



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

SUSCEPTIBILIDAD DE LICUEFACCIÓN EN LA COMUNA DE DOÑIHUE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

NICOLAS ESTEBAN LARA YÁÑEZ

PROFESOR GUÍA:

MARÍA FRANCISCA FALCÓN HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Nicolás Esteban Lara Yáñez
FECHA: 27/12/2013
PROFESOR GUÍA: Ma. Francisca Falcón

SUSCEPTIBILIDAD DE LICUEFACCIÓN EN LA COMUNA DE DOÑIHUE

El 27 de Febrero de 2010, a las 3:34 am hora local, ocurrió un sismo de magnitud 8,8 Mw en la zona central de Chile. El movimiento gatilló licuefacción en más de 120 sitios, en un radio máximo de 450 km desde el epicentro. Uno de los sitios afectados por el fenómeno fue la comuna de Doñihue, ubicada en la provincia del Cachapoal, región del Libertador Bernardo O'Higgins. En el sitio se observaron evidencias de licuefacción como grietas y asentamientos diferenciales de estructuras, dañando seriamente algunas de las viviendas del sector.

Con el objetivo de conocer las zonas más propensas a la licuefacción en la comuna, y al mismo tiempo aportar al plan de desarrollo comunal, se elaboró una metodología semicuantitativa de estimación de la susceptibilidad. En ella se evalúan y ponderan los factores que influyen en el desarrollo del fenómeno: granulometría, origen y edad de los depósitos, profundidad del nivel freático y amplitud de la vibración del terreno durante un sismo. A continuación se procedió a confeccionar una tabla evaluativa del potencial de licuefacción para cada uno, asociando las *características de sitio* a un valor o *clasificación* que resuma que tan favorable es esa característica para el desarrollo del fenómeno. Cada tabla está vinculada a un mapa temático elaborado en la plataforma ArcMap del software Arcgis, que muestra la *distribución geográfica* de las clasificaciones asignadas. Luego se procedió a estimar el peso o influencia de los factores en la evaluación de la susceptibilidad mediante un proceso iterativo de superposición de mapas temáticos. Una vez conseguida la combinación óptima se obtuvo un mapa preliminar. Cada zona de este mapa presenta un valor entero de 1 a 9 denominado Índice de Susceptibilidad (IS), catalogado cualitativamente como: **1-3, muy bajo; 4, bajo; 5, medio; 6, alto; 7-9 muy alto**. Posteriormente se procedió a elaborar una matriz de decisión, en la cual se muestran las combinaciones de los factores que dieron origen a las susceptibilidades obtenidas. Finalmente el mapa preliminar fue sometido a interpretación y revisión, en donde se corrigieron los errores propios de la metodología, obteniéndose el mapa final de susceptibilidad de licuefacción.

Las mayores susceptibilidades se obtuvieron sobre los depósitos aluviales arenosos limosos ubicados a los pies del cordón montañoso que rodea la comuna, a la salida de las quebradas mayores Chicahue y Las Vegas, y sobre depósitos fluviales con un nivel freático inferior a 15 metros y lentes de arena en profundidad.

En términos geográficos las áreas identificadas con una susceptibilidad alta a muy alta son las zonas rurales dedicadas al sector agrícola, las zonas urbanas de Doñihue (Camarico, Cerrillos, California, Rinconada y Doñihue), la localidad de Plazuela y el sector centro norte de Lo Miranda. Las menos susceptibles son las áreas forestales ubicadas sobre el cordón montañoso y la zona sur/sureste de Lo Miranda, en donde se encuentra el sector residencial e industrial del valle.

Conocí a un viajero de una tierra antigua
que dijo: «dos enormes piernas pétreas, sin su tronco
se yerguen en el desierto. A su lado, en la arena,
semihundido, yace un rostro hecho pedazos, cuyo ceño
y mueca en la boca, y desdén de frío dominio,
cuentan que su escultor comprendió bien esas pasiones
las cuales aún sobreviven, grabadas en estos inertes objetos,
a la mano que se mofó de ellas y al corazón que las alimentó.

Y en el pedestal se leen estas palabras:

"Mi nombre es Ozymandias, rey de reyes:
¡Contemplad mis obras, oh poderosos, y desesperad!"

No queda nada a su lado. Alrededor de las ruinas
de ese colosal naufragio, infinitas y desnudas
se extienden, a lo lejos, las solitarias y llanas arenas»

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mi familia por sobre todas las cosas, porque a pesar de las distintas circunstancias siempre me han acompañado, apoyado y alentado en cada cosa que he realizado y que estoy seguro lo seguirán haciendo.

A mis amigos que han compartido conmigo todos estos años, haciendo que el camino sea más fácil y más llevadero, gracias por todos esos momentos de relajo siempre necesarios.

A mis compañeros de trabajo, quienes me brindaron su ayuda y colaboración durante todo este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2	Ubicación del área de estudio.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo General.....	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Vías de acceso.....	3
1.5	Metodología.....	4
1.6	Definiciones.....	7
1.7	Trabajo de terreno.....	9
2	MARCO SISMOTECTÓNICO Y TERREMOTO DE 2010	10
2.1	Sismicidad en el área de estudio.....	10
2.2	Terremoto de 2010.....	11
2.3	El terremoto y la licuefacción.....	12
3	MARCO TEÓRICO	14
3.1	Licuefacción.....	14
3.2	Factores asociados al potencial de licuefacción.....	16
3.3	Evidencias superficiales del fenómeno de licuefacción.....	17
3.4	Estudios previos del potencial de licuefacción.....	22
4	ANTECEDENTES DEL ÁREA EN ESTUDIO	30
4.1	Geología.....	30
4.1.1	Rocas Estratificadas.....	30
4.1.2	Rocas no estratificadas.....	32
4.1.3	Depósitos cuaternarios.....	32
4.2	Geografía y Geomorfología.....	35
4.2.1	Descripción.....	35
4.2.2	Interpretación.....	36
4.3	Hidrología.....	39
5	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN	41
5.1	Granulometría y origen de los depósitos.....	41
5.2	Amplitud y duración de la vibración del terreno.....	46
5.3	Edad de los depósitos.....	48
5.4	Profundidad del nivel freático.....	48

5.5	Resumen de resultados.....	51
5.5.1	Tablas de Evaluación del potencial de licuefacción.....	51
5.5.2	Mapas temáticos del potencial de licuefacción	52
6	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD	53
6.1	Introducción	53
6.2	Resultados	53
7	DISCUSIONES.....	56
7.1	Respecto a los factores que influyen en la licuefacción	56
7.2	Respecto a la Metodología.....	57
7.3	Respecto a la evaluación del potencial de licuefacción	57
7.4	Respecto a la susceptibilidad final.....	59
7.5	Respecto a las medidas de mitigación	60
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
9	REFERENCIAS	62
10	ANEXOS	68

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

El 27 de Febrero de 2010 Chile se vio azotado por un terremoto de magnitud 8,8Mw, siendo uno de los más destructivos de su historia. Su epicentro se ubicó frente a las costas de las localidades de Curanipe y Cobquecura, entre la VII y VIII región, y a más de 30 km bajo la corteza terrestre. Vino acompañado además por un tsunami que devastó las costas de la zona central del país. De acuerdo a conteos oficiales el número de víctimas totales ascendió por sobre las 500 personas, dentro de los cuales se contabilizan 156 personas fallecidas producto del tsunami, tanto por asfixia como por los traumatismos producto del impacto de las olas. Los daños se estiman del orden de US\$30.000 millones, equivalentes al 15% del producto interno bruto.

En la comuna de Doñihue, VI región, producto del sismo del 27 de febrero, se observó licuefacción de suelos, principal causante del daño ocasionado por terremotos (Zeng, 2006) y responsable de parte importante de las averías en la red vial, viviendas y del servicio de agua potable, luz y gas.

La licuefacción es un fenómeno en el cual los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua, se separan, debido a vibraciones generadas comúnmente por terremotos, tronaduras, u otro fenómeno de similares características. Estas vibraciones actúan elevando la presión de agua de los poros. Si ésta llega a igualar o superar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia se reduce a cero (Falcón y Ramírez, 2012). El sedimento cae y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado son fenómenos como desplazamientos y/o fallas de terreno, volcanes de arena, asentamientos diferenciales, etc.

Los terrenos susceptibles de experimentar licuefacción correspondan a suelos formados por sedimentos no consolidados, de baja a nula compactación y saturados de agua. Se trataría, principalmente, de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y en menor medida aluviales (Falcón et al., 2010).

De acuerdo a la Hoja Rancagua - San Vicente de Tagua Tagua de Godoy et al. 2009, las principales localidades de la comuna (Doñihue y Lo Miranda) se encuentran emplazadas sobre depósitos aluviales de valle de edad Pleistocena-Holocena, de tipo no consolidados, estratificados, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas.

Por otra parte, la Hoja Hidrográfica de Rancagua 1990 propuesta por Hauser Y.A. indica que en algunas zonas de la comuna la profundidad del nivel freático es inferior a los 5 metros.

Estos factores, sumados a que ya existe evidencia de licuefacción en la zona de acuerdo a datos recogidos en 2012 en estudios previos del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), enmarcados en el proyecto GOT de Rancagua de la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial, dan a la comuna características altamente favorables para el desarrollo de la licuefacción, lo que la transforma en una zona de interés para el estudio de la susceptibilidad del fenómeno.

1.2 Ubicación del área de estudio

La comuna de Doñihue está ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en la comuna de Cachapoal, a 21 km hacia el sur oriente de la ciudad de Rancagua, entre los 70,5 y 70,6° de longitud Oeste y los 34,08 y 34,15° de latitud Sur, extendiéndose sobre una superficie de 88,2 Km² (Figura 1).

Geomorfológicamente se ubica en el extremo este de la Subsubcuenca de Río Cachapoal entre el estero Las Cadenas y río Claro (Dirección General de Aguas, DGA).

Según la división Político-Administrativa limita al norte con la Región Metropolitana, al oriente con la comuna de Rancagua, al poniente con la comuna de Coltauco y al sur con las comunas de Olivar y Coinco.

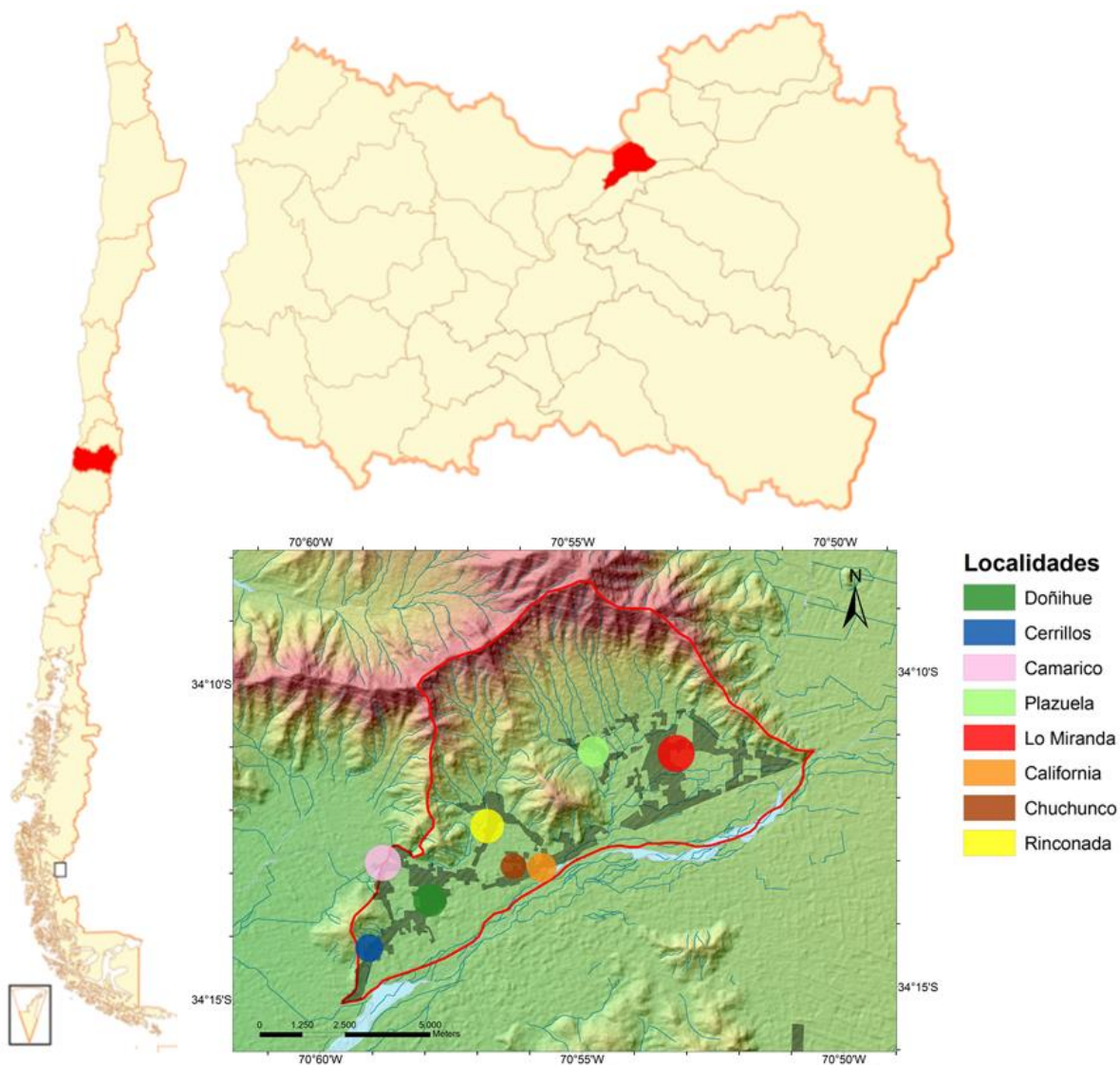


Figura 1: Ubicación del área de Estudio. A la izquierda Chile, en rojo la Región del Lib. Bernardo O'Higgins. Arriba a la derecha ubicación de la comuna de Doñihue. Abajo a la derecha imagen satelital del área en estudio.

1.5 Metodología

En 1994, la American Water Works Association (AWWA), determinó que existen 7 factores que influyen en el potencial de un suelo para licuarse, estos son: Distribución del tamaño de los granos; profundidad de las aguas subterráneas; amplitud y duración de vibración del terreno; peso del recubrimiento y profundidad del suelo; y finalmente densidad, edad y origen de los depósitos (Detalles en capítulo 3.2).

De ellos sólo 5 serán considerados para la evaluación de la susceptibilidad, debido a falta de datos para una correcta estimación de la densidad y el peso del recubrimiento y profundidad del suelo. A esto se suma la alta interdependencia de la densidad con el resto de los factores la cual, a pesar de su gran importancia, puede ser supuesta indirectamente a través de una buena caracterización de la granulometría y origen del depósito. Se realizará un mayor análisis en el capítulo xxx.

Los factores serán finalmente agrupados en 4 categorías:

- Granulometría y origen de los depósitos
- Profundidad del nivel freático
- Edad de los depósitos
- Amplitud y duración de vibración de los depósitos

Una vez realizado el análisis de estos factores, se procederá a confeccionar una tabla evaluativa del potencial de licuefacción para cada uno, asociando las *características de sitio* a un valor o *clasificación* que resuma que tan favorable es esa característica para el desarrollo del fenómeno de licuefacción. Esta clasificación irá de 1 a 9, de menos a más favorable respectivamente, y utilizará sólo valores enteros impares (1, 3, 5, 7, 9).

Por ejemplo, suponiendo un caso simple, si se pretende evaluar la profundidad del nivel freático y se tiene que en la zona de estudio éste puede ser profundo, intermedio o superficial, podría obtenerse lo siguiente (Tabla 1):

Tabla 1: Ejemplo de tabla de evaluación del potencial de licuefacción

Profundidad del nivel freático	Clasificación
Profundo	1
Intermedio	5
Superficial	9

De esta forma se está zonificando la zona de estudio de acuerdo a las diferentes características presentes y asignándole un valor absoluto a cada una, facilitando la identificación y manipulación de la información.

Cada tabla estará vinculada a un mapa temático elaborado en la plataforma ArcMap del software Arcgis, que muestre la *distribución geográfica* de las características definidas para cada factor y la *clasificación* de cada una.

Posteriormente se procederá estimar el **peso o influencia** de cada factor en la evaluación de la susceptibilidad de licuefacción. Esto se realizará mediante un proceso iterativo de superposición de los mapas temáticos elaborados previamente. La superposición se llevará a cabo utilizando la herramienta Weighted Overlay de la plataforma Arcmap del software ArcGis. Lo

que se busca durante esta etapa es establecer la combinación efectiva que mejor relacione las zonas históricamente licuadas con las clasificaciones más altas que, de acuerdo a la metodología elaborada, serían aquellas más susceptibles a licuar.

Una vez conseguida la combinación óptima se obtendrá un mapa preliminar de susceptibilidad de licuefacción. En el mapa se observará la zonificación alcanzada como resultado de la ponderación de los factores en base a la clasificación asignada a cada área. Cada zona de este mapa preliminar presentará un valor entero de 1 a 9, que será llamado de ahora en adelante “Índice de Susceptibilidad” o IS. (La clasificación, luego de la ponderación, arrojará un número decimal redondeado al entero más cercano debido a las limitaciones del programa empleado, por ello no se utilizan valores decimales).

Los valores del IS serán asignados a rangos de susceptibilidad de la siguiente forma: **1-3**, *muy bajo*; **4**, *bajo*; **5**, *medio*; **6**, *alto*; **7-9** *muy alto*.

Posteriormente, para facilitar el acceso a la información, se procederá a elaborar una matriz de decisión, en la cual se muestren las combinaciones de los factores que dieron origen a los rangos de susceptibilidades finales obtenidos.

Una vez asignadas las susceptibilidades el mapa será sometido a interpretación, en donde se corregirán errores propios de la metodología. Por último, luego de finalizada la revisión y aplicadas las correcciones, se obtendrá el mapa final.

El resumen de la metodología se muestra en la Figura 3.

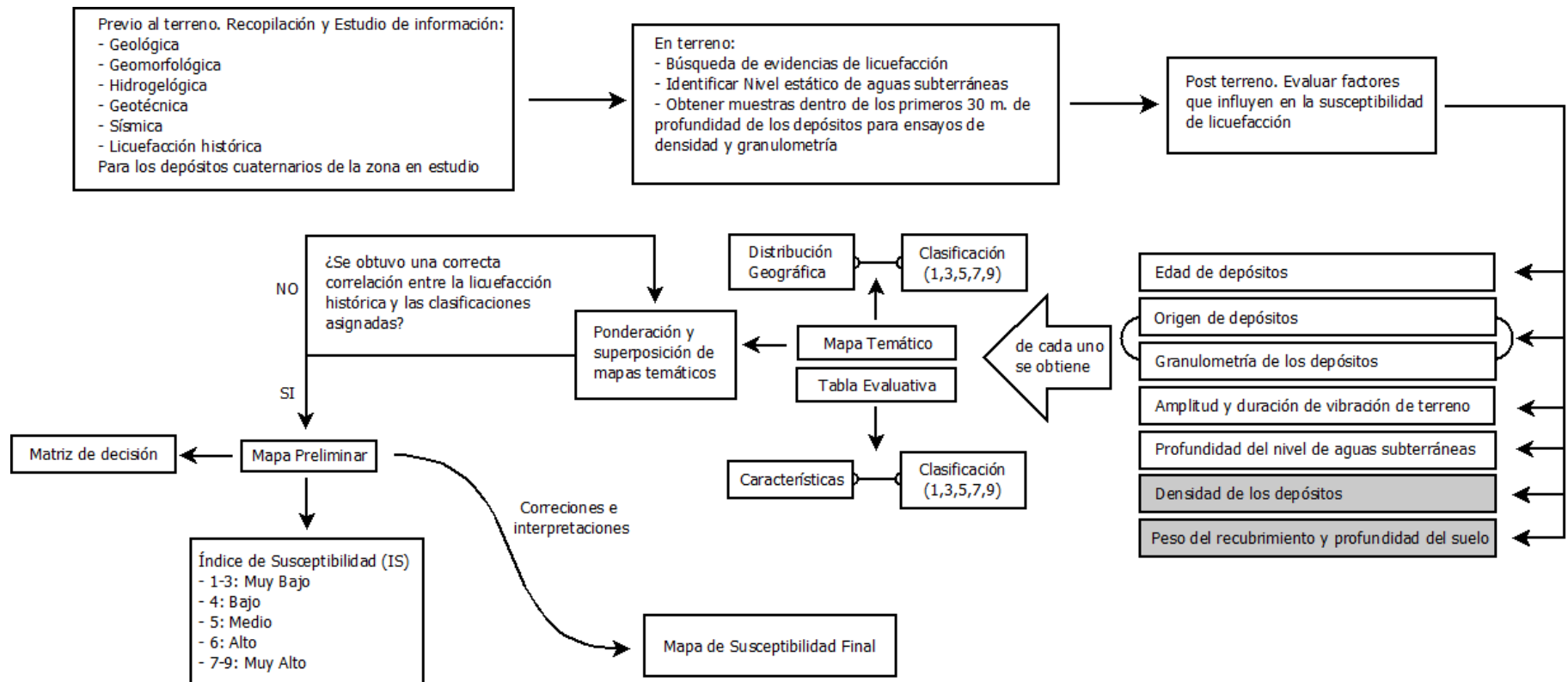


Figura 3: Esquema de la metodología propuesta.

1.6 Definiciones

El manejo de los conceptos peligro, riesgo, amenaza, vulnerabilidad y susceptibilidad es imprescindible en este y en cualquier trabajo relacionado con la identificación, caracterización, evaluación y diagnóstico de zonas que podrían verse adversamente afectadas por fenómenos geológicos de diversa índole y magnitud.

Las definiciones que se darán a conocer a continuación fueron extraídas de los trabajos de Oliver y Renet, 1976; Varnes, 1984; y Tadashi, 1995

Peligro o amenaza (H): Condición o proceso geológico potencialmente catastrófico. Existen dos tipos de peligros distinguibles:

- Peligro declarado o actual es una condición o proceso geológico que constituye un peligro y que se ha producido en el pasado o está en evolución, dejando evidencias geomorfológicas, sedimentológicas o de otra naturaleza que permiten identificarlo.
- Peligro potencial, por otro lado, es la condición o proceso geológico que potencialmente puede ocurrir en el futuro en una determinada zona, constituyendo un peligro geológico. Se define a través del análisis de factores desfavorables que pueden inducir el peligro o actualizarlo.

Grado de peligro o peligrosidad (H): Probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante cierto periodo de tiempo en un sitio determinado.

Elementos bajo riesgo (E): corresponden a la población, las propiedades, las actividades económicas u otros, que se encuentran bajo riesgo en un área determinada. Los elementos bajo riesgo son cuantificables y se les puede aplicar una unidad de valor.

Vulnerabilidad (V): corresponde al grado de pérdida de elementos bajo riesgo en caso de ocurrir un evento peligroso. La vulnerabilidad puede ser medida en una proporción (0 a 100%) del costo susceptible a ser perdido por la ocurrencia de un evento peligroso dado.

Riesgo comprende dos subdefiniciones:

- Riesgo específico (Rs): corresponde al grado de pérdida esperado debido a un fenómeno peligroso particular.

$$R_s = H * V$$

- Riesgo total (R): número esperado de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad, daños a la actividad económica u otros, que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984).

$$R = E * R_s$$

$$R = E * H * V$$

Catástrofe: perturbación repentina y violenta de la naturaleza, atribuida a causas naturales excepcionales, que afectan las condiciones físicas de la superficie terrestre.

Desastre: interacción de un fenómeno geológico catastrófico y una comunidad u obra humana, que causa alteraciones intensas en las personas, los bienes, los servicios y/o el ambiente. Un desastre es la ocurrencia efectiva de un fenómeno peligroso que, como consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos adversos sobre los mismos.

Evaluación de Peligros: técnica de naturaleza predictiva cuyo objetivo es identificar los tipos de eventos peligrosos, determinar la frecuencia de tales eventos y definir las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia.

Evaluación o Análisis de Riesgo: técnica que, a partir de la evaluación de peligros, trata de cuantificar las informaciones, correlacionando la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos con la probabilidad de consecuencias indeseables, estimándose los daños y realizándose estudios de vulnerabilidad.

Susceptibilidad: capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada o generar un proceso geológico determinado.

Periodo de Retorno: intervalo de tiempo en el que se puede producir un suceso de un determinado nivel y se calcula por medios estadísticos.

Una metodología para enfrentar estos estudios es a través del esquema conceptual mostrado en la Figura 4.¹

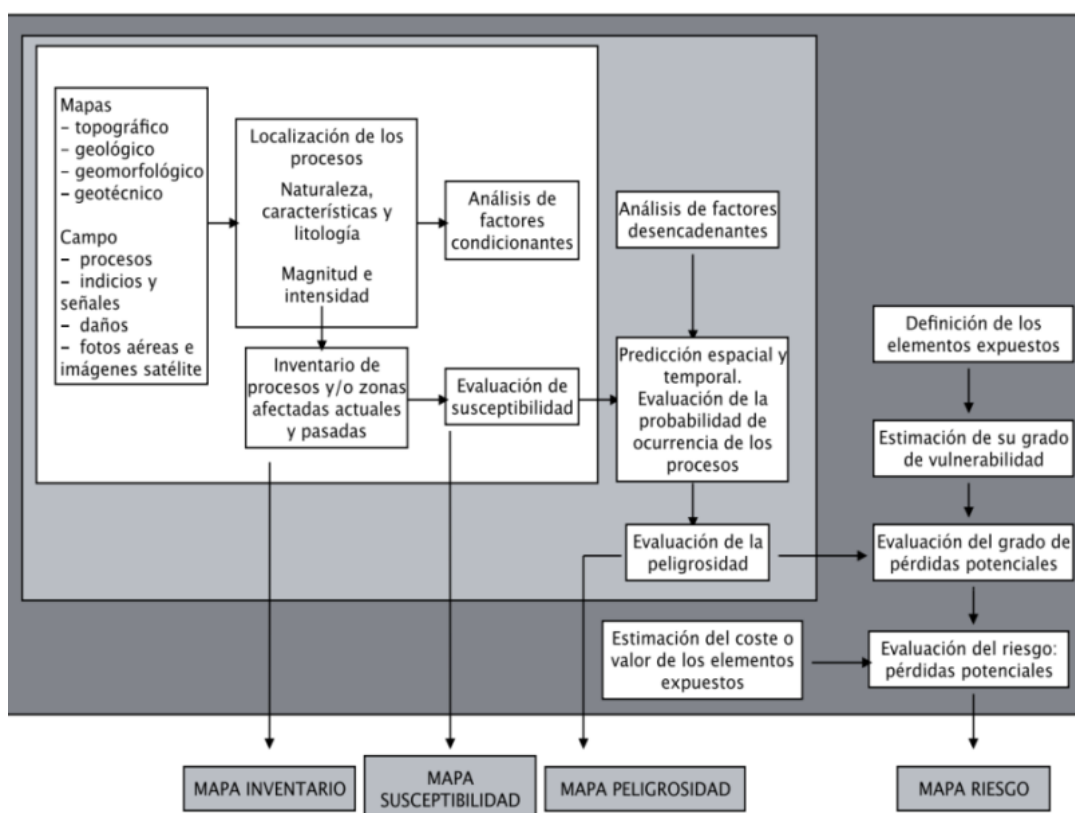


Figura 4: Esquema metodológico para la elaboración de mapas de peligrosidad, susceptibilidad y riesgo, según Ferrer (1991)

¹ Toda la información contenida en este capítulo fue recogida de la Memoria de Título "Determinación del peligro de flujos de detritos en la quebrada de Macul, cuenca de Santiago" de Natalia Garrido.

1.7 Trabajo de terreno

Durante el trabajo de memoria se realizó una salida a terreno en el mes de enero de 2013. Aquí se ejecutó una labor de levantamiento de datos respecto a del nivel freático de la comuna, lo que se logró midiendo la profundidad del nivel estático de aguas en diversas norias de vecinos del sector (Anexo E)

Se realizó además un refinamiento de la geología, detallando las unidades que en la Hoja de Rancagua se identifican como depósitos aluviales de valle y depósitos aluviales de piedemonte y quebradas. (Marco Geológico).

Por último se realizó un catastro de las áreas con evidencias de licuefacción, considerando los trabajos realizados en terreno durante el año 2013 y en campañas previas enmarcadas en el proyecto GOT Rancagua (Anexo H).

Todo el trabajo realizado en campañas de terreno se resume en la Figura 5 y Anexo D.

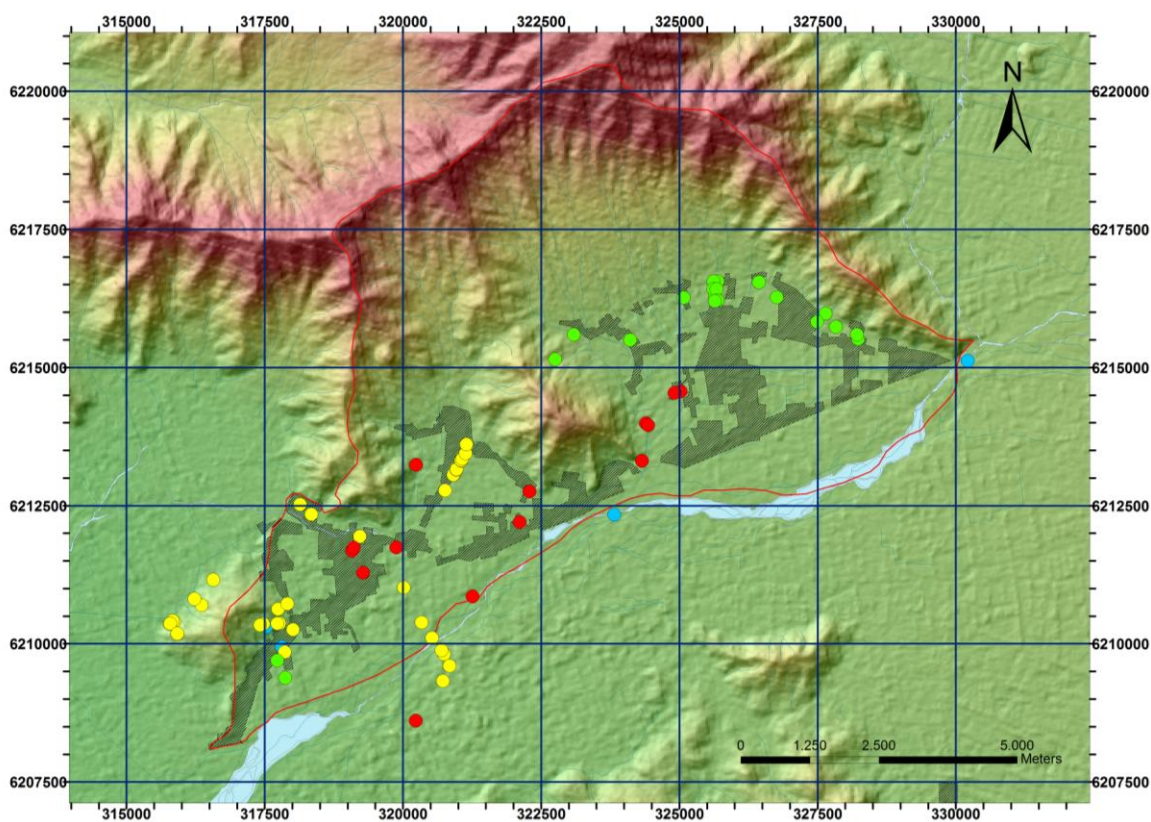


Figura 5: Distribución de campañas de terreno. En celeste: 05/2012, amarillo: 06/2012, rojo: 10/2012 y verde: 01/2013

2 MARCO SISMOTECTÓNICO Y TERREMOTO DE 2010

2.1 Sismicidad en el área de estudio

Para nadie es un secreto que Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, en él se liberó durante el siglo pasado más del 40% de la energía sísmica del planeta. La mayor parte de su territorio se encuentra en el contacto por subducción de las placas de nazca y sudamericana, siendo afectado por 3 tipos de sismos: interplaca, intraplaca de profundidad intermedia y corticales (Leyton, 2010).

Dentro de los límites de la comuna de Doñihue, y en general, dentro de todo el margen asociado a la depresión intermedia, existe un predominio de epicentros sísmicos tipo intraplaca de profundidad intermedia, sin embargo esto no excluye a la zona de ser afectada por sismos de carácter cortical o de interplaca, siendo estos últimos los que alcanzan magnitudes mayores.

El terremoto de 2010, con una magnitud de 8,8Mw, ha sido el más devastador de los terremotos históricos que han afectado la VI región. Otros movimientos con magnitudes iguales o superiores a 8,0 que han generado daño en esta zona son el de Valparaíso de 1730, con una magnitud de 8.75Mw estimada a partir de la intensidad de daño (Leyton, 2010), y el de Algarrobo de 1985, con una magnitud de 8,0Mw.

Sin embargo, son las aceleraciones sísmicas y no directamente la magnitud o intensidad de un sismo las verdaderas responsables del fenómeno de licuefacción (ver Capítulo 3.4).

Las aceleraciones se miden como aceleraciones horizontales máximas (PGA). Se utiliza este parámetro al momento de evaluar la sismicidad debido a que se relaciona de mejor forma con terremotos de gran magnitud (Kramer, 1996).

Leyton, 2010, realizó un estudio de las aceleraciones máximas esperadas para la región metropolitana y parte de la V y VI regiones. Calculó que para un periodo de vida útil de 50 años (Como el usado en gran parte de las obras de gran envergadura), equivalente a un periodo de retorno de 475 años, las aceleraciones máximas esperadas en la comuna de Doñihue, de acuerdo a lo que se deduce de sus mapas, pueden llegar a 0,6g (Figura 6), más del doble de lo que indica la norma chilena de construcción (Nch433). Para periodos de vida útil mayores las aceleraciones máximas estimadas pueden llegar incluso a 0,8g.

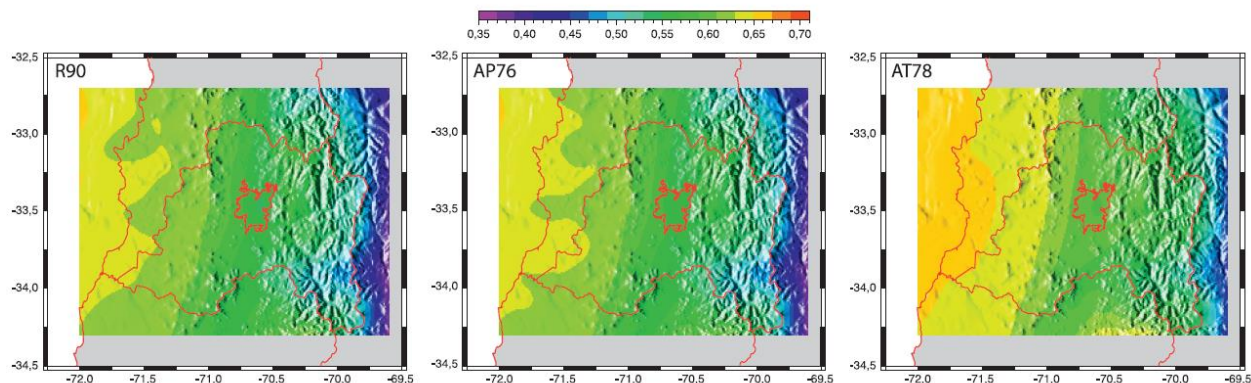


Figura 6: Aceleración horizontal máxima esperada, para un período de vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10% (equivalente a un período de retorno de 475 años). El color presentado es proporcional al PGA (en g), de acuerdo a la escala mostrada en el borde superior (Leyton, 2010).

2.2 Terremoto de 2010

A las 3:34 am (hora local) del sábado 27 de febrero de 2010, Chile se vio azotado por un sismo de una magnitud de 8,8 Mw de tipo interplaca (U.S. Geological Survey, 2010). El epicentro se localizó a 43 km al SO de Cobquecura y a 30,1 km bajo la corteza terrestre, en la provincia de Ñuble, Región del Biobío (Servicio Sismológico Universidad de Chile, 2010).

Es el mayor terremoto ocurrido en Chile desde el de Valdivia de 1960 (Mw 9.5) y uno de los más grandes en el mundo, siendo el primer terremoto de magnitud superior a Mw 8.0 registrado instrumentalmente en el campo cercano (Ruiz y Madariaga, 2012).

Presentó un área de ruptura de 450km de largo (Verdugo et al. 2012). Los desplazamientos horizontales máximos registrados alcanzaron amplitudes mayores a 3 metros en la zona de la península de Arauco y superiores a 15 metros en el fondo oceánico (Moreno et al. 2012). Por otro lado los levantamientos y hundimientos máximos en la zona costera fueron levemente inferiores a los 3 metros y también fueron registrados en la península de Arauco (Vargas et al. 2010).

Las zonas más afectadas fueron las regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Biobío y La Araucanía, las cuales acumulan más de 13 millones de habitantes, cerca del 80% de la población del país.

El 21% de los valores de intensidad obtenidos fueron mayores a VII (Ruiz y Astroza, 2012, Figura 7 izquierda), no existiendo reportes de intensidades iguales o superiores a IX. Otros estudios sugieren que la intensidad máxima reportada fue de IX, y se ubicó en la ciudad de Concepción (ONEMI-DIREMER, 2010). Estudios posteriores proponen que las intensidades mayores a VIII se concentraron en 3 sectores: la localidad de Navidad, la zona costera desde Pichilemu hasta Constitución y la depresión intermedia en las localidades de Cauquenes y Parral (Verdugo et al., 2012, Figura 7 derecha).

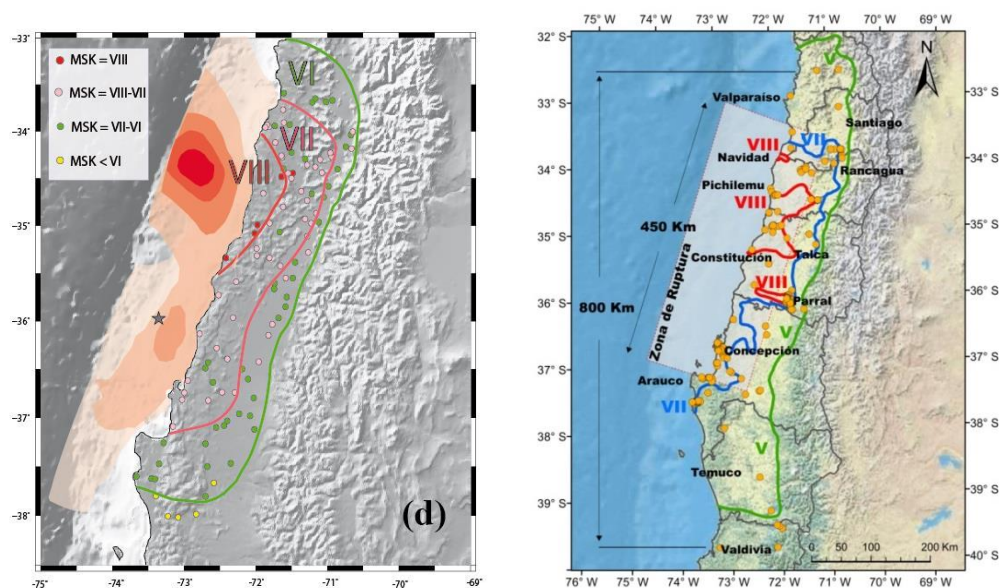


Figura 7: Izquierda: Isosistas terremoto 27F (Ruiz & Astroza, 2012). Derecha: Distribución de intensidades propuestas por Verdugo et al, en el informe “MW=8.8 terremoto en Chile 27 de febrero 2010; Cap. 4: Características y efectos del fenómeno de licuefacción.”

El movimiento sísmico generó un tsunami que alcanzó las costas de la zona centro sur del país y las islas del archipiélago Juan Fernández. Las mayores olas se generaron en un periodo que va entre unos pocos minutos a varias horas después de ocurrido el terremoto (Barrientos, 2012), alcanzando un altura promedio de casi 10 metros. La altura máxima alcanzada por el tsunami fue de 27 metros y ocurrió en la costa de Constitución (Fritz et al. 2011)

El número total de víctimas fatales por causa directa del terremoto/tsunami fue de 523, de las cuales 156 fueron producto del tsunami (Ministerio del Interior y Seguridad Pública), esto sin considerar las personas desaparecidas.

2.3 El terremoto y la licuefacción

Resulta importante señalar que un número no despreciable de profesionales de la comunidad geotécnica nacional, antes del terremoto del 27F, eran de la opinión que en Chile el fenómeno de licuefacción no era relevante. Esto se debe principalmente a que la comunidad internacional de Ingeniería Civil tomo conciencia de la existencia del fenómeno recién en 1964, con los terremotos de Niigata y Alaska, por lo que las evidencias de licuefacción presentes en el terremoto de 1960 en Valdivia pasaron inadvertidas. Esto, sumado a que el terremoto de 1985 generó casi nula licuefacción, plasmaron la idea de que la ocurrencia del fenómeno en Chile, dejando de lado los tranques de relaves, era prácticamente nula. (Verdugo et al, 2012).

El terremoto de 2010 gatilló licuefacción en más de 120 sitios, a una distancia máxima desde el epicentro del sismo del orden de 450 km hacia el norte, en el tranque de relaves Veta del Agua en la comuna de Nogales, y 400 km hacia el sur, en la ciudad de Valdivia y en los lagos Calafquen y Panguipulli. Considerando el área de ruptura, la licuefacción ocurrió a alrededor de 100 km al norte de su extremo septentrional y a poco más de 250 km hacia el sur de su extremo meridional.

La diferencia entre los las distancias a las cuales ocurrió licuefacción desde la zona de ruptura pueden explicarse por los tipos de depósitos y el nivel freático de la zona. Hacia el norte de La Calera, los depósitos de suelos arenosos saturados disminuyen considerablemente, siendo más común la presencia de suelos gruesos, suelos finos y napas profundas. En cambio hacia el sur de Concepción existen abundantes depósitos arenosos saturados, especialmente en bordes de ríos y lagos (Verdugo et al, 2012).

Verdugo et al, 2012, ha clasificado los sitios afectados a licuefacción según las condiciones de terreno y/o estructuras afectadas como sigue (Figura 8):

- Terreno relativamente planos
- Lateral spreading
- Tranques de relaves
- Puentes y pasos desnivel
- Puertos y muelles
- Estructuras enterradas

Cada clasificación menciona características particulares de los sitios afectados, junto con imágenes y observaciones de terreno. Además se entrega una base de datos con todos los puntos en los que se observó licuefacción.

Un registro de las aceleraciones sísmicas registradas en Chile durante el terremoto puede encontrarse en el Anexo E.

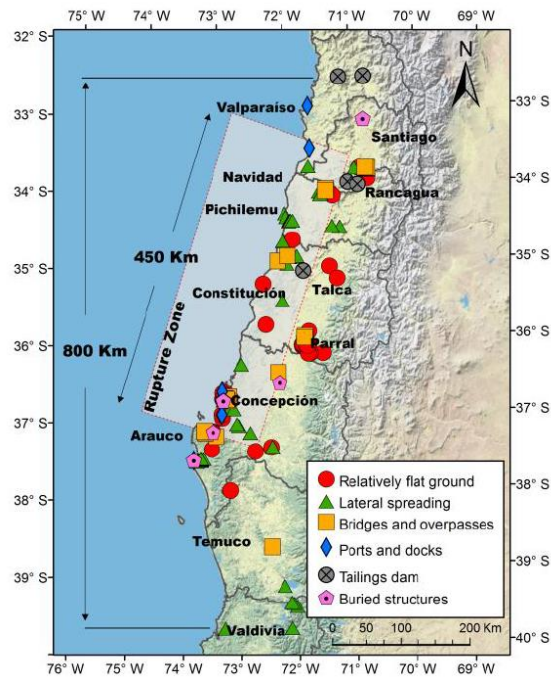


Figura 8: Distribución de los puntos en que se evidenció licuefacción, junto con clasificación correspondiente. (Verdugo et al. 2012)

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Licuefacción

El término liquefaction (traducido como licuefacción o licuación) habría sido acuñado por Hazen (1920) al referirse a la falla de la Presa Calaveras, ocurrida el 24 de marzo de 1918. Esta presa experimentó una falla de talud repentina durante su construcción, sin una aparente perturbación que la gatillara. De acuerdo a Hazen, se liberaron aproximadamente 730 mil metros cúbicos de material que se deslizaron a través de una distancia de alrededor de 90 metros. (Verdugo, 2006).

Años más tarde Terzaghi and Peck (1948) se refirieron como “licuefacción espontánea” a la transformación repentina de arenas sueltas en un flujo viscoso gatillada por una ligera perturbación. Éste fenómeno fue considerado como la principal causa de fallas de talud que tendían a ocurrir en depósitos saturados de arenas limosas finas (Ishihara, 1993).

Una de las definiciones más aceptadas fue acuñada por Youd (1973) quien, en base a ensayos de laboratorio realizados por Seed y Lee (1966), caracterizó el fenómeno como la “Transformación de un material granular desde un estado sólido a un estado licuado como consecuencia de un incremento de la presión de poro y una reducción del stress efectivo”. (Figura 9).

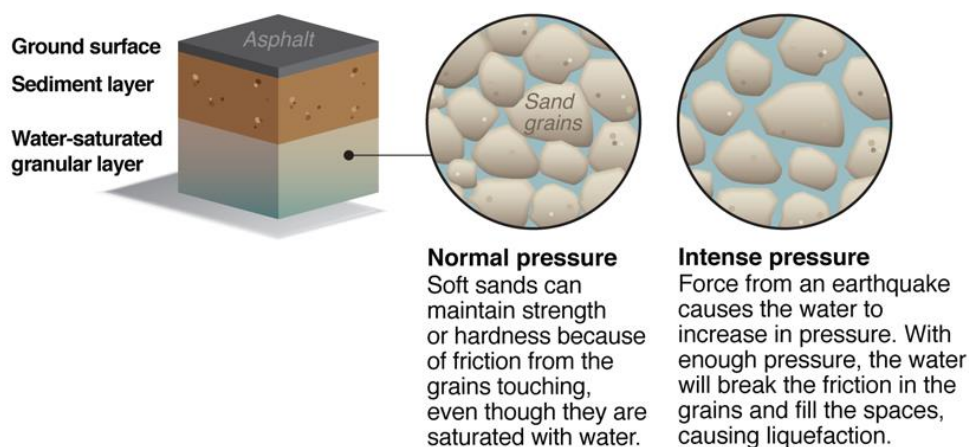


Figura 9: Figura esquemática del proceso de licuefacción popularmente entendido. (Brian Cragin, fuente: California Watch research).

Un par de años más tarde el profesor Casagrande (1975) determinó que en realidad existían dos tipos de fenómenos de licuefacción, cuya característica común era el incremento en la presión de poros. Uno estaba relacionado a la pérdida de *rigidez*, acuñando el término de **movilidad cíclica**; y otro vinculado a la pérdida de *resistencia*, al que denominó **licuación verdadera** (Éste último es conocido actualmente como **licuación de flujo** debido a su semejanza a un fluido viscoso).

A continuación se profundizará en los conceptos antes mencionados. La información fue extraída y traducida de Geotechnical Earthquake Engineering (Kramer, 1996).

La licuación de flujo produce los más grandes daños a las estructuras de entre todos los fenómenos relacionados a la licuefacción, debido a inestabilidades conocidas como **fallas de flujo**. Ocurre cuando el “*esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático de una masa de suelo (esfuerzo de corte estático) es mayor que el esfuerzo de corte del suelo en su estado*

licuado”. Una vez gatillada, las grandes deformaciones producidas por la licuefacción de flujo son conducidas por los estreses de corte estático. Los estreses cíclicos pueden llevar al suelo a un estado inestable en el cual su resistencia cae lo suficiente para permitir a los estreses estáticos producir fallas de flujo. Las fallas de la licuefacción de flujo se caracterizan por la naturaleza repentina de su origen, la velocidad con la cual se desarrollan y las grandes distancias sobre las cuales los materiales licuados se mueven. Ejemplos de licuefacción de flujo son los ocurridos durante los terremotos de Alaska y Niigata 1964 (Figura 10²) y las fallas producidas en las presas Sheffield y Lower San Francisco.



Figura 10: A la izquierda: Licuefacción de flujo en The Turnagain Heights, Alaska, durante el terremoto de 1964 el cual se piensa fue gatillado por la licuación de lentes de arenas en un área deslizada de 130 acres. A la derecha: Pérdida de la capacidad soporte del complejo de departamentos en Kawagishi-cho durante el terremoto de Niigata de 1964.

La movilidad cíclica es otro fenómeno que también puede producir grandes deformaciones durante un movimiento sísmico. En contraste con la licuefacción de flujo, la movilidad cíclica ocurre cuando el “*esfuerzo de corte estático es menor que el esfuerzo de corte del suelo licuado*”. Las deformaciones producidas por movilidad cíclica se incrementan con el desarrollo del terremoto. En contraste a la licuefacción de flujo, las deformaciones producidas por la movilidad cíclica son conducidas tanto por el esfuerzo de corte cíclico como estático. Estas deformaciones, denominadas **lateral spreading**, pueden ocurrir en pendientes suaves o en terrenos planos adyacentes a cuerpos de agua. En presencia de estructuras pueden generar un daño significativo.

Un caso especial de movilidad cíclica es la licuefacción a nivel del suelo. Debido a que no existen esfuerzos de corte estáticos que puedan controlar las deformaciones laterales, la licuefacción a nivel del suelo durante un sismo puede producir grandes y caóticos movimientos conocidos como **oscilaciones de terreno**, que a la vez generan pequeños desplazamientos permanentes en el suelo. Las fallas en este tipo de licuefacción son producidas por el ascenso de flujos de agua que ocurren cuando se disipa el exceso de presión de poro acumulado por el movimiento sísmico. Dependiendo de la cantidad de tiempo requerido para alcanzar el equilibrio hidráulico, las fallas asociadas a esta licuefacción pueden ocurrir después del cese del sismo. Los **asentamientos verticales**, **anegamientos de terrenos de baja altitud** y **volcanes de arena** son evidencias superficiales de fallas producidas por licuefacción de suelos (más en profundidad en capítulo 4.3).

² <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html>

3.2 Factores asociados al potencial de licuefacción

La experiencia ha demostrado que existen siete factores importantes para determinar el potencial de un suelo para licuarse (AWWA, 1994):

1. Distribución del tamaño de los granos
 2. Densidad
 3. Profundidad a las aguas subterráneas
 4. Peso del recubrimiento y profundidad del suelo
 5. Amplitud y duración de la vibración del terreno
 6. Edad del depósito
 7. Origen del suelo
1. Distribución del tamaño de los granos: La arena uniformemente graduada, con granos pocos finos o muy gruesos (arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo cargas cíclicas muy severas.
 2. Densidad: La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando la presión intersticial se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licúa. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.
 3. Profundidad de las aguas subterráneas: Puede ocurrir licuefacción si existe agua subterránea en el punto de la columna del suelo donde se está produciendo la densificación. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
 4. Peso del recubrimiento y profundidad del suelo: Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 30 pies (9 metros); rara vez ocurre a profundidades mayores de 50 pies (15 metros).
 5. Amplitud y duración de la vibración del terreno: La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.
 6. Edad del depósito: Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos anteriores al pleistoceno tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse

excepto si sufren una vibración bastante fuerte, mientras que los depósitos del holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.

7. *Origen del suelo:* El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común de décadas pasadas era la colocación de los rellenos hidráulicamente. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

3.3 Evidencias superficiales del fenómeno de licuefacción

Cuando la licuación es acompañada por algún tipo de desplazamiento o falla del terreno, sus efectos destructivos pueden tomar muchas formas, entre ellas: falla de flujo, desplazamiento lateral, oscilación del terreno, pérdida de capacidad portante, asentamientos, e incrementos en las presiones laterales sobre muros de contención y pilotes.

A continuación se amplían los conceptos relacionados con algunas de las formas destructivas en las que se manifiesta el fenómeno de licuación. Todas las definiciones fueron recogidas de Bartlett & Youd (1992).

Falla de flujo

Es el tipo de falla más catastrófico causado por la licuación, ya que por lo general desplaza grandes masas de suelo por decenas de metros. Los flujos pueden estar compuestos de suelo completamente licuado o por bloques intactos de material flotando sobre la capa de suelos licuados. Los flujos se presentan en arenas, limos sueltos y saturados, y en taludes con pendientes superiores a los 3 grados. Figura 11³.



Figura 11: Falla de terreno producto de la licuefacción en un depósito de relleno al norte del Puente La Mochita, Concepción, Chile, durante el terremoto del 27 de Febrero de 2010.

³ <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/005.cfm>

Desplazamiento lateral

El corrimiento lateral involucra el desplazamiento de grandes bloques de suelo como resultado de la licuación. El desplazamiento ocurre en respuesta a la combinación de las fuerzas de la gravedad y las inerciales generadas por el sismo. Los desplazamientos laterales se presentan por lo general en pendientes suaves (comúnmente menores a los 3 grados) y se incrementan en las cercanías a un canal o un río.

La magnitud de los desplazamientos horizontales generalmente es del orden de metros. Las capas de suelos desplazados en general presentan fisuras, fracturas, escarpes y hundimientos de bloques (Figura 12⁴⁵ y Figura 13).

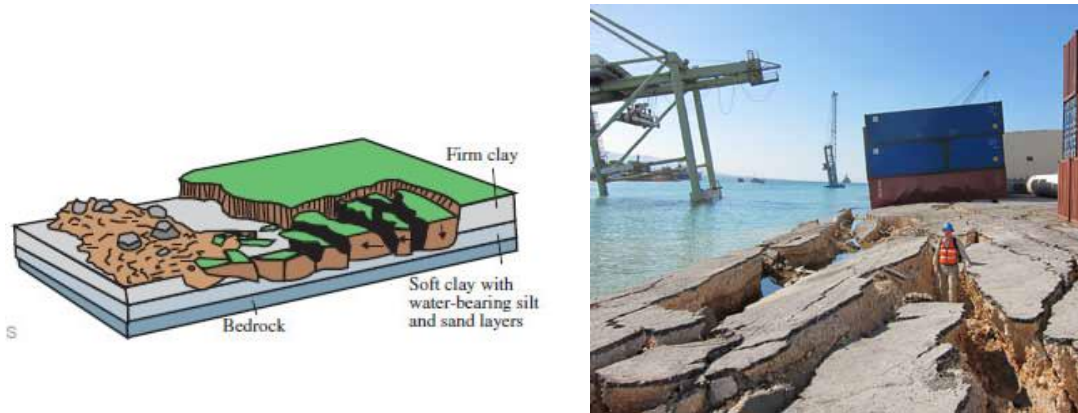


Figura 12: Desplazamiento lateral. A la izquierda imagen esquemática del fenómeno. A la derecha fisuras provocadas por desplazamiento lateral en instalaciones portuarias de Puerto Príncipe, Haití.

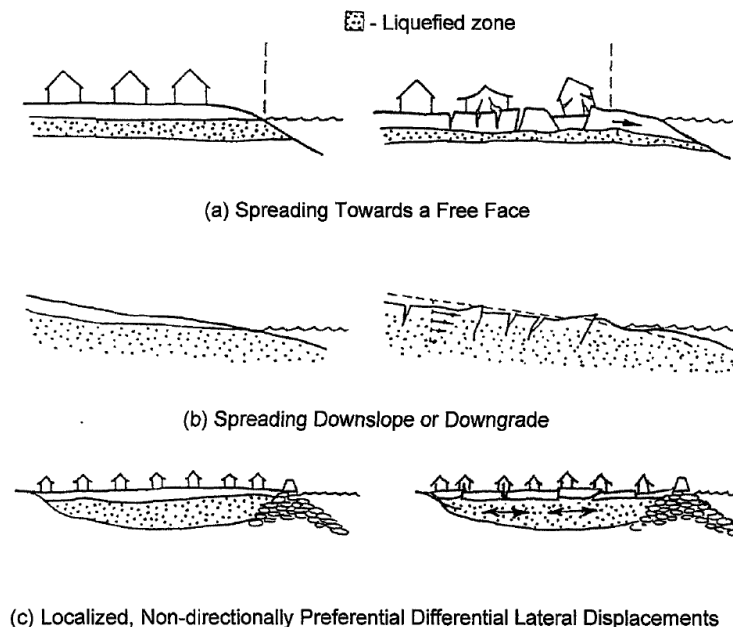


Figura 13: ejemplos esquemáticos de modos de desplazamiento lateral inducidos por licuefacción limitada. Youd (1992)

⁴ <http://geology.com/usgs/landslides/>

⁵ <https://www.eeri.org/2010/01/haiti/03-31/>

Oscilaciones del terreno

Donde el terreno es plano o la pendiente demasiado suave para permitir desplazamientos laterales, la licuación de estratos subyacentes puede causar oscilaciones que no dependen de las capas superficiales, la cual se manifiesta hacia los lados, arriba y abajo en la forma de ondas de terreno Figura 14⁶. En general, dichas oscilaciones son acompañadas por la apertura y cierre de fisuras en el suelo, y la fractura de estructuras rígidas como los pavimentos y tuberías.



Figura 14: Ejemplo de oscilación de terreno durante el terremoto de 2011 en Japón. Flechas en rojo indican la dirección de los esfuerzos. En la imagen superior se observa el flujo ascendente de agua producto de la compresión.

Pérdida de la resistencia del suelo de soporte

Cuando el suelo que soporta un edificio u otra estructura se licua y pierde su resistencia, se pueden presentar grandes deformaciones en su interior, las cuales hacen que las estructuras superficiales se asienten y se inclinen. Las fallas más espectaculares que se conocen por este fenómeno ocurrieron en el sismo de Niigata, Japón, en 1964. Figura 15⁷⁸.



Figura 15: A la izquierda: daños generados por el fenómeno de licuefacción durante el terremoto de 1964 en Niigata, Japón. A la derecha: Automóvil enterrado debido a la pérdida de resistencia del suelo durante el terremoto de 2011 en Christchurch, Nueva Zelanda.

⁶ <http://www.youtube.com/watch?v=Sfva2E1mXzE>

⁷ <http://liquefactionmitigation.weebly.com/liquefactions-basics.html>

⁸ http://myapplenewton.blogspot.com/2011/02/surviving-second-christchurch_24.html

Volcanes de arena

Al presentarse la licuación de arenas, se generan presiones de poro muy altas, las cuales obligan a que el agua fluya rápidamente a la superficie, formando pequeños volcanes de arena (Figura 16^{9,10}). Este flujo ascendente de agua puede ocurrir durante o después de un sismo. Los volcanes de arena indican también zonas de posibles asentamientos.



Figura 16: A la izquierda: Foto de un volcán de arena generado durante el terremoto de 7.1 grados que azotó el 2010 a Christchurch, Nueva Zelanda. A la derecha: Corte transversal de un volcán de arena litificado.

Asentamientos

En muchos casos el peso de la estructura puede ser insuficiente para causar los grandes asentamientos asociados con las pérdidas de capacidad portante descritas anteriormente. Sin embargo, pueden ocurrir pequeños asentamientos cuando la presión de poro se disipa después de un sismo. Estos asentamientos pueden causar daños aunque menores a los producidos por fallas de flujo, desplazamientos laterales o pérdidas de capacidad portante (Figura 17¹¹).



Figura 17: A la izquierda: Asentamiento del pilar central del Puente San Nicolás en la región del Bio Bio, Chile. A la derecha: Asentamiento del Puente Juan Pablo II, Concepción, Chile. En ambos casos el fenómeno se produjo posterior al terremoto del 27 de Febrero de 2010.

⁹ <http://www.flickr.com/photos/erasmuse/4956234383/>

¹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sand_Volcano_Cross_Section.jpg

¹¹ <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/005.cfm>

Incrementos de la presión lateral sobre muros de contención

Si el suelo de relleno de un muro de retención se licua, las presiones laterales sobre dicho muro se pueden incrementar enormemente. Como un resultado de esto, el muro puede desplazarse en el sentido lateral, cabecear o fallar estructuralmente, como se ha observado en un gran número de rompeolas e islas artificiales durante varios sismos (Figura 18¹²).



Figura 18: Licuefacción en la Represa Lower San Francisco, producto del terremoto de magnitud 6,7 de 1971, en San Fernando, EEUU.

Falla de Cimentaciones Profundas

La licuación puede causar grandes cargas laterales en las cimentaciones a base de pilotes. Los pilotes hincados a través de un estrato débil, potencialmente licuable, hasta una capa más fuerte no sólo tienen que soportar las cargas verticales de la superestructura, sino que también deben estar en capacidad de resistir cargas horizontales y momentos de flexión inducidos por movimientos laterales si el estrato débil se licua (Figura 19 izquierda).

Se puede obtener suficiente resistencia con pilotes de dimensiones más grandes y/o con mayor refuerzo. Es importante que los pilotes estén conectados con el cabezal en una forma dúctil que permita que ocurra alguna rotación sin que se presente falla en la conexión. Si dicha conexión falla, el cabezal no puede resistir momentos de volteo provenientes de la superestructura desarrollando cargas verticales en los pilotes (Figura 19 derecha).

Ejemplo de inclinación de pilotes en Figura 20.

¹² <http://www.gf.uns.ac.rs/~wus/wus07/web4/liquefaction.html>

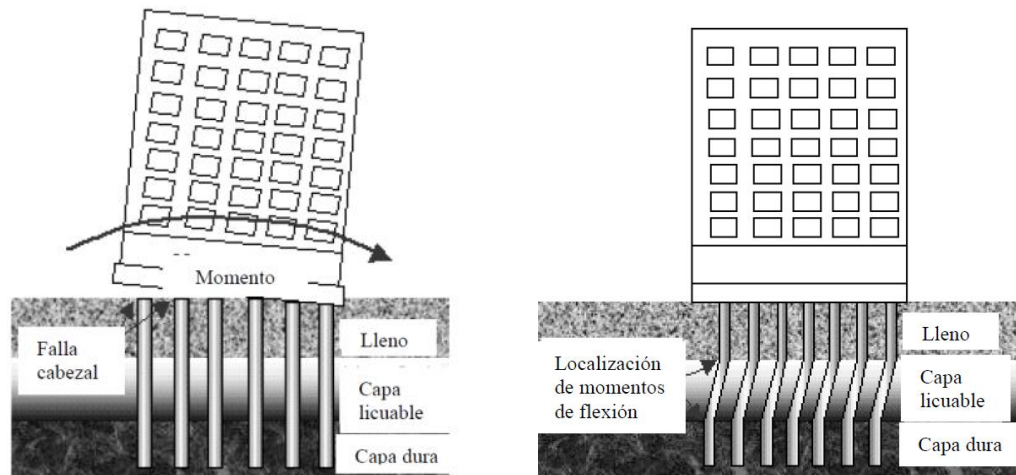


Figura 19: A la izquierda: Falla de la conexión entre el cabezal de los pilotes y la superestructura. A la derecha: Cargas laterales y momentos de flexión en pilotes por licuación.



Figura 20: Inclinación de pilotes en uno de los muelles del Puerto de Coronel, Chile, Producto del terremoto del 27 de Febrero. González, 2012, en VII congreso Chileno de Geotecnia.

3.4 Estudios previos del potencial de licuefacción

Siguiendo la metodología expuesta en el capítulo 1.5 se proponen a continuación criterios de estimación del potencial de licuefacción para cada uno de los 4 factores que serán posteriormente evaluados en el capítulo 5. Esto se llevará a cabo mediante el uso de tablas, figuras e interpretaciones de estudios previos del fenómeno.

Cabe mencionar que ésta es una metodología propuesta exclusivamente para este estudio, por lo que no considera los factores densidad y profundidad de estratos licuables. Sin embargo se propondrán recomendaciones respecto a la forma en la que podrían ser incluidos en futuros trabajos.

Las características finales que se utilizarán para evaluar la susceptibilidad dependerán del criterio de cada individuo, pero siempre teniendo en consideración las bases teóricas proporcionadas en este capítulo.

Granulometría y origen de los depósitos

La granulometría, relacionada directamente con el origen de los depósitos, constituye uno de los factores más importantes al momento de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción.

Históricamente se sabe que la licuefacción es un fenómeno que ocurre casi exclusivamente en arenas limosas o limos arenosos (Seed et al. 1966 and Youd & Bennett. 1983). Sin embargo, estudios actuales muestran evidencia de que las gravas también pueden licuar (Yu Huang y Miao Yu, 2012). Teniendo esto en consideración, la evaluación del potencial de licuefacción respecto a la granulometría y origen de depósitos del capítulo 5.1 deberá hacer énfasis en la identificación y ubicación de los estratos de arena limosa a gravosa, con la finalidad de delimitar correctamente las zonas con mayor potencial de licuefacción

La evaluación del potencial de licuefacción de acuerdo a la granulometría y origen de los depósitos se basará en 3 estudios esencialmente: Berril et al, 1993; Youd & Perkins (1978) y Falcón y Ramírez (2012). Otros estudios que pueden ser utilizados a modo de consulta son Iwasaki et al (1982), el cual asigna un potencial de licuefacción dependiendo del relieve topográfico; Yong y Yanli Wang (2010) si se busca relacionar el potencial de licuefacción con el contenido de finos (de donde serían necesarios análisis de límites de Attenberg); y Horng-Yuh Guo et al (2000) si se quiere una relación rápida que permita establecer una susceptibilidad a partir sólo de la granulometría y del nivel de saturación del suelo para áreas pequeñas.

Berril et al, 1993 (Figura 21): Establece los límites potencialmente licuables para suelos bien y mal gradados mediante curvas granulométricas. Mientras más céntrica entre las curvas límites se encuentre la muestra de suelo, más propensa será a la licuefacción.

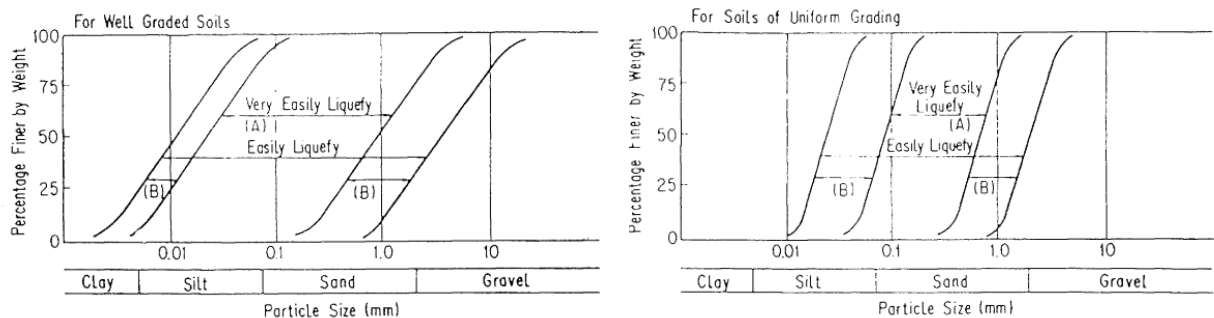


Figura 21: Potencial de licuefacción de acuerdo a curvas granulométricas. Obtenido de “Bulletin of New Zealand National society for earthquake engineering, Vol 26, No.4, December 1993”, “Liquefaction: Ejecta samples from the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake” de J.B. Berril et al.}

Youd & Perkins, 1978 (Tabla 2): Establecen un valor de susceptibilidad dependiendo del tipo de depósito, la distribución de los sedimentos sueltos y la edad. Esta última variable será analizada en detalle más adelante. Sólo están considerados los depósitos continentales debido a la ubicación del área de estudio de este trabajo. Se sugiere consultar este documento en caso de requerir más información, ya que sólo se extrajo lo estrictamente necesario para llevar a cabo el análisis.

Tabla 2: Susceptibilidad estimada de licuefacción de distintos tipos de depósitos sedimentarios durante movimientos sísmicos importantes. (Youd and Perkins 1978).

Types of deposit	General distribution of cohesionless sediments in deposits	Likelihood that cohesionless sediments, when saturated, would be susceptible to liquefaction (by age of deposit)			
		<500 yr	Holocene	Pleistocene	Prepleistocene
(a) Continental Deposits					
River channel	Locally variable	Very high	High	Low	Very low
Flood plain	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low
Alluvial fan and plain	Widespread	Moderate	Low	Low	Very low
Marine terraces and plains	Widespread	---	Low	Very low	Very low
Delta and fan-delta	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Lacustrine and playa	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Colluvium	Variable	High	Moderate	Low	Very low
Talus	Widespread	Low	Low	Very low	Very low
Dunes	Widespread	High	Moderate	Low	Very low
Loess	Variable	High	High	High	Unknown
Glacial till	Variable	Low	Low	Very low	Very low
Tuff	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Tephra	Widespread	High	High	?	?
Residual soils	Rare	Low	Low	Very low	Very low
Sebka	Locally variable	High	Moderate	Low	Very low

Falcón y Ramírez, 2012 (Tabla 3): Establecen los criterios utilizados para la elaboración de mapas de susceptibilidad utilizando la granulometría, edad y origen del suelo.

Tabla 3: Tabla evaluativa del potencial de licuefacción para el territorio de Chile, de acuerdo a Falcón y Ramírez, 2012.

	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)	Nulo (0)
Unidades geológicas	Depósitos no consolidados			Roca
Origen del suelo	Depósitos sedimentarios litorales actuales, depósitos fluviales activos, depósitos lacustres y de remoción en masa, rellenos antrópicos (relaves), depósitos eólicos y deltaicos.	Depósitos coluviales y de remociones en masa	Terrazas marinas, fluviales, lacustres y de remoción en masa, depósitos glaciofluviales, morrénicos y fluvioglaciales	
Granulometría o tamaño de partícula	Arenas limpias, finos limosos, arenas con finos o arenas con gravas y finos	Gravas arenosas	Composición variable entre finos limo-arcillosos y arenas con gravas	
Edad del depósito	Holoceno-Pleistoceno	Holoceno-Pleistoceno	Pleistoceno-Plioceno	

Profundidad del nivel freático

El nivel estático de aguas es un factor imprescindible si se quiere evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, debido a que el fenómeno sólo ocurre en un ambiente saturado. Mientras más superficial sea el nivel estático de aguas mayor será la probabilidad que se desencadene el fenómeno. Esto debido a que la presión de poro necesaria para igualar el stress total y así gatillar licuefacción aumenta con la profundidad.

Existen estudios previos que proponen rangos de profundidades de nivel freático (junto a otros parámetros) para evaluar la susceptibilidad. Entre ellos se encuentran 3 pertenecientes al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con fecha de publicación entre 1998 y 2006¹³. Los puntos críticos utilizados en estos trabajos son a los 10, 30, 40 y 50 pies o de forma equivalente 3, 9, 12 y 15 metros aproximadamente.

Otro trabajo relevante es el de Tinsley et al (1985) (Tabla 4). Éste propone puntos críticos a los 3, 10 y 15 metros, asociados al mismo tiempo con la edad de los depósitos.

Tabla 4: Criterio utilizado en la elaboración de un mapa de susceptibilidad de licuefacción para el valle de San Fernando, California. (modificado de Tinsley et al. 1985 por Dr. Stephen E. Dickenson en el reporte “Assessment and mitigation of liquefaction hazards to bridge approach embankments in Oregon”).

Sedimentary Unit	Depth to Ground Water, in meters			
	0-3	3-10	10-15	>15
Holocene				
Latest -----	Very high to high ¹	Moderate ²	Low	Very low
Earlier -----	High	Moderate	Low	Very low
Pleistocene				
Late -----	Low	Low	Very low	Very low
Middle and early ----	Very low	Very low	Very low	Very low
Tertiary and pre-Tertiary -	Very low	Very low	Very low	Very low

Edad de los depósitos

En términos generales es sabido que el potencial de licuefacción disminuye con el incremento en la edad del depósito. Seed (1979) ya había observado este incremento en la resistencia de los depósitos con la edad al someter muestras de arenas reconstituidas a ensayos de laboratorio. Observó diferencias de hasta un 25% en la relación de resistencia cíclica de arenas recién reconstituidas y otras de 100 días de edad.

Youd and Hoose (1977) y Youd and Perkins (1978) se percataron de que este fenómeno también ocurría a escalas geológicas. Depósitos de unos pocos miles de años de edad son en general mucho más susceptibles a la licuefacción que los sedimentos Holocenos más viejos. Depósitos pleistocenos son aún más resistentes que los Holocenos, mientras que los sedimentos pre-Pleistocenos son generalmente inmunes a la licuefacción (Youd and Idriss, 2001).

¹³ Description of mapping of quaternary deposits and liquefaction susceptibility, Nine-County San Francisco Bay Region, California. USGS. 2000
 Maps showing quaternary geology and liquefaction susceptibility, Napa, California, 1:100,000 quadrangle: a digital database. USGS. 1998
 Maps of quaternary deposits and liquefaction susceptibility in the Central San Francisco Bay Region, California. USGS. 2006.

Antes de analizar los estudios existentes respecto a la edad de depósitos y licuefacción resulta importante recordar las edades geológicas más recientes y el rango de años que cada una de ellas abarca. De la Tabla 5 se desprende que el periodo Holoceno comprende los últimos 11.784 años, el Pleistoceno comienza hace 2,58 Ma. y termina en el Holoceno, mientras que el Plioceno comienza hace 5,33 Ma. y termina con el Pleistoceno.

Tabla 5: Edades geológicas para las distintas épocas del Cenozoico.

Era	Período	Época	Millones años
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0,011784
		Pleistoceno	2,588
	Neógeno	Plioceno	5,332
		Mioceno	23,03
	Paleógeno	Oligoceno	33,9 ±0,1
		Eoceno	55,8 ±0,2
		Paleoceno	65,5 ±0,3

Existen diversos estudios que relacionan el potencial de licuefacción de un suelo con su edad. Sin embargo las susceptibilidades que estos trabajos sugieren están muchas veces vinculados a otros factores, tales como el tipo de depósito o la profundidad del nivel freático. Esto no significa que un factor dependa de otro, sino simplemente que los rangos de susceptibilidad que se asignan son el resultado de la mezcla de factores, y no a la edad por sí sola.

Kramer y Arango, 1998 (Tabla 6): relacionan valores de resistencia de suelos con la edad del depósito. Se observa que la resistencia de un depósito a los 10.000 años habrá aumentado en un 42% respecto a los primeros 1000 años y un 145% respecto al millón de años (Pleistoceno tardío aprox.). Para depósitos más antiguos no se registran datos.

Tabla 6: Incremento de la resistencia a la licuefacción con el aumento de la edad del sedimento (según Kramer y Arango, 1998). Los valores de strength (esfuerzo) indican el factor de incremento de la resistencia del terreno en comparación con sedimentos actuales.

Age (years)	0-1000	10,000	100,000	1,000,000
Strength	1	1.42	2	2.45

Falcón & Ramírez, 2012 (Tabla 7): En el documento “Generación de mapas de licuefacción a partir del sismo de febrero de 2010” presentado en el VII congreso de geotecnia chileno se menciona a la edad del depósito como factor preponderante en la evaluación del potencial de licuefacción. Al igual que los otros autores mencionados proponen una reducción de la susceptibilidad con el incremento de la edad del depósito. Sin embargo presenta los mismos rangos de edad tanto para medio como para alto potencial de licuefacción.

Tabla 7: Potencial de licuefacción y edad del depósito.

	Alta	Medio	Bajo
Edad del depósito	Holoceno-Pleistoceno	Holoceno-Pleistoceno	Pleistoceno-Plioceno

Brankman & Baise, 2008 (Tabla 8): Desarrolla una serie de criterios, entre ellos la edad de los depósitos, para agrupar las unidades de su estudio en 3 grupos de riesgo.

Tabla 8: Categorías de riesgo de acuerdo al criterio geológico de susceptibilidad usado por Charles M. Brankman, 2008, en su estudio “Liquefaction Susceptibility Mapping in Boston, Massachusetts”. Basado en características geológicas de varios mapas posteriores al estudio de Youd and Perkins 1978.

Hazard Category	Geologic Criteria (Susceptibility)	Geologic Units	Geotechnical Boring-Based Criteria
High hazard	Modern to Holocene; saturated; abundant cohesionless, uncompacted sediments	Artificial fill Active beach deposits	>20 percent of borings with liquefiable samples
Moderate hazard	Holocene to Pleistocene; saturated; variable amounts of cohesionless, uncompacted sediments	Glaciofluvial deposits Marsh deposits	5 to 20 percent of borings with liquefiable samples
Low hazard	Pleistocene to pre-Pleistocene; non-saturated to saturated; well indurated; cohesive; limited cohesionless sediments	Glacial till (drumlin and ground moraine) Bedrock	<5 percent of borings with liquefiable samples

Youd & Perkins, 1978 (Tabla 2): Relacionan la edad con el tipo de depósito para asignar una susceptibilidad de licuefacción. En términos generales puede observarse un incremento en la resistencia a la licuefacción con la edad independiente de tipo de depósito. Vemos que en promedio existe una alta susceptibilidad para depósitos de menos de 500 años; media para depósitos Holocenos; baja para depósitos pleistocenos y muy baja para aquellos pre-pleistocenos.

Tinsley et al, 1985 (Tabla 4): Desarrolló una relación de susceptibilidad entre la edad del depósito y la profundidad del nivel freático. Nuevamente se observa una tendencia de incremento de la resistencia a la licuefacción con la edad del depósito, sin embargo, en caso de presentarse un nivel freático por debajo de los 15 metros, la susceptibilidad a la licuefacción se vuelve muy baja e independiente de la edad del depósito. Lo mismo ocurre para depósitos pre-pleistocenos.

Amplitud y duración de vibración de los depósitos

Tanto la amplitud como la duración de la vibración del suelo son parámetros que dependen directamente de las características que posea el sismo.

Entenderemos por amplitud la aceleración, velocidad y/o desplazamiento máximo necesario para gatillar el fenómeno de licuefacción. Se utilizará el parámetro PGA, ya que éste se relaciona de mejor forma con terremotos de gran magnitud (Kramer, 1996). La duración de vibración del terreno, a pesar de que es un factor importante, es difícil de estimar, ya que existen pocos registros históricos de la duración de movimientos sísmicos. A grandes rasgos se sabe que a mayor magnitud del sismo mayor será la duración de la vibración (Kramer, 1996, Figura 22) y por ende más favorable será la ocurrencia del fenómeno. Sin embargo, esto no permite establecer intervalos de tiempos que permitan delimitar los rangos para el potencial de licuefacción, por lo que el parámetro será omitido en éste trabajo.

La zona de estudio presenta una superficie muy acotada como para zonificar la zona de acuerdo a su peligro sísmico, por lo que se propondrá un método alternativo, el cual considerará aceleraciones gatillantes de depósitos particulares en lugar de aceleraciones a nivel regional o trabajos de amplificaciones sísmicas.

El método que se sugiere es el utilizado por Hayden, Lloyd and Haydon, 1999, quienes establecieron una metodología de evaluación de susceptibilidad, la cual en una de sus etapas utiliza el coeficiente PGA para evaluar el potencial de licuefacción (Figura 23). Este análisis se basa en datos estratigráficos obtenidos de su área en estudio, en donde pudieron determinar la

aceleración horizontal mínima requerida para gatillar la licuefacción en un tipo de suelo específico, utilizando como referencia un sismo de magnitud 7.5. Así, por ejemplo, suelos que requieren menos de 0.1g para licuarse presentan una muy alta susceptibilidad y, en el otro extremo, suelos que necesitan más de 0.3g presentan una baja susceptibilidad.

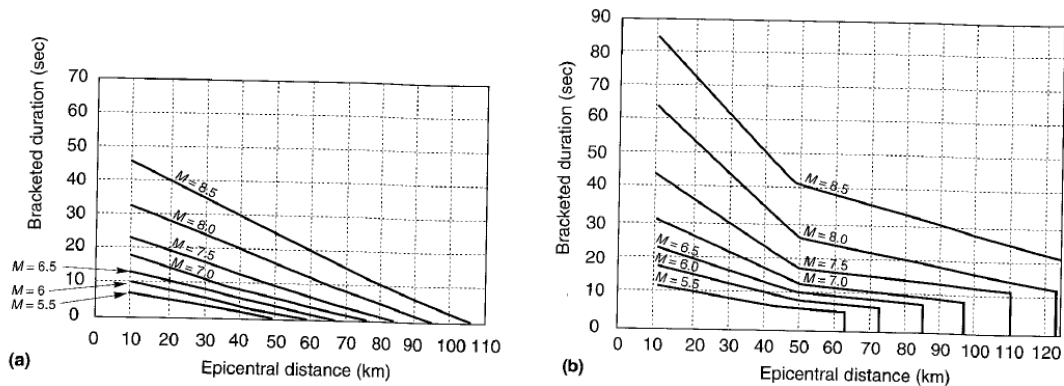


Figura 22: variación de la duración de un movimiento sísmico de acuerdo a la magnitud y distancia epicentral. (a) en roca, (b) en suelo.(Kramer, 1996).

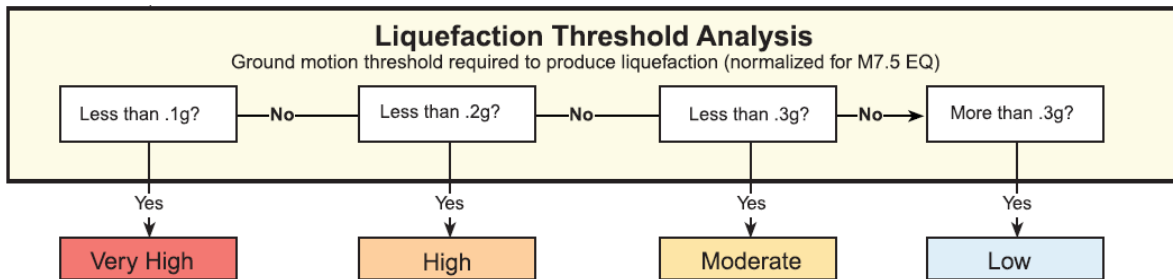


Figura 23: Parte de la metodología de evaluación de la susceptibilidad de licuefacción propuesta por, Hayden, Lloyd and Haydon, 1999. El esquema metodológico completo puede encontrarse en “Liquefaction susceptibility and Probabilistic Liquefaction Potential hazard mapping, St Louis, Missouri and Illinois. U.S. Geological Survey, National Earthquake Hazards Reduction Program”.

Sin embargo trabajos recientes, en base a un registro de más de 201 estudios de caso, sugieren que la aceleración mínima para gatillar licuefacción sería de 0.08g, mientras que la máxima llegaría a los 0.84g (Santucci de Magistris et al, 2013), con un promedio de 0.329g. Esto significaría una subvaloración del potencial de licuefacción asignado por Hayden, Lloyd and Haydon, 1999.

Para establecer las aceleraciones gatillantes de los distintos tipos de depósitos existentes se recurrió a estudios del USGS realizados en la Bahía de San Francisco entre los años 2000 y 2006¹⁴ (Capítulo 5.2, tabla 14). Utilizando esta información y cruzándola con los rangos de aceleraciones gatillantes sugeridos se obtiene el potencial de licuefacción de cada depósito.

Hay que recordar que las aceleraciones gatillantes que se obtengan de estos estudios son aproximadas y meramente estimativas, ya que generalizan los tipos de depósitos. Sólo se busca dar una aproximación del valor absoluto real que se podría obtener mediante ensayos.

¹⁴ Maps of quaternary deposits and liquefaction susceptibility in the central San Francisco Bay Region, California, USGS, 2006. Description of mapping of quaternary deposits and liquefaction susceptibility, nine-county San Francisco Bay Region, California, USGS, 2000.

Densidad y profundidad de depósitos

La densidad está directamente relacionada con la edad de los depósitos, sin embargo también se relaciona en un nivel menor con la profundidad de los mismos, a mayor profundidad mayor será la densidad de los estratos (en términos generales claro está).

El fenómeno de licuefacción históricamente tiende a ocurrir a profundidades menores a 9 m. y rara vez a profundidades mayores a 15 m., nunca sobrepasando la cota de los 30 m. establecida como límite licuable. Sin embargo se ha comprobado experimentalmente que puede ocurrir a profundidades mayores si se dan las condiciones apropiadas, tales como movimientos de gran amplitud y duración sobre suelos arenosos saturados (González et al., 2005).


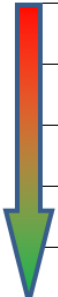
Para realizar la evaluación del potencial de licuefacción de acuerdo a su densidad y profundidad es necesario en primer lugar conocer la ubicación exacta de los depósitos licuefactables que existan en el área de estudio. Para ello es imprescindible identificar los estratos de arena limosa a gravosa mediante estudios geotécnicos que proporcionen esta información. Idealmente se debe tener un enrejado de perforaciones con una distancia entre ellos que permita posteriormente realizar una interpolación.

A continuación se debe considerar el estrato de arena más superficial de cada pozo, sin superar los 30 metros establecidos como límite licuable. Se debe tener en consideración un espesor mínimo que le permita licuar.

De esta forma se podrá establecer una tabla de decisión en donde los estratos más propensos a licuar serán aquellos menos densos y más superficiales, en contrapartida con aquellos más densos y profundos (Tabla 9).

Los valores críticos a utilizar para la evaluación escapan de este trabajo, por lo que se deja propuesto.

Tabla 9: Propuesta de estimación del potencial de licuefacción de acuerdo a los factores densidad y profundidad de depósitos para una evaluación de susceptibilidad de 5 valores (muy bajo a muy alto). Letras a-d: valores críticos de profundidades; letras A-D: valores críticos de densidades.

		Aumento de Profundidad 				
		a<	a-b	b-c	c-d	d>
Aumento de Densidad 	A<	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Media	Media
	A-B	Muy Alta	Alta	Alta	Media	Baja
	B-C	Alta	Alta	Media	Media	Baja
	C-D	Media	Media	Media	Baja	Muy Baja
	>D	Media	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja

No hay que olvidar que esta propuesta de evaluación está ajustada a lo que se realiza en este trabajo y que para futuros estudios se deja abierta la posibilidad de realizar una estimación alternativa.

El uso de este método está fuertemente condicionado por la robustez de la base de datos que se posea, siendo solamente recomendable en el caso de poseer suficiente información que lo respalde.

4 ANTECEDENTES DEL ÁREA EN ESTUDIO

4.1 Geología

La zona de estudio presenta en superficie unidades de roca, estratificadas como no estratificadas, y depósitos no consolidados (Figura 24).

Las rocas más antiguas de la zona de estudio corresponden a una secuencia volcánica y sedimentaria de origen principalmente continental perteneciente a la **Formación las Chilcas** (Kilc, Barremiano-Albiano), la cual aflora como una franja NS a NE-SO en las zonas correspondientes a los cerros Punta Cortés, Llivillivi, Tres Quiscos, Tren Tren y al Cerrillo de Doñihue.

Intruyendo a la unidad antes descrita se reconoce un intrusivo diorítico asociado a la unidad de **monzodioritas y dioritas cuarcíferas de Doñihue** (Ksmzdd, 87-83 Ma.), ubicado en el cordón montañoso al norte de la comuna, desde el cual provienen gran parte de los sedimentos que posteriormente conforman los depósitos aluviales de piedemonte y quebradas.

Sobre las unidades mencionadas se disponen, en discordancia, depósitos cuaternarios de edad Pleistocena a Holocena. Estos son:

1. **Depósitos aluviales de valle, PIHav (Pleistoceno-Holoceno)**
2. **Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas, PIHq (Pleistoceno-Holoceno)**
3. **Depósitos fluviales antiguos, PIHf (Pleistoceno superior?-Holoceno)**
4. **Depósitos fluviales recientes, Hf (Holoceno)**
5. **PIHrm: Depósitos de remoción en masa, PIHrm (Pleistoceno?-Holoceno)**

4.1.1 Rocas Estratificadas

Formación Las Chilcas Kilc (Barremiano-Albiano)

La Formación Las Chilcas corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria de origen principalmente continental, con un amplio espectro de litologías que incluye basaltos, andesitas, brechas, tobas, areniscas tobáceas, lutitas, y conglomerados con rodados muy gruesos. Thomas (1958) estimó un espesor máximo para esta formación de 7.000 m en el área de Las Chilcas, lugar que consideró como localidad tipo por presentar todas las variedades litológicas que la caracterizan. Se extiende como una franja relativamente continua desde los 33°S, la cual se empobrece progresivamente hacia el sur en facies sedimentarias, predominando los estratos volcánicos a los 34°S (Sellés y Gana, 2001).

En el área de estudio, la Formación Las Chilcas aflora como una franja NS a NE-SO, a lo largo del borde oriental de la cordillera de la Costa, donde se encuentra intruida por granitos de edad cretácica tardía. Las subunidades pertenecientes a esta formación y que afloran dentro de los límites de la comuna son:

1. **Tobas dacíticas líticas y de cristales, Kilc(b)**
2. **Domos riódacíticos, Kilc(d)**
3. **Andesitas, Kilc(e)**

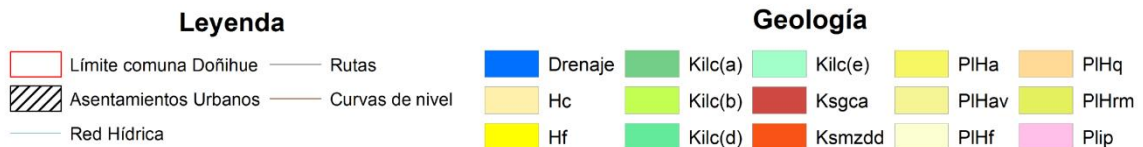
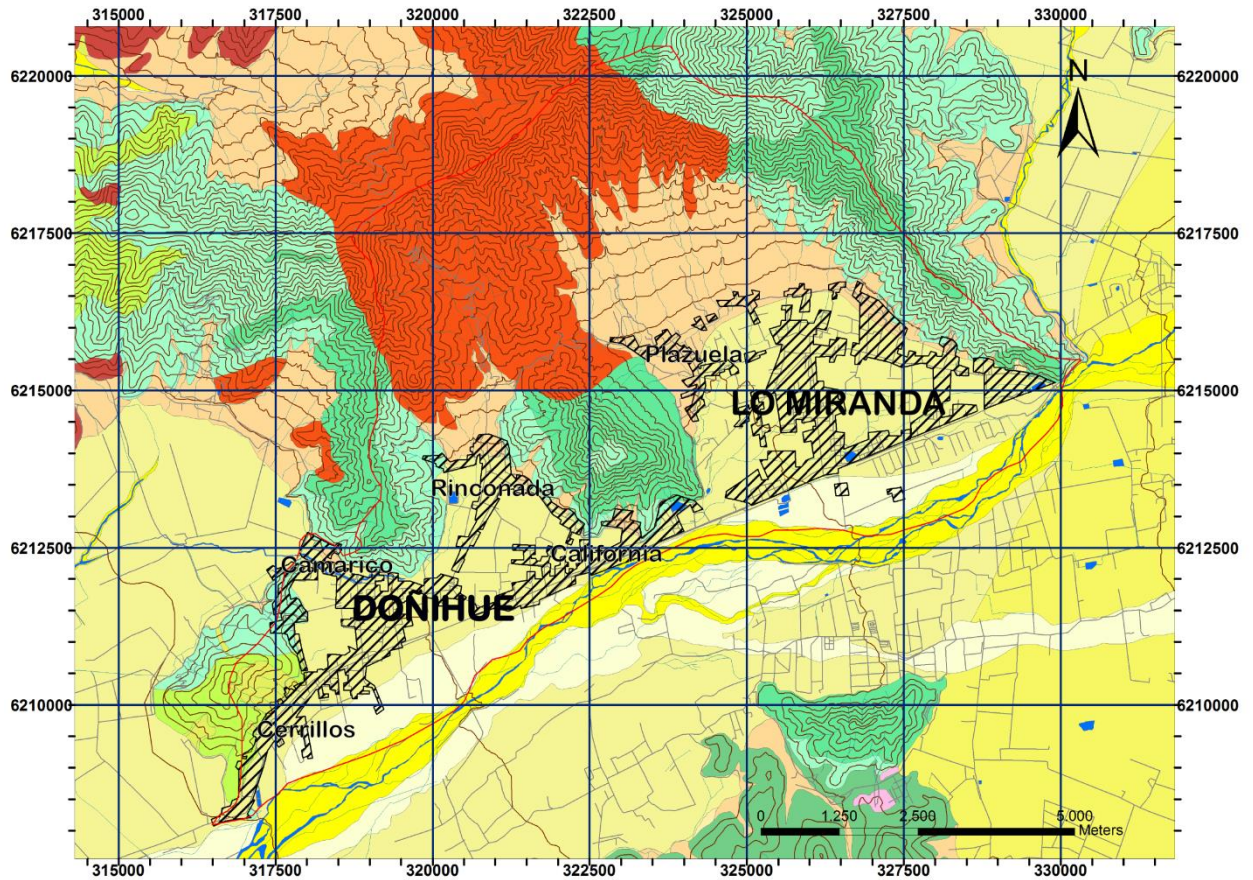


Figura 24: Mapa geológico de la comuna de Doñihue y alrededores (Modificado de Godoy, E.; Schilling, M.; Solari, M.; Fock, A. 2009. Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua). Geología presente en el área de estudio:

- Hc: Depósitos coluviales
- Hf: Depósitos fluviales
- Kilc(a): Formación Las Chilcas, Ignimbritas
- Kilc(b): Formación Las Chilcas, Tobas dacíticas líticas y de cristales
- Kilc(d): Formación Las Chilcas, Domos riódacíticos
- Kilc(e): Formación Las Chilcas, Andesitas
- Ksgca: Complejo Plutónico Alhué
- Ksmzdd: Monzodioritas y dioritas cuarcíferas de Doñihue
- PIHa: Depósitos aluviales
- PIHav: Depósitos aluviales de valle
- PIHf: Depósitos fluviales antiguos
- PIHq: Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas
- PIHrm: Depósitos de remoción en masa
- Plip: Ignimbrita Pudahuel

4.1.2 Rocas no estratificadas

Monzodioritas y dioritas cuarcíferas de Doñihue, Ksmzdd (87-83 Ma.):

Al norte de Doñihue afloran monzodioritas y dioritas cuarcíferas localmente porfídicas, como una banda de 7 km de ancho y rumbo NE, que intruye rocas de la Formación Las Chilcas. Contiene diotita y piroxeno, en parte ortopiroxeno, el cual muestra diversos grados de alteración. En su borde norte, el clinopiroxeno está parcialmente reemplazado por anfíbola, mineral que también se encuentra como fenocristal. Tres edades K-Ar le dan un rango de 87 a 83 Ma.

4.1.3 Depósitos cuaternarios

Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas, PIHq (Pleistoceno-Holoceno):

Corresponden a sedimentos ubicados al pie de las laderas, en quebradas y en cursos de agua menores o efímeros, que forman conos de deyección con un amplio desarrollo en la Cordillera de la Costa. Los depósitos de piedemonte y quebradas están compuestos por bloques, gravas, arenas y en menor cantidad por limos, son generalmente clastosoportados, no consolidados y con mala estratificación (Figura 25). Las áreas cercanas a la zona apical del abanico contienen un mayor porcentaje de sedimentos gruesos que las partes distales. Además, incluyen algunos depósitos matriz soportados de flujos de detritos. En algunos casos están constituidos por maicillo y bolones graníticos, sin embargo domina la presencia de bloques, bolones, gravas, arenas y limos.

De la campaña de terreno en Enero de 2013 logró recopilarse información adicional respecto a esta unidad mediante la observación de un afloramiento ubicado a los pies del cerro Punta Cortés. Se obtuvo la siguiente descripción:

- Depósito aluvial
- No consolidado
- Permeable
- Granulometría: Presenta poco limo, y una granulometría en general gruesa:
 - a. Bloques (5%): de 0,3 a 1 m. de diámetro
 - b. Bolones (15%): angulosas a subangulosas de 8-30 cm. de diámetro
 - c. Gravas Gruesas (40%): angulosas a subangulosas de 4-8 cm. de diámetro
 - d. Matriz (40%):
 - Grava Fina (20%): angulosas a subangulosas de 0,5-4 cm. de diámetro
 - Arena y Limos (20%): <0.5 cm de diámetro.
- Clasto soportado
- Clastos de alta dureza
- Polimíctico: Aquí es posible diferenciar 4 tipos diferentes de rocas:
 - a. Lavas de textura porfírica y masa fundamental afanítica. Fenocristales de plagioclasas. Roca probablemente andesítica.
 - b. Roca volcánica afanítica, de color gris negruzco
 - c. Toba lítica. Presenta poca meteorización
 - Fragmentos líticos (60%): 40% mayores, 20% menores.

- Cristales (30%): Qz. lechoso, feldespato, obsidiana, alteración clorita-epidota.
 - Vidrio (10%): Pómez.
- d. Lava brechoza con alteración de clorita-epidota en vetillas.



Figura 25: Afloramiento de depósitos de piedemonte en la localidad de Lo Miranda.

Depósitos de remoción en masa, PIH_{rm} (Pleistoceno?-Holoceno)

Son sedimentos mal seleccionados, escasamente consolidados, ubicados al pie de laderas y a lo largo de cursos fluviales. En la cordillera de la Costa esta unidad incluye depósitos de flujos de detritos constituidos mayormente por maicillo. En el cerrillo de Doñihue se observan los efectos del movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca y suelo. El deslizamiento rotacional múltiple presenta un área de 46.000 m², la cual en su parte superior es delimitada por planos de ruptura que forman escarpes con forma de media luna (Figura 26).



Figura 26: Remoción en masa en cerrillo de Doñihue, al Oeste de Doñihue. En rojo escarpe de la remoción

Depósitos aluviales de valle, PIH_{av} (Pleistoceno-Holoceno)

Esta Unidad ha sido dividida en dos subunidades, desde ahora denominadas depósitos aluviales proximales y distales (Figura 27), debido a que se registraron particularidades en el área de estudio que permiten caracterizar estos depósitos más en detalle. Sus nombres derivan de su distancia relativa al río Cachapoal.

Depósitos aluviales proximales: Conforman una llanura aluvial (alluvial plain) formada por las variaciones del cauce y de las zonas inundables del río Cachapoal. Estos depósitos se caracterizan por ser pobremente consolidados, estratificados y compuestos por bolones, gravas, arenas, limos y arcillas.

Depósitos aluviales distales: Compuestos por arena, limo y arcillas en superficie. No hay presencia de una granulometría gruesa. Engranán lateralmente con los depósitos aluviales de piedemonte y quebradas hacia el Norte y con los depósitos aluviales proximales hacia el Sur.

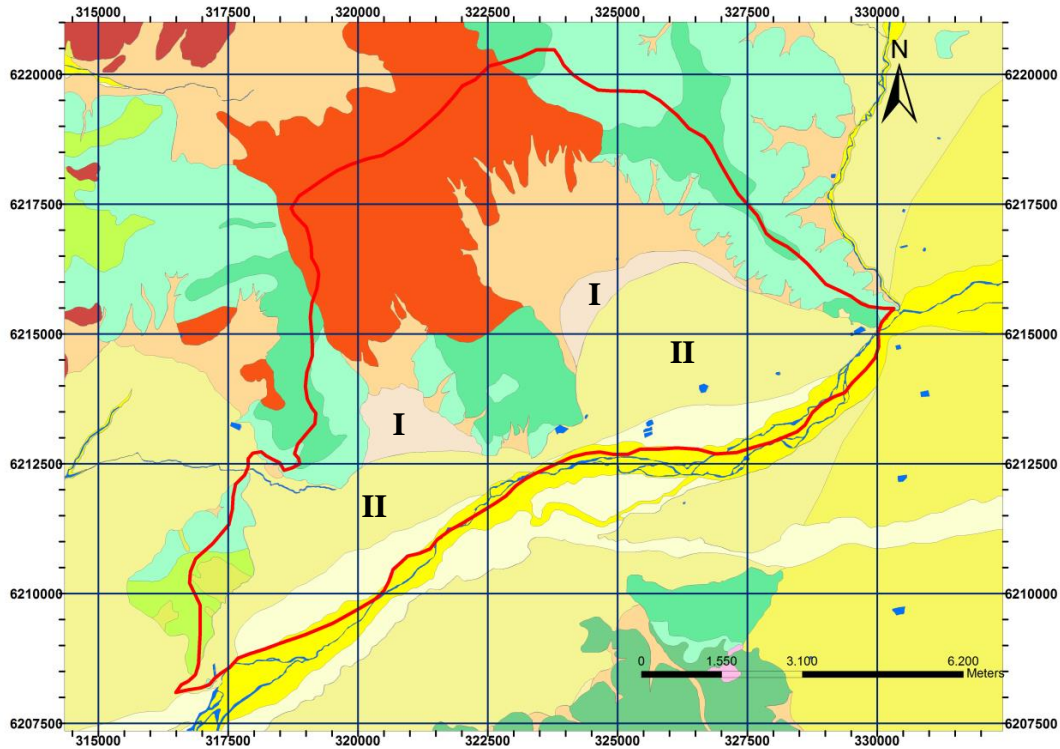


Figura 27: Distribución de las unidades geológicas de la zona de estudio. I: depósitos aluviales distales; II: depósitos aluviales proximales.

Depósitos coluviales, Hc (Holoceno)

Depósitos compuestos por fragmentos líticos angulosos, decimétricos, mal seleccionados, con escasa matriz centimétrica, ubicados principalmente al pie de acantilados formados en rocas de la Formación Abanico, en el sector este-sureste de la Carta Geológica Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua y en partes de la cordillera de la Costa.

Depósitos fluviales recientes, Hf (Holoceno)

Corresponden a depósitos de facies fluviales, observados en las planicies fluviales cercanas al cauce del río Cachapoal y que presentan actividad actual o presumiblemente durante el Holoceno. Están compuestos por bolones y gravas no consolidadas, redondeados a bien redondeados, clastosoportados, y de baja esfericidad. De manera ocasional se encuentran imbricados y son polimícticos. Esporádicamente se observan lentes de arenas no consolidadas, con estratificación plana-horizontal y cruzada, junto a escasos limos finamente laminados.

Depósitos fluviales antiguos, PIHf (Pleistoceno superior?-Holoceno)

Incluye los depósitos de facies fluviales que forman terrazas por sobre el lecho actual del río Cachapoal (Figura 28) y a aquellos que se depositaron en cauces antiguos. Corresponden a gravas clatosoportadas, imbricadas y granodecrescentes, que forman al menos dos niveles aterrizados en las laderas del valle del río Cachapoal. Incluye bancos arenáceos decimétricos, que son más abundantes y potentes aguas abajo. Su posición horizontal explica el mayor desnivel aguas abajo con respecto al fondo de los ríos. Se incorporan a esta unidad, gravas matriz soportadas canalizadas sobre maicillo, que afloran en un paleocurso del río Coya, al sur de su desembocadura, y a 200 m por sobre el nivel de base actual.

En los ríos Cachapoal, Coya y Claro de Rengo se observan sucesiones de sedimentos fluviales no consolidados, que engranan con facies aluviales de piedemonte, que alcanzan hasta 50 m de espesor y en las cuales es posible distinguir al menos dos niveles aterrizados. En los Depósitos fluviales antiguos queda registrada la variación que han tenido los cauces de algunos ríos.



Figura 28: Margen del río Cachapoal donde se observan terrazas compuestas por depósitos fluviales estratificados (Foto de Andrés Fock, marzo del 2006).

4.2 Geografía y Geomorfología

4.2.1 Descripción

La comuna de Doñihue, en términos generales, se encuentra emplazada en un valle aluvial que limita hacia el norte con un cordón montañoso y hacia el sur con el cauce del Río Cachapoal (Figura 29).

Su geomorfología ha sido modelada por la erosión constante del cordón montañoso, junto con variaciones en el cauce del Río Cachapoal y probables ciclos de inundación. Esto ha generado grandes depósitos aluviales sobre los cuales se encuentran emplazados los dos centros urbanos principales, Doñihue y Lo Miranda, separados entre ambos por el cerro Tren Tren.

La configuración del espacio geográfico de Lo Miranda se encuentra conformada por una cadena de cerros que van, en forma de media luna, desde Punta de Cortés por el sur-este, pasando por el alto de Llivillivi, el Morro del Chivato y el cerro Tren Tren, hasta La Puntilla o límite con California al sur-oeste. En su extremo Noroeste se encuentra ubicada la localidad de Plazuela.

Por otro lado Doñihue se encuentra al SW del cerro Tren Tren. El sector con mayor densidad de población se ubica entre el Cerro Tres Quiscos y el Cerrillo de Doñihue. Las localidades que lo conforman son: Rinconada, ubicada a la salida de las quebradas Las Vegas y Los Limones, entre el cerro Tren Tren y Tres Quiscos; California, cerca del Río Cachapoal; Cerrillos, a los pies del Cerrillo de Doñihue y Camarico en el límite con la comuna de Coltauco.

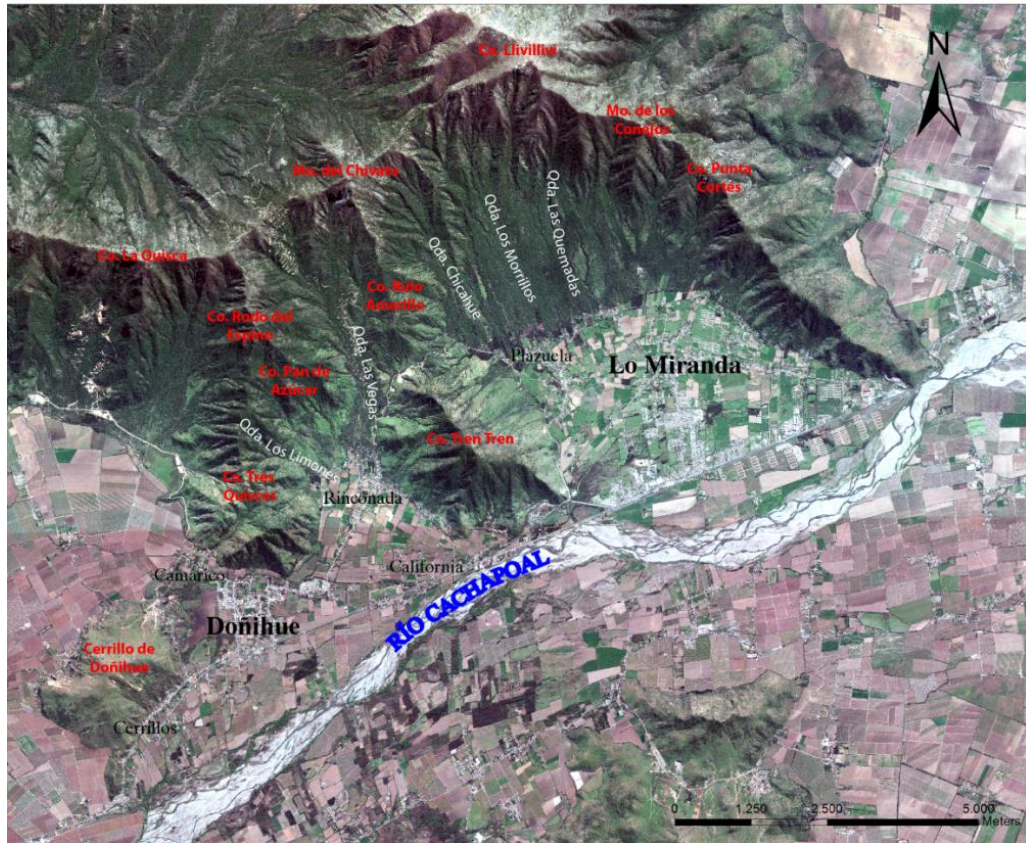


Figura 29: Geomorfología de la comuna de Doñihue. En rojo: cerros del sector. En blanco: Principales quebradas. En negro: Localidades (fuente mayor corresponde a localidades principales). En Azul: Río Cachapoal.

4.2.2 Interpretación

La mayor parte de los depósitos en la comuna de Doñihue se asocian a planicies aluviales. Estas se definen como “un gran conjunto de estructuras geomorfológicas (depósitos de ríos trenzados, terrazas, etc.) que forman rampas regionales de baja pendiente a lo largo de los bordes de las montañas y que se extienden por grandes distancias desde su fuente” (USDA, U.S. Department of Agriculture). Otras fuentes las definen como grandes planicies creadas por la acumulación de sedimento durante largos periodos de tiempo por uno o más ríos provenientes de regiones elevadas, donde se forma el suelo aluvial.

Las llanuras de inundación son parte del proceso de formación de una planicie aluvial. Son el área más pequeña sobre la cual los ríos fluyen en un periodo de tiempo particular, mientras que las planicies aluviales representan el área mayor sobre la cual las planicies de inundación han variado a escalas de tiempo geológicas.

Bajo estos conceptos es que se propone que la cuenca se formó por la erosión fluvial de material proveniente desde el cordón montañoso, generando depósitos aluviales tipo abanico aluvial junto a conos de deyección (en este trabajo denominados depósitos de quebradas y piedemonte). Éstos engranan lateralmente con los depósitos aluviales tipo planicie aluvial (aquí denominados depósitos aluviales de valle) provenientes del Río Cachapoal.

En capítulos posteriores se darán evidencias de que la mayor concentración de material arenoso/limoso (de gran interés debido a su gran facilidad para licuar) se encuentra en la zona de contacto entre los depósitos aluviales de piedemonte y los depósitos aluviales de valle. Esto puede ser explicado de dos maneras, no excluyentes entre ellas:

1. Los depósitos aluviales de piedemonte, al presentar la morfología de un abanico aluvial, tienen una gradación del tamaño de granos que va desde grava en las zonas de alta pendiente a arena/limo en las zonas de menor pendiente (Figura 30; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Como la zona ubicada a los pies del cordón montañoso posee una pendiente media/baja ($\sim 5^\circ$) es esperable que sus depósitos presenten una granulometría arenosa/limosa.

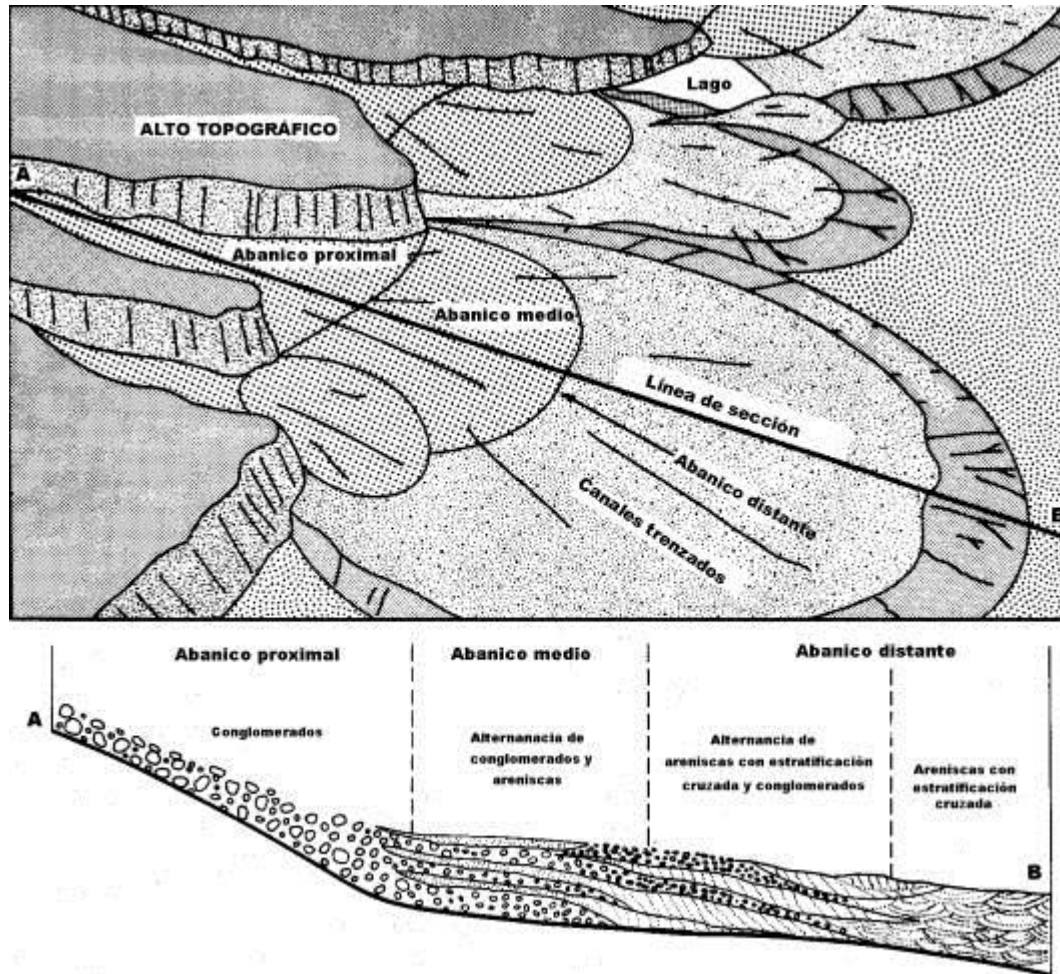


Figura 30: Variación granulométrica general de los sedimentos a lo largo de una sección longitudinal dentro de un abanico aluvial (Grijalva, 2012)

2. Los procesos de inundación generan levees en las orillas del cauce. La carga suspendida durante estos ciclos comienza con un sedimento grueso en las cercanías del borde a sedimentos más finos hacia las zonas más distales (Figura 31 (b)). De esta forma en las cercanías del cauce del Río Cachapoal existen depósitos con una granulometría gruesa, la

cual ira gradando paulatinamente a una granulometría más fina hacia los pies del cordón montañoso.

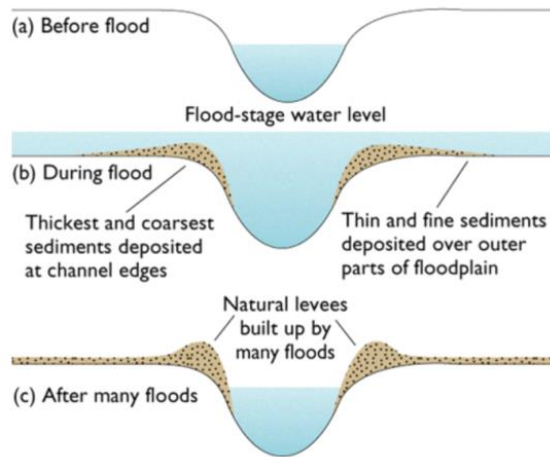


Figura 31: Esquema representativo del proceso de formación de llanuras de inundación. (a) Etapa previa a la inundación. (b) Durante la inundación. (c) después de muchos ciclos de inundación. (David Rogers, Department of Geological Sciences & Engineering, Missouri University of Science & Technology).

Sin embargo, la hipótesis más factible es que la zona de interés presente ambos eventos: depósitos distales de abanicos aluviales sobrepuestos a una facies fina de un ambiente fluvio-aluvial (Figura 32). Esto explicaría la acumulación de material arenoso/limoso a los pies del cordón montañoso.

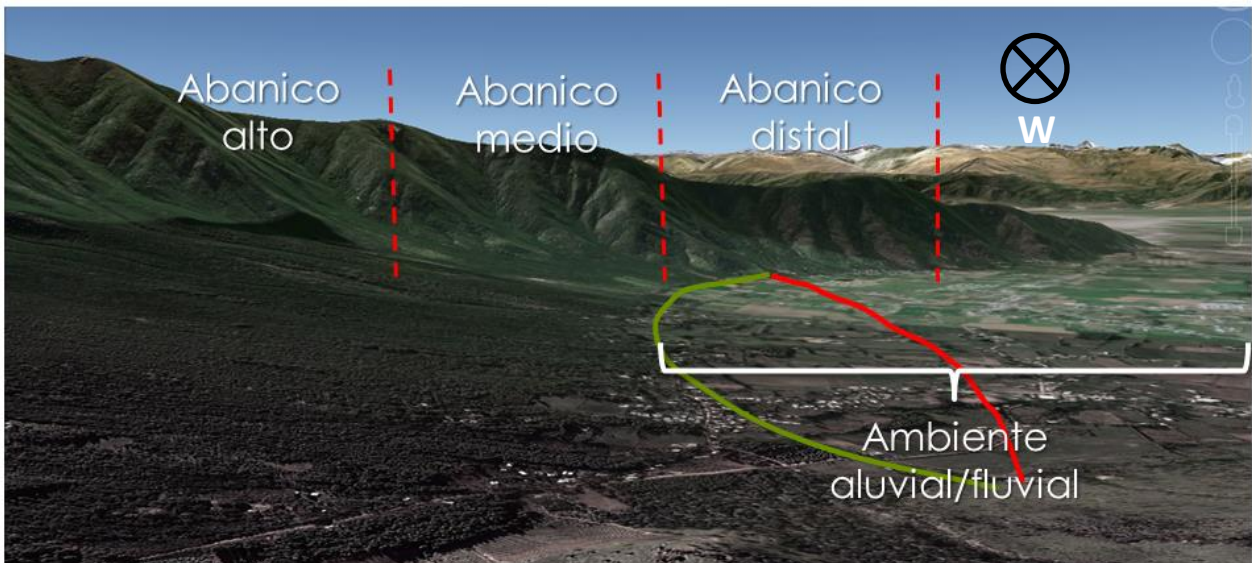


Figura 32: Vista panorámica de la localidad de Lo Miranda. En la imagen se observan los dos principales depósitos presentes en la comuna. Extraída desde plataforma Google Earth.

Cabe señalar que gran parte de las evidencias superficiales de estos fenómenos han sido borradas por la erosión del sector y que los procesos, al ser cíclicos a escalas de tiempo geológicas, presentan una superposición de eventos que dificulta definir los límites entre unidades.

4.3 Hidrología

El área de estudio se ubica en el sector oriental de la subsubcuenca hidrográfica de Río Cachapoal entre Estero Las Cadenas y Río Claro (Dirección General de Aguas, DGA).

Existen dos zonas de confluencia de aguas, que coinciden además con la ubicación de los dos principales centros urbanos. Su escurrimiento superficial presenta una dirección preferencial SW, que coincide con el sentido del Río Cachapoal (Figura 33).

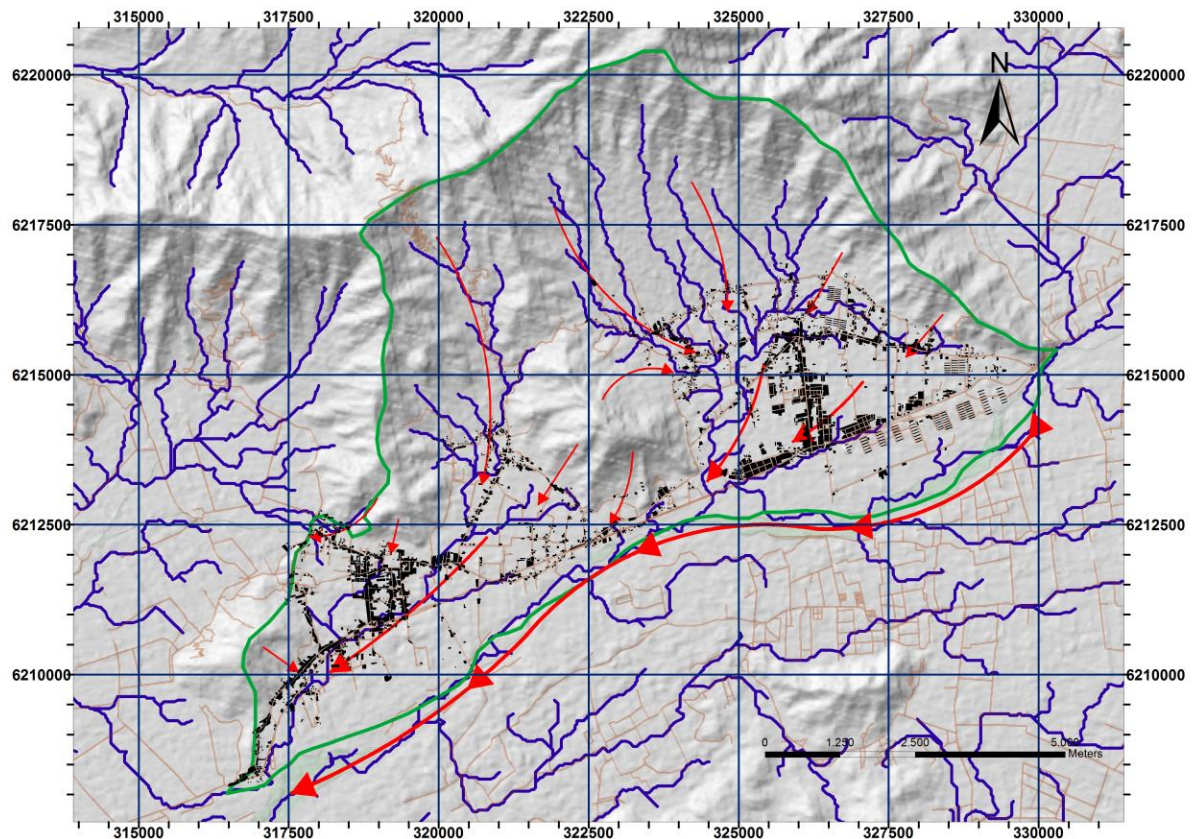


Figura 33: Mapa de dirección de Flujos. En verde: límite comunal; en azul: redes de drenaje; en rojo: dirección del escurrimiento de aguas; en negro: zonas con edificaciones; café: rutas.

De acuerdo a información pluviométrica recogida de la DGA (Anexo F), las mayores precipitaciones en la provincia del Cachapoal ocurren durante el mes de Junio, entre los últimos días de otoño y primeros días de invierno (Figura 34). En cambio las precipitaciones máximas en un periodo de 24 horas se concentran entre los meses de Mayo a Julio (Figura 35).

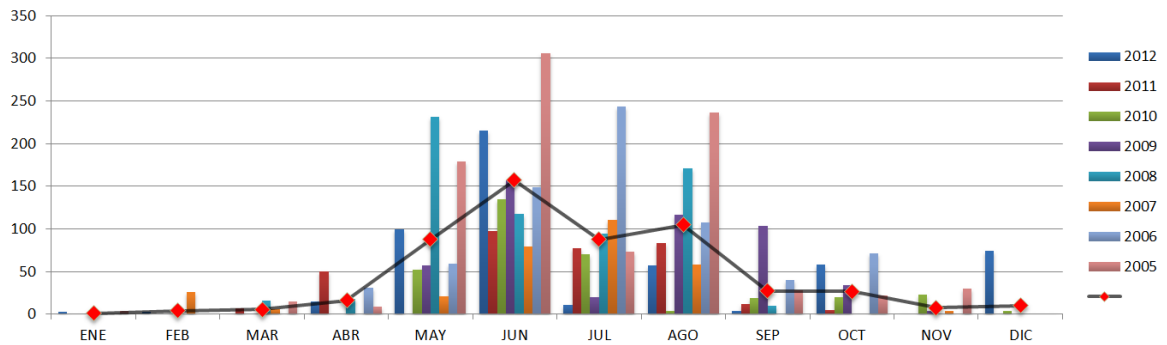
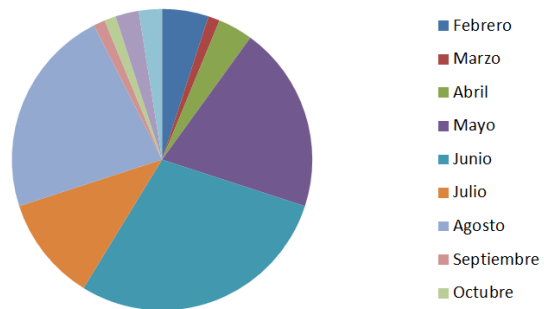


Figura 34: Precipitaciones promedio y totales en 10 puntos de la provincia del Cachapoal, calculados para el periodo 2005-2012. El detalle de las estaciones y de los registros pluviométricos mensuales se encuentra en el Anexo F 1.

Figura 35: Frecuencia de precipitaciones máximas en un periodo de 24 hr. registradas en 10 estaciones pluviométricas de la provincia del Cachapoal.



Éstas precipitaciones constituyen el principal factor de recarga de los acuíferos de la zona, el cual puede variar significativamente dependiendo de la estación del año. Por otro lado, los principales factores de descarga están dados por las extracciones a partir de norias y pozos construidos para satisfacer múltiples demandas: potable, riego, industrial, etc. y por las efluencias hacia cursos superficiales: ríos y esteros con morfología local favorable.

El cálculo del balance hídrico de la zona escapa de este estudio, sin embargo para futuros trabajos se recomienda considerar la completitud de los factores de carga y descarga asociados a la cuenca, y que se detallan en el Anexo F Anexo F 1.

5 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

5.1 Granulometría y origen de los depósitos

En la comuna de Doñihue, de acuerdo a la hoja de Rancagua- San Vicente de Tagua Tagua, existen 2 unidades cuaternarias principales sobre las cuales están edificadas casi la totalidad de las estructuras. Estas unidades son los depósitos aluviales de valle, PIHav (Pleistoceno-Holoceno) y los depósitos aluviales de piedemonte y quebradas, PIHq (Pleistoceno-Holoceno).

Para información granulométrica de los depósitos se obtuvo de la carta geológica de Rancagua- San Vicente de Tagua Tagua, de la información recogida en la campaña de terreno de 2013, de estudios granulométricos solicitados al Departamento de laboratorios del Sernageomin y de una base de datos de la dirección de Obras Hidráulicas (DOH) que contiene la estratigrafía de diversos pozos de la VI región y de la cual se seleccionaron 4 pertenecientes a la zona en estudio.

La clasificación granulométrica del suelo a utilizar será la establecida por la “American Society for Testing and Materials (ASTM)” de la Tabla 10.

Tabla 10: Intervalos de diámetros granulométricos y el nombre asignado según la clasificación de la ASTM.

	Diámetro [mm]
Bloques	>300
Bolones	80-300
Grava	5-80
Arena	0,08-5
Limo	0,005-0,08
Arcilla	<0,005

Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas:

La información se obtuvo mediante la observación de un afloramiento situado a los pies del cerro Punta Cortés, al este de la localidad de Lo Miranda.

De acuerdo al análisis granulométrico realizado en terreno, y tal como se mencionó en la descripción geológica del área de estudio, se observa que la unidad de depósitos de quebradas y piedemonte presenta poco limo y un tamaño de grano en general grueso (Figura 36). A partir de lo observado en terreno se determinó la siguiente granulometría:

- Bloques (5%): de 0,3 a 1 m. de diámetro.
- Bolones (15%): angulosas a subangulosas de 8-30 cm. de diámetro.
- Gravas Gruesas (40%): angulosas a subangulosas de 4-8 cm. de diámetro.
- Matriz (40%):

- i. Grava Fina (20%): angulosas a subangulosas de 0,5-4 cm. de diámetro.
- ii. Arena y limo (20%): <0.5 cm de diámetro. (alrededor de 15% de arena y 5% de limo).



Figura 36: Afloramiento de los depósitos de piedemonte. A la izquierda: Se observan las gravas y bolones. Al Centro: Se distingue claramente un bloque. A la derecha: Bloques que se han desprendido por gravedad o quedado expuestos en la superficie por erosión de los sedimentos más finos. (Figura 36)

Dadas las características de estos depósitos aluviales es esperable que su granulometría no cambie radicalmente dentro de los primeros 30 metros, por lo que serán considerados como uniformes.

Depósitos Aluviales de Valle:

Estos depósitos, como se mencionó durante la caracterización geológica, fueron divididos en dos subunidades: depósitos aluviales proximales y distales (Figura 37).

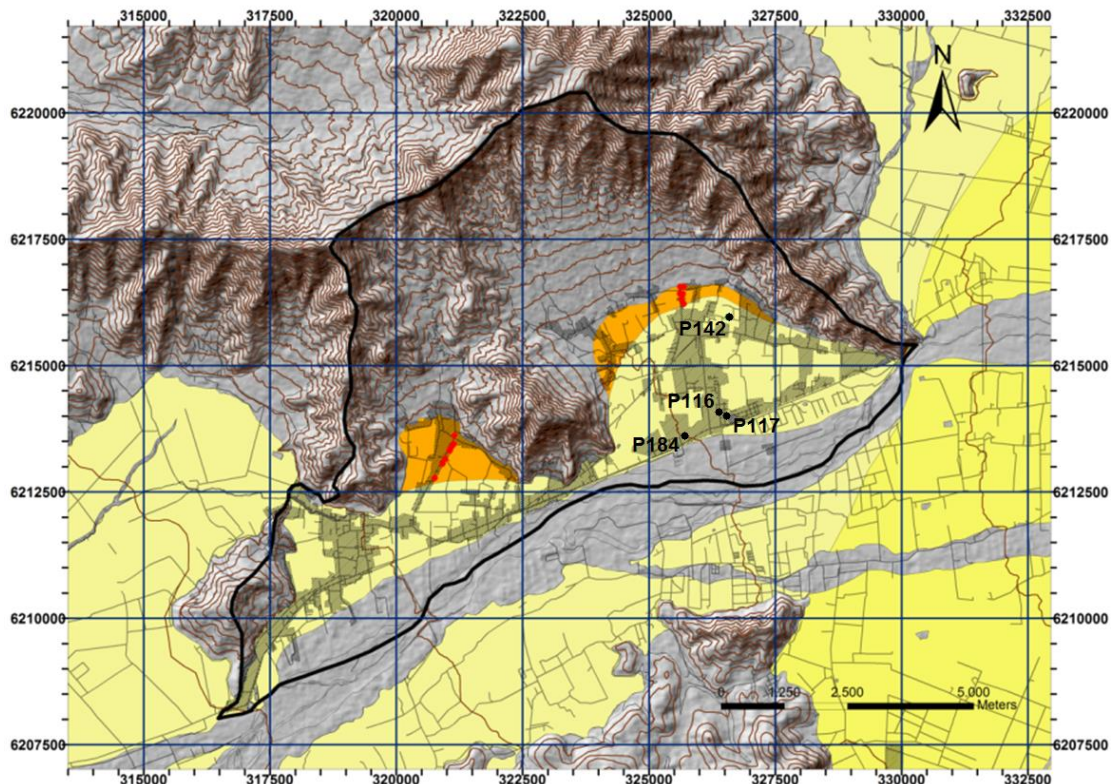


Figura 37: Puntos negros: Ubicación geográfica de los pozos estratigráficos de la base de datos proporcionada la DOH. Puntos rojos: ubicación de las zonas identificadas con evidencia de licuefacción. En amarillo claro, depósitos aluviales de valle proximales. En naranja, depósitos aluviales de valle distales. En amarillo oscuro depósitos aluviales definidos en la Hoja Rancagua- San Vicente de Tagua Tagua, irrelevantes para este estudio.

Depósitos Aluviales proximales:

De acuerdo a la Hoja Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua están compuestos por bolones, gravas, arenas, limos y arcillas. La ubicación espacial de los pozos obtenidos de la DOH se observa en la Figura 37. La información obtenida de la DOH se resume en la Tabla 11:

Tabla 11: Resumen de las granulometrías encontradas en los pozos pertenecientes a la DOH. La litología está descrita desde el tamaño granulométrico más abundante al menos abundante. En rojo: estratos con alta probabilidad de licuar ubicados. En amarillo: estratos con menor probabilidad de licuar. En gris: estratos que poseen la granulometría para licuar pero que se encuentran por debajo del límite licuable de 30 metros.

N°	UTM E	UTM N	Espesor		Litología
			Desde	Hasta	
116	326459	6214104	0	24,5	gravilla, arena, arcilla
			24,5	28	arena, arcilla, gravilla
			28	34,5	gravilla, arena, arcilla
			34,5	45,5	arcilla, gravilla, arena
			45,5	61	gravilla, arena, arcilla
			61	66	gravilla, arena, poca arcilla
			66	75	gravilla, arena gruesa y fina, poca arcilla
117	326496	6214067	0	16	gravilla, arena, arcilla
			16	18	gravilla, arena, poca arcilla
			18	64	bolones, gravilla, arena, arcilla
			64	75	gravilla, arena gruesa y poca fina, arcilla
142	326570	6216067	0	9	bolones, ripio, arena
			9	11	ripio, arena, poca arcilla
			11	31	bolones, grava, arena, poca arcilla
			31	36	arena, grava, poca arcilla
			36	47	ripio, arena, gravilla, poca arcilla
			47	48	limo, arcilla
184	325759	6213648	0	14	bolones, ripio, grava, gravilla, arena, 15% arcilla
			14	20	ripio, grava, gravilla, arena, pocos bolones, 20% arcilla
			20	33	ripio fino, grava, gravilla, arena, 30% arcilla
			33	37	ripio grueso, grava, gravilla, pocos bolones, arena, 15% arcilla
			37	49	ripio fino, grava, gravilla, arena, 35% arcilla
			49	56	arena, grava, gravilla, poco ripio, 40% arcilla
			56	65	arena, 40% arcilla

De acuerdo a la tabla existen zonas en los depósitos aluviales proximales que poseen dentro de los primeros 30 metros de profundidad una granulometría compuesta mayoritariamente por arena, lo que favorecería enormemente la licuefacción. Sin embargo este tipo de depósitos presentan una alta heterogeneidad (González de Vallejo, 2002), lo que impide zonificar en detalle

la ubicación de los estratos licuables dentro del área de estudio. Teniendo esto en consideración se omitirá un análisis más profundo de esta unidad.

Depósitos Aluviales distales:

De acuerdo a lo observado en terreno están compuestos por arena, limo y arcillas dentro de los primeros 3 metros de superficie.

El muestreo de este depósito se realizó en 2 zonas. La primera corresponde a una cantera desde la cual se extrae material para la confección de ladrillos (Figura 38) y la segunda en una noria en construcción dentro de una parcela (Figura 39).



Figura 38: Arriba: Vista panorámica de la zona de extracción de material. Abajo: Vista panorámica de la confección de ladrillos. Coordenadas geográficas: 6215958N/326565E. Muestras AV336-338



Figura 39: Noria en construcción con nivel freático a 1,1 metros de profundidad. En la imagen se puede observar la estratigrafía del pozo, la cual según visto en terreno correspondía a arenas, limos y arcillas, confirmado posteriormente por los análisis granulométricos. Coordenadas geográficas: 6215825N/325511E. Muestras AV339-341

El detalle del tamizaje y curvas granulométricas de las muestras se adjunta en el Anexo B. A partir de este registro se obtuvieron los datos necesarios para describir el suelo de acuerdo a la clasificación USCS del Anexo A (Tabla 12).

Tabla 12: Tabla de clasificación de suelos. Los espacios vacíos corresponden a datos que no son necesarios para la clasificación.

Muestra	% que pasa por 4,75 mm de abertura	% que pasa por 0,075 mm de abertura	D10	D30	D60	Cu	Cc	Clasificación	Descripción
AV 336	98,5	16	-	-	-	-	-	SC-SM	Arenas limosas a arcillosas
AV 337	98,5	13,5	-	-	-	-	-	SC-SM	Arenas limosas a arcillosas
AV 338	87	9	0,1	0,5	1,6	16	1,6	SW-SM-SC	Arena bien graduada con arcilla y/o limo
AV 339	99	14	-	-	-	-	-	SC-SM	Arenas limosas a arcillosas
AV 340	97	14	-	-	-	-	-	SC-SM	Arenas limosas a arcillosas
AV 341	94,3	16	-	-	-	-	-	SC-SM	Arenas limosas a arcillosas

Las muestras son clasificadas como *Arenas limosas a arcillosas*. No es posible hacer una diferenciación entre SW (Arenas bien graduada), SC (Arenas Arcillosas) y SM (Arena limosa), ya que no existen datos de plasticidad que lo permitan.

Esta descripción se realizó dentro de los primeros metros de profundidad, sin embargo, dado que en la zona existen claras evidencias de licuefacción, nos pondremos en el peor caso esperable y se supondrá que las características del suelo se mantienen relativamente semejantes a profundidades mayores.

Depósitos Fluviales:

Tanto los depósitos fluviales antiguos como recientes son relativamente jóvenes, por lo que la granulometría de ambos puede considerarse equivalente.

En la base de datos proporcionada por la DOH existen pozos perforados sobre lo que ha sido catalogado como depósitos fluviales. Estos pozos, al igual que los ubicados sobre los depósitos aluviales proximales, presentan una granulometría muy variable en donde predomina la granulometría gruesa en superficie (Bolones, gravas y Arenas). También comparten la característica de presentar lentes de arena dentro de los primeros 30 metros de profundidad, lo que favorece la licuefacción.

Depósitos Coluviales:

La Hoja Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua describe estos depósitos como “fragmentos volcánicos angulosos decimétricos, mal seleccionados y con escasa matriz centimétrica, ubicados al pie de acantilados”. Esto da inmediatamente a entender que son depósitos compuestos principalmente por Bloques y bolones, con una matriz gravosa.

Depósitos de Remociones en Masa:

La granulometría de este tipo de depósitos dependerá directamente del tipo de deslizamiento y de la zona en que se produzca. El mayor deslizamiento en la comuna ocurre en el cerrillo de Doñihue, caracterizado por presentar un volumen de material constituido por roca y suelo. Sin embargo no se tienen más antecedentes del área en estudio, por lo que a modo de generalización se entenderá que los depósitos de remociones en masa estarán constituidos mayormente por bolones y gravas, y en menor proporción por arenas y finos.

Estableciendo criterios comunes para todos los depósitos es que se asigna finalmente un potencial de licuefacción mediante una clasificación que va de 1 a 9, de menor a mayor potencial respectivamente (Tabla 13). Las cifras utilizadas sólo serán números impares de acuerdo a la metodología propuesta. La clasificación resume los datos sobre granulometría y origen de los depósitos vistas en este capítulo y toma como base las consideraciones de estudios previos propuestas en el capítulo 3.4.

Tabla 13: Evaluación del potencial de licuefacción según criterio granulométrico.

Clasificación	Origen/Tipo de Depósitos	Granulometría de Depósitos
9	Depósitos aluviales distales	Depósitos compuestos por arenas, limos y arcillas
7	Depósitos aluviales proximales Depósitos Fluviales recientes Depósitos Fluviales antiguos	Depósitos que posean lentes de arena dentro de los primeros 30 metros de profundidad.
5	-	Depósitos compuestos por gravas, arenas y finos en relativamente igual proporción
3	Depósitos de Remociones en Masa	Depósitos compuestos por Bolones, Gravas y en menor proporción arenas
1	Depósitos Coluviales Depósitos de quebradas y piedemonte	Depósitos compuestos mayoritariamente por Bloques, Bolones y Gravas

5.2 Amplitud y duración de la vibración del terreno

Estudios del USGS realizados en San Francisco entre los años 2000 y 2006 asignan susceptibilidades de licuefacción a distintos tipos de depósitos, basados en la profundidad de nivel freático, ocurrencia histórica y PGA gatillante del fenómeno.

Los documentos estiman el valor PGA para las zonas granulométricamente susceptibles (arenas y limos) de depósitos fluviales y aluviales principalmente, no así para los depósitos de remociones en masa, de quebradas y piedemontes (conos de deyección) ni coluviales. Por tal motivo para estos 3 últimos se realizará una estimación de su PGA gatillante comparándolos con depósitos aluviales (abanico aluvial o indiferenciados), que sí están estudiados.

Los depósitos del área de estudio de este trabajo, de acuerdo a lo visto en el capítulo 5.1, presentan dos edades principales: Holoceno y Pleistoceno-Holoceno, por lo que quedan excluidos aquellos depósitos de edad Pleistocena o anterior.

El resumen de las aceleraciones gatillantes del fenómeno se presenta en la Tabla 14

Tabla 14: Aceleraciones horizontales máximas (PGA) estimadas para cada tipo de depósito, considerando los valores propuestos en los trabajos realizados en San Francisco entre los años 2000 y 2006.

Depósito	PGA gatillante (2000)	PGA gatillante (2006)
Modern stream channel deposits	0,1	0,1
Latest Holocene stream terrace deposits	0,2	>0.1
Holocene stream terrace deposits	0.2 to 0.3	0.3
Latest Pleistocene to Holocene stream terrace deposits	>0.3	>0.3
Latest Pleistocene stream terrace deposits	>0.5	>0.5
Early to late Pleistocene stream terrace deposits	>0.6	>0.6
Latest Holocene alluvial fan deposits	0,2	>0.2
Holocene alluvial fan deposits	0,3 to 0,5	>0.3
Latest Pleistocene to Holocene alluvial fan deposits	>0.3	>0.3
Latest Pleistocene alluvial fan deposits	>0.5	>0.5
Early to late Pleistocene alluvial fan deposits	>0.6	>0.6
Holocene alluvium, undifferentiated	0,2-0,5	>0.2
Latest Pleistocene to Holocene alluvium, undifferentiated	>0.3	>0.3
Latest Pleistocene alluvium, undifferentiated	>0.5	>0.5
Early to late Pleistocene alluvium, undifferentiated	>0.6	>0.6
Holocene alluvial fan deposits, fine facies	0,3-0,5	0,2
Latest Holocene alluvial deposits, undifferentiated	0,2	0,2
Late Holocene alluvial floodplain deposits, undifferentiated	0,2	-

Se utilizarán los datos de aceleraciones gatillantes del estudio de 2006 por ser el más reciente. Además se usarán como referencia los rangos de aceleraciones propuestos por Hayden, Lloyd and Haydon, 1999, adaptándolos a las necesidades de este trabajo.

Por último se realizarán correcciones a los valores extremos considerando el PGA gatillante mínimo de 0.08g encontrado por Santucci de Magistris et al. El resultado final sugerido se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15: Potencial de licuefacción asignado de acuerdo a PGA gatillante

Clasificación	PGA gatillante	Tipo de depósito
9	$\leq 0,2g$	Fluviales Recientes
7	$\geq 0.2g$	-
5	$\geq 0.3g$	Fluviales Antiguos Aluviales de Valle
3	$\geq 0.4g$	Aluviales de piedemonte y quebradas Remoción en masa Coluviales
1	$\geq 0.5g$	-

5.3 Edad de los depósitos

La subdivisión de edades que mejor se adapta a un análisis de susceptibilidad de 5 niveles es la de Tinsley et al. (1985). Sin embargo, la edad datada de las unidades que se incluyen en el área de estudio de acuerdo a la Hoja Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, no es muy precisa, limitándose a periodos relativamente largos de tiempo.

El resto de los estudios no pueden ser aplicados correctamente a este trabajo, debido a la excesiva precisión de Kramer y Arango, 1998, a la ambigüedad de Falcón & Ramírez, 2012 que utilizan un mismo periodo de tiempo para dos niveles de susceptibilidad y a la mezcla de factores que utiliza Brankman & Baise, 2008, para definir un nivel de peligro.

Los periodos de tiempo que finalmente se utilizarán son los propuestos por Youd & Perkins, 1978: Holoceno, Pleistoceno a Holoceno y Pre pleistoceno, omitiendo el periodo <500 años por falta de datos.

Como además esta división debe adaptarse a una metodología que utiliza 5 niveles de potencial de licuefacción para cada factor se propone la clasificación de la Tabla 16.

Tabla 16: Susceptibilidad asignada de acuerdo a la Edad del Depósito.

Clasificación	Edad del depósito
9	Holoceno
7	-
5	Pleistoceno a Holoceno
3	-
1	Pre pleistoceno

5.4 Profundidad del nivel freático

El nivel estático de aguas es un factor imprescindible al momento de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción, ya el fenómeno sólo ocurre en un ambiente saturado.

Durante la campaña de terreno de Enero de 2013, y con el objetivo de elaborar un mapa de isopropiedades del nivel estático, se recopilieron datos de niveles de agua en base a mediciones realizadas en pozos y norias de la comuna y alrededores (Anexo C). A la vez se buscaron registros históricos de profundidad de aguas, obteniéndose información a partir desde la carta hidrogeológica de Rancagua (Hauser 1990) y desde bases de datos pertenecientes al Sernageomin, enmarcados en el proyecto GOT Rancagua. Finalmente se utilizaron las herramientas de interpolación del software Arcmap 9.3 de la plataforma Arcgis, obteniéndose el mapa del Anexo C.

Los intervalos utilizados para definir el potencial de licuefacción se basaron en el estudio de Tinsley et al. (1985), debido a que eran los que mejor se ajustaban a este trabajo. Sin embargo se realizaron modificaciones al nivel más superficial para acotar de mejor forma las zonas en que se favorece el fenómeno.

El potencial de licuefacción en base al nivel freático se clasifica de acuerdo a la Tabla 17.

El mapa obtenido luego de la interpolación fue sometido a un proceso de interpretación para corregir los errores propios del proceso. Los criterios utilizados fueron:

- Suavizar curvas puntiagudas.
- Unir aquellas curvas que encierren zonas de igual profundidad pero que aparentemente por falta de datos intermedios quedaron aisladas.
- Eliminar curvas aisladas que encierren áreas pequeñas y que no parezcan relacionarse correctamente con su entorno.
- Modificar levemente la curvatura de las líneas que cruzan el río Cachapoal, imitando la alineación propuesta en la carta hidrogeológica de Rancagua.

En la Figura 40 se muestra la distribución final de las curvas post-correcciones.

El análisis indica que la mayor parte de los acuíferos de la comuna se encuentran a profundidades menores a 10 metros y tenderían a ser más superficiales hacia las zonas elevadas, sitios en que el tiempo de residencia de las aguas tendería a ser menor, y por ende, percolarían más rápido hacia zonas más profundas.

El mapa es solo una estimación de la profundidad a la cual debería encontrarse el nivel freático, sin embargo hay factores que no están tomados en cuenta y que escapan del análisis. Entre los más preponderantes están la influencia de la carga de agua del río en las proximidades de sus bordes, la diferencia estacional en la recarga de los acuíferos y la distancia temporal existente entre los datos recogidos en terrenos del Sernageomin y los pertenecientes a la carta hidrogeológica de Rancagua.

Tabla 17: Susceptibilidad asignada de acuerdo a la profundidad de nivel freático

Clasificación	Profundidad nivel freático en metros
9	<2,5
7	2,5-5
5	5-10
3	10-15
1	>15

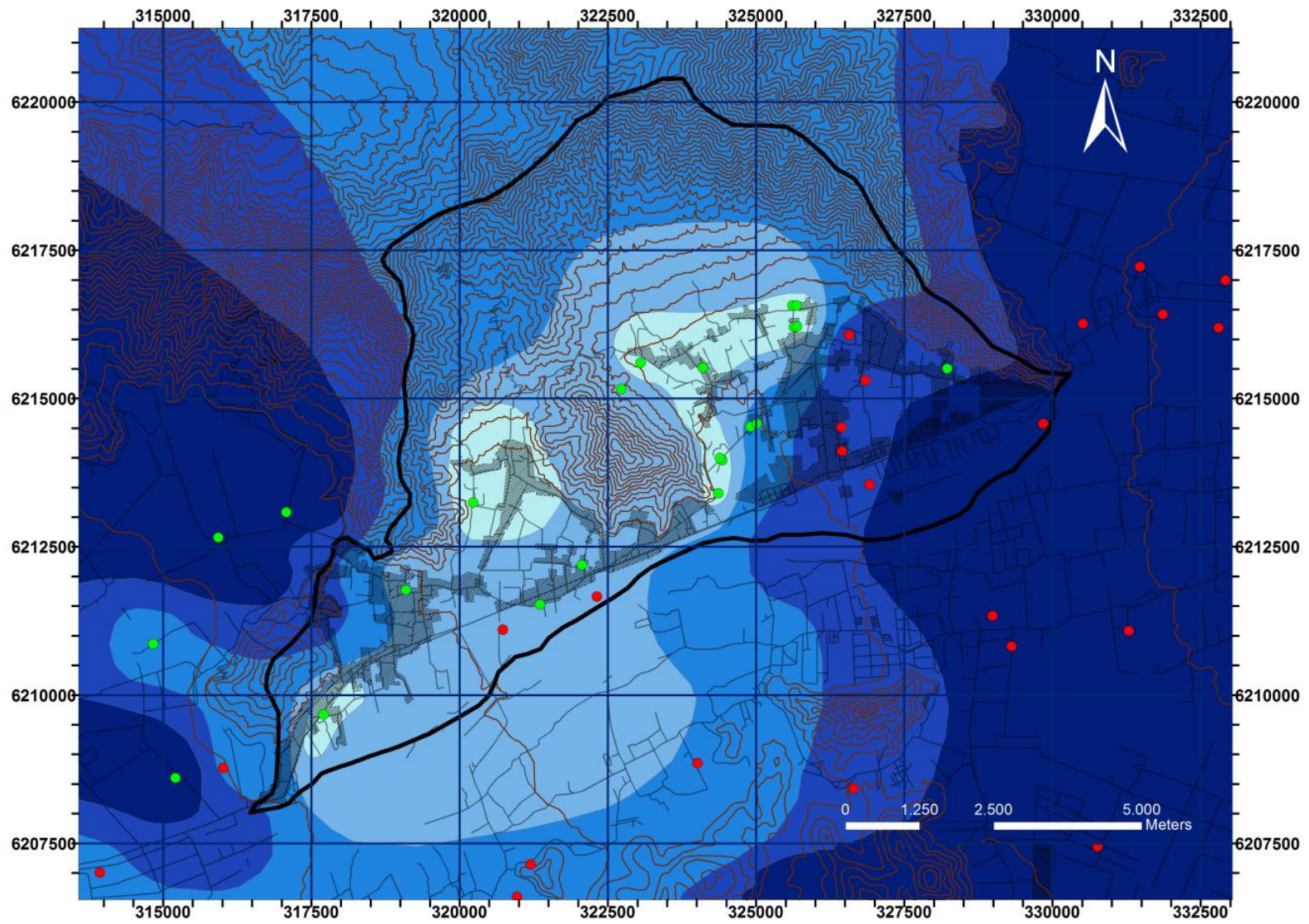


Figura 40: Nivel estático de aguas en la comuna de Doñihue. La tabla con las coordenadas geográficas de los puntos se detalla en el Anexo C 2. Ptos. en rojo: pertenecientes a la carta Hidrogeológica de Rancagua; Ptos. en Verde: medidos durante terrenos. Borde en negro: límite comunal. Profundidad en metros de acuerdo al color, de más claro a más oscuro: <2.5, 2.5-5, 5-10, 10-15 y >15 m.

5.5 Resumen de resultados

5.5.1 Tablas de Evaluación del potencial de licuefacción

Tabla 18: Tabla resumen de la evaluación del potencial de licuefacción en la comuna de Doñihue

Clasificación	Granulometría y Origen de depósitos		Profundidad nivel freático en metros	Edad del depósito	Aceleraciones gatillantes	
	Origen/Tipo de Depósitos	Granulometría de Depósitos			Tipo de depósito	PGA gatillante
9	Depósitos aluviales distales	Depósitos compuestos por arenas, limos y arcillas	<2,5	Holoceno	Fluviales Recientes	≤0,2g
7	Depósitos aluviales proximales	Depósitos que posean lentes de arena dentro de los primeros 30 metros de profundidad y con una granulometría distinta de los depósitos de muy alta susceptibilidad	2,5-5	-	-	≥0.2g
	Depósitos Fluviales recientes					
	Depósitos Fluviales antiguos					
5	-	Depósitos compuestos por gravas, arenas y finos en relativamente igual proporción	5-10	Pleistoceno a Holoceno	Fluviales Antiguos	≥0.3g
					Aluviales de Valle	
3	Depósitos de Remociones en Masa	Depósitos compuestos por Bolones, Gravas y en menor proporción arenas	10-15	-	Aluviales de piedemonte y quebradas	≥0.4g
					Remoción en masa	
					Coluviales	
1	Depósitos Coluviales	Depósitos compuestos mayoritariamente por Bloques, Bolones y Gravas	>15	Pre pleistoceno	-	≥0.5g
	Depósitos de quebradas y piedemonte					

5.5.2 Mapas temáticos del potencial de licuefacción

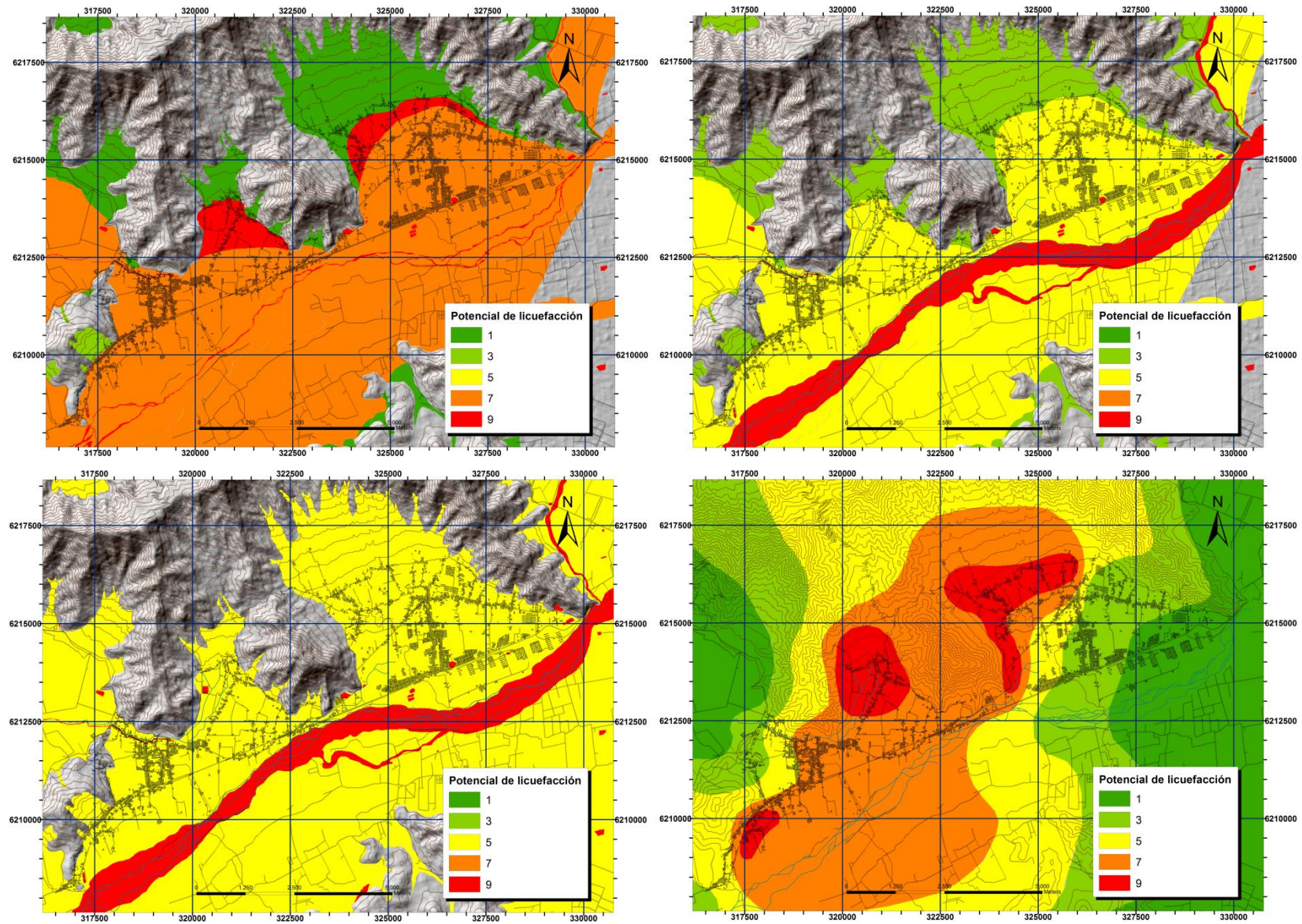


Figura 41: Esquina superior izquierda: Granulometría y origen. Esquina superior derecha: Amplitud de vibración. Esquina inferior izquierda: Edad de los depósitos. Esquina Inferior derecha: Profundidad de nivel freático.

6 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

6.1 Introducción

La evaluación de la susceptibilidad se realizó en base a los 4 factores analizados durante el capítulo 6: Granulometría y Origen de los Depósitos (GRyO), Amplitud de vibración del terreno (AV), Edad de los depósitos (ED) y Profundidad del nivel freático (NF).

El área en estudio fue zonificada y evaluada respecto a ellos, obteniéndose para cada factor un mapa temático (Figura 41) y una tabla evaluativa del potencial de licuefacción (Tabla 18). En cada tabla se detallan las características observadas, calculadas y/o inferidas que son necesarias para asignar un potencial específico (9, 7, 5, 3, 1) a las zonas que componen el área en estudio.

Para evaluar la susceptibilidad se ponderó el mapa temático de cada factor por un coeficiente que representa su porcentaje de influencia en el mapa de susceptibilidad final. Tal como se mencionó en la metodología, el resultado de esta ponderación se denomina Índice de Susceptibilidad (IS) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

$$IS = a \times GRyO + b \times AV + c \times ED + d \times NF$$

Ecuación 1: Índice de Susceptibilidad

El valor del IS redondeado al entero más cercano será interpretado cualitativamente de acuerdo a la Tabla 19.

Tabla 19: Rangos del IS y Susceptibilidad asignada

IS	Susceptibilidad
1-3	Muy Bajo
4	Bajo
5	Medio
6	Alto
7-9	Muy Alto

6.2 Resultados

Los valores de los coeficientes de la Ecuación 1 que mejor modelan la susceptibilidad de la zona son: a=0,3, b=0,2, c=0,2, d=0,3.

Estos porcentajes se obtuvieron luego de superponer iterativamente los mapas temáticos asociados a cada factor hasta conseguir una relación que vincule de buena manera las zonas con evidencias de licuefacción con las zonas de alta susceptibilidad.

El resumen de ponderaciones y susceptibilidades finales asignadas se observa en la Tabla 20. El mapa de susceptibilidad preliminar se observa en el Anexo G.

Tabla 20: Matriz de decisión de susceptibilidad de acuerdo a los diferentes tipos de depósitos en el área de estudio. Celdas en blanco: susceptibilidades observadas en la zona de estudio. Celdas en gris: susceptibilidades inferidas de acuerdo a la metodología empleada. VH: Muy Alta, H: Alta, M: Media, L: Baja, VL: Muy Baja.

Unidad Geológica	Descripción	Granulometría (30%)	Edad del depósito (20%)	Amplitud de Vibración (20%)	IS de acuerdo a profundidad de nivel freático					Susceptibilidad				
					<2,5 (9)	2,5-5 (7)	5-10 (5)	10-15 (3)	>15 (1)	<2,5	2,5-5	5-10	10-15	>15
PIHav	Depósitos aluviales de valle	Variable (7 a 9)	5	5	7	6-7	6	5-6	4	VH	H-VH	H	M-H	L
	<i>Aluviales proximales</i>	7	5	5	7	6	6	5	4	VH	H	H	M	L
	<i>Aluviales distales</i>	9	5	5	7	7	6	6	5	VH	VH	H	H	M
PIHq	Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas	1	5	3	5	4	3	3	2	M	L	VL	VL	VL
PIHf	Depósitos fluviales antiguos	7	5	5	7	6	6	5	4	VH	H	H	M	L
Hf	Depósitos fluviales recientes	7	9	9	8	8	7	7	6	VH	VH	VH	VH	H
PIHrm	Depósitos de remoción en masa	3	5	3	5	5	4	3	3	M	M	L	VL	VL
Hc	Depósitos coluviales	1	9	3	5	5	4	4	3	M	M	L	L	VL

El mapa preliminar fue posteriormente sometido a revisión para corregir aquellos errores que escapan de la metodología propuesta. El mapa final de susceptibilidad de licuefacción se observa en la Figura 42. Entre las correcciones finales realizadas se encuentran:

- Delimitar apropiadamente la zona perteneciente al área de estudio y eliminar los resultados obtenidos fuera de ella.
- Omitir las zonas de muy alta susceptibilidad asignadas a la escorrentía superficial del cauce del río Cachapoal debido a que varían con el tiempo.
- Incrementar la susceptibilidad a la zona ubicada entre los depósitos fluviales y aluviales de valle. Esto debido a la posibilidad de que ocurra “lateral spreading”.
- Suavizar curvas.

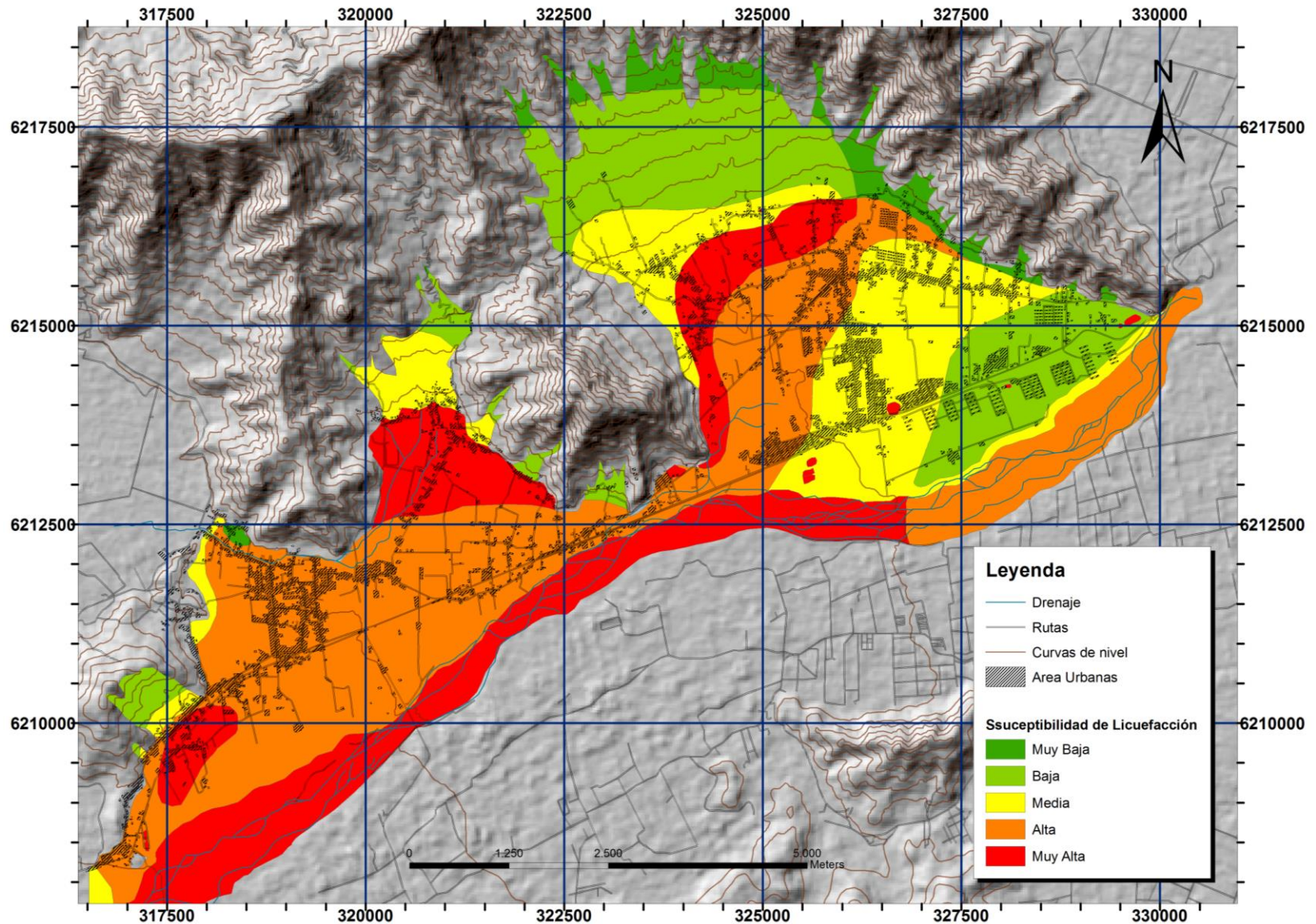


Figura 42: Mapa final de susceptibilidad a la licuefacción en la comuna de Doñihue. Susceptibilidades asignadas: en rojo, muy alta; naranja, alta; amarillo, media; verde claro, baja; verde oscuro, muy baja. Zonas con construcciones achuradas. Curvas de nivel en color café. Rutas en color negro. Drenaje en color azul.

7 DISCUSIONES

7.1 Respecto a los factores que influyen en la licuefacción

La forma de evaluación de la susceptibilidad depende completamente de los factores a utilizar. De todos los mencionados sólo la profundidad del nivel y la amplitud de vibración son relativamente independientes del resto.

A continuación se detallarán las relaciones existentes entre los distintos factores estudiados, siempre hablando en términos generales y considerando los casos más probables, sin caer en las particularidades de la zona de estudio.

Densidad:

La densidad se relaciona con la **edad de los depósitos**; depósitos antiguos serán más densos que los jóvenes. Esto se explica por el proceso de litificación que cementa y compacta los granos con el paso del tiempo.

A su vez la densidad se relaciona con el **origen de los depósitos** y su **granulometría**; por ejemplo, depósitos coluviales que usualmente están formados por sedimentos de grano grueso presentan una densidad relativa menor que depósitos lacustres de grano fino. La relación se logra a través de la porosidad, mientras mayor sea la densidad relativa de un depósito menor será su porosidad y por ende mayor será el tamaño del grano. Esto último se obtiene generalizando los depósitos como monodispersos (un solo tamaño de grano).

Se relaciona además con el **peso del recubrimiento y profundidad del suelo**, en donde se puede estimar que la densidad relativa de los depósitos se incrementa con la profundidad. Esto se debe a que el esfuerzo total ejercido sobre los depósitos es mayor con la profundidad, incrementando el roce entre partículas. La combinación de estos factores incrementa la resistencia a la licuefacción.

Granulometría:

Se decidió agrupar la granulometría con el **tipo u origen del depósito** debido a que este último es el que realmente influye en la susceptibilidad final. El potencial de licuefacción que se asigna al tipo de depósito probablemente deriva de una mera estimación o generalización de su granulometría y de casos históricos observados.

Amplitud de vibración:

No existe una relación directa ni obvia entre la amplitud de vibración y los demás factores, por lo que fue considerado independiente del resto. Sin embargo las metodologías utilizadas llevan implícita la variable **edad del depósito**.

Profundidad del nivel freático:

Tampoco existe una relación directa entre la profundidad del nivel freático (o estático) de aguas con el resto de los factores. Sin embargo es fácil percatarse que la granulometría y densidad del suelo pueden afectar el nivel de aguas en periodos cortos de tiempo. Por ejemplo, una perturbación en la profundidad de la napa subterránea (por bombeo de agua, ensayos de permeabilidad, etc.) no se recupera inmediatamente, necesitando de tiempo para recobrar su

estado original. Esto se debe a que el escurrimiento está controlado por la permeabilidad del suelo, factor que en parte depende de la porosidad (relacionada a la granulometría) y la densidad del terreno.

7.2 Respecto a la Metodología

La metodología empleada busca dar un sustento teórico y semicuantitativo al proceso de evaluación de la susceptibilidad que actualmente se utiliza en el Sernageomin, la cual no establece una pauta de trabajo clara, y se guía más bien por los patrones generales de comportamiento de los factores que influyen en el potencial de licuefacción, sin asignar rangos pertinentes para cada uno (a excepción del nivel freático, el cual sí es trabajado de acuerdo a intervalos de profundidad).

La metodología propuesta, al contrario de estudios previos del USGS, no considera la licuefacción histórica como un factor propiamente tal, sino que como un parámetro de correlación, esto debido a que las evidencias no encierran áreas, sino que son zonas puntuales.

El utilizar un método iterativo para obtener las susceptibilidades puede dar la impresión al lector que se está manipulando la información para hacer calzar los datos, sin embargo esto no es así. Al verse modificada la ponderación de uno de los factores la zonificación de la susceptibilidad no cambia solamente en un sitio particular, sino que afecta a toda el área de estudio, lo que permite distribuir de manera óptima las zonas desde muy alta a muy baja susceptibilidad. Además la relación se establece mediante las zonas de licuefacción histórica, que intuitivamente, desde una primer proceso de iteración, debiesen estar relativamente bien correlacionadas con las zonas de alta a muy alta susceptibilidad, siendo el proceso de iteración un mero ajuste final.

Debido a las limitaciones del programa empleado la metodología se realizó con clasificaciones de 1 a 9, utilizando valores impares y con el IS redondeado al entero más cercano. Para futuros estudios se deja abierta la opción asignar al grado de susceptibilidad otros rango de valores o de utilizar decimales en el análisis si así se desea.

7.3 Respecto a la evaluación del potencial de licuefacción

Granulometría y origen de depósitos

El contacto entre lo que fue definido como depósitos aluviales I y II es solo estimativo, ya que no existen datos granulométricos suficientes que permitan establecer donde ocurre exactamente este cambio en el tamaño de grano.

Tampoco es muy claro el contacto entre los depósitos aluviales de piedemonte y quebradas con los depósitos aluviales distales. Esto debido a que si se comparan los datos de la Hoja Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua con una base de datos proporcionada por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) es posible observar una discrepancia en el origen de depósitos. Zonas mapeadas como depósitos aluviales de valle en la Hoja, están marcadas como abanicos aluviales en la base de datos. Esto sólo reafirma la hipótesis propuesta en el capítulo 4.2.2, que supone una superposición de eventos en esta zona.

Por otro lado los datos granulométricos fueron obtenidos de diversas fuentes, lo que implica un mayor nivel de detalle en algunas unidades que en otras:

- Depósitos aluviales distales: Observaciones de terreno y ensayos de laboratorio
- Depósitos aluviales proximales y fluviales: Carta geológica Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua y Base de datos de la DOH.
- Depósitos aluviales de piedemonte y quebradas: Carta geológica Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua y observaciones de terreno.
- Coluviales y de remociones en masa: Carta geológica Rancagua – San Vicente de Tagua Tagua

Su homogeneidad en profundidad tampoco está asegurada ya que no todas los depósitos presentan descripciones de pozos (DOH).

Amplitud y duración de vibración del terreno

En este capítulo solo fue evaluada la amplitud, no así la duración de la vibración, lo que puede restringir la evaluación de la susceptibilidad final.

El estudio de este factor no se llevó a cabo mediante una zonificación sísmica debido a que la zona de estudio es muy pequeña para obtener una distribución adecuada. Tampoco se realizó un trabajo de amplificaciones que hubiese sido lo ideal (considerar como ejemplo el trabajo de Ramírez, 2012, en Iquique) debido a que escapa de los objetivos propuestos en este trabajo.

Por tal motivo se propuso estimar la influencia sísmica en la zona mediante un análisis de las aceleraciones gatillantes de licuefacción, clasificándolas de acuerdo a Hayden, Lloyd y Haydon, 1999, pero utilizando rangos modificados de acuerdo a trabajos recientes. El análisis se utilizó los datos existentes en trabajos del USGS que utilizaron la metodología de Seed & Idriss, 1971 (*Simplified procedure for evaluationg soil liquefaction potencial*) para evaluar la resistencia a la licuefacción y con ella estimar la aceleración gatillante de cada depósito de la zona de estudio.

A pesar de no ser la forma ideal de acuerdo a la metodología, sí resulta ser bastante útil, ya que incluye indirectamente uno de los métodos comúnmente más utilizados para evaluar el potencial de licuefacción en la ingeniería civil.

La aceleración gatillante para los depósitos aluviales de piedemonte y quebradas, remociones en masa y coluviales se realizó en base a las establecidas para depósitos aluviales indiferenciados y de abanico en trabajos realizados en San Francisco entre los años 2000 y 2006. Esta es una generalización, debido a que no se encontraron aceleraciones gatillante para estos depósitos en estudios previos.

La forma en que se obtuvieron las aceleraciones gatillantes lleva implícita el factor edad del depósito, lo que puede resultar redundante si se evalúa este mismo factor en otro capítulo (No confundir que el método utilizado use ambas variables con que sean dependientes unas de otras).

Edad del depósito

La falta de precisión en las edades asignadas a los depósitos impidió zonificar detalladamente el área de estudio. Los rangos utilizados son muy amplios, por lo que se recomienda para futuros trabajos intentar imitar la distribución propuesta por Tinsley et al (1985),

que resulta ser la mejor si se evalúa la susceptibilidad en cinco intervalos (desde muy alta a muy baja).

Profundidad del nivel freático

El estudio no consideró las variaciones estacionales del nivel estático de aguas. Además se utilizaron registros de pozos de la carta hidrogeológica de Rancagua, los cuales tienen entre 30 a 40 años de antigüedad promedio. Esto puede generar variaciones entre el nivel estimado y el nivel real actual.

La división de los rangos de profundidad del nivel estático asociados a la susceptibilidad de licuefacción no es constante. La distribución escogida se basó en estudios previos que fueron modificados levemente de acuerdo a criterios personales. Estos rangos pueden ser adaptados a las condiciones y requerimientos de próximos trabajos, siempre considerando que un potencial alto a muy alto nunca debe ser asignado a profundidades mayores a 10 metros.

Existen registros de licuefacción hasta 30 metros bajo condiciones excepcionales, sin embargo la ocurrencia histórica del fenómeno a estas profundidades es tan baja que el riesgo de licuefacción podría considerarse nulo para profundidades mayores, aunque no se recomienda.

Las modificaciones realizadas al mapa obtenido luego de la interpolación se basaron en criterios personales y en las curvas propuestas en la Carta hidrogeológica de Rancagua. La profundidad del nivel freático propuesta debe limitarse a las unidades de suelo, no así a las unidades de roca. Esto fue considerado en el mapa final.

7.4 Respecto a la susceptibilidad final

La evaluación final consideró finalmente 5 de los 7 factores considerados relevantes para la evaluación de la susceptibilidad, excluyendo la densidad y la profundidad de depósitos. Los 5 factores utilizados fueron agrupados finalmente en 4, por la interdependencia del origen de depósitos y su granulometría.

En el análisis final no se consideraron factores propios de la geomorfología del sector. Tampoco se consideraron fenómenos de transporte de sedimentos como la iluviación de arcillas, que podría haber influido en la alta concentración de material fino en los depósitos aluviales distales.

Las susceptibilidades obtenidas a partir del IS dependen en gran medida del porcentaje de influencia de cada factor. Se recomienda que tanto la ponderación del nivel freático como de la granulometría y origen de depósitos nunca sea inferior al 25% cada uno, debido a que estos factores son imprescindibles para evaluar la susceptibilidad.

Es probable que con mayor información respecto a la profundidad del nivel freático se observe que el nivel inferior a 2,5 m recorra todo el borde ubicado a los pies del cordón montañoso, bordeando por completo el cerro Tren Tren. Esto tendría sentido debido a que en esta zona ocurre un cambio abrupto de pendiente, lo que dejaría el nivel estático más expuesto en superficie.

Estudios más detallados deben incluir ensayos de mecánica de suelos sobre los depósitos de la zona en estudio: granulometría, límites de Atterberg, ensayos SPT, que permitan para identificar claramente el potencial de licuefacción, junto a una mejora en la metodología.

7.5 Respecto a las medidas de mitigación

Un resumen completo de los distintos métodos de mitigación de la licuefacción pueden encontrarse en el Anexo I.

Los métodos de mitigación más fiables orientados a obras nuevas son aquellos que se basan en la densificación de terreno, siendo considerados como métodos estándar para mitigar el potencial de licuefacción. Sin embargo el ruido y las vibraciones producidas durante las técnicas de vibroflotación, vibrosustitución y compactaciones dinámicas genera efectos adversos en el medio ambiente y la comunidad.

Los métodos de vibroflotación y vibrosustitución frente a la compactación dinámica resultan ser mucho más efectivos en cuanto a profundidad de influencia y comportamiento relativo al contenido finos. Sin embargo presentan cualidades negativas, como lo son sus altos costos y los posibles efectos nocivos de los agentes estabilizantes.

Por otro lado, el método de mitigación orientado a obras existentes que resulta más adecuado es la inyección de compactación. (Henríquez, 2007).

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La susceptibilidad de licuefacción fue modelada utilizando 4 factores: Granulometría y origen de depósitos, edad de los depósitos, amplitud de vibración y profundidad de nivel freático.
- La metodología propuesta resultó pertinente para cumplir con los objetivos del estudio, sin embargo debe ser refinada en futuros trabajos, para ello se recomienda:
 - Establecer un criterio que permita relacionar y evaluar la edad, densidad, peso del recubrimiento y profundidad de depósitos, ya que son factores interdependientes.
 - Refinar el criterio asignado al factor granulometría y origen de depósitos, esta vez utilizando la clasificación USCS de suelos. Para ello es necesario contar con ensayos de granulometría para cada depósito y/o zona de interés (estratos licuables, superficies con evidencias de licuefacción, etc.)
 - Contar con datos estacionales de nivel freático, a fin de elaborar mapas de susceptibilidad tanto para estación lluviosa como seca.
- Existe una superposición de eventos entre un ambiente fluvio-aluvial asociado a los depósitos del río Cachapoal y un ambiente aluvial asociado a la erosión y arrastre de material desde el cordón montañoso.
- El método alternativo propuesto para la evaluación de la amplitud de vibración mediante aceleraciones gatillantes resultó adecuado, sin embargo se recomienda utilizar un mapa de amplificaciones sísmicas para futuros estudios.
- Las mayores susceptibilidades se obtuvieron a los pies del cordón montañoso que rodea la comuna, en la zona de transición entre depósitos aluviales de quebradas y piedemontes y los depósitos aluviales distales. También se obtuvieron en la zona en que los depósitos fluviales presentan un nivel freático inferior a 15 metros.
- La mayor parte de las zonas pobladas de la comuna se ubican en áreas catalogadas de alta a muy alta susceptibilidad, esto debido principalmente a la baja profundidad del nivel freático en la localidad de Doñihue.
- El nivel estático de aguas se vuelve más profundo hacia el Este, en dirección a Rancagua. Esto genera que el valle de Lo Miranda presente susceptibilidades menores.
- En términos geográficos las áreas más susceptibles al fenómeno son las zonas rurales dedicadas al sector agrícola, las zonas urbanas de Doñihue (Camarico, Cerrillos, California, Rinconada y Doñihue), la localidad de Plazuela y el sector centro norte de Lo Miranda. Las menos susceptibles son la zona sur/sureste de Lo Miranda, en donde se encuentra el sector residencial e industrial del valle, y las áreas forestales ubicadas sobre el cordón montañoso.

9 REFERENCIAS

- Algermissen, S.T.; Kausel, E.; Hanson, S.; Thenhaus, P.C. 1992. Earthquake hazard in Chile. *Revista Geofísica* 37: 195-218.
- Allen, John RL. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 1965, vol. 5, no 2, p. 89-191.
- Ambraseys, N.N., 1991. Engineering seismology. *Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 17, 1–105.
- Astroza, M., Ruiz, S., Astroza, R. and Molina, J. (2012). Intensidades Sísmicas. Capítulo 5. Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile. 27 Febrero 2010. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Astroza, M.; Moya, A.; Sanhueza, S. 2002. Estudio comparativo de los efectos de los terremotos de Chillan de 1939 y de Talca de 1928. In *Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, No. 8. CD-ROM. Valparaíso.
- Astroza, M.; Sandoval, M.; Kausel, E. 2005. Estudio comparativo de los efectos de los sismos chilenos de subducción del tipo intraplaca de profundidad intermedia. In *Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, No. 9. CD-ROM. Concepción.
- Audemard, A. y De Santis, F., 1991. Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *Bulletin International Association Engineering Geol.*, n° 44: 4-16.
- Barrientos, S. 1980. Regionalización sísmica de Chile. Tesis de Magíster en Ciencias (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geofísica: 72 p.
- Bartlett, S. F., & Youd, T. L. (1992). Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spreads (pp. 5-14). Buffalo, NY: National Center for earthquake engineering research.
- Belmonte-Pool, J. 1997. Análisis del contacto sismogénico interplaca a lo largo de Chile. Tesis de Magíster en Ciencias (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geofísica: 148 p.
- Brankman, C. M., & Baise, L. G. (2008). Liquefaction susceptibility mapping in Boston, Massachusetts. *Environmental & Engineering Geoscience*, 14(1), 1-16
- Bridge, J. S., & Leeder, M. R. (1979). A simulation model of alluvial stratigraphy. *Sedimentology*, 26(5), 617-644.
- Cáceres D., Ramírez P. 2012. “Microzonificación sísmica y fenómenos de licuefacción en la comuna de San Pedro de la Paz, región del Biobío – Chile.” En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción y Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.
- Canal13. 24 Octubre, 2010. “La realidad de Doñihue tras el terremoto”. Doñihue, Chile. [Videograbación en línea] <http://www.youtube.com/watch?v=bbHkUnwY9DI> [Consulta: 16 Enero 2012]. 487 seg. Sonido. Color. Resolución 240p.
- Casagrande, A. (1979). Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands: A Critical Review; Presented at Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina, November 1975. Pierce Hall. Centro de Información de Recursos Naturales CIREN.

Charles Wortmann, Martha Mamo, and Charles Shapiro, Lime Use for Soil Acidity Management, University of Nebraska Extension NebGuide G03-1504-A

Charles Wortmann, Martha Mamo, and Charles Shapiro, Management Strategies to Reduce the Rate of Soil Acidification, University of Nebraska Extension NebGuide G03-1503-A.

Cuenta Pública 2010. Ministerio del Interior y Seguridad Pública.

Da Silva Rodríguez M.R. (2011). Análisis de las relaciones porosidad y permeabilidad en sedimentos no consolidados. Proyecto de Grado para optar al título de ingeniero geofísico. Sartenejas, Universidad Simón Bolívar.

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Dirección General de Aguas (DGA). Mapa de cuencas, subcuencas y subsubcuencas hidrográficas de Chile.

Donald B. Ballantyne, American Water Works Association (AWWA). 1994. Minimizing Earthquake Damage. A guide for Water Utilities.

Falcón M.F., et al. 2010. Peligro de licuefacción: área Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante. Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental. Mapa escala 1:50.000.

Falcón M.F., Ramírez P. 2012. "Generación de mapas de licuefacción a partir del sismo de Febrero de 2010". En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción y Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.

Galli, P. (2000). New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics*, 324(3), 169-187.

Galli, P., Ferreli, L., 1995. A methodological approach for historical liquefaction research. In: Serva, L., Slemmons, B. (Eds.), *Perspectives in Paleoseismology*. Association of Engineering Geologists Special Publication 6., 36-48.

Galli, P., Meloni, F., 1993. Liquefazione Storica. Un catalogo nazionale. *Quat. Ital. J. Quat. Sci.* 6, 271-292.

Garrido N. 2012. Determinación de Peligro de Flujos de Detritos en la Quebrada de Macul, Cuenca de Santiago. Memoria para optar al Título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Gestión de Patrimonio Ltda. 2008. Plan de Desarrollo Comunal, Ilustre Municipalidad de Doñihue, 2008 – 2012. 45 p.

Glossary of U.S. Department of agriculture (USDA).

Godoy E., Schilling M., Solari M., Fock A. 2009. Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 118: 50 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

González L, Abdoun T, Zeghal M, Kallou V, Sharp MK (2005) Physical modeling and visualization of soil liquefaction under high confining stress. *Earthq Eng Vib* 4(1):47-57

González de Vallejo, Luis & Otros. 2004. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, S.A. Madrid.

- González J., Verdugo R. 2012. “Efectos del terremoto del 27F en el subsuelo del puerto de Coronel”. En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción y Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile.
- González V., Verdugo R. 2012. “Licuefacción en el área de Paine inducida por el terremoto 27F”. En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción y Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile
- Hauser A. 1990. Hoja Rancagua, VI Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Hidrogeológica de Chile No. 1: 73 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Hayden, Lloyd, and Haydon, 1999. Título desconocido.
- Henríquez Pantaleón C.I., 2007. Mejora de Terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación. Tesis Doctoral. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Huang, Y., & Yu, M. (2013). Review of soil liquefaction characteristics during major earthquakes of the twenty-first century. *Natural Hazards*, 65(3), 2375-2384.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351-451.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation* (Vol. 3, pp. 1310-1330).
- Jaramillo C. 2011. Estudio de los efectos del terremoto del 27 de febrero de 2010 en las viviendas sociales de la VI Región. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago de Chile. Universidad de Chile.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.* 95, 406–421
- Khazaradze, G., & Klotz, J. (2003). Short-and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 108(B6).
- Knudsen K.L., Sowers J.M., Witter R.C., Wentworth C.M. and Helley E.J., 2000, Description of mapping of quaternary deposits and liquefaction susceptibility, nine-county San Francisco Bay Region, California: U.S. Geological Survey Part 3 of Open-File Report 00-444 Version 1.0.
- Kramer S.L., Universidad de Washington, 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall. 653p.
- Kramer, C., & Arango, I. (1998, September). Aging effects on the liquefaction resistance of sand deposits: A review and update. In *Proc., Eleventh European Conf. on Earthquake Engineering* (Vol. 184). Paris, Abstract.
- Kuribayashi, E., & Tatsuoka, F. (1975). Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V., Salas, J. A. J., Ortiz, J. M. R., & Rodríguez, A. R. (1972). *Mecánica de suelos* (p. 582pag). Limusa-Wiley.
- Leyton F., Arenas M., Contreras J. 2012. “Geología superficial, frecuencias predominantes de suelos y observaciones de licuefacción en Curicó tras el terremoto de Maule de 2010”. En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Proyecto Fondecyt 1100551.

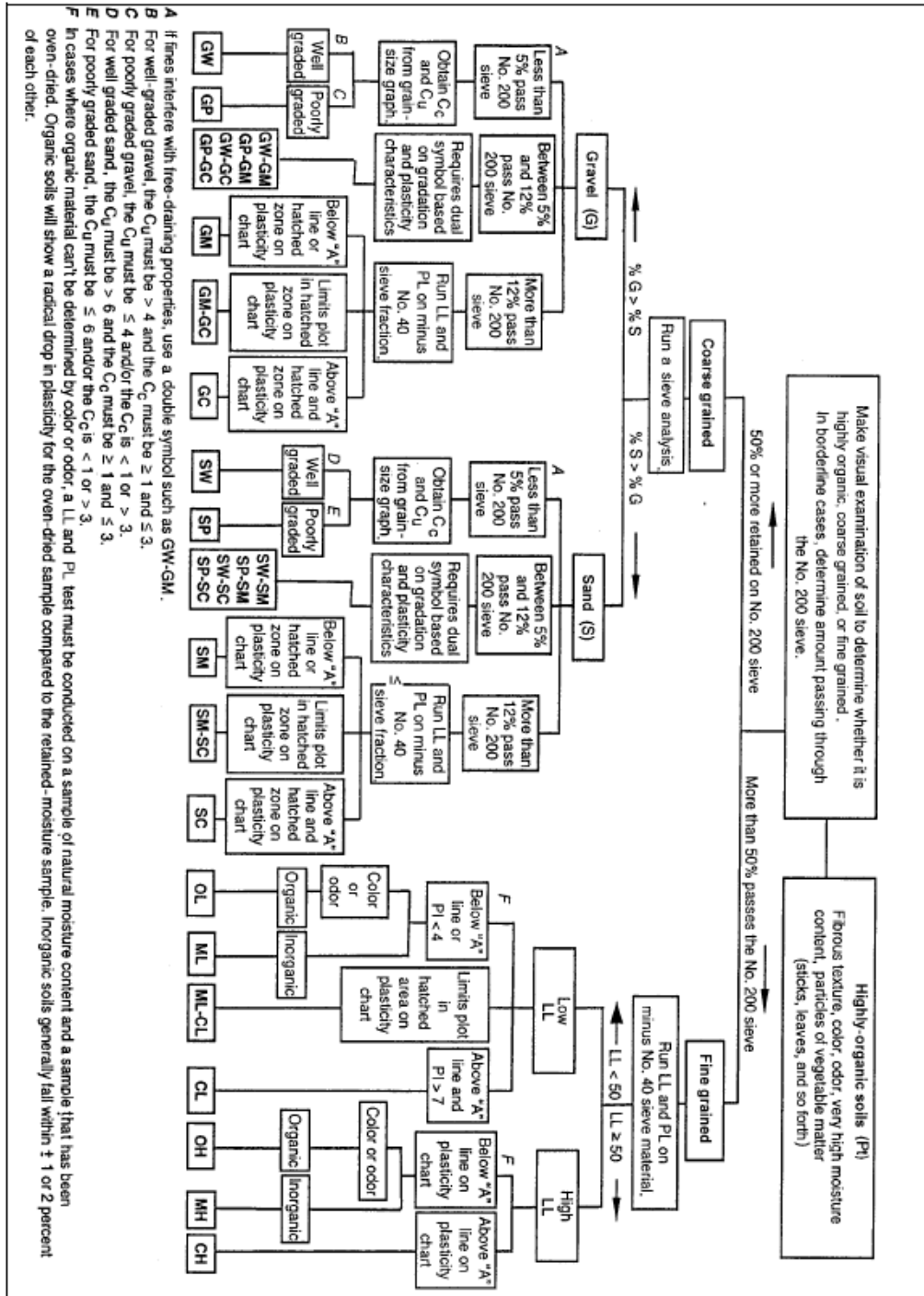
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472
- López A., Maturana G. 1986. Plan Regulador Comunal de Doñihue, Localidad de Lo Miranda. Doñihue. Esc. 1:5000.
- López A., Maturana G. 1986. Plan Regulador Comunal de Doñihue, Localidad de Doñihue. Doñihue. Esc. 1:5000.
- Marcel Hürlimann, Año desconocido. Tema 1.2, Título desconocido. Barcelona TECH.
- Martín, A. 1990. Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 132 p.
- Meganoticias. 10 Marzo, 2010. “Reportaje post-terremoto Chile en Doñihue 27 febrero 2010”. Doñihue, Chile. [Videograbación en línea] <http://www.youtube.com/watch?v=bbHkUnwY9DI> [Consulta: 16 Enero 2012]. 325 seg. Sonido. Color. Resolución 480p.
- Menke, W. 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, International Geophysical series: 289 p. New York.
- Moretti, M., Pieri, P., Tropeano, M. y Walsh, N., 1995. Tyrrhenian seismites in Bari area (Murge-Apulian foreland). *Atti dei Convegni Licenci*, 122. Terremoti in Italia. Accademia Nazionale dei Lincei: 211 – 216.
- Naeini, S. A., & Baziar, M. H. (2004). Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(3), 181-187.
- Obermeier, S., 1994. Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. En: *Using ground-failure features for paleoseismic analysis* (Ed. Obermeier, S. y Jibson, W.) Geological Survey Open-File Report, 94-633: A1- A98.
- Oliver G.; Renet J.P., 1976. Essai de cartographie des risques liés à des mouvements de terrain dans la région de Saint-Martin-de-Belleville. *Bull. Liason Lab. P. et Ch., spécial*, mars 1976, 40-55.
- ONEMI-DIREMER Desde la Región de Antofagasta hasta la Región de Los Lagos.
- Ovando-Shelley, E., & Mesa, C. M. (1991). Undrained behavior of a sand containing fines. In *Proceedings of the 9th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Viña del Mar, Chile (Vol. 3, pp. 1119-1136).
- Papadopoulos, G.A., Lefkopulos, G., 1993. Magnitude–distance relations for liquefaction in soil from earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 925–938.
- Peor tragedia natural de los últimos 50 años desata pánico y destrucción en zona centro sur. *La Tercera*, Chile, 28 de Febrero de 2010.
- Perucca L. y Bastias H., *El Terremoto Argentino de 1894: Fenómenos de Licuefacción asociados a Sismos*, 2005, *El terremoto argentino de 1894: Fenómenos de licuefacción asociados a Sismo*, Simposio Bodenbender serie de correlación Geológica, INSUGEO. Tucuman; Año: 2005 p. 55 – 55.
- Reineck, H. E., & Singh, I. B. (1980). Tidal flats. In *Depositional Sedimentary Environments* (pp. 430-456). Springer Berlin Heidelberg.
- Romanoff, F. 1999. Estudio del Peligro Sísmico en la Región Metropolitana. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 85 p.

- Ruiz, S. y Madariaga, R. (2012). Sismogénesis, Proceso de Ruptura y Replicas del Mega Terremoto del Maule 2010. Capítulo 1. Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile. 27 Febrero 2010. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Ruiz, S.; Saragoni, G.R. 2005a. Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo. In Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, No. 9. CD-ROM. Concepción.
- Ruiz, S.; Saragoni, G.R. 2005b. Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile de terremotos interplaca tipo thrust considerando los efectos del suelo y las asperezas. In Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, No. 9. CD-ROM. Concepción.
- Sadigh, K.; Chang, C.-Y; Egan, JA.; Makdisi, F; Youngs, R.R. 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological Research Letters* 68: 180-189.
- Saragoni, GR.; Astroza, M.; Ruiz, S. 2004. Comparative study of subduction earthquake ground motion of north, central and south America. In Proceedings of the thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper 104. CD-ROM. Vancouver.
- Sathvi, Bulk density Pictures [en línea] <http://withfriendship.com/user/sathvi/bulk-density.php> [consulta: 14 Octubre 2013]
- Seed, B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 92(ASCE# 4972 Proceeding).
- Seed, H. B. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(2), 201-255.
- Seed, H., 1968. Landslides during earthquakes due to solid liquefaction. *Proc. Am. Soc. Civil Eng., Soil Mech. Fdns. Div.*, 94: 1053-1122.
- Sellés, D., & Gana, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal: regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Gobierno de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología.
- Servicio Sismológico, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile. Registros históricos.
- Silva, N. 2008. Caracterización y determinación del peligro sísmico en la Región Metropolitana. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil: 148 p.
- Suárez, G.; Comte, D. 1993. Comment on 'Seismic coupling along the Chilean subduction zone' by B.W. Tichelaar and L.R. Ruff. *Journal of Geophysical Research* 98: 15825-15828.
- Tadashi, A., 1995. Riesgos geológicos urbanos. In: Aspectos geológicos de protección ambiental. Repetto, F., Santiago, C., editores. UNESCO, Montevideo, Vol. 1, pp. 89-101
- Televisión Nacional de Chile (TVN). 18 Marzo, 2010. "Doñihue, Chile, Región de O'Higgins". Doñihue, Chile. [Videograbación en línea] <http://www.youtube.com/watch?v=J6dHmzf2A9A> [Consulta: 16 Enero 2012]. 193 seg. Sonido. Color. Resolución 480p.
- Terzaghi, K., and Ralph B. Peck, 1948, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, New York
- Tichelaar, B. W., & Ruff, L. J. (1993). Depth of seismic coupling along subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, 98(B2), 2017-2037.

- Tinsley, J. C., Youd, T. L., Perkins, D. M., & Chen, A. T. F. (1985). Evaluating liquefaction potential. *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region—An Earth-Science Perspective*, ed. JI Ziony. US Geological Survey Professional Paper, (1360).
- Torres A., Verdugo R. 2012. “Retro-Análisis de falla por licuefacción de terreno ganado al mar en la bahía de San Vicente”. En: VII congreso Chileno de Geotecnia. 28 al 30 de Noviembre de 2012. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería.
- Tsunami: Académico PUCV detectó olas de 30 metros de altura en misión científica en el sur de Chile. *Universia*, Chile, 31 de Marzo de 2010.
- U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center, 2010. Magnitude 8.8 - OFFSHORE BIO-BIO, CHILE.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards* 3, UNESCO, 63 p.
- Verdugo R. 2006. Capítulo 4.4, Riesgo de licuefacción. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico Aysén.
- Verdugo R. et al. (2012). Características y efectos del fenómeno de licuefacción. Capítulo 4. Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile. 27 Febrero 2010. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Witter, R.C., Knudsen, K.L, Sowers, J.M., Wentworth, C.M., Koehler, R.D., Randolph, C. E. , Brooks, S.K., and Gans, K.D., 2006, Maps of Quaternary Deposits and Liquefaction Susceptibility in the Central San Francisco Bay Region, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 06-1037.
- Yong Wang, and Yanli Wang, 2010. Study of Effects of Fines Content on Liquefaction Properties of Sand. *GeoShanghai 2010 International Conference*.
- Youd T.L. (1977). Brief Review of Liquefaction During Earthquakes in Japan (Discussion).
- Youd, T. L. (1973). Liquefaction, flow, and associated ground failure (p. 12). Washington, DC: US Geological Survey.
- Youd, T. L., & Bennett, M. J. (1983). Liquefaction sites, Imperial Valley, California. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 440-457.
- Youd, T. L., & Hoose, S. N. (1977). Liquefaction susceptibility and geologic setting. In *Proceedings of 6th World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India (Vol. 6, pp. 37-42).
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313.
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 433-446.
- Zeng C.N. 2006. “Laboratory test study on the influence of percent fines on silt liquefaction and post-liquefaction.” Ph.D. thesis, Civil Engineering. Nanjing: Hohai University.

10 ANEXOS

ANEXO A



Anexo A 1: Esquema de clasificación de suelos de acuerdo a la USCS. Tomado de "clasificación de suelos", Geología Aplicada, semestre primavera 2012. Departamento de Geología, FCFM, Universidad de Chile.

TABLE 1 Soil Classification Chart

Criteria for Assigning Group Symbols and Group Names Using Laboratory Tests ^A				Soil Classification	
				Group Symbol	Group Name ^B
COARSE-GRAINED SOILS	Gravels	Clean Gravels	$Cu \geq 4$ and $1 \leq Cc \leq 3^C$	GW	Well-graded gravel ^D
More than 50 % retained on No. 200 sieve	More than 50 % of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Less than 5 % fines ^E	$Cu < 4$ and/or $1 > Cc > 3^C$	GP	Poorly graded gravel ^D
		Gravels with Fines	Fines classify as ML or MH	GM	Silty gravel ^{D, F, G}
		More than 12 % fines ^E	Fines classify as CL or CH	GC	Clayey gravel ^{D, F, G}
	Sands	Clean Sands	$Cu \geq 6$ and $1 \leq Cc \leq 3^C$	SW	Well-graded sand ^H
	50 % or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Less than 5 % fines ^I	$Cu < 6$ and/or $1 > Cc > 3^C$	SP	Poorly graded sand ^H
		Sands with Fines	Fines classify as ML or MH	SM	Silty sand ^{F, G, H}
		More than 12 % fines ^I	Fines classify as CL or CH	SC	Clayey sand ^{F, G, H}
FINE-GRAINED SOILS	Silts and Clays	inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line ^J	CL	Lean clay ^{K, L, M}
50 % or more passes the No. 200 sieve	Liquid limit less than 50	organic	$PI < 4$ or plots below "A" line ^J	ML	Silt ^{K, L, M}
			Liquid limit – oven dried ^O < 0.75	OL	Organic clay ^{K, L, M, N}
			Liquid limit – not dried	OL	Organic silt ^{K, L, M, O}
	Silts and Clays	inorganic	PI plots on or above "A" line	CH	Fat clay ^{K, L, M}
	Liquid limit 50 or more		PI plots below "A" line	MH	Elastic silt ^{K, L, M}
		organic	Liquid limit – oven dried ^O < 0.75	OH	Organic clay ^{K, L, M, P}
			Liquid limit – not dried	OH	Organic silt ^{K, L, M, O}
HIGHLY ORGANIC SOILS	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor			PT	Peat

^A Based on the material passing the 3-in. (75-mm) sieve.

^B If field sample contained cobbles or boulders, or both, add "with cobbles or boulders, or both" to group name.

^C $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$

^D If soil contains $\geq 15\%$ sand, add "with sand" to group name.

^E Gravels with 5 to 12 % fines require dual symbols:

- GW-GM well-graded gravel with silt
- GW-GC well-graded gravel with clay
- GP-GM poorly graded gravel with silt
- GP-GC poorly graded gravel with clay

^F If fines classify as CL-ML, use dual symbol GC-GM, or SC-SM.

^G If fines are organic, add "with organic fines" to group name.

^H If soil contains $\geq 15\%$ gravel, add "with gravel" to group name.

^I Sands with 5 to 12 % fines require dual symbols:

- SW-SM well-graded sand with silt
- SW-SC well-graded sand with clay
- SP-SM poorly graded sand with silt
- SP-SC poorly graded sand with clay

^J If Atterberg limits plot in hatched area, soil is a CL-ML, silty clay.

^K If soil contains 15 to 29 % plus No. 200, add "with sand" or "with gravel," whichever is predominant.

^L If soil contains $\geq 30\%$ plus No. 200, predominantly sand, add "sand" to group name.

^M If soil contains $\geq 30\%$ plus No. 200, predominantly gravel, add "gravelly" to group name.

^N $PI \geq 4$ and plots on or above "A" line.

^O $PI < 4$ or plots below "A" line.

^P PI plots on or above "A" line.

^Q PI plots below "A" line.

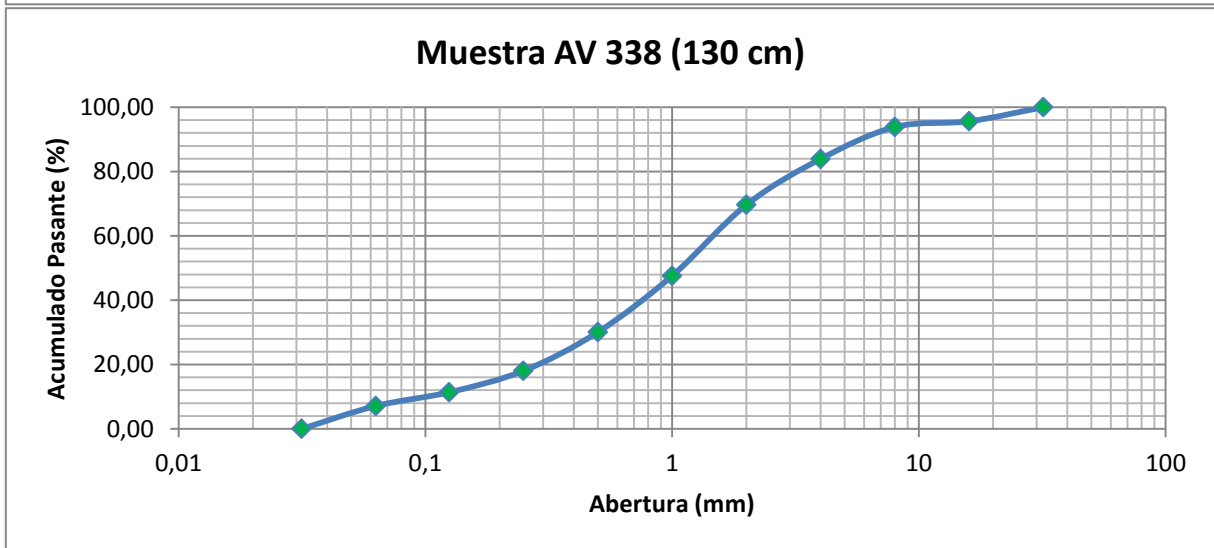
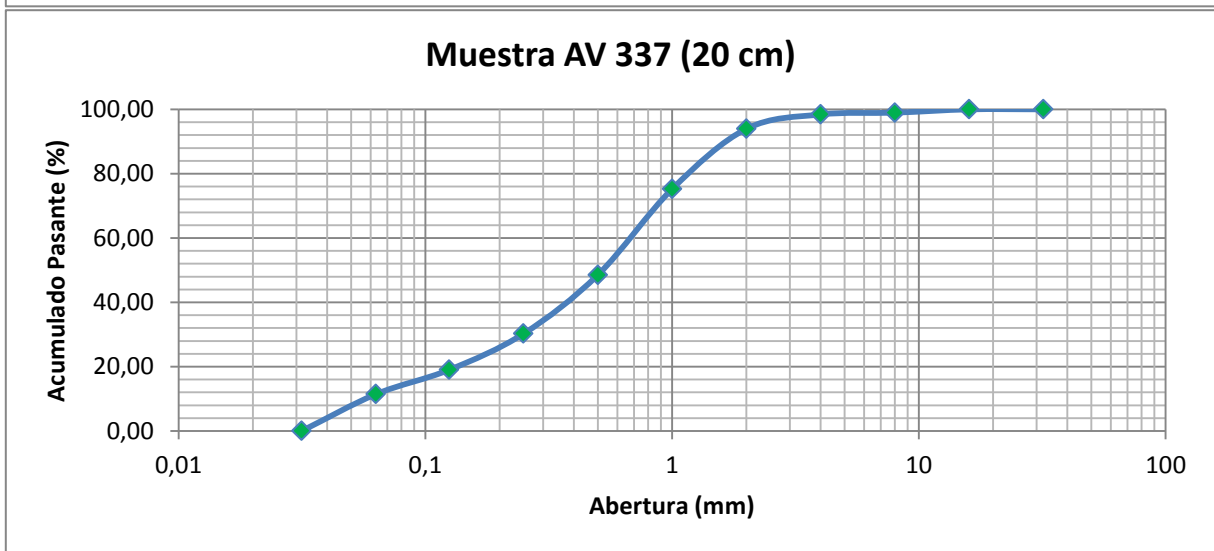
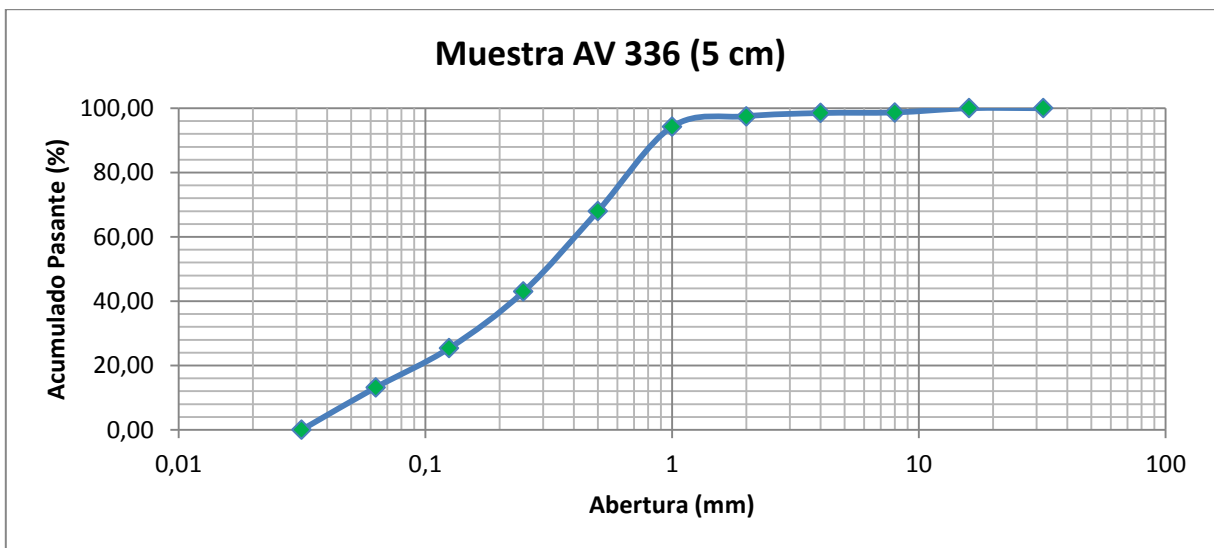
Anexo A 2: Tabla de clasificación de suelos. Obtenida de "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". ASTM international.

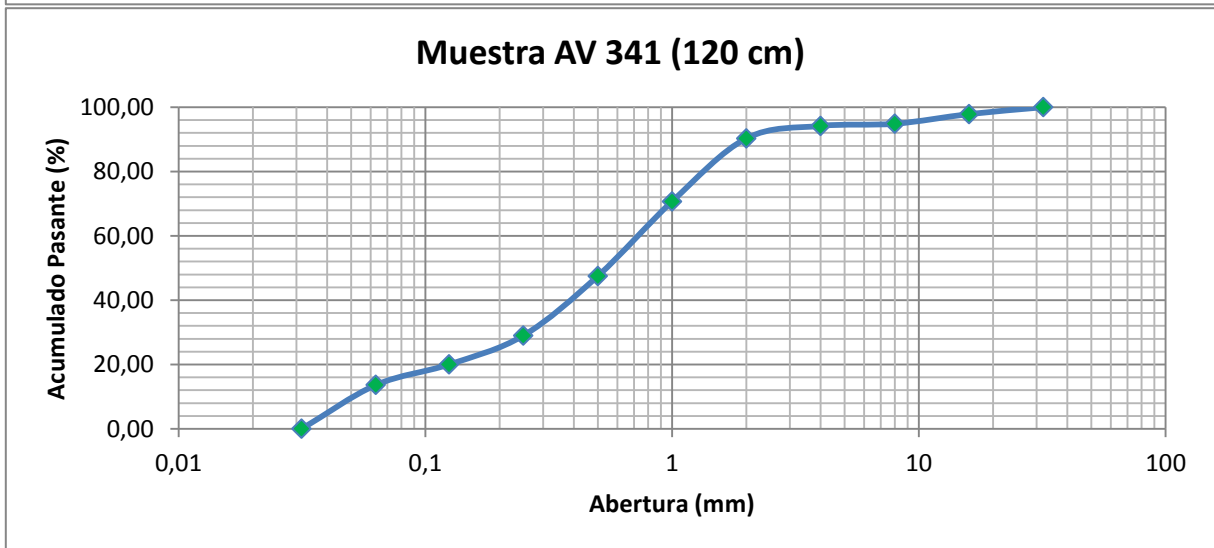
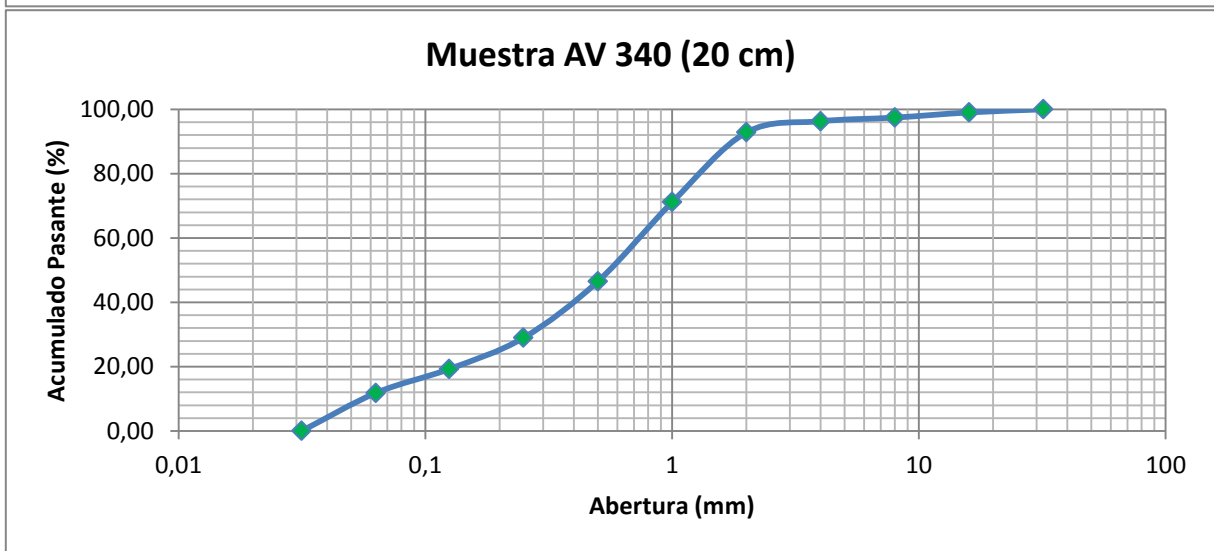
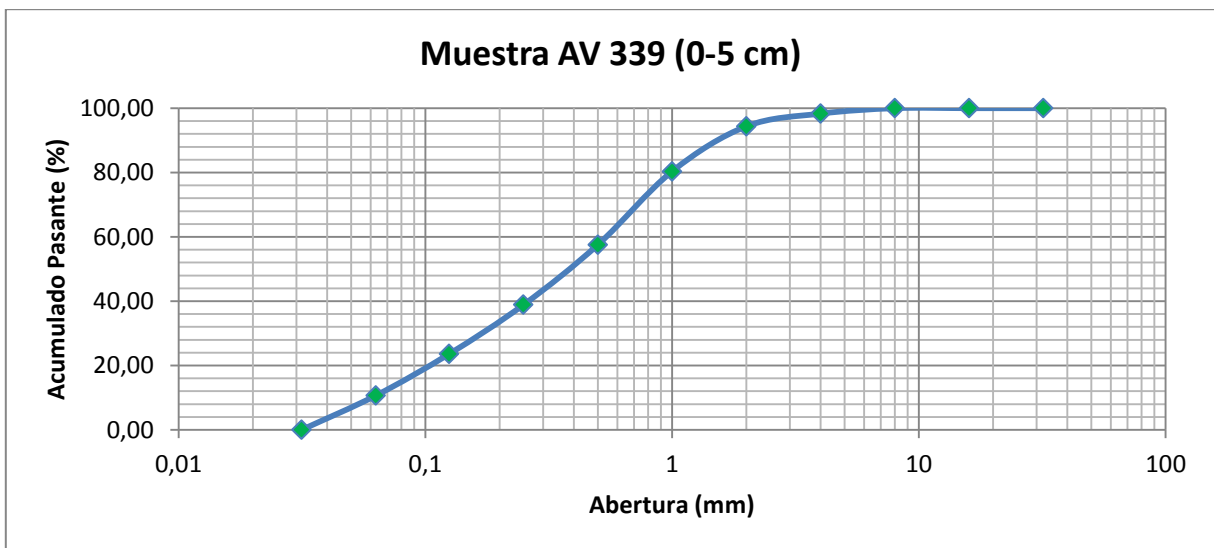
ANEXO B

	Tamices	Intervalo	Abertura (mm)	Pesos (grs)	%	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
AV 336. Profundidad: 0-5 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	0,00	0,00	0,00	100,00
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	8,82	1,31	1,31	98,69
	5/16-5	8mm-4mm	4	1,28	0,19	1,50	98,50
	5-10	4mm-2mm	2	6,77	1,00	2,50	97,50
	10-18	2mm-1mm	1	21,85	3,24	5,74	94,26
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	177,14	26,25	31,98	68,02
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	168,88	25,02	57,01	42,99
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	118,68	17,59	74,59	25,41
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	82,32	12,20	86,79	13,21
<230	<0,063mm	0,0315	89,15	13,21	100,00	0,00	
			674,89	100,00			
AV 337. Profundidad: 5-20 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	0,00	0,00	0,00	100,00
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	6,14	1,02	1,02	98,98
	5/16-5	8mm-4mm	4	3,38	0,56	1,59	98,41
	5-10	4mm-2mm	2	26,78	4,46	6,05	93,95
	10-18	2mm-1mm	1	112,31	18,71	24,75	75,25
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	160,35	26,71	51,46	48,54
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	109,75	18,28	69,74	30,26
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	67,41	11,23	80,97	19,03
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	45,58	7,59	88,56	11,44
<230	<0,063mm	0,0315	68,69	11,44	100,00	0,00	
			600,39	100,00			
AV 338. Profundidad: 20-130 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	34,80	4,37	4,37	95,63
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	14,21	1,78	6,15	93,85
	5/16-5	8mm-4mm	4	79,04	9,92	16,06	83,94
	5-10	4mm-2mm	2	113,84	14,28	30,34	69,66
	10-18	2mm-1mm	1	175,94	22,07	52,41	47,59
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	139,63	17,52	69,93	30,07
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	95,8	12,02	81,95	18,05
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	53,13	6,66	88,61	11,39
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	34,07	4,27	92,89	7,11
<230	<0,063mm	0,0315	56,7	7,11	100,00	0,00	
			797,16	100,00			

	Tamices	Intervalo	Abertura (mm)	Pesos (grs)	%	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
AV 339. Profundidad: 0-5 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	0,00	0,00	0,00	100,00
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	0,00	0,00	0,00	100,00
	5/16-5	8mm-4mm	4	8,65	1,68	1,68	98,32
	5-10	4mm-2mm	2	20,34	3,95	5,63	94,37
	10-18	2mm-1mm	1	72,09	14,00	19,63	80,37
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	117,51	22,82	42,45	57,55
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	96,01	18,64	61,09	38,91
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	78,7	15,28	76,37	23,63
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	66,73	12,96	89,33	10,67
	<230	<0,063mm	0,0315	54,95	10,67	100,00	0,00
			514,98	100,00			
AV 340. Profundidad: 5-20 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	4,37	0,95	0,95	99,05
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	7,40	1,60	2,55	97,45
	5/16-5	8mm-4mm	4	5,26	1,14	3,69	96,31
	5-10	4mm-2mm	2	16,00	3,47	7,16	92,84
	10-18	2mm-1mm	1	100,07	21,70	28,86	71,14
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	113,53	24,62	53,47	46,53
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	80,87	17,53	71,01	28,99
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	44,79	9,71	80,72	19,28
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	34,36	7,45	88,17	11,83
	<230	<0,063mm	0,0315	54,56	11,83	100,00	0,00
			461,21	100,00			
AV 341. Profundidad: 20-120 cm	>11/4	>32mm	32	0,00	0,00	0,00	100,00
	11/4-5/8	32mm-16mm	16	7,09	2,14	2,14	97,86
	5/8-5/16	16mm-8mm	8	9,95	3,00	5,14	94,86
	5/16-5	8mm-4mm	4	2,23	0,67	5,81	94,19
	5-10	4mm-2mm	2	12,78	3,86	9,67	90,33
	10-18	2mm-1mm	1	64,97	19,60	29,27	70,73
	18-35	1mm-0.5mm	0,5	76,9	23,20	52,48	47,52
	35-60	0,5mm-0,25mm	0,25	61,24	18,48	70,96	29,04
	60-120	0,25mm-0,125mm	0,125	29,85	9,01	79,96	20,04
	120-230	0,125mm-0,063mm	0,063	21,2	6,40	86,36	13,64
	<230	<0,063mm	0,0315	45,2	13,64	100,00	0,00
			331,41	100,00			

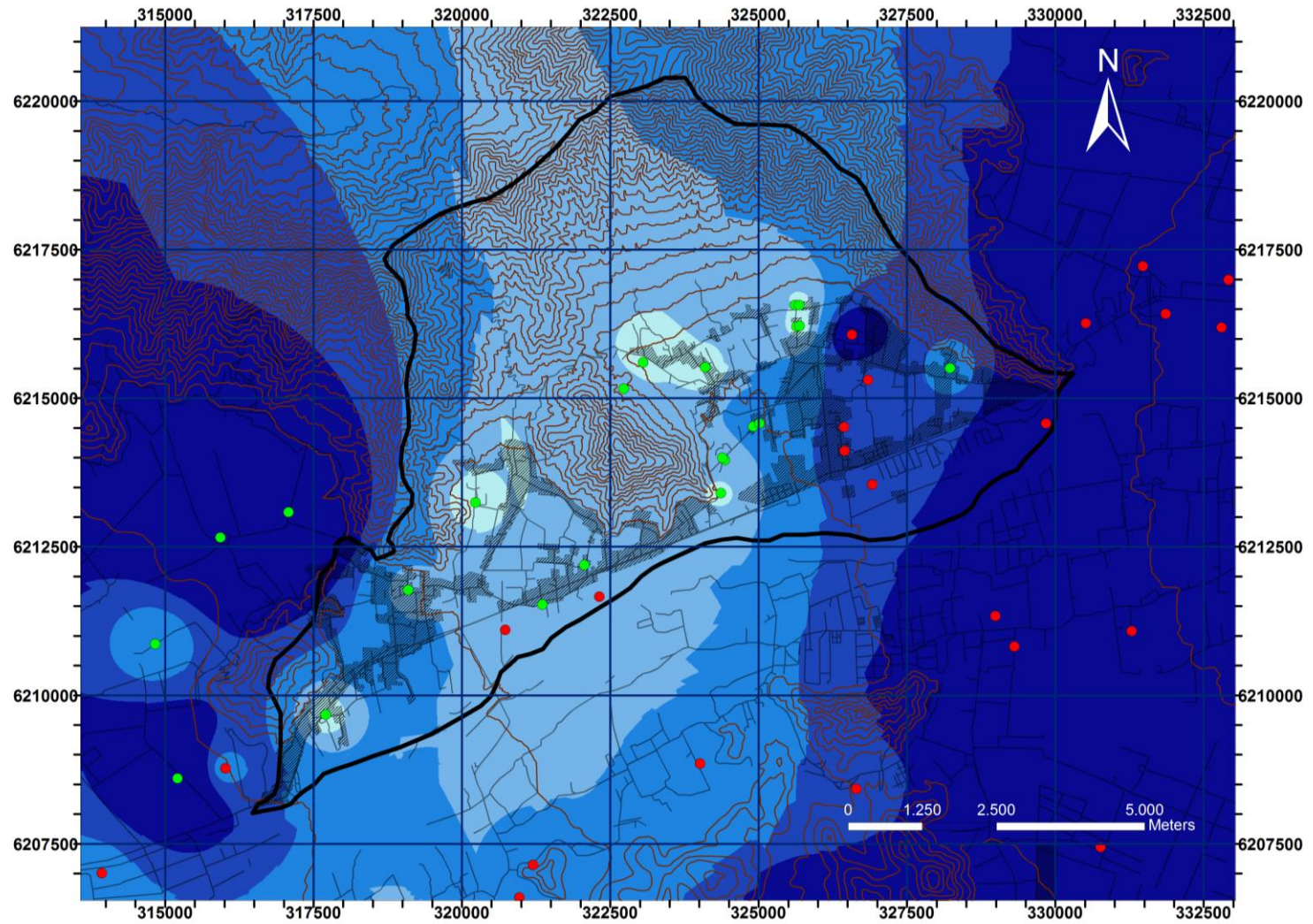
Anexo B 1: Resultados del tamizaje de las muestras AV 336-341





Anexo B 2: Gráfico de distribución granulométrica de las muestras AV 339, 340 y 341.

ANEXO C



Anexo C 1: Mapa de profundidad de nivel freático luego de interpolación.

	ID	PROF (CMS)	E	N		ID	PROF (CMS)	E	N
Terrenos y Bases de datos Sernageomin	-69	100	325686	6216566	Mapa Hauser	57	1740	332910	6216994
	-68	290	325614	6216566		58	2050	332796	6216193
	-67	110	325691	6216217		59	2300	331469	6217223
	-66	255	325638	6216207		60	3300	331858	6216422
	-65	180	323050	6215603		61	2650	330509	6216262
	-64	745	328223	6215506		62	2800	326569	6216070
	-63	126	324099	6215522		63	1200	326843	6215305
	-61	350	322728	6215159		64	1050	326434	6214516
	-59	900	325014	6214578		67	1440	326915	6213551
	-58	700	324906	6214527		68	2900	329839	6214574
	-56	250	324389	6213997		69	7140	333418	6213763
	-55	244	324427	6213959		79	350	322318	6211658
	-53	200	324361	6213404		80	2910	328987	6211336
	-52	100	320227	6213243		81	2440	329308	6210822
	-51	4000	317080	6213081		82	4330	331281	6211079
	-50	3000	315930	6212658		93	780	316016	6208769
	-48	500	322062	6212194		94	630	324012	6208849
	-46	400	319097	6211770		95	1040	326643	6208426
	-45	350	321356	6211528		96	2290	330760	6207442
	-44	500	314834	6210863		105	840	313935	6207008
-43	130	317705	6209673	106	200	312631	6206596		
-42	4000	315211	6208604	116	570	321199	6207145		
					117	540	320971	6206596	
					6566	1190	326445	6214114	
					7778	330	320731	6211100	

Anexo C 2: Ubicación y profundidad de pozos y norias utilizadas en la confección del mapa de nivel freático.

ANEXO D

Punto	E	N	Altura	Fecha	Nota GPS	Nota Libreta
1	330214	6215123	450	09-05-2012	-	Camino a Doñihue, en el sector se juntan el río Cachapoal con un río que viene encausado desde el norte, el camino y el cerro
2	323819	6212341	377	09-05-2012	-	Lo Miranda-California, el río va al costado del camino, y éste constituye una especie de dique contenedor. El sector tiene mucha basura. Se observan evidencias de inundación (sedimentos)
3	317809	6209946	330	09-05-2012	-	Doñihue, pie de cerro con muchas remociones en masa. Foto de escarpe desde lejos.
4	317529	6210311	395	09-05-2012	-	Doñihue, cerro con muchas remociones en masa. Fotos de escarpes.
5	315779	6210358	306	08-06-2012	Cantera Doñihue	-
6	316359	6210699	372	08-06-2012	Deslizamiento y reptación de suelo	-
7	320525	6210108	347	09-06-2012	Puente Cachapoal	Puente Coínco Río Cachapoal
8	320744	6209814	342	09-06-2012	Terraza sur	-
9	320696	6209882	336	09-06-2012	Río	-
10	320845	6209604	338	09-06-2012	Canal	-
11	320722	6209327	339	09-06-2012	Ribera sur	-
12	320337	6210389	344	09-06-2012	Ribera norte	-
13	320014	6211020	344	09-06-2012	Cruce Doñihue-Coinco	-
14	317741	6210629	390	10-06-2012	Cerro Doñihue sur	Antenas cerro Doñihue
15	317475	6210355	400	10-06-2012	Masa deslizada	Nos encontramos en la masa deslizada de un gran deslizamiento el cual tiene asociados deslizamientos posteriores y flujos que han ido arrastrando el material cerro abajo (P81, 82 y 83)
16	317477	6210361	398	10-06-2012	-	-
17	317418	6210339	405	10-06-2012	Masa deslizada	-
18	317762	6210374	369	10-06-2012	-	-
19	317725	6210370	371	10-06-2012	Límite E deslizamiento	-
20	315859	6210403	309	10-06-2012	Casa con caída de roca	Casa con caída de roca para terremoto, la roca pasó por arriba de la casa, dañando parte del techo
21	315834	6210415	309	10-06-2012	Roca caída	Roca aprox. 1,3 x 1,4 x 1 m = 1,82 m ³
22	317860	6209853	334	10-06-2012	Foto REM sur	-
23	318008	6210259	332	10-06-2012	Caída de rocas	-
24	317909	6210724	335	10-06-2012	Fin caída de roca	-
25	316567	6211158	318	10-06-2012	Quebradilla	-
26	316225	6210814	318	10-06-2012	Caída de roca	-
27	315786	6210368	315	10-06-2012	Cantera superior	-
28	315920	6210188	423	10-06-2012	Cantera superior	-

29	318138	6212521	338	11-06-2012	Otro cerro Doñihue	Sector Camarico, para el terremoto cayó una roca muy grande del cerro, la que quedó atrapada en la quebrada y tuvo que sacarla bomberos para estabilizarla.
30	318343	6212344	344	11-06-2012	Foto reptación	Sector con reptación y caída de rocas
31	319218	6211946	353	11-06-2012	Camarico vista al Cerro	Fotos cerros, en el sector el agua está a 4 m
32	320761	6212776	367	11-06-2012	Rinconada Florida de Doñihue	Sector tres esquinas, 80% de casas destruidas con el terremoto, agua a 5 m, licuefacción.
33	320920	6213064	369	11-06-2012	Grieta 1 N125E	Grieta N125 E, 10 a 20 cm de ancho, levantó el lado norte alrededor de 5 cm sobre el lado sur.
34	320912	6213057	369	11-06-2012	Canal	Canal paralelo a la grieta
35	320966	6213150	370	11-06-2012	Grieta 2	-
36	320967	6213158	370	11-06-2012	Grieta 3	-
37	321056	6213315	373	11-06-2012	Grieta 4	-
38	321052	6213322	374	11-06-2012	Canal	-
39	321069	6213353	375	11-06-2012	Grieta 5	-
40	321109	6213414	375	11-06-2012	Grietas 6, 7 y 8	-
41	321134	6213449	374	11-06-2012	Grieta y casas rotas	-
42	321147	6213613	376	11-06-2012	Multicancha	Agua a 1 m, terreno arenoso. Hablamos con Sra. Inés del Centro de Madres, se rompió la multicancha de la Junta de Vecinos, hubo ruptura de canoa de relave con inundación hacia el sur. Grieta del P108, se extiende 1 km al E y 1 km al W, rompiendo varias casas y saliendo arena por la grieta.
43	319279	6211290	346	25-10-2012	-	Municipalidad Doñihue. Eduardo Letelier, director de obras e.letelier@mdonihue.cl tel.: (72) 959293, cel.: 9-4457837. APR Rinconada: Víctor Cantillana, cel.: 8-9295700. APR California: Alfredo Arriagada 8-3699761. Población Doñihue 20,600 hab. (precenso 2012).
44	320232	6208611	348	25-10-2012	-	-
45	319079	6211682	342	25-10-2012	-	Casa frente a Maule 602, nos dicen que tiene noria, pero nadie atiende la puerta.
46	319110	6211743	343	25-10-2012	noria 4 m	Casa antigua frente a carabineros, con noria. Noria revestida hasta los 2 m hacia abajo pozo desnudo. Espejo a 4 m. Esta noria abasteció a Doñihue por 6 días que tuvo cortada el agua después del terremoto. Casa de don Carlos Gutiérrez Hurtado.
47	319877	6211748	351	25-10-2012	-	Viña El Boldo. Don Hernán Carrasco, antes tenían agua de vertiente y del canal. Ahora utilizan agua del APR
48	320235	6213240	366	25-10-2012	noria 1 m	Casa de don Manuel Soto Carrasco, callejón Las Rosas. Noria 1 m de diámetro con rodela de cemento. Agua a 1 m b.n.d.t., cerro a 50-150 m con reptación. Canal al borde del camino. En el sector la mayoría de las propiedades tienen construidas medias aguas de reconstrucción.
49	322110	6212203	366	25-10-2012	noria 5 m	sector California, noria sin ocupar, espejo de agua a 5 m.
50	321356	6211531	359	25-10-2012	noria 3,5 m	Sector California, la gente es muy temerosa y no quiere mostrar sus norias, sin embargo aseguran que en el sector el agua se encuentra a 3,5 m
51	321257	6210860	354	25-10-2012	-	Botadero de guano y restos animales, el ambiente es irrespirable, está poblado al menos por 20 jotes y otras aves carroñeras. Se ven plumas y restos de huesos de pollo y lleno de moscas pequeñas. Según vecinos del sector los desechos provienen de la Planta Avícola Galdacano. Este botadero tiene todo el sector de California lleno de moscas y con aire contaminado.
52	325021	6214572	364	26-10-2012	noria 9 m	Piscina Las Vegas. El agua de la noria ahora se encuentra a 9 m, sin embargo en verano, aseguran, llega a los 4 m b.n.d.t. Noria cuadrada con concreto y con tubería para la extracción del agua

53	324911	6214540	364	26-10-2012	noria 7 m	Otra noria, también dentro de la Piscina Las Vegas, espejo de agua a 7 m, noria redonda con concreto, pozo de 18 m, entubado, 1 m de diámetro, con bomba.
54	324395	6213990	363	26-10-2012	noria 2,5 m	Piscina El Bosque, noria entubada, 2,5 m b.n.d.t. se ubica el espejo de agua, la noria tiene 3,2 m de profundidad y 1,1 m de diámetro. El propietario señala que a fines de junio es cuando el agua se encuentra en su nivel más bajo. También indica que antes en el sector había vertientes, pero que las drenó con bomba hacia el canal para poder construir las piscinas.
55	324434	6213960	364	26-10-2012	noria 2,44 m	Otra noria en Piscina El Bosque, redonda, con espejo de agua a 2,44 m b.n.d.t.
56	324324	6213314	370	26-10-2012	-	Caída de rocas desde corte de macizo para construcción del camino. Caída por cuña de bloques de 0,5 a 2 m que al caer se quebran en fragmentos menores. La roca es muy dura, de fractura concoidal, silicificada con abundante calcita en las fracturas. Se observan 3 sets principales de fracturas: uno sub horizontal y dos subverticales, las que en conjunto generan las cuñas. La abertura de las fracturas es mayor a 1 cm. Talud inestable a 50 m de la canoa de relave de Teniente, la que se encuentra descubierta.
57	322287	6212761	357	26-10-2012	-	Rinconada de California, entre el cerro y el canal se forman vegas donde aflora agua en superficie
58	359884	6214820	818	23-01-2013	-	Sitio de despegue Helicóptero
59	317724	6209700	326	24-01-2013	Noria 1,3m	Noria de 3 metros de profundidad con espejo de agua a 1,3m. Alrededor de 300 metros hacia el sur se observa un depósito de lo que parece ser escoria de relave, manejados por la empresa Geo Barra. <u>Referencias geográficas:</u> Recinto con camionada de choclos.
60	317872	6209386	326	24-01-2013	-	Depósito de escoria de relave. Maquinaria trabajando. <u>Referencias geográficas:</u> 300 m. al sur del pto. anterior
61	325689	6216561	419	24-01-2013	Noria 1m	Noria interior de 8m de profundidad con espejo de agua a 1m. No se destapó, el valor es aproximado según lo descrito por el propietario. Su casa se cayó con el terremoto. Presenta grietas en el suelo. <u>Referencias geográficas:</u> Sitio a la falda del cerro. Criadero de conejos
62	325616	6216561	419	24-01-2013	Noria 2,9m	Noria exterior. Paredes recubiertas con hormigón hasta 3 m. de profundidad aprox. Espejo de agua a 2,9m
63	325640	6216307	413	24-01-2013		Durante el terremoto del 2010 una de las casas construidas de madera y que estaban cimentadas sobre una base de hormigón sufrió un corte de sus cimientos, quedando "flotando" en el suelo licuado, trasladándose desde su sitio de emplazamiento. <u>Referencias Geográficas:</u> Recinto con caballos de rodeo. 150-200 m. al sur de punto anterior.
64	325613	6216421	413	24-01-2013		Otra de las casas, que se encontraba cruzando, la calle sufrió daños irreparables. Se observa además asentamientos diferenciales de terreno.
65	325672	6216419	413	24-01-2013		Se observan evidencias de licuefacción en el terreno. Al norte de ella hay registro de una grieta con orientación N40E, la cual gira a medida que se dirige hacia el oeste, quedando con una orientación casi NS; 20 cm de desnivel aprox.
66	325690	6216218	413	24-01-2013	Noria 1,1m	Agujero excavado por el propietario con un nivel de agua a 1,1 m. Se recomienda realizar análisis estratigráfico del suelo. Pablo Aros propietario. <u>Referencias geográficas:</u> Al costado SE de la propiedad. Al lado de la casa en construcción
67	325643	6216205	413	24-01-2013	Noria 2,55m	Noria de uso diario. Agua 2,55 metros de profundidad. Vecina de la propiedad anterior. <u>Referencias geográficas:</u> Cruzando la calle. Noria en el antejardín
68	324111	6215499	399	24-10-2013	Noria 1,26m	Noria. 3 metros de diámetro. Presenta 6 metros encementados y 3 metros abiertos en su parte inferior. <u>Referencias geográficas:</u> Recinto con plantaciones de melones y sandías. Parcela en esquina de la curva de la calle. Noria ubicada en el extremo norte de la plantación
69	323090	6215597	427	24-10-2013	Noria 1,8m	Noria revestida con hormigón. <u>Referencias geográficas:</u> Esquina noroeste de Lo Miranda.

70	322750	6215149	502	24-10-2013	Noria 3,5m	Noria de 2x2 m de diámetro, revestida con hormigón los 6 primeros metros y los últimos 1,5 descubiertos. Tiene una recarga de agua mucho más lenta, se puede usar para riego cada 3 días durante 1 hr. Cuando está más alta el espejo de agua llega a 0,5 m de profundidad. <u>Referencias geográficas:</u> Esquina noroeste de Lo Miranda, subiendo por el cerro occidental.
71	328231	6215519	415	25-10-2013	Noria 7,45m	Noria. 9 metros de profundidad del año '58. Se secó durante el terremoto pero nivel de agua se recuperó en octubre del mismo año. La casa se cayó pero no se evidencian grietas en la tierra. <u>Referencias geográficas:</u> Ex pasaje Juana Reyes.
72	327829	6215738	416	25-10-2013	-	Cambio de nivel
73	328208	6215595	424	25-10-2013	-	Cambio de nivel
74	326761	6216270	410	25-10-2013	-	Cambio de nivel. Cantera de arcilla, talud de 90° y 2,2 m. de altura en su parte más baja. <u>Referencias geográficas:</u> Sitio de elaboración de ladrillos.
75	326438	6216548	415	25-10-2013	-	Cambio de nivel
76	325079	6216268	415	25-10-2013	-	Cambio de nivel
77	327640	6215978	432	25-10-2013	-	Descripción de afloramiento (en Geología área de Estudio)
78	327486	6215826	415	25-10-2013	-	Cambio de nivel

Anexo D 1: Puntos de terreno de las campañas 2012 y 2013. En celeste: Profundidad de espejo de agua en norias y pozos. En verde: cambios de nivel en Lo Miranda. En rojo: evidencias de licuefacción. En amarillo: Información que concierne al fenómeno de remociones en masa. Gris: Otro tipo de información.

ANEXO E

TABLA 1. Terremoto El Maule 2010. Aceleración Máxima (PGA), Intensidad de Arias I_a , Potencial destructivo P_d y Potencial destructivo Horizontal P_{dh} . Se incluyen algunas intensidades MSK

N° ESTACIÓN	COMPONENTE	MSK	PGA [g]	I_a [g s]	P_d [cm s]	P_{dh} [cm s]	N° ESTACIÓN	COMPONENTE	MSK	PGA [g]	I_a [g s]	P_d [cm s]	P_{dh} [cm s]
1 CONSTITUCIÓN	LONG	8*	0.54	2.02	43.87	110.98	17 PAPUDO	LONG		0.29	0.29	4.20	9.59
	TRAN		0.63	2.68	67.11	TRAN		0.42		0.40	5.39		
	VERT		0.34	0.40	2.39	VERT		0.16		0.04	0.11		
2 CONCEPCIÓN CENTRO	LONG	8	0.40	0.89	47.62	69.79	18 MELIPILLA	LONG	6.5	0.57	0.92	3.23	8.47
	TRAN		0.29	0.58	22.17	TRAN		0.77		1.29	5.24		
	VERT		0.36	0.77	12.97	VERT		0.38		0.23	0.35		
3 CONCEPCIÓN SAN PEDRO	1	7,5*	0.59	1.45	13.83	31.87	19 SANTIAGO SAN JOSÉ	1	6	0.47	0.77	3.63	7.20
	2		0.65	1.76	18.04	2		0.47		0.67	3.57		
	VERT		0.55	1.10	5.02	VERT		0.24		0.21	0.69		
4 LLOLLEO	LONG	7	0.33	0.50	9.22	26.93	20 CABILDO	LONG		0.27	0.27	2.53	5.41
	TRAN		0.54	1.03	17.71	TRAN		0.32		0.27	2.88		
	VERT		0.70	0.67	5.03	VERT		0.13		0.05	1.50		
5 MATANZAS	LONG	<7.0	0.33	0.72	17.29	26.34	21 SANTIAGO ANTUMAPU	EW	6.5	0.34	0.33	2.03	4.33
	TRAN		0.30	0.46	9.05	NS		0.28		0.30	2.30		
	VERT		0.24	0.23	1.04	VERT		0.21		0.16	0.81		
6 ANGOL	EW	6.5	0.69	1.79	10.24	20.42	22 PICHILEMU	LONG		0.12	0.12	1.73	4.11
	NS		0.93	2.03	10.18	TRAN		0.16		0.14	2.38		
	VERT		0.28	0.44	1.58	VERT		0.13		0.06	0.34		
7 TALCA	LONG	7,5*	0.48	1.18	10.53	20.32	23 SANTIAGO PUENTE ALTO	EW	6.5	0.26	0.17	1.34	3.84
	TRAN		0.42	1.13	9.79	NS		0.27		0.26	2.50		
	VERT		0.24	0.31	1.10	VERT		0.13		0.10	0.54		
8 HUALAÑE	LONG	7	0.39	0.81	7.51	16.12	24 LOS MOLLES	X		0.16	0.08	1.29	3.18
	TRAN		0.47	0.89	8.61	Y		0.15		0.09	1.89		
	VERT		0.39	0.65	1.87	VERT		0.07		0.02	0.09		
9 CASABLANCA	1		0.29	0.38	7.90	15.62	25 SANTIAGO SANTA LUCÍA	1		0.32	0.28	1.39	3.08
	2		0.33	0.39	7.72	2		0.24		0.28	1.69		
	VERT		0.23	0.13	0.59	VERT		0.26		0.26	1.26		
10 VALPARAÍSO ALMENDRAL	LONG	7.5	0.22	0.23	8.86	14.37	26 SANTIAGO PEÑALOLÉN	EW	6	0.30	0.34	2.54	2.80
	TRAN		0.27	0.21	5.51	NS		0.29		0.33	0.26		
	VERT		0.15	0.07	0.65	VERT		0.28		0.18	1.05		
11 CURICÓ	EW	7.5	0.47	1.09	6.38	13.96	27 SANTIAGO FCFM	EW	6	0.16	0.13	1.25	2.38
	NS		0.41	1.13	7.58	NS		0.17		0.12	1.13		
	VERT		0.19	0.30	1.12	VERT		0.14		0.08	0.15		
12 SANTIAGO LAS AMÉRICAS	1	6.5	0.23	0.31	4.88	13.73	28 EL ROBLE	EW		0.14	0.09	0.55	2.32
	2		0.31	0.38	8.85	NS		0.19		0.16	1.77		
	VERT		0.16	0.16	1.81	VERT		0.11		0.04	0.14		
13 VIÑA DEL MAR CENTRO	EW	6.5	0.33	0.39	9.48	13.54	29 SANTIAGO ANDALUCÍA	1	6	0.23	0.22	1.53	2.27
	NS		0.22	0.21	4.06	2		0.31		0.28	2.30		
	VERT		0.19	0.04	0.67	VERT		0.18		0.14	0.74		
14 VIÑA DEL MAR MARGA MARGA	LONG		0.34	0.45	5.66	12.43	30 VALPARAÍSO UTFSM	LONG		0.14	0.03	0.33	1.03
	TRAN		0.33	0.48	6.77	TRAN		0.31		0.05	0.70		
	VERT		0.26	0.21	0.79	VERT		0.08		0.02	0.18		
15 SANTIAGO MAIPÚ	1	7	0.50	0.50	4.32	10.39	31 ZAPALLAR	LONG		0.18	0.06	0.29	0.54
	2		0.54	0.58	6.07	TRAN		0.18		0.06	0.25		
	VERT		0.23	0.18	1.03	VERT		0.11		0.03	0.07		
16 OLMUÉ	X		0.25	0.20	2.94	10.29	32 LOS VILOS	EW		0.03	0.00	0.02	0.03
	Y		0.36	0.41	7.35	NS		0.03		0.00	0.02		
	VERT		0.15	0.07	0.30	VERT		0.02		0.00	0.01		

(*) La intensidad corresponde al lugar donde se ubica este instrumento, por esta razón es distinta a la estimada por Astroza et al. (2012).

Anexo E 1: Aceleraciones sísmicas registradas durante el terremoto de 27 de Febrero de 2010. Mw= 8.8 Terremoto en Chile, 27 de febrero 2010.

ANEXO F

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2012	1	6	0	36	0	194	19	40	5	40	1	73	Canal Sauzal en Puente Termas
	0	3	0	0	75	189	13	70	1	52	5	53	Cocalan
	0	3	0	0	223	315	9	46	3	50	0	56	Coltauco
	0	0	0	0	124	184	10	81	2	45	5	68	Pichidegua
	0	5	0	2	90	212	2	60	4	55	0	68	Popeta
	0	2	0	6	71	189	7	45	4	23	0	51	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	3	0	2		134	7	39	4	48	1	58	Rengo
	20	6	0	50	0		0		9	158	0	196	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	2	0	0	121	187	7	68	1	35	0	14	Río Cachapoal en puente Arqueado
	5	5	0	56	199	337	39	73	10	84	1	114	Río Pangal en Pangal
Promedio	3	3	0	15	100	216	11	58	4	59	1	75	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2011	0	2	0	37	0	129	70	101	11	6	0	0	Canal sauzal de puente termas
	4	0	12	44	0	75	91	102	18	0	3	0	Cocalan
	0	0	9	97	0	83	117	93	8	0	0	0	Coltauco
	2	0	13	38	0	88	84	103	12	0	1	0	Pichidegua
	0	0	4	79	0	90	93	68	7	0	0	0	Popeta
	0	0	4	27	0	88	47	53	5	5	0	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	1	0	7	75	4	93	82	54	15	0	1	0	Rengo
	0	7	16	0	0				8	8	1	0	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	3	0	0	40	0	86	84	95	10	0	2	0	Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	4	10	65	0	150	34	85	26	32	1	0	Río Pangal en Pangal
Promedio	1	1	8	50	0	98	78	83	12	5	1	0	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2010	0	0	0	1	56	141	67	14	11	25	41	0	Canal sauzal de puente termas
	0	0	0	0	53	166	99	0	12	20	1	0	Cocalan
	0	0	0	0	58	229	80	0	5	19	5	0	Coltauco
	0	0	0	0	40	139	74	4	13	19	3	0	Pichidegua
	0	0	0	0	47	150	65	8	37	26	20	0	Popeta
	0	0	1	1	49	109	51	8	22	14	17	1	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	0	0	0	48	143	63	1	29	24	8		Rengo
	0	0	0	4				0	20	14	57	18	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
					49					23	0	1	Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	0	0	6	75	0			21	19	78	17	Río Pangal en Pangal
Promedio	0	0	0	1	53	135	71	4	19	20	23	4	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2009	0	0	0	0	84	134	16	131	111	45	2	0	Canal sauzal de puente termas
	0	0	0	0	24	127	21	86	53	14	6	0	Cocalan
	0	0	0	0	55	209	20	156	92	16	11	0	Coltauco
	0	0	0	0	20	147	16	98	47	10	12	0	Pichidegua
	0	0	0	0	75	135	24	97	83	41	2	0	Popeta
	0	0	0	0	35	130	15	85	81	10	2	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	0	0	0	73	145	20	113	77	44	3	0	Rengo
					6	240	31		60	76	0	0	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	0	2	0		122	12	72	33	6			Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	0	0	0	147	182	31	212	407	82	3	0	Río Pangal en Pangal
Promedio	0	0	0	0	58	157	21	117	104	34	5	0	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2008	0	0	18	11	249	134	99		8		0	0	Canal sauzal de puente termas
	0	0	13	14	182	90	89	140	7	0	0	0	Cocalan
	0	0	20	23	303	146	152	255	12	0	0	0	Coltauco
	0	0	10	18	166	91	102	101	0	0	0	0	Pichidegua
	0	0	12	24	199	113	82	158	19	0	0	0	Popeta
	0	0	20	5	101	80	67	133	20	0	0	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	0	17	17	180	99	91	179	13	1	0	0	Rengo
	0	6	25	33	229								Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	0	12	13	142	55	71	82	6	0	0	0	Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	4	18	26	564	250	99	322	12	0	0	0	Río Pangal en Pangal
Promedio	0	1	16	18	231	117	95	171	11	0	0	0	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2007	0	16	4	0	21	84	150	49		0			Canal sauzal de puente termas
	0	32	3	1	28	69	68	77	0	0	0	0	Cocalan
	0	33	8	0	20	93	95	70	0	0	0	0	Coltauco
	0	35	6	2	20	55	119	129	1	0	0	0	Pichidegua
	0	25	2	1	15	82	71	59	0	2	9	0	Popeta
	0	29	10	0	20	51	68	55	2	2	9	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	17	6	0	22	64	74	51	3	1	3	0	Rengo
	0	21	6	0	29	111	208	32	0	0	4	1	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	26	2	1	15	57	43	49		0	0	0	Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	26	11	4	24	134	207	18	0	7	9	0	Río Pangal en Pangal
promedio	0	26	6	1	21	80	110	59	1	1	4	0	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2006	0	0	0	45	83	150	266	103	42	73	0	2	Canal sauzal de puente termas
	0	0	0	20	12	100	221	116	30	71	0	0	Cocalan
	0	0	0	21	74	149	248	110	30	71	0	0	Coltauco
	0	0	0	18	27	164	200	107	28	55	0	0	Pichidegua
	0	0	0	25	54	114	191	103	48	84	1	0	Popeta
	0	0	0	36	32	105	165	62	31	99	2	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	0	0	18	47	113	180	119	40	66	1	0	Rengo
	0	0	0	62	127	225	389	143	42	64	0	1	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	0	0	15	15	117	173	79	21	45	0	0	Río Cachapoal en puente Arqueado
	0	3	0	50	121	251	405	136	89	86			Río Pangal en Pangal
promedio	0	0	0	31	59	149	244	108	40	71	1	0	

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Estación de registro
2005								264	37	20	37	0	Canal sauzal de puente termas
	0	0	10	3	152	212	68	156	21	12	18	0	Cocalan
	0	0	6	4	175	279	77	238	18	8	18	0	Coltauco
	0	0	15	5	153	204	80	169	23	7	26	0	Pichidegua
	0	0	7	5	169	296	72	173	6	18	27	3	Popeta
	1	1	12	10	111	194	32	136	24	27	32	0	Rancagua (Cachapoal - DCP)
	0	0	8	4	144	273	59	161	14	18	27	1	Rengo
	14	0	26	0	286	520	75	347	55	45	37	2	Río Cachapoal 5 Km. Aguas Abajo
	0	0	8	7	130	200	52	135	16	4			Río Cachapoal en puente Arqueado
	26	0	44	45	298	574	143	590	68	68	49	0	Río Pangal en Pangal
promedio	5	0	15	9	180	306	73	237	28	23	30	1	

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Promedio periodo	1	4	6	16	88	157	88	105	27	27	8	10

Anexo F 1: Promedio mensual de agua caída en diez estaciones de registro de la provincia del Cachapoal durante los últimos 8 años.

2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
Fecha	MAX	Fecha	MAX	FECHA	MAX	FECHA	MAX	FECHA	MAX	FECHA	MAX	FECHA	MAX	FECHA	MAX
26-ago	73,7	07-jun	87,9	05-jul	43,3	22-may	94,4	19-jun	48,5	23-jun	44,2	29-jun	57,8	19-dic	55,9
03-may	50	07-jun	52	16-feb	31,5	20-may	53	14-ago	50	17-jun	50	16-ago	33	13-jun	57
26-ago	79,5	11-jul	90,7	12-jul	38	15-ago	148	14-ago	109	17-jun	61,5	13-abr	61	26-may	153
15-jun	52,3	11-jul	64,8	14-ago	41	20-may	65	14-ago	61	17-jun	42	18-jun	37	26-may	103
26-ago	52	07-jun	50	16-feb	25	20-may	65	19-jun	50	23-jun	36	13-abr	48	26-may	55
27-jun	52,5	13-oct	74	16-feb	29,2	15-ago	66,5	19-jun	52	06-jul	32,5	18-jun	36	26-may	58,5
26-ago	50	07-jun	50	08-ago	20,5	15-ago	89	14-ago	62	17-jun	39	13-abr	52	22-ago	26
26-ago	122	11-jul	111	05-jul	72	20-may	68,5	19-jun	85,9	07-nov	50,2	12-mar	10,4	19-dic	143
03-may	40,9	07-jun	58,8	16-feb	20,1	20-may	48,8	14-ago	46,2	14-may	22	18-jun	44,5	26-may	90,3
26-ago	187	11-jul	89,7	05-jul	116	22-may	194	05-sep	184	07-nov	74	29-jun	86,5	27-may	90
	76		72,9		43,7		89,2		74,9		45,1		46,6		83,1

Anexo F 2: Precipitaciones máximas en un periodo de 24 horas. estaciones de registro en la provincia del Cachapoal durante los últimos 8 años.

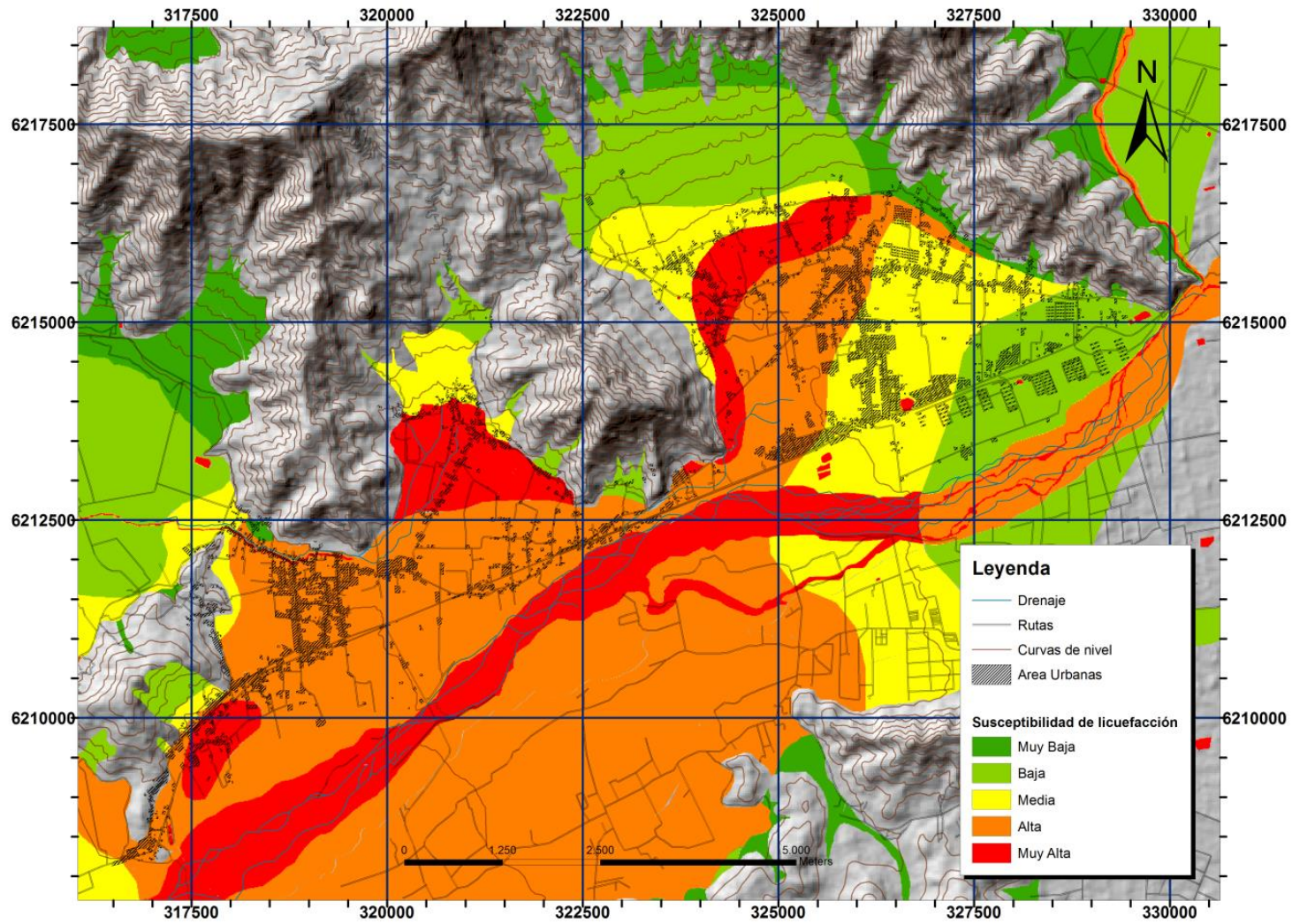
Factores de recarga:

- Infiltraciones directas a partir de precipitaciones pluviales, que se concentran en la estación invernal.
- Infiltraciones a partir del escurrimiento de la red de drenaje, que alcanza un mayor desarrollo hacia los meses de noviembre-enero. En ese momento el nivel de agua en el río Cachapoal puede exceder el nivel de agua en acuíferos ribereños libres, facilitando la recarga.
- Infiltración relacionada con retorno de riego, en zonas con densa red de canales, donde la recarga es simultánea y uniforme. Sin embargo, dado que el riego se realiza principalmente en meses estivales, que coincide con periodos de alta temperatura y baja humedad, el nivel de infiltración puede verse reducido. A esto se suma el incremento de la evapotranspiración de las plantas durante este periodo.
- Infiltración local a partir de embalses de riego.
- Transferencia de agua por flujo vertical entre acuíferos someros y profundos.

Factores de descarga:

- Extracciones a partir de norias y pozos construidos para satisfacer múltiples demandas: potable, riego, industrial, etc.
- Efluencias hacia cursos superficiales: ríos y esteros con morfología local favorable
- Transferencia a acuíferos adyacentes, hidráulicamente interconectados.
- Evapotranspiración, que ocurre en zonas con amplio desarrollo de especies freatófilas
- Descargas superficiales a través de vertientes o manantiales.

ANEXO G



Anexo G 1: Mapa preliminar de susceptibilidad de licuefacción

ANEXO H



Anexo H 1: Punto 33. Grieta en medio del camino. Orientación N125E. 10 a 20 cm de ancho, levantó el lado norte alrededor de 5 cm sobre el lado sur.



Anexo H 2: Puntos 35 y 36. Grietas.



Anexo H 3: Punto 37. Grieta.



Anexo H 4: Punto 37. Grieta en el camino y daños estructurales en vivienda.



Anexo H 5: Punto 39. Grieta.



Anexo H 6: Punto 40. Grietas.



Anexo H 7: Punto 41. Grietas en camino y daños estructurales en viviendas.



Anexo H 8: Separación de bloques y grietas en multicancha.



Anexo H 9: Punto 63. Casa de madera construida sobre una losa/radier de cemento arena y ripio. No sufrió daños estructurales.



Anexo H 10: Punto 64. Casa donde se observan grietas y asentamientos diferenciales



Anexo H 11: Punto 65. Grietas con orientación N40E.



Anexo H 12: Punto 64. Separación entre pared y borde encementado



Anexo H 13: Punto 64. Leve grieta en terreno.

ANEXO I

Métodos de Mitigación:

Los métodos señalados en éste capítulo, así como los grupos de clasificación propuestos, fueron obtenidos del documento “Minimizing Earthquake Damage. A guide for Water Utilities” elaborado por la American Water Works Association (AWWA) en 1994. También se obtuvo información de la tesis doctoral “Mejora de Terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación” de Henríquez C. de 2007.

De acuerdo a los documentos señalados los métodos de mitigación del fenómeno de licuefacción pueden ser divididos en dos grandes grupos:

- A. Aquellos métodos orientados a contrarrestar sus consecuencias.
- B. Aquellos métodos orientados a prevenir y/o evitar la ocurrencia del fenómeno

Dentro del primer grupo existen 5 medidas comúnmente utilizadas, estas son:

1. Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.
 - a. Cambiar el trazado horizontal de las tuberías.
 - b. Cambiar el trazado vertical de las tuberías mediante el uso de la perforación direccional para que crucen los ríos por debajo de los materiales licuables.
2. Colocar los cimientos por debajo del material licuable.
 - a. Pilotes.
 - b. Excavar hasta el material adecuado.
3. Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral.
 - c. Agregar masa de concreto.
4. Usar material flexible al movimiento.
 - a. Losa pesada, conexiones flexibles de tuberías.
 - b. Tubería con uniones fijas, dúctiles y flexibles.
5. Aceptar el daño.
 - c. Proporcionar válvulas de corte.

Dentro del segundo grupo los métodos utilizados buscan **estabilizar el material licuable**. Estos métodos pueden ser aplicables a *obras nuevas*, llevándose a cabo antes de la ejecución de un proyecto, o en *obras existentes*, modificando las condiciones del terreno, de la estructura o de sus cimientos.

Métodos orientados a obras nuevas:

- a. Reemplazo: Consiste en minimizar el riesgo de licuación mediante la excavación del estrato susceptible a licuar y reemplazarlo por un material de relleno compactado.
- b. Usar muros de contención: estructura de contención rígida, destinada a contener el material licuable.
- c. Compactación dinámica clásica: Se dejan caer pesos de 2 a 200 toneladas (1.800 a 180.000 kg) de alturas de hasta 120 pies (36 m) para densificar el terreno.
- d. Compactación dinámica rápida: Se utiliza una pesa de 7 t la cual se levanta con un sistema hidráulico hasta una altura de 1.2 m y a continuación se deja caer sobre una zapata de acero especialmente diseñada, de 1.5 m de diámetro, con una frecuencia de hasta 50 golpes por minuto.
- e. Vibroflotación: Se usa un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión, con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3 m) y hasta 20 m. de profundidad. Las vibraciones producen un reordenamiento de las partículas a una estructura más densa. Los agujeros son posteriormente rellenados con material externo o del propio terreno.
- f. Vibrosustitución: Se utiliza para suelos cohesivos compuestos por arena, limos y/o arcillas, con un contenido de finos superior al 15%, que no responden a la vibración. Se usa un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3m) y hasta 30 m. de profundidad. Luego de la extracción el agujero es rellenado con grava. Las columnas de piedra proporcionan resistencia y drenaje.
- g. Pilotes de compactación: Los terrenos granulares pueden ser mejorados por la ejecución de inclusiones rígidas. Estas, por lo general son pilotes de desplazamiento usualmente de hormigón prefabricado, hincados en el terreno formando una retícula.
- h. Mezcla de suelo profundo (Deep Mixing): el suelo es mezclado mecánicamente con algún tipo de aditivo químico (agente estabilizante) que reacciona con el terreno, incrementando su resistencia y reduciendo su deformabilidad. Se pueden alcanzar profundidades de hasta 30 m.
- i. Rebaje del nivel freático: Drenaje por gravedad o bombeo.

Métodos orientados a obras existentes:

- a. Inyección para impermeabilización o impregnación: Consiste en la inyección de un fluido de baja viscosidad (lechada de silicatos, cemento o productos químicos) dentro de los poros del terreno, sin alterar la estructura del suelo. Su uso está limitado a arenas y gravas limpias u otro tipo de terreno poroso. El objetivo principal de esta técnica es reducir la permeabilidad, controlar las redes de flujo e incrementar la resistencia y deformabilidad del terreno.
- b. Inyección para compactación: Inyección de un mortero seco (mezcla de arena, aglomerantes, aditivos y agua), de baja movilidad, que al ser inyectado se expande como una masa homogénea desplazando y compactando el terreno circundante.
- c. Inyecciones de fracturación: Hidrofracturación deliberada del terreno mediante inyección bajo presión, con el objetivo de colmatar con la mezcla inyectada las fisuras creadas y los posibles huecos y fisuras naturales existentes.
- d. Jet Grouting: Tratamiento del terreno consistente en la disgregación del mismo por la inyección de un fluido a alta energía en sentido generalmente ascendente. El suelo desprendido se va mezclando con una lechada de cemento con el fin de crear de una forma controlada columnas pseudo cilíndricas de suelo-cemento.

Algunos métodos como el deep mixing pueden ser utilizados para obras existentes, sin embargo debido a sus restricciones de acceso y dimensiones resulta poco viable.