



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**Aporte para una microzonificación geotécnica de la  
ciudad de Valparaíso:  
Potencial de licuefacción debido a solicitaciones  
sísmicas.**

Memoria de Título presentada por

**Gabriel Eduardo Zamora Tobar**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba

Julio de 2023



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**Aporte para una microzonificación geotécnica de la ciudad de Valparaíso:  
Potencial de licuefacción debido a solicitaciones sísmicas.**

AUTOR:

**Gabriel Eduardo Zamora Tobar**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. Guía

Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba

Nombre Miembro 1 Comisión

.....

Nombre Miembro 2 Comisión

.....

Valparaíso, Chile, Julio de 2023

# **APORTE PARA UNA MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE VALPARAÍSO: POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN DEBIDO A SOLICITACIONES SÍSMICAS.**

Gabriel Eduardo Zamora Tobar, Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba.

Universidad Técnica Federico Santa María

## **Resumen**

El presente documento analiza el potencial de licuefacción en la ciudad de Valparaíso debido a solicitaciones sísmicas con el fin de realizar una microzonificación de la zona de estudio para prevenir posibles desastres en futuras construcciones, dado el historial sísmico de la ciudad.

A lo largo de su historia, la ciudad de Valparaíso ha experimentado numerosos terremotos y ha sufrido daños significativos en su infraestructura. Se han realizado estudios para identificar los tipos de suelos presentes en la ciudad, encontrando gran variedad de suelos a lo largo del plan. En base a esto, se ha propuesto una zonificación basada en las frecuencias predominantes de los suelos (Baquedano et al., 2012).

La licuefacción de suelos es un proceso en el cual el suelo pierde rigidez y resistencia debido a cargas sísmicas, generando deformaciones. Se distinguen dos fenómenos principales: la licuefacción de flujo y la movilidad cíclica; los cuales pueden causar daños importantes en estructuras.

Se han desarrollado distintas metodologías para estimar el potencial de licuefacción de los suelos, siendo el método simplificado propuesto por Seed & Idriss (1971) el más utilizado a nivel internacional. Sin embargo, se han señalado limitaciones en la estimación del potencial de licuefacción en la superficie, por lo que se autores como Iwasaki et al. (1978) o Sonmez (2003) proponen el uso del índice de potencial de licuefacción (LPI) para crear mapas de zonas de riesgo.

**Palabras Claves:** Zonificación, licuefacción, potencial de licuefacción.

# ÍNDICE

1	Introducción .....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo General .....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	3
1.3	Alcance del estudio .....	3
2	Antecedentes .....	4
2.1	Estudios de zonificación en Valparaíso .....	4
2.1.1	Grimme & Álvarez (1964) .....	4
2.1.2	Gana et al. (1996) .....	4
2.1.3	Baquedano et al. (2012) .....	5
2.1.4	Castañeda & González (2013) .....	5
2.2	Historial sísmico.....	6
2.3	Metodología .....	6
2.3.1	Ensayo SPT.....	2
2.3.2	Correlación DR% y $N_{SPT}$ .....	5
2.4	Ensayos.....	6
3	Licuefacción.....	7
3.1	Descripción .....	7
3.2	Fenómenos asociados a la licuefacción.....	7
3.2.1	Licuefacción de flujo.....	7
3.2.2	Movilidad cíclica .....	7
3.2.3	Degradación de rigidez cíclica .....	8
3.3	Potencial de licuefacción.....	8
3.4	Método simplificado .....	8
3.4.1	Tensiones cíclicas de los sismos (CSR).....	8
3.4.2	Comportamiento suelos de granos finos .....	8
3.4.3	Tensiones cíclicas de los suelos (CRR) - Suelos con comportamiento de arenas.....	9
3.4.4	Tensiones cíclicas de los suelos (CRR) - Suelos con comportamiento de arcillas.....	10
3.5	Factor de seguridad (FS).....	11
3.6	Probabilidad de licuar (PL).....	12
3.7	Índice de potencial de licuefacción (LPI) .....	12
4	Análisis y Resultados .....	15
4.1	Condiciones de licuefacción .....	15
4.2	Pesos específicos .....	15
4.3	Magnitud y aceleración máxima .....	16

4.4	Índice de potencial de licuefacción (LPI) .....	16
4.5	Potencial de licuefacción según DR% .....	18
5	Conclusiones y Recomendaciones .....	19
6	Referencias .....	20
	ANEXO A .....	23
	ANEXO B .....	25

## Índice de figuras

Figura 1:	Bosquejo geológico de Valparaíso y Viña del Mar (Grimme & Álvarez, 1964). .....	4
Figura 2:	Extracto mapa geológico de Valparaíso (Gana et al., 1996).....	4
Figura 3:	Zonificación sísmica en base a frecuencias predominantes (Baquedano et al., 2012).....	5
Figura 4:	Microzonificación sísmica según intensidad base (Castañeda & González, 2013). .....	6
Figura 5:	Metodología del estudio. ....	2
Figura 6:	Falla de flujo (a) y Movilidad cíclica (b) (Yoshimine & Ishihara, 1998).....	7
Figura 7:	Esquema de transición del comportamiento de arena a arcilla para suelos de grano fino según PI (Boulanger & Idriss, 2008). .....	9
Figura 8:	Relaciones MSF para suelos con comportamiento de arcillas y arenas (Boulanger & Idriss, 2014).....	11
Figura 9:	Gráfico comparativo PL v/s FS.....	12
Figura 10:	Planilla de cálculo, análisis SPT.....	23
Figura 11:	Planilla de cálculo, potencial de licuefacción. ....	24

## Índice de tablas

Tabla 1:	Valores de CE según tipo de martillo (Figueroa & Orostegui, 2014). .....	3
Tabla 2:	Valores de CR según largo total de las barras, martinete manual (INN, 2014). .....	3
Tabla 3:	Valores de CR según largo total de las barras, martinete automático (INN, 2014). .....	4
Tabla 4:	Valores de CS según tipo de recubrimiento (INN, 2014).....	4
Tabla 5:	Valores de CB según diámetro de perforación (INN, 2014).....	4
Tabla 6:	Expresiones para CN según distintos autores. ....	5
Tabla 7:	Clasificación de Terzaghi et al. (1948) modificada por Skempton (1986). .....	5
Tabla 8:	Ensayos a disposición para el estudio. ....	6
Tabla 9:	Clasificación según PL (Chen & Juang, 2000). .....	12
Tabla 10:	Categorías de Potencial de Licuefacción según LPI (Iwasaki et al., 1981). .....	13
Tabla 11:	Categorías de Potencial de Licuefacción según LPI (Luna & Frost, 1998). .....	13
Tabla 12:	Categorías de Potencial de Licuefacción según LPI (Sonmez, 2003) . .....	14

Tabla 13: Condiciones de licuefacción según parámetros. ....	15
Tabla 14: Pesos específicos naturales y saturados según clasificación USCS (Coduto et al., 2016). ....	15
Tabla 15: Valores de $M_w$ y $a_{max}$ durante el 27F (JST-JICA SATREPS Perú Project, 2010).....	16
Tabla 16: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.8$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	17
Tabla 17: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 6.0$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	25
Tabla 18: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 6.5$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	26
Tabla 19: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 7.0$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	27
Tabla 20: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 7.5$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	28
Tabla 21: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.0$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	29
Tabla 22: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.5$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	30
Tabla 23: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 9.0$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	31
Tabla 24: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 9.5$ y $a_{max} = 0.3g$ . ....	32
Tabla 25: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 6.0$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	33
Tabla 26: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 6.5$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	34
Tabla 27: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 7.0$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	35
Tabla 28: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 7.5$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	36
Tabla 29: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.0$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	37
Tabla 30: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.5$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	38
Tabla 31: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 9.0$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	39
Tabla 32: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 9.5$ y $a_{max} = 0.4g$ . ....	40
Tabla 33: Valores LPI y categorización de ensayos para $M_w = 8.8$ y $a_{max} = 0.27g$ . ....	41

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

La ciudad de Valparaíso ha estado sometida a grandes movimientos sísmicos a lo largo de su historia, como fueron los terremotos de Santiago en 1647, Valparaíso en 1730, Valparaíso en 1822, Valparaíso en 1906 y Algarrobo en 1985 (Lomnitz, 2004). También se ha visto afectada por sismos de gran magnitud en la zona centro sur del país, como el terremoto de Valdivia en 1960 y más recientemente, el terremoto del Maule el 27 de Febrero de 2010 (27F), los que han sido provocados principalmente por la subducción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca (sismos interplaca).

Casos como el del terremoto de 1985 (Astroza & Monge, 1989) o el del terremoto del 2010 (González, 2015) evidenciaron grandes daños a infraestructura, tanto como en construcciones menores (adobe, tabiquería y albañilería), como en obras portuarias. Para el caso del terremoto de 1985, se evidenciaron grandes desplazamientos horizontales en el sector del sitio 5 de la zona portuaria de Valparaíso, los cuales alcanzaron hasta los 40 cm aguas adentro en dirección del mar (Troncoso, 1992). Estos daños fueron causados debido a que los interiores del muro estaban conformados principalmente por relleno de arena y grava débilmente compactados, los cuales experimentaron una disminución en la resistencia al corte y provocaron un aumento en los empujes sísmicos, provocando la falla.

En base al mapa geológico elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Gana et al., 1996), los estudios realizados en la ciudad para poder identificar el tipo de suelo y proponer una zonificación geotécnica. En base a esto, Baquedano et al. (2012) realizaron una propuesta de zonificación tomando en consideración las frecuencias predominantes medidas con instrumentos de 3 componentes GVB de 4.5 Hz. De esta manera, se observa que la ciudad de Valparaíso está constituida principalmente por 2 tipos de suelos predominantes, uno compuesto por suelos duros que no contrastan con el basamento rocoso de roca intrusiva del Jurásico y rocas sobre regolitos tipo maicillo formado por meteorización, el cual se encuentra principalmente en el sector oriente y en el sector del Cerro Alegre y cerros aledaños a este; mientras que el segundo tipo de suelo principal corresponde a depósitos litorales y eólicos actuales, los cuales se encuentran en el sector del barrio El Almendral y la zona portuaria. Entre estos dos tipos de suelos, existe una zona de transición en la composición del suelo. De esta manera, Baquedano et al. (2012) propone una zonificación basada en 4 zonas principales, la Zona I predominada por frecuencias por sobre los 6.5 Hz, ubicada en los cerros de la ciudad; la Zona II predominada por frecuencias entre 4.0 y 6.5 Hz, compuesta por rocas intrusivas meteorizadas inmersas en la Zona I; la Zona III predominada por frecuencias entre los 2.4 y 4.0 Hz, correspondiente a la zona de transición entre sedimentos blandos y la zona rocosa; mientras que la Zona IV se encuentra predominada por frecuencias menores a los 2.4 Hz, compuesta por sedimentos sueltos o poco compactados y ubicado en las zonas del Valle de Valparaíso.

Continuando esta investigación, Castañeda & González (2013) proponen una actualización de la zonificación de la ciudad de Valparaíso en base a las intensidades en escala MSK, la cual presenta amplificaciones y rangos de intensidades dependientes del tipo de suelo, observando de manera más eficiente los efectos de sitio ocurridos en la ciudad. De esta manera, se observa que la propuesta de zonificación coincide con la propuesta anterior, observando que el sector del plan de Valparaíso, principalmente el barrio El Almendral, y la zona portuaria presentan una amplificación en la respuesta sísmica.

La licuefacción de suelos es un proceso en el cual existe una deformación del suelo como resultado de la aplicación de cargas monotónicas o cíclicas, como lo son los sismos, provocando una pérdida de rigidez y resistencia producto del aumento de la presión intersticial (presión de poros), disminuyendo la presión de confinamiento efectiva del suelo bajo cargas no drenadas y provocando deformaciones superficiales en los suelos. Este fenómeno afecta principalmente a arenas finas, poco densas, mal

graduadas o no confinadas. Dentro de la licuefacción, existen dos fenómenos característicos en los cuales se pueden clasificar las situaciones observadas, las cuales son la licuefacción de flujo y la movilidad cíclica.

La licuefacción de flujo ocurre cuando el esfuerzo de corte estático es mayor a la resistencia de corte del suelo en estado licuado, lo cual es producido por cargas cíclicas o por cambios repentinos en la condición de cargas. Una vez esto sucede, la resistencia del suelo no es capaz de soportar las tensiones estáticas y producen grandes y rápidos flujos de masa, provocando un alto nivel de daños en estructuras aledañas. Este fenómeno ocurre principalmente en terrenos con pendientes o en fundaciones de estructuras.

Por otra parte, la movilidad cíclica ocurre debido a cargas cíclicas, en donde el esfuerzo de corte estático es menor a la resistencia de corte del suelo en estado licuado. Su ocurrencia se ha visto principalmente en terrenos llanos o cercanos a cuerpos de agua compuestos principalmente por arenas con comportamientos no drenados, con un nivel freático alto, provocando que exista un aumento en la presión de poros y que el agua fluya hacia la superficie del terreno, mientras el suelo se consolida en la parte inferior. Al momento del afloramiento del agua en superficie, se genera una especie de volcanes de arena por donde escurre el agua. Este fenómeno es más común que la licuefacción de flujo y genera principalmente asentamientos verticales.

Existe un fenómeno similar a la licuefacción conocido como degradación de rigidez cíclica o ablandamiento cíclico, definido por Boulanger & Idriss (2004), el cual se presenta en suelos cohesivos no drenados (limos y limo arcillosos), provocando pérdida de resistencia y deformaciones.

A lo largo de los últimos años, se han presentado distintas metodologías para estimar el potencial de licuefacción de un depósito de suelos, siendo el método simplificado propuesto por Seed & Idriss (1971) y modificado años después por Boulanger & Idriss (2014) el método más utilizado a nivel internacional, en donde el potencial de licuefacción se mide en relación a la comparación de las tensiones cíclicas de los suelos (CRR) y de los sismos (CSR). Las tensiones provenientes de los sismos se relacionan a la demanda aplicada al depósito de suelo, mientras que las tensiones provenientes de los suelos se relacionan a la capacidad que tiene dicho depósito de soportar la demanda. De esta manera, se calcula el factor de seguridad (FS), el cual es la razón entre la capacidad del depósito (CRR) y la demanda de los sismos (CSR).

A pesar de que el método simplificado es el más aplicado en el rubro de la ingeniería geotécnica, autores como Iwasaki et al. (1978) han encontrado falencias en el método, principalmente lo asociado a la estimación del potencial de licuefacción en superficie, debido a que el método simplificado permite obtener un factor de seguridad (FS) en función de la profundidad. Es por esta razón que Iwasaki et al. (1978) propone el índice de potencial de licuefacción (LPI), el cual es utilizado para la creación de mapas con zonas de riesgo de licuefacción debido a que sus resultados reflejan los efectos de los sismos.

Como indica en su libro titulado “La catástrofe del 16 de agosto de 1906 en la República de Chile.”, Rodríguez & Gajardo (1906) mencionan lo siguiente: “...En el terremoto de que nos ocupamos la tierra se abrió en varias partes formando grandes y profundas grietas. Una de éstas, aunque no de muy grandes proporciones, se formó en el sitio eriazo que queda en el comienzo de la Avenida del Brasil. en el terreno destinado para la erección del templo de Nuestra Señora del Carmen. La instantánea que insertamos ha sorprendido á un caballero cuya curiosidad lo llevó hasta ese sitio para cerciorarse del hecho...”. Este relato sumado a los antecedentes anteriormente mencionados, indican que en la ciudad de Valparaíso existe la posibilidad de presentar fenómenos de licuefacción debido a cargas sísmicas de gran magnitud, por lo que el presente documento busca estimar el potencial de licuefacción para los distintos tipos de suelos aplicando las metodologías mencionadas con el fin de crear un aporte en la zonificación geotécnica de la ciudad de Valparaíso, y así evitar posibles desastres en obras futuras.



## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Crear aporte para una microzonificación geotécnica de la ciudad de Valparaíso mediante mapas de licuefacción elaborados mediante el análisis del potencial de licuefacción con datos geotécnicos provenientes de ensayos realizados en la ciudad.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar los ensayos geotécnicos a disposición y estimar la susceptibilidad de los suelos con el fin de identificar los suelos con una mayor probabilidad de presentar la licuefacción.
- Calcular la resistencia cíclica del suelo (CRR) para determinar las tensiones que puede soportar.
- Calcular las tensiones cíclicas de los sismos (CSR) para distintas magnitudes propuestas.
- Comparar las tensiones cíclicas de los suelos y de los sismos e identificar zonas donde se puede presentar el fenómeno de licuefacción.
- Estimar el potencial de licuefacción de los suelos analizados para distintas magnitudes de sismos y categorizar dichos resultados en función de la ubicación y la profundidad mediante mapas de licuefacción.
- Comparar mapas de licuefacción para distintas magnitudes y analizar los resultados.

## **1.3 Alcance del estudio**

El estudio pretende aportar con una microzonificación de la ciudad de Valparaíso, tomando como datos de entrada los ensayos de mecánica de suelos puestos a disposición por el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) y de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV).

## 2 Antecedentes

### 2.1 Estudios de zonificación en Valparaíso

#### 2.1.1 Grimme & Álvarez (1964)

En el año 1964, los autores Kurt Grimme y Leonardo Álvarez confeccionan una carta del suelo de fundación de las zonas urbanizadas de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar luego de que el Prof. Dr. Walter Schott viniera a Chile proveniente de Alemania con el fin de estudiar los efectos del terremoto de 1960. Grimme & Álvarez (1964) mencionan lo siguiente: *"...La zona urbana de Valparaíso está constituida sobre una antigua playa cubierta por relleno artificial y se ha extendido considerablemente hacia las quebradas y terrazas adyacentes..."*. De este estudio, se realiza un bosquejo de los suelos de las ciudades de estudio (Figura 1).

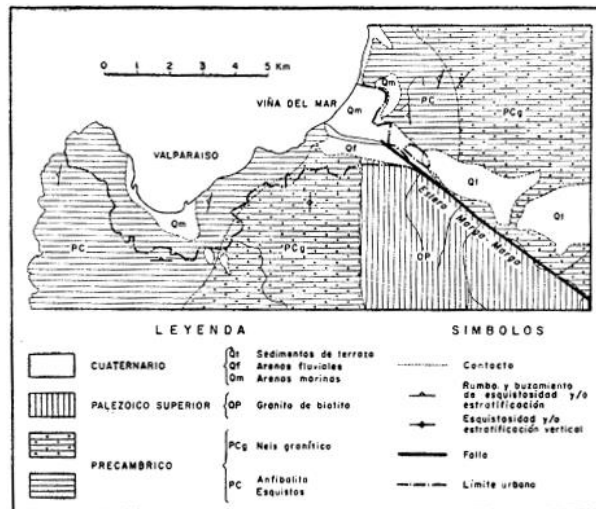


Figura 1: Bosquejo geológico de Valparaíso y Viña del Mar (Grimme & Álvarez, 1964).

#### 2.1.2 Gana et al. (1996)

Posteriormente, Gana et al. (1996) en el año 1996 presentó una nueva caracterización geológica para el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en el documento titulado "Mapa geológico del área de Valparaíso - Curacaví, Regiones de Valparaíso y Metropolitana" en base al estudio realizado por Grimme & Álvarez (1964), donde se observa en mayor detalle las principales unidades geológicas presentes en la ciudad de Valparaíso (Figura 2), como el complejo metamórfico Valparaíso (Pzmv), presente en el sector de Caleta Las Docas; la roca intrusiva Laguna Verde (Jlv), presente en los cerros de la ciudad; y depósitos litorales y eólicos actuales (Qe), presente en el sector del plan de Valparaíso.

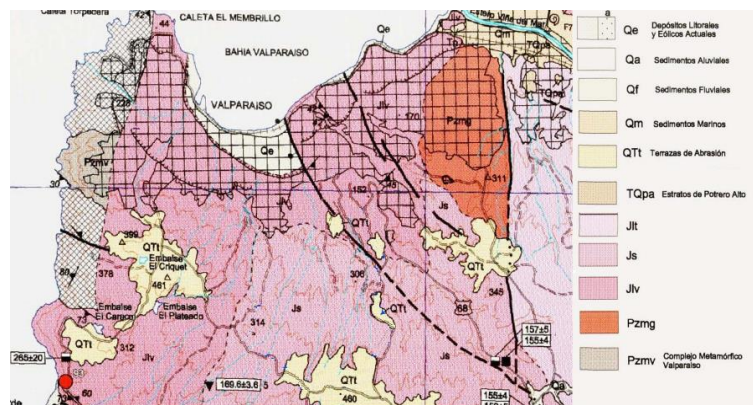


Figura 2: Extracto mapa geológico de Valparaíso (Gana et al., 1996).

### 2.1.3 Baquedano et al. (2012)

Años después, Baquedano et al. (2012) toma como base los estudios previos en la ciudad y en base al estudio de las frecuencias predominantes, realizadas mediante el uso de un instrumento de 3 componentes GVB de 4.5 Hz, realizan una propuesta de zonificación sísmica de la ciudad de Valparaíso (Figura 3).

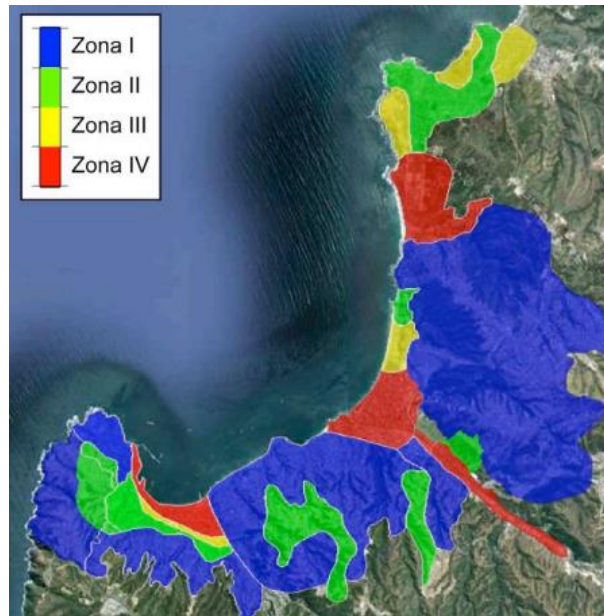


Figura 3: Zonificación sísmica en base a frecuencias predominantes (Baquedano et al., 2012).

Esta zonificación presenta 4 zonas en las que se espera un comportamiento sísmico característico, en consideración de la geología y las frecuencias predominantes. Las zonas propuestas son las siguientes:

- **Zona I:** Definida por frecuencias predominantes muy altas sobre los 6,5 Hz y curvas planas, ubicados sobre las unidades de rocas intrusivas.
- **Zona II:** Se encuentra sobre sectores de rocas intrusivas meteorizadas, inmersos en sectores de Zona I, con formación de regolito, además en sectores donde es necesario diferenciar de la zona III debido a que se encuentra sobre depósitos de suelos blandos. El rango de frecuencias predominantes que concentra esta zona fluctúan entre los 4,0 y 6,5 Hz.
- **Zona III:** Corresponde a los sectores que se encuentran ubicados sobre sedimentos blandos pero con frecuencias predominantes que fluctúan entre los 2,4 y 4,0 Hz. En el sector de Valparaíso, corresponde al sector de transición entre sedimentos blandos y la zona rocosa.
- **Zona IV:** Es la zona en donde se presentan las menores frecuencias predominantes (inferiores a los 2,4 Hz) y que se ubican sobre sedimentos sueltos o poco compactados. Estas zonas están presentes en el Valle de Valparaíso.

### 2.1.4 Castañeda & González (2013)

Al año siguiente, Castañeda & González (2013) realiza una propuesta de microzonificación en base a intensidades en escala MSK, tomando datos basados en los daños presentados en las viviendas en la ciudad luego del terremoto del 2010, como también mediciones en terreno de las propiedades dinámicas provenientes de micro vibraciones y velocidad de onda de corte; y recopilaciones de información geológica, geomorfológica y estudios de amplificación sísmica. En base a lo anterior, los autores proponen una microzonificación sísmica (Figura 4) basada en una intensidad base en escala MSK para reflejar fenómenos como los efectos de sitio.



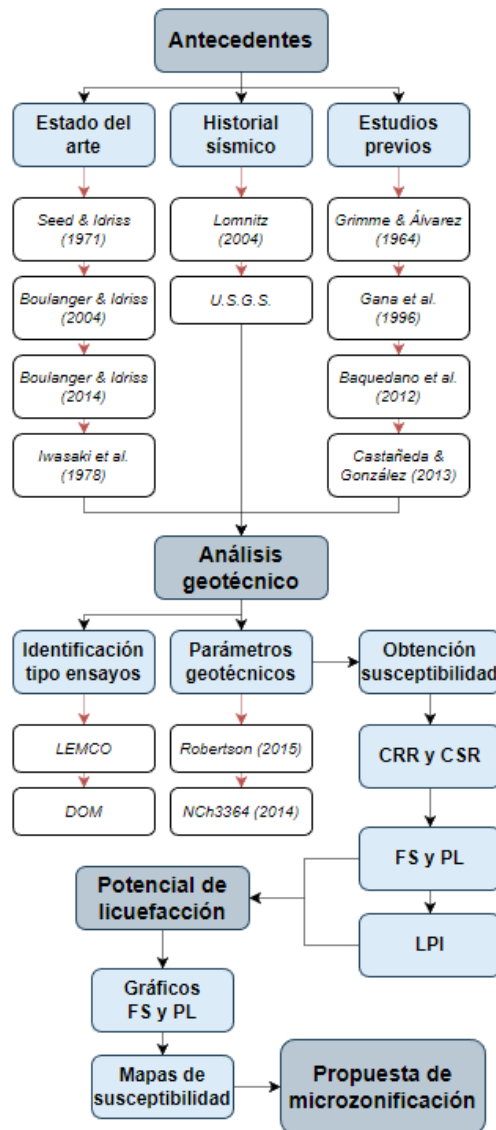


Figura 5: Metodología del estudio.

### 2.3.1 Ensayo SPT

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es uno de los ensayos más utilizados debido a la rapidez de su implementación, como también su sencillez y bajo costo económico en comparación a otros ensayos.

El ensayo SPT consiste básicamente en golpear mediante un martillo de acero de  $63.5 \pm 0.5$  [kgf] sobre una barra de perforación a una altura de 0.76 [m] con el fin de medir el número de golpes necesarios para penetrar una profundidad de 0.45 [m] del suelo, dividida en tres tramos de 0.15 [m], en donde además, se pueden obtener muestras del suelo mediante una cuchara hueca.

A nivel nacional, la normativa vigente para ensayos SPT corresponde a la NCh3364 (INN, 2014), donde se detalla de mejor manera el paso a paso y lo necesario para llevar a cabo el ensayo y así obtener el número de golpes ( $N_i$ ) para cada tramo.

Una medición puede ser rechazada bajo 3 condiciones:

- Aplicar un total de 50 golpes en uno de los tramos de 0.15 [m].
- Aplicar un total de 100 golpes en los tres tramos consecutivos (0.45 [m]).
- Aplicar un total de 10 golpes y no observar un avance del muestreador.

De esta manera, se obtiene el número de golpes normalizado ( $(N_1)_{60}$ ) mediante la ecuación (1).

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_E \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_N \quad (1)$$

Donde:

- $N_m$  Índice de penetración registrado en terreno.
- $C_E$  Factor de corrección para llevar al 60% de la energía teórica del ensayo.
- $C_R$  Factor de corrección por largo de barras.
- $C_S$  Factor de corrección para cucharas con o sin liner.
- $C_B$  Factor de corrección por diámetro del sondaje.
- $C_N$  Factor de normalización a presión confinante de 1 [kgf/cm<sup>2</sup>].

El factor de corrección por energía ( $C_E$ ) depende de la razón de energía transmitida con respecto a la teórica ( $ERi$  o  $ETR$ ) y se calcula según la ecuación (2).

$$C_E = \frac{ERi}{60} \quad (2)$$

El valor de este factor depende del tipo de martillo utilizado, como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1: Valores de  $C_E$  según tipo de martillo (Figueroa & Orostegui, 2014).**

Tipo de Martillo	$ERi$	$C_E$
Tipo Donut	30 a 60	0.5 a 1.0
Safety	40 a 70	0.7 a 1.2
Automático	50 a 80	0.8 a 1.3

El factor de corrección por largo de barras ( $C_R$ ) depende del largo total de las barras utilizadas en la medición y según tipo de martinete y se obtiene según la Tabla 2 o la Tabla 3.

**Tabla 2: Valores de  $C_R$  según largo total de las barras, martinete manual (INN, 2014).**

Largo Total (L) en [m]	$C_R$
≤ 3	0.75
150	1.00

**Tabla 3: Valores de  $C_R$  según largo total de las barras, martinete automático (INN, 2014).**

Largo Total (L) en [m]	$C_R$
$\leq 3$	0.75
$3 < L \leq 4$	0.80
$4 < L \leq 6$	0.85
$6 < L \leq 10$	0.95
$10 < L \leq 30$	1.00

El factor de corrección ( $C_S$ ) depende si la cuchara tiene o no un recubrimiento, como lo puede ser una camisa o tubería protectora. El valor de este factor se obtiene de la Tabla 4.

**Tabla 4: Valores de  $C_S$  según tipo de recubrimiento (INN, 2014).**

Cuchara estándar	$C_S$
Con liner	1.0
Sin liner	1.1 - 1.3

El factor de corrección ( $C_B$ ) depende del diámetro de la perforación del ensayo. El valor de este factor se obtiene de la Tabla 5.

**Tabla 5: Valores de  $C_B$  según diámetro de perforación (INN, 2014).**

Diámetro de perforación [mm]	$C_B$
65 a 115	1.00
150	1.05
200	1.15

El factor de normalización ( $C_N$ ) depende principalmente de los esfuerzos efectivos ( $\sigma'_v$ ) y un exponente ( $n$ ) que depende del material, el cual se calcula mediante la ecuación (3).

$$C_N = \left( \frac{P_{atm}}{\sigma'_v} \right)^n \quad (3)$$

En la literatura existen distintos valores para exponente  $n$  dependiendo del tipo de suelo, tomando rangos entre los 0.45 a 0.6 en arenas limpias, 0.6 a 0.7 para arenas con finos, usualmente utilizando el valor de 0.5 en la práctica (INN, 2014).

En relación el factor  $C_N$ , distintos autores han propuesto expresiones para su cálculo durante los años, tal como se observa en la Tabla 6, en donde según los autores, se limita superiormente a 1.7.

**Tabla 6: Expresiones para  $C_N$  según distintos autores.**

Peck et al. (1974)	Seed et al. (1975)	Seed & Idriss (1982)	Liao & Whitman (1986)
$C_N = 0.77 \cdot \log\left(\frac{20 \cdot P_{atm}}{\sigma'_v}\right)$	$C_N = 1 - 1.25 \cdot \log\left(\frac{\sigma'_v}{P_{atm}}\right)$	$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma'_v}{P_{atm}}}$	$C_N = \sqrt{\frac{P_{atm}}{\sigma'_v}}$

Sin embargo, para realizar el análisis del potencial de licuefacción, es necesario utilizar la expresión propuesta por Boulanger & Idriss (2010) con el fin de considerar el porcentaje de finos, corrigiendo el término  $(N_1)_{60}$  según la ecuación (4), obteniendo de esta manera el factor  $(N_1)_{60CS}$ , siendo éste el número de golpes normalizado y corregido por contenido de finos.

$$C_N = \left(\frac{P_{atm}}{\sigma'_v}\right)^{0.784 - 0.0768 \cdot \sqrt{(N_1)_{60CS}}} \leq 1.7 \quad (4)$$

Debido a que esta nueva expresión para  $C_N$  depende directamente de  $(N_1)_{60CS}$ , es necesario realizar un proceso iterativo hasta encontrar el valor final. Además, esta expresión solo es válida para valores de  $(N_1)_{60CS} \leq 64$ .

### 2.3.2 Correlación DR% y $N_{SPT}$

La primera correlación existente entre el  $N_{SPT}$  y la densidad relativa fue propuesta por Terzaghi et al. (1948), la cual relacionaba de manera directa los valores de  $N_{60}$  y DR%.

Posteriormente, Gibbs & Holtz (1957) postularon que la densidad relativa no solo depende del  $N_{60}$ , sino que también depende de  $\sigma'_v$ , por lo que proponen un ábaco que relaciona estos parámetros.

En base a dicho ábaco, Meyerhof (1957) realiza un ajuste y lo expresa según la ecuación (8).

$$DR\% = \sqrt{\frac{N_{60}}{23 \cdot \sigma'_v + 16}} \quad (5)$$

Años después, luego de distintas investigaciones, Skempton (1986) resume dichas investigaciones y propone una expresión para el cálculo DR% según la ecuación (6), en base al  $(N1)_{60}$  y parámetros  $a$  y  $b$ , los que dependen de los límites de  $\sigma'_v$ .

$$DR\% = \sqrt{\frac{(N1)_{60}}{a \cdot \sigma'_v + b}} \quad (6)$$

En base a esto, se presenta la Tabla 7 la cual presenta la compacidad del suelo según su  $(N1)_{60}$  y DR%.

**Tabla 7: Clasificación de Terzaghi et al. (1948) modificada por Skempton (1986).**

$(N1)_{60}$	DR%	Compacidad
0 - 3	0 - 15	Muy suelta
3 - 8	15 - 35	Suelta
8 - 25	35 - 65	Medianamente densa
25 - 42	65 - 85	Densa
42 - 58	85 - 100	Muy densa

Para este estudio, se utiliza la expresión propuesta por Boulanger & Idriss (2010) en base al  $(N1)_{60CS}$ , que se observa en la ecuación (7).



$$DR\% = \sqrt{\frac{(N1)_{60cs}}{46}} \quad (7)$$

## 2.4 Ensayos

Para realizar el estudio de licuefacción de Valparaíso, se tienen distintos ensayos SPT a disposición por parte del Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) y de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Los estudio y su ubicación y coordenadas se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8: Ensayos a disposición para el estudio.**

Nombre	Latitud	Longitud	Ubicación
SPT 1	-33.04801	-71.60750	Plaza O'Higgins, Valparaíso
SPT2			
SPT 3			
SPT 4	-33.04523	-71.61106	Avenida Brasil 2350, Valparaíso
SPT 5	-33.04594	-71.61347	General Cruz N°222, Valparaíso
SPT 6	-33.04317	-71.60867	Nuevo Edificio VTP, Valparaíso
SPT 7	-33.04317	-71.60867	Nuevo Edificio VTP, Valparaíso
SPT 8			
SPT 9	-33.04520	-71.61361	Avenida Brasil N°2162, Valparaíso
SPT 10	-33.04124	-71.60632	Rotonda acceso Norte VTP, Barón, Valparaíso.
SPT 11	-33.04406	-71.61088	Mall Plaza, Valparaíso
SPT 12	-33.04287	-71.60953	
SPT 13	-33.04203	-71.60739	
SPT 14	-33.04526	-71.61355	Avenida Brasil N°2162, Valparaíso
SPT 15	-33.04489	-71.61297	Edificio VTP, Valparaíso
SPT 16			
SPT 17			
SPT 18			
SPT 19			
SPT 20			
SPT 21	-33.06314	-71.60617	Pje. Los Olivos con Los Maitenes, Cerro Las Cañas, Valparaíso
SPT 22	-33.03796	-71.59836	Calle Diego Portales N°1346, Valparaíso
SPT 23			
SPT 24	-33.03350	-71.59268	Av. España N°1920, Valparaíso.
SPT 25	-	-	-
SPT 26	-	-	-
SPT 27	-	-	-
SPT 28	-	-	-
SPT 29	-33.03815	-71.62742	Estación Puerto, Sotomayor 7-39, Valparaíso
SPT 30	-33.03834	-71.62716	Estación Puerto, Errázuriz 629, Local 119, Valparaíso
SPT 31	-33.03817	-71.62754	Estación Puerto, Sotomayor 39-17, Valparaíso
SPT 32	-33.03844	-71.62692	Estación Puerto, Errázuriz 629, Valparaíso
SPT 33	-33.03864	-71.62666	Estación Puerto, Errázuriz 811, Valparaíso

### 3 Licuefacción

#### 3.1 Descripción

La licuefacción de suelos, definida por primera vez por Mogami & Kubo (1953), es un proceso en el cual existe una deformación del suelo como resultado de la aplicación de cargas monotónicas o cíclicas, provocando una pérdida de rigidez y resistencia producto del aumento de la presión de poros, disminuyendo la presión de confinamiento efectiva del suelo bajo cargas no drenadas y provocando deformaciones superficiales en los suelos. Este fenómeno afecta principalmente a arenas finas, poco densas, mal graduadas o no confinadas. El fenómeno comenzó a ser estudiado luego de los terremotos de Alaska (Estados Unidos) y Niigata (Japón) en 1964, en los cuales se evidenciaron daños inducidos por la licuefacción, como fallas de taludes, falla de puentes y cimentaciones de edificios (Kramer, 1996).

#### 3.2 Fenómenos asociados a la licuefacción

El término licuefacción se asocia principalmente al aumento de presión de poros en un depósito de suelo no cohesivo debido a la aplicación de cargas de manera rápida, teniendo un comportamiento no drenado al momento de efectuarse la carga. Sin embargo, este fenómeno puede dividirse principalmente en otros dos fenómenos llamados licuefacción de flujo (flow liquefaction) y movilidad cíclica (cyclic mobility). Tanto la licuefacción de flujo como la movilidad cíclica son importantes a la hora de la evaluación de daños, no obstante, la licuefacción de flujo ocurre con mucho menos frecuencia que la movilidad cíclica, pero sus efectos son mucho peores, mientras que esta última puede suceder bajo muchas más condiciones del suelo.

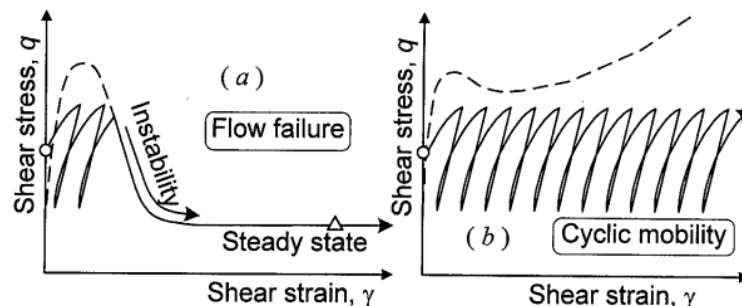


Figura 6: Falla de flujo (a) y Movilidad cíclica (b) (Yoshimine & Ishihara, 1998).

##### 3.2.1 Licuefacción de flujo

La licuefacción de flujo es el fenómeno asociado a la licuefacción que mayores daños produce, debido a la inestabilidad que se produce al momento de aplicar la carga, ya sean cíclicas o aplicadas repentinamente. Este fenómeno ocurre cuando el esfuerzo de corte estático es mayor a la resistencia de corte del suelo en estado licuado (Figura 6). Una vez esto sucede, la resistencia del suelo no es capaz de soportar las tensiones estáticas y esto provoca un movimiento de grandes masas de suelo a una gran velocidad, provocando daños considerables a estructuras aledañas. Este fenómeno ocurre principalmente en terrenos con pendientes, como lo son los taludes, o en fundaciones de estructuras.

##### 3.2.2 Movilidad cíclica

La movilidad cíclica ocurre debido a cargas cíclicas y puede provocar deformaciones permanentes considerables, en donde el esfuerzo de corte estático es menor a la resistencia de corte del suelo en estado licuado (Figura 6). A diferencia de la licuefacción de flujo, la movilidad cíclica puede suceder tanto por esfuerzos cortantes estáticos o cíclicos. Se define el término de expansión lateral (lateral spreading) a estos desplazamientos, en donde su ocurrencia se ha visto principalmente en terrenos

llanos o cercanos a cuerpos de agua compuestos principalmente por arenas con comportamientos no drenados, con un nivel freático alto.

Dentro de la movilidad cíclica, también existe el fenómeno denominado licuefacción a nivel de suelo (level-ground liquefaction), provocando que exista un aumento en la presión de poros y que el agua fluya hacia la superficie del terreno, mientras el suelo se consolida en la parte inferior. Al momento del afloramiento del agua en superficie, se genera una especie de volcanes de arena (sand boils) por donde escurre el agua. Este fenómeno es más común que la licuefacción de flujo y genera principalmente asentamientos verticales.

### 3.2.3 Degradación de rigidez cíclica

Existe un fenómeno similar a la licuefacción conocido como degradación de rigidez cíclica o ablandamiento cíclico (cyclic softening), definido por Boulanger & Idriss (2004), el cual se presenta en suelos cohesivos no drenados (limos y limo arcillosos), provocando pérdida de resistencia y deformaciones.

## 3.3 Potencial de licuefacción

### 3.4 Método simplificado

#### 3.4.1 Tensiones cíclicas de los sismos (CSR)

El valor de las tensiones cíclicas provenientes de los sismos (CSR) se calcula de la respuesta dinámica del depósito de suelos, según la ecuación (8) (Seed & Idriss, 1971).

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad (8)$$

Donde:

$CSR_{M,\sigma'_v}$  Tensión cíclica del sismo para una Magnitud  $M$  y esfuerzo efectivo  $\sigma'_v$ .

$\sigma_v$ : Presión total a una profundidad dada, en [kPa].

$\sigma'_v$ : Presión efectiva a una profundidad dada, en [kPa].

$a_{max}$ : Aceleración máxima del sismo registrada en superficie, en [g].

$g$ : Aceleración de gravedad.

$r_d$ : Factor de reducción efectiva (Boulanger & Idriss, 2014).

Según Boulanger & Idriss (2014), el factor de reducción del esfuerzo cortante ( $r_d$ ) explica la respuesta dinámica del perfil del depósito de suelo. Este parámetro se define en función de la profundidad en [m] ( $z$ ) y la magnitud de momento ( $M_w$ ) del sismo. Este factor se calcula según la ecuación (9).

$$r_d = e^{\alpha(z)+\beta(z)\cdot M_w}$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (9)$$

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

#### 3.4.2 Comportamiento suelos de granos finos

Los suelos de granos finos suelen tener un comportamiento más cercano a las arcillas que a las arenas bajo un rango muy acotado de los límites de Atterberg. Debido a que las cargas cíclicas sobre arenas se pueden correlacionar mediante el análisis de licuefacción, en el caso de suelos con comportamientos más cercanos a las arcillas se debe considerar la metodología propuesta para ese tipo de suelos (Boulanger & Idriss, 2004).

La transición existente entre ambos comportamientos fue representada por Boulanger & Idriss (2008), donde entre Índices de Plasticidad (PI) de 3 a 8, existe dicha transición de comportamiento (Figura 7).

Además, se señala que no se puede distinguir el comportamiento de los suelos solo en base a los Límites Líquidos (LL).

En términos ingenieriles, se puede esperar que los suelos de grano fino con un  $PI \geq 7$  presenten un comportamiento tipo arcilla. En caso de que las condiciones anteriormente señaladas no se cumplan, se puede considerar que los suelos tienen un comportamiento similar al de las arenas.

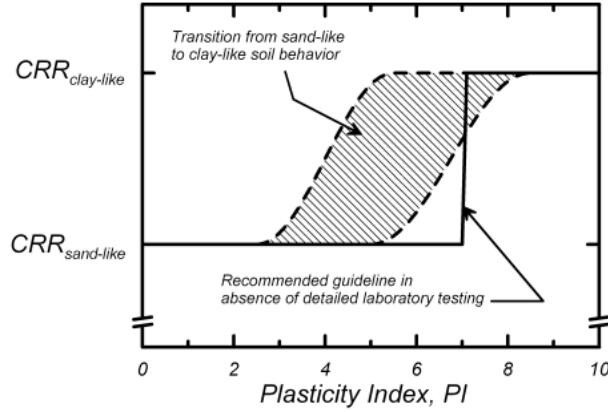


Figura 7: Esquema de transición del comportamiento de arena a arcilla para suelos de grano fino según PI (Boulanger & Idriss, 2008).

### 3.4.3 Tensiones cíclicas de los suelos (CRR) - Suelos con comportamiento de arenas

Para la determinación de las tensiones cíclicas de los suelos provenientes de cargas cíclicas, se procede a utilizar la ecuación (10) propuesta por Boulanger & Idriss (2010), la cual depende directamente de la magnitud de momento del sismo ( $M_w$ ), como también de la presión de confinamiento de las capas de suelo ( $\sigma'_v$ ).

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (10)$$

Donde:

$CRR_{M,\sigma'_v}$  Tensión cíclica del suelo para una Magnitud  $M$  y esfuerzo efectivo  $\sigma'_v$ .

$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1}$  Tensión cíclica del suelo para una Magnitud  $M = 7.5$  y esfuerzo efectivo  $\sigma'_v = 1[atm]$ .

$MSF$  Factor de escala por magnitud del sismo.

$K_\sigma$  Factor de corrección por sobrecarga.

La tensión cíclica normalizada ( $CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1}$ ) se calcula según la ecuación (11).

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right) \quad (11)$$

Donde:

$(N_1)_{60cs}$  N° de golpes medidos según SPT normalizado y corregido por contenido de finos.

Este parámetro se diferencia del obtenido según la NCh3364 (INN, 2014), debido a que el subíndice "cs" hace referencia a una corrección debido al contenido de finos (FC) que poseen las capas de suelo. De esta manera, la obtención del  $(N_1)_{60cs}$  se obtiene según la ecuación (12).

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (12)$$

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

El factor  $MSF$  se utiliza para tomar en consideración los efectos de duración de los sismos, como lo son el número de ciclos de carga, como también las amplitudes de estos. Esto influye en gran manera en la respuesta de los suelos debido a que a mayor número de cargas en el tiempo, al suelo le resulta más difícil drenar el agua en su interior y esto aumenta la presión de poros.

Los valores de  $MSF$  fueron obtenidos mediante estudios realizados en zonas donde se presentó el fenómeno bajo sismos de magnitudes cercanas a los 7.5 (Boulanger & Idriss, 2014).

De esta manera, Boulanger & Idriss (2014) proponen una expresión para calcular el factor  $MSF$  mediante la ecuación (13).

$$MSF = 6.9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (13)$$

El valor de 1.8 para el límite superior es utilizado para corregir terremotos de magnitudes pequeñas, los cuales pueden estar dominados por un solo pulso o peak en la serie de tiempo.

El factor de corrección por sobrecarga ( $K_\sigma$ ) considera un aumento de tensiones efectivas debido a sobrecargas existentes sobre el depósito de suelo. Boulanger & Idriss (2014) propuso una expresión para obtener  $K_\sigma$  basado en resultados de ensayos de laboratorio y de estudios de casos históricos in situ. De esta manera, la expresión propuesta es la ecuación (14).

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_{atm}}\right) \leq 1.1 \quad (14)$$

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

El coeficiente  $C_\sigma$  está limitado superiormente por 0.3 y es válido para valores de  $(N_1)_{60cs} \leq 37$ .

#### 3.4.4 Tensiones cíclicas de los suelos (CRR) - Suelos con comportamiento de arcillas

Al igual que el caso del cálculo del  $CRR$  para suelos con comportamiento de arenas, para este caso también depende directamente de la magnitud de momento del sismo ( $M_w$ ) y de la presión de confinamiento de las capas de suelo ( $\sigma'_v$ ), solo que no se considera un factor de corrección por sobrecarga. De esta manera, Boulanger & Idriss (2004) proponen una expresión para el cálculo del  $CRR$  según la ecuación (15).

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} \cdot MSF \quad (15)$$

La tensión cíclica normalizada ( $CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1}$ ) se calcula según la ecuación (16).

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = 0.18 \cdot OCR^{0.8} \cdot K_\alpha \quad (16)$$

Donde:

$OCR$  Relación de preconsolidación de los suelos.

$K_\alpha$  Razón entre la resistencia cíclica con el esfuerzo de corte estático inicial.

Según Mayne & Kemper (1988), la relación para obtener valores de  $OCR$  en base al número de golpes  $(N)_{60}$  y el esfuerzo efectivo  $\sigma'_v$  para ensayos SPT se observa en la ecuación (17).

$$OCR = 0.193 \left(\frac{(N)_{60}}{\sigma'_v}\right)^{0.689} \quad (17)$$

Según Boulanger & Idriss (2004), las relaciones para obtener valores de  $K_\alpha$  fueron estudiadas en función de la relación de esfuerzos  $\frac{\tau_s}{s_u}$ , tal como se observa en la ecuación (18).

$$K_\alpha = 1.344 - \frac{0.344}{\left(1 - \frac{\tau_s}{S_u}\right)^{0.638}} \quad (18)$$

Sin embargo, debido a un ajuste realizado a conveniencia, la relación de esfuerzos  $\frac{\tau_s}{S_u}$  se puede expresar en función del *OCR*, dando una expresión como la de la ecuación (19).

$$\frac{\tau_s}{S_u} = \frac{\tau_s}{S_u} \cdot \frac{1/\sigma'_v}{1/\sigma'_v} = \frac{\alpha}{S_u/\sigma'_v} = \frac{\alpha}{0.22 \cdot OCR^{0.8}} \quad (19)$$

Quedando una nueva expresión para el factor  $K_\alpha$ , tal como se observa en la ecuación (20).

$$K_\alpha = 1.344 - \frac{0.344}{\left(1 - \frac{\alpha}{0.22 \cdot OCR^{0.8}}\right)^{0.638}} \quad (20)$$

Para el factor *MSF* se tiene una expresión distinta a la propuesta para arenas, en donde Boulanger & Idriss (2004) proponen la ecuación (21) para su cálculo.

$$MSF = 1.12 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) + 0.828 \leq 1.13 \quad (21)$$

Se observa que esta expresión posee menor dependencia al número de ciclos, y por lo tanto a la magnitud, reflejado en que esta curva es más plana que la propuesta para suelos con comportamiento de arenas, tal como se observa en la Figura 8.

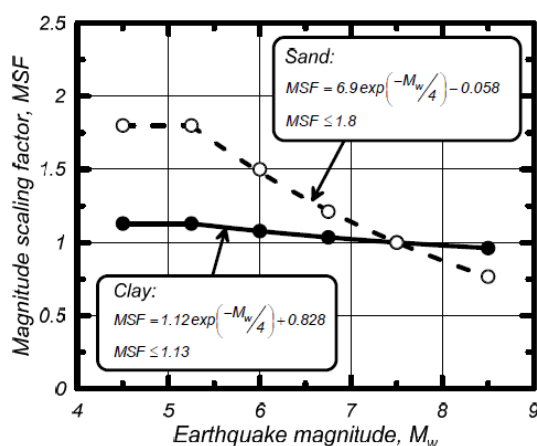


Figura 8: Relaciones MSF para suelos con comportamiento de arcillas y arenas (Boulanger & Idriss, 2014).

### 3.5 Factor de seguridad (FS)

El factor de seguridad propuesto inicialmente por Seed & Idriss (1971) se calcula como el cociente entre *CRR* y *CSR*, como se presenta en la ecuación (22).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (22)$$

La manera de interpretar los resultados obtenidos para las distintas capas se puede simplificar en señalar que para  $FS > 1$  el suelo califica como no licuable, mientras que para  $FS < 1$  el suelo califica como licuable. Para el caso de  $FS = 1$ , se dice que el suelo se encuentra en un estado límite entre licuable y no licuable. Sin embargo, este análisis no es del todo confiable, debido a que no refleja la severidad del fenómeno de licuefacción, por lo que a lo largo de los años diversos autores como Chen & Juang (2000), Iwasaki et al. (1978), Juang et al. (2003) y Sonmez (2003) han propuesto distintos métodos probabilísticos con el fin de poder reflejar el potencial de daños provocados por la licuefacción en base a los factores de seguridad obtenidos.

### 3.6 Probabilidad de licuar (PL)

Autores como Chen & Juang (2000) y Juang et al. (2003) han propuesto expresiones para el cálculo de la probabilidad de licuar ( $PL$ ) en base a estudios y registros históricos de fenómenos de licuefacción, tomando en consideración para sus cálculos el factor de seguridad ( $FS$ ). Realizando una comparación entre ambos autores, se observa en la Figura 9 que lo propuesto por Juang et al. (2003) entrega valores de  $PL$  mayores a los propuestos por Chen & Juang (2000), lo que disminuye la incertidumbre de los resultados y garantiza que estos sean más seguros.

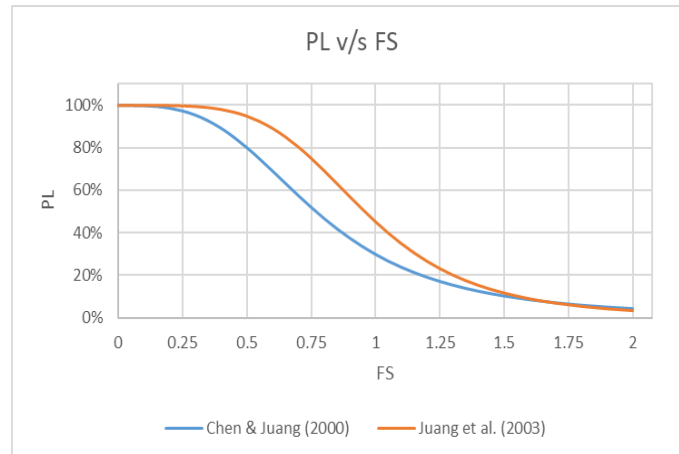


Figura 9: Gráfico comparativo PL v/s FS.

Dichos resultados se obtienen de las ecuaciones (23) y (24), propuestas por Chen & Juang (2000) y Juang et al. (2003), respectivamente.

$$PL = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{0.77}\right)^{3.25}} \quad (23)$$

$$PL = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{0.96}\right)^{4.5}} \quad (24)$$

En base a los valores obtenidos anteriormente, la capa de suelo analizada puede ser clasificada en clases según el valor de  $PL$ , tal como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9: Clasificación según PL (Chen & Juang, 2000).

PL	Clase	Descripción
$0.85 \leq PL \leq 1.00$	5	Casi seguro de licuar
$0.65 \leq PL < 0.85$	4	Muy probable que se licue
$0.35 \leq PL < 0.65$	3	Licuar y no licuar equiprobables
$0.15 \leq PL < 0.36$	2	Poco probable que se licue
$0.00 \leq PL < 0.15$	1	Casi seguro de no licuar

### 3.7 Índice de potencial de licuefacción (LPI)

El índice de potencial de licuefacción ( $LPI$ ) es otra manera de poder cuantificar los posibles daños y la severidad del fenómeno de licuefacción, tomando en cuenta principalmente los  $FS$  de cada capa, y la cantidad y espesor de dichas capas que sean licuables, todo en función de la profundidad a la que se encuentren éstas.

Originalmente, este índice fue propuesto por Iwasaki et al. (1978), tomando en consideración solo los primeros 20 [m] de depósito de suelo, ya que estos son los que afectan en mayor medida la respuesta del suelo en superficie. Según su propuesta inicial, el *LPI* se calcula según la ecuación (26).

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) dz \quad (25)$$

Donde:

$$F(z) = \begin{cases} 1 - FS & , FS \leq 1 \\ 0 & , FS > 1 \end{cases} \quad \text{Factor de resistencia a la licuación.}$$

$$w(z) = 10 - 0.5 \cdot z \quad \text{Factor de ponderación de profundidad.}$$

$$z \quad \text{Profundidad, en [m].}$$

Para poder interpretar los resultados obtenidos para cada depósito de suelo, es necesario correlacionar los valores de *LPI* en función de categorías de potencial de licuefacción, las cuales cada autor según sus estudios y calibraciones correspondientes considera correctas.

El primer ejemplo de estas interpretaciones corresponde a Iwasaki et al. (1981), donde en base a su estudio basado en 64 sitios que presentaron licuefacción y 23 sitios que no presentaron licuefacción, propone categorías explicadas en la Tabla 10.

**Tabla 10: Categorías de Potencial de Licuefacción según *LPI* (Iwasaki et al., 1981).**

<b>LPI</b>	<b>Categoría Potencial de Licuefacción</b>
0	Muy bajo (no necesita estudios de licuefacción)
$0 < LPI \leq 5$	Bajo (necesita estudios de licuefacción para estructuras especialmente importantes)
$5 < LPI \leq 15$	Alto (necesita estudios de licuefacción y contramedidas generales)
$LPI > 15$	Muy alto (necesita estudios detallados de licuefacción y contramedidas específicas)

Debido a que el cálculo del *LPI* es en base a funciones continuas, Luna & Frost (1998) proponen una forma de integración discreta en base a perfiles de suelos divididos en un número de *N* capas con espesor *H<sub>i</sub>*, un factor de resistencia a la licuación de *F<sub>i</sub>* (calculado de la misma manera que *F(z)*) y un factor de profundidad *w<sub>i</sub>* (calculado de la misma manera que *w(z)*), obteniendo una expresión como la que se presenta en la ecuación (26).

$$LPI = \sum_{i=1}^N F_i \cdot w_i \cdot H_i \quad (26)$$

De esta manera, Luna & Frost (1998) proponen las categorías presentadas en la Tabla 11.

**Tabla 11: Categorías de Potencial de Licuefacción según *LPI* (Luna & Frost, 1998).**

<b>LPI</b>	<b>Categoría Potencial de Licuefacción</b>
0	Bajo a nulo
$0 < LPI \leq 5$	Bajo
$5 < LPI \leq 15$	Moderado
$LPI > 15$	Alto



Posteriormente, Sonmez (2003) propone una nueva expresión para el cálculo de  $F(z)$  con el fin de poder mejorar ciertas limitaciones de los métodos previos, como lo son el no existir una categoría de Potencial de Licuefacción Moderada en la propuesta de Iwasaki et al. (1981). De esta manera, Sonmez (2003) propone dividir a los suelos no licuables, los ligeramente licuables y los licuables en base a  $FS$ , como se observa en la ecuación (27).

$$F(z) = \begin{cases} 0 & , FS \geq 1.2 \\ 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot FS) & , 0.95 \leq FS < 1.2 \\ 1 - FS & , FS < 0.95 \end{cases} \quad (27)$$

En función de esta nueva expresión, Sonmez (2003) propone nuevas categorías de Potencial de Licuefacción, presentadas en la Tabla 12.

**Tabla 12: Categorías de Potencial de Licuefacción según LPI (Sonmez, 2003) .**

LPI	Categoría Potencial de Licuefacción
0	No licua (basado en $FS \geq 1.2$ )
$0 < LPI \leq 2$	Bajo
$2 < LPI \leq 5$	Moderado
$5 < LPI \leq 15$	Alto
$LPI > 15$	Muy alto

En base a lo visto en la sección 3, se utiliza una planilla de calculo que se refleja en la Figura 10 y Figura 11 del ANEXO A.

## 4 Análisis y Resultados

### 4.1 Condiciones de licuefacción

En base a lo propuesto por Boulanger & Idriss (2004, 2014) y a la NCh 3364 (INN, 2014), se presenta la Tabla 13 la cual presenta el estado de las capas de suelo propuesto en el análisis de los ensayos en base a condiciones específicas.

**Tabla 13: Condiciones de licuefacción según parámetros.**

Estado	Condición
Rechazo	Medición rechazada según NCh3364 (INN, 2014)
No aplica	Estrato de suelo es grava o roca
	Estrato de suelo se encuentra sobre la napa freática
No licuable	Arena con $(N_1)_{60cs} > 37$ (Boulanger & Idriss, 2014)
Si licua	Arena con $FS \leq 1$
No licua	Arena con $FS > 1$
Presenta degradación	Limo o arcilla con $FS \leq 1$
No presenta degradación	Limo o arcilla con $FS > 1$

Los estados presentan un primer análisis de las condiciones de licuefacción de los suelos, con el fin de establecer un parámetro para la consideración de los Índices de potencial de licuefacción (*LPI*).

### 4.2 Pesos específicos

Para el estudio presente, es necesario tener valores de los pesos específicos naturales y saturados de los distintos tipos de suelos presentes en los ensayos. Si bien existen correlaciones para obtener dichos valores mediante los resultados de los ensayos SPT y otros estudios geotécnicos, se opta por utilizar valores estándar (Tabla 14) propuestos por Coduto et al. (2016) y desglosados en el documento de Bustos (2017), debido a falta de información en algunos de estos ensayos y con el fin de estandarizar los resultados obtenidos.

**Tabla 14: Pesos específicos naturales y saturados según clasificación USCS (Coduto et al., 2016).**

Clasificación USCS	$\gamma_{\text{natural}}$	$\gamma_{\text{saturado}}$
	[T/m <sup>3</sup> ]	[T/m <sup>3</sup> ]
CL	1.86	2.27
GC(CL)	2.09	2.54
GW-GM	2.09	2.54
GP-GM	2.09	2.24
ML	1.81	2.2
ML-CL	1.81	2.2
SC(CL)	1.86	2.27
SM	1.75	2.13
SM(ML)	1.86	2.27

Clasificación USCS	$\gamma_{\text{natural}}$	$\gamma_{\text{saturado}}$
	[T/m <sup>3</sup> ]	[T/m <sup>3</sup> ]
SM(ML)-SC(CL)	1.86	2.27
SC	1.75	2.13
SM-SC	1.75	2.13
SP	1.75	2.13
SP-SM	1.86	2.27
SP-SM(ML)	1.86	2.27
SW	2.09	2.54
SW-SM	1.75	2.13
SW-SM(ML)	1.75	2.13

### 4.3 Magnitud y aceleración máxima

Debido a que el potencial de licuefacción depende directamente de la magnitud de un sismo ( $M_w$ ) y su respectiva aceleración máxima ( $a_{max}$ ), es necesario establecer valores para realizar el análisis. Estos valores se considerarán desde una magnitud de  $M_w = 6.0$  hasta una magnitud de  $M_w = 9.5$ .

Por su parte, se considera un valor de aceleración máxima de  $a_{max} = 0.4g$ , según lo indicado en la NCh2369 (INN, 2003) por la zona sísmica en la cual se encuentra Valparaíso; además, se considera un valor de aceleración máxima de  $a_{max} = 0.3g$ , con la finalidad de establecer un rango de resultados y realizar un análisis de sensibilidad del potencial de licuefacción.

Anexo a lo mencionado anteriormente, se considerarán dos valores de  $M_w$  y  $a_{max}$  (Tabla 15), obtenidos del estudio realizado para el terremoto del 27F del año 2010, donde se ubicaban acelerógrafos SMA-1 en los sectores de Valparaíso UTFSM y Valparaíso Almendral (JST-JICA SATREPS Perú Project, 2010).

**Tabla 15: Valores de  $M_w$  y  $a_{max}$  durante el 27F (JST-JICA SATREPS Perú Project, 2010).**

Ubicación	$M_w$	$a_{max}$
UTFSM	8.8	0.27 g
Almendral	8.8	0.30 g

### 4.4 Índice de potencial de licuefacción (LPI)

Basándose en el análisis de potencial de licuefacción presentado en la sección 3, y particularmente en la sección 3.7, se presenta la Tabla 16, con una magnitud de  $M_w = 8.8$  y una aceleración máxima de  $a_{max} = 0.3g$  correspondientes a la medición registrada en el sector Almendral (Tabla 15), donde se observa el valor de  $LPI$  de cada ensayo analizado según la ecuación (26) y su respectiva categorización según la Tabla 12.

**Tabla 16: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.8$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	1.05	Baja
SPT 2	1.15	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	3.40	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	6.18	Alta
SPT 7	4.29	Moderada
SPT 8	3.06	Moderada
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	1.48	Baja
SPT 11	0.14	Baja
SPT 12	1.33	Baja
SPT 13	4.80	Moderada
SPT 14	6.58	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	1.20	Baja
SPT 19	1.60	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	4.46	Moderada
SPT 26	2.35	Moderada
SPT 27	1.60	Baja
SPT 28	2.26	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	1.02	Baja
SPT 31	1.07	Baja
SPT 32	5.60	Alta
SPT 33	0.00	No licua

Para los demás casos de análisis, se presentan las tablas correspondientes en el ANEXO B.

Dentro de los criterios utilizados para el cálculo del *LPI*, se dejaron afuera los valores obtenidos para las mediciones en donde la licuefacción no aplicaba, como el caso de estratos sobre la napa freática, o los cuales no eran susceptibles a presentar el fenómeno de licuefacción; con el motivo de poder obtener valores de *LPI* más acorde a la respuesta real del depósito de suelos.

A pesar de que según los *LPI* obtenidos en los sectores cercanos a la zona costera de la ciudad presentan un alto valor, como los son las mediciones realizadas en el Nuevo Edificio VTP o las realizadas en el sector de Estación Puerto, los que los clasifica como Moderada a Alta su potencial de licuefacción, estos resultados resultan ser muy superficiales debido a la cantidad de ensayos analizados y el tipo de información extraída de ellos, por lo que el siguiente paso es un análisis más exhaustivo a las capas de suelo presente en dichos ensayos que presentan el fenómeno de licuefacción o degradación cíclica.

#### **4.5 Potencial de licuefacción según DR%**

En función del tipo de suelo según la clasificación USCS y la *DR%* que presenta cada estrato, se observan los siguientes patrones de comportamiento.

- Arenas limosas o limo arcillosas mal graduadas (SP-SM) presentan el fenómeno de licuefacción cuando estas tienen una *DR%* menor al 78-82%, siendo principalmente estratos medianamente densos a densos, o menores en la clasificación de la Tabla 7.
- Arenas limosas o limo arcillosas bien graduadas (SW-SM) presentan el fenómeno de licuefacción cuando estas tienen una *DR%* menor al 73-77%, siendo principalmente estratos medianamente densos o menores en la clasificación de la Tabla 7.
- Arenas mal graduadas (SP) presentan el fenómeno de licuefacción cuando estas tienen una *DR%* menor al 78-82%, siendo principalmente estratos medianamente densos a densos, o menores en la clasificación de la Tabla 7.
- Arenas bien graduadas (SW) presentan el fenómeno de licuefacción cuando estas tienen una *DR%* menor al 78-82%, siendo principalmente estratos medianamente densos a densos, o menores en la clasificación de la Tabla 7.
- Arenas limosas o limo arcillosas (SM) presentan el fenómeno de licuefacción cuando estas tienen una *DR%* menor al 76-80%, siendo principalmente estratos medianamente densos o menores en la clasificación de la Tabla 7.

## 5 Conclusiones y Recomendaciones

Dentro del análisis de los estudios SPT a disposición, se logra observar que existen suelos susceptibles a la licuefacción sobre el nivel de la napa freática, lo que en el caso de que ésta se encuentre más cercana a la superficie, existe la probabilidad de que el potencial de licuefacción de ese depósito de suelo aumente en gran medida, debido a la cercanía a la superficie.

Se observa que el potencial de licuefacción de los suelos compuestos principalmente por depósitos marinos mal graduados y poco compactos tienen una tendencia a ser mayores que suelos con depósitos de sedimento más compacto y mejor graduado, como lo son los suelos SW.

Los valores propuestos en la sección 4.5 pueden verse afectados principalmente por la profundidad a la cual se encuentre el estrato analizado, esto debido a que a mayor profundidad el *CSR* aumenta, lo que implica que bajo las mismas condiciones del suelo, el *FS* tiende a disminuir y el suelo puede presentar un mayor potencial de licuefacción.

Sin embargo, el hecho de que el potencial de licuefacción pueda aumentar debido al aumento del *CSR*, este efecto se ve disminuido o ignorado por completo en el caso de que la profundidad del estrato analizado sea mayor a los 20 [m] de profundidad, ya que según lo propuesto por Iwasaki et al. (1978), solo los primeros 20 [m] de un depósito de suelo afecta de manera sustancial la respuesta al fenómeno de licuefacción.

Estos resultados ayudan a realizar una interpretación más transversal a los estudios de ensayos SPT en relación a los parámetros descritos con anterioridad, como lo son el *FS*, la *PL* o el *LPI*, con el fin de poder identificar tipos de suelo y su posible comportamiento bajo condiciones de cargas sísmicas.

Es necesario destacar que a mayoría de los ensayos SPT fueron realizados antes de la construcción de las obras, lo que entrega una respuesta a suelos que en la actualidad tienen características geotécnicas distintas a las entregadas en este análisis, por lo que los resultados de este estudio entregan un reflejo de los posibles comportamientos de los suelos frente al fenómeno de licuefacción y debiesen ser verificados bajo condiciones más actuales.

En función de lo anterior, se proponen recomendaciones para futuros estudios de zonificación geotécnica en la ciudad de Valparaíso, o como conocimiento general para el estudio del potencial de licuefacción.

- Se recomienda, en lo posible, el uso de ensayos que entreguen mayor cantidad de datos, como lo son los ensayos CPT, CPTu o SCPTu, con el fin de poder realizar el estudio de manera más completa y continua a través de la profundidad de los estratos, ya que como se observa en las mediciones realizadas por los ensayos SPT, estos son tomados por tramos discontinuos y se ven alterados por la presencia de suelos finos.
- Realizar comparación entre resultados de ensayos SPT, en este caso de estudio, antes y después de la construcción de las obras, ya que como se observa en los ensayos analizados, la mayoría de estos fueron previos a la construcción, lo que implica que en caso de que el suelo de fundación de la obra no fuera lo suficientemente apto, es necesario realizar técnicas de mejoramiento de suelos, lo que modifica sustancialmente los parámetros geotécnicos de los suelos y su futura respuesta, disminuyendo en gran medida el potencial de licuefacción de los suelos.
- Se recomienda realizar estudios probabilísticos con el fin de poder adaptar los valores límites de parámetros sobre el potencial de licuefacción como la *PL* o el *LPI* a medida de los suelos presentes en Valparaíso, ya que a pesar de que lo propuesto por Chen & Juang (2000) y Juang et al. (2003) para la *PL*, o Iwasaki et al. (1978), Luna & Frost (1998) y Sonmez (2003) para el *LPI*, sea aplicable a distintos estudios, estos pueden presentar una diferencia a lo que se podría observar en la realidad.

## 6 Referencias

- Astroza, M., & Monge, J. (1989). Aumento de intensidades según las características geológicas de los suelos de fundación, sismo del 3 de Marzo de 1985.
- Baquedano, F., Leyton, F., & Sepúlveda, S. A. (2012). Frecuencia predominante de los suelos de Valparaíso—Viña del Mar y propuesta de microzonificación preliminar.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2004). Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silt and clays.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2008). Soil Liquefaction during earthquakes.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2010). SPT-based liquefaction triggering procedures.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures.
- Bustos, I. (2017). Aportes para una nueva zonificación geotécnica de Viña del Mar Estimación del potencial de licuefacción en la cuenca del Marga—Marga. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23420>
- Castañeda, R., & González, A. (2013). Actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad de Valparaíso. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/2984>
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr., L. F., Kayen, R. E., & Moss, R. E. S. (2004). Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential.
- Chen, C. J., & Juang, C. H. (2000). Calibration of SPT- and CPT- based liquefaction evaluation methods.
- Coduto, D., Kitch, W., & Yeung, M. (2016). Foundation design: Principles and practices (3rd edition).
- CSN. (s. f.). Grandes terremotos en Chile. Recuperado 26 de octubre de 2022, de <https://www.csn.uchile.cl/sismologia/grandes-terremotos-en-chile/>
- Figuroa, E., & Orostegui, P. (2014). Ensayos de Medición de Energía SPT con Martillo Manual y Automático en Proyectos Inmobiliarios.

- Gana, P., Wall, R., & Gutiérrez, Á. (1996). Mapa Geológico del Área de Valparaíso -Curacaví.
- Gibbs, H. J., & Holtz, W. G. (1957). Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing.
- González, J. (2015). Estudio el fenómeno de licuefacción en Chile para el terremoto del Maule, 2010. [Tesis de postgrado, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137848>
- Grimme, K., & Álvarez, L. (1964). El suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar.
- Guerrero, N. (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. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.
- INN. (2003). NCh2369—Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- INN. (2014). NCh3364—Geotecnia, Ensayo de Penetración Estándar.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. I., & Yasuda, S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on cases studies at various sites in Japan.
- Iwasaki, T., Tokida, K., & Tatsuoka, F. (1981). Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure.
- JST-JICA SATREPS Perú Project. (2010). 2010 Chile Earthquake and Tsunami Technical Report.
- Juang, C. H., Yuan, H., Lee, D.-H., & Lin, P.-S. (2003). Simplified Cone Penetration Test-based Method for Evaluating Liquefaction Resistance of Soils.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering.
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile, A Historical Survey, 1535-1960.
- Luna, R., & Frost, D. (1998). Spatial Liquefaction Analysis System.
- Mayne, P. W., & Kemper, J. B. (1988). Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT.
- Meyerhof, G. (1957). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils.
- Mogami, T., & Kubo, K. (1953). The behavior of soil during vibration.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). Guide to Cone Penetration Testing (6th Edition).



- Rodríguez, A., & Gajardo, C. (1906). La catástrofe del 16 de agosto de 1906 en la República de Chile.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential.
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sand of overburden pressure, relative, particle size, ageing and overconsolidation.
- Sonmez, H. (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol,Turkey).
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1948). Soil mechanics in engineering practice.
- Troncoso, J. (1992). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica.
- Yoshimine, M., & Ishihara, K. (1998). Flow potential of sand during liquefaction.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils.

# ANEXO A

## Planilla de cálculo potencial de licuefacción.

		Nivel Freático		4.20																				
		Aceleración máxima según zona sísmica		0.30																				
		Magnitud sismo		8.80																				
ID	Horizonte	USCS	Densidad [T/m <sup>3</sup> ]	% Finos	Tipo Comportamiento	IP	Desde [m]	Hasta [m]	Profundidad (m)	N1	N2	N3	Nm	$\sigma$ total [T/m <sup>2</sup> ]	$\sigma$ efectivo [T/m <sup>2</sup> ]	$\sigma$ efectivo [KN/m <sup>2</sup> ]	C <sub>e</sub>	C <sub>b</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>s</sub>	C <sub>n</sub> (N) <sub>60</sub>	C <sub>n</sub> (N) <sub>100</sub>	C <sub>n</sub> (N) <sub>150</sub>	
1	2	SP	1.75	5	arena	NP	1.30	1.75	1.53	5	5	7	12	2.67	2.67	26.18	1.0	1.00	0.75	1.0	9	0.48	1.7	15
2	2	SP	1.75	5	arena	NP	2.80	3.25	3.03	6	19	19	38	5.29	5.29	51.93	1.0	1.00	1.00	1.0	38	0.27	1.2	45
3	2	SP	2.13	5	arena	NP	4.23	4.68	4.46	13	14	14	28	9.49	9.23	90.59	1.0	1.00	1.00	1.0	28	0.37	1.0	29
4	2	SP	2.13	5	arena	NP	5.83	6.28	6.06	12	14	16	30	12.90	11.04	108.32	1.0	1.00	1.00	1.0	30	0.37	1.0	29
5	2	SP	2.13	5	arena	NP	7.32	7.77	7.55	16	18	22	40	16.07	12.73	124.84	1.0	1.00	1.00	1.0	40	0.31	0.9	37
6	3	SP	2.13	5	arena	NP	8.87	9.32	9.10	19	20	25	45	19.37	14.48	142.02	1.0	1.00	1.00	1.0	45	0.29	0.9	41
7	4	SP	2.13	5	arena	NP	10.34	10.79	10.57	10	11	14	25	22.50	16.14	158.32	1.0	1.00	1.00	1.0	25	0.44	0.8	20
8	5	SP	2.13	5	arena	NP	11.90	12.35	12.13	12	13	16	29	25.83	17.90	175.61	1.0	1.00	1.00	1.0	29	0.42	0.8	23
9	5	SP	2.13	5	arena	NP	13.36	13.81	13.59	12	13	18	31	28.94	19.55	191.80	1.0	1.00	1.00	1.0	31	0.41	0.8	24
10	6	SP	2.13	5	arena	NP	14.94	15.39	15.17	13	15	16	31	32.30	21.34	209.31	1.0	1.00	1.00	1.0	31	0.42	0.7	23
11	7	SP-SM	2.27	5	arena	NP	16.40	16.85	16.63	14	16	18	34	37.74	25.31	248.33	1.0	1.00	1.00	1.0	34	0.41	0.7	23
12	7	SP-SM	2.27	5	arena	NP	17.92	18.37	18.15	14	16	19	35	41.19	27.24	267.27	1.0	1.00	1.00	1.0	35	0.41	0.7	23
13	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	19.50	19.95	19.73	10	13	15	28	44.78	29.25	286.95	1.0	1.00	1.00	1.0	28	0.45	0.6	17
14	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	20.96	21.41	21.19	10	13	15	28	48.09	31.10	305.14	1.0	1.00	1.00	1.0	28	0.46	0.6	17
15	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	22.44	22.89	22.67	12	14	16	30	51.45	32.98	323.58	1.0	1.00	1.00	1.0	30	0.45	0.6	18
16	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	23.99	24.44	24.22	12	15	18	33	54.97	34.95	342.89	1.0	1.00	1.00	1.0	33	0.44	0.6	19
17	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	25.46	25.91	25.69	15	19	23	42	58.30	36.82	361.70	1.0	1.00	1.00	1.0	42	0.39	0.6	26
18	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	26.94	27.39	27.17	17	19	25	44	61.66	38.70	379.64	1.0	1.00	1.00	1.0	44	0.38	0.6	26
19	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	28.49	28.94	28.72	20	24	27	51	65.18	40.67	398.95	1.0	1.00	1.00	1.0	51	0.34	0.6	32
20	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	29.95	30.40	30.18	22	25	29	54	68.50	42.52	417.14	1.0	1.00	1.00	1.0	54	0.33	0.6	34
21	8	SP-SM	2.27	10	arena	NP	30.55	31.00	30.78	26	27	31	58	69.86	43.28	424.62	1.0	1.00	1.00	1.0	58	0.31	0.6	37

Figura 10: Planilla de cálculo, análisis SPT.

Corrección (N1) <sub>no</sub> [N1] <sub>yes</sub>		ARENAS										ARCILLAS Y LIMOS										ESTADO							
		Relación de Resistencia Cíclicas					Relación de Resistencia Cíclicas					Relación de Resistencia Cíclicas					Relación de Tensiones Cíclicas												
		Δ(N1) <sub>no</sub>	(N1) <sub>yes</sub>	(N1) <sub>yes</sub> / dif	C <sub>r</sub>	K <sub>r</sub>	MSF	C <sub>r</sub>	K <sub>r</sub>	MSF	OCR	α	K <sub>α</sub>	CRR <sub>0.5,1mm</sub>	MSF	CRR <sub>0.5</sub>	a(z)	b(z)	rd	CSR <sub>0.5</sub>	CSR <sub>0.5</sub>		CRR <sub>0.5</sub>	CSR <sub>0.5</sub>	FS	PL	F(z)	W(z)	F(z) W(z)
0	15	0	0.16	0.7	0.11	1.1	10.79	3.82	12.00	14.48	0.95	13.79	-0.05	0.01	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.63	86.91	0.37	9.24	0.00	3.40
0	45	45	0.3566	0.7	0.30	1.1	18.16	3.78	38.00	69.56	0.95	66.22	-0.14	0.02	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	141.87	0.00	0	8.49	0.00	Moderada
0	29	29	0.43	0.7	0.19	1.0	10.03	2.10	28.00	31.87	0.95	30.35	-0.23	0.03	1.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	1.55	10.29	0	7.77	0.00	
0	29	29	0.44	0.7	0.19	1.0	9.30	1.76	30.00	32.14	0.95	30.60	-0.35	0.04	1.00	0.23	0.30	0.23	0.30	0.23	0.30	0.23	1.34	18.42	0	6.97	0.00		
0	37	37	0.189	0.7	0.30	0.9	10.28	1.57	40.00	46.44	0.95	44.22	-0.47	0.05	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	5.10	0.05	0	6.23	0.00		
0	41	41	0.502	0.7	0.30	0.9	10.20	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.60	0.07	0.99	0.26	3.19	0.26	3.19	0.26	3.19	0.26	12.31	0.00	0	5.45	0.00		
0	20	20	0.21	0.7	0.14	0.9	6.31	0.85	0.02	0.01	0.95	0.01	-0.73	0.08	0.99	0.27	0.14	0.27	0.14	0.27	0.14	0.27	0.52	93.91	0.48	4.72	1.01		
0	23	23	0.25	0.7	0.15	0.9	6.51	0.85	0.09	0.08	0.95	0.07	-0.88	0.10	0.98	0.28	0.16	0.28	0.16	0.28	0.16	0.28	0.58	90.46	0.42	3.94	0.74		
0	24	24	0.26	0.7	0.15	0.9	6.42	0.81	0.27	0.22	0.95	0.21	-1.02	0.11	0.98	0.28	0.17	0.28	0.17	0.28	0.17	0.28	0.59	89.68	0.41	3.21	0.59		
0	23	23	0.25	0.7	0.15	0.9	6.04	0.71	0.47	0.36	0.95	0.34	-1.17	0.13	0.97	0.29	0.15	0.29	0.15	0.29	0.15	0.29	0.54	93.01	0.46	2.42	0.50		
0	23	23	0.26	0.7	0.15	0.9	5.72	0.62	0.61	0.45	0.95	0.42	-1.31	0.14	0.96	0.28	0.16	0.28	0.16	0.28	0.16	0.28	0.56	92.04	0.44	1.69	0.34		
0	23	23	0.26	0.7	0.15	0.9	5.55	0.57	0.66	0.47	0.95	0.45	-1.45	0.16	0.95	0.28	0.15	0.28	0.15	0.28	0.15	0.28	0.55	92.68	0.45	0.93	0.19		
1	19	19	0.19	0.7	0.13	0.9	4.53	0.40	0.78	0.47	0.95	0.45	-1.58	0.17	0.94	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.41	97.84	0.59	0.14	0.04		
1	18	18	0.18	0.7	0.12	0.9	4.34	0.36	0.81	0.47	0.95	0.45	-1.70	0.19	0.93	0.28	0.11	0.28	0.11	0.28	0.11	0.28	0.40	98.16	0.6	0.00	0.00		
1	19	19	0.19	0.7	0.13	0.9	4.37	0.36	0.81	0.47	0.95	0.45	-1.81	0.20	0.92	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.41	97.82	0.59	0.00	0.00		
1	20	20	0.21	0.7	0.14	0.8	4.49	0.37	0.81	0.48	0.95	0.46	-1.90	0.21	0.91	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.12	0.28	0.45	96.93	0.55	0.00	0.00		
1	27	27	0.34	0.7	0.17	0.8	5.11	0.46	0.75	0.50	0.95	0.48	-1.98	0.21	0.90	0.28	0.18	0.28	0.18	0.28	0.18	0.28	0.67	83.70	0.33	0.00	0.00		
1	28	28	0.37	0.7	0.18	0.8	5.10	0.46	0.76	0.50	0.95	0.48	-2.05	0.22	0.88	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	0.72	78.29	0.28	0.00	0.00		
1	33	33	0.74	0.7	0.23	0.7	5.46	0.49	0.75	0.52	0.95	0.50	-2.10	0.22	0.87	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	1.31	20.06	0	0.00	0.00		
1	35	35	1.07	0.7	0.26	0.6	5.51	0.47	0.77	0.55	0.95	0.52	-2.13	0.22	0.86	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	1.77	5.95	0	0.00	0.00		
1	38	38	2.43	0.7	0.30	0.6	5.71	0.46	0.79	0.58	0.95	0.55	-2.13	0.22	0.85	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	0.20	0.27	3.66	0.24	0	0.00	0.00		

Figura 11: Planilla de cálculo, potencial de licuefacción.

## ANEXO B

### Índice de potencial de licuefacción según $M_w$ y $a_{max}$

Tabla 17: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 6.0$  y  $a_{max} = 0.3g$ .

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.00	No licua
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.00	No licua
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	1.35	Baja
SPT 7	0.00	No licua
SPT 8	0.00	No licua
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.00	No licua
SPT 13	0.00	No licua
SPT 14	0.00	No licua
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.00	No licua
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	0.68	Baja
SPT 26	0.00	No licua
SPT 27	0.00	No licua
SPT 28	0.00	No licua
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.00	No licua
SPT 32	0.00	No licua
SPT 33	0.00	No licua

Tabla 18: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 6.5$  y  $a_{max} = 0.3g$ .

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.00	No licua
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.00	No licua
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	1.93	Baja
SPT 7	0.09	Baja
SPT 8	0.00	No licua
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.00	No licua
SPT 13	0.00	No licua
SPT 14	0.00	No licua
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.00	No licua
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	1.17	Baja
SPT 26	0.38	Baja
SPT 27	0.00	No licua
SPT 28	0.00	No licua
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.00	No licua
SPT 32	0.00	No licua
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 19: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 7.0$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.00	No licua
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.07	Baja
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	2.83	Moderada
SPT 7	0.48	Baja
SPT 8	0.00	No licua
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.00	No licua
SPT 13	0.55	Baja
SPT 14	0.00	No licua
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.38	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	1.73	Baja
SPT 26	0.92	Baja
SPT 27	0.07	Baja
SPT 28	0.28	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.00	No licua
SPT 32	0.30	Baja
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 20: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 7.5$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.25	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.71	Baja
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	3.80	Moderada
SPT 7	1.03	Baja
SPT 8	0.10	Baja
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.39	Baja
SPT 13	1.58	Baja
SPT 14	0.25	Baja
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.79	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	2.47	Moderada
SPT 26	1.38	Baja
SPT 27	0.42	Baja
SPT 28	0.85	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.07	Baja
SPT 32	0.91	Baja
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 21: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.0$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.25	Baja
SPT 2	0.58	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	1.90	Baja
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	4.61	Moderada
SPT 7	2.10	Moderada
SPT 8	0.84	Baja
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.31	Baja
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.80	Baja
SPT 13	2.97	Moderada
SPT 14	2.53	Moderada
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	1.14	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	3.18	Moderada
SPT 26	1.77	Baja
SPT 27	0.73	Baja
SPT 28	1.32	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.39	Baja
SPT 31	0.47	Baja
SPT 32	2.55	Moderada
SPT 33	0.00	No licua



**Tabla 22: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.5$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.72	Baja
SPT 2	0.96	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	2.89	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	5.56	Alta
SPT 7	3.44	Moderada
SPT 8	2.06	Moderada
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.97	Baja
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	1.15	Baja
SPT 13	4.17	Moderada
SPT 14	5.01	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.38	Baja
SPT 19	1.44	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	3.85	Moderada
SPT 26	2.09	Moderada
SPT 27	1.13	Baja
SPT 28	1.91	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.80	Baja
SPT 31	0.86	Baja
SPT 32	4.50	Moderada
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 23: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 9.0$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	1.30	Baja
SPT 2	1.27	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	3.71	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	6.55	Alta
SPT 7	4.92	Moderada
SPT 8	3.70	Moderada
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	1.79	Baja
SPT 11	0.30	Baja
SPT 12	1.45	Baja
SPT 13	5.19	Alta
SPT 14	7.67	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	1.80	Baja
SPT 19	1.70	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	4.94	Moderada
SPT 26	2.61	Moderada
SPT 27	1.97	Baja
SPT 28	2.48	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	1.15	Baja
SPT 31	1.20	Baja
SPT 32	6.28	Alta
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 24: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 9.5$  y  $a_{max} = 0.3g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	1.85	Baja
SPT 2	1.53	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	4.40	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	7.40	Alta
SPT 7	6.35	Alta
SPT 8	5.15	Alta
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	2.50	Moderada
SPT 11	0.66	Baja
SPT 12	1.93	Baja
SPT 13	6.12	Alta
SPT 14	10.16	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	3.17	Moderada
SPT 19	1.93	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	6.30	Alta
SPT 26	3.53	Moderada
SPT 27	3.02	Moderada
SPT 28	3.09	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	1.56	Baja
SPT 31	1.49	Baja
SPT 32	7.79	Alta
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 25: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 6.0$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.00	No licua
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.00	No licua
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	2.52	Moderada
SPT 7	0.42	Baja
SPT 8	0.00	No licua
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.00	No licua
SPT 13	0.43	Baja
SPT 14	0.00	No licua
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.37	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	1.50	Baja
SPT 26	0.73	Baja
SPT 27	0.00	No licua
SPT 28	0.06	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.00	No licua
SPT 32	0.13	Baja
SPT 33	0.00	No licua

Tabla 26: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 6.5$  y  $a_{max} = 0.4g$ .

Nombre	LPI	
SPT 1	0.00	No licua
SPT 2	0.14	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	0.28	Baja
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	3.51	Moderada
SPT 7	0.89	Baja
SPT 8	0.00	No licua
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.00	No licua
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.37	Baja
SPT 13	1.34	Baja
SPT 14	0.00	No licua
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	0.77	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	2.17	Moderada
SPT 26	1.22	Baja
SPT 27	0.33	Baja
SPT 28	0.64	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.00	No licua
SPT 31	0.00	No licua
SPT 32	0.67	Baja
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 27: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 7.0$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.13	Baja
SPT 2	0.38	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	1.37	Baja
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	4.36	Moderada
SPT 7	1.86	Baja
SPT 8	0.60	Baja
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.30	Baja
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	0.77	Baja
SPT 13	2.72	Moderada
SPT 14	1.77	Baja
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.00	No licua
SPT 19	1.12	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	2.92	Moderada
SPT 26	1.62	Baja
SPT 27	0.65	Baja
SPT 28	1.14	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.36	Baja
SPT 31	0.43	Baja
SPT 32	2.08	Moderada
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 28: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 7.5$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.49	Baja
SPT 2	0.78	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	2.44	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	5.29	Alta
SPT 7	3.21	Moderada
SPT 8	1.68	Baja
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.93	Baja
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	1.12	Baja
SPT 13	3.94	Moderada
SPT 14	4.24	Moderada
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.08	Baja
SPT 19	1.42	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	3.63	Moderada
SPT 26	1.97	Baja
SPT 27	1.02	Baja
SPT 28	1.64	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.77	Baja
SPT 31	0.82	Baja
SPT 32	4.05	Moderada
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 29: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.0$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	1.00	Baja
SPT 2	1.12	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	3.34	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	6.31	Alta
SPT 7	4.69	Moderada
SPT 8	3.33	Moderada
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	1.74	Baja
SPT 11	0.21	Baja
SPT 12	1.42	Baja
SPT 13	4.99	Moderada
SPT 14	6.68	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	1.24	Baja
SPT 19	1.68	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	4.61	Moderada
SPT 26	2.49	Moderada
SPT 27	1.73	Baja
SPT 28	2.24	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	1.12	Baja
SPT 31	1.16	Baja
SPT 32	5.81	Alta
SPT 33	0.00	No licua



**Tabla 30: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.5$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	1.59	Baja
SPT 2	1.40	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	4.08	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	7.18	Alta
SPT 7	6.13	Alta
SPT 8	4.80	Moderada
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	2.45	Moderada
SPT 11	0.57	Baja
SPT 12	1.83	Baja
SPT 13	5.88	Alta
SPT 14	9.26	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	2.63	Moderada
SPT 19	1.91	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	5.89	Alta
SPT 26	3.29	Moderada
SPT 27	2.61	Moderada
SPT 28	2.90	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	1.52	Baja
SPT 31	1.46	Baja
SPT 32	7.38	Alta
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 31: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 9.0$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	2.09	Moderada
SPT 2	1.64	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	4.88	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	7.92	Alta
SPT 7	7.38	Alta
SPT 8	6.07	Alta
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	3.06	Moderada
SPT 11	0.89	Baja
SPT 12	2.48	Moderada
SPT 13	6.84	Alta
SPT 14	11.48	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	3.96	Moderada
SPT 19	2.11	Moderada
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	7.19	Alta
SPT 26	4.22	Moderada
SPT 27	3.93	Moderada
SPT 28	3.80	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	2.22	Moderada
SPT 31	2.07	Moderada
SPT 32	8.72	Alta
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 32: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 9.5$  y  $a_{max} = 0.4g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	2.50	Moderada
SPT 2	1.83	Baja
SPT 3	0.10	Baja
SPT 4	6.02	Alta
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	8.56	Alta
SPT 7	8.45	Alta
SPT 8	7.15	Alta
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	3.59	Moderada
SPT 11	1.16	Baja
SPT 12	3.33	Moderada
SPT 13	8.13	Alta
SPT 14	13.35	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	5.15	Alta
SPT 19	2.28	Moderada
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	8.30	Alta
SPT 26	5.01	Alta
SPT 27	5.13	Alta
SPT 28	4.59	Moderada
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	2.87	Moderada
SPT 31	2.68	Moderada
SPT 32	9.94	Alta
SPT 33	0.00	No licua

**Tabla 33: Valores LPI y categorización de ensayos para  $M_w = 8.8$  y  $a_{max} = 0.27g$ .**

Nombre	LPI	
SPT 1	0.73	Baja
SPT 2	0.98	Baja
SPT 3	0.00	No licua
SPT 4	2.93	Moderada
SPT 5	0.00	No licua
SPT 6	5.52	Alta
SPT 7	3.37	Moderada
SPT 8	1.95	Baja
SPT 9	0.00	No licua
SPT 10	0.88	Baja
SPT 11	0.00	No licua
SPT 12	1.11	Baja
SPT 13	4.11	Moderada
SPT 14	5.02	Alta
SPT 15	0.00	No licua
SPT 16	0.00	No licua
SPT 17	0.00	No licua
SPT 18	0.41	Baja
SPT 19	1.41	Baja
SPT 20	0.00	No licua
SPT 21	0.00	No licua
SPT 22	0.00	No licua
SPT 23	0.00	No licua
SPT 24	0.00	No licua
SPT 25	3.78	Moderada
SPT 26	2.10	Moderada
SPT 27	1.09	Baja
SPT 28	1.93	Baja
SPT 29	0.00	No licua
SPT 30	0.76	Baja
SPT 31	0.82	Baja
SPT 32	4.43	Moderada
SPT 33	0.00	No licua