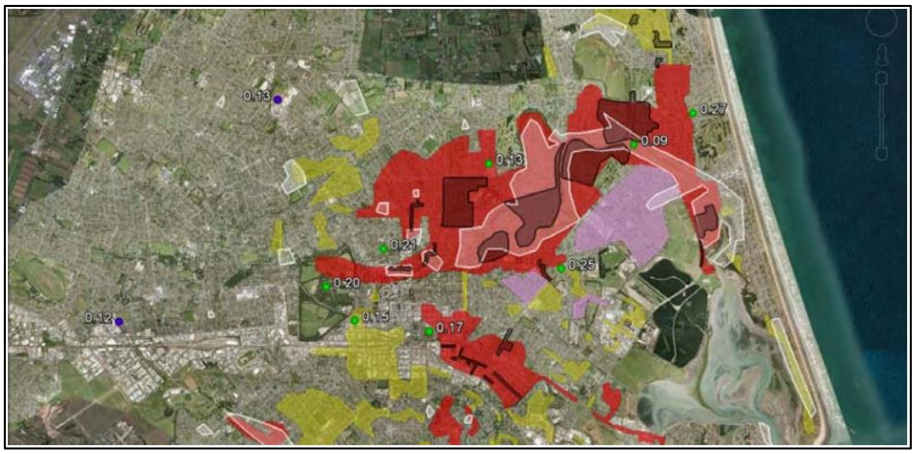

Figura 4. Mapa de licuación indicando áreas donde se observó licuación en los sismos de 2010 (contorno blanco) y 2011 (contorno negro). (Cubrinovski, 2013).

Un ejemplo de asentamiento en edificio de fundaciones superficiales producto de la licuación se observa en la Figura 5. En esta un edificio de 6 pisos presenta asentamiento diferenciado, teniendo una diferencia aproximada de 30 cm entre el mínimo y máximo asentamiento, lo que genera una inclinación y daña tanto las fundaciones como la superestructura. Se presentaron grietas en la superficie, fisuras, depresión del suelo superficial y eyección de agua y suelo. La recuperación del edificio era económicamente inviable por lo que fue demolido.

Figura 5. Asentamiento diferenciado de un edificio con fundaciones superficiales. (Cubrinovski, 2013).

4.3 Licuación en Chile (Maule, 2010).

Producto del terremoto Mw=8.8 ocurrido en la madrugada del 27F 2010, se registraron en Chile más de 170 sitios con claras evidencias de licuación. La Figura 6 ilustra la zona en donde se concentraron estos casos y el tipo de licuación que presentaron. La zona en cuestión tiene una longitud de casi mil kilómetros lo que equivale a casi un cuarto de la longitud del país y un poco menos del doble de la longitud de la zona de ruptura, por lo que se considera que la distribución de las zonas que presentaron licuación es vasta.

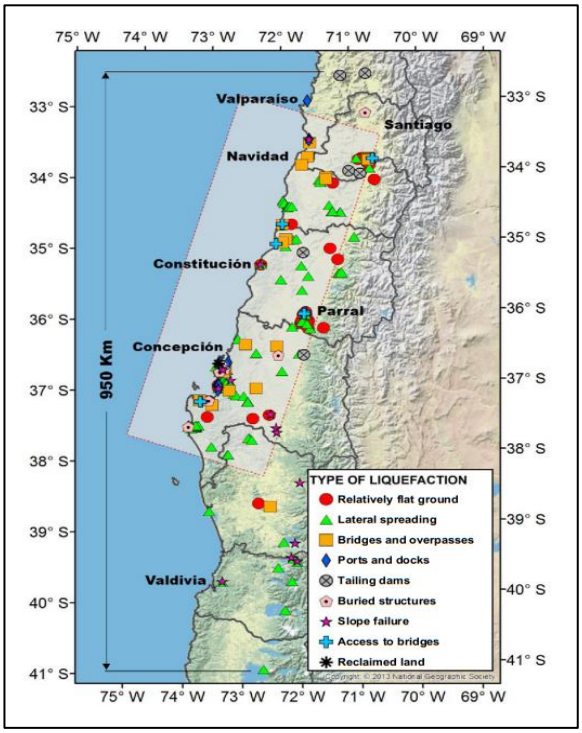

Figura 6. Evidencias de licuación en Chile producto del terremoto del 2010. (Verdugo & González, 2015)

A continuación, se entrega información de dos de los casos más relevantes sobre los efectos de la licuación en edificios en chile.

4.3.1 Edificio Riesco, Hualpén.

Un caso emblemático de licuación en Chile fue el ocurrido en el condominio Los Presidentes de Hualpén. El condominio en general presentó signos de licuación, habiendo desde evidencia de eyección de suelo, hasta asentamientos de gran magnitud, como se puede apreciar en la Figura 7. En particular, el edifico Riesco, el más afectado del condominio, presentó asentamientos de 40 cm en una de sus esquinas y de solo 10 cm en la esquina opuesta, generando inclinaciones de 1°. Este asentamiento diferenciado, fue el principal responsable de los daños que presentó el edificio. En la Figura 8 se presenta un esquema de lo sucedido con el edificio Riesco.

Figura 7. Evidencia de licuación en el Edificio Riesco, a) evidente inclinación y asentamiento, b) eyección de suelo visible en el muro. (González, 2015)

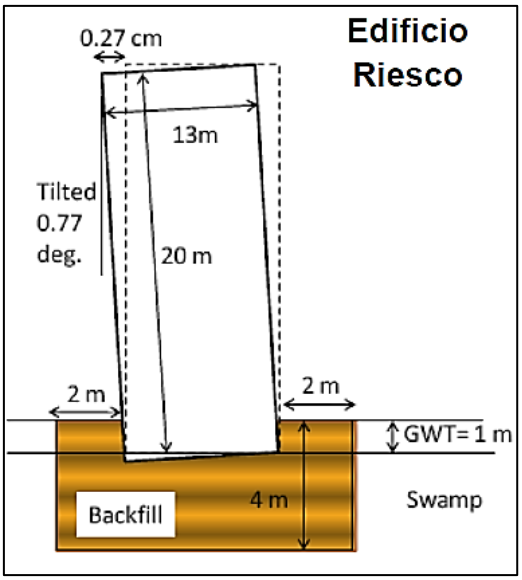

Figura 8. Esquema de lo sucedido en el edifico Riesco. (Verdugo et al., 2010)

4.3.2 Hospital provincial, Curanilahue.

Otro caso relevante ocurrido producto del terremoto del 2010 es el del Hospital provincial en Curanilahue, que llevaba solo 2 años de funcionamiento cuando ocurrió el terremoto.

La mayoría de las estructuras de Curanilahue no supera los 2 pisos y no se observó existencia de licuación en esos sitios, pero donde sí se observó la existencia de ésta, fue en el hospital, que cuenta con 10 alas estructuralmente independientes que van de 1 a 6 pisos. En la Figura 9 (a) se puede apreciar, a partir de la presencia de material eyectado, la existencia de licuación.

Figura 9. Hospital provincial de Curanilahue (a) evidencia de material eyectado y (b) muro de partición dañado producto de la distorsión del suelo en el ala 1C. (Bray et al., 2012)

Si bien se observaron tanto daños estructurales como no estructurales, de todas formas, la extensión del daño estructural fue mínima, debido a las separaciones de aislamiento entre las alas. El ala más afectada fue la 1C, la más alta, en donde se pudo apreciar un cierre de las separaciones sísmicas, resultando en contacto entre las alas. Adicionalmente, se tuvieron asentamientos relativos superiores a los 10 cm y giros de 1.5° entre esta ala y las demás, lo que resultó en distorsión del piso y en daños en los muros de partición, como se puede observar en la Figura 9 (b). Inmediatamente después del terremoto el ala 1c fue cerrada y durante el año 2018 fue demolida.

4.4 Licuación en edificios con fundaciones superficiales.

Un suelo en campo libre que ha licuado producto de un movimiento sísmico presentará un asentamiento asociado principalmente a la consolidación post licuación. En caso de que exista un edificio con fundaciones superficiales sobre el suelo que ha licuado, la situación cambia, ya que, la interacción entre el edificio y el suelo provocará un asentamiento adicional al de campo libre. Este asentamiento adicional puede ser considerablemente superior al que se obtendría sin la presencia de la estructura. Como ejemplo, en la Figura 10, la acera presenta un asentamiento de campo libre de 30 cm mientras que el edificio de la derecha tiene un asentamiento relativo a la acera de 40 cm, resultando en un asentamiento total de 70 cm.

Figura 10. A la izquierda, edifico apoyado sobre pilotes, A la derecha, edificio con fundación superficial. Urayasu, Japón. (Ashford et al., 2011)

El asentamiento que experimenta un edifico con fundaciones superficiales está inducido principalmente por tres factores. Estos son eyección de suelo, esfuerzos de corte y cambios volumétricos, como se puede apreciar en la Figura 11. La eyección del suelo (Figura 11 (a)) ocurre cuando el material que se encontraba debajo del edificio se desplaza hacia la superficie saliendo en forma de volcán de arena. Los esfuerzos de corte se presentan de dos formas, punching failure (Figura 11 (b)) y ratcheting (Figura 11 (c)), que corresponden al desplazamiento de material hacia los lados, producto de la presión vertical que ejerce el edificio, y al efecto asociado a la inclinación del edificio que provoca de manera intermitente tracción y compresión sobre el suelo (siendo la tracción especialmente peligrosa, ya que es sabido que el suelo tiene poca resistencia a esta). Finalmente, los cambios volumétricos (Figura 11 (d) y (e)) hacen referencia al reacomodamiento de partículas.

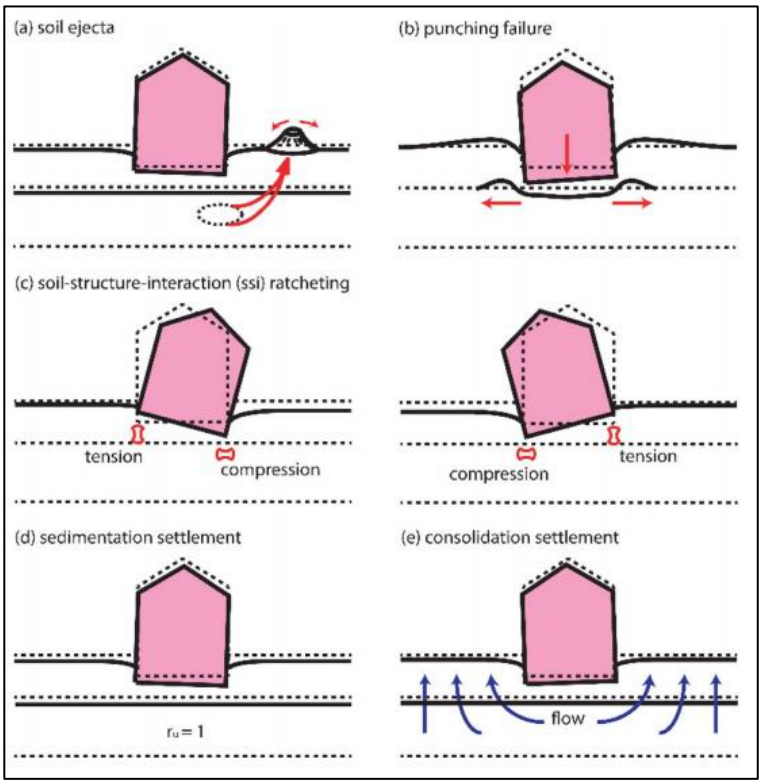

Figura 11. Mecanismos de desplazamiento de edificios inducidos por licuación: (a) pérdida de suelo; asentamiento inducido por corte por (b) punching failure, o (c) soil-structure-interaction (SSI) ratcheting; asentamientos inducidos por cambios volumétricos por (d) sedimentación o (e) reconsolidación post-licuación. (J. D. Bray & Macedo, 2017)

4.5 Cálculo de asentamiento.

En la práctica habitual el cálculo de asentamiento se realiza bajo el supuesto de campo libre (sin estructura sobre el suelo), lo que se traduce en un cálculo de asentamiento netamente asociado a la componente volumétrica (acomodamiento de partículas: reconsolidación post licuación y sedimentación).

El proceso de evaluación de licuación se presenta en la Figura 12, donde se aprecia que cuando un suelo es susceptible a licuar se debe comprobar el potencial de licuación de este. Para comprobar el potencial se calculan factores de seguridad a la licuación, mediante métodos como Moss et al. (2006), Youd e Idriss. (2001) y Boulanger e Idriss (2014), que funcionan a partir de ensayos SPT o CPT.

Una vez comprobado que el suelo es potencialmente licuable, es posible estimar distintos índices que entregan información respecto a los efectos de la licuación, uno de ellos es S_{v1D}, que corresponde al asentamiento volumétrico o de campo libre. Para lo que respecta a este trabajo de memoria, el cálculo de asentamiento en campo libre será realizado utilizando el método de Idriss & Boulanger (2008).

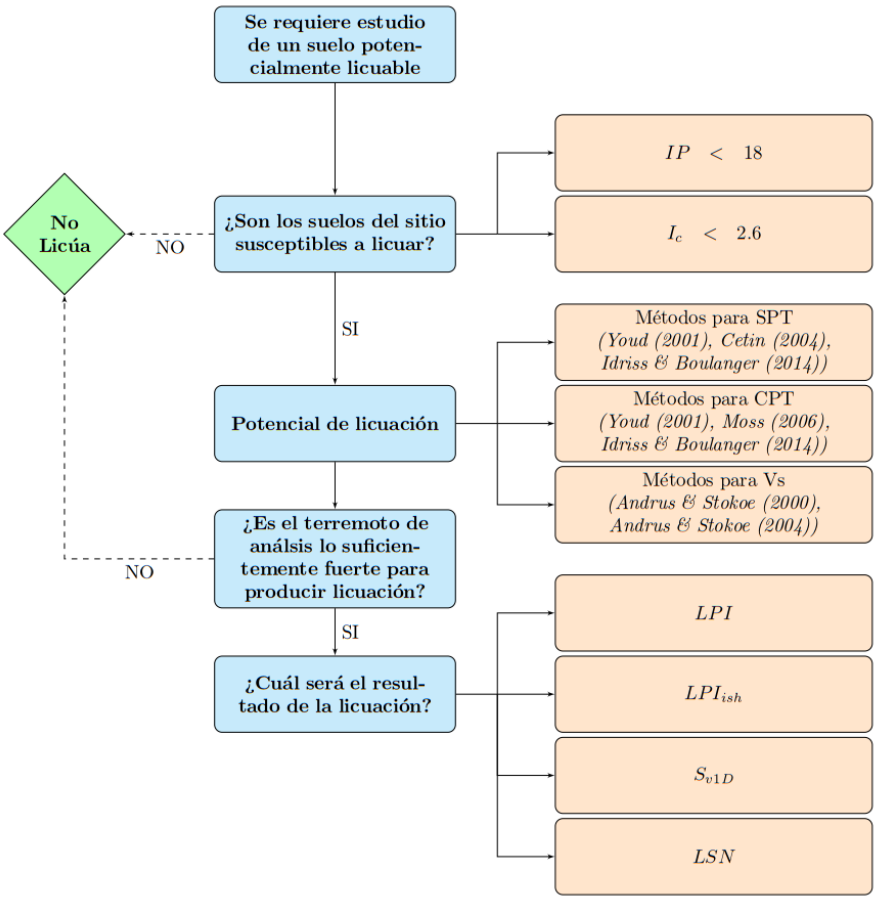

Figura 12. Esquema de método Diagrama que muestra el proceso de evaluación de un terreno a licuación. (Guerrero, 2020)

Como se mencionó en la sección anterior, la interacción entre un edificio de fundaciones y un suelo con potencial de licuación pueden llevar a experimentar asentamientos de más del doble de lo estimado por campo libre.

En la actualidad se han desarrollado métodos de cálculo de asentamiento por licuación para edificios con fundaciones superficiales que incluyen los efectos adicionales ocasionados por la interacción suelo-estructura. En esta memoria se trabajará con las siguientes tres metodologías de cálculo simplificados para edificios con fundaciones superficiales:

4.5.1 Bertalot et al. (2013)

Toma como base el modelo de Liu & Dobry (1997), formulado a partir de los datos en terreno del terremoto de Niigata 1964, que plantea un gráfico, con ambos ejes normalizados por D_L (espesor del suelo licuable), donde el asentamiento inducido por licuación disminuye a medida que aumenta B, ancho de la fundación.

La información de dicho modelo es comparada con los datos de 23 edificios, con fundaciones superficiales, sin sótano, ubicados en 4 sitios diferentes, que sufrieron asentamiento e inclinación como consecuencia de la licuación por el terremoto del Maule en el 2010. Los tipos de suelo varían desde arena limpia de Biobio hasta limo arenoso con 90% de finos.

De la comparación se desprende que para el grupo de datos donde $B/D_L>2$, no se sigue la correlación planteada, es decir, es necesario plantear un nuevo método que incluya de manera correcta la información adquirida posterior al terremoto del Maule. Como primer paso de este nuevo modelo, se plantea que, a diferencia del anterior, B no debe ir normalizado por D_L.

Posterior a eso, para incluir el efecto de la presión de la fundación, se obtienen los valores aproximados de la presión de los casos incluidos en el historial, en base a estimaciones por piso, ya que no se tienen los detalles de diseño. Los datos obtenidos se grafican versus el asentamiento normalizado (S/D_L) y se obtiene que, a diferencia de lo que se podría pensar, el mayor asentamiento se tiene en valores intermedios de q, y no en máximos.

Para compatibilizar los resultados de esta investigación, se terminan graficando, de manera tridimensional, las bases de datos obtenidas, generando así la Figura 13, de donde se obtienen las curvas de máximo asentamiento, presentadas en la Figura 14

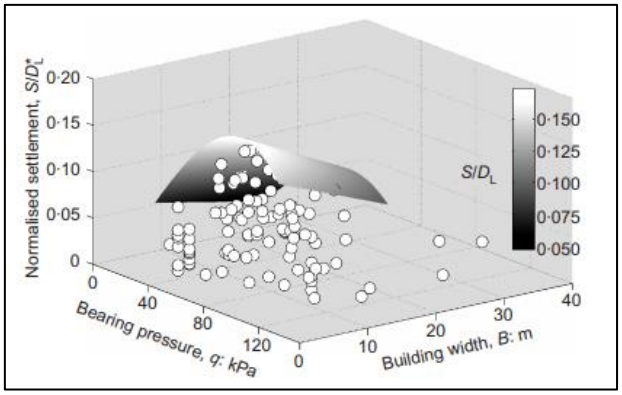

Figura 13. Gráfica en 3D de los parámetros analizados en este estudio (B, Q y S/D_L) y superficie propuesta de interpolación de máximos valores de asentamiento normalizado. (Bertalot et al., 2013)**.**

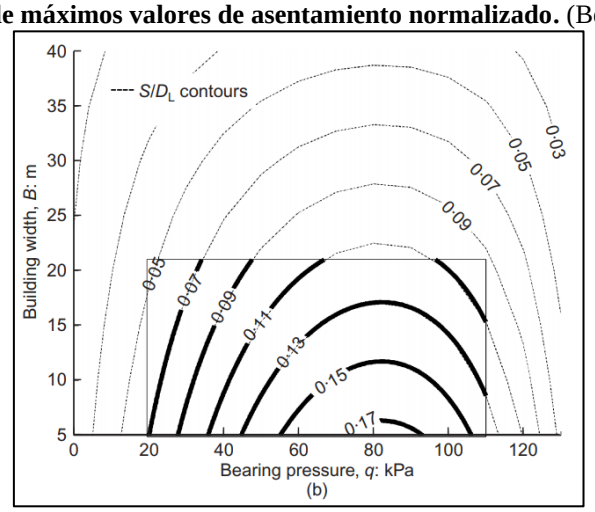

Figura 14. Curvas de máximo S/D_L observado. Fuera del recuadro una interpolación que debe ser confirmada. (Bertalot et al., 2013)**.**

En la Tabla 1 se presentan los parámetros necesarios para la implementación de este método, junto con las unidades y definiciones de estos.

De la Figura 14, también se desprende que, para asegurar la representatividad de este método, se debe trabajar con casos que tengan un ancho B de hasta 20 [m] y una presión que se encuentre ente 20 y 110 [kPa].

Tabla 1. Parámetros requeridos por el modelo de Bertalot et al., (2013).

Bertalot et al, 2013		
Parámetro	Unidad	Definición
B	m	Ancho del edificio
q	kPa	Presión de contacto de la fundación
D_L	m	Espesor del suelo licuable

4.5.2 Bray & Macedo (2017).

Este método plantea que el asentamiento total se obtiene a partir de las tres componentes principales de asentamiento, presentadas en la Figura 11, de eyección de suelo (De), inducidas por cambios volumétricos (Dv) y finalmente, motivadas por los esfuerzos de corte (Ds), como se aprecia en la ecuación 1:

$$Dt = De + Dv + Ds \tag{1}$$

Esta investigación se centra en definir los asentamientos asociados a los esfuerzos de corte. Para lograrlo, se realizan análisis de sensibilidad para diferentes características de, movimiento de suelo, condiciones de sitio, y configuraciones de la estructura. Se generan 105 modelos diferentes en base a variaciones de los parámetros principales del suelo.

Estos 105 modelos son sometidos a 12 registros sísmicos de terremotos superficiales de la corteza, generando 1260 análisis. Posteriormente, se seleccionaron 24 registros sísmicos adicionales y se hicieron interactuar con subgrupos de los modelos mencionados anteriormente, para explorar la influencia de un mayor rango de movimientos de suelo.

Los análisis de interacción suelo-estructura (SSI) dinámicos no lineales fueron realizados con el programa FLAC, con el modelo constitutivo PM4Sand

A partir de los modelamientos numéricos se lograron definir las ecuaciones (2) y (3), en base a los parámetros que resultaron más importantes. Donde c1=-7.48 y c2=0.014 para LBS>16, y c1=-8.35 y c2=0.072 para LBS≤16. HL es el espesor acumulado de las capas con factor de seguridad para la licuación (FSL) <1.0 en metros. Q es la presión de contacto en kPa, y B es el ancho en metros. Las medidas de intensidad, CAV_{dp} en g-s y S_{a1} en g, se estiman para movimientos de campo libre, asumiendo que no hay licuación. El parámetro ε es una variable aleatoria normal con media igual 0 y desviación estándar 0.5.

$$Ln(Ds) = c1 + 4.59ln(Q) - 0.42ln(Q)^2 + c2LBS + 0.58ln\left(Tanh\left(\frac{HL}{6}\right)\right) - 0.02B + 0.84ln\left(CAV_{dp}\right) + 0.41ln(S_a1) + \varepsilon \tag{2}$$

$$LBS = \int W \frac{\varepsilon_{shear}}{z} dz \tag{3}$$

En la Tabla 2 se presentan los parámetros necesarios para la implementación de este método, junto con las unidades y definiciones de estos.

Tabla 2. Parámetros requeridos por el modelo de Bray & Macedo (2017).

Bray y Macedo, 2017		
Parámetros	Unidad	Definición
Q	kPa	Presión de contacto de la fundación
HL	m	Espesor acumulado de las capas con FSL≤1
B	m	Ancho del edificio
CAV_{dp}	g-s	Versión estandarizada del CAV
Sa1	g	Aceleración espectral para t=1 s
LBS	-	Índice de asentamiento en edificio inducido por la licuación

4.5.3 Bullock et al. (2019).

Modelo semi empírico basado en análisis numéricos anteriormente desarrollados por (Karimi & Dashti, 2016), posteriormente calibrado con una base de datos de 50 casos de licuación producidos por 6

terremotos diferentes. Dentro de dicha base de datos se encuentran los casos de licuación estudiados en la investigación de Bertalot et. al (2013), por lo que también incluye casos de Chile asociados al terremoto de la región de Maule en el 2010. De los 50 casos mencionados anteriormente 16 corresponden a Chile.

Este método descompone el valor del asentamiento en tres partes principales, asociadas cada una a un aspecto relevante del proyecto. Estos son el perfil del suelo (f_{s0}), fundación (f_{fnd}) y estructura (f_{st}) y para cada uno de ellos entrega un set de ecuaciones a partir de las que se calculan las componentes del asentamiento. Además, incluye un término asociado a la velocidad absoluta acumulada (CAV) calculada para roca aflorante.

$$\ln(\bar{S})_{num} = f_{so} + f_{fnd} + f_{st} + s_0 \ln(CAV) \tag{4}$$

El factor f_{s0}, que caracteriza el suelo, depende de la función escalón de Heaviside H(·), que toma el valor 0 si el argumento es negativo y 1 si es positivo, de la presencia de un estrato de baja permeabilidad sobre el primer estrato susceptible a licuar F_{LPC} (1 si se tiene o 0 si no), y el factor f_s, que puede ser calculado tanto con CPT como SPT.

$$f_{so} = \left(\sum_i H\left(H_{s,i} - 1 + \varepsilon\right) f_{s,i} f_{H,i}\right) + [c_0 + c_1 \ln(CAV)] F_{LPC} \tag{5}$$

La componente del asentamiento asociada a la fundación f_{fnd}, depende de f_q, función de la presión de la fundación (q), y $f_{B,L}$, función de las dimensiones de la fundación B y L.

$$f_{fnd} = f_q + f_{B,L} \tag{6}$$

Finalmente, f_{st} es función de la altura efectiva (h_{eff}) y la masa inercial de la estructura (M_{st}), f_0, f_1 y f_2 son constantes.

$$f_{st} = [f_0 + f_1 \ln(\min(CAV, 1000))] h_{eff}^2 + f_2 \min\left[\left(\frac{M_{st}}{10^6}\right), 1\right] \tag{7}$$

El detalle de cada función aquí mencionada está presente en el trabajo investigativo del autor (Bullock et al., 2019)

En la Tabla 3 se presentan los parámetros necesarios para la implementación de este método, junto con las unidades y definiciones de estos.

Tabla 3. Parámetros requeridos por el modelo de Bullock et al. (2019).

	Bullock et al. (2019)		
	Parámetros	Unidad	Definición
f_{s0}	CAV	cm/s	Integral del valor absoluto del tiempo historia de aceleraciones
	H_{si}	m	Espesor de la capa susceptible
	D_{si}	m	Profundidad desde el fondo de la fundación hasta el centro de la capa susceptible i
	$N_{1,60,i}$	-	Contador de golpes SPT corregido
	$q_{c1N,i}$	-	Resistencia de punta del cono normalizado
	Dr	%	Densidad relativa de las capas susceptibles
f_{fnd}	CAV	cm/s	Integral del valor absoluto del tiempo historia de aceleraciones

	q	kPa	Presión de contacto de la fundación
	B	m	Ancho de la fundación rectangular
	L	m	Largo de la fundación rectangular
	Df	m	Profundidad de la superficie al fondo de la fundación
	$D_{S,1}$	m	Profundidad al centro de la capa susceptible superior con N1,60,i menor a 17.2 golpes (qc1N menor a 140.2)
f_{st}	CAV	cm/s	Integral del valor absoluto del tiempo historia de aceleraciones
	h_{eff}	m	Altura efectiva de la estructura
	M_{st}	kg	Inercia de masa de la estructura

Finalmente, es importante mencionar que a partir de las bases de datos de casos históricos utilizados para desarrollar y calibrar este modelo se recomienda, para mayor confiabilidad, aplicarlo solo para casos donde B < 25m, q < 250 kPa, Heff < 18m, L/B < 4.0, y Df < 5m.

4.5.4 Restricciones

Debido a que los métodos se desarrollan en base a datos de casos históricos y/o en base a simulaciones en programas computacionales, la validez de los métodos propuestos se encuentro condicionada por estos. Es decir, los métodos solo entregan resultados seguros, cuando son evaluados en situaciones que se encuentran dentro de los parámetros de los casos históricos o dentro de los parámetros en los que se movieron las simulaciones.

El método de Bertalot et al. (2013) solo tiene dentro de sus bases de datos de casos, edificios que cumplen con:

- 20<q<110 [kPa]
- 5<B<21 [m]

El método de Bray & Macedo (2017) fue planteado a partir de los siguientes supuestos:

- Estructuras regulares (cargas uniformes)
- H< 24 [m]
- La corteza no licuable no tiene defectos (zanjas que generan caminos preferenciales para la eyección de material)
- La estructura no está en un área de lateral spreading significativo

El método de Bullock et al. (2019) fue calibrado a partir de una base de datos en donde la aplicabilidad está limitada por:

- B < 25 [m]
- Q < 250 [kPa]
- L/B < 4
- Df < 5 [m]

5 Caso de estudio

Se pretende realizar cálculos de asentamientos en un caso de estudio, aplicando los tres métodos presentados en la sección anterior con la intención de aclarar el funcionamiento y aplicabilidad de dichos métodos. El caso de estudio corresponde a una situación hipotética que toma la información de estructura y fundación de un proyecto ubicado en la ciudad de Valdivia y, la información del estudio de suelo de un proyecto ubicado en Viña del Mar, donde el suelo es potencialmente licuable. La información de ambos proyectos es facilitada por la empresa Ferrara.

La decisión de combinar la información de dos proyectos distintos nace desde la necesidad de trabajar con un edificio que no cuente con subterráneo, ya que los métodos estudiados en esta memoria no

consideran la existencia de estos, y, por otro lado, desde el deseo de tener una caracterización exhaustiva del suelo en un sitio con potencial de licuación, para asegurar la validez de los resultados. Como no fue posible encontrar un proyecto que cumpliese con ambos requerimientos se tomó la decisión de formular un caso hipotético.

Si bien el caso de estudio no existe realmente, el cálculo de asentamientos de éste sigue siendo relevante, ya que, al utilizar información real, permite abordar desafíos y plantear respuestas a situaciones que se presentan en la práctica ingenieril.

Un ejemplo de lo anterior se puede apreciar en el caso de la presión de fundación (Q), ya que, los tres métodos que se revisarán en esta memoria funcionan con un único valor de Q como input. En la práctica, Q se representa como un espectro de distintos valores, como se puede apreciar en Figura 15, por lo tanto, queda al criterio del ingeniero la forma de obtener el valor representativo de Q que se usará en la implementación.

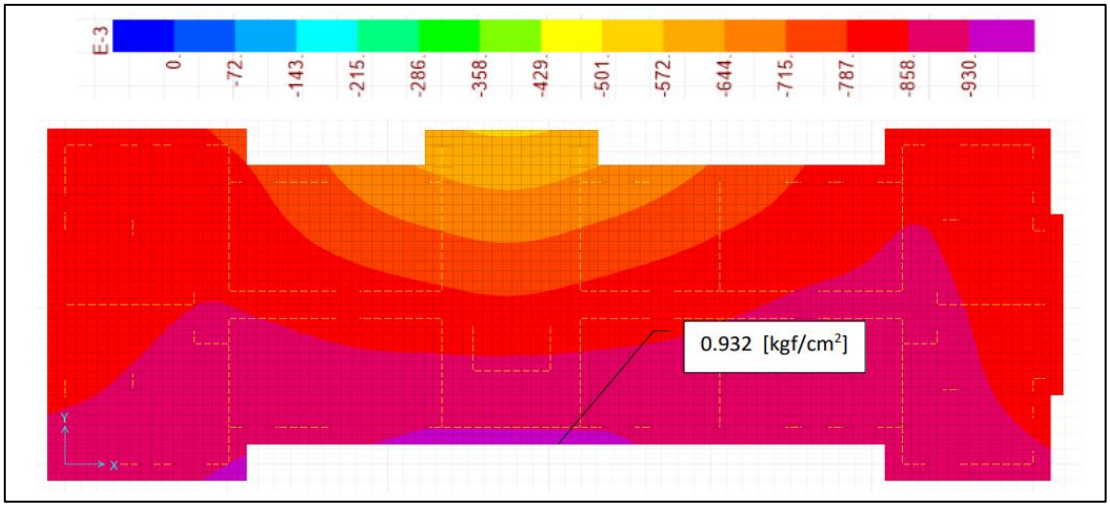

Figura 15. Distribución de esfuerzos estáticos de fundación del edificio a estudiar.

Toda información entregada sobre la estructura corresponde a la torre A, de 7 pisos, que se muestra en la Figura 16 y en la Figura 17.

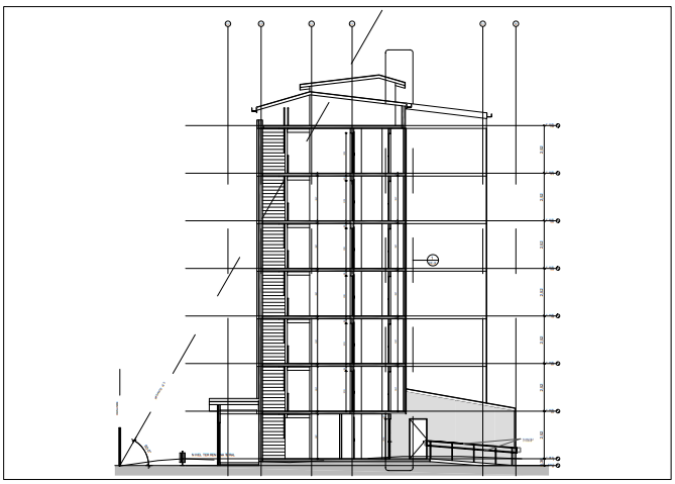

Figura 16. Corte transversal del edificio a estudiar.

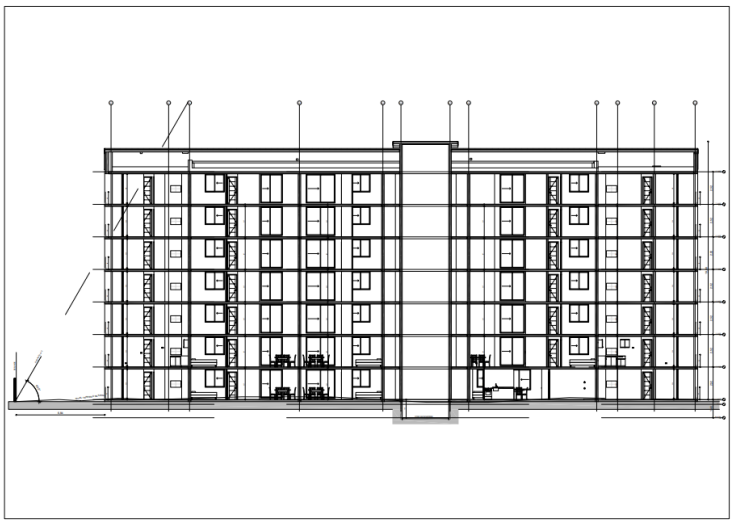

Figura 17. Corte longitudinal del edificio a estudiar.

El terreno del caso de estudio cuenta con dos estratigrafías distintas, la primera de un sondaje con extracción de muestras y ejecución de ensayos SPT, como se muestra en la Tabla 4 en donde se describe el contenido de cada estrato, se clasifica según USCS, y se menciona que la totalidad de la muestra es no plástica, por lo que se aclara que el suelo es susceptible a la licuación.

Tabla 4. Estratigrafía obtenida a partir del sondaje con extracción de muestras asociado al ensayo SPT.

Horizonte	Profundidad [m]	Tipo de Suelo
E1	0.00-0,30	Rellenos de arenas con gravas y finos; distribución aproximada de tamaños: 20% gravas, 65% arenas y 15% finos. Sin plasticidad. Clasificación USCS: SM
E2	0.30-6.00	Arena de grano grueso; distribución aproximada de tamaños: 0% gravas, 90% arenas y 10% finos Sin plasticidad. Valores de NSTP entre 8 y 17. Clasificación USCS: SP-SM, SP
E3	5.00-30.00	Arena de grano fino; distribución aproximada de tamaños: 0% gravas, 95% arenas y 5% finos Sin plasticidad. Valores de NSTP entre 22 y 42. Clasificación USCS: SP

La segunda estratigrafía viene dada por el ensayo CPT (Figura 18), en esta se especifica que la totalidad de la muestra corresponde a arena y arena limosa. Adicionalmente se presentan la resistencia de punta e Ic en profundidad.

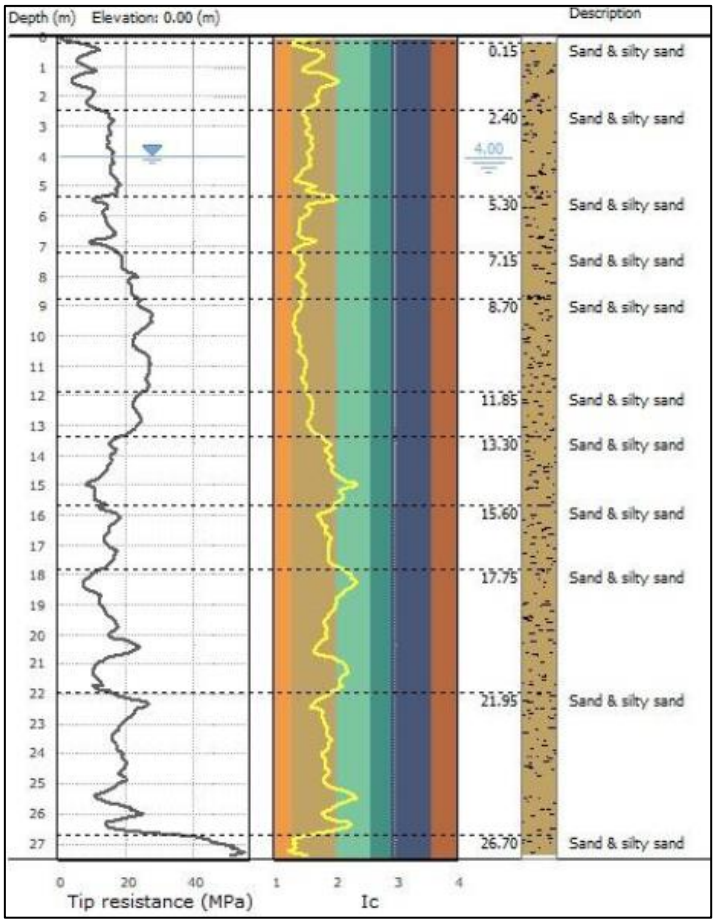

Figura 18. Estratigrafía, resistencia de punta ensayo CPT e Ic en profundidad.

Los factores de seguridad en función de la profundidad, necesarios para la verificación del potencial de licuación y obtenidos a partir de la información de los ensayos CPT y SPT, se presentan en la Figura 19 (a y b respectivamente). Ambos gráficos fueron obtenidos utilizando el método de Boulanger e Idriss (2014) que, adicionalmente, requiere datos como aceleración máxima y magnitud del sismo para el que se evalúa, ambos datos obtenidos desde el estudio de amenaza sísmica y presentados en la Tabla 6.

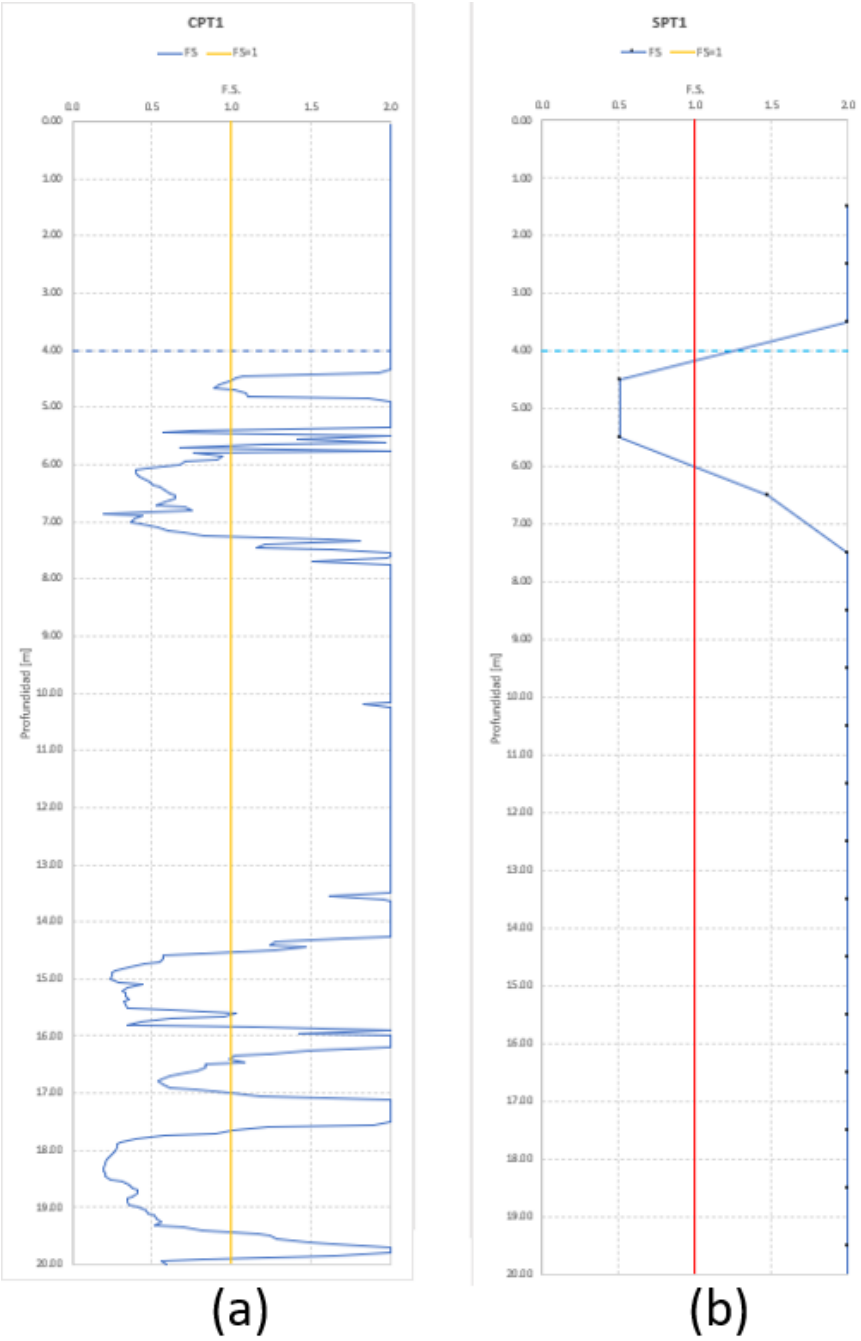

Figura 19. Factor de seguridad en función de la profundidad calculado usando el método de Boulanger & Idriss (2014). Donde (a), los valores asociados al ensayo CPT y, (b), los del ensayo SPT. Ambos casos cuentan con un nivel freático de 4 m.

El estudio de peligro sísmico determinístico se realiza con la intención de definir el espectro de diseño para el tipo de suelo correspondiente al tipo F (Figura 20). Entrega información relvante para el estudio de licuación, ya que, tanto PGA(aceleración máxima del suelo) como Mw (momento magnitud del sismo de diseño) son parámetros necesarios para la estimacion del factor de seguridad para la licuación FSL (Boulanger e Idriss 2014). Adicionalmente, tanto la profundidad como el Rmin, en conjunto con Mw y V_{s30}, son parámetros necesarios para el cálcuo de CAV, que correspode a la velocidad absoluta acumulada. Para el desarrollo de esta memoria, se trabaja asumiendo un ambiente tectónico de subducción interplaca, motivado principalmente por la idea de recrear las condiciones sísmicas predominantes de Chile. En la Tabla 5 se pueden apreciar las tres geometrías que se utilizan para obtener

el espectro determinístico de la Figura 20. En la Tabla 6 se presentan los valores asociados a los demás parámetros.

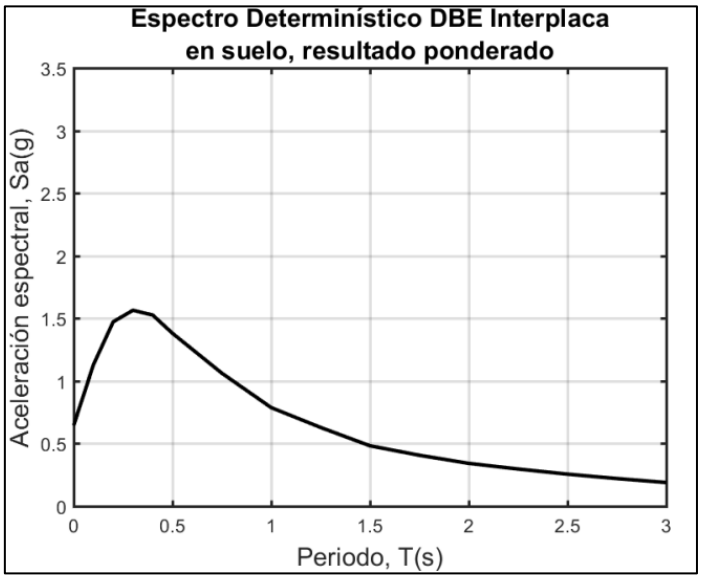

Figura 20. Espectro determinístico para condiciones de suelo, Sismo de diseño Interplaca. obtenido del estudio de peligro sísmico.

Tabla 5. Geometrías a partir de las que obtuvo el espectro determinístico.

	Fuente interplaca	
Geometría	Rmin [km]	Profundidad [km]
Geometría 1	33	30
Geometría 2	23	21
Geometría 3	42	39

Tabla 6. Principales parámetros obtenidos del estudio de peligro sísmico

Mw	8.8
V_{s30} [m/s]	337
PGA [g]	0.65
Sa1 [g]	0.8

6 Implementación y obtención de resultados.

La implementación de los métodos se realiza siguiendo los pasos planteados por los autores en las respectivas investigaciones y los parámetros con los que se trabaja son los obtenidos a partir de planos del edificio, distribución de esfuerzos, estudios de mecánica de suelos y amenaza sísmica entre otros.

6.1 Bertalot et al. (2013).

Este método es gráfico, por lo que no requiere una implementación en base a software. Los principales desafíos son la identificación de las propiedades del caso de estudio y la realización argumentada de supuestos.

En cuanto al parámetro de la presión de la fundación (q), se espera ingresar un número, pero la información está presentada en forma de distribución, como se puede apreciar en la Figura 15, por lo

que corresponde justificar la elección del valor, ya sea si se trabaja con valores máximos, con un promedio o con un valor diferente.

Para la implementación de estos métodos, se trabaja con el valor promedio, basando esta decisión en el hecho de que la presión de la fundación se transmite al suelo en forma de un bulbo de presiones, los cuales interactúan entre sí homogeneizando los esfuerzos dentro (o a través) del suelo. Este q promedio se obtiene a partir de la ponderación por área, en la que para el cálculo de áreas se utiliza AutoCAD y el q correspondiente a cada área es el observado en la distribución de esfuerzos sobre la fundación (Figura 15)

El otro parámetro que requiere argumentación es el del espesor de la capa licuable, ya que, en la investigación de Bertalot et al. (2013) se menciona el uso de un valor promedio entre el máximo y el mínimo para definir D_L, pero no especifica si estos valores máximos y mínimos son acumulados. En la práctica, se pueden presentar distintos estratos que licuan, no solo un estrato continuo, por lo que la definición de este parámetro no entrega la especificación suficiente.

El supuesto que se realiza para este trabajo de memoria es que D_L corresponde a un espesor acumulado, ya que, de esta manera se considera la totalidad de las capas que presentan factores de seguridad para licuación inferiores a 1. Las alternativas descartadas fueron, tomar solo al estrato licuable más cercano a la superficie, y, considerar como D_L desde el primer estrato con FSL<1 hasta el último. Ambas opciones se descartaron debido a que no lograrían entregar una buena caracterización del suelo, al ser formas muy extremas de representar la situación real.

En la Figura 21 se aprecia como se ubica el punto en el gráfico que permite despejar el valor deseado de asentamiento (S).

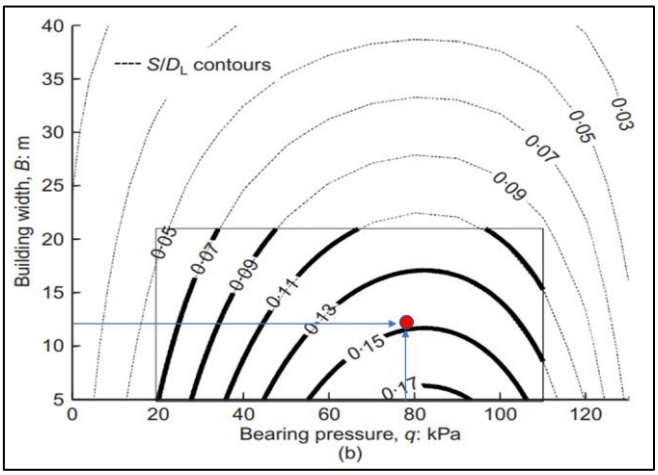

Figura 21. Aplicación método Bertalot et al. (2013).

En la Tabla 7 se presentan los valores, correspondientes al caso de estudio, con los que se aplica el método. En esta misma tabla, el valor de S corresponde al asentamiento buscado.

Tabla 7. Parámetros aplicación Bertalot et al. (2013).

	SPT	CPT
Q [kPa]	77.79	77.79
B [m]	12.18	12.18
D_L [m]	2.00	5.50
S/D_L	0.147	0.147
S [cm]	29.40	80.85

6.2 Bray & Macedo (2017).

Como se puede apreciar en la ecuación 1, la implementación de este método requiere 3 cálculos distintos de asentamiento, el primero es la estimación de la componente asociada a la pérdida de material (eyección), para esto se verifica mediante índices como LSN o LPI, si efectivamente existe un asentamiento relevante. En el caso de estudio, se tiene un suelo con estrados de suelo clasificados como SM y SP, y un LSN inferior a 25, lo que según el trabajo de Hutabarat & Bray (2019), indica que no es necesario estimar esta componente del asentamiento. Si se hubiese dado el caso de tener un LSN superior a 25, se debería estimar esta componente a partir del estudio de casos históricos.

Para el cálculo de la componente volumétrica, se utiliza un modelo de Idriss & Boulanger (2008), comúnmente implementado por las empresas para estimar el asentamiento en campo libre, que funciona tanto en base al ensayo CPT como al SPT. En cuanto a esto, a recomendación realizada por Bray y Macedo (2017) es la de utilizar método de cálculo asociados a CPT.

Finalmente, la implementación del cálculo de la componente de corte se desarrolla mediante una planilla Excel, donde se deben ingresar los parámetros del modelo, presentados en la Tabla 2. Los cálculos principales incluyen la obtención de LBS (Índice de Asentamiento del Edificio inducido por la Licuación), que principalmente considera la deformación unitaria de corte que experimenta la fundación, basado en el trabajo de Macedo (2017), y a su vez se debe estimar el valor de CAVdp, sugiriéndose el uso de la ecuación propuesta por Campbell & Bozorgnia (2019), según comunicación personal con Macedo, y que depende de los parámetros sísmicos asociados a terreno.

Estimar el valor de CAVdp en suelo resulta complejo, ya que requiere bastantes parámetros, y el estudio de peligro sísmico del proyecto no los entrega. Tomando esto en consideración se opta por calcular el CAV planteado por Foulser-Pegott (2015), basado en los terremotos de Japón. Esta decisión se justifica principalmente por tres motivos. Primero porque esta expresión requiere menos inputs y que se cuenta con ellos. Segundo, por el hecho de que este método, a diferencia de la expresión de Campbell & Bozorgnia (2019), sí considera el ambiente tectónico de subducción, que es lo que se está trabajando en esta memoria para emular de mejor manera los escenarios más típicos presentes en Chile. Tercero, porque si bien CAVdp no es lo mismo que CAV, en el mismo trabajo de Campbell, se menciona que CAV>CAVdp, se cumple siempre, por lo que utilizar CAV termina siendo válido, aunque más conservador.

Si bien la implementación del método de Foulser-Pegott (2015) es sencilla, ya que tiene un número pequeño de ecuaciones, no fue posible obtener resultados coherentes. Se cree que lo anterior se debe principalmente al hecho de que, si bien este método incluye dentro de su base de datos sismos de grandes magnitudes, dichos sismos están asociados a distancias a la ruptura (Rmin) superiores a los 50 km, y el caso de estudio contempla distancias en torno a los 30 km.

Ante este problema, y considerando la imposibilidad de encontrar otro método de estimación del CAV en suelo, que aplique para ambientes tectónicos de subducción, se toma la decisión de aplicar el método considerando un valor arbitrario de CAVdp, correspondiente a 1 [g], basado en el valor utilizado como ejemplo en la investigación de Bray y Macedo. De todos modos, para complementar esta decisión, se realiza un análisis de sensibilidad adicional, considerando solamente la variable CAVdp, para demostrar el impacto que este término tiene en el cálculo del asentamiento. Los límites de este análisis de sensibilidad corresponden al mínimo y máximo valor de CAVdp utilizado en la investigación de Bray y Macedo. Este análisis se presenta en la sección 8.3 de esta memoria, en la Figura 25.

A continuación, en la Tabla 8. se presentan los parámetros necesarios para a implementación del método.

Tabla 8. Parámetros para el cálculo de Ds. (Bray & Macedo, 2017).

	CPT	SPT
Q [kPa]	77.79	77.79
LBS	180.63	198.66

HL [m]	5.55	2.00
B [m]	12.18	12.18
CAVdp [g-s]	1.00	1.00
Sa1 [g]	0.80	0.80
Df [m]	1.00	1.00

Finalmente, habiendo calculado las tres componentes del asentamiento, se realiza la suma y se obtiene el asentamiento total. Todo esto se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Asentamiento por componentes y total. (Bray & Macedo, 2017).

	CPT	SPT
Dv [cm]	8.70	3.65
De [cm]	0	0
Ds [cm]	70.10	56.16
Dt [cm]	78.80	59.81

6.3 Bullock et al. (2019).

Al igual que en el método anterior, la implementación se lleva a cabo a través de una planilla Excel, que trabaja en base a los parámetros de la Tabla 3. Este método es el que presenta el mayor número de parámetros y ecuaciones para el cálculo de asentamiento.

Aunque este método también depende de la velocidad absoluta acumulada, este solo requiere el parámetro CAV en roca, que es más sencillo de obtener que el CAVdp en suelo, del método anterior. Este hecho cobra relevancia, ya que la bibliografía asociada al cálculo del CAV en roca Bullock et al. (2017) es más completa, presenta diferentes ecuaciones para los distintos ambientes tectónicos, y requiere una cantidad considerablemente menor de parámetros que el CAVdp en suelo.

Adicional al CAV, se identifican los demás parámetros necesarios para realizar los cálculos, siendo los demás sencillos de obtener. En la Tabla 10 se presentan los valores de caso de estudio que serán usados para calcular el asentamiento.

Tabla 10. Parámetros del caso de estudio para la aplicación de método de Bullock et al. (2019).

CAV [cm/s]	3528.92	B [m]	12.18	Mst [kg]	4423287.81
FLPC	0	L [m]	45.80	Df [m]	1.00
q [kPa]	77.79	heff [m]	18.67	DS,1 [m]	0.50

Este método presenta ecuaciones diferentes en base a si se trabaja con información de CPT o SPT. Como el caso de estudio presenta ambos ensayos, se aplicará de ambas maneras para tener más información sobre las diferencias que se generan en el resultado final. De todos modos, ante la opinión de que el ensayo CPT es superior al ensayo SPT, el resultado final de este método que se comparará con los obtenidos por los demás métodos, será el asociado al ensayo CPT.

Ya sea utilizando CPT o SPT, el método requiere ordenar los estratos e ingresar los valores qc1N,i o N1(60)i, como se puede apreciar en la Tabla 11. Aunque ambos ensayos se realizaron a partir de dos sondajes diferentes, se trabaja bajo el supuesto de que la información es comparable, considerando que se realizaron en un mismo terreno. Para ordenar los estratos se toma en consideración la estratigrafía obtenida del sondaje asociado al ensayo SPT, presentada en la Tabla 4

Tabla 11. Ensayos CPT y SPT

CPT		SPT	
z [m]	qc1N,i	z [m]	N1,60,i
1.5	123.76	1.5	15.42
6	179.68	6	29.29
15	145.00	15	39.80

A continuacion, en la Tabla 12, se presentan los asentamientos calcuados a partir de los dos ensayos presentados anteriormente.

Tabla 12. Valor de asentamiento obtenido mediante ecuaciones de CPT y SPT

S(CPT) [cm]	25.91
S(SPT) [cm]	24.27

7 Análisis

7.1 Comparación entre métodos

Como primer análisis, se comparan los resultados de asentamiento obtenidos por cada método siguiendo las recomendaciones realizadas por los autores, es decir, para Bertalot et al. (2013) se utiliza la información del ensayo SPT, y tanto para Bray y Macedo (2017) como para Bullock et al. (2019) se utilizan los valores del ensayo CPT (Bullock entrega la posibilidad de aplicar el método con cualquiera de estos ensayos, pero se opta por usar el valor de CPT debido a que es reconocido como un mejor ensayo). La idea de realizar esta comparación es entregar más información al lector, que permita guiar en la toma de decisión sobre la implementación de alguno de estos métodos.

Tabla 13. Comparación entre los valores de asentamiento obtenidos para cada método

	Asentamiento en [cm]
Bertalot et al. (2013)	29.40
Bray y Macedo (2017)	78.80
Bullock et al. (2019)	25.91

Lo que más resalta de la Tabla 13, es que Bertalot y Bullock entregan resultados similares, y Bray y Macedo, por otra parte, entrega resultados de más del doble que los demás. Lo importante de este hecho es que tanto Bertalot como Bullock tienen dentro de sus bases de datos de registros históricos, más de 20 casos de licuación en Chile, ocurridos para el terremoto del Maule en el 2010, por lo que la similitud de resultados entrega mayor confianza y comprueba que están relacionados de alguna manera.

El hecho de que Bray y Macedo entregue resultados tan distintos a los demás, y aparentemente poco realistas, puede tener que ver con el hecho de que este no incluye casos chilenos en sus bases de datos, donde además el sismo de mayor magnitud corresponde a 7.9 Mw, muy diferente a los grandes sismos interplaca que ha experimentado Chile, por lo que no es un método óptimo para evaluar asentamiento en un ambiente tectónico de subducción, como el de Chile. Probablemente este método sea superior a los demás si se trabajara en un caso de ambiente tectónico dominante tipo Shallow crustal ya que el método fue validado, principalmente, para casos observados en la secuencia de terremotos de Canterbury, Nueva Zelanda, de 2010-2011. Pero como el objetivo de este trabajo es implementarlo en Chile, termina siendo poco práctico ya que es el que más trabajo requiere y el que entregó resultados más alejados.

7.2 Comparación de los asentamientos obtenidos con el asentamiento de campo libre.

En un comienzo se planteó la idea de que las metodologías actuales de cálculo de asentamiento eran insuficientes para predecir correctamente el asentamiento de un edificio con fundación superficial que se encuentra sobre un suelo licuable, debido a que la interacción entre la estructura y el suelo genera asentamientos adicionales. En esta sección se comparará el asentamiento en campo libre que se hubiese obtenido aplicando el método de Boulanger e Idriss (2008), con los asentamientos que se obtuvieron al aplicar los métodos simplificados que se presentaron en esta memoria.

Tabla 14. Valores de asentamiento para campo libre y tomando en consideración una estructura de fundaciones superficiales.

	Asentamiento en [cm]	Boulanger e Idriss (2008) - Campo libre [cm]	%
Bertalot et al. (2013)	29.40	8.70	237.93
Bray y Macedo (2017)	78.80	8.70	805.75
Bullock et al. (2019)	25.91	8.70	197.82

La Tabla 14, deja demostrado que los asentamientos estimados mediante los métodos simplificados son inmensamente superiores a los que se hubiese obtenido en campo libre, Bullock et al. (2019) entrega la menor diferencia, pero sigue prácticamente el triple del valor de campo libre. Lo anterior confirma la importancia de comenzar a trabajar con estos métodos en la práctica a nivel nacional.

7.3 Analisis de sensibilidad

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad en cada método, se analizan los parámetros B y Q, que corresponden a los parámetros en común de los 3 métodos y adicionalmente se agregan 1 o más parámetros propios del método. Luego, se fija un caso base (Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17) y se procede a variar en un 20%, positiva y negativamente, cada uno de los parámetros de forma independiente. La Figura 22, Figura 23 y Figura 24 presentan los gráficos de sensibilidad de los métodos de Bertalot et al. (2013), Bray y Macedo (2017), y Bullock et al. (2019), donde lo graficado es el valor de asentamiento que se genera al realizar las variaciones. Como todos los parámetros fueron variados en un 20%, mientras mayor sea el tamaño de la gráfica del parámetro, mayor la relevancia de este a la hora de calcular el asentamiento.

Tabla 15. Caso base para método de Bertalot et al. (2013)

Base Bertalot	
B [m]	12.18
D_L [m]	2.00
Q [kPa]	77.80
S [cm]	29.40

Tabla 16. Caso base para método de Bray y Macedo (2017)

Base Bray	
LBS	180.62
HL[m]	5.55
CAVdp [cm/s]	1.00
B [m]	12.18
Q [kPa]	77.79
S [cm]	78.80

Tabla 17. Caso base para método de Bullock et al. (2019)

Base Bullock	
CAV [cm/s]	3528.92
B [m]	12.18
q [kPa]	77.79
S [cm]	25.91

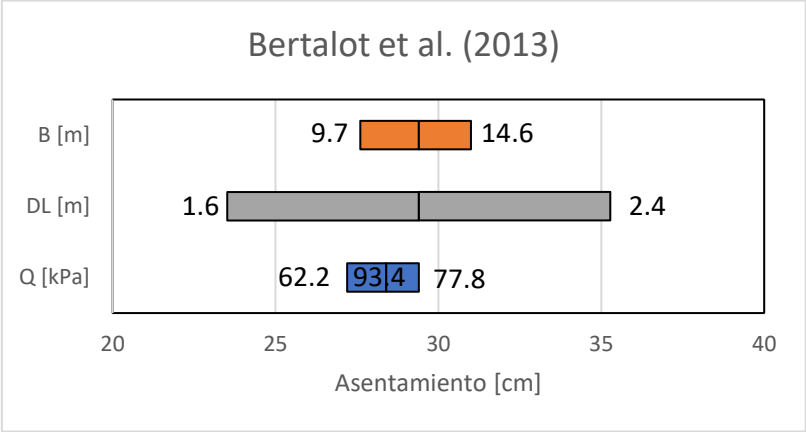

Figura 22. Análisis de sensibilidad Bertalot et al. (2013)

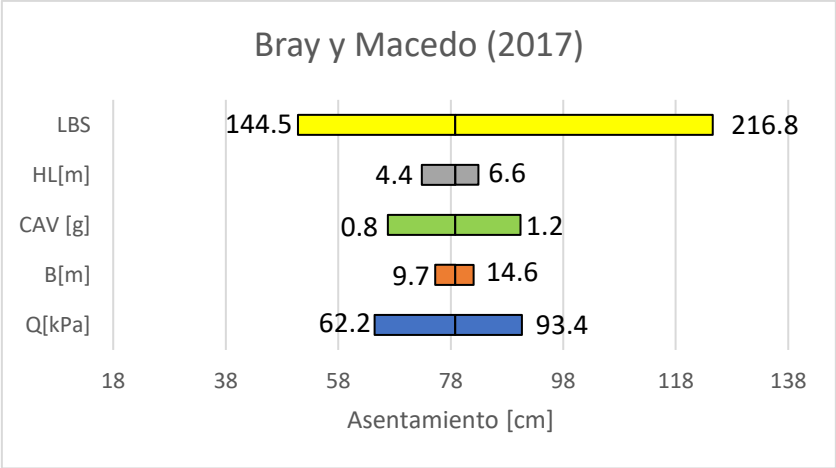

Figura 23. Análisis de sensibilidad Bray y Macedo (2017)

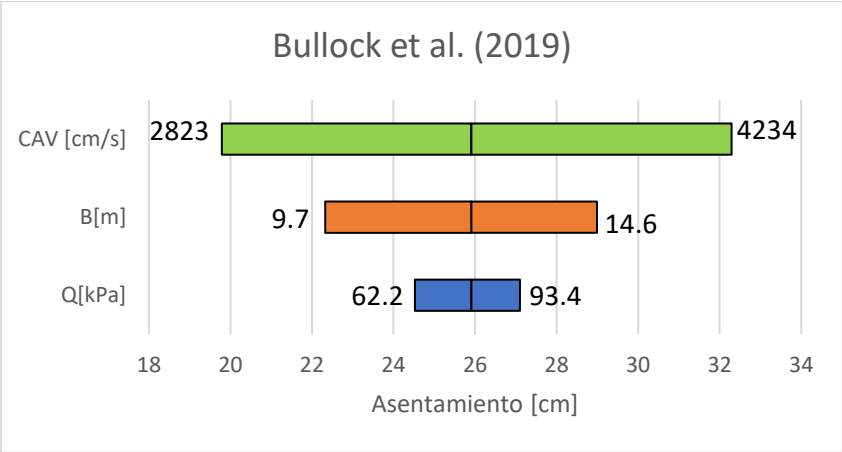

Figura 24. Análisis de sensibilidad Bullock et al. (2019)

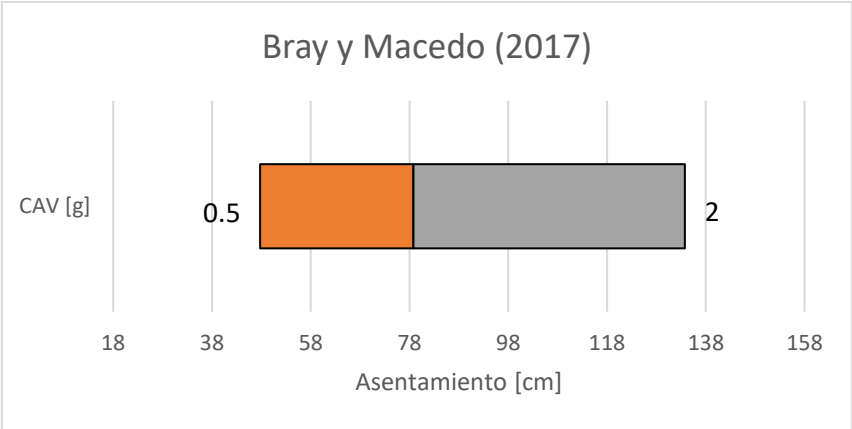

Figura 25. Análisis de sensibilidad, con límites especiales, enfocado en el parámetro CAVdp, para el método de Bray y Macedo (2017)

Para el caso de Bertalot (Figura 22), el análisis es simple, ya que solo tiene 3 parámetros, de estos el que mayor control tiene sobre el cálculo del asentamiento es D_L, espesor de la capa licuable, lo que tiene sentido considerando que este número es directamente proporcional al valor del asentamiento. En cambio, Q y B tienen una relación parabólica, que no genera cambios significativos en la escala de variaciones que se trabajaron.

En lo que respecta a Bray (Figura 23), es evidente que el parámetro que controla el cálculo de asentamiento es el índice LBS, generando variaciones en el valor final de asentamiento de hasta un 60 % superior al caso base. También se aprecia que cuando el cambio en el parámetro es positivo, entonces el efecto en el asentamiento es mayor. El valor de LBS se obtiene a partir de la información de los ensayos SPT y/o CPT, por lo que estos en consecuencia se vuelven relevantes a la hora de obtener resultados. De los demás parámetros se puede decir que B es el que menos influencia tiene y que tanto CAVdp como Q aportan de manera similar.

Finalmente, para el método de Bullock presentado en la Figura 24, se aprecia que el CAV es el parámetro que controla el cálculo de asentamiento, aunque en una menor escala que la apreciada en el método anterior con el LBS. Q es un parámetro de menor relevancia en este método, generando cambios menores al 10% del caso base.

De este análisis de sensibilidad se puede comprobar que el supuesto realizado en la sección 7.1 (implementación método de Bertalot), sobre el valor de Q que se debía usar, es adecuado. En esa sección se optó por asumir el valor promedio, por sobre el máximo, en este análisis se aprecia que el aumento de 20% del valor de Q (llevándolo aproximadamente al valor máximo) genera asentamientos levemente superiores al caso base.

Como se mencionó en la sección 6.2, se realiza un análisis especial que considera la variación de CAVdp, para el método de Bray y Macedo, dentro de los valores mínimos y máximos utilizados en dicha investigación, con la idea de ver el comportamiento que toma el asentamiento en base a la variación de este parámetro. Del análisis se aprecia que el CAVdp es de gran importancia a la hora de estimar asentamientos ya que si se mueve dentro de los valores encontrados en los casos históricos se pueden obtener diferencias de casi 1 m.

7.4 CPT vs SPT

En la sección implementación y obtención de resultados, los tres métodos fueron calculados tanto para los datos de SPT como para los de CPT. Lo anterior va en contra de lo planteado por los autores de los métodos. Bertalot et al. (2013) sugieren que el método se aplique teniendo información de ensayo SPT, y, por el contrario, Bray y Macedo (2017), sugieren que los cálculos de su método se realicen en base a lo obtenido por un ensayo CPT. Como la idea de esta memoria es acercar estos métodos a práctica ingenieril nacional, se realizan los cálculos con ambos ensayos, para dejar claros los efectos que puede significar usar un ensayo u otro. Se considera esta información como relevante, ya que un ensayo es mucho más popular que el otro, siendo el uso del SPT una práctica común en los proyectos de Chile.

Para realizar este análisis, se presenta la Tabla 18,que resume la información entregada por la Tabla 9, Tabla 7 y Tabla 12, entregando los asentamientos de los 3 métodos y utilizando los 2 ensayos.

Tabla 18. Asentamientos obtenidos para los 3 métodos de cálculo simplificado, considerando ensayos SPT Y CPT. Adicionalmente se entrega la diferencia porcentual entre estos resultados.

Asentamiento [cm]	CPT	SPT	dif %
Bertalot et al. (2013)	80.85	29.40	63.64
Bray y Macedo (2017)	78.80	59.81	24.10
Bullock et al. (2019)	25.91	24.27	6.33

Una tendencia que se encuentra al analizar la Tabla 18, es que en todos los métodos el asentamiento fue superior al ser calculado mediante la información del ensayo CPT, aunque la diferencia entre los métodos no fue constante en cuando a porcentaje, ya que se tienen para un método diferencias de 60% y para otro solo 6%.

Para explicar la diferencia entre los métodos, hay que partir por conocer la información que entregan el uno y el otro. Primero que todo, estos dos ensayos no se realizaron de un mismo sondaje, así que es parte de lo esperado que no sean exactamente el mismo suelo, pero siguen estando en un mismo terreno,

por lo que si se considera que son comparables. Por otro lado, si bien la profundidad hasta la que se realizaron los ensayos difiere, por consistencia ambos análisis se realizaron hasta la profundidad de 20 [m]. En cuanto a el valor de los parámetros que se ven afectados por la diferencia entre el SPT Y CPT, D_L (Bertalot) y HL (Bray y Macedo), correspondientes al espesor acumulado de los estratos con FSL<1, se tiene que para el SPT este valor es de 2 [m], en cambio para el CPT dicho valor es 5.5 [m], cercano al triple.

Dicho lo anterior, la tendencia descubierta es consistente con lo comentado en la sección de sensibilidad, ya que Bertalot se ve dominado por el valor de D_L, por lo tanto, si CPT tiene un valor de D_L considerablemente mayor que SPT, es lógico que el asentamiento obtenido sea tan dispar. En cuanto a Bray y Macedo, el parámetro HL no es el que domina, pero sí tiene un efecto sobre el cálculo de asentamiento, por lo que de todas maneras era esperable una diferencia menor que en el caso de Bertalot.

Finalmente, para el caso de Bullock, no se tiene una diferencia significativa, lo que se relaciona con el hecho de que Bullock no tiene entre sus parámetros el espesor de la capa licuable porque no requiere de un análisis previo de licuación. Esto significa que, en base a la información entregada por los ensayos, realiza internamente una interpretación de la potencial licuación. Adicionalmente, se puede concluir que, bajo los criterios de Bullock, lo entregado por el ensayo SPT y CPT, se considera similar.

8 Conclusiones

Luego de haber analizado los resultados obtenidos con los tres métodos, es posible distinguir diferencias claras entre ellos, pero como el caso de estudio es hipotético no se tiene un valor real con el que comparar, por lo que no se puede decidir solo basado en el asentamiento, qué metodología es la que entregó el mejor resultado. Sin embargo, si hay algo de extrema relevancia que notar y eso es que los 3 métodos entregaron asentamientos estimados de más de 25 cm, cuando el análisis convencional de campo libre (Dv en la Tabla 9) es de 8 cm, es decir, de no considerar el efecto que tiene la interacción entre el suelo y la estructura en el asentamiento inducido por licuación, se estaría subestimando este valor, obteniendo resultados poco conservadores.

Si se comparan los resultados, el método más sencillo de implementar (Bertalot et al. 2013) tuvo resultados similares a los de uno de los métodos más complejos de implementar (Bullock et al. 2019), por lo que se transforma en una buena herramienta para estimar asentamientos de manera rápida, y podría ser un buen primer cálculo para hacer una idea preliminar de lo que se podría asentar. Otro punto favorable es que considera el ensayo SPT, como primera opción, y este es el más común de realizar en Chile.

El método de Bray & Macedo (2017) tiene a su favor la incorporación del LBS (Índice de asentamiento en edificio inducido por la licuación), que incluye los efectos del corte producido entre los estratos. Además, si se cuenta con una gran cantidad de información del terreno a estudiar, resulta conveniente poder incluir en las fórmulas dicha información para terminar caracterizando el suelo de forma muy completa. En contra tiene que no está desarrollado para los grandes sismos de subducción de magnitud sobre 8 Mw que ocurren en Chile y tampoco ha sido validado con casos de estudio ocurridos en Chile, a diferencia de los otros dos métodos. Adicionalmente, si no se cuenta con la gran cantidad de información, los inputs del método terminan poniendo trabas en la implementación. Por último, no se plantea una metodología específica para estimar los asentamientos asociados a la eyección de material, por lo que estimar el asentamiento total no puede automatizarse completamente, ya que siempre hay que hacer un análisis y estimación de esta componente del asentamiento.

Finalmente, con respecto al método de Bullock et al. (2019), siendo el método más reciente, resuelve problemas de los métodos anteriores, por ejemplo, incluye en su calibración, bases de datos de casos históricos con asentamiento por eyección de material, logrando así incluirlo implícitamente en su formulación. Siguiendo esa misma idea, no requiere un análisis previo de licuación y entrega la oportunidad de trabajar tanto con un ensayo SPT como CPT. Si bien no se logra comprobar que sea el más efectivo, en cuanto a lo que implementación respecta, es el que más potencial tiene ya que permite

automatizar la mayor parte del procedimiento y un dato no menor es que incluye casos chilenos en sus bases de datos.

Del análisis de sensibilidad se lograron definir los parámetros que controlan cada metodología de cálculo de asentamiento, para Bertalot es D_L, Para Bray y Macedo es LBS, y para Bullock es el CAV, por lo que se invita a tomar precauciones adicionales con estos parámetros para evitar distorsiones en valor de asentamiento esperado.

En cuanto a la posibilidad de intercambiar los ensayos que requiere cada método, del análisis de la sección 8.4, se aprecia que asentamiento asociado al ensayo CPT, es siempre mayor al valor asociado al SPT, pero esto es solo cierto para el caso de estudio, ya que en la práctica puede darse que el ensayo SPT entregue factores de seguridad más altos, invirtiendo esta relación. Lo que debe ser destacado de esta sección es que existe una gran diferencia entre los resultados de los distintos ensayos, llegando hasta un 60% en el método de Bertalot. Finalmente, en lo que respecta a la diferencia entre los ensayos, debido a su mayor precisión y resolución, es más confiable el análisis mediante CPT.

9 Recomendaciones

Como se menciona en secciones anteriores el CAVdp y CAV son una medida de intensidad que se relaciona con la capacidad destructiva que presenta un sismo sobre un terreno en particular. Tanto para el método de Bray & Macedo (2017) como el de Bullock et al. (2019), este parámetro demuestra ser de alta relevancia a la hora de estimar el asentamiento de edificios producto de la licuación. Para poder obtener los parámetros necesarios para el cálculo del CAVdp y CAV, resulta imprescindible realizar un estudio de peligro sísmico específico, que incluya esa información.

Si se analizan las bases de datos de casos históricos a partir de las cuales se calibraron los métodos simplificados, se aprecia que tanto Bertalot et al. (2013), como Bullock et al. (2019), tienen dentro de estas, registros de edificios que sufrieron asentamientos inducidos por licuación en la región del Maule en el 2010, por lo que, si se trabaja en esas zonas, estos métodos pueden cobrar mayor relevancia.

Si se cuenta con poca información del terreno, por ejemplo, no hay estudio de peligro sísmico, entonces el método de Bertalot et al. (2013) debiese ser ocupado, ya que con pocos parámetros, y con el ensayo más común, puede entregar una estimación de asentamiento.

Por el contrario, si se cuenta con mucha información, aplicar Bullock et al. (2019) sería lo ideal, ya que, de los dos métodos que requieren mayor cantidad de información, este fue el más sencillo de implementar, además de haber sido calibrado con registros de Chile y entregar ecuaciones para ser utilizado con ensayos de SPT y CPT.

A nivel de investigación, se recomienda hacer un estudio riguroso de la aplicabilidad del método de Bray & Macedo, en el ambiente sismológico y geotécnico de Chile, comparando sus resultados con la base de datos de casos chilenos que se usó en los otros dos métodos. En esta misma línea, adicionalmente, se recomienda trabajar en la formulación de ecuaciones predictivas para el parámetro CAVdp en suelo, para el ambiente tectónico de subducción, ya que, en el desarrollo de esta memoria se comprobó que no hay de estas ecuaciones disponibles para Chile, lo que termina siendo un impedimento para poder utilizar este método con mayor confianza.

Lo importante es tener en cuenta que estos métodos no son utilizados en la práctica, por lo que usar cualquiera de ellos, ya entregaría una visión más amplia del problema ingenieril que representan los asentamientos en estructuras inducidos por licuación.

Estos métodos se deben usar siempre con criterio ingenieril, respetando las limitaciones que tienen los modelos. Estos métodos no se indefinen al salir de los rangos recomendados, pero lo que sí sucede es que pierden representatividad con respecto al comportamiento real. Por lo que resulta irresponsable guiarse por los resultados entregados por algunos de estos métodos, si es que el caso estudiado no cumple con las condiciones mínimas de aplicabilidad.

Se debe tener en cuenta que siguen siendo solo unos métodos simplificados, por lo que ante proyectos de mayor complejidad es necesario un análisis computacional más detallado.

10 Referencias

Ashford, S. a, Boulanger, R. W., Donahue, J. L., & Stewart, J. P. (2011). Geotechnical Quick Report on the Kanto Plain Region during the March 11, 2011, Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance*, *GEER-025a*(April), 1–20.

Bertalot, D., Brennan, A. J., & Villalobos, F. A. (2013). Influence of bearing pressure on liquefaction-induced settlement of shallow foundations. *Geotechnique*, *63*(5), 391–399.

Boulanger, RW and Idriss, I. M. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes: Vol.* (Issue).

Boulanger, RW and Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures. *Center for Geotechnical Modeling*, *10–02*, 134.

Bray, J. D., & Macedo, J. (2017). 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *102*(July), 215–231.

Bray, J., Rollins, K., Hutchinson, T., Verdugo, R., Ledezma, C., Mylonakis, G., Assimaki, D., Montalva, G., Arduino, P., Olson, S. M., Kayen, R., Hashash, Y. M. A., & Candia, G. (2012). Effects of ground failure on buildings, ports, and industrial facilities. *Earthquake Spectra*, *28*(SUPPL.1), 97–118.

Bullock, Z., Karimi, Z., Dashti, S., Porter, K., Liel, A. B., & Franke, K. W. (2019). A physics-informed semi-empirical probabilistic model for the settlement of shallow-founded structures on liquefiable ground. *Geotechnique*, *69*(5), 406–419.

Bullock, Zach, Dashti, S., Liel, A., Porter, K., Karimi, Z., & Bradley, B. (2017). Ground-motion prediction equations for arias intensity, cumulative absolute velocity, and peak incremental ground velocity for rock sites in different tectonic environments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *107*(5), 2293–2309.

Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2019). Ground motion models for the horizontal components of arias intensity (AI) and cumulative absolute velocity (CAV) using the NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, *35*(3), 1289–1310.

Cubrinovski, M. (2013). *Scholars ' Mine Liquefaction-Induced Damage in The2010-2011 Christchurch (New Zealand) Earthquakes*. *May*, 0–11.

ERDIK, M. (2001). *Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes*. 149–186. https://doi.org/10.1142/9789812811707_0018

González, J. (2015). *ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LICUEFACCIÓN EN CHILE PARA EL TERREMOTO DEL MAULE, 2010*.

Hutabarat, D., & Bray, J. D. (2019). Effective stress analysis of liquefiable site in christchurch to discern the characteristics of sediment ejecta. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019*, *June*, 2923–2931.

Karimi, Z., & Dashti, S. (2016). Numerical and Centrifuge Modeling of Seismic Soil–Foundation–Structure Interaction on Liquefiable Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *142*(1), 04015061.

Liu, L., & Dobry, R. (1997). Seismic Response of Shallow Foundation on Liquefiable Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *123*(6), 557–567.

Macedo, J. L. (2017). Simplified Procedures for Estimating Earthquake-Induced Displacements. In *Simplified Procedures for Estimating Earthquake-Induced Displacements (Doctoral dissertation, UC Berkeley)* (Vol. 53, Issue 9).

Moss, R. E., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & 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.

Natalia Guerrero Castro. (2020). *Análisis comparativo de metodologías de evaluación de la licuación de suelos y recomendaciones para su aplicación en Chile, para las mediciones in situ SPT, CPT y Vs.*

Verdugo, R., & González, J. (2015). Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *79*, 280–295.

Verdugo, R., Villalobos, F., Yasuda, S., Konagai, K., Sugano, T., Okamura, M., Tobita, T., & Torres, A. (2010). Description and analysis of geotechnical aspects associated to the 2010 Chile earthquake Descripción y análisis de aspectos geotécnicos asociados al terremoto de Chile del 2010. *Obras y Proyectos*, *8*, 27–33.

Youd, B. T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Jr, L. F. H., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Iii, W. F. M., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., … Ii, K. H. S. (2001). L Iquefaction R Esistance of S Oils : S Ummary R Eport From the 1996 Nceer and 1998 Nceer / Nsf W Orkshops on E Valuation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *127*(10), 817–833.