



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DESARROLLO DE MODELOS DE FALLA EN COMPONENTES DEL
SISTEMA DE AGUA POTABLE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCION INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MATÍAS JORGE IGNACIO HENRÍQUEZ PEDRAZA

PROFESORA GUÍA:
Yolanda Alberto Hernández

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Yarko Niño Campos
Felipe Villalobos Jara

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA.
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.

POR: Matías Jorge Ignacio Henríquez Pedraza

FECHA: 2023

PROF. GUÍA: Yolanda Alberto Hernández

**DESARROLLO DE MODELOS DE FALLA EN COMPONENTES DEL
SISTEMA DE AGUA POTABLE**

En el presente trabajo se desarrolla un estudio de riesgo sísmico para la red de agua potable de la ciudad de Concepción utilizando la velocidad máxima del suelo (PGV) para determinar la tasa de fallas por kilómetro de las tuberías de la red. Para esto se modeló la red de agua potable de Concepción en Epanet y se desarrolló una ecuación de vulnerabilidad propia para la ciudad, utilizando los datos de las fallas ocurridas en la red después de ocurrido el terremoto del año 2010 en el país. Esta ecuación se comparó con tres ecuaciones más utilizando los datos de la "American Lifelines Alliance". Con estas cuatro ecuaciones se eligió la que mejor representase los daños ocurridos el 2010 en la ciudad. Además, se desarrollaron dos ecuaciones extras diferenciando los datos según la materialidad de la red, sin embargo, estas ecuaciones resultaron ser no pertinentes para el trabajo debido a una subestimación del daño de la red. Una vez escogida la ecuación se procede a realizar un análisis hidráulico de la red utilizando el módulo de Python WNTR, donde se estudia la probabilidad de falla de las tuberías y las presiones de la red para cada escenario sísmico. Para ampliar el estudio del comportamiento de la red se modelaron 10 escenarios sísmicos y se estudiaron 5 de ellos. Con el fin de realizar una comparación con otros modelos existentes es que se utiliza la ecuación de vulnerabilidad desarrollada por Bellagamba (2019).

El análisis de riesgo pudo dar cuenta de que la red empeora su desempeño a medida que aumenta la intensidad del evento sísmico en estudio. Sin embargo, no fue posible realizar un correcto análisis en el estudio de presiones debido a problemas a la hora de modelar la red en Epanet Finalmente, se realizan algunos comentarios y conclusiones donde se entregan recomendaciones para mejorar trabajos futuros en el tema.

Agradecimientos

La culminación de este largo proceso nunca hubiese sido posible sin el apoyo de mi familia. A Jorge, Caty, Cristian y Carmen les agradezco por haberme cuidado como a un hermano. A mis abuelos, Blanca y Jorge, por haber estado conmigo de forma incondicional en esta vida. Y a mis padres, Blanca y Leonardo, por el amor irracional con el que me criaron. Cada uno de ustedes me ayudó a convertirme en la persona que soy ahora.

A mis amigos del colegio por compartir conmigo todos estos años aún cuando se hizo difícil para cada uno, por las infaltables risas de nuestras clásicas reuniones y por saber entenderme en los momentos complejos de la vida.

A los amigos que tuve la suerte de conocer en esta tortuosa carrera. Las experiencias vividas con ustedes en estos años fueron hermosas. Las risas en clases, los sufrimientos antes de un control y el relajo de los viernes son cosas que recordaré con mucho cariño. Gracias por su apoyo y por su amistad. También mencionar a mi equipo de baby fútbol, Los Viga, con quienes pude compartir una de mis pasiones y que culminó con el tan anhelado campeonato de civil.

Por último, quiero agradecerle a la profesora Yolanda Alberto por ser una excelente persona, por haber confiado en mí y por haberme entregado todo su apoyo y ayuda en los momentos en que fue necesario. Agradecer también a los profesores de mi comisión, Felipe Villalobos y Yarko Niño, por haber aceptado ser parte de este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis y Objetivos	3
1.2.1. Hipótesis	3
1.2.2. Objetivo General	3
1.2.3. Objetivos Específicos	3
1.3. Estructura de la memoria	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Contexto Sísmico Chileno	5
2.2. Riesgo Sísmico	6
2.2.1. Análisis de Probabilidad de Peligro Sísmico	6
2.2.1.1. Análisis Determinístico	6
2.2.1.2. Análisis Probabilístico	7
2.3. Redes de Agua Potable	8
2.4. Estudio de Fragilidad en Redes de Agua Potable	11
2.4.1. Tuberías	11
2.4.2. Estanques	14
2.4.3. Válvulas y Otros Componentes	15
3. Programas Computacionales	17
3.1. EPANET	17
3.2. Water Network Tool for Resilience (WNTR)	18
3.3. QGIS	19
3.4. DXF/XYZ	21
4. Metodología	22
5. Desarrollo de Curvas de Fragilidad	26
5.1. Historial Sísmico de Concepción	26
5.2. Elección de GMPE	28
5.2.1. Ecuaciones de Atenuación Estudiadas	28
5.2.2. Aceleración Máxima del Suelo (PGA)	29
5.2.2.1. Idini et al. (2017)	29
5.2.2.2. Montalva et al. (2017)	30
5.2.2.3. Abrahamson et al. (2016)	30
5.2.3. Velocidad Máxima del Suelo (PGV)	32
5.2.3.1. Montalva et al. (2018)	32

5.2.3.2.	Huang and Galasso (2019)	33
5.2.3.3.	Jaimes and García-Soto (2020)	33
5.3.	Red de Agua Potable de Concepción	35
5.4.	Características Geotécnicas de Concepción	37
5.4.1.	Microzonificación Sísmica	37
5.4.2.	Peligros de Licuefacción en la Zona	40
5.4.3.	Velocidad de Onda de Corte	42
5.5.	Desarrollo de Curvas de Amenaza	44
5.5.1.	Distribución de Magnitudes	44
5.5.2.	Distribución de Distancias	44
5.5.3.	Distribución de Intensidades	45
5.5.4.	Curvas de Amenaza	45
5.6.	Curva de Vulnerabilidad	46
5.6.1.	Tasa de Fallas en Tuberías	46
5.6.1.1.	Validación de Ecuación Obtenida	56
5.7.	Tasa de Fallas para Tuberías Según Material	57
5.8.	Curva de Fragilidad de Estanques	59
5.9.	Modelo de la Red en Epanet	60
6.	Análisis de Riesgo	65
6.1.	Resultados de la Modelación Hidráulica de la Red	65
6.2.	Comparación con Bellagamba	69
7.	Discusión y Conclusiones	72
8.	Bibliografía	76
Anexos		79
A.	Muestreo de Magnitudes y Radios	79
B.	Red de Agua Potable de Concepción	80
C.	Desarrollo de Curva de Vulnerabilidad	81

Índice de Tablas

2.1.	Base de datos utilizada por ALA para la elaboración de curvas de fragilidad de estanques.	15
5.1.	Parámetros establecidos por Poulos (2019).	28
5.2.	Parámetros utilizados para el modelo.	28
5.3.	Parámetros de los modelos de atenuación de PGA, parte 1.	31
5.4.	Parámetros de los modelos de atenuación de PGA, parte 2.	31
5.5.	Parámetros de los modelos de atenuación de PGV, parte 1.	34
5.6.	Parámetros de los modelos de atenuación de PGV, parte 2.	34
5.7.	Materiales de la red de agua potable de Concepción. Guzmán (2011).	36
5.8.	Diámetros en la red de Concepción. Guzmán (2011).	36
5.9.	Datos de fallas relacionadas al PGV.	48
5.10.	Tasa de fallas en Concepción para el año 2010.	50
5.11.	Resumen de parámetros obtenidos.	53
5.12.	Curva de fragilidad para estanques de hormigón.	59
6.1.	Características de LRI. Bellagamba (2019)	70
A.1.	Sismos chilenos utilizados en el modelo. Fuente: USGS.	79
B.1.	Distribución de diámetros en la red de agua potable de Concepción. Guzmán (2011).	80
B.2.	Estanques Semienterrados en Concepción. Fuente: Essbio (2022).	81
C.1.	Velocidades de onda de corte en distintas zonas de Concepción. Fuente: Sáez (2016).	81
C.2.	Fallas en la red de agua potable de Concepción. Fuente: Guzmán (2011).	82
C.3.	Tasa de fallas Concepción.	85
C.4.	Tasa de fallas Japón. Fuente: ALA (2001).	86
C.5.	Tasa de fallas de Northridge. Fuente: ALA (2001)	87
C.6.	Tasa de fallas de Loma Prieta. Fuente: ALA (2001).	88
C.7.	Tasa de fallas de San Fernando. Fuente: ALA (2001)	88
C.8.	Tasas de falla de zonas restantes. Fuente: ALA (2001).	89
C.9.	Tasa de fallas según tipo de material para el terremoto de Concepción 2010.	89

Índice de Ilustraciones

2.1.	Curva de vulnerabilidad desarrollada por ALA (2001).	13
3.1.	Ejemplo de red en EPANET.	18
4.1.	Diagrama de flujo de metodología del estudio de amenaza probabilística. . . .	23
4.2.	Diagrama de flujo de metodología del desarrollo de las curvas de vulnerabilidad.	24
4.3.	Diagrama de flujo de metodología del estudio de riesgo sísmico.	25
5.1.	Sismos mayores a 6.5 Mw desde 1950 hasta la fecha en zonas cercanas a Concepción.	26
5.2.	Zonificación desarrollada por Poulos (2019).	27
5.3.	Comparación de los modelos de PGA estudiados.	32
5.4.	Comparación de los modelos de PGV estudiados.	34
5.5.	Red de agua potable de la ciudad de Concepción.	35
5.6.	Distribución de materiales en la red de agua potable de Concepción.	36
5.7.	Distribución de diámetros en la red de agua potable de Concepción.	37
5.8.	Mapa geológico y suelos de fundación de Concepción. Vivallos et al. (2010). . .	38
5.9.	Mapa de períodos predominantes y anomalías gravimétricas de Concepción. Vi- vallos et al. (2010).	39
5.10.	Microzonificación sísmica de Concepción. Vivallos et al. (2010).	40
5.11.	Peligro de licuefacción en Concepción. Falcón et al. (2010).	42
5.12.	Velocidades de onda de corte en Concepción. Sáez (2016).	43
5.13.	Interpolación de velocidades de onda de corte.	43
5.14.	Distribución de magnitudes.	44
5.15.	Distribución de distancias epicentrales.	45
5.16.	Curvas de amenaza obtenidas.	45
5.17.	Curvas de amenaza obtenidas.	46
5.18.	Fallas en la red de agua potable en Concepción. Guzmán (2011).	47
5.19.	PGV en la ciudad de Concepción.	48
5.20.	Tasa de daño en función del PGV para Concepción.	51
5.21.	Tasa de daño en función del PGV para Concepción.	51
5.22.	Datos utilizados para el análisis.	52
5.23.	Datos de Concepción y ALA.	52
5.24.	Datos de Concepción y Japón.	53
5.25.	Funciones de vulnerabilidad de cada caso estudiado.	54
5.26.	Tasa de fallas en Concepción en el año 2010.	54
5.27.	Tasas de falla.	55
5.28.	Comparación de datos.	56
5.29.	Tasa de fallas en Concepción con los datos de fallas utilizados.	56
5.30.	Resultado de comparación entre ambos casos.	57
5.31.	Curvas de vulnerabilidad para tuberías de asbesto cemento y PVC.	58
5.32.	Modelación de ecuaciones para tuberías de asbesto cemento y PVC.	59

5.33.	Curva de fragilidad para estanques de hormigón.	60
5.34.	Estanques enterrados en Concepción.	60
5.35.	Red de distribución de agua potable en EPANET.	61
5.36.	Caso de presiones bajas.	63
5.37.	Caso de presiones altas.	64
6.1.	Mapa de probabilidad de fallas en la red.	66
6.2.	Fallas documentadas y modelación de la red afectada al sismo.	67
6.3.	Mapa de presiones.	68
6.4.	Comparación de mapa de fallas con el peligro de licuefacción del suelo de Concepción.	69
6.5.	Mapa de LRI de Chirstchurch. Bellagamba (2019).	70
6.6.	Forma general de ecuación desarrollada por Bellagamba (2019).	70
6.7.	Comparación de resultados con Bellagamba en escenario 1.	71
6.8.	Comparación de resultados con Bellagamba en escenario 10.	71
C.1.	Dato erróneo en PGV 40.	82
C.2.	Dato erróneo en PGV 38.	83
C.3.	Dato erróneo en PGV 36.	83
C.4.	Dato erróneo en PGV 32.	84
C.5.	Dato erróneo en PGV 26.	84
C.6.	Dato erróneo en PGV 26.	85

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En Chile una de las principales amenazas naturales es la ocurrencia de terremotos. Estos ocurren debido a la ubicación geográfica del país, el cual se encuentra en bordes activos de placas tectónicas. Las placas de Nazca, Antártica y Scotia interactúan con la placa Sudamericana, generando esfuerzos y deformaciones en las rocas del interior de la Tierra capaces de generar terremotos. Estos tienen una alta tasa de ocurrencia, teniendo, aproximadamente, un terremoto mayor o igual a 8.0 Mw cada 10 años y un megaterremoto de 9.0 Mw cada 100 años. Sin ir más lejos, según el Centro Sismológico Nacional (CSN), en los últimos 20 años han ocurrido 7 terremotos mayores o iguales a 7.0 Mw a lo largo del país. Además, debido a estos eventos de alta magnitud es que también se generan tsunamis y maremotos, los que provocan aún más daño en la población del país que se encuentra en la costa del Océano Pacífico. Por último, y tratando de cuantificar daños, desde principios del siglo XX, en términos de desastres originados por fenómenos naturales, el 99% de fatalidades y un 98% de las pérdidas económicas han sido debido a terremotos y tsunamis, lo que se traduce en pérdidas del alrededor del 1% - 2% del PIB anual. En particular, el terremoto del año 2010 en Chile produjo daños equivalentes al 18% del PIB del país (OPS, 2010). En el caso del terremoto del año 2014 en la región de Tarapacá, el cual tuvo una magnitud de 8.2 Mw, se generaron notables daños en las comunas de Alto Hospicio e Iquique, dejando un total de 9.780 viviendas dañadas, y una diversa cantidad de infraestructura de servicios públicos, como colegios municipales y centros de salud municipal, con desperfectos por reparar. Junto con esto, se vio afectado el sector del turismo en la zona, viéndose una disminución del 26,7% en las ventas reales de este tipo de establecimientos (Gobierno de Chile, 2014). El último terremoto de gran magnitud en el país ocurrió el año 2015 y tuvo una magnitud de 8.4 Mw con epicentro en el mar frente a Illapel (CSN). En este, 9.588 viviendas sufrieron daños, de las cuales 2.321 corresponden a viviendas con daños irreparables (Plan Regional de Gobierno, 2015). A partir de los datos entregados anteriormente, donde se puede ver la alta frecuencia de grandes terremotos en los últimos años, se puede apreciar que existe una importante necesidad de estar preparados como país para los eventos que se avecinan en el futuro próximo. Es por esto que se ha vuelto importante un enfoque de construcción de estructuras resilientes en el país, donde las personas puedan seguir ocupando sus viviendas, recibiendo suministros básicos (luz, agua, gas) y pudiendo trabajar una vez ocurrido un evento sísmico de gran magnitud, ya que esto hace que la sociedad pueda continuar con su correcto funcionamiento.

A lo largo de los años la comunidad de ingenieros se ha preocupado de construir sistemas esenciales para la población lo más seguras y confiables posible. Estos sistemas son en los que la sociedad se apoya para mantener la seguridad nacional, la vitalidad económica y la salud pública, y pueden pertenecer y ser operados por el gobierno o por sectores privados. A nivel ingenieril se han desarrollado diferentes métodos para limitar el daño a estos sistemas esenciales dependiendo de los desastres naturales que más los puedan afectar. El Concejo Asesor de Infraestructura Nacional de Estados Unidos (NIAC por sus siglas en inglés) define la resiliencia estructural como la habilidad para reducir la magnitud y/o duración de eventos disruptivos. La efectividad de una estructura resiliente depende de su habilidad para anticipar las amenazas y sus consecuencias, monitorear las amenazas mediante indicadores adecuados, aprender lecciones a partir de experiencias previas, tanto de las positivas como las negativas, y responder a los desastres mediante set de soluciones predefinidas o ajustando la funcionalidad regular de la estructura (Hollnagel, 2011).

Según lo dispuesto por la CEPAL, el terremoto del año 2010 dañó 441.717 viviendas, se contabilizaron 163 daños en la red vial de caminos y accesos, 300 km de vías ferroviarias se estimaron con daños severos y 20 puentes tuvieron daños estructurales. La red eléctrica al 10 de marzo de ese año tenía un 89 % de sus servicios reestablecidos en la región Metropolitana y del Maule, y un 75 % en la región del Biobío. En el caso del sistema sanitario, en el informe del año 2010, elaborado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), se detalla el catastro de daños en el servicio sanitario provocado por el terremoto del 27 de febrero. Aquí, se indica que, entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía, hubo 35 localidades con daños a nivel de producción, 64 con daños en la distribución, 55 en la recolección, y 46 en el tratamiento y disposición del servicio sanitario. La región más afectada en la cobertura de agua potable fue la del Biobío, disminuyendo su cobertura total a un 71 %. Estos datos dan cuenta de cómo grandes terremotos afectan el sector sanitario de gran parte de la población de Chile en cada evento de gran magnitud. Es por esto por lo que se hace necesario una buena normativa sísmica, junto con investigaciones que se centren en la estimación, o probabilidad, de daños de la infraestructura crítica del país. En este informe se estudiará, en particular, parte de la red de agua potable presente en la ciudad de Concepción.

Así, en el caso del sistema sanitario, según la información entregada por la SISS en el Informe de Gestión del Sector Sanitario del año 2021, en Chile existen un total de 5.714.583 clientes registrados por las empresas sanitarias, los que cuentan con servicios de agua potable y/o alcantarillado. Además, a diciembre de 2021 la cobertura nacional de agua potable en los territorios urbanos concesionados es de 99,94 %, y la de alcantarillado, de 97,4 %, y el consumo total de agua potable de estos clientes fue de 1.191 millones de metros cúbicos, lo que da un consumo promedio por cliente de $17,4 m^3$ al mes. Junto con lo anterior, se debe tener en cuenta que se estima que la población total de Chile llegue a los 21 millones de personas (INE, 2019), por lo que los servicios sanitarios, y sistemas esenciales en general, deberán ir aumentando su alcance año tras año.

A partir de lo establecido anteriormente es que se puede deducir que el modelamiento y estudio de las amenazas sísmicas tiene un rol protagónico a la hora de verificar estudios previos y anticiparse fallas en algún sistema, o alguna parte de este. Para esto es que se utilizan las curvas de fragilidad. Estas se pueden definir como la relación entre la probabilidad de daño de un componente y el nivel de peligro sísmico (ALA, 2001). En la conferencia

acerca de ingeniería resiliente en París el año 2018 diversos autores describen a las curvas de fragilidad como una herramienta importante para representar los daños sísmicos (Rossetto and Elnashai, 2003; Shinozuka et al., 2000) y para evaluar la eficiencia de algunas soluciones técnicas de las estructuras afectadas (Dukes, DesRoches, and Padgett, 2012; Güneyisi and Altay, 2008; Padgett and DesRoches, 2008). Para el caso sísmico, la probabilidad de falla se obtiene en función de algunos parámetros de los terremotos, como la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima (PGV), el desplazamiento máximo (PGD), o la aceleración espectral, para algún estado límite determinado. Para el caso de tuberías en redes de agua potable se tienen distintas metodologías: en base a ondas sísmicas, a las deformaciones permanentes del suelo, y a desplazamientos de fallas geográficas (Jacobson and Grigoriu, 2008).

La diversidad del país también aporta nuevos enfoques de estudio en el análisis de amenazas, como lo es el enfoque de riesgo multi-amenaza. En el caso de Chile, ocurre comúnmente que después de grandes terremotos se producen maremotos o tsunamis. Sin embargo, estas no son las únicas amenazas posibles, ya que se pueden provocar también desprendimientos de tierra cerca de lugares montañosos, licuefacción en zonas con arenas finas comúnmente ubicadas en la costa, aluviones cerca de quebradas o cauces de ríos, entre otros. Así, con el fin de tener un estudio más completo de las amenazas naturales que pueden afectar es que se pueden desarrollar nuevos estudios que incluyan esta diversidad de desastres naturales posibles.

1.2. Hipótesis y Objetivos

1.2.1. Hipótesis

La hipótesis del presente trabajo es que se puede determinar el riesgo sísmico de las redes de agua potable en la ciudad de Concepción, a partir de datos empíricos y modelos analíticos, empleando escenarios sísmicos en conjunto con modelos probabilísticos de daño.

1.2.2. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación consiste en desarrollar modelos de falla para tuberías de agua potable, con base en datos empíricos, que puedan ser empleados para determinar el riesgo sísmico en sistemas de agua potable en Concepción.

1.2.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta investigación serán:

- Recopilar información con respecto a las condiciones sísmicas de Concepción.

- Caracterizar la amenaza sísmica en Concepción a través de un análisis probabilístico.
- Recopilar información acerca de las características del sistema de agua potable y sus componentes.
- Recopilar información acerca del daño en las componentes del sistema de agua potable durante el terremoto del año 2010.
- Generar curvas de vulnerabilidad para la ciudad de Concepción.

1.3. Estructura de la memoria

El presente trabajo se compone de 8 capítulos y un anexo. El capítulo 1 da una introducción al trabajo, su motivación, la hipótesis planteada y los objetivos de la tesis. El capítulo 2 entrega los antecedentes bibliográficos en los que se basa el desarrollo del trabajo, explicando los principales conceptos que son utilizados a lo largo del informe. El capítulo 3 da cuenta de las herramientas computacionales que se utilizaron para el desarrollo del análisis de riesgo. En el capítulo 4 se explican las metodologías de los tres principales temas del trabajo, el análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA), la creación de la curva de vulnerabilidad y el análisis de riesgo en las redes de agua potable. En el capítulo 5 se presenta el desarrollo del trabajo para obtener las curvas de amenaza, la ecuación de vulnerabilidad para tuberías, la curva de fragilidad para estanques y la creación del modelo de la red utilizando el programa computacional Epanet. El capítulo 6 presenta los resultados del modelamiento hidráulico, una comparación entre la probabilidad de daño y el peligro de licuefacción en Concepción, y una comparación con el trabajo de funciones de fragilidad para tuberías desarrollado por Bellagamba. En el capítulo 7 se presentan algunas discusiones y las conclusiones del trabajo. Y, finalmente, el capítulo 8 presenta la bibliografía utilizada en el presente informe.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Contexto Sísmico Chileno

Chile se encuentra en una de las zonas más sísmicas del planeta, esto debido a que bajo el territorio convergen las placas oceánicas de Nazca y Antártica con la placa continental Sudamericana. Esto provoca que se generen grandes terremotos subductivos, los cuales tienen como características ser de gran magnitud y con una duración mayor que las de tipo cortical. El primer evento de gran magnitud reconocido por la sociedad científica es el terremoto de Concepción el 8 de febrero de 1570, el cual afectó la antigua ubicación costera de Concepción, actualmente Penco. En la época colonial se tiene registro del terremoto de mayo de 1647, el cual redujo a escombros a la ciudad de Santiago y condujo a una aguda crisis económica. En el año 1730 ocurrió, el que se cree, ha sido el sismo con mayor magnitud que ha afectado la zona central del país en esta última mitad del milenio, provocando daños desde la ciudad de La Serena hasta Chillán. En el año 1751 ocurrió otro gran terremoto que provocó que la ciudad de Concepción cambiara su ubicación debido al gran maremoto que azotó sus costas.

Durante el siglo XIX los terremotos que se destacan son el de 1822 en la zona central y el de 1835 en Concepción y Talcahuano. Ya en el siglo XX se tuvo un importante registro de actividad sísmica en el país. En 1906 ocurrió el terremoto de Valparaíso, el cual dejó la ciudad casi completamente destruida. Asimismo, los terremotos de Atacama en 1922 y el de Talca de 1928 provocaron graves daños en las ciudades cercanas, tanto así, que el terremoto de Talca fue el que dio origen a la Ley y Ordenanza General sobre Construcciones y Urbanización que entró en vigencia el 20 de noviembre de 1935. En 1939 ocurre el terremoto de Chillán, el cual tiene la particularidad de ser un terremoto intraplaca. Este evento provocó que las autoridades y la población en general tuvieran una mejor planificación y organización para las labores de rescate y reconstrucción. En diciembre de 1949 ocurre un terremoto de magnitud 7.7 en la zona austral del país. Este se asocia a al deslizamiento transcurrente de la falla de Magallanes-Fagnano. En diciembre de 1950 ocurre un terremoto de magnitud 8.0 cerca de la ciudad de Calama, en el norte del país, siendo el sismo intraplaca de profundidad intermedia de mayor magnitud ocurrido en el país.

Ya en el año 1960, el día 21 de mayo ocurre un gran terremoto de magnitud 8.1 en Concepción y, posteriormente, el día 22 la ruptura avanza hacia el sur, provocando el terremoto de Valdivia, el cual ha sido el evento sísmico de mayor magnitud registrado en el mundo.

En marzo de 1965 ocurre el terremoto de La Ligua de magnitud 7.4 y el cual arrasó con el pueblo de El Cobre debido al colapso de un tranque de relave ubicado en las cercanías. El siguiente terremoto ocurre en el año 1971, tiene una magnitud de 7.8 y afecta a las zonas norte y central del país. Durante el año 1985 ocurre uno de los terremotos más recordados por la población, el cual tuvo una magnitud de 8.0 con epicentro en Algarrobo, región de Valparaíso. Los registros y la información recogida de este sismo se utilizaron para modificar la norma de diseño sísmico de edificios del país (NCh 433). En el año 1995 otro terremoto de magnitud 8.0 se registró en Antofagasta, sin embargo, se produjeron daños menores.

El primer terremoto del siglo XXI ocurre en el año 2005 en las cercanías de Mamiña y tiene una magnitud de 7.8, provocando graves daños en la región de Tarapacá. En el año 2007 ocurren 2 terremotos, uno en Aysén de magnitud 6.2 y el otro en Tocopilla de magnitud 7.7, donde ambos provocaron daños materiales importantes en sus respectivas ciudades. El 27 de febrero del año 2010 ocurre el terremoto del Maule de magnitud 8.8, el cual genera múltiples daños en diversas regiones del país. En marzo del año 2014 ocurre el terremoto de Iquique el cual tuvo una magnitud de 8.2 y provocó diversos daños en la infraestructura de la zona, especialmente por las réplicas que le siguieron. El año 2015 tiene lugar el terremoto Coquimbo con una magnitud de 8.4 y siendo el último evento mayor a 8.0 del país. El último sismo de gran magnitud ocurrido hasta la fecha es el terremoto de Chiloé ocurrido el 25 de diciembre de 2016 y el cual tuvo una magnitud de 7.6 en una zona cercana al terremoto del Valdivia de 1960.

2.2. Riesgo Sísmico

El análisis de riesgo sísmico de las estructuras tiene como objetivo determinar si alguna infraestructura en particular podrá soportar la intensidad de movimiento manteniéndose bajo niveles de desempeño esperados. El análisis de estudio de riesgo sísmico busca cuantificar las variables inciertas acerca de la ubicación, la magnitud y el movimiento de suelo de futuros terremotos. Con los estudios de riesgo sísmico es posible calcular la probabilidad de daño de las componentes de sistemas de redes de servicios vitales (agua potable, electricidad, caminos, etc). Finalmente, a la relación entre la probabilidad de daño de un componente, o del sistema en general, y alguna medida de intensidad, se le conoce como curva de fragilidad.

2.2.1. Análisis de Probabilidad de Peligro Sísmico

2.2.1.1. Análisis Determinístico

Al momento de llevar a cabo cualquier obra civil el diseñador tendrá que elegir un "peor caso" sísmico para poder realizar sus cálculos. Este peor de los casos implica encontrar la magnitud máxima que puede ocurrir por un terremoto en la falla más cercana a la zona de estudio, lo que parece simple en la teoría, sin embargo, llevarlo a la práctica tiene múltiples dificultades. Una de estas es la probabilidad de ocurrencia de terremotos de distintas magnitudes a diferentes distancias, lo que genera que no exista un sólo "peor caso". La incertidumbre aumenta cuando la falla geológica cerca de la zona de estudio no está claramente

identificada ni definida y, por lo tanto, la fuente sísmica es cuantificada como una fuente irreal capaz de producir terremotos en alguna zona.

Mientras que elegir el "peor caso" para un terremoto puede ser difícil y subjetivo, un problema mayor es la elección de las intensidades de movimiento de suelo asociadas al terremoto. Esto ya que los valores de intensidad registrados en un terremoto tienen una diferencia importante con los valores entregados por los modelos de atenuación elaborados con modelos empíricos, por lo que se hace necesario conocer la media y la desviación estándar de los modelos a implementar.

Dadas estas problemáticas es evidente que cualquier sismo de diseño y movimiento de suelo elegido de forma determinística no necesariamente representará el verdadero "peor caso" en un terremoto. Es por esta razón que se debe escoger un caso razonablemente fuerte, lo cual se hace con un evento de gran magnitud cercano a la zona de estudio, y luego determinando un nivel adecuado de intensidades asociados a este. Al realizar este tipo de procedimiento se deben tener en cuenta dos problemas:

1. La intensidad del movimiento de suelo resultante no es el "peor caso".
2. El resultado depende del escenario sísmico elegido y sus modelos predictivos de movimiento de suelo.

Los eventos sísmicos escogidos con este procedimiento se conocen como "Sismo Máximo Creíble" (MCE por sus siglas en inglés) y es ampliamente utilizado en distintos proyectos de ingeniería.

2.2.1.2. Análisis Probabilístico

Al contrario de la mirada determinista, este análisis se enfoca en conocer la mayor cantidad de fuentes capaces de generar un terremoto de gran escala que pueda afectar la zona de estudio. Estas fuentes pueden ser fallas geológicas o epicentros de terremotos pasados. Una vez que todas las posibles fuentes han sido identificadas se puede conocer la distribución de magnitudes y las distancias fuente-sitio asociadas a cada fuente.

Para conocer la magnitud esperada por algún sismo se utiliza la relación de recurrencia Gutenberg-Richter. Esta relación da cuenta que la tasa de ocurrencia de los terremotos siguen una cierta distribución:

$$\log_{10} \lambda_m = a - b \cdot m \quad (2.1)$$

donde λ_m es la tasa de terremotos mayores que una magnitud m , con a y b constantes. Estas constantes son estimadas utilizando análisis estadísticos de observaciones sísmicas históricas en la zona de estudio, y evidencia geológica que permita concluir la ocurrencia de un terremoto en el pasado. El valor a indica la tasa general de terremotos en una región, y el valor b indica la tasa relativa de pequeñas y grandes magnitudes.

Para poder predecir el movimiento del suelo en un sitio también es necesario modelar la distribución de distancias desde el epicentro hacia la zona de interés. Para una fuente sísmica determinada, generalmente, se asume que algún terremoto puede propagarse con igual probabilidad a cualquier distancia de la falla. Dado que aquellas ubicaciones están uniformemente distribuidas, por lo general, es simple identificar la distribución fuente-sitio utilizando sólo la geometría de la fuente. Se debe tener cuidado al momento de utilizar el concepto de "distancia". Esta palabra puede usarse para referirse a la distancia epicentral o hipocentral, distancia al punto más cercano a la superficie de falla, o la distancia al hipocentro del evento, respectivamente.

Lo descrito en los párrafos anteriores permite obtener una distribución de magnitudes y ubicaciones de potenciales terremotos, sin embargo, lo útil en estos estudios es analizar la respuesta del suelo. Por lo tanto, el siguiente paso es un modelo predictivo de movimiento de suelo. Estos modelos predicen la distribución de probabilidad de la intensidad de movimiento del suelo como función de distintas variables como, por ejemplo, magnitud, distancia, mecanismo de falla, la geología y la estratigrafía del sitio, entre otros. Estos modelos de predicción se desarrollan utilizando datos estadísticos de múltiples eventos sísmicos documentados en una cierta zona de estudio. La forma general de estos modelos de atenuación es:

$$\ln IM = \overline{\ln IM}(M, R, \theta) + \sigma(M, R, \theta) \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

donde $\ln IM$ es el logaritmo natural de la intensidad de movimiento de interés (aceleración espectral, PGA, PGV, etc). Los términos $\overline{\ln IM}(M, R, \theta)$ y $\sigma(M, R, \theta)$ son los "outputs" del modelo, representan el valor medio de la predicción y su desviación estándar, respectivamente. Ambos términos son funciones de la magnitud del terremoto (M), su distancia (R) y otros parámetros (θ). Por último, ϵ es la desviación normal estándar que representa la variabilidad observada en $\ln IM$. Actualmente, existen múltiples modelos de predicción que varían según el autor y que consideran distintos parámetros para su desarrollo. Alguno de los más reconocidos a nivel nacional son Abrahamson et al. (2016), Borosheck & Contreras (2012), Montalva et al. (2017), entre otros. Los principales parámetros que se tienen en cuenta a la hora de desarrollar un modelo son: la zona de estudio, el tipo de terremoto, la cantidad de documentación existente y la evidencia científica.

2.3. Redes de Agua Potable

A modo general, una red de distribución de agua potable es aquella en la que se transporta el agua desde la planta de tratamiento o del estanque de almacenamiento hasta la conexión del servicio, es decir, el punto en el que el usuario puede hacer uso de ella, ya sea una toma de agua comunitaria o conexiones domiciliarias. Con estos sistemas se pretende preservar la calidad y la cantidad de agua, así como mantener las presiones suficientes en la distribución de esta. Está compuesto, básicamente, por una red de tuberías, válvulas y otros componentes.

El agua que procede de la conducción, planta de tratamiento o estanque de almacena-

miento y se distribuye hacia los domicilios es lo que se conoce como red matriz, que es la que se "encarga de mantener las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto de todo el sistema". La red matriz (tubería principal) se conecta a una red secundaria, sobre la cual se instalan generalmente las conexiones domiciliarias. El conjunto de ambas redes conforma el sistema de distribución de agua potable.

Según la forma del circuito y el tamaño de la población la red de distribución puede ser de 2 tipos básicos: abierta o ramificada y cerrada o mallada (en forma de malla). La primera, es para poblaciones cuyas viviendas están localizadas a lo largo de una vía o son poblaciones dispersas, mientras que la segunda es para poblaciones que están desarrolladas por manzanas o cuadras.

El sistema abierto o ramificado es aquella donde de la tubería principal o matriz parten una serie de ramificaciones que terminan en pequeñas mallas (puntos ciegos o muertos). Se usa más a menudo en caminos donde la topografía hace difícil, económica y técnicamente, realizar interconexiones entre ramales. Las poblaciones suelen tener un desarrollo lineal a lo largo de un camino o río que es donde se encuentra la red principal y de la que se derivan las tuberías secundarias.

Por último, en el sistema cerrado o mallado el agua circula por tuberías que están interconectadas en forma de malla, generando un sistema cerrado, eficiente en presión y caudal, en el que no hay puntos muertos y los tramos se abastecen por ambos extremos logrando menores pérdidas de carga.

Es importante que se tengan conocimientos acerca de las siguientes partes de un sistema de distribución de agua potable:

- Fuente: Es el depósito de agua superficial o subterránea, natural o artificial, utilizado en un sistema de suministro de agua potable. Según la zona, puede ser un manantial (afloramiento, naciente, nacimiento), o bien un pozo o la derivación de agua de un curso de agua como un río o lago.
- Captación: Es el conjunto de obras o estructuras necesarias para obtener o "captar" el agua de una fuente de abastecimiento de agua. Pueden ser superficiales o subterráneas.
- Conducción: La conducción se refiere a las obras o red de tuberías que permiten llevar el agua desde el lugar de tratamiento o potabilización hasta el tanque de almacenamiento o de reserva, pero también directamente hasta la red de distribución.
- Tratamiento: Se llama tratamiento al proceso del sistema de agua potable donde se llevan a cabo las diferentes acciones y procesos para mejorar las características físico - químicas y bacteriológicas del agua volviéndola potable, o sea, apta para el consumo humano. El conjunto de estructuras, obras, equipos y materiales necesarios para los procesos necesarios en el tratamiento que logra la potabilización del agua se debe ver como una industria que utiliza como materia prima principal el agua cruda y cuyo producto final es el agua potable.

Además, la red de agua potable se conforma por las siguientes componentes:

- Tubería: Conjunto de tubos y su sistema de unión o ensamble. Para este análisis se denominará tubería al conducto entre dos secciones transversales del mismo. Se denominan nodos a los puntos de unión de una tubería con otra. Estas pueden ser continuas, es decir, que posee conexiones rígidas como las tuberías de acero soldadas, o segmentadas, las cuales cuentan con conexiones flexibles.
- Válvulas: Depósito que sirve para regular o impedir el paso, la salida y el retroceso del flujo del fluido.
- Tanques de distribución: Unidad de almacenamiento de agua potable en un sistema, que puede ser elevado, semienterrado o enterrado dependiendo de los requerimientos del proyecto.
- Cajas rompedoras de presión: Depósitos con superficie libre de agua y volumen pequeño. Su función es permitir que el flujo de la tubería se descargue en esta, eliminando la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo en la red de distribución.
- Piezas especiales: Son los accesorios que se utilizan para realizar ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tubería de distinto material o diámetros y terminales de conductos.
- Grifos: Equipos hidráulicos que están instalados en ciertos puntos del sistema, que conectados a una red de abastecimiento de agua puede generar un gran caudal en caso de incendio. Permite la conexión de mangueras y equipos de lucha contra incendios, así como el llenado de las cisternas de agua de los camiones de bomberos.
- Plantas Elevadoras: Instalaciones de bombeo que se ubican en puntos intermedios de la red. Permiten elevar la carga hidráulica en el punto para mantener la circulación del agua por la tubería.
- Tomas domiciliarias: Conjunto de piezas y tuberías que permiten el abastecimiento desde la red hasta el usuario.

La red sanitaria en Chile, compuesta por la red de agua potable y la red de aguas servidas, son atendidas por 55 empresas a lo largo del país, entregando los servicios de producción y distribución en el caso del agua potable, y de recolección y disposición en el caso de aguas servidas. De estas 55 empresas existen dos que son las que cuentan con la mayor cantidad de clientes regulados, estas son Aguas Andina S.A. y Essbio S.A., captando un 36.03 % y un 15.13 % de clientes, respectivamente. En la región del Bío-bío la empresa encargada del servicio sanitario es Essbio S.A., la cual, hasta el año 2010, contaba con una red de agua potable con una extensión total de 4.445 [km] en la región.

En el caso de la red de agua potable en Chile, esta cuenta con una cobertura urbana del 99.94 % y una longitud total de 42.245 [km] (SISS 2021). En este caso, nuevamente, las empresas Aguas Andinas S.A. y Essbio S.A. son las que tienen la mayor extensión de red a nivel nacional con un 27.9 % y un 17.5 %, respectivamente.

2.4. Estudio de Fragilidad en Redes de Agua Potable

2.4.1. Tuberías

Las principales amenazas de las tuberías en una red de agua son el movimiento del suelo provocado por un sismo, deslizamientos de terreno, licuefacción, asentamientos y la presencia de fallas geológicas.

Los deslizamientos de suelo suelen generarse cuando el sismo ocurre en zonas con gran cantidad de humedad, o en una época lluviosa del año. La cantidad de suelo que puede ceder varía desde sólo algunos centímetros hasta varios metros cúbicos de volumen, pudiendo dañar un área importante de tuberías en ciertos sectores. La cantidad de suelo desplazado se mide en términos de desplazamiento permanente del suelo (PGD).

El fenómeno de licuefacción ocurre en suelos arenosos que se encuentren sueltos y saturados, y que estén sometidos a fuertes movimientos de terreno durante un período suficientemente prolongado de tiempo. La vibración eleva la presión de agua en los poros del suelo y si esta llega a igualar o superar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia del suelo se reduce a un valor residual, experimentando licuefacción. Esto provoca que el suelo pueda comportarse como un material licuoso, generando grandes deformaciones en el terreno, afectando así a las estructuras que estén apoyadas sobre él. Algunos factores que condicionan el fenómeno son: el origen geológico del suelo, la distribución del tamaño de los granos, la profundidad de las aguas subterráneas, la edad del depósito, la amplitud y duración de la vibración del terreno, y el peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Algo bastante común es que cuando ocurre licuación se generen desprendimientos laterales del suelo, esto debido a que pueden existir capas de suelo licuables bajo la superficie. Al igual que con los deslizamientos de suelo, la cantidad de suelo que puede sufrir licuación en una zona se mide en términos del PGD.

Los asentamientos provocan roturas en las tuberías asociadas a desplazamientos verticales en las zonas de transición de distintos tipos de suelo. También es común que ocurran en las zonas donde las tuberías se conectan a tanques o algún edificio. Nuevamente, el asentamiento esperado se mide en términos de PGD.

El daño a tuberías segmentadas que se encuentran sobre una superficie de falla es severo. Las tuberías continuas pueden tener un mejor comportamiento, dependiendo de su profundidad de enterramiento. La orientación de la tubería con respecto a la falla juega un papel importante para determinar un posible daño, ya que las tensiones en las tuberías varían según el ángulo entre ambos.

El daño en tuberías puede ser expresado mediante la tasa de reparaciones (o fallas) por unidad de longitud, en función de la velocidad máxima del suelo (PGV), o como falla de suelo, en función del desplazamiento permanente del suelo (PGD). El desarrollo de estos algoritmos se ha basado en evidencia empírica, en conjunto con juicio ingenieril y estudios analíticos. Los datos empíricos han sido recolectados obteniendo información después de ocurrido algún terremoto. En específico, se debe saber qué niveles de PGV experimentó la tubería, contar

cuantas fallas ocurrieron en la red (roturas o fugas) y relacionar la intensidad de movimiento con estas fallas. Los resultados empíricos hasta 1989 están, principalmente, relacionados con tuberías de hierro fundido de diámetro pequeño. En los datos de años posteriores se ha podido recolectar información de tuberías modernas con distintos materiales y diversos diámetros.

Para el presente trabajo se utilizará la metodología y la data de la "American Lifelines Alliance" (ALA), en donde se desarrollan curvas de fragilidad expresadas en términos de tasa de reparación por 1.000 pies de tubería. Asimismo, se considerará como falla a una rotura de tubería, una fuga o algún daño a un elemento complementario de esta.

Como se mencionó anteriormente, el daño es expresado mediante una tasa de reparación, la cual se define como el número de reparaciones necesarias dividido el largo total de la tubería sometida a una demanda sísmica en particular. Se consideran dos mecanismos causantes de falla: el efecto de las ondas sísmicas y falla de suelo.

Los efectos de las ondas sísmicas son deformaciones vibratorias transitorias del suelo provocadas por un terremoto. Cubren una gran área geográfica y tienen consecuencias en todos los tipos de suelo y se inducen presiones en las tuberías debido a la restricción de movimiento dentro del suelo. En teoría, para propagaciones verticales de onda, la compresión máxima del suelo es directamente proporcional a la velocidad máxima del mismo, por lo tanto, el PGV es una descripción de demanda natural.

La base de datos recolectada por ALA consigue entregar un par de relaciones entre la tasa de reparaciones y el PGV. Estas son el modelo lineal y el modelo potencial de tasas de reparación, las cuales se presentan en las ecuaciones 2.3 y 2.4, respectivamente.

$$RR = a \cdot PGV \quad (2.3)$$

donde a corresponde a la pendiente media del set de datos utilizados. Para el caso de los datos utilizados por ALA, esta constante tiene un valor de 0.00187, con la velocidad medida en [pulgadas/s] y la tasa de reparación expresada en reparaciones por cada 1000 pies. Al convertir estas unidades al sistema internacional se obtiene un valor de "a" de 0.0031.

$$RR = b \cdot PGV^c \quad (2.4)$$

donde "b" y "c" son los coeficientes obtenidos al realizar una regresión de mínimos cuadrados en el $\log(PGV)$. Los valores obtenidos por ALA para estos coeficientes son 0.00108 y 1.173, respectivamente.

En la figura 2.1 se pueden ver los datos reales ocupados por ALA, y sus regresiones con sus respectivos coeficientes.

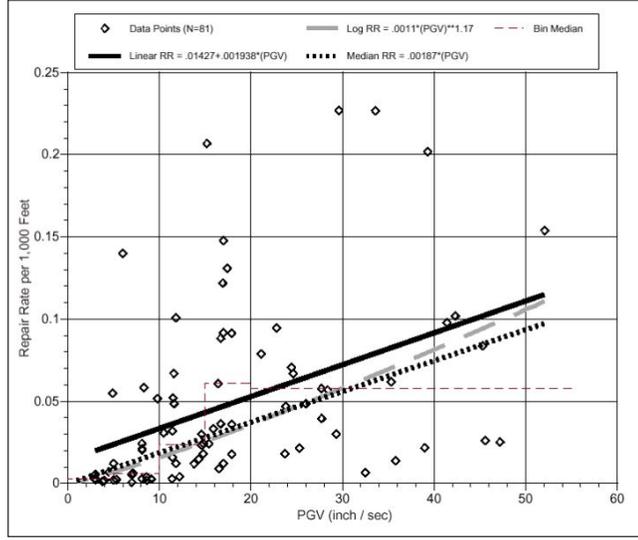


Figura 2.1: Curva de vulnerabilidad desarrollada por ALA (2001).

Para el cálculo de la probabilidad de falla de alguna tubería se utiliza una distribución de probabilidad de Poisson:

$$P_{x=k} = (\lambda L)^k e^{-\lambda L} / k! \quad (2.5)$$

donde x es la variable aleatoria que indica el número de veces que se rompa una tubería, λ es la tasa de ocurrencia del evento, y λL es el promedio de veces que falla una tubería de largo L . El valor λ se determina utilizando los valores máximos obtenidos del estudio de daño según la velocidad máxima del suelo (PGV) descrito anteriormente.

Dado que sólo una rotura en una tubería puede provocar la pérdida de servicio en todo su largo, se puede calcular fácilmente la probabilidad de que una tubería no falle utilizando un valor $k=0$. Así, la expresión para una tubería que continúa en servicio es:

$$P_i = e^{-\lambda L} \quad (2.6)$$

Una vez obtenida esta expresión, resulta sencillo calcular la probabilidad de que una tubería quede fuera de servicio producto de un sismo, utilizando el complemento del cálculo anterior. Así, y utilizando la expresión obtenida anteriormente para las tasas de falla (RR), la probabilidad de falla de una tubería se puede calcular como:

$$P_{falla} = 1 - P_i = 1 - e^{-RR \cdot L} \quad (2.7)$$

2.4.2. Estanques

En el caso de los estanques se deben considerar diversas variables, tales como, el tipo y la extensión del daño, la funcionalidad del tanque después del terremoto, las pérdidas económicas, y el tiempo necesario para su reparación. Para un correcto desarrollo del estudio de fragilidad se debe tener en cuenta el peligro sísmico en el lugar donde se encuentre ubicado el estanque, ya que para analizar el daño se puede utilizar la aceleración máxima del suelo (PGA) o la deformación permanente del terreno (PGD). Además, se deben definir los estados de daño que se quieran para el estanque, el cual puede depender de su funcionalidad, la condición de su fundación, la existencia de pandeo, el colapso de su techo, entre otros.

Al igual que con las tuberías, para el desarrollo de las curvas de fragilidad se realiza en base a datos empíricos recolectados de diferentes eventos sísmicos. En este caso se tuvieron 424 estanques para estudiar, donde los datos, en su mayoría, estaban descritos correctamente. Existen algunas diferencias en la definición del estado de daño, ya que esa es una característica que asigna cada autor del estudio. Para el análisis de ALA, se define como estado de daño 2 (DS=2) a un estanque que se encuentre con algunas grietas o fugas en sus tuberías de entrada o salida, y estado de daño 4 (DS=4) a los estanques que no puedan seguir en funcionamiento. Los estanques estudiados por ALA provienen de diversos lugares con distintos tipos de terremotos. La base de datos general se muestra en la tabla 2.1, y aquí se puede ver que la mayor parte provienen de terremotos de Estados Unidos, donde se caracterizan por ser de tipo cortical y de corta duración. Además, también se tienen datos de terremotos de Costa Rica, Nueva Zelanda, Japón y Chile.

Para el presente trabajo se considerarán las curvas de fragilidad realizadas para estanques de hormigón cuya medida de intensidad para evaluar el daño es el PGA.

Tabla 2.1: Base de datos utilizada por ALA para la elaboración de curvas de fragilidad de estanques.

Evento	Nº de Estanques Dañados	Rango de PGA [g]	PGA medio [g]
1933 Long Beach	49	-	0.17
1952 Kern County	24	-	0.19
1964 Alaska	39	0.20 - 0.30	0.22
1971 San Fernando	27	0.20 - 1.20	0.51
1972 Managua	1	0.50	0.50
1975 Ferndale	1	0.30	0.30
1978 Miyagi-ken-ogi	1	0.28	0.28
1979 Imperial Valley	24	0.24 - 0.49	0.24
1980 Ferndale	1	0.25	0.25
1980 Greenville	1	0.25	0.25
1983 Coalinga	48	0.20 - 0.62	0.49
1984 Morgan Hill	12	0.25 - 0.50	0.30
1985 Chile	5	0.25	0.25
1986 Adak	3	0.20	0.20
1987 Nueva Zelanda	11	0.30 - 0.50	0.42
1987 Whittier	3	0.27	0.17
1989 Loma Prieta	141	0.11 - 0.54	0.16
1989 Loma Prieta (intensidad baja)	1670	0.03 - 0.10	0.06
1992 Costa Rica	38	0.35	0.35
1992 Landers	33	0.10 - 0.56	0.30
1994 Northridge	70	0.30 - 1.00	0.63

2.4.3. Válvulas y Otros Componentes

Pueden existir diversos tipos de válvulas en una red de agua y la mayor parte se ubican enterradas junto a las tuberías. El algoritmo desarrollado para las tuberías por ALA (2001), y que fue presentado anteriormente, incluye el daño que podrían sufrir las válvulas. En el caso de tuberías de diámetro grande, las válvulas están enterradas en cámaras de concreto. Por lo general, el largo de la tubería influye en los posibles daños que puedan sufrir las válvulas, esto porque en tuberías extensas la frecuencia tubería-válvula es mucho menor que 10 [Hz], aumenta la posibilidad de sufrir incrementos en las tensiones de la tubería. Los datos empíricos muestran que la tasa de reparaciones en una red se pueden dividir en tres tipos: rotura de matriz principal, daño en las conexiones de las tuberías y daño a válvulas y grifos. Se estima que la proporción del daño se divide entre estos tres tipos en un 20 %, 60 % y 20 %, respectivamente. Por lo tanto, para tener un valor general de la tasa de fallas en válvulas, se debe tener en cuenta esta relación.

Además, dentro de una red de abastecimiento de agua se deben tener en cuenta los componentes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) que se encuentren. Entre estos

elementos se incluye la instrumentación, la fuente de poder, componentes de comunicación y sistemas meteorológicos. Muchos de estos instrumentos utilizan equipos externos de recepción. Los sensores son colocados en la tubería y el procesamiento de la señal se ejecuta en una cámara metálica. Las principales problemáticas de estos equipos serían la caída de baterías, un desacople del tablero de circuitos y un movimiento fuerte del receptor debido a un mal anclaje. Un estudio de efecto de sitio es la mejor manera de manejar estas vulnerabilidades.

Algunas instalaciones SCADA incluyen medidores de presiones o de flujo según la altura del agua en una tubería. Durante un terremoto puede suceder que ingrese aire a la tubería, pudiendo afectar a estos medidores y provocando la lectura de datos incorrectos. Por lo tanto, mientras el equipo no esté dañado, se deberá recalibrar después de un evento sísmico.

Capítulo 3

Programas Computacionales

3.1. EPANET

Epanet es un programa informático desarrollado por la agencia de protección ambiental (EPA) de los Estados Unidos. Realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua durante un período extendido en redes de tuberías presurizadas. La red incluye tuberías, nodos (juntas de las tuberías), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos. El programa rastrea el flujo de agua de cada tubería, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada estanque y la concentración de sustancias químicas en toda la red durante un período de simulación que comprende múltiples períodos. Asimismo, también es posible realizar una simulación de las sustancias químicas, la antigüedad del agua y el seguimiento de la fuente.

Este programa está diseñado como una herramienta de investigación para mejorar la comprensión del movimiento y destino de los componentes del agua potable en los sistemas de distribución. Se puede utilizar para muchos tipos diferentes de aplicaciones en los análisis de sistemas de distribución. Entre algunos ejemplos, se puede mencionar el muestreo del diseño del programa, la calibración del modelo hidráulico, la evaluación de la exposición del consumidor, entre otros. Este programa puede ayudar a evaluar estrategias de gestión alternativas para mejorar la calidad del agua en todo un sistema.

La modelización hidráulica completa y precisa es un requisito previo para poder realizar una modelización eficaz de la calidad del agua. Epanet posee un motor de análisis hidráulico avanzado que no necesita limitar el tamaño de la red a analizar, calcula la pérdida de carga por fricción, incluye las pérdidas de carga menores en codos, puede modelar bombas de velocidad constante o variable, calcula la energía y el costo de bombeo, es capaz de modelar distintos tipos de válvulas, entre otras propiedades útiles a la hora de un análisis hidráulico.

Para crear una red de agua potable se deben considerar al menos 4 componentes esenciales: los nodos, las tuberías, los estanques y las fuentes de agua. Con el programa es posible colocar cada una de estas componentes por separado, sin embargo, cuando se tienen redes de agua potable muy extensas es recomendable elaborarlas con un programa externo que automatice este procedimiento. Cada elemento cuenta con distintas propiedades, los cuales dependen de las características propias de la red. En el caso de los nodos, serán necesarias, como mínimo,

sus coordenadas y su elevación de cota. De las tuberías se deben saber su nodo inicial y nodo final, su diámetro y su longitud. Los estanques deben contar con su elevación, su nivel inicial, su volumen mínimo y máximo, y su diámetro. Por último, las fuentes de agua deben tener como dato el cabezal total de energía para su funcionamiento. Un ejemplo de un red en EPANET se puede ver en la figura 3.1

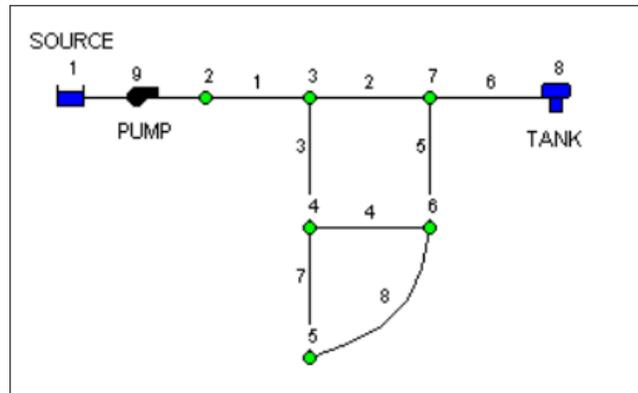


Figura 3.1: Ejemplo de red en EPANET.

3.2. Water Network Tool for Resilience (WNTR)

La herramienta WNTR es un paquete de Python el cual está diseñado para simular y analizar la resiliencia de redes de distribución de agua potable. Esta herramienta tiene una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) que es flexible y permite realizar cambios en la estructura de la red y sus operaciones, junto con la simulación de incidentes abruptos y las acciones de recuperación. Este programa se basa en EPANET, descrito anteriormente, para simular el movimiento y comportamiento de agua potable dentro de una red de distribución. Por lo general, a los usuarios se les recomienda estar familiarizados con el programa EPANET, y, además, tener nociones básicas en el modelamiento de redes de agua.

Con esta herramienta es posible crear modelos de redes de agua potable a partir de un archivo de EPANET o completamente desde cero. Además, se puede modificar la estructura de una red añadiendo o removiendo componentes, la operación de la red se puede modificar cambiando sus condiciones iniciales, las propiedades de sus componentes, su suministro y demanda, y sus condiciones de control. Se pueden agregar condiciones de daño a los tanques, válvulas y bombas, fuga en cañerías, cortes de poder, contaminación en la red, y cambios en el ambiente. Se puede simular la calidad del agua y el comportamiento hidráulico del sistema, programar la resiliencia utilizando datos topográficos, hidráulicos, de seguridad y económicos. Y, por último, se pueden generar simulaciones probabilísticas utilizando curvas de fragilidad para los componentes del sistema, aspecto fundamental para el desarrollo del trabajo.

Mientras que EPANET está diseñado para modelar y analizar algunos aspectos de la resiliencia en las redes de agua, WNTR fue desarrollado para extender estos estudios. WNTR entrega una plataforma para modelar una amplia gama de incidentes y de estrategias de reparación. Además, es compatible con paquetes de modelamiento científico usados en la industria como NetworkX, pandas, NumPy, SciPy, y Matplotlib. Estos paquetes permiten trabajar directamente en Python y poder tener acceso a herramientas que permiten analizar redes de agua potable complejas, correr simulaciones eficientemente, y crear gráficos y animaciones de alta calidad.

3.3. QGIS

El software QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU (General Public License). Es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) y corre sobre Linux, Unix, Mac, OSX, Windows y Android. Además, soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos. Las principales funciones del programa son el ver datos, tanto vectoriales como de ráster; explorar datos espaciales y componer mapas; crear, editar, gestionar y exportar datos; analizar datos; y publicar mapas en internet.

El programa puede ver combinaciones de datos vectoriales y ráster en 2D y 3D en diversos formatos, entre los cuales se incluyen:

- Tablas y vistas habilitadas espacialmente con PostGIS, SpatiaLite y MS SQL Spatial, Oracle Spatial, formatos compatibles con la biblioteca OGR instalada, incluidos GeoPackage, ESRI Shapefile, MapInfo, SDTS, GML, entre otros.
- Ráster y formatos de imágenes admitidos por la biblioteca GDAL, como por ejemplo GeoTIFF, ERDAS IMG, ArcInfo ASCII GRID, JPEG y PNG.
- Datos de malla, tanto TIN como cuadrículas regulares.
- Teselas vectoriales.
- Ráster GRASS y datos vectoriales de base de datos GRASS.
- Datos espaciales servicios online como Servicios Web OGC, incluyendo WMS, WMTS, WCS, WFS y WFS-T.
- Hojas de cálculo (ODS/XLSX)

Para explorar los datos y componer mapas, el software cuenta con una diversidad de herramientas:

- Navegador QGIS.
- Reproyección al vuelo.

- Representación de mapas en 2D y 3D.
- Gestor de base de datos.
- Diseño de impresión.
- Informe.
- Panel de vista general.
- Marcadores espaciales.
- Herramientas de anotaciones.
- Identificar/seleccionar objetos espaciales.
- Editar/ver/buscar atributos.
- Etiquetado de entidades definidas por datos.
- Vectores definidos por datos y herramientas para simbología ráster.
- Composición de atlas y mapa con capas de cuadrícula.
- Flecha Norte, barra de escala y etiqueta copyright para mapas.
- Apoyo para guardar y restaurar proyectos.

Para la creación, edición, administración y exportación de capas vectoriales y ráster, QGIS cuenta con:

- Herramientas de digitalización vectorial.
- Habilidad para crear y editar múltiples formatos de archivos y capas vectoriales GRASS.
- Complemento de georreferenciador para geocodificar imágenes.
- Herramientas GPS para importar y exportar formato GPX, y convertir otros formatos GPS a GPX.
- Apoyo para visualizar y editar datos de OpenStreetMap.
- Habilidad para crear tablas de bases de datos espaciales desde archivos con el complemento de Administrador de BBDD.
- Mejor manejo de tablas de bases de datos espaciales.
- Herramientas para la gestión de tablas de atributos vectoriales.
- Opción para guardar capturas de pantalla como imágenes georreferenciadas.
- Herramienta para exportar DXF con capacidades aumentadas de explorar estilos y plugins que realizan funciones parecidas a CAD.

Para analizar datos, QGIS cuenta con herramientas de análisis vectorial, análisis ráster, muestreo, geoprocésamiento, geometría y gestión de bases de datos. También, puede utilizar las herramientas integradas de GRASS, o bien, puede trabajar con el complemento Procesos, el cual proporciona un potente marco de análisis geoespacial para llamar a algoritmos nativos y de terceros desde QGIS. Todas las funciones de análisis se ejecutan en segundo plano, lo que permite continuar con el trabajo antes de que el procesamiento haya terminado.

QGIS puede publicar datos en internet a través de los protocolos WMS, WCS WFS y OAPIF utilizando un servidor web.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán las herramientas para ver datos, en particular, hojas de cálculo, de texto, CSV y ShapeFiles. Además, se compondrán mapas utilizando el navegador de QGIS y sus herramientas de anotaciones. Por último, se crearán capas vectoriales y de ráster, utilizando las Herramientas de Proceso ofrecidas por el programa, con el fin de obtener información acabada de la zona de estudio. Estas herramientas son las de Análisis de Ráster, Herramientas de Ráster e Interpolación.

3.4. DXF/XYZ

El programa DXF/XYZ convierte archivos DXF, los cuales se ocupan en programas de diseño asistido como AutoCad, en archivos de texto XYZ, los cuales indican las coordenadas de ciertos elementos a estudiar. Esta herramienta será útil para la asignación de cotas en la ciudad de Concepción, y utilizarlas en la red de tuberías a estudiar.

Capítulo 4

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se debe realizar un estudio probabilístico de riesgo sísmico, se debe crear una curva de vulnerabilidad adecuada para la zona de estudio, y, por último, se debe realizar un análisis de riesgo sísmico para la red de agua potable de la zona. La metodología de cada uno de estos procesos se presenta a continuación.

Primero, para realizar el análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA) en Concepción, es necesario llevar a cabo un muestreo de magnitudes según la ley Gutenberg-Richter y un muestreo de distancias según distribución beta. Estos muestreos son obtenidos utilizando la información disponible en el catálogo de sismos del USGS acerca de los sismos mayores a 6.5 Mw ocurridos en un radio de 200 [km] de la ciudad de Concepción desde el año 1950 hasta la fecha. Una vez realizados los muestreos, es necesario calcular la intensidad (PGA o PGV) utilizando alguna ecuación de atenuación (GMPE) adecuada. La elección de las ecuaciones de atenuación se presentan en la sección 5.2 del presente informe. Una vez obtenidas las medidas de intensidad en la zona, se calcula la probabilidad de superar un cierto valor de intensidad. Finalmente, se calcula la tasa de excedencia de un valor de magnitud para cada muestra en base a la ley de Gutenberg-Richter, con lo cual es posible generar la curva de amenaza para la medida de intensidad estudiada. En la figura 4.1 se presenta el diagrama de flujo de este procedimiento.

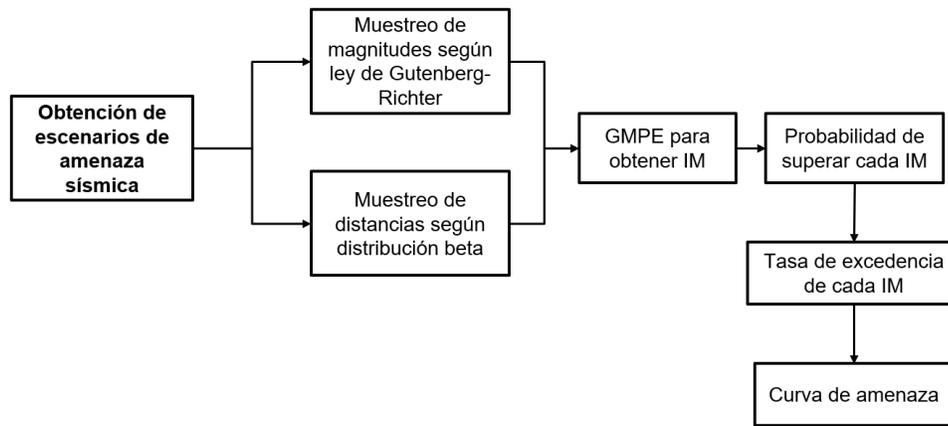


Figura 4.1: Diagrama de flujo de metodología del estudio de amenaza probabilística.

Para el desarrollo de la curva de vulnerabilidad utilizada en este trabajo se realiza un estudio de las fallas ocurridas en Concepción el año 2010 y la información disponible en la American Lifelines Alliance (ALA). Primero, se recolecta la información acerca de las fallas ocurridas en las tuberías después de un terremoto en la zona de estudio. Estas fallas se pueden dividir según su causa, el tipo de material de la tubería o su diámetro. Luego, se deben conocer los valores de la velocidad máxima del suelo (PGV) en la zona, y dividirla en rangos de PGV. Para conocer la tasa de fallas por kilómetro, es necesario calcular la longitud de tubería en cada zona de PGV. Una vez obtenida la longitud de tubería en cada zona, se dividen las fallas de la zona por este valor de longitud en km. Con estos datos ya se puede obtener una relación entre el PGV y la tasa de fallas por kilómetro de la zona de estudio. Con esta información es posible realizar una regresión lineal de los datos, obteniéndose una ecuación que indica la tasa de fallas por kilómetro según el PGV. Una vez obtenida esta relación, y con el fin de tener una mayor cantidad de datos para el estudio, se utiliza la información presente en ALA para realizar una comparación e incluir los datos al análisis. Una vez comparada la información entre los datos escogidos, se procede a elegir la ecuación de vulnerabilidad que mejor represente lo sucedido con la red de Concepción para el año 2010. El diagrama de flujo de este procedimiento se puede ver en la figura 4.2.

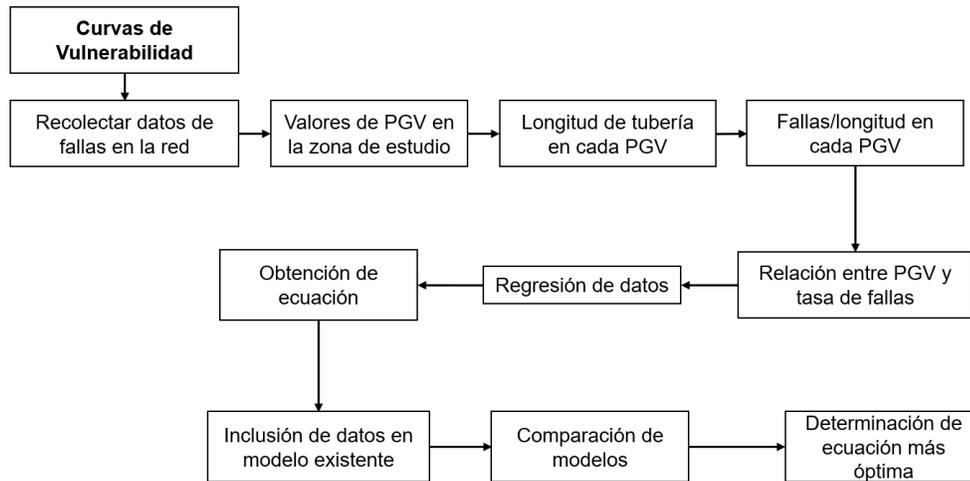


Figura 4.2: Diagrama de flujo de metodología del desarrollo de las curvas de vulnerabilidad.

Para realizar el análisis de riesgo sísmico se utiliza el paquete de python WNTR, con el cual es posible configurar un modelo de la red hidráulica a estudiar, realizar una simulación hidráulica y obtener las métricas de la red en un estado normal de funcionamiento. Luego, utilizando los datos del estudio de amenaza y de la curva de vulnerabilidad, se obtienen distintos escenarios de amenaza sísmica, donde cada escenario representa un sismo de una cierta magnitud. Al aplicar este sismo en la red se pueden determinar los daños que sufrirá, y con la red dañada se realiza una nueva simulación hidráulica, donde se obtienen nuevamente las métricas de la red. Estos datos son utilizados para calcular parámetros de rendimiento de la red, como la fracción de agua suministrada (WSA), las multas económicas o el cumplimiento de la presión mínima en los nodos de la red. Un resumen de este procedimiento se puede ver en la figura 4.3.

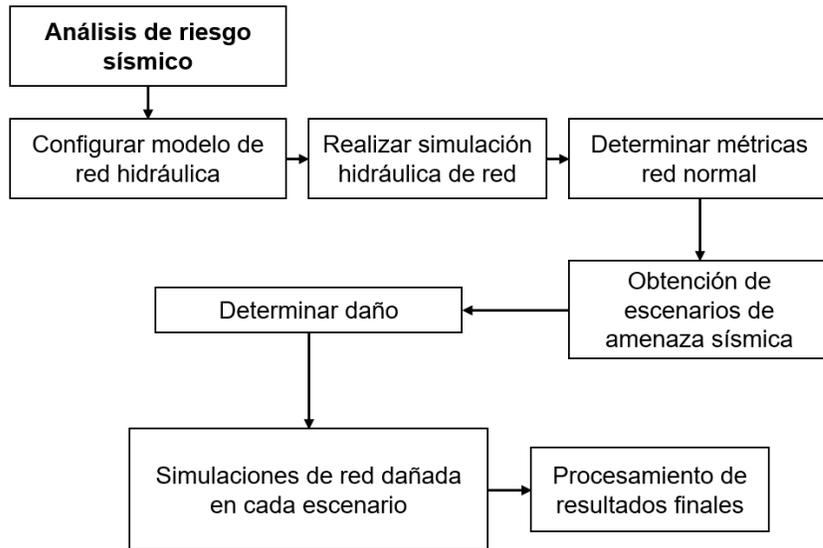


Figura 4.3: Diagrama de flujo de metodología del estudio de riesgo sísmico.

Capítulo 5

Desarrollo de Curvas de Fragilidad

5.1. Historial Sísmico de Concepción

Para comenzar con el análisis sísmico de la zona, se buscaron los sismos mayores o iguales a 6.5 Mw ocurridos en un radio de 200 km alrededor de la ciudad de Concepción. Para esto se utilizó la base de datos del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), tomando el año 1950 como el año de inicio de la búsqueda. Los datos entregados por la USGS dan cuenta de 20 sismos que cumplen con las condiciones mencionadas en un principio, siendo el de mayor magnitud el terremoto de Valdivia de 1960 con una magnitud de 9.5 Mw, y que aún corresponde al mayor evento sísmico registrado hasta la fecha a nivel mundial. La distribución de estos sismos se muestran en la figura 5.1, donde mientras mayor sea el radio del círculo, mayor es su magnitud. Además de la magnitud de cada evento, también se necesitaron extraer los datos de la profundidad, la distancia epicentral y la distancia hipocentral. Estos datos se muestran en la tabla A.1 de la sección Anexos del presente informe. En la tabla 5.2 se muestran los datos de distancia hipocentral mínima y máxima (R_{min} y R_{max}), la distancia promedio (R_{prom}), la razón entre la desviación estándar y la distancia promedio (R_{cov}) y la profundidad media de todos los sismos (Z_{mean}).

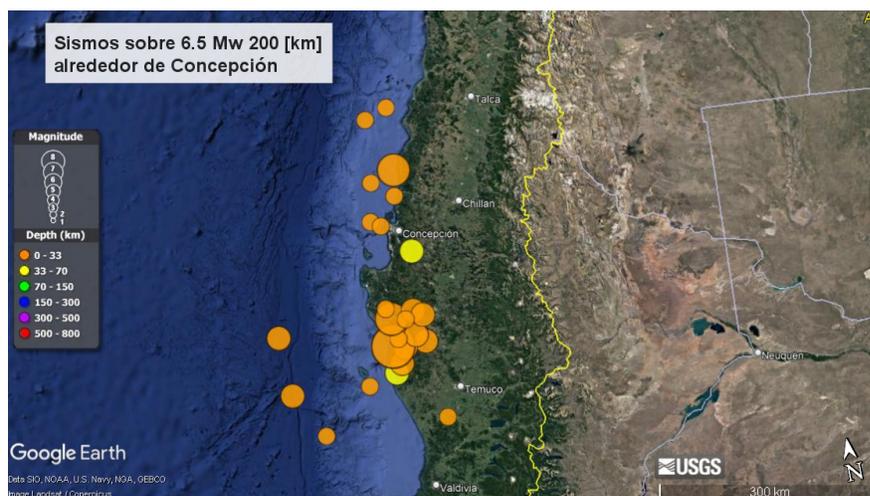


Figura 5.1: Sismos mayores a 6.5 Mw desde 1950 hasta la fecha en zonas cercanas a Concepción.

Para los parámetros "a" y "b" de la ley de Gutenberg-Richter se utilizó lo establecido por Poulos (2019). En su documento se propone un modelo de recurrencia nuevo para la zona subductiva chilena, el cual mejora algunos problemas de modelos anteriores, como la falta de un detalle mayor en los terremotos registrados o el uso de escalas de magnitud no compatibles con modelos de movimiento de suelo actuales. Poulos divide a Chile en siete zonas, de las cuales tres corresponden a una zona interplaca (zonas 1 a 3) y cuatro a zonas intraplaca (zonas 4 a 7). Estas zonas se presentan en la figura 5.2, donde con el círculo amarillo indica la ubicación de la ciudad de Concepción. A partir de esto se puede ver que Concepción está ubicada en la zona 3 definida por Poulos. Los parámetros "a" y "b" para esta zona son 4.26 y 0.77, respectivamente, y se muestran en la tabla 5.1.

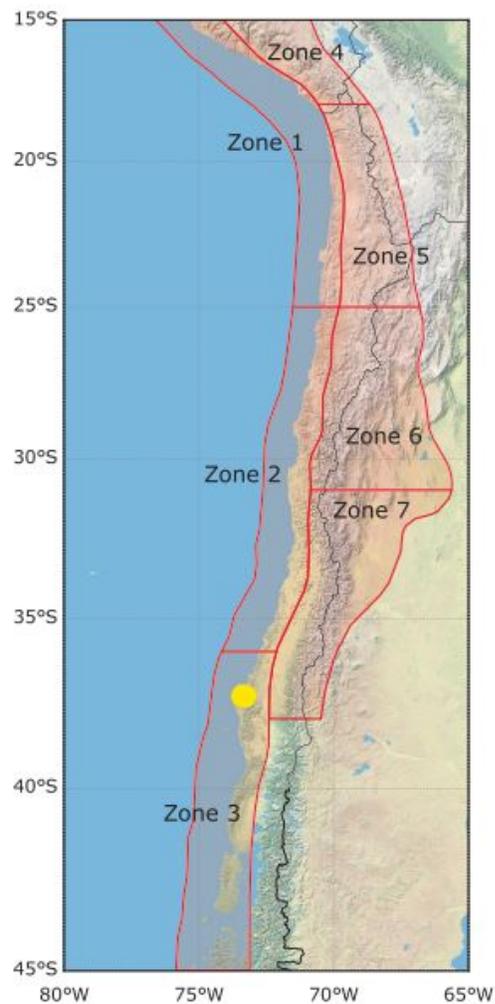


Figura 5.2: Zonificación desarrollada por Poulos (2019).

Tabla 5.1: Parámetros establecidos por Poulos (2019).

Zonas	Nº Eventos	a*	b*
1	390	5,15	0,87
2	508	5,36	0,88
3	144	4,26	0,77
4	242	5,11	0,90
5	843	6,37	1,04
6	195	6,12	1,11
7	149	5,32	0,98
1–3	1042	5,55	0,86
4–7	1429	6,48	1,02

Tabla 5.2: Parámetros utilizados para el modelo.

Mw_{min}	6.56
Mw_{max}	9.50
R_{min} [km]	30.73
R_{max} [km]	189.88
R_{mean} [km]	117.59
R_{cov}	0.38
Z_{mean}	24.60
a	4.26
b	0.77

5.2. Elección de GMPE

5.2.1. Ecuaciones de Atenuación Estudiadas

En el caso de las ecuaciones de atenuación (GMPE por sus siglas en inglés) se estudiaron seis modelos en total, tres enfocadas en la aceleración máxima del suelo (PGA) y tres enfocadas a la velocidad máxima del suelo (PGV). Los modelos enfocados en el PGA estudiados fueron: Idini et al. (2017), Montalva et al. (2017) y Abrahamson et al. (2016). Y los modelos enfocados en el PGV estudiados fueron: Montalva et al. (2018), Huang and Galasso (2019) y Jaimes and García-Soto (2020). Un resumen comparativo de los modelos de atenuación enfocados en el PGA se muestran en las tablas 5.3 y 5.4, además, se muestra la variación de estos modelos con la magnitud teniendo una distancia constante en la figura 5.3. En el caso de los modelos enfocados en el PGV, se muestra un resumen comparativos en las tablas 5.5 y 5.6, además, se muestra la variación de estos modelos con la magnitud en la figura 5.4.

5.2.2. Aceleración Máxima del Suelo (PGA)

5.2.2.1. Idini et al. (2017)

El modelo de Idini trabaja con un amplio registro de eventos ocurridos en la zona de subducción chilena, desarrollando un modelo de respuesta del terreno para la aceleración de máxima de suelo (PGA) y la respuesta de aceleración espectral con un 5% de amortiguamiento para períodos entre 0.01 y 10 [s]. El efecto de la amplificación dinámica del suelo fue considerado utilizando un nuevo modelo empírico basado en dos parámetros, el período predominante del suelo y la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m] de profundidad (V_{s30}). Este modelo está pensado para predecir los grandes terremotos subductivos ocurridos en el país, es decir, de magnitudes mayores a 8.0 Mw, sin necesidad de extrapolación de registros de sismos de menor magnitud.

Comparando este modelo con el desarrollado por Contreras y Borosheck (2012), el cual es el modelo más actualizado para la zona de subducción chilena, se puede decir que este último tiene algunas limitaciones importantes, como por ejemplo que no toma en cuenta los terremotos intraplaca, su predicción de movimiento tiene un rango de aceleraciones espectrales estrecho, utiliza funciones anticuadas que simplifican los efectos de sitio, y sus registros sísmicos no incluyen los terremotos chilenos más recientes.

Los datos utilizados para este modelo fueron obtenidos desde el Centro Sismológico Nacional (CSN) y de la Red Nacional de Acelerómetros del Departamento de Ingeniería Civil (RENADIC), ambos pertenecientes a la Universidad de Chile. A partir de estos datos se obtuvieron 1207 registros de terremotos interplaca mayores o iguales a 5.5 Mw y terremotos intraplaca de profundidad intermedia mayores a 5.0 Mw. Para el desarrollo del modelo se seleccionaron 114 registros de 38 terremotos intraplaca y 369 registros de terremotos interplaca. Para los terremotos intraplaca el rango de distancias va desde 61 a 386 [km], y para los interplaca desde 31 a 391 [km].

La forma general del modelo toma en cuenta la contribución de la fuente sísmica F_F , la de los efectos de la trayectoria entre la fuente y el sitio de estudio F_D y los efectos de sitio locales F_S . La ecuación del modelo es la siguiente:

$$\log_{10} Y = F_F(M_w, H, F_{eve}) + F_D(R, M_w, F_{eve}) + F_S \quad (5.1)$$

donde Y es la aceleración máxima del suelo o la aceleración espectral para un oscilador con un 5% de amortiguamiento en función del período medido en g, Mw la magnitud de momento, H la profundidad hipocentral, F_{eve} una variable auxiliar que es 0 para eventos interplaca y 1 para eventos intraplaca, y R la distancia hipocentral en eventos intraplaca e interplaca menores a 7.7 Mw, o la distancia más cercana a la ruptura para eventos interplaca mayores o iguales a 7.7 Mw.

5.2.2.2. Montalva et al. (2017)

El modelo de Montalva et al. (2017) es un modelo de predicción para la componente horizontal de la respuesta espectral para la zona de subducción chilena. La data utilizada consta de 3.774 registros de 473 terremotos, desde el año 1985 hasta el 2015, incluyendo los últimos megaterremotos ocurridos en Chile los años 2010, 2014 y 2015. Los registros fueron seleccionados y procesados con un esquema de trabajo uniforme y fueron incluidos los eventos interplaca e intraplaca. Los parámetros de movimiento de suelo calculados por el modelo corresponden a la aceleración máxima del suelo (PGA) en g y la respuesta espectral de pseudoaceleración con un 5 % de amortiguamiento hasta un período de 10 [s].

La función que representa la media del modelo sigue lo propuesto por Abrahamson et al. (2016). Para este modelo los efectos de sitio son estimados utilizando la velocidad de onda de corte en los primeros 30 [m] de profundidad, V_{s30} . El modelo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(Z|\theta) = \ln SA(T) = \theta_1 + f_{source} + f_{path} + f_{event/depth} + f_{site} + f_{FABA} \quad (5.2)$$

donde $\mu(Z|\theta)$ es el valor medio del modelo, siendo Z la matriz con todas las variables y θ los coeficientes de la regresión. SA es la aceleración espectral con un 5 % de amortiguamiento o el PGA, ambos en unidades de g . El coeficiente f_{source} recoge los efectos de la fuente y depende de la magnitud del evento; f_{path} depende del tipo de evento y de su magnitud; $f_{event/depth}$ depende del tipo de evento y su profundidad; f_{site} depende de las características del sitio, y ocupa como variable la velocidad de onda de corte en los primeros 30 [m] de profundidad y el PGA_{1000} , el cual es el valor del PGA para un sitio con V_{s30} igual a 1000 [m/s]; por último f_{FABA} es una variable binaria igual a 1 para sitios de arco-trasero y 0 para sitios de arco-delantero o desconocidos.

El rango de validez de este modelo es para distancias máximas de 300 [km], sin embargo, se han visto resultados razonables para distancias hasta los 1000 [km]. En el caso de las magnitudes, este rango va desde eventos con magnitudes desde 5.0 hasta 8.0 M_w , no obstante, eventos entre 8.0 y 9.0 M_w han sido los mejores caracterizados, por lo que es razonable extender el rango de aplicación del modelo hasta terremotos de magnitud 9.0 M_w . Para la velocidad de onda de corte este valor va desde los 100 hasta los 1000 [m/s].

5.2.2.3. Abrahamson et al. (2016)

El modelo de Abrahamson se construye a partir de un análisis de una extensa data de estudios previos realizados por diversos autores, siendo analizados un total de 9.946 registros de movimiento horizontal de 292 terremotos subductivos. Finalmente, el modelo utiliza una data de 2.590 registros de 63 terremotos superficiales con magnitudes entre 5.0 y 7.9 M_w y 953 registros de 43 terremotos interplaca con magnitudes entre 6.0 y 8.4 M_w , con distancias epicentrales máximas de 300 [km], para realizar la regresión y poder obtener la ecuación de atenuación. Estos registros se obtuvieron a través de investigaciones previas de diversos

autores de todo el mundo y del Centro Sismológico Internacional.

Las ecuaciones que definen al modelo son dos, una para terremotos interplaca (ecuación 5.3) y otra para terremotos superficiales (ecuación 5.4. Estas son:

$$\ln(Sa_{interplaca}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{rup} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{rup} + f_{mag}(M) + f_{FABA}(R_{rup}) + f_{site}(PGA_{1000}, Vs_{30}) \quad (5.3)$$

$$\ln(Sa_{superficial}) = \theta_1 + \theta_4 \Delta C_1 + (\theta_2 + \theta_{14} F_{event} + \theta_3(M - 7.8)) \ln(R_{hypo} + C_4 \exp(\theta_9(M - 6))) + \theta_6 R_{hypo} + \theta_{10} F_{event} + f_{mag}(M) + f_{depth}(Z_h) + f_{FABA}(R_{hypo}) + f_{site}(PGA_{1000}, Vs_{30}) \quad (5.4)$$

donde las variables θ_i son coeficientes del modelo; Sa es el valor de la aceleración espectral o PGA, ambos en g ; M es la magnitud de momento; Z_h es la profundidad hipocentral en km; F_{event} es una variable binaria que es 0 para sismos interplaca y 1 para intraplacas; F_{FABA} es otra variable binaria que es 0 para sitios entre-arco o sitios desconocidos, y 1 para sitios de arco-trasero; $f_{mag}(M)$ es un factor de magnitud; $f_{depth}(Z_h)$ es un factor de profundidad; f_{FABA} es un factor que depende de F_{event} ; y f_{site} es un factor de sitio que depende del valor de Vs_{30} y del PGA_{1000} .

Este modelo es un modelo global para terremotos de tipo subductivos. Sus principales virtudes son que está desarrollado utilizando registros sísmicos de diversas partes del mundo, las variaciones regionales en las constantes han sido evaluadas, y existen términos para ajustar el modelo a grandes eventos sin afectar las pequeñas magnitudes. Sin embargo, este modelo presenta algunas debilidades como que no considera la variación regional de Vs_{30} , y que las diferencias de arco-trasero/arco-delantero pueden ser debidos a la diferencia del factor de distancia (θ_6) en Japón comparado con las otras regiones.

Tabla 5.3: Parámetros de los modelos de atenuación de PGA, parte 1.

Modelo	Magnitud [Mw]	Registros	Tipo de distancia	Distancia [km]	Profundidad [km]
Idini et al. (2017)	≤ 9.0	483	Epicentral/Hipocentral	30-400	150
Montalva et al. (2017)	5.0 - 9.0	3774	Epicentral/Hipocentral	0-300	-
Abrahamson et al. (2016)	≤ 7.0	3543	Epicentral/Hipocentral	0-100	120

Tabla 5.4: Parámetros de los modelos de atenuación de PGA, parte 2.

Modelo	Efecto de sitio	Rango Vs30 [m/s]	Región	Tipo de sismos
Idini et al. (2017)	T*, Vs30	0-400	Subducción chilena	Interplaca/Intraplaca
Montalva et al. (2017)	Vs30	100-1000	Subducción chilena	Interplaca/Intraplaca
Abrahamson et al. (2016)	Vs30	0-1000	Global	Interplaca/Intraplaca

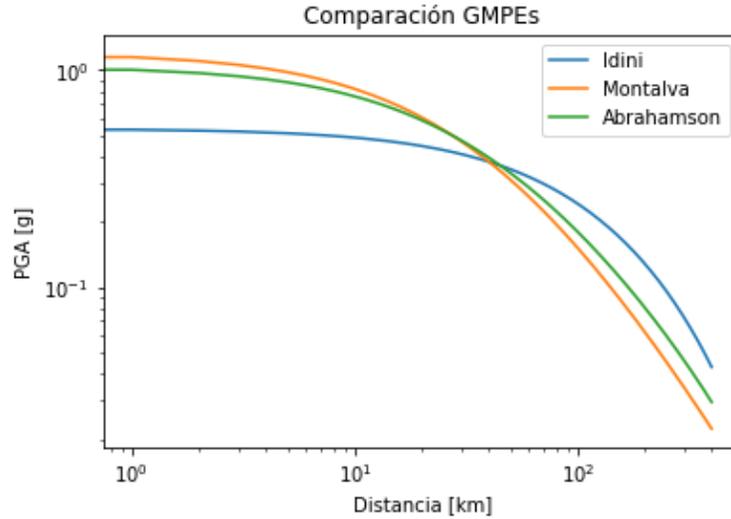


Figura 5.3: Comparación de los modelos de PGA estudiados.

5.2.3. Velocidad Máxima del Suelo (PGV)

5.2.3.1. Montalva et al. (2018)

Este modelo desarrollado por Montalva, Bastías y Leyton entrega una predicción para las velocidades máximas (PGV) y espectrales (PSv) para la zona de subducción chilena. La base de datos utilizadas en este modelo es una actualización del trabajo hecho por Bastías y Montalva, el cual es un modelo predictivo de aceleración máxima del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales (PSa), siendo amplificado con datos más recientes del Centro Sismológico Nacional (CSN). Finalmente, se utilizaron 19.437 registros de dos componente, de 3.560 eventos. Estos se dividen en 9.690 registros de 2.032 eventos interplaca, y 9.747 registros de 1.528 eventos intraplaca. El rango de distancia es de 25 a 725 [km] y el de magnitud es de 4.0 hasta 8.8 Mw.

La forma funcional del modelo es una adaptación de los modelos de Abrahamson et al. (2016) y de Montalva et al. (2017), ambos presentados con anterioridad en el presente documento. La ecuación del modelo se presenta a continuación:

$$\mu(Z|\theta) = \ln(PGV) = \theta_1 + f_{mag} + f_{path} + f_{event/depth} + f_{site} \quad (5.5)$$

donde los parámetros f_x son las variables que dependen de la magnitud, el tipo de evento, la trayectoria y el sitio de estudio.

Este modelo ha sido utilizado para estudios específicos en la cuenca de Concepción frente al terremoto del año 2010 en Chile, y ha demostrado una gran capacidad predictiva del daño estructural recopilado en terreno.

5.2.3.2. Huang and Galasso (2019)

Este modelo desarrolla predicciones para la aceleración máxima de suelo (PGA), velocidad máxima (PGV) y aceleraciones espectrales con un 5 % de amortiguamiento para períodos de 0.01 a 4 [s]. El estudio consta con un total de 7843 registros de 233 eventos sísmicos ocurridos en Italia entre los años 1976 y 2016. El rango de magnitud con el que trabaja es de 4.0 a 6.9 Mw y con una distancia epicentral máxima de 250 [km].

La forma funcional de este modelo es:

$$Y = f(X, b) = b_1 + b_2 M + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \log_{10}(\sqrt{R_{JB}^2 + b_6^2}) + b_7 S_S + b_8 S_A + b_9 F_N + b_{10} F_R \quad (5.6)$$

donde M representa la magnitud de momento; R_{JB} es la distancia Joyner-Boore en [km]; S_S y S_A son variables binarias que dependen del tipo de suelo; F_N y F_R son variables binarias que dependen del tipo de falla del evento; y las variables b_i son parámetros propios del modelo.

5.2.3.3. Jaimes and García-Soto (2020)

El presente modelo fue desarrollado para el cálculo de la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima (PGV) y las aceleraciones espectrales con un 5 % de amortiguamiento para períodos entre 0.01 y 5 [s]. Para esto, se utilizaron 366 registros de 23 eventos sísmicos. Este modelo es la actualización de modelos previos desarrollados para la zona de subducción mexicana e incluye dos nuevos grandes eventos ocurridos en 2017.

La forma funcional del modelo es la siguiente:

$$\ln Y_{H/V} = \alpha_1(T) + \alpha_2(T) \cdot M_w + \alpha_3(T) \cdot \ln R^* + \alpha_4(T) \cdot R^* + \alpha_5 \cdot H^* + \delta_{H/V}(T) \quad (5.7)$$

donde $Y_{H/V}$ es el valor del valor espectral horizontal o vertical según corresponda; T es el período en [s]; M_w es la magnitud de momento; R^* es una medida de distancia definida como $R^* = \sqrt{R^2 + \Delta^2}$, donde R es la distancia más cercana a la superficie de falla y Δ es un término de saturación cercana a la fuente definido como $\Delta = 0.0075 \cdot 10^{0.507 \cdot M_w}$; $H^* = (\min(H_D, 75) - 50)$ es un factor de escala de profundidad y H_D es la profundidad del sismo; α_i son los coeficientes estimados mediante el análisis de regresión para la componente horizontal y vertical, según corresponda; y $\delta_{H/V}$ son estimadores de error aleatorios normalmente distribuidos para los casos horizontal y vertical.

Este modelo de atenuación es válido para distancias epicentrales de hasta 400 [km], su rango de magnitudes es de 5.0 a 8.2 Mw y trabaja con profundidades de hasta 75 [km].

Tabla 5.5: Parámetros de los modelos de atenuación de PGV, parte 1.

Modelo	Magnitud [Mw]	Registros	Tipo de distancia	Distancia [km]	Profundidad [km]
Montalva et al. (2018)	4.0-9.0	19437	Epicentral	25-725	-
Huang and Galasso (2019)	4.0-6.5	7843	Epicentral	250	-
Jaimes and García-Soto (2020)	5.0-8.2	366	Epicentral/Hipocentral	0-400	75

Tabla 5.6: Parámetros de los modelos de atenuación de PGV, parte 2.

Modelo	Efecto de sitio	Rango Vs30 [m/s]	Región	Tipo de sismos
Montalva et al. (2018)	Vs30, f0	0-1000	Subducción chilena	Interplaca/Intraplaca
Huang and Galasso (2019)	Vs30	-	Italia	Superficiales
Jaimes and García-Soto (2020)	-	-	Mexico	Interplaca/Intraplaca

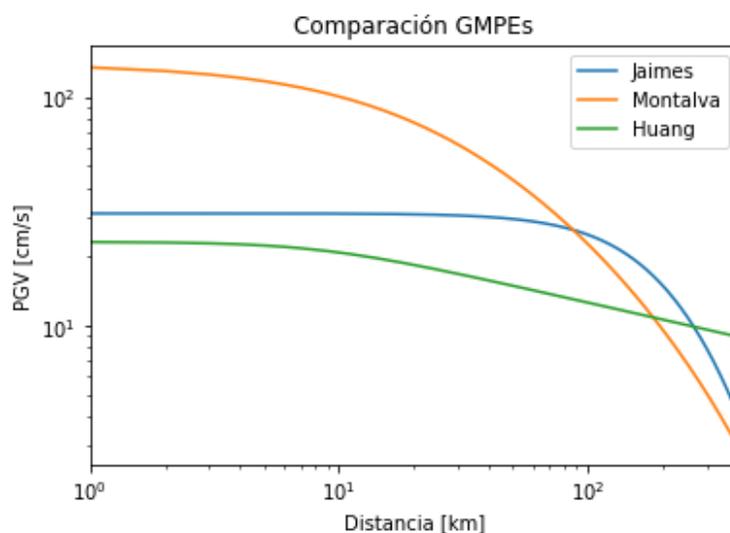


Figura 5.4: Comparación de los modelos de PGV estudiados.

En un principio la intención fue trabajar con una ponderación de los modelos estudiados, sin embargo, al no tener una correlación adecuada, y debido a la particularidad de cada modelo desarrollado, se decidió elegir un solo modelo de PGA y PGV.

En el caso del modelo de aceleración máxima del suelo se escoge el desarrollado por Montalva. Esto porque es un modelo que está enfocado en la zona de subducción chilena, al igual que el modelo de Idini, sin embargo, utiliza una mayor cantidad de registros sísmicos para su elaboración.

Para la elección del modelo de velocidad máxima del suelo se escoge, al igual que con el modelo para el PGA, el desarrollado por Montalva. En este caso la elección se basa, principalmente, en que este es el modelo que está más enfocado en eventos subductivos de grandes magnitudes.

5.3. Red de Agua Potable de Concepción

La empresa encargada del servicio de agua potable y de alcantarillado para la ciudad de Concepción corresponde a Essbio S.A. La red de agua potable de la ciudad tiene una longitud total de 540.268 [km] y los materiales utilizados en esta red son: policloruro de vinilo (PVC), acero, hierro fundido dúctil (FFD), polietileno de alta densidad (PEAD), asbesto cemento (ASB) y hormigón armado (HA). La distribución de estos materiales en el sistema de agua potable de Concepción se presentan en la tabla 5.7 y en la figura 5.6. Con respecto a sus diámetros, estos varían desde los 30 [mm] hasta los 1000 [mm] dependiendo de las necesidades de transporte de agua. Por lo general, se consideran tuberías de diámetros pequeño las que van desde los 75 [mm] hasta los 110 [mm], de diámetros medianos los que están entre los 110 [mm] y los 500 [mm], y de ahí en adelante se consideran como tuberías de diámetro grande. La distribución de los diámetros en la red se presentan en la tabla 5.8 y en la figura 5.7. La disposición de la red en la ciudad de Concepción se presenta en al figura 5.5.

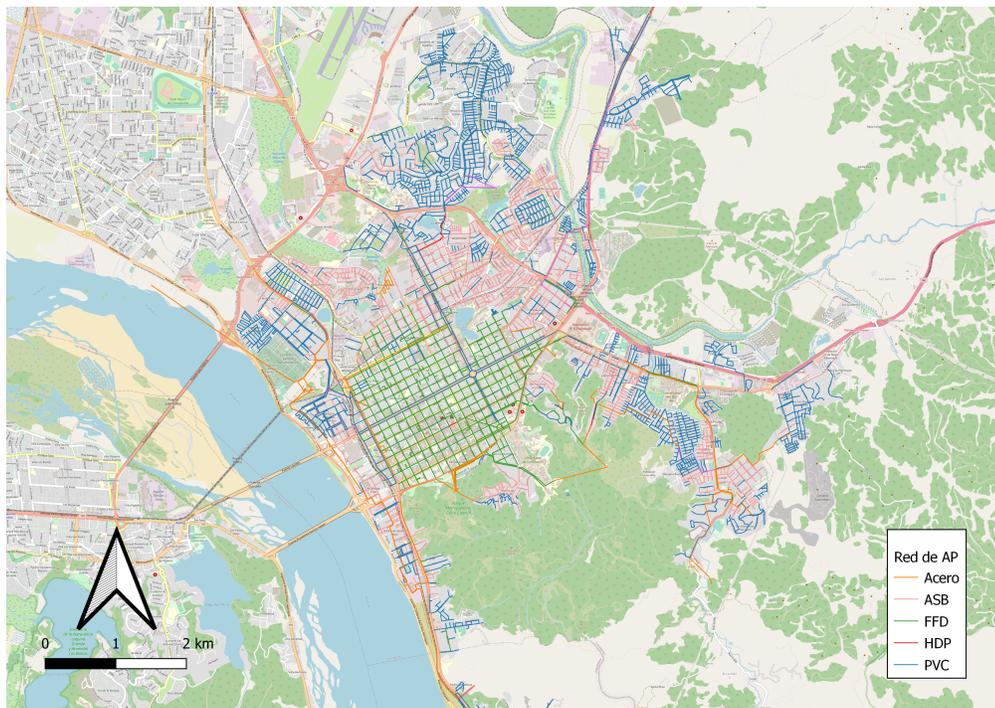


Figura 5.5: Red de agua potable de la ciudad de Concepción.

Tabla 5.7: Materiales de la red de agua potable de Concepción. Guzmán (2011).

Materiales	Cantidad	Longitud [km]	%
PVC	8870	235.792	43,64
ASB	3858	173.276	32,07
FFD	1873	87.609	16,22
Acero	328	40.753	7,54
PEAD	40	2.404	0,44
HA	7	0.256	0,05
Indet	10	0.177	0,03

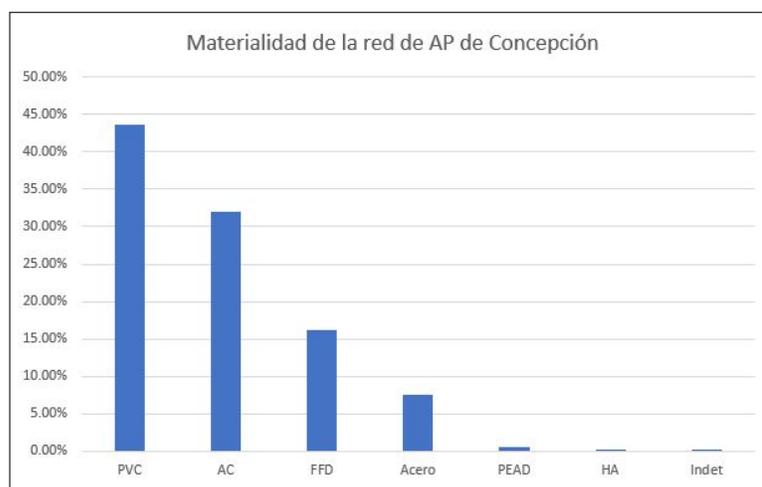


Figura 5.6: Distribución de materiales en la red de agua potable de Concepción.

Tabla 5.8: Diámetros en la red de Concepción. Guzmán (2011).

Diámetros [mm]		Cantidad	Longitud [km]	%
Pequeños	$30 \leq D \leq 110$	10932	346.18	64.08
Medianos	$110 < D < 500$	3929	174.63	32.32
Grandes	$500 \leq D \leq 1000$	84	16.67	3.09

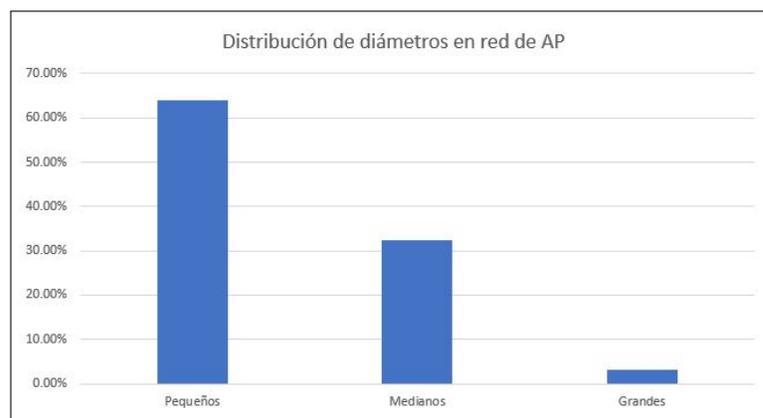


Figura 5.7: Distribución de diámetros en la red de agua potable de Concepción.

5.4. Características Geotécnicas de Concepción

5.4.1. Microzonificación Sísmica

El estudio de la geología y de los suelos de fundación de la ciudad de Concepción ha sido realizada por el servicio nacional de geología y minería (SERNAGEOMIN) entre los años 2006 a 2008 sobre la base topográfica del IGM. La principal unidad geológica presente en la ciudad es la de depósitos fluviales del río Biobío (Pleistoceno-Holoceno), la cual contiene arenas desde muy fina a gruesa, con limo, de buena selección y subredondeadas. Es un material detrítico de origen volcánico y composición predominantemente andesítica-basáltica, con depósitos coluviales. Este tipo de suelos se caracteriza por tener una buena capacidad de soporte, compresibilidad normal y grado de compactación medio, sin embargo, la estabilidad de taludes es baja. Su clasificación según la norma chilena NCh 433 Of96 (INN, 2005) es de un suelo de tipo III, y, según el DS 61, corresponde a un suelo tipo D. Otra unidad geológica principal en la ciudad son las arenas con bastante limo (Pleistoceno-Holoceno). Estos son depósitos eólicos de dunas y depósitos coluviales, formados por arenas finas a medias, sin cementación y con limos subordinados. En las áreas próximas a las laderas se incrementa el contenido de limos y arcillas. Este tipo de suelo tiene características desfavorables como suelo de fundación, debido a la gran cantidad de poros y sus características pueden tener una gran variación vertical y horizontalmente. Además, presenta una baja estabilidad de taludes y tiende a ser fácilmente erosionado por el agua y el viento. Su clasificación según la norma chilena NCh 433 Of96 (INN, 2005) es de un suelo de tipo III, y, según el DS 61, corresponde a un suelo tipo E. Estas unidades geológicas son las principales en la ciudad, sin embargo, existen diversos tipos de unidades geológicas, como rocas sedimentarias y plutónicas. La distribución de los distintos tipos de unidades geológicas en Concepción se presentan en la figura 5.8.

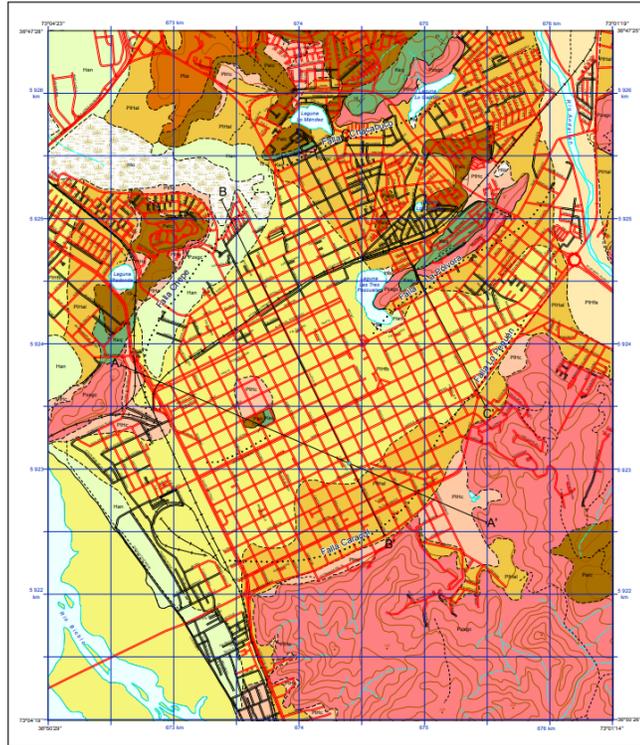


Figura 5.8: Mapa geológico y suelos de fundación de Concepción. Vivallos et al. (2010).

En la figura 5.9 se presentan los períodos predominantes y la anomalía gravimétrica de Concepción. El mapa de períodos predominantes del casco urbano de la ciudad presenta curvas de isoperíodos de entre 0,3 y 1,3 segundos, los cuales reflejan la variabilidad de las características del suelo. Los contornos de períodos predominantes más cortos (0,3 [s]) se ubican al sur y al suroeste del mapa y los isoperíodos de rango intermedio (0,5 a 1,0 [s]) se distribuyen formando contornos orientados en dirección suroeste-noreste. Los períodos más largos (0,8 a 1,3 [s]) se ubican al centro del casco urbano y se distribuyen en dirección suroeste-noreste. De forma general, en suelos duros los períodos predominantes varían entre 0,3 a 0,5 [s], mientras que en suelos blandos estos períodos aumentan hasta valores de 0,8 a 1,3 [s].

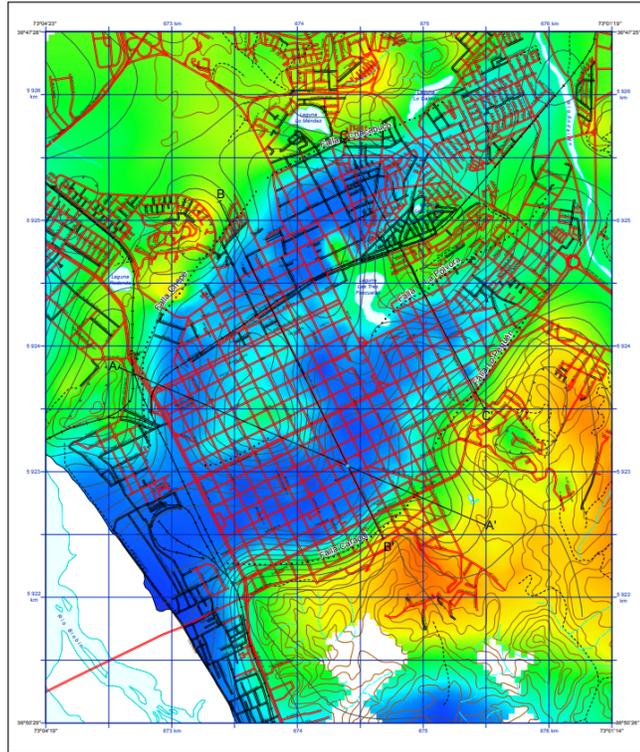


Figura 5.9: Mapa de períodos predominantes y anomalías gravimétricas de Concepción. Vivallos et al. (2010).

Con respecto a la microzonificación sísmica de la ciudad, esta se presenta en la figura 5.10. Aquí, se pueden reconocer cuatro zonas, que muestran períodos predominantes con valores bajos en los afloramientos rocosos y valores altos en las zonas conformadas por suelos de origen fluvial y aluvial. Los límites de las zonas se determinaron mediante cálculos numéricos, por lo que están sujetos a incertidumbres propias de los cálculos. La zona I de la ciudad corresponde al subsuelo de la mayor parte del centro de la ciudad. Está formada, principalmente, por arenas limosas, intercalada con limos, de los depósitos fluviales del río Biobío, y por depósitos de origen eólico hacia el noreste. Hacia el sur se ve un aumento considerable en su contenido de limos, con una potencia media de relleno sedimentario entre 50 y 130 [m]. La mayoría de estos suelos se clasifican como suelos de tipo D según el DS 61. El período predominante en esta zona se encuentran entre 1,0 a 1,3 [s] y su amplitud relativa de la relación espectral H/V entre 0 y 20 Hz se encuentra entre 6 y 8. En la zona II predominan los depósitos fluviales de los ríos Biobío y Andalién y están compuestos por arenas finas a medias con abundante limo, intercaladas con niveles de arcillas y limos de origen coluvial, los que, en algunos casos, están cubiertos por rellenos antrópicos o zonas de humedales. Estos depósitos tienen una profundidad media de 50 [m]. Los suelos en esta zona también se clasifican como suelos de tipo E según el DS 61. Además, poseen un período predominante de entre 0,7 a 1,0 [s] y la amplitud relativa varía de 3 a 8. La zona III corresponde a afloramientos rocosos y suelos arcillosos, formados por la meteorización de rocas sedimentarias en cerros con alturas cercanas a los 100 m.s.n.m.; a depósitos coluviales en el pie de laderas, intercaladas con arenas fluviales y eólicas con abundantes limos. Esta zona se clasifica, según el DS 61, como un suelo de tipo A en las zonas cercanas a roca sana, y como suelo de tipo D en sectores de arenas limosas. El período predominante varía entre 0,5 y 0,7 [s] y la amplitud relativa de 3 a 8. La zona IV se

mapa fue elaborado por la subdirección nacional de geología de SERNAGEOMIN el año 2010. A partir de este mapa se puede ver que la ciudad de Concepción cuenta, mayoritariamente, con un grado de peligro de licuefacción medio, seguido por zonas, cercanas a ríos y lagos, con un peligro alto. En el mapa las zonas de color rojizo representan un grado de peligro alto, las zonas de color anaranjado un grado de peligro medio y las zonas blancas un grado de peligro bajo.

Las zonas con un peligro alto se caracterizan por ser suelos formados por sedimentos no consolidados, de baja compactación y saturados. Se tratan de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y, en menor medida, aluviales. Una característica común en estos suelos es que se encuentran saturados, o con un nivel freático cercana a la superficie. Además, presenta grandes espesores de sedimentos propensos a ser licuados, por lo que la magnitud de la licuefacción es aún mayor. La recomendación es no construir en este tipo de lugares. Los humedales deben ser desestimados como terrenos donde construir, ya que son inundados recurrentemente. Además, los humedales regulan el sistema hidrológico siendo parte vital de un ecosistema mayor.

Las zonas con un peligro medio corresponden a suelos naturales compuestos por sedimentos no consolidados, de baja a media compactación, constituidos por arenas y arenas limo-arcillosas las cuales son, principalmente, arenas depositadas en ambientes fluviales y eólicos. Su espesor es variable y su nivel freático varía entre los 0 y 5 [m] de profundidad. Se ubican principalmente entre humedales, en los bordes de cerros y en la Cordillera de la Costa. En Concepción esta zona corresponde al casco antiguo de la ciudad, la cual es la zona más densamente poblada. Si bien la construcción no es recomendable, las obras proyectadas deben incluir estudios de mecánica de suelos y tratamiento de suelos y relleno con el fin de mitigar los efectos de la licuación. Los cimientos deben estar por debajo de los niveles licuables, y las obras lineales, como acueductos, alcantarillados, entre otras, deben ser construidas con materiales y uniones flexibles que permitan deformaciones importantes. El diseño y construcción de viviendas deben evitar asentamientos diferenciales y el colapso de ellas.

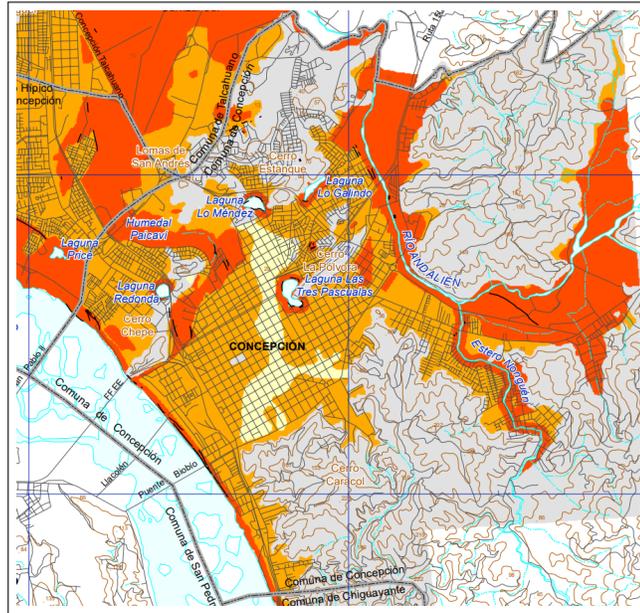


Figura 5.11: Peligro de licuefacción en Concepción. Falcón et al. (2010).

5.4.3. Velocidad de Onda de Corte

Para conocer la distribución de velocidades de onda de corte en la ciudad de Concepción se utilizaron los datos recopilados por Pablo Sáez O. (2016) en su tesis "Actualización de la estratificación y zonificación de los suelos en la Comuna de Concepción" realizada en la Universidad del Bío-Bío. La base de datos en esta tesis es de 451 sondajes, y fueron recopilados gracias al aporte de empresas dedicadas al estudio de mecánica de suelos de la zona. En el trabajo se desarrollaron modelos estratigráficos para 16 sectores de la ciudad de Concepción, donde se agruparon todos los sondajes con estratigrafías de similares características, se definieron los bordes de las zonas, se comparó la composición de los sondajes de la zona observando el suelo predominante hasta 10 [m] de profundidad, y, por último, se clasificó el suelo en cinco tipos. Los modelos estratigráficos presentados cuentan con información acerca del tipo de suelo, el valor de N_{spt} , su clasificación según el DS 61, y la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 [m] de profundidad. Los datos de V_{s30} para las zonas de Concepción que se pudieron extraer de esta tesis se encuentran en la tabla C.1 del anexo. La distribución de los datos se muestran en la figura 5.12.

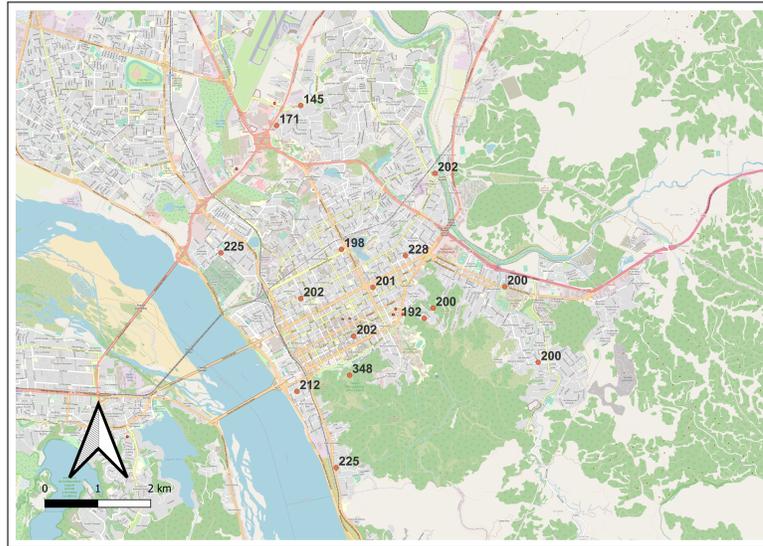


Figura 5.12: Velocidades de onda de corte en Concepción. Sáez (2016).

Utilizando la herramienta de interpolación IDW de QGIS se consigue obtener los valores de velocidad de onda de corte (V_{s30}) en toda la ciudad de Concepción. El fin de obtener estos valores es poder utilizarlos en los modelos de atenuación seleccionados. El resultado de la interpolación se muestra en la figura 5.13. Aquí, se puede ver los valores de V_{s30} van desde los 145 [m/s] hasta los 347 [m/s], obteniéndose los valores más altos en zonas de afloramientos ROCOSOS.

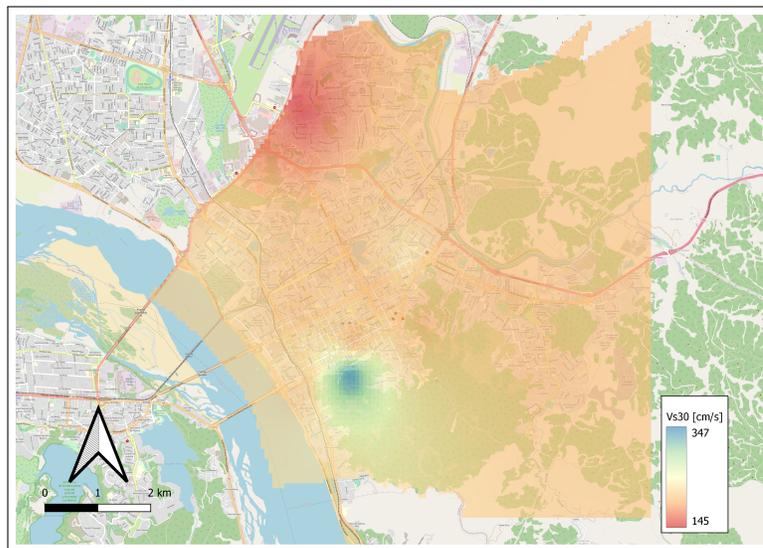


Figura 5.13: Interpolación de velocidades de onda de corte.

5.5. Desarrollo de Curvas de Amenaza

5.5.1. Distribución de Magnitudes

Para construir la distribución de magnitudes en la zona, se debe calcular la función de densidad de probabilidad (PDF) utilizando los parámetros b y M_{min} de la tabla 5.2 y generando 10.000 muestras aleatorias entre 0 y 1. El valor de la PDF se calcula utilizando un evento de magnitud aleatoria que tome un valor entre M_{min} y M_{max} , con este valor se calcula la PDF según la ecuación 2.3 de Baker (2013) y se divide por el resultado del cálculo de una PDF uniforme con los mismos parámetros. Por último, para aceptar la muestra, el valor de la razón entre las PDF dividido por un número arbitrario, que en este caso es 20, debe ser mayor que el número aleatorio entre 0 y 1 definido en un comienzo. El gráfico entre la PDF y la magnitudes se presenta en la figura 5.14.

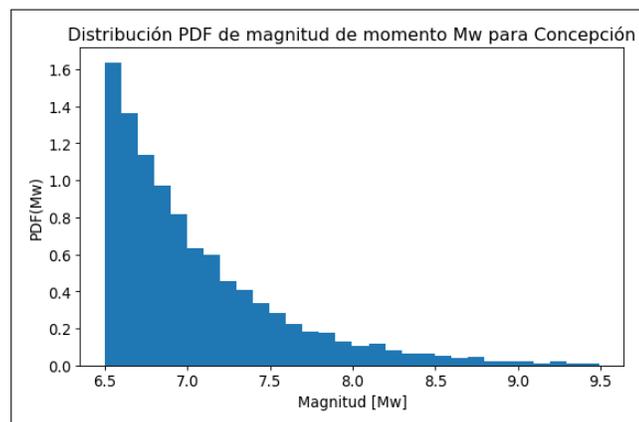


Figura 5.14: Distribución de magnitudes.

5.5.2. Distribución de Distancias

Para construir la distribución de distancias se utilizó una distribución beta, donde se utilizan los valores de las distancias epicentrales máximas y mínimas (R_{min} y R_{max}), la distancia epicentral promedio (R_{mean}) y el coeficiente de variación (R_{cov}), todos presentados en la tabla 5.2. De esta forma es posible obtener valores de distancias epicentrales que sigan el mismo comportamiento de los sismos estudiados en los últimos 70 años cerca de la ciudad de Concepción. La distribución de estas distancias se presentan en la figura 5.15. A partir del gráfico de distribución se puede ver que las distancias se concentran en las zonas más alejadas a la ciudad de Concepción, aumentando casi linealmente su probabilidad con respecto a la distancia mínima.

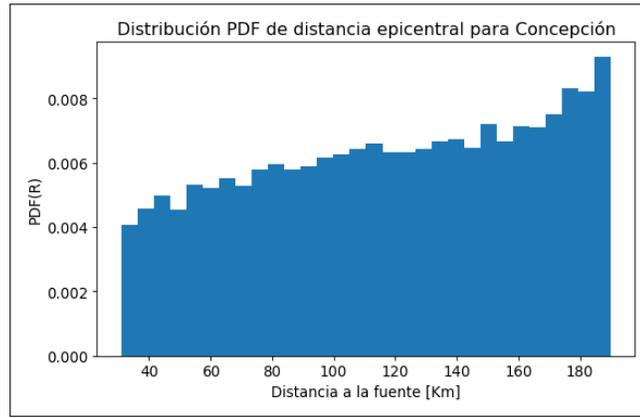
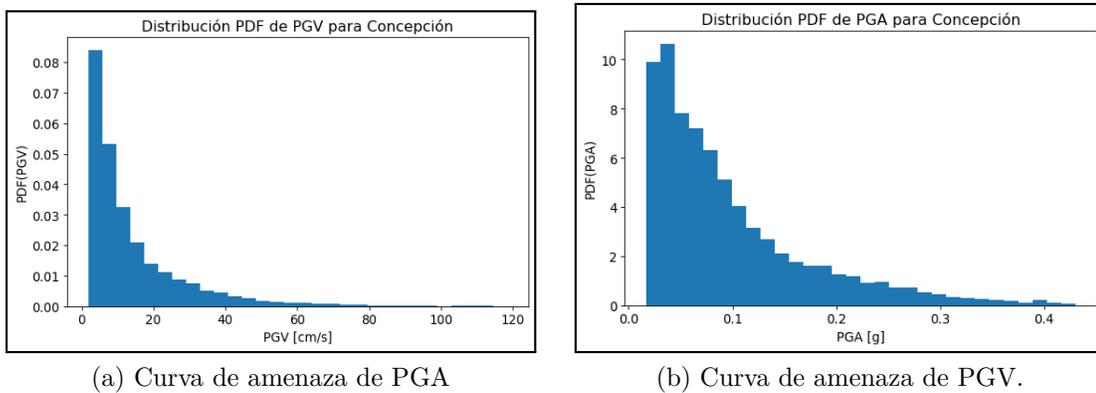


Figura 5.15: Distribución de distancias epicentrales.

5.5.3. Distribución de Intensidades

La distribución de intensidades se calcula utilizando las ecuaciones de atenuación de Montalva (ecuaciones 5.2 y 5.5) y utilizando las distribuciones de magnitudes y distancias elaboradas anteriormente. Esta distribución de magnitudes, tanto para PGV como para PGA, se muestran en las figuras 5.16.a y 5.16.b, respectivamente.



(a) Curva de amenaza de PGA

(b) Curva de amenaza de PGV.

Figura 5.16: Curvas de amenaza obtenidas.

5.5.4. Curvas de Amenaza

Una vez obtenidas la distribución de intensidades es posible calcular la probabilidad de superar cierto valor de IM, junto con una tasa anual de excedencia de un valor de magnitud para cada muestra en base a la ley de Gutenberg-Richter. Con esto es posible calcular una tasa de excedencia anual para cada valor de IM, pudiéndose construir así la curva de amenaza de ambas medidas de intensidad estudiadas y mostradas en la figura 5.17.

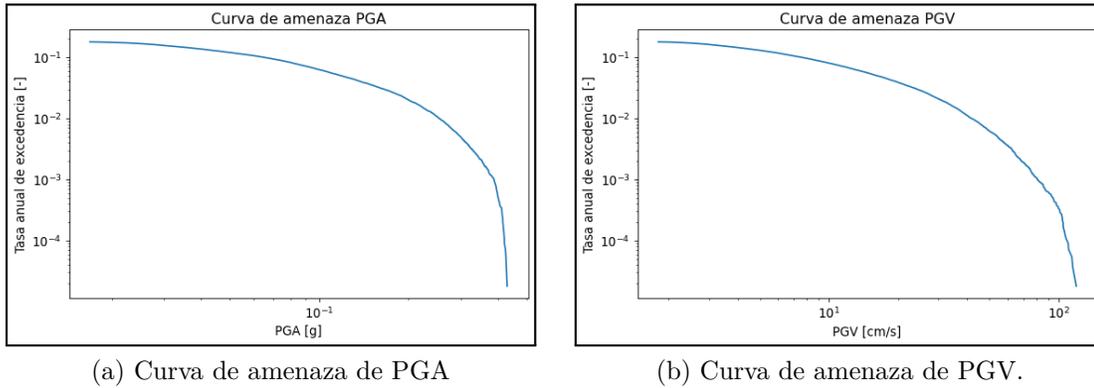


Figura 5.17: Curvas de amenaza obtenidas.

5.6. Curva de Vulnerabilidad

5.6.1. Tasa de Fallas en Tuberías

Para poder elaborar la curva de fragilidad en tuberías se decidió trabajar con la velocidad máxima del suelo (PGV) ocurrida durante un terremoto. El nivel de daño ocurrido en un sistema de agua potable se expresa en fallas ocurridas cada cierta distancia, la cual puede ser expresada en pies, metros, o la que se estime conveniente. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó como parámetro de daño la tasa de fallas ocurridas por kilómetro. Si bien en la literatura se presentan las ecuaciones 2.3 y 2.4 para poder calcular las tasas de falla en una red de agua después de un terremoto, estas no necesariamente son válidas para todas las zonas de estudio. Esto ocurre debido a dos factores, el primero es que los datos utilizados para el desarrollo de las relaciones de falla fueron recolectados durante la segunda mitad del siglo XX, por lo que las tecnologías desarrolladas durante esa época hacían necesario el uso de equipo humano para el levantamiento de datos, lo que genera un error aleatorio mucho mayor a la hora de la correcta identificación de las fallas. Además, la acción de respuesta frente a terremotos tampoco tenía el desarrollo actual, siendo ahora mucho más rápida que antes y provocando así que se puedan tener datos recolectados en un menor tiempo después de ocurrido el suceso. El segundo factor es que la mayoría de los eventos estudiados corresponden a terremotos de tipo corticales, o superficiales, los cuales tienen duración y magnitud menores a los experimentados comúnmente en Chile. Es por esto que se agregaron nuevos datos, y se seleccionaron datos específicos, para poder generar nuevas ecuaciones que puedan representar de una mejor manera los daños ocurridos en una red de agua potable en el país.

Los datos utilizados corresponden a las fallas que se pudieron recolectar en la ciudad de Concepción después de ocurrido el terremoto del año 2010. Estos datos fueron recolectados a partir de la tesis "Estudio de Interacción Suelo-Tubería en las Redes de Agua Potable y Aguas Servidas del Gran Concepción" (2011) de Andrés Guzmán de la Universidad de la Santísima Concepción. La distribución de estas fallas en la ciudad se pueden ver en la figura 5.18, donde se colocaron todos los registros de fallas que se obtuvieron durante ese año, lo que implica que no necesariamente todos estos fueron producidos por el terremoto. Los tipos

de falla pueden ser por fallas de válvulas, rotura de matrices, fallas en la interconexión de redes, roturas de grifo, roturas por terceros, entre otros. En la misma figura se coloca el tipo de material de la tubería que falla. Junto con los datos de las fallas, es necesario conocer la velocidad máxima del suelo a la que fue sometida la tubería. Para esto, se utiliza un mapa de intensidades desarrollado por la USGS y que se puede descargar de forma gratuita (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20100227063411530_30/shakemap/psa).

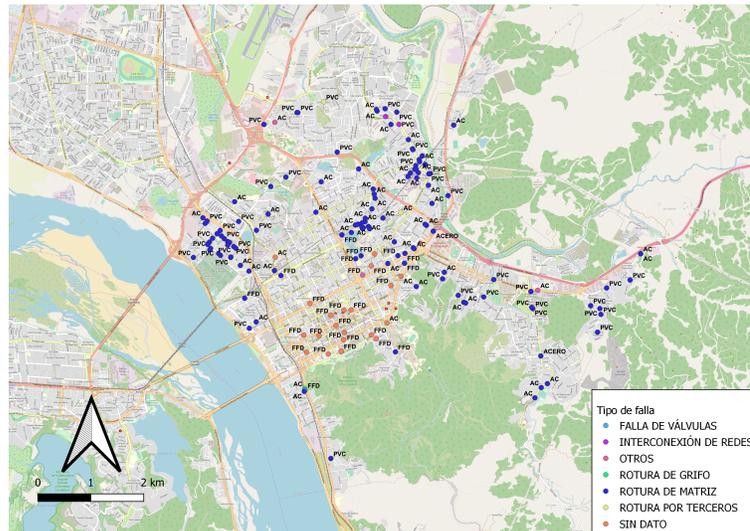


Figura 5.18: Fallas en la red de agua potable en Concepción. Guzmán (2011).

Una vez descargado el mapa de intensidades es posible utilizarlo con el programa QGIS, donde se trabaja sólo con las intensidades que afectan a la ciudad de Concepción, como se muestra en la figura 5.19.a. Una vez obtenidas las intensidades que afectan a la red se puede realizar una correlación entre las fallas y la velocidad máxima del suelo. En la figura 5.19.b se presentan las fallas ocurridas en la red distribuidas en las distintas intensidades de PGV. Para poder realizar el cálculo de fallas por kilómetro se debe calcular la longitud de la red en la zona de PGV a estudiar. Esto se puede lograr utilizando la herramienta de medición disponible en QGIS, donde se procede a medir la longitud total de tuberías que existen en cada segmento de PGV. En una primera instancia se utilizan todas las fallas para el análisis, obteniéndose los datos presentados en la tabla 5.9. Sin embargo, al hacer una revisión en detalle de los datos se pudo ver que existían inconsistencias en algunas fallas que se encuentran localizadas en los límites entre los segmentos de PGV. Estas zonas son las de PGV 40, 38, 36, 34, 32 y 26 [cm/s].

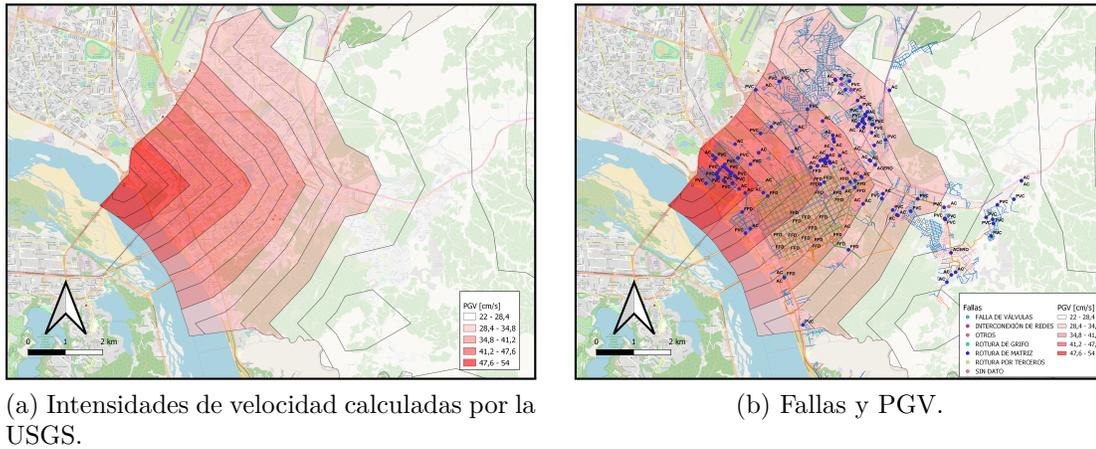


Figura 5.19: PGV en la ciudad de Concepción.

Tabla 5.9: Datos de fallas relacionadas al PGV.

PGV [cm/s]	Fallas	Longitud [km]	Fallas/km
52	1	3,75	0,27
50	10	9,12	1,10
48	18	23,23	0,78
46	6	22,86	0,26
44	4	32,89	0,12
42	2	38,44	0,05
40	18	48,09	0,37
38	22	59,65	0,37
36	23	80,12	0,29
34	10	74,19	0,13
32	29	73,16	0,40
30	6	55,92	0,11
28	6	37,72	0,16
26	13	50,38	0,26

En el segmento de PGV 40 [cm/s] se tienen dos fallas ubicadas en un mismo sitio. Al revisar el detalle de estos puntos se encontró una discrepancia entre las direcciones entregadas y las coordenadas colocadas. El problema se muestra en la figura C.1, donde se puede ver existen dos fallas colocadas en un mismo sitio. Al ver el detalle de estos datos en la figura C.1.b del anexo, donde se puede ver que la dirección "Bandera con Paicaví" no corresponde a la ubicación de la falla en el mapa. Es por esta razón que se asume que esa falla se encuentra en la esquina de Bandera con Paicaví, marcada con una estrella roja en la figura C.1.a. Por lo tanto, se debe sumar una falla al segmento de PGV 42, y restar esta misma en el segmento de PGV 40.

En el segmento de PGV 38 [cm/s] se tienen dos fallas que limitan con el segmento de 40 [cm/s], estas se pueden ver resaltadas en la figura C.2.a del anexo. Al revisar el detalle de ambas fallas, en la figura C.2.b del anexo, se puede ver que ambas poseen la misma dirección "Ainavillo/Pje los lirios", cuya ubicación en el mapa se encuentra en la zona de 40 [cm/s]. Ante esta problemática, se decide respetar la posición de la calle en el mapa, por lo que ambas fallas pasan a ser datos del segmento de PGV 40 [cm/s].

En el segmento de PGV 36 [cm/s] se tienen dos fallas colocadas en la misma coordenada, como se puede ver en la figura C.3.a del anexo. Al revisar el detalle de ambos datos en la figura C.3.b del anexo, se puede ver que ambas fallas poseen la misma dirección y fueron registradas en la misma fecha, sin embargo, una está mas detallada que la otra. Al ocurrir esta coincidencia, se prefiere asumir que se trata de una misma falla registrada en más de una ocasión, lo que se trataría de un error humano no evidenciado al momento de realizarse el registro. Esto provoca que se elimine una falla de los datos en el segmento de 36 [cm/s].

En los segmentos de 36 [cm/s] y 34 [cm/s] se tienen dos fallas que son provocadas por terceros. Al tratarse de fallas que no fueron provocadas por el terremoto del año 2010, se eliminan estos datos del registro de fallas para el cálculo de la tasa de fallas final. Por lo tanto, se quita una falla en el segmento de 36 [cm/s] y otra falla en el segmento de 34 [cm/s].

En el segmento de PGV 32 [cm/s] se tienen dos fallas en el mismo sitio, como se muestra en la figura C.4.a del anexo. Al revisar el detalle de ambos, presentados en la figura C.4.b del anexo, se puede ver que ambas fallas poseen la misma dirección y coordenadas, diferenciándose solamente en la hora de registro en la que fueron tomadas. Es por esto que se asume que se trata de una misma falla, la que fue registrada dos veces. Por lo tanto, se elimina una falla del segmento de 32 [cm/s]. Junto con esto, en el mismo segmento existe una falla que fue causada por terceros, por lo que también se elimina del segmento.

En el segmento de PGV 26 [cm/s] existen dos casos de fallas repetidas, las cuales se muestran en las figuras C.5 y C.6 del anexo. En ambos casos, según lo visto en los detalles de las figuras C.5.b y C.6.b, se repiten las direcciones y coordenadas de la falla, por lo que se asume que se anotó la misma falla en más de una ocasión en el sistema. Es por esto que se decide eliminar, en cada caso, una de las fallas. Por lo tanto, en el segmento de 26 [cm/s] se deben eliminar dos fallas en total.

Habiendo modificado estos datos en el registro de fallas según el segmento de velocidad correspondiente, es que se obtienen los datos presentados en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Tasa de fallas en Concepción para el año 2010.

PGV [cm/s]	Fallas	Longitud [km]	Fallas/km
52	1	3,75	0,27
50	10	9,12	1,10
48	18	23,23	0,78
46	6	22,86	0,26
44	4	32,89	0,12
42	3	38,44	0,08
40	19	48,09	0,40
38	20	59,65	0,34
36	21	80,12	0,26
34	9	74,19	0,12
32	27	73,16	0,37
30	6	55,92	0,11
28	6	37,72	0,16
26	11	50,38	0,22

Al graficar los datos de la tabla 5.10, y realizando una regresión lineal y potencial, se obtienen los gráficos presentados en las figuras 5.20.a y 5.20.b, respectivamente. Las ecuaciones resultantes de estas regresiones son:

$$RR = 0,0087 \cdot PGV \quad (5.8)$$

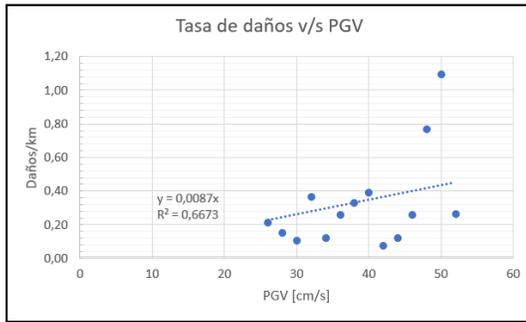
$$RR = 0,0014 \cdot PGV^{1,4165} \quad (5.9)$$

El factor R^2 de estas regresiones fueron de 0,6673 para el caso lineal y de 0,2678 para el caso potencial. Debido a que el valor de R^2 es mayor en el caso lineal, se seguirá trabajando con este tipo de análisis.

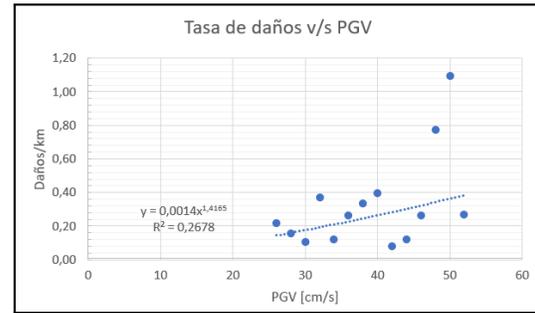
Con el fin de realizar un mejor trabajo estadístico es que los datos se agrupan en rangos de velocidades y se construye el histograma presentado en la figura 5.21.a, donde fue posible realizar una nueva regresión lineal utilizando las marcas de clase de cada rango de PGV como se muestra en la figura 5.21.b. A partir de este análisis la nueva ecuación que representa la tasa de fallas por kilómetro en la red de Concepción es:

$$RR = 0,0071 \cdot PGV \quad (5.10)$$

En este caso el valor de R^2 es de 0,792, lográndose el mejor ajuste de los datos.

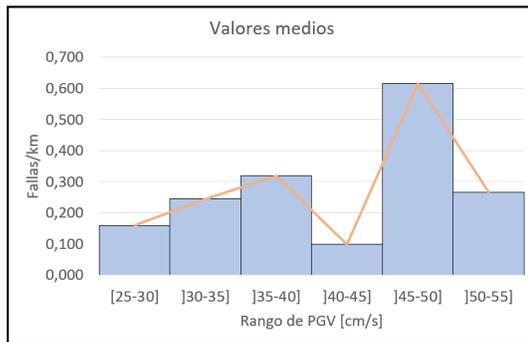


(a) Regresión lineal.

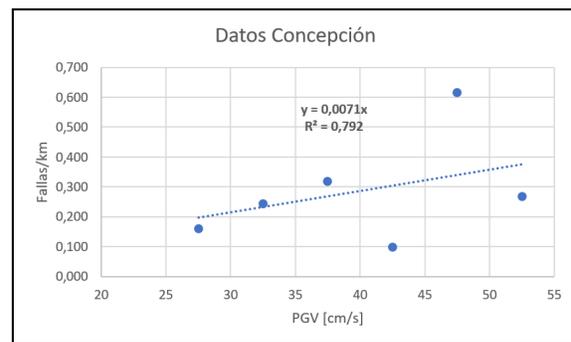


(b) Regresión potencial.

Figura 5.20: Tasa de daño en función del PGV para Concepción.



(a) Histograma de velocidades.



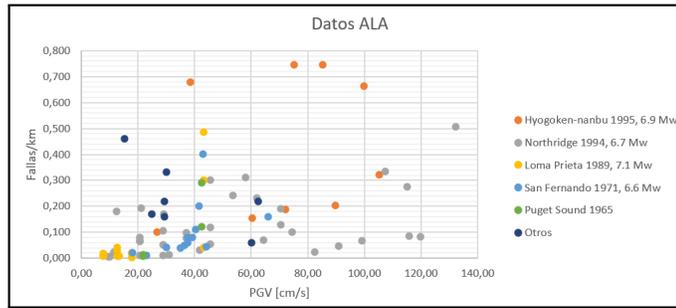
(b) Regresión de datos de Concepción.

Figura 5.21: Tasa de daño en función del PGV para Concepción.

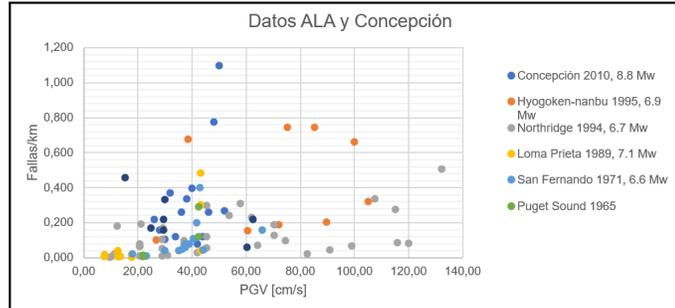
Una vez obtenida la relación de vulnerabilidad con los datos de Concepción, se trabaja con la información utilizada por ALA para la construcción de sus curvas de vulnerabilidad. Esta información corresponde a la información recolectada en distintos terremotos ocurridos a nivel mundial. Estos eventos se dividen, principalmente, en cinco ciudades: Hyogoken-nanbu (1995, Japón), Northridge (1994, USA), Loma Prieta (1989, USA), San Fernando (1971, USA) y Puget Sound (1965, USA). La información recolectada acerca de la relación entre la tasa de daño por kilómetro y el PGV de estos terremotos, incluyendo además los datos de Concepción, se muestra en la figura 5.22. Para tener un mejor análisis de estos datos es que se agrupará la información en 4 categorías:

1. American Lifelines Alliance (ALA).
2. ALA y Concepción.
3. Japón y Concepción.
4. Concepción.

Se decide separar la información en estos cuatro casos de estudio porque son los que podrían representar de mejor manera los eventos sísmicos del país. El detalle de las tasas de falla de cada zona se muestran en las tablas C.3 a C.8 del anexo.



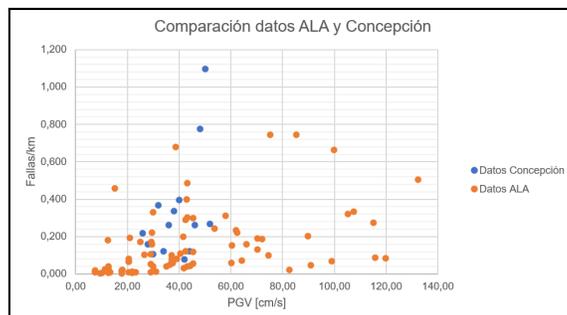
(a) Datos utilizados por ALA



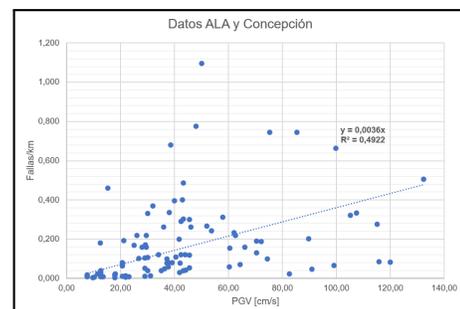
(b) Datos de ALA y Concepción.

Figura 5.22: Datos utilizados para el análisis.

En la figura 5.23.a se pueden ver los datos de las tasas de falla de Concepción y de la American Lifelines Alliance (ALA) por separado. Para los datos de Concepción, y como fue mencionado anteriormente, se obtiene un valor para la pendiente de 0,0071 con un $R^2=0,792$. En el caso de los datos de ALA, se debieron convertir las unidades originales por las utilizadas en el sistema internacional. Esto quiere decir que los valores de velocidad, medidos en [pulgadas/s], se multiplicaron por un factor de 2,54 y los valores de las tasas de falla, medidos en [fallas/1000pies], por un factor de 0,3048. Con estos datos con las unidades de medida corregidas se obtiene como pendiente un valor de 0,0031 con un $R^2=0,5357$. En la figura 5.24 se graficaron los datos de Japón y Concepción solamente. Al realizar la regresión lineal se obtiene una pendiente de 0,0057 y un $R^2=0,7204$.

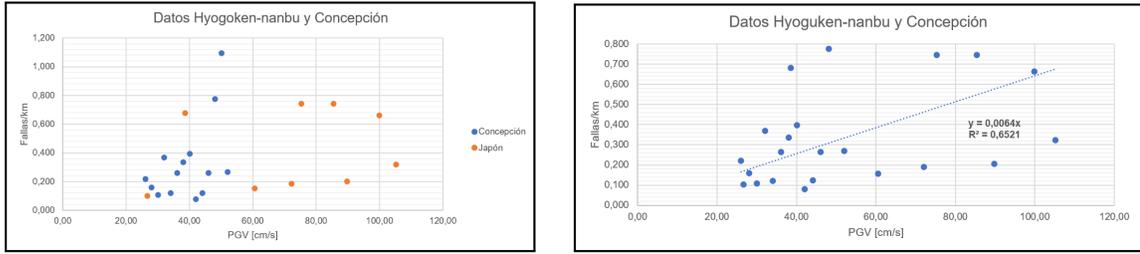


(a) Datos de Concepción y ALA.



(b) Regresión lineal de los datos de Concepción y ALA.

Figura 5.23: Datos de Concepción y ALA.



(a) Datos de Concepción y Japón.

(b) Regresión lineal de los datos de Concepción y Japón.

Figura 5.24: Datos de Concepción y Japón.

En resumen, se pudieron obtener distintos valores de "a" para cada conjunto de datos estudiados. Estos conjuntos fueron construidos pensando en la pertinencia de su implementación en el ámbito nacional. Los valores obtenidos para cada conjunto y su coeficiente R^2 se muestran en la tabla 5.11 y en las ecuaciones 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14. Además, los gráficos de estas cuatro ecuaciones se muestran en la figura 5.25. Se puede ver que el valor de la pendiente va aumentando a medida que se utilizan datos más adecuados pensando en el ámbito nacional. Asimismo, se puede ver que la regresión realizada por ALA es la que cuenta con el menor valor de R^2 , y los datos de Concepción el mayor.

Tabla 5.11: Resumen de parámetros obtenidos.

Datos	a	R^2
ALA	0,0031	0,5357
ALA + Concepción	0,0036	0,4922
Japón + Concepción	0,0064	0,6521
Concepción	0,0071	0,7920

$$RR = 0.0031 \cdot PGV \quad (5.11)$$

$$RR = 0.0036 \cdot PGV \quad (5.12)$$

$$RR = 0.0064 \cdot PGV \quad (5.13)$$

$$RR = 0.0071 \cdot PGV \quad (5.14)$$

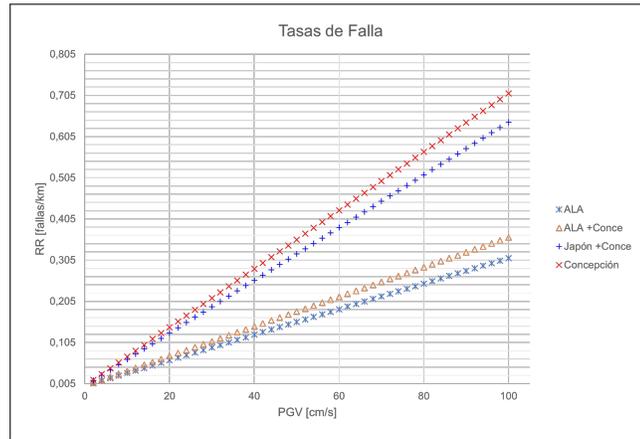


Figura 5.25: Funciones de vulnerabilidad de cada caso estudiado.

Ahora, para escoger qué ecuación de vulnerabilidad utilizar, se deben comparar los resultados de la implementación de cada ecuación para el evento sísmico del terremoto del año 2010 en la zona de estudio, con la información recopilada en terreno acerca de las fallas ocurridas para aquel mismo terremoto.

La información que se presenta en la figura 5.19.b y en la tabla 5.10, es utilizada para determinar la tasa de fallas empírica para la ciudad y la distribución de estas tasas de falla se presenta en la figura 5.26. A continuación, utilizando el GMPE de Montalva (2018) para obtener los valores de PGV en la zona, se calcula la tasa de fallas utilizando las cuatro ecuaciones de vulnerabilidad desarrolladas anteriormente.

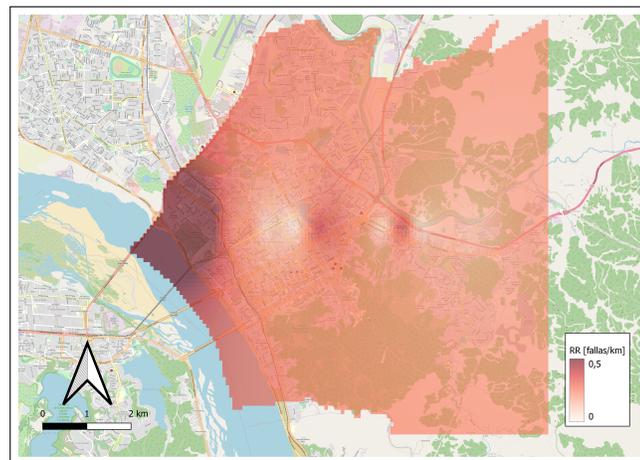
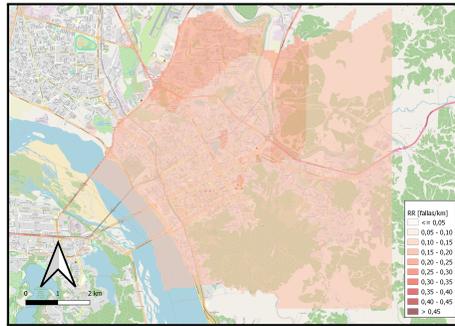


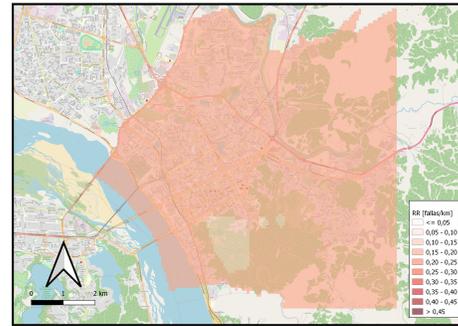
Figura 5.26: Tasa de fallas en Concepción en el año 2010.

Para realizar la modelación del sismo del año 2010 utilizando la ecuación de atenuación de Montalva (2018), es necesario utilizar la información de los valores de velocidad de onda de corte en la zona y de los períodos predominantes según el tipo de suelo, los cuales se presentan en las figuras 5.13 y 5.9, respectivamente. Los resultados de la implementación de cada ecuación de vulnerabilidad se muestran en la figura 5.27. Una vez obtenidos estos

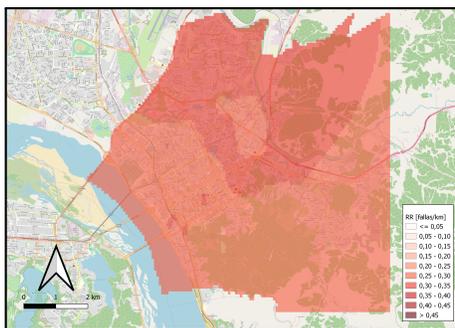
resultados, es necesario determinar cuál de estos se acerca más al caso empírico. Mediante una evaluación visual se puede ver que los resultados que más se asemejan a los datos reales son las ecuaciones de vulnerabilidad 5.13 y 5.14, representadas en las imágenes 5.27.c y 5.27.d, respectivamente. Ahora, para determinar de forma precisa cuál es la ecuación a utilizar, se dividen los valores de tasa de fallas obtenidos por ambas ecuaciones entre los valores empíricos.



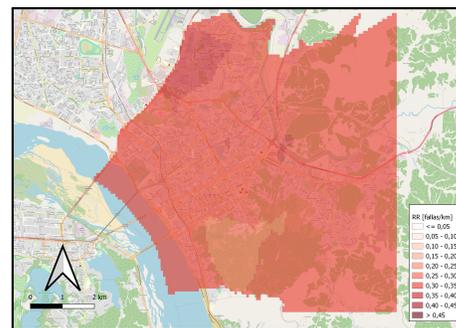
(a) Ecuación de vulnerabilidad de ALA.



(b) Ecuación de vulnerabilidad de ALA y Concepción.



(c) Ecuación de vulnerabilidad de Japón y Concepción.



(d) Ecuación de vulnerabilidad de Concepción.

Figura 5.27: Tasas de falla.

Al realizar esta comparación con ambas ecuaciones, se obtienen los resultados presentados en las figura 5.28. A partir de aquí, se puede ver que en el caso de la ecuación de Concepción, los valores de tasa de fallas son más del doble que en el caso empírico. Para el caso de la ecuación de Japón y Concepción, los valores más altos rondan valores entre 1,5 a 2,0, siendo mayores que el caso empírico, pero obteniéndose resultados más cercanos en comparación con la otra ecuación de vulnerabilidad. Es por esto que, finalmente, se decide utilizar la ecuación de vulnerabilidad 5.13 para implementarla en el análisis.

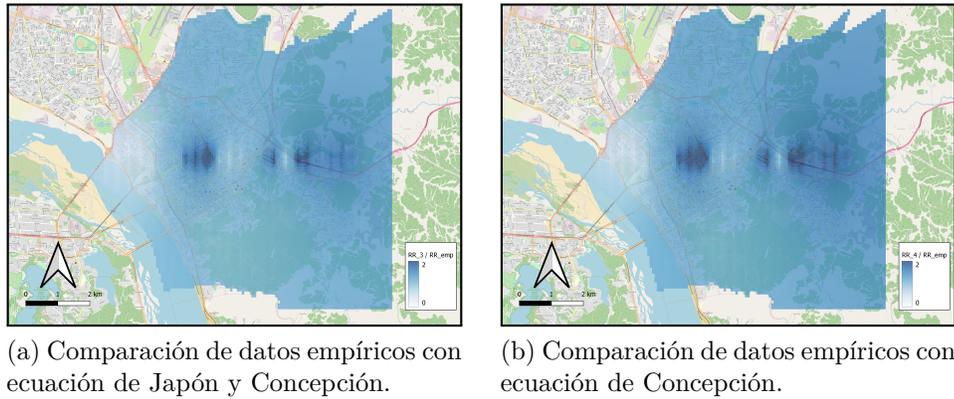


Figura 5.28: Comparación de datos.

5.6.1.1. Validación de Ecuación Obtenida

Con el fin de validar la ecuación de vulnerabilidad escogida es que se evaluará esta ecuación utilizando los datos de las fallas en la red de Concepción, y se comparará con la tasa de fallas empíricas, donde se verá la variación de los resultados entre ambas. Al utilizar la ecuación 5.13 con los valores de velocidad máxima del suelo mostrados en la figura 5.19 se pudo obtener la tasa de fallas que se muestra en la figura 5.29.a. Al superponer las fallas ocurridas en el año 2010 se puede ver las zonas de mayor tasa de fallas tienen una coincidencia con las de mayor concentración de tuberías dañadas en la red. Con el fin de determinar cuan acertado o alejado están los resultados es que se comparará la tasa de fallas empírica con la resultante al utilizar la ecuación escogida.

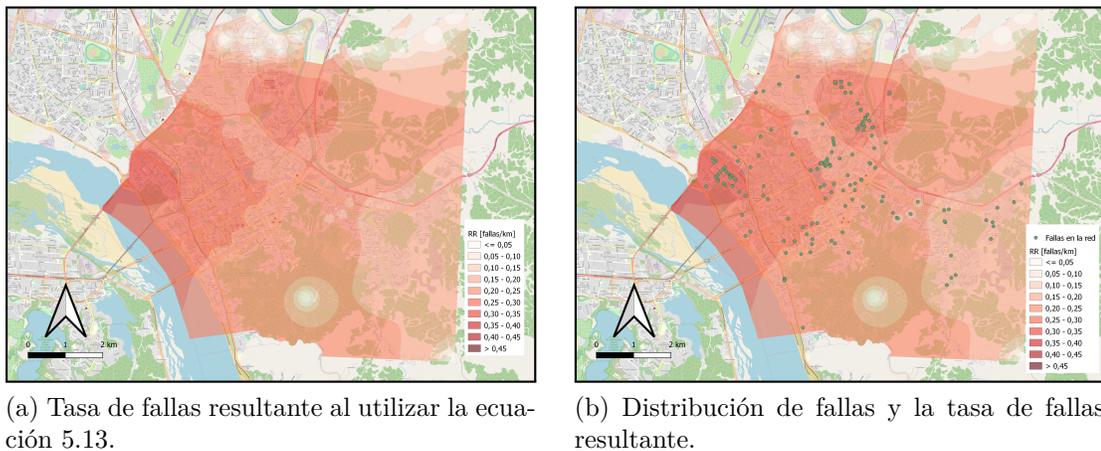


Figura 5.29: Tasa de fallas en Concepción con los datos de fallas utilizados.

Para que los datos sean más realistas, se asignarán valores de tasa de fallas cero en las zonas donde no existan tuberías dañadas y se encuentren alejadas del centro de la ciudad, ya que, en caso de no realizarlo, los datos pierden coherencia entre ellos. A continuación se dividen los datos entre ambos casos con el fin de saber la proporción de diferencias existentes.

En la figura 5.30 se muestran los resultados obtenidos. Las zonas de color blanco muestran una gran diferencia entre los datos y las zonas de color azul una mayor semejanza entre estos. Se puede ver que en las zonas más alejadas de la ciudad se tiene una mayor diferencia entre estos datos, en cambio, en las zonas más pobladas ambos casos son bastante similares, logrando valores cercanos a 1. Por lo tanto, es posible concluir que se valida el uso de la ecuación 5.13 para su uso en este estudio.

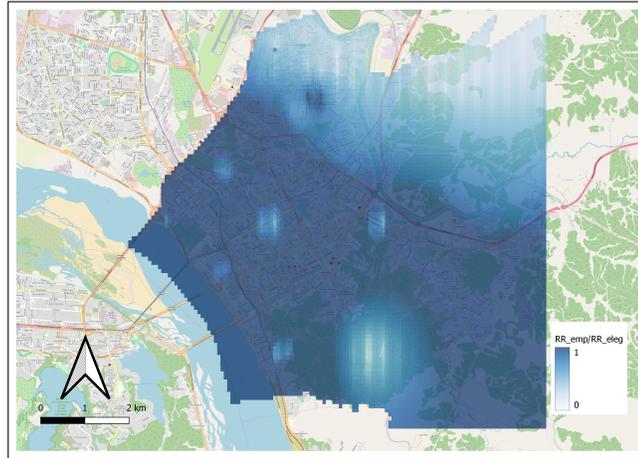


Figura 5.30: Resultado de comparación entre ambos casos.

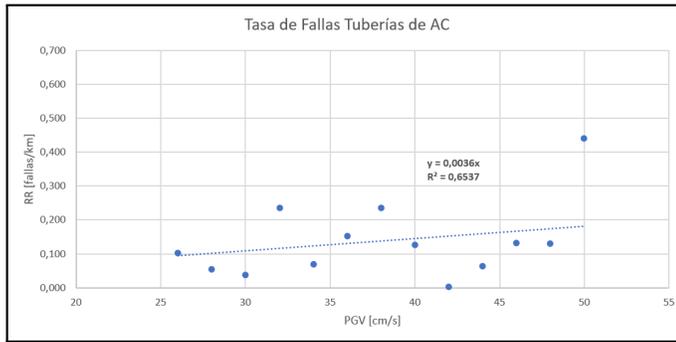
5.7. Tasa de Fallas para Tuberías Según Material

Con el fin de un análisis más detallado es que se estudian las fallas ocurridas en la red de agua potable según el tipo de material. Se consideran solamente las tuberías de asbesto cemento y de PVC, ya que son las de mayor extensión y las más comunes dentro de la red. El detalle de las fallas según material ocurridas en la red según el valor de PGV se muestra en la tabla C.9 del anexo. Al graficar ambos resultados y realizar una regresión lineal de los datos se obtienen los gráficos de la figura 5.31. A partir de estos resultados se obtienen dos nuevas ecuaciones de vulnerabilidad:

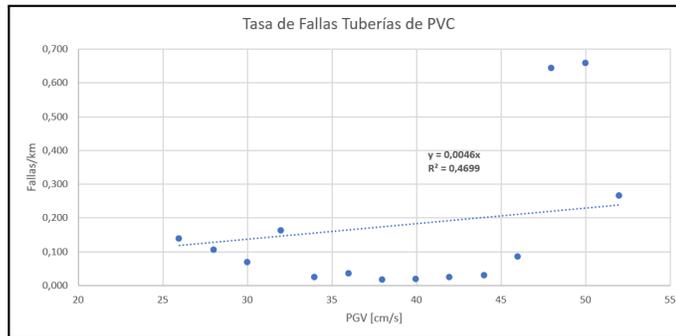
$$RR = 0,0036 \cdot PGV \quad (5.15)$$

$$RR = 0,0046 \cdot PGV \quad (5.16)$$

donde la ecuación 5.15 corresponde a las tuberías de asbesto cemento y la ecuación 5.16 a las de PVC.



(a) Curva de vulnerabilidad para tuberías de AC.



(b) Curva de vulnerabilidad para tuberías de PVC.

Figura 5.31: Curvas de vulnerabilidad para tuberías de asbesto cemento y PVC.

La modelación de las tasas de falla utilizando estas ecuaciones se muestra en la figura 5.32. Aquí se puede ver que en el caso de las tuberías de PVC se espera una mayor tasa de fallas en la zona. Haciendo una comparación con el caso empírico se puede ver que ambos resultados se alejan de los datos obtenidos en terreno para el terremoto del año 2010.

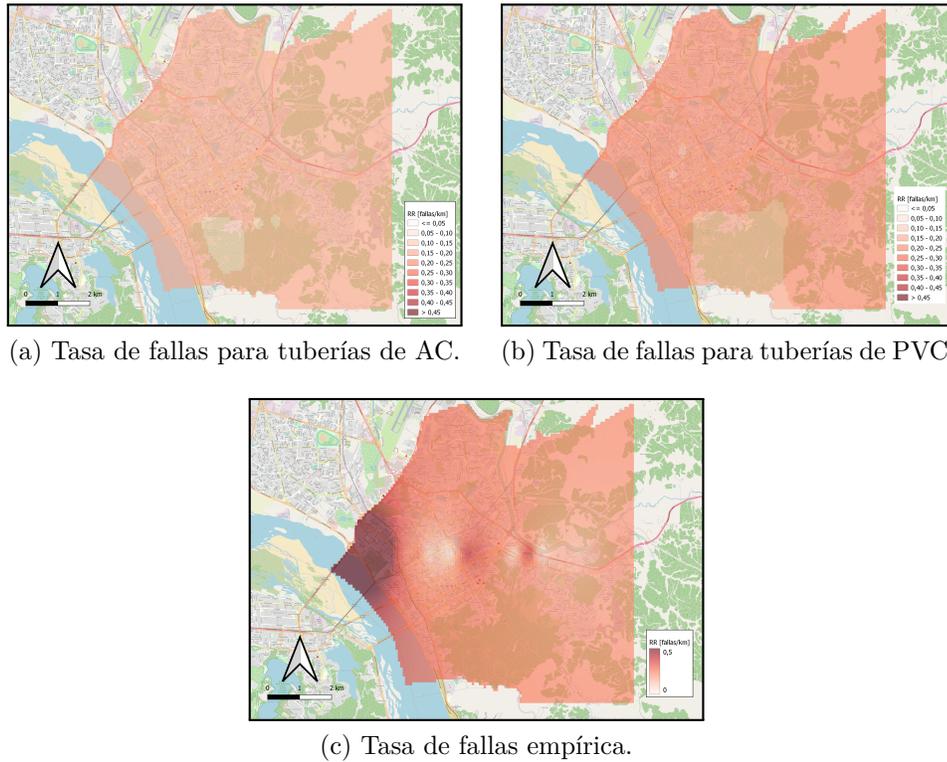


Figura 5.32: Modelación de ecuaciones para tuberías de asbesto cemento y PVC.

5.8. Curva de Fragilidad de Estanques

Para el caso de los estanques de agua se utiliza una curva representativa presentada por ALA para estanques de hormigón armado anclados al suelo. Se decide usar este tipo de estanques porque, según la información recogida mediante la superintendencia de servicios sanitarios (SISS) en su portal de transparencia, Essbio cuenta, en su gran mayoría (96 %), con estanques de este material en Concepción. Los estados de daño y los parámetros a utilizar para la construcción de la curva de fragilidad se presentan en la tabla 5.12.

Tabla 5.12: Curva de fragilidad para estanques de hormigón.

Hazard	Damage State	Damage Factor	Median A (g)	Beta	Freq. (Hz)
Ground Shaking	Uplift - Crush Concrete	0,1	1,3	0,5	9
Ground Shaking	Sliding	0,03	1,1	0,5	9
Ground Shaking	Shearing of Tank Wall	0,03	1,6	0,5	9
Ground Shaking	Hoop Overstress	0,03	4,1	0,5	9

En la figura 5.33 se puede ver la curva de fragilidad obtenida utilizando los parámetros establecidos anteriormente. Si bien se utilizan tres estados de daño, en un caso real ocurre

que, cuando un estanque cuenta con daños medios o mayores, su funcionalidad es nula, ya que para su reparación se necesita cortar el suministro desde el estanque dañado. Cabe destacar que, en el año 2010, en Concepción los estanques no sufrieron daños en su estructura.

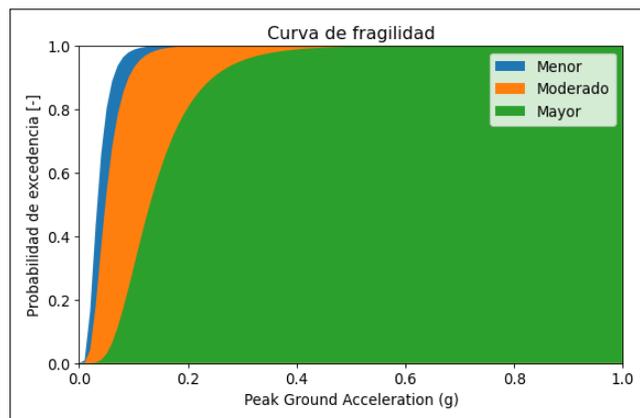


Figura 5.33: Curva de fragilidad para estanques de hormigón.

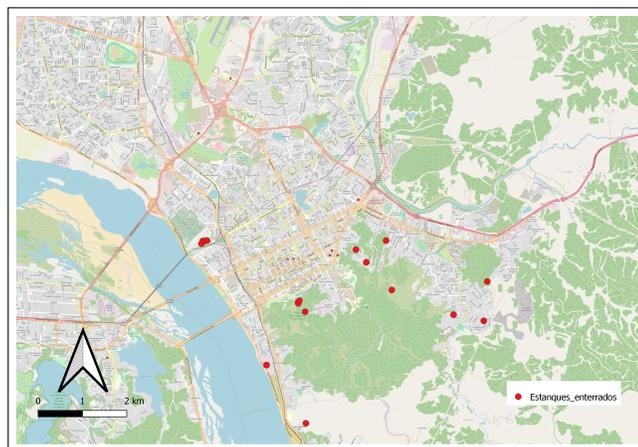


Figura 5.34: Estanques enterrados en Concepción.

5.9. Modelo de la Red en Epanet

Para comenzar a modelar la red de agua potable de Concepción se debió trabajar con el plano del modelo en AutoCad. Este plano fue facilitado por la empresa Essbio y corresponde a la red existente en la ciudad para el año 2010.

Para trabajar con el plano en EPANET se utilizó el programa EpaCAD, el cual es capaz de convertir ficheros de AutoCad en un documento EPANET. Este programa fue desarrollado por la Universitat Politècnica de Valencia y está disponible de forma gratuita para todos

quienes deseen utilizarlo (<https://www.epacad.com/epacad-es.php>). El programa es capaz de reconocer de forma automática algunas propiedades de la red como por ejemplo la longitud de sus elementos, la ubicación de los nodos, sus coordenadas, entre otras. Con este programa se pudo desarrollar la forma de la red con las coordenadas de los nodos y con los largos de las tuberías. Para esto, se debieron seleccionar las capas del documento CAD que correspondieran a la red en sí misma, dejando fuera los nombres, señaléticas, o especificaciones que hubiesen agregadas en el plano. Una vez seleccionadas estas capas del documento CAD, EpaCAD las convierte en un sólo plano compatible con EPANET. Un defecto del programa que no se pudo solucionar de forma inmediata, fue la asignación de las cotas de elevación de los nodos y de los diámetros de las tuberías. La red obtenida se muestra en la figura 5.35.



Figura 5.35: Red de distribución de agua potable en EPANET.

Para la asignación de elevaciones en los nodos se utilizó, de forma complementaria, el programa QGIS, en conjunto con un plano CAD de elevaciones del terreno de Concepción facilitado por la empresa Essbio. Primero, los datos del plano de elevaciones se extrajeron a un archivo de texto utilizando la aplicación "DXF to XYZ". Luego, este archivo de texto fue importado a QGIS, donde cada línea de cota se representó mediante puntos en el plano. Con estos puntos fue posible realizar una interpolación para estimar las elevaciones en toda la ciudad de Concepción, creando así un ráster de elevaciones. Una vez obtenidas estas elevaciones se deben importar las coordenadas de los nodos de la red de agua potable. Con estas coordenadas, y utilizando el ráster de elevaciones creado, se puede elaborar un nuevo archivo de texto donde se extrae el valor de la elevación correspondiente a cada nodo. Finalmente, este archivo de texto se utiliza para asignar las coordenadas de cada nodo en el archivo de EPANET de la red.

Con respecto a los diámetros, estos no se pudieron asignar de forma automática con el programa EpaCAD, por lo que se prosiguió con lo siguiente. Cada capa del plano CAD, las cuales están separadas por diámetros, se convirtió en un archivo EPANET. Con esto se consiguen una serie de archivos con los diámetros de las tuberías asignados de forma correcta. Estos archivos se pueden trabajar en Excel, de tal manera de obtener un sólo plano. Al tener este nuevo plano con los diámetros surge un nuevo problema, el cual consiste en que los nodos de la tubería se encuentran desacoplados. Para resolver este problema se procede a asignar los diámetros en el primer plano de EPANET creado. Esto se realiza creando un pequeño código en python, y utilizando también el archivo original de la red sin los diámetros, donde es posible asignar el valor de los diámetros según la ubicación de los nodos inicial y final de cada tubería. Con esto se tiene un nuevo archivo EPANET con las coordenadas y las elevaciones de los nodos, y con los diámetros de cada tubería. No obstante, debido a problemas propios del plano original utilizado, existen nodos que no están conectados a la red principal, por lo que se hace necesario hacer esta corrección.

El problema de los nodos no conectados se descubrió una vez que se quiso comprobar si el modelo funcionaba correctamente. Esta función es parte del programa EPANET e indica los problemas existentes en el modelo. Para resolver el problema de los nodos no conectados se procedió a conectar los nodos de forma manual. Para esto existen dos casos: nodos que se conectan en una tubería continua, y nodos que se conectan a otro nodos. Para el primer caso, se crean dos nuevas tuberías que se conecten a este nodo que intersecta a la tubería, y se elimina la tubería original. Se debe tener en cuenta de asignar el diámetro y la longitud adecuada a estos nuevos segmentos de tubería. En el segundo caso se debe cambiar el nodo final, o inicial, según corresponda, para que el sector desconectado se pueda incluir en la red principal. Una vez conectado existe un nodo sin tuberías conectadas a él, por lo que se elimina. Este procedimiento se realiza con todos los nodos que indique el programa y se vuelve a comprobar si el modelo cuenta o no con problemas. Una vez analizado el modelo, existe un nuevo error a manejar. Este error es el de las presiones negativas en el sistema y se puede ver representado en la figura 5.36.

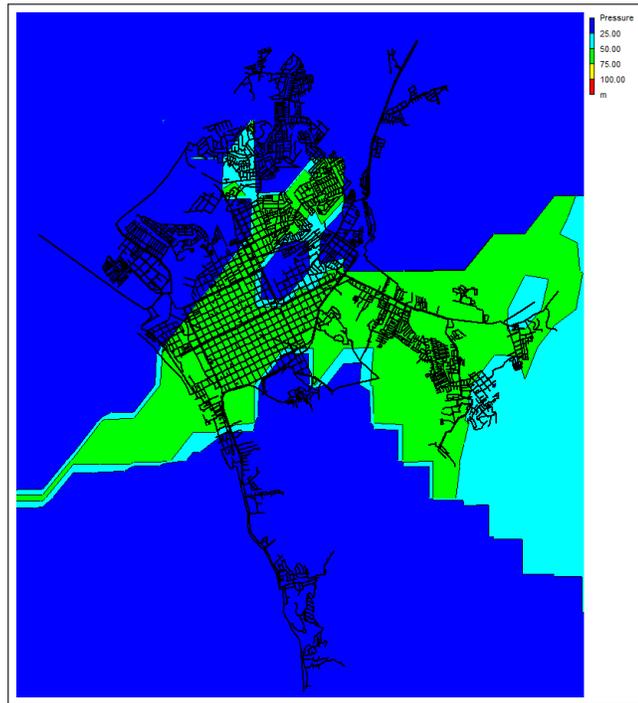


Figura 5.36: Caso de presiones bajas.

El tema de las presiones negativas surge debido a que aún no se han colocado los estanques y reservorios estipulados en el plano, ya que el programa EpaCAD no distingue estos elementos para convertirlos al plano final. Es por esto que se deben agregar de forma manual utilizando EPANET. En este caso en el plano se especifican estanques y plantas de elevación de agua potable (PEAP). Los estanques cuentan con la información de la cota de radier y su volumen. Las PEAP tienen especificado su caudal y la altura de agua elevada. Con estos datos se agregan estos elementos en el modelo, sin embargo, al comprobar el correcto funcionamiento de este, el programa sigue señalando la existencia de presiones negativas. Al comenzar a analizar estas presiones negativas se pudo ver que estas ocurrían en sectores donde existían tuberías con diámetros muy pequeños de 12 [mm]. Este diámetro es colocado por defecto por el programa a la hora de agregar una tubería. Estos errores ocurrieron al utilizar el programa de python para eliminar los nodos repetidos en la red. Para solucionarlo se identifican las tuberías con este problema, se verifica que diámetro debería tener según el plano original y se modifica en EPANET. Al resolver esto el programa indica que no existen problemas, sin embargo, al revisar las presiones en la red se distingue que estas poseen valores muy altos. Para intentar solucionar esta última problemática se colocaron válvulas reductoras de presión según lo establecido por los planos entregados por la SISS. Sin embargo, al colocar las válvulas y tratar de utilizar el archivo en el programa para poder realizar el análisis, existieron problemas de convergencia, por lo que fue imposible utilizar estas válvulas para poder mejorar las presiones de la red. Esto produce que las presiones utilizadas en el estudio no sean las reales, por lo que estas se deberán considerar de forma referencial para estudiar la variación que se tenga cuando se la red se vea afectada por un sismo.

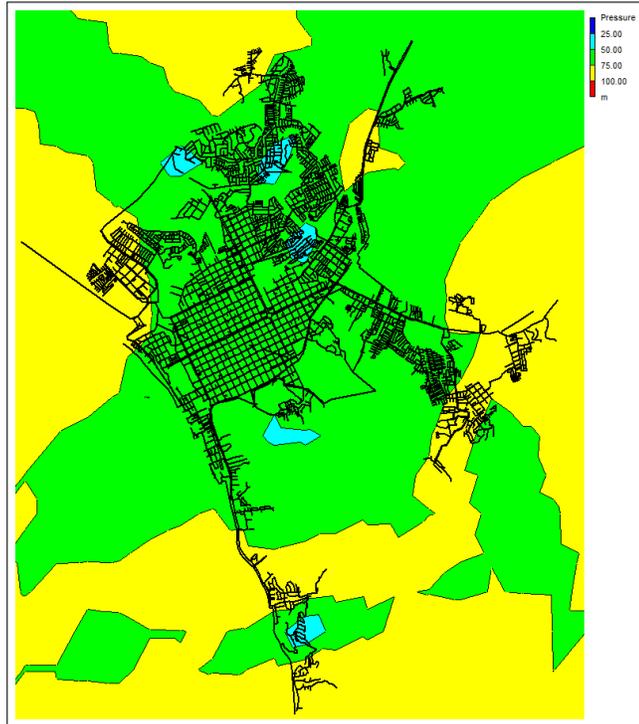


Figura 5.37: Caso de presiones altas.

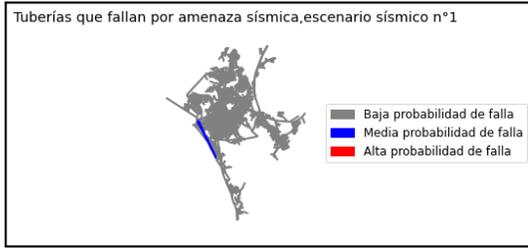
Capítulo 6

Análisis de Riesgo

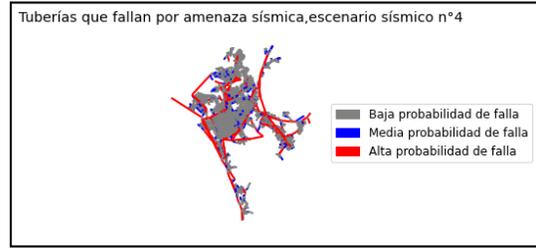
6.1. Resultados de la Modelación Hidráulica de la Red

Una vez realizado el estudio de amenaza sísmica de Concepción, y habiendo definido y validado la ecuación de vulnerabilidad a utilizar, se procede a comenzar con la modelación hidráulica de la red utilizando el plano creado en Epanet, explicado en la sección 5.7 del presente informe. Cada tubería cuenta con su largo y diámetro indicados por el detalle del plano de la red utilizado para su construcción. El estudio hidráulico se enfocará en la probabilidad de falla de las tuberías, y en cómo varía la presión en el sistema.

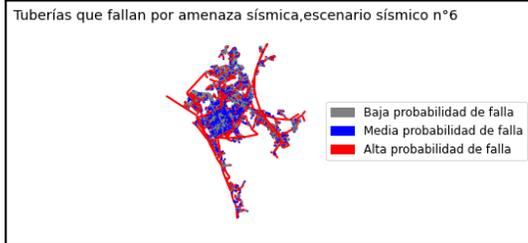
La probabilidad de fallas en las tuberías se calcula utilizando la ecuación 2.7, donde la tasa de fallas (RR) se calcula con los parámetros escogidos en la sección 5.6 del presente informe. Los resultados de la modelación en relación a las fallas se presentan en la figura 6.1, donde se muestran los escenarios sísmicos 1, 4, 6, 9 y 10, los cuales corresponde a sismos de magnitudes 6.5, 7.6, 8.8, 9.8 y 11.7 Mw, respectivamente. A partir de estos resultados se puede ver que a medida que aumenta la magnitud lo hace también la probabilidad de falla de las tuberías. Además, las tuberías que más se ven afectadas por el sismo son las de mayor longitud. Esto se puede explicar observando la ecuación 2.7, donde se puede ver que la probabilidad de falla depende directamente de la longitud de la tubería. Siguiendo esta misma lógica, es posible ver por qué ante un terremoto de gran magnitud, como lo es el del escenario sísmico 10, las tuberías de muy poca longitud cuentan con una probabilidad de falla baja, a pesar de la gran magnitud del sismo.



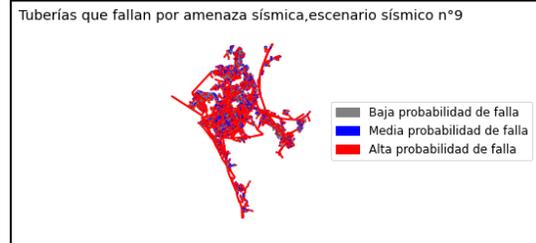
(a) Mapa de probabilidad de fallas para escenario sísmico 1.



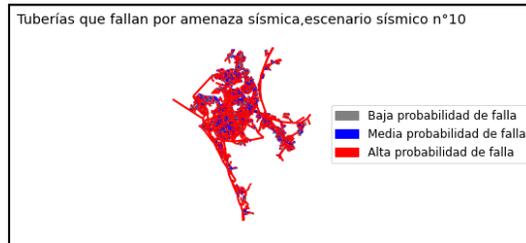
(b) Mapa de fallas para el escenario sísmico 4.



(c) Mapa de fallas para el escenario sísmico 6.



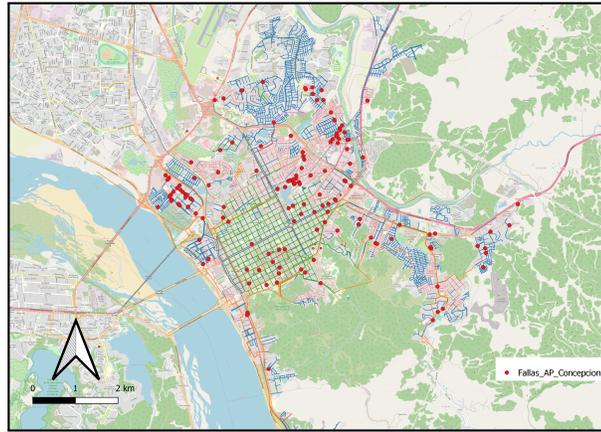
(d) Mapa de fallas para el escenario sísmico 9.



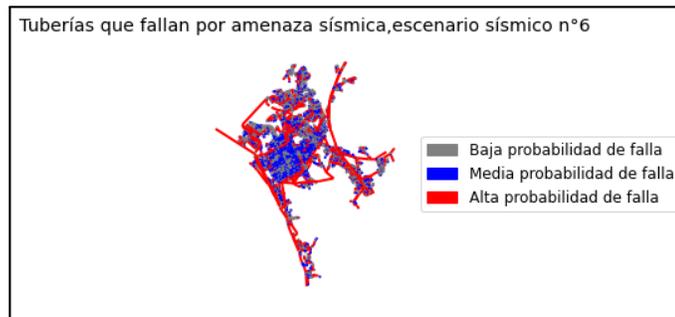
(e) Mapa de fallas para el escenario sísmico 10.

Figura 6.1: Mapa de probabilidad de fallas en la red.

En la figura 6.2 se compara el escenario sísmico 6, el cual corresponde al caso del terremoto 8.8 Mw del año 2010, con las fallas ocurridas durante el sismo en aquel mismo año y que fueron utilizadas para desarrollar la ecuación de vulnerabilidad. Al ver la imagen se puede ver que la concentración de fallas en la zona noroeste coinciden con la alta probabilidad de falla estimada por la modelación. En la zona este de la red también se tiene coincidencia entre las fallas y la alta probabilidad obtenida por el modelo. Sin embargo, en la zona noreste y central de la red no se predicen de forma correcta la concentración de fallas. Una última observación que se puede realizar es que las tuberías de conducción, las cuales cuentan con una alta probabilidad de falla, no contienen la gran cantidad de daño esperado.



(a) Fallas en la red en el año 2010.

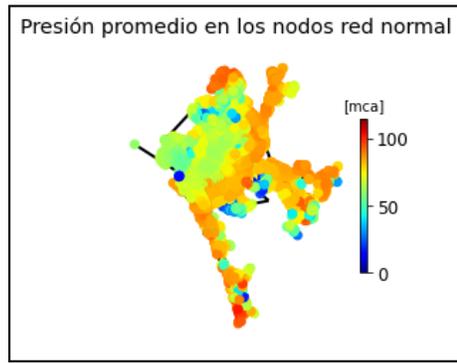


(b) Mapa de fallas para el escenario sísmico 6.

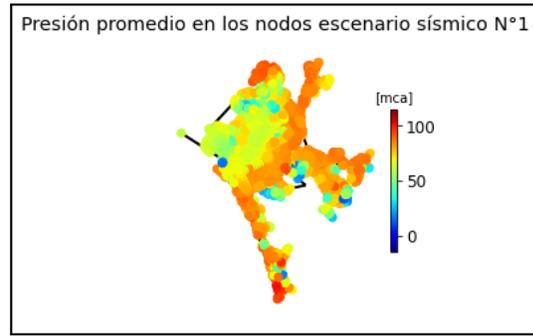
Figura 6.2: Fallas documentadas y modelación de la red afectada al sismo.

Con respecto a las presiones, estas en su estado normal de funcionamiento cuentan con valores muy altos para una red de agua potable promedio en el país, las cuales, por lo general, operan entre 14 a 30 [mca]. Esta situación se genera debido a que la red se construyó con información poco precisa en lo que respecta a la conexión entre las tuberías, sus diámetros y la elevación del terreno. Otro factor que explicaría las altas presiones fue la imposibilidad de modelar de forma correcta los estanques y las plantas de elevación de agua potable en el programa Epanet. Por esta razón es que los resultados encontrados son útiles para saber cómo varían las presiones en la red en los distintos escenarios sísmicos, sin embargo, no representan el funcionamiento real de esta ante un terremoto, ni si las presiones finales cumplen o no con la presión mínima requerida.

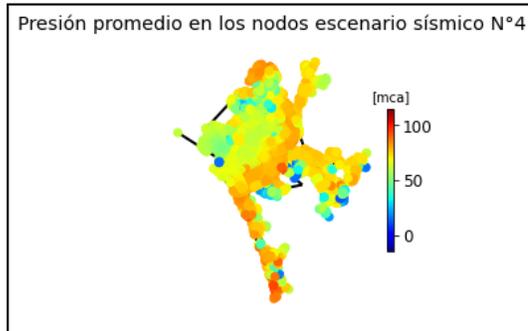
En la figura 6.3 se presenta la red en 6 estados de presiones distintos: su estado normal y en los escenarios sísmicos 1, 4, 6, 9 y 10. A partir de estos casos se puede ver que la red en el escenario sísmico 1 no se ve afectada por el sismo, mientras que en los escenarios sísmicos 6, 9 y 10 se ve una disminución de la presión en toda la red. Esta disminución es de casi el 50% y se aprecia más notoriamente en los nodos que se encuentran ubicados en las zonas donde se encuentran las tuberías de mayor longitud, las cuales corresponden a tuberías de conducción. En el caso de los escenarios sísmicos 1 y 4, debido a la baja magnitud de los eventos, no se distingue claramente una disminución en las presiones de la red.



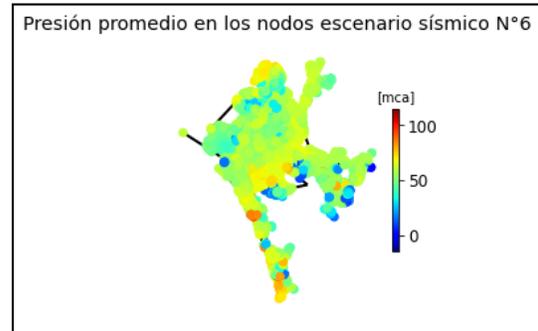
(a) Mapa de presiones para el estado normal de la red.



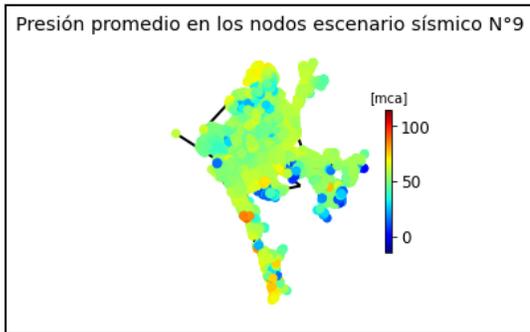
(b) Mapa de presiones para el escenario sísmico número 1.



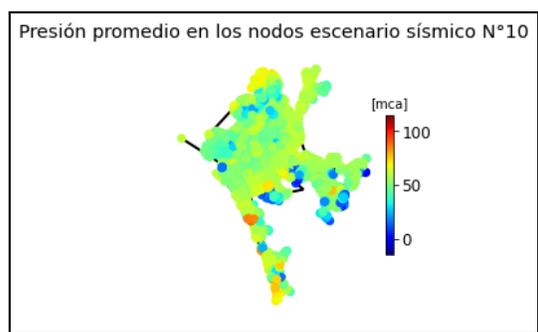
(c) Mapa de presiones para el escenario sísmico 4.



(d) Mapa de presiones para el escenario sísmico 6.



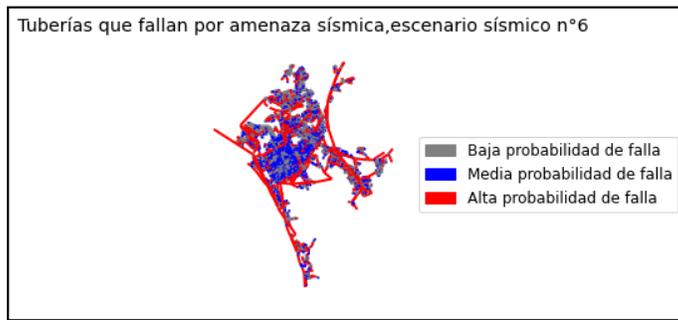
(e) Mapa de presiones para el escenario sísmico 9.



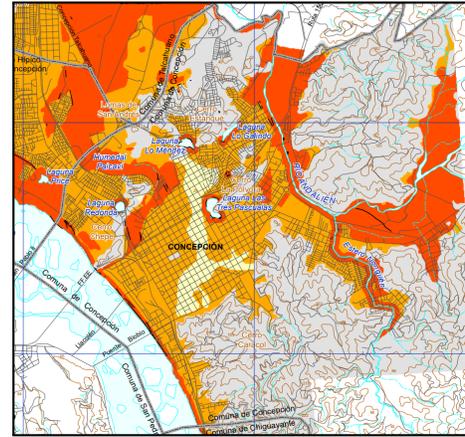
(f) Mapa de presiones para el escenario sísmico 10.

Figura 6.3: Mapa de presiones.

En la figura 6.4 se presentan el mapa de probabilidad de falla de la red de Concepción en el escenario sísmico 6 y el mapa de peligro de licuefacción de la ciudad. Se escoge estudiar el escenario 6 debido a que es un evento de magnitud 8.8 Mw como el ocurrido el año 2010 la zona. Al comparar ambos mapas se puede ver que las zonas con mayor probabilidad de falla coinciden con las zonas de mayor peligro de licuación del suelo. Las zonas céntricas de la ciudad, las cuales en su mayoría cuentan con una probabilidad media de falla, coinciden con un peligro medio de licuación.



(a) Mapa de probabilidad de fallas para escenario sísmico 9.



(b) Mapa de peligro de licuefacción en Concepción.

Figura 6.4: Comparación de mapa de fallas con el peligro de licuefacción del suelo de Concepción.

6.2. Comparación con Bellagamba

En el trabajo de Bellagamba (2019) se desarrollan ecuaciones de vulnerabilidad para tuberías enterradas teniendo como datos la información recopilada en los terremotos de Canterbury en Nueva Zelanda, ocurridos los días 22 de Febrero y 13 de Junio de 2011, y con magnitudes de 6.2 Mw y 6.0 Mw, respectivamente. Estos eventos provocaron grandes daños en la infraestructura de las ciudades cercanas al epicentro y, además, se pudo ver la ocurrencia de licuefacción y corrimientos laterales. En Chirstchurch se estimaron cinco zonas susceptibles a licuefacción (LRI), donde cada zona se define por un rango de CRR (Cyclic Resistance Ratio) basado en las fallas de suelo observadas durante el terremoto del 22 de Febrero. El mapa de las zonas susceptibles a licuación en Chirstchurch se muestra en la figura 6.5 y en la tabla 6.1 se muestran los rangos definidos para el estudio. La red de agua potable de Christchurch tiene una extensión total de 3.246 [km], se compone por tuberías principales de entre 80 a 300 [mm] (49,9%) y secundarias de entre 15 a 80 [mm] (50,1%), y los materiales presentes en la red son: polietileno de alta densidad (HDPE, 28,7%), asbesto cemento (26,2%), PVC (14,4%), polietileno de media densidad (MDPE80, 14,0%), acero galvanizado (5,8%), hierro fundido (5,7%), acero revestido de hormigón (1,6%), hierro dúctil (1,5%), acero (1,0%) y otros tipo de material en segmentos despreciables de la red (1,0%). En el trabajo se desarrolla una curva de vulnerabilidad en base a la velocidad máxima del suelo (PGV), las características de la tubería, y la susceptibilidad del suelo a licuar basado en el CRR. Esto marca una diferencia con respecto a la curva de vulnerabilidad desarrollada por ALA, ya que se tienen una mayor cantidad de parámetros para determinar la tasa de fallas por kilómetro en cierta sección de la red. La forma general de la función se muestra en la figura 6.6, donde se puede ver se cuenta con 5 parámetros, los cuales dependen del tipo de material, el comportamiento de la tubería y su diámetro.

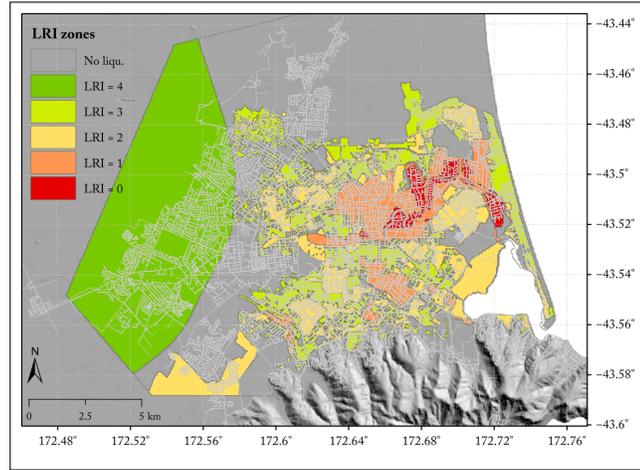


Figura 6.5: Mapa de LRI de Chirstchurch. Bellagamba (2019).

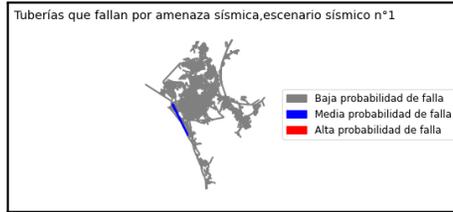
Tabla 6.1: Características de LRI. Bellagamba (2019)

LRI [-]	CRR Equivalente [-]	Asentamiento [mm]	Desplazamiento Lateral [mm]
0	<0,065	>500	>400
1	0,065 - 0,11	250 - 500	200 - 400
2	0,11 - 0,16	50 - 250	40 - 200
3	0,16 - 0,23	20 - 50	20 - 40
4	>0,23	<20	<20

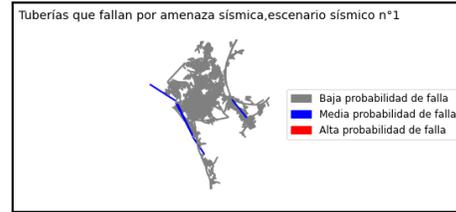
$$\ln(\lambda) = [a_0 PGV^{b_0} + c_0] + [a_1 PGV + b_1] + [a_2 \cdot PGV + b_2] + [a_3 \cdot PGV + b_3] + [a_4 CRR^{b_4} + c_4] + \varepsilon$$

Figura 6.6: Forma general de ecuación desarrollada por Bellagamba (2019).

Al realizar la modelación hidráulica utilizando la ecuación de Bellagamba, se obtiene lo presentado en las figuras 6.7.b y 6.8.b donde se presentan los escenarios sísmicos 1 y 10, respectivamente. Comparando estos resultados con los obtenidos anteriormente, se puede ver como claramente la probabilidad de falla de la red aumenta considerablemente al utilizar la ecuación desarrollada por Bellagamba. En el caso del escenario sísmico 1, se puede ver como en el caso de Bellagamba existen tuberías con una probabilidad media de falla inclusive con un sismo pequeño. Asimismo, en el escenario sísmico 10, se puede ver que la red en su totalidad tiene una alta probabilidad de falla.

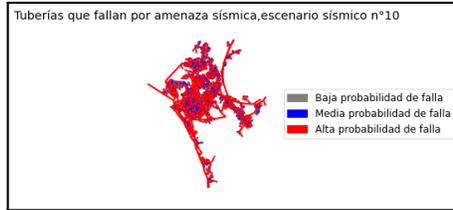


(a) Resultados del presente trabajo en escenario 1.

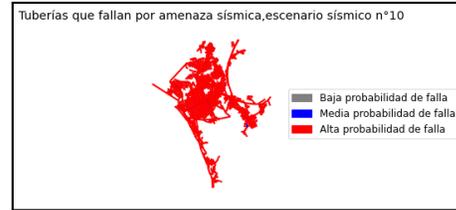


(b) Resultados Bellagamba en escenario 1.

Figura 6.7: Comparación de resultados con Bellagamba en escenario 1.



(a) Resultados del presente trabajo en escenario 10.



(b) Resultados Bellagamba en escenario 10.

Figura 6.8: Comparación de resultados con Bellagamba en escenario 10.

Capítulo 7

Discusión y Conclusiones

El estudio de riesgo sísmico de la ciudad de Concepción contempló el desarrollo de una ecuación de vulnerabilidad para las tuberías de la red de la zona de estudio y la implementación de una curva de fragilidad para los estanques presentes, utilizando datos recolectados durante el terremoto del año 2010 que afectó a la zona centro sur del país. La red de agua potable se modeló en el programa Epanet, mediante el cual fue posible incluir las tuberías, los nodos y los estanques establecidos según los planos entregados por la SISS.

El modelamiento computacional de la red fue uno de los puntos más complejos del trabajo, ya que las tuberías, los nodos y los estanques fueron incluidos desde planos que no contaban con todas las especificaciones técnicas necesarias. A pesar de esto, fue posible construir la red utilizando los planos dispuestos por la SISS y los sistemas de localización disponibles en la web. Esta problemática con la modelación se podría mejorar trabajando directamente con el equipo de Essbio, empresa encargada del servicio sanitario en la región del Biobío, con el fin de resolver las dudas debido a los errores presentes en los planos dispuestos, como los diámetros o la duplicidad de nodos. Un tema que no se pudo resolver por completo fue la implementación de los estanques en el modelo. Si bien se pudieron colocar los estanques establecidos en los planos, las propiedades de estos, como su volumen y diámetro, no se pudieron modificar debido a que generaba problemas de convergencia en WNTR. Esta problemática requiere un análisis en profundidad con expertos hidráulicos e informáticos especializados en el modelamiento computacional de redes hidráulicas.

Otro aspecto a mejorar del trabajo presentado tiene que ver con el desarrollo de la curva de fragilidad de los estanques. Esta curva fue desarrollada con los datos presentes en la American Lifelines Alliance (ALA), donde para su elaboración se utilizan datos de diferentes terremotos ocurridos en Estados Unidos entre los años 1933 y 1994. El uso de datos no actualizados genera que se construyan curvas de fragilidad que sobreestimen la probabilidad de daño de la componente en estudio. Para una mejor construcción de estas curvas se deben utilizar una mayor cantidad de datos actuales similares a las del caso chileno. Además, al construir una curva de fragilidad para estanques se debe tener en cuenta que los estados de daños, en este caso, debiesen dar un indicio del tiempo de reparación que tomaría reparar el estanque, o, en otras palabras, el tiempo en el que un estanque estaría fuera de funcionamiento. Esto se explica teniendo en cuenta que si un tanque tiene alguna falla que provoque fugas, para su reparación se debe detener su operación por completo, y dependiendo de la gravedad del problema depende el tiempo que pueda estar inoperativo. Un último aspecto a tener en

consideración para futuros estudios con respecto al daño en estanques, es el estudio de suelos en el cual se encuentra cimentada la estructura. En el terremoto del año 2010, si bien no se presentaron fallas en algún estanque en la ciudad de Concepción, sí se visualizaron problemas en los terrenos en los cuales estos estaban dispuestos, presentándose desprendimientos de suelo adyacente a la estructura.

Con respecto a la curva de vulnerabilidad desarrollada, esta fue construida utilizando los datos de fallas disponibles del terremoto del año 2010 en Chile y de los datos de tasa de reparación por kilómetro según la velocidad máxima del suelo del terremoto de Hyogoken-nanbu de Japón el año 1995. Mediante la utilización de esta ecuación de vulnerabilidad fue posible hacer una estimación de los daños sufridos por la red de agua potable en distintos escenarios sísmicos. En base a estos resultados se pudo ver que la red de agua potable se ve afectada en su totalidad para un caso catastrófico, es decir, para un terremoto mayor a 10.0 Mw. Sin embargo, para eventos de baja magnitud, existe una probabilidad de falla media en las tuberías de la red que poseen mayor longitud. Para el caso de un evento sísmico similar al del terremoto del año 2010, se tiene que existe una gran parte de la red con una alta probabilidad de falla, sin embargo, las tuberías de menor longitud presentan una baja probabilidad de falla a pesar de la magnitud del sismo. Esto se produce debido a que la fórmula utilizada para el cálculo de la probabilidad de falla depende directamente de la longitud de la tubería (ver ecuación 2.7). Con el fin de estudiar la tasa de fallas según el material de la tubería se desarrollaron dos ecuaciones de vulnerabilidad nuevas, considerando las fallas de las tuberías de asbesto cemento y de PVC por separado. Las ecuaciones obtenidas para cada tipo de material se muestran en la sección 5.7 del presente informe. A partir de estos resultados se pudo ver que los valores de las tasas de fallas disminuyen con respecto a la ecuación elegida anteriormente para la zona de Concepción, y, además, al realizar la modelación se obtuvieron resultados que confirmaron la alta diferencia entre el caso empírico y los desarrollados utilizando las ecuaciones según material. Por último, con el fin de realizar una comparación con otros modelos de vulnerabilidad en tuberías, es que se estudia la investigación realizada por Bellagamba (2019), en la cual se desarrolla un modelo de falla para tuberías utilizando la data de los terremotos ocurridos en Nueva Zelanda el año 2011.

En el documento de Bellagamba se desarrolla una ecuación de vulnerabilidad para la zona utilizando los datos recopilados durante los terremotos de Canterbury del 22 de febrero y el 13 de junio del año 2011. Para su elaboración, se toman en cuenta una función principal y cuatro términos de corrección dependiendo del parámetro de estudio. La función principal es igual para todos los casos y estima la tasa de fallas dependiendo sólo de la velocidad máxima del suelo, los términos de corrección dependen del tipo de material y el diámetro, el comportamiento de las tuberías, y la susceptibilidad del suelo a licuar. Todas estas características generan que la tasa de fallas resultante sea mucho más precisa para cada tipo de tubería. Al comparar con la ecuación obtenida utilizando la metodología de ALA se puede ver que esta última es mucho más sencilla, no diferenciando entre distintos tipos de tuberías. Además, al modelar la red hidráulica con la ecuación de vulnerabilidad de Bellagamba, se ve cómo el daño en la red aumenta considerablemente para el caso en el que se tiene un sismo similar al del terremoto del año 2010 en Chile. Junto con lo anterior, se debe tener en cuenta que la data utilizada por Bellagamba es mucho más actual que la de ALA, lo que genera que se tenga una recolección de datos más precisa y con menos tiempo de diferencia entre el terremoto y la visita a terreno del equipo especialista. Por último, el estudio de Bellagamba toma

en cuenta el peligro de licuefacción de la zona, incluyéndola en la utilización del parámetro CRR en los términos de corrección. Esto es un aspecto muy útil cuando se estudian zonas con un peligro de licuefacción alto de sus suelos.

La función de vulnerabilidad desarrollada para este trabajo no incluye el efecto de la licuefacción en la zona de estudio. Esto genera que las tasas de falla obtenidas no representen este fenómeno en sus resultados, lo que puede significar en una subestimación del peligro real. Una forma de incluir este fenómeno es seguir la metodología de Bellagamba, donde incluye la susceptibilidad de licuación del suelo mediante el parámetro CRR (Cyclic Resistance Ratio) como un factor de corrección a la función principal.

Durante el desarrollo de este trabajo se pudo visibilizar la necesidad de elaborar ecuaciones de vulnerabilidad para las redes de agua potable del país. Estas curvas serían de gran utilidad para prevenir un desabastecimiento prolongado del sistema sanitario en alguna zona afectada por un sismo de gran magnitud, pudiendo crear medidas de mitigación adecuadas en conjunto con las empresas encargadas de proveer el servicio.

Una de las formas que puede mejorar la elaboración de las curvas de vulnerabilidad es recopilando más datos de las fallas en las tuberías producidas por sismos a lo largo del país. En conjunto con estos datos, se debe tener información correspondiente de la red, como el tipo de material, su diámetro y el tipo de suelo en la cual se encuentra. A medida que se tenga una mayor cantidad de información es posible crear un modelo predictivo mucho más detallado y que cuente con menos incertezas en relación a estos parámetros. Para que esto sea posible se requiere de una colaboración entre las empresas del servicio sanitario, profesionales capacitados, y el SENAPRED (ex ONEMI), el cual es el organismo encargado de la prevención y atención de emergencias en el país.

Habiendo desarrollado el trabajo se pudo ver la necesidad de una buena modelación de la red hidráulica previo a realizar un estudio de riesgo. Esta modelación debiese ser realizada por profesionales familiarizados con la red en la cual se trabaje o, en su defecto, por la empresa a cargo del sistema sanitario que se esté estudiando. Esto permitiría que se pudiesen desarrollar estudios de riesgo con mayor facilidad utilizando herramientas computacionales como WNTR y Epanet. Esto reduciría los tiempos necesarios a la hora de trabajar con modelos hidráulicos y se evitarían errores propios de la construcción del modelo. Una buena medida a nivel país que se podría implementar es que todas las empresas sanitarias cuenten con un modelo hidráulico desarrollado con programas compatibles entre ellos.

Finalmente, se puede decir que en el presente trabajo se pudo recopilar la información sísmica necesaria para caracterizar la ciudad de Concepción, se pudo obtener la información acerca de las características de su sistema de agua potable mediante el uso del portal de transparencia de la SISS y, en conjunto con la información de las fallas ocurridas durante el terremoto el año 2010, se pudo entregar una ecuación de vulnerabilidad para la ciudad, lo cual es un tema que no ha sido desarrollado en detalle en el país. Además, se estableció una curva de fragilidad para los estanques de hormigón armado utilizando información recopilada por ALA, sin embargo, es necesario actualizar los datos de estudio para una mejor calibración de la curva, utilizando datos cercanos al ámbito nacional. El estudio de riesgo sísmico en este tipo de componentes del sistema de agua potable no ha sido desarrollado en el país, por

lo que su implementación podría ayudar a prevenir grandes desabastecimientos de agua en caso de que uno, o más, estanques fallasen durante un evento sísmico. Sin embargo, no fue posible obtener un análisis de riesgo completo del sistema, debido a la dificultad de modelar la red hidráulica de forma correcta. Este tema, y como se mencionó anteriormente, debiese ser corregido por expertos en informática e hidráulica que estén familiarizados con el sistema sanitario chileno. De esta manera se podrían obtener resultados adecuados para el estudio de las presiones reales del sistema, los problemas económicos que tendrían las fallas de la red y el porcentaje del déficit de suministro de agua después de un terremoto.

8. Bibliografía

- Abrahamson, N., Gregor, N., Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23-44.
- Aguero, R. (1997). *Agua potable para poblaciones rurales. Sistemas de abastecimiento por gravedad sin tratamiento. Lima (Perú)*
- Aguirre, F. (2015). *Abastecimiento de Agua Potable para Comunidades Rurales. Machala (Ecuador): Universidad Técnica de Machala, 1ra edición.*
- American Lifelines Alliance (2001). *Seismic Fragility Formulations For Water Systems*. United States: FEMA.
- Baker, J. W. (Octubre, 2008). An introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). *White paper, Version 1.72.*
- Bastias, N., Montalva, G., Leyton, F (Diciembre, 2018). Modelo Predictivo de Velocidad Máxima (PGV) y Espectral (PSv) para Zona de Subducción Chilena. *X Congreso Sochige.*
- Bellagamba, X., Bradley, B. A., Wotherspoon, L. M., Hughes, M. W. (2019). Development and validation of fragility functions for buried pipelines based on Canterbury earthquake sequence data. *Earthquake spectra*, 35(3), 1061-1086.
- Boroschek, R., Contreras, V. (2012, March). Strong ground motion from the 2010 Mw 8.8 Maule Chile earthquake and attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes. *In International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake* (Vol. 1, pp. 1722-1733).
- CARE-AVINA (2012). *Operación y mantenimiento de sistemas de agua potable, módulo 5. Quito (Ecuador): Fortalecimiento de capacidades de Organizaciones Comunitarias Prestadoras de Servicios de Agua y Saneamiento (OCSAS) en América Latina.*
- Dukes, J., DesRoches, R., Padgett, J. E. (2012). Sensitivity study of design parameters used to develop bridge specific fragility curves. *In Proc. 15th World Conf. Earthquake Eng (Vol. 720).*
- Fell, R. (2005). *Geotechnical engineering of dams* (pp. 694-701). CRC press. 694-701
- Gobierno de Chile (2010). *Informe de Gestión del Sector Sanitario.*
- Gobierno de Chile (2014). *Plan de reconstrucción. Región de Tarapacá.*

- Gobierno de Chile (2015). *Accountability social del plan regional de gobierno Coquimbo. Un aporte al plan de reconstrucción.*
- Gobierno de Chile (2020). *Informe de Gestión del Sector Sanitario.*
- Guzmán, A. (2016). *Estudio de Interacción Suelo-Tubería en las Redes de Agua Potable y Aguas Servidas del Gran Concepción* (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://www.civil.ucsc.cl/investigacion/memorias/2011Guzman.pdf>.
- Huang, C., Galasso, C. (2019). Ground-motion intensity measure correlations observed in Italian strong-motion records. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 48(15), 1634-1660.
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S., Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 1853-1880.
- Jacobson, A. & Grigoriu, M. (2008). *Fragility Analysis of Water Supply Systems*. (No. MCEER-08-0009). Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Jaimes, M. A., García-Soto, A. D. (2020). Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate-depth intraslab earthquakes including V/H ratios. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1298-1330.
- Kappes, M.S., Keiler, M., von Elverfeldt, K. et al. *Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. Nat Hazards* 64, 1925–1958 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>.
- Montalva, G. A., Bastías, N., Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 901-911.
- National Infrastructure Advisory Council (NIAC). (2009). *Critical Infrastructure Resilience, Final Report and Recommendations*, U.S. Department of Homeland Security, Washington, D.C. http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac_critical_infrastructure_resilience.pdf.
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N., de la Llera, J. C. (2019). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its Poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(1), 66-74.
- Rossetto, T., Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering structures*, 25(10), 1241-1263.
- Rossman, L. A. (2001). Epanet 2 manual de usuario. *US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.*
- Sáez, P (2016). *Actualización de la estratificación y zonificación de los suelos en la Comuna de Concepción* (Tesis de pregrado). Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2228/1/Saez_Obreque_Pablo_Cesar.pdf.
- Samaniego, J. L. (Marzo, 2010). *Terremoto en Chile. Una primera mirada al 10 de marzo de*

2010. Santiago: Naciones Unidas.

Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of engineering mechanics*, 126(12), 1224-1231.

Stojadinovic, Bozidar and Mai, Chu V. (Noviembre, 2013). *Fragility curves as a tool for seismic risk analysis of civil engineering structures. Workshops on Resilience engineering. Paris.*

Anexos

Anexo A. Muestreo de Magnitudes y Radios

Tabla A.1: Sismos chilenos utilizados en el modelo. Fuente: USGS.

Time	Latitude [°]	Longitude [°]	Profundidad [km]	mag	R_{epi} [km]	R_{hyp} [km]
18-10-1961 13:51	-36.738	-73.238	20	6.56	23.3	30.7
14-07-2010 4:32	-38.067	-73.31	22	6.6	141.6	143.3
05-03-2010 8:47	-36.665	-73.374	18	6.6	40.4	44.3
03-05-2004 0:36	-37.695	-73.406	21	6.6	105.2	107.3
29-09-2019 12:57	-35.4758	-73.163	11	6.7	149.9	150.3
14-02-2011 0:40	-35.38	-72.834	21	6.7	161.7	163.0
15-03-2010 23:21	-36.217	-73.257	18	6.7	71.0	73.3
22-05-1960 6:32	-37.86	-73.149	25	6.8	116.1	118.8
11-02-2011 17:05	-36.422	-72.96	26	6.9	45.2	52.1
19-06-1960 22:01	-38.154	-72.917	25	7	148.9	151.0
18-08-1974 6:44	-38.453	-73.431	36	7.1	186.4	189.9
14-02-1962 3:36	-37.845	-72.885	30	7.1	115.3	119.1
22-05-1960 6:30	-37.775	-73.017	25	7.14	106.1	109.1
02-01-2011 17:20	-38.355	-73.326	24	7.2	173.4	175.0
06-05-1953 13:16	-37.093	-72.866	66	7.55	36.3	75.3
10-05-1975 10:27	-38.183	-73.232	6	7.7	152.9	153.0
22-05-1960 14:56	-38.061	-73.039	25	7.8	137.9	140.1
21-05-1960 6:02	-37.824	-73.353	25	8.1	116.7	119.3
27-02-2010 3:34	-36.122	-72.898	22.9	8.8	79.2	82.5
22-05-1960 15:11	-38.143	-73.407	25	9.5	152.4	154.4

Anexo B. Red de Agua Potable de Concepción

Tabla B.1: Distribución de diámetros en la red de agua potable de Concepción. Guzmán (2011).

Diámetros [mm]	Cantidad	Longitud [km]	%
0 (Sin información)	10	0,18	0,03
30	1	0,05	0,01
50	9	0,39	0,07
63	49	2,17	0,40
75	1218	61,70	11,42
90	784	33,26	6,16
100	4885	120,21	22,25
110	3986	128,40	23,77
125	335	9,90	1,83
140	149	4,01	0,74
150	735	31,46	5,82
160	562	16,71	3,09
180	10	0,34	0,06
200	1197	50,04	9,26
250	569	22,44	4,15
300	166	15,09	2,79
315	13	0,92	0,17
350	9	2,86	0,53
355	34	1,65	0,31
400	107	15,32	2,84
450	43	3,88	0,72
500	31	2,60	0,48
550	6	3,01	0,56
600	19	2,82	0,52
750	2	0,09	0,02
800	9	4,44	0,82
850	4	0,18	0,03
1000	44	6,14	1,14

Tabla B.2: Estanques Semienterrados en Concepción. Fuente: Essbio (2022).

Nombre	Cota Fondo Radier [m.s.n.m.]	Cota Rebalse [m.s.n.m.]	Volumen de Diseño [m ³]
LONCO	85	89,91	2000
CHEPE CONCEPCION 1	50,53	56,73	5000
CHEPE CONCEPCION 2	50,53	56,73	5000
SANTA SABINA 2	80	84,44	1000
SANTA SABINA 1	80	85,68	2000
CARACOL 1	49,68	54,98	3600
CARACOL 2	49,68	54,98	3125
CARACOL 3	50,65	56,32	5000
AGUITA DE LA PERDIZ	124,44	128,24	200
BUENA VISTA	85,16	89,15	200
NONGUEN ALTO	129,95	134,44	500
NONGUEN	57,5	63,53	500
SANTA ANDREA	71,93	76,46	1000
LAGOS DE CHILE	55,5	60,2	1000
LO PEQUEN	81,92	85,42	200
GLEISNER	73	76,5	120
LONCO PARQUE	150	156	200
VILLUCO ALTO	150	155,5	250

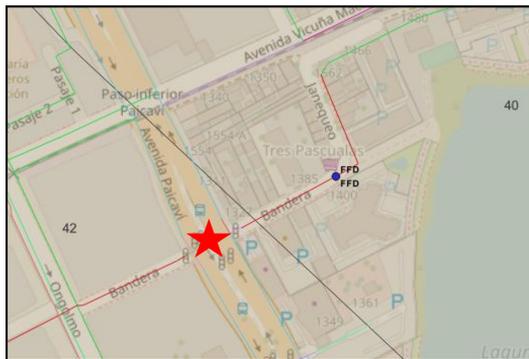
Anexo C. Desarrollo de Curva de Vulnerabilidad

Tabla C.1: Velocidades de onda de corte en distintas zonas de Concepción. Fuente: Sáez (2016).

Sector	Latitud [°]	Longitud [°]	V_{s30} [m/s]	Tipo de suelo según DS 61
Andalién	-36,80096	-73,029477	202	E
Cementerio-Vega	-36,814463	-73,074867	225	F
Centro Norte	-36,813869	-73,049315	198	E
Centro Oeste	-36,822214	-73,057906	202	F
Centro sur	-36,828597	-73,046709	202	E
Cerro Caracol	-36,835212	-73,047586	348	E
Cerro la Virgen	-36,823826	-73,029904	200	F
Collao	-36,820222	-73,014718	200	F
Centro Noreste	-36,814945	-73,035754	228	E
Centro	-36,820311	-73,042647	201	E
Condominio Aire Mediterráneo	-36,789469	-73,057942	145	F
Ebenezer	-36,837952	-73,058745	212	D
Lo Pequén	-36,82558	-73,031764	192	D
Lomas San Andrés	-36,79286	-73,06305	171	F
Nonguén	-36,83304	-73,007628	200	F
Pedro de Valdivia	-36,850879	-73,050431	225	D

Tabla C.2: Fallas en la red de agua potable de Concepción. Fuente: Guzmán (2011).

PGV [cm/s]	Fallas	Área [km ²]	Material				Diámetro		
			PVC	AC	FFD	ACERO	Pequeños	Medianos	Grandes
52	1	1,01	1	0	0	0	1	0	0
50	10	1,09	6	4	0	0	10	0	0
48	18	1,34	15	3	0	0	17	1	0
46	6	1,64	2	3	1	0	5	1	0
44	4	1,97	1	2	1	0	2	2	0
42	2	2,45	1	0	1	0	1	1	0
40	18	3,01	1	6	11	0	11	7	0
38	22	3,42	1	14	7	0	16	6	0
36	23	3,85	3	12	8	0	13	8	2
34	10	4,86	2	5	1	2	7	3	0
32	29	6,55	12	17	0	0	22	7	0
30	6	8,69	4	2	0	0	5	1	0
28	6	25,12	4	2	0	0	5	1	0
26	13	33,75	7	5	0	1	9	4	0



(a) Fallas y posición final.

Fallas AP Concepción [2]	
▼ Dirección	BANDERA CON PAICAVI
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	BANDERA CON PAICAVI
Coord_norte	138880
Coord_este	5918286
Fecha	29-07-2010 17:00
Motivo	INTERCONEXION DE REDES
Observación	INTERCONEXION NUEVAS INSTALACIONES
Tipo de Corte	Cortes Prog.
DIAMETRO	150
MATERIAL	FFD
▼ Dirección	MACKENNA
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	MACKENNA
Coord_norte	138880
Coord_este	5918286
Fecha	02-08-2010 16:30
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	FATIGA DE MATERIAL
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	150
MATERIAL	FFD

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.1: Dato erróneo en PGV 40.



(a) Ubicación de los datos.

Dirección	AINAVILLO / PJE LOS LIRIOS
(Derivado)	
(Acciones)	
Dirección	AINAVILLO / PJE LOS LIRIOS
Coord_norte	139271
Coord_este	5918418
Fecha	10-08-2010 8:50
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC
Dirección	AINAVILLO / PJE LOS LIRIOS
(Derivado)	
(Acciones)	
Dirección	AINAVILLO / PJE LOS LIRIOS
Coord_norte	139251
Coord_este	5918450
Fecha	10-08-2010 11:40
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.2: Dato erróneo en PGV 38.

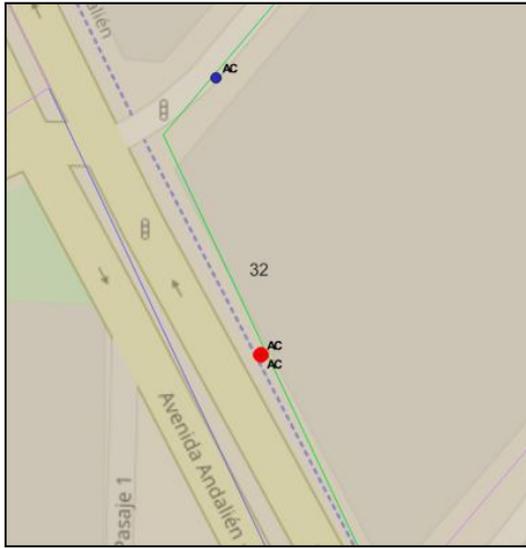


(a) Ubicación de los datos.

Dirección	MAIPU-VILUMILLA
(Derivado)	
(Acciones)	
Dirección	MAIPU-VILUMILLA
Coord_norte	140086.95
Coord_este	5917802.14
Fecha	04-08-2010
Motivo	SIN DATO
Observación	sin dato
Tipo de Corte	NULL
DIAMETRO	150
MATERIAL	FFD
Dirección	VILUMILLA / MAIPU
(Derivado)	
(Acciones)	
Dirección	VILUMILLA / MAIPU
Coord_norte	140087
Coord_este	5917802
Fecha	04-08-2010 18:00
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	150
MATERIAL	FFD

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.3: Dato erróneo en PGV 36.

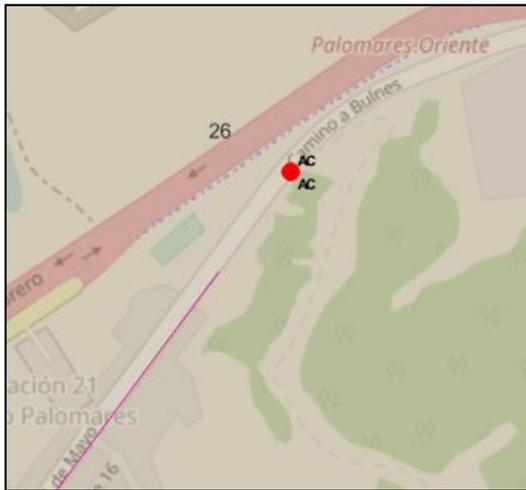


(a) Ubicación de los datos.

▼ Dirección	ANDALIEN /9 DE MARZO
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	ANDALIEN /9 DE MARZO
Coord_norte	140291
Coord_este	5919728
Fecha	08-09-2010 14:29
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	FATIGA
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC
▼ Dirección	ANDALIEN / NUEVE DE MARZO
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	ANDALIEN / NUEVE DE MARZO
Coord_norte	140291
Coord_este	5919728
Fecha	08-09-2010 15:20
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.4: Dato erróneo en PGV 32.

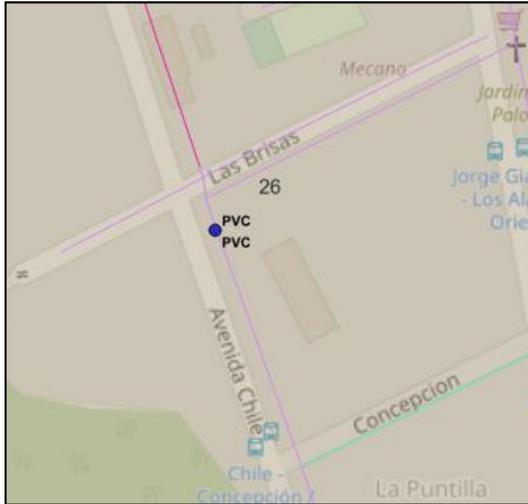


(a) Ubicación de los datos.

▼ Dirección	GENERAL BONILLA / VEINTIUNO DE MAYO
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	GENERAL BONILLA / VEINTIUNO DE MAYO
Coord_norte	144546.74
Coord_este	5918168.68
Fecha	20-07-2010 15:00
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC
▼ Dirección	VEINTIUNO DE MAYO / AV VEINTIUNO DE MAYO
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	VEINTIUNO DE MAYO / AV VEINTIUNO DE MAYO
Coord_norte	144546.74
Coord_este	5918168.68
Fecha	26-07-2010 12:30
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	Falla matriz Falla de matriz
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	100
MATERIAL	AC

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.5: Dato erróneo en PGV 26.



(a) Ubicación de los datos.

▼ Dirección	AV CHILE # 200
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	AV CHILE # 200
Coord_norte	143641.53
Coord_este	5917150.92
Fecha	23-07-2010 11:25
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	FATIGA
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	110
MATERIAL	PVC
▼ Dirección	AV. CHILE # 200
▶ (Derivado)	
▶ (Acciones)	
Dirección	AV. CHILE # 200
Coord_norte	143641.53
Coord_este	5917150.92
Fecha	24-07-2010 8:38
Motivo	ROTURA DE MATRIZ
Observación	ROTURA ESPONTANEA
Tipo de Corte	Cortes no Prog.
DIAMETRO	110
MATERIAL	PVC

(b) Detalles de ambas fallas.

Figura C.6: Dato erróneo en PGV 26.

Tabla C.3: Tasa de fallas Concepción.

Concepción 2010			
PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
20,47	0,081	52,00	0,267
19,69	0,334	50,00	1,097
18,90	0,236	48,00	0,775
18,11	0,080	46,00	0,263
17,32	0,037	44,00	0,122
16,54	0,024	42,00	0,078
15,75	0,120	40,00	0,395
14,96	0,102	38,00	0,335
14,17	0,080	36,00	0,262
13,39	0,037	34,00	0,121
12,60	0,113	32,00	0,369
11,81	0,033	30,00	0,107
11,02	0,048	28,00	0,159
10,24	0,067	26,00	0,218

Tabla C.4: Tasa de fallas Japón. Fuente: ALA (2001).

Hyogoken-nanbu 1995			
PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
10,5	0,031	26,67	0,102
15,2	0,207	38,61	0,679
23,8	0,047	60,45	0,154
28,4	0,057	72,14	0,187
29,6	0,227	75,18	0,745
33,6	0,227	85,34	0,745
35,3	0,062	89,66	0,203
39,3	0,202	99,82	0,663
41,4	0,098	105,16	0,322

Tabla C.5: Tasa de fallas de Northridge. Fuente: ALA (2001)

Northridge 1994			
PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
47,2	0,0253	119,89	0,083
35,8	0,014	90,93	0,046
29,3	0,0303	74,42	0,099
22,8	0,0949	57,91	0,311
17,9	0,0167	45,47	0,055
14,6	0,0302	37,08	0,099
11,4	0,0161	28,96	0,053
8,1	0,0196	20,57	0,064
4	0,002	10,16	0,007
25,3	0,0216	64,26	0,071
12,2	0,0042	30,99	0,014
8,1	0,0207	20,57	0,068
3,8	0,0014	9,65	0,005
52,1	0,1541	132,33	0,506
45,6	0,0263	115,82	0,086
39	0,0205	99,06	0,067
32,5	0,0068	82,55	0,022
27,7	0,0578	70,36	0,190
24,4	0,0708	61,98	0,232
21,1	0,0739	53,59	0,242
17,9	0,0362	45,47	0,119
14,6	0,0236	37,08	0,077
11,4	0,0321	28,96	0,105
8,1	0,0246	20,57	0,081
4,5	0,0073	11,43	0,024
42,3	0,102	107,44	0,335
45,3	0,0839	115,06	0,275
27,7	0,0396	70,36	0,130
16,5	0,0092	41,91	0,030
11,4	0,0031	28,96	0,010
8,1	0,0031	20,57	0,010
17,9	0,0914	45,47	0,300
11,5	0,0522	29,21	0,171
8,3	0,0587	21,08	0,193
4,9	0,0551	12,45	0,181

Tabla C.6: Tasa de fallas de Loma Prieta. Fuente: ALA (2001).

Loma Prieta 1989			
PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
17	0,148	43,18	0,486
7	0,0061	17,78	0,020
5	0,0084	12,70	0,028
3	0,0025	7,62	0,008
17	0,0123	43,18	0,040
7	0,0009	17,78	0,003
5	0,0024	12,70	0,008
3	0,0034	7,62	0,011
17	0,0919	43,18	0,302
7	0,0052	17,78	0,017
5	0,0123	12,70	0,040
3	0,0056	7,62	0,018
5,3	0,0026	13,46	0,009

Tabla C.7: Tasa de fallas de San Fernando. Fuente: ALA (2001)

San Fernando 1971			
PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
13,8	0,0122	35,05	0,040
14,3	0,0152	36,32	0,050
14,8	0,0244	37,59	0,080
14,8	0,0183	37,59	0,060
15,4	0,0244	39,12	0,080
15,9	0,0335	40,39	0,110
16,4	0,061	41,66	0,200
16,9	0,122	42,93	0,400
17,4	0,0131	44,20	0,043
26	0,0488	66,04	0,160
9,1	0,0029	23,11	0,010
7,1	0,0067	18,03	0,022
11,8	0,0125	29,97	0,041

Tabla C.8: Tasas de falla de zonas restantes. Fuente: ALA (2001).

	PGV [pulgadas/s]	Fallas/1000pies	PGV [cm/s]	Fallas/km
Puget Sound 1965	16,7	0,0366	42,42	0,120
	8,6	0,0022	21,84	0,007
	16,7	0,0884	42,42	0,290
	8,6	0,004	21,84	0,013
Kanto 1923	11,6	0,0488	29,46	0,160
	11,6	0,0671	29,46	0,220
Mexico 1989	9,8	0,0518	24,89	0,170
Coalinga 1983	11,8	0,101	29,97	0,331
Imperial Val. 1979	23,7	0,0183	60,20	0,060
Niigata 1964	6	0,14	15,24	0,459
Long Beach 1933	24,6	0,0671	62,48	0,220

Tabla C.9: Tasa de fallas según tipo de material para el terremoto de Concepción 2010.

PGV [cm/s]	Fallas	Longitud [km]	PVC	AC
52	1	3,75	0,267	0,000
50	10	9,12	0,658	0,439
48	18	23,23	0,646	0,129
46	6	22,86	0,088	0,131
44	4	32,89	0,030	0,061
42	2	38,44	0,026	0,000
40	18	48,09	0,021	0,125
38	22	59,65	0,017	0,235
36	23	80,12	0,037	0,150
34	10	74,19	0,027	0,067
32	29	73,16	0,164	0,232
30	6	55,92	0,072	0,036
28	6	37,72	0,106	0,053
26	13	50,38	0,139	0,099