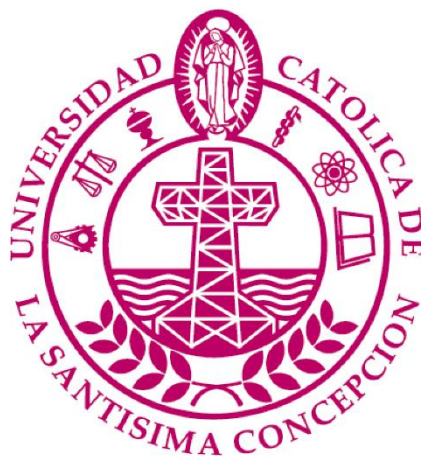


UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



ESTIMACIÓN DE DAÑOS POR TSUNAMI EN IQUIQUE

LUISA ISOLDE URRRA ESPINOZA

PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Dr. Rafael Aránguiz M.

Profesor Informante

Mauricio Villagrán

Concepción, Agosto 2015

Resumen

Los últimos terremotos de gran magnitud que han propagado tsunamis a la zona norte de Chile tuvieron lugar en 1868 y 1877, generando inundaciones de 12 y 10 m en Iquique respectivamente.

En el presente trabajo se modeló con TUNAMI un posible escenario de ruptura actual tomando como base estos eventos y considerando los sismos ocurridos en el último tiempo. Como resultado se observó que la inundación en la costa de Iquique no superó los 4 m y el flujo avanzó hasta una cota de terreno de 3m. Al incrementar el doble los desplazamientos se obtiene un evento de $M_W = 9.0$ que genera una inundación en la costa cercana a 7 m y una intrusión del flujo en la ciudad hasta una elevación ligeramente menor a 10 m. Un tercer escenario, obtenido al descontar la ruptura desde Iquique hacia el norte, genera inundaciones de 5 m en Cavanca y no inunda la Zona Franca de Iquique (Zofri).

Posteriormente se estimaron los daños que el escenario $M_W = 9.0$ podría ocasionar en Iquique. Para ello se utilizó un mapa con las máximas profundidades de flujo, un Sistema de Información Geográfico, clasificación de estructuras y curvas de fragilidad. Los resultados mostraron que el flujo inundaría aproximadamente 2320 estructuras, de las cuales 1200 corresponden a edificios de albañilería y 630 de madera.

De las edificaciones de albañilería afectadas, más de 500 pertenecen al sector de Zofri y 130 de ellas poseen una alta probabilidad de colapsar o ser completamente arrasadas por el flujo. De las 700 edificaciones restantes distribuidas desde el sector antiguo de Iquique hasta Cavanca, 150 podrían colapsar o ser arrasadas.

Un 80% de las estructuras de madera se concentran en el sector antiguo de Iquique y alrededor de 150 podrían ser completamente destruidas.

Abstract

The last major earthquakes and tsunamis in northern Chile took place in 1868 and 1877, with inundation heights in Iquique approximately 10 to 12m.

Based on these two events and the greatest recent earthquakes, a possible future scenario was modeled using the TUNAMI code. As a result, the inundation height in Iquique's shoreline did not exceed 4 m, and the inundation penetrates the city until 3m of ground elevation. The displacement was increased twice to generate a $M_w = 9.0$ event, which generated a 7 m inundation height in the shoreline and a runup of 10 m. A third scenario was obtained by discounting the northern rupture area. This scenario did not generate inundation in the Duty Free of Iquique (Zofri), however a 5m inundation height in the Cavancha residence was estimated.

The next step was to develop the damage estimation of the $M_w = 9.0$ scenario for Iquique. Thus, the maximum flow depth output was combined with building classification and fragility curves into a geographical information system. Results showed approximately 2320 flooded structures, 1200 of masonry and 630 of them were wooden buildings. Over 500 of the affected masonry buildings are located in the Zofri area, and 130 of them have high probability to collapse or to be completely destroyed by the inundation flow. Out of the remaining 700 buildings located from the old sector to Cavancha Iquique, 150 could collapse or be destroyed. The old town of Iquique presents an 80% of the affected wooden structures and around 150 could be completely destroyed.

*A Dios, a mis padres y hermanos,
porque en ellos encuentro la fuerza
para alcanzar mis sueños.*

Agradecimientos

Se agradece de manera especial al Proyecto JICA – SATREPS Chile y al Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN) por la beca de perfeccionamiento que hizo posible este trabajo.

Se agradece a la Dirección de Obras Portuarias (DOP), por facilitar batimetrías de detalle de Iquique.

Se agradece al Dr. Shunichi Koshimura por su gran disposición a compartir el conocimiento adquirido en sus múltiples investigaciones y por el tiempo y la voluntad de debatir sobre la aplicabilidad de ellas en este proyecto.

Agradezco a M.Sc. Bruno Adriano, por enseñarme algunos de los códigos y softwares que se utilizan en la modelación numérica de tsunamis y post-proceso de datos.

Finalmente, agradezco de todo corazón al Dr. Rafael Aránguiz por la oportunidad, enseñanzas, confianza y soporte que me ha entregado durante todas las etapas de esta tesis. Su pasión hacia la investigación, cooperación y desarrollo científico han sido de gran inspiración.

Índice de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Justificación	4
1.3	Área de Estudio	8
1.4	Objetivos	10
2	MARCO TEÓRICO	11
2.1	Tsunami: Generación, propagación y efecto en la costa.....	11
2.1.1	Generalidades de una onda	11
2.1.2	Generación de Tsunamis.....	12
2.1.3	Propagación	13
2.1.4	Modificación y efectos del tsunami en la costa	15
2.2	Métodos de estimación de daños	19
2.2.1	Estimación de daños según Shuto (1993)	19
2.2.2	Estimación de daños según Papadopoulos (2001)	21
2.2.3	Estimación de daños según Papathoma (2003).....	25
2.2.4	Estimación de daños según Koshimura (2009).....	28
3	MATERIALES Y MÉTODO	41
3.1	Mapas de inundación por tsunami	41
3.1.1	Elección de un evento tsunamigénico probable	41
3.1.2	Antecedentes Topobatimétricos	43
3.1.3	Condición Inicial	46
3.1.4	Modelo numérico	48
3.1.5	Mallas: Resolución espacial y temporal	49
3.2	Estimación de daños	50

3.2.1	Clasificación de estructuras	50
3.2.2	Set de Curvas de Fragilidad	52
4	RESULTADOS.....	56
4.1	Mapas de inundación.....	56
4.2	Estimación de daños	60
4.2.1	Clasificación de Estructuras.....	60
4.2.2	Estimación de daños	61
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
5.1	Condición Inicial	67
5.2	Máximas profundidades de flujo	67
5.2.1	Escenario $MW = 8.81$	67
5.2.2	Escenario $MW = 9.0$	68
5.2.3	Escenario $MW = 8.89$	68
5.3	Estimación de daños	69
5.3.1	Cantidad y distribución de edificaciones inundadas.....	69
5.3.2	Cantidad y distribución de estructuras con daño nivel 3 o superior.....	69
5.3.3	Análisis de la distribución de daño.....	70
5.3.4	Análisis de los mapas de zonificación.....	71
6	CONCLUSIONES	72
7	REFERENCIAS	74
8	ANEXOS.....	79
8.1	Anexo 2.1: Factores que afectan la vulnerabilidad según Papathoma.....	79
8.2	Anexo 3.1: Escenario $Mw=8.81$ Yagi (2014).....	81

Índice de Figuras

Figura 1.1:	Devastación en Banda Aceh, Sumatra. Tsunami 2004	2
Figura 1.2:	Alturas de inundación debido al tsunami de 2010 en Chile	3
Figura 1.3:	Distribución de sismos históricos de Magnitud mayor a 6.0 en la zona norte de Chile	4
Figura 1.4:	Extensión aproximada de rupturas con magnitud mayor a 8.0 en la zona norte de Chile y sur de Perú	5
Figura 1.5:	Área de Estudio: Iquique-Chile	8
Figura 2.1:	Condición inicial de un tsunami	13
Figura 2.2:	Daños del tsunami de 2010 en Chile	16
Figura 2.3:	Medidas de un tsunami	19
Figura 2.4:	Ejemplo de evaluación de vulnerabilidad según Papathoma	27
Figura 2.5:	Curvas de fragilidad hipotéticas	29
Figura 2.6:	Curvas de fragilidad para el tsunami de 2004 en Banda Aceh, Indonesia	29
Figura 2.7:	Niveles de daño por teledetección (Gokon)	31
Figura 2.8:	Niveles de daño por teledetección (Suppasri)	32
Figura 2.9:	Niveles de daño mediante encuestas de campo (Gokon)	33
Figura 2.10:	Niveles de daño mediante encuestas de campo (Murao)	34
Figura 2.11:	Clasificación de estructuras (Murao)	35
Figura 3.1:	Extensión espacial aproximada del dominio de cálculo	43
Figura 3.2:	Topobatemetría de distinta resolución. (a) TB-1. (b) TB-2. (c) TB-3.	45
Figura 3.3:	Parámetros de una falla planar	46
Figura 3.4:	Extensión de los dominios 1 a 5, figuras (a) a (e) respectivamente. Poseen resolución espacial: (a) 810 m. (b) 270 m. (c) 90 m. (d) 30 m. (e) 10 m.	50
Figura 3.5:	Set de curvas de fragilidad utilizadas	54

Figura 4.1:	Condición inicial del tsunami para cada evento: (a) Mw=8.81. (b) Mw=9.0. (c) Mw=8.9	56
Figura 4.2:	Profundidad de Inundación de los escenarios Mw=8.81, Mw=9.0 y Mw=8.9 respectivamente, utilizando TUNAMI-N2	57
Figura 4.3:	Profundidad de inundación máxima para el escenario Mw=9.0 utilizando TUNAMI-N2	58
Figura 4.4:	Mareogramas virtuales en Zofri y Cavancha para el escenario Mw=9.0 utilizando TUNAMI-N2	59
Figura 4.5:	Clasificación de materialidades en la ciudad de Iquique	60
Figura 4.6:	Estimación de daño en seis niveles	61
Figura 4.7:	Distribución del daño considerando dos niveles	63
Figura 4.8:	Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de madera	64
Figura 4.9:	Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de albañilería	65
Figura 4.10:	Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de hormigón armado	66

Índice de Tablas

Tabla 1.1:	Máximos run up por tsunami entre las latitudes -16° y -24°	6
Tabla 2.1:	Escala de intensidad y daño de tsunami propuesta por Shuto	20
Tabla 2.2:	Escala de intensidad y daño de tsunami propuesta por Papadopoulos	21
Tabla 2.3:	Relación entre la intensidad propuesta por Papadopoulos y la propuesta por Shuto	24
Tabla 2.4:	Niveles de daño mediante clasificación por satélite	31
Tabla 2.5:	Niveles de daño mediante clasificación en terreno (Gokon)	33
Tabla 2.6:	Niveles de daño mediante clasificación en terreno (Murao)	34
Tabla 2.7:	Clasificación de edificaciones (Murao)	34
Tabla 3.1:	Categorización de estructuras	51
Tabla 3.2:	Parámetros estadísticos del set de curvas de fragilidad	52
Tabla 3.3:	Clasificación de seis niveles de daño estructural	53
Tabla 5.1:	Distribución de posibles estructuras inundadas por un Mw=9.0	69
Tabla 5.2:	Distribución de estructuras con daño nivel 3 o superior	70

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Chile se encuentra ubicado en el extremo occidental de la placa sudamericana, cerca de 100 km al Este de donde se produce la subducción de la placa de Nazca, la que crece y crea nuevo fondo marino debido al magma proveniente de la Cordillera Mezo-dorsal del Pacífico, empujando entre 65 y 74 mm hacia el continente cada año (Rhea, et al., 2010).

La placa Sudamericana posee una mayor densidad que la de Nazca y producto de esta interacción se genera un valle profundo en el fondo del océano llamado “Fosa de Perú-Chile” o “Fosa de Atacama” que registra profundidades cercanas a 8.000 m.

Alrededor de la zona de subducción ocurren distintos tipos de falla, siendo los “sismos interplaca” los únicos de interés en este estudio, pues estos se producen cuando las placas logran destrabarse y se desplaza el fondo marino tanto horizontal como verticalmente. Este tipo de ruptura es responsable de los mayores terremotos y tsunamis registrados en Chile.

Luego del gran terremoto y tsunami de Tohoku en 2011, el gobierno Japonés implementó la utilización de dos niveles de inundación por tsunami para diferenciar el impacto esperado y proponer medidas de mitigación estructural o no estructural según corresponda (Shibayama, et al., 2013). Eventos relativamente recurrentes, con periodos de retorno inferior a 150 años y profundidades de inundación menor a 10 m se conocen como “Tsunami Nivel 1”, y el plan de acción ante ellos es reducir los daños estructurales mediante la construcción de muros costeros, rompeolas, bosques de mitigación o alzamiento del nivel de terreno.

Aquellos eventos con periodo de retorno de varios siglos y profundidades de inundación cercanas a 20 m son considerados como “Tsunami de Nivel 2”. El daño que provocan es catastrófico, ninguna estructura resiste y el único objetivo es salvar la mayor cantidad de vidas posible.

Ejemplo de tsunami nivel 2 sería el gran terremoto y tsunami que impactó la costa oeste de Sumatra, Indonesia en 2004, el cual afectó más de 10 países, registrando una altura de onda máxima de 30 m en la costa, cerca de 300.000 fallecidos y una gran destrucción (USGS, 2004) (Paris, et al., 2006). (Ver Figura 1.1)



Figura 1.1: Devastación en Banda Aceh, Sumatra. Tsunami 2004.

Fuente: (DigitalGlobe, 2004)

Adicionalmente, un evento nivel 1 sería el tsunami de 2010 en Chile. Donde en promedio se registraron alturas de inundación menor a 10 m (Ver Figura 1.2), afectando alrededor de 32.000 viviendas, de las cuales cerca de 8.000 fueron completamente destruidas (RMS, 2011).

Actualmente en Chile no existen normas que regulen la construcción de viviendas (o estructuras en general) en zonas costeras, no existe una evaluación de riesgo o vulnerabilidad, ni tampoco una zonificación clara sobre las profundidades de inundación más probables a las que se podría ver afectado cada sector en caso de ocurrir un Tsunami Nivel 1.

Si bien lo ideal sería que todas las edificaciones tuvieran mejoras estructurales y que frente a un posible tsunami toda la población evacuara, la realidad no lo permite, pues los recursos siempre son escasos y estos deben optimizarse. Además, una evacuación excesiva trae consigo accidentes producto del pánico, como ocurrió con el falso tsunami de Concepción en el año 2005, donde dos personas murieron (Bordas, et al., 2006).

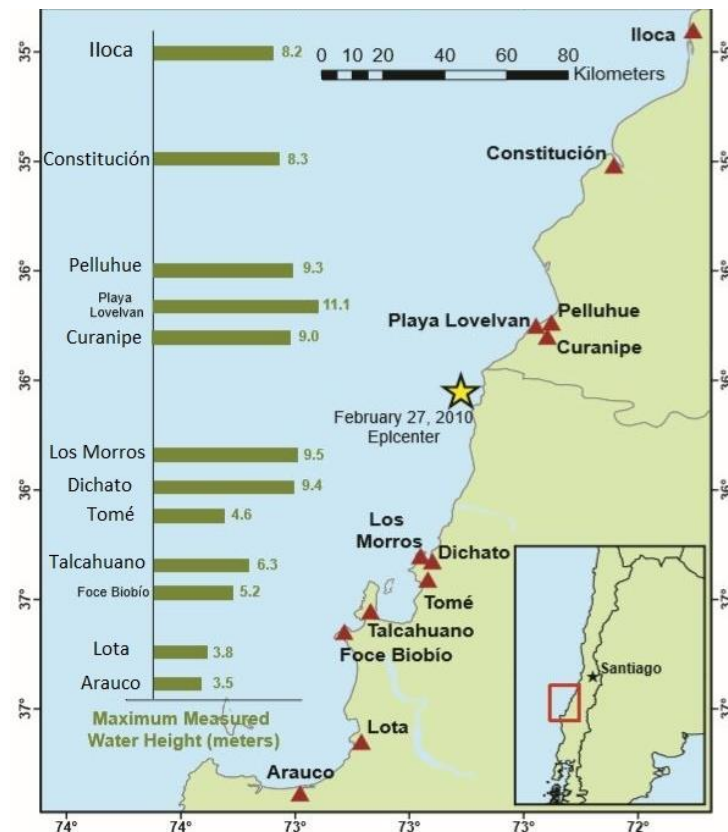


Figura 1.2: Alturas de inundación debido al tsunami de 2010 en Chile.

Fuente: (RMS, 2011)

Por ello, la motivación de este trabajo es identificar las zonas de una localidad que posean mayor probabilidad de ser afectadas por el flujo de un tsunami, así como también, la probabilidad que tienen las edificaciones costeras de ser dañadas o destruidas por la inundación. Información con la cual sería posible implementar medidas de mitigación, realizar mejoras estructurales, planes de alerta temprana, de evacuación, zonificar según profundidades de inundación y finalmente regular el tipo de construcción en la costa.

1.2 Justificación

Analizando la historia sísmica del norte de Chile, es posible observar una gran cantidad de eventos de magnitud superior a 6.0 (Ver Figura 1.3), de los cuales el último ocurrió frente a la costa de Iquique en el año 2014 y registró una magnitud $M_w \sim 8.1$ (Yagi, et al., 2012).

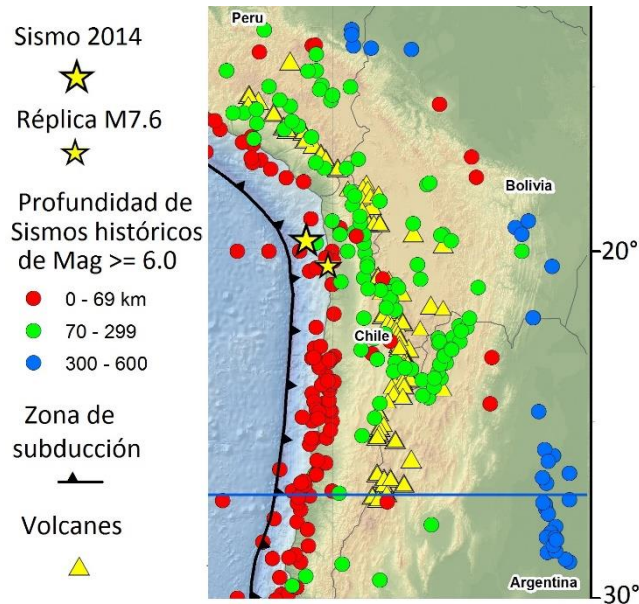


Figura 1.3: Distribución de sismos históricos de Magnitud mayor a 6.0 en la zona norte de Chile.

Fuente: (USGS, 2014).

Dos grandes áreas de ruptura caracterizan los eventos de mayor intensidad de los que se tenga registro en el norte de Chile, siendo ambas generadoras de tsunamis de campo cercano. Una de ellas está ubicada en la costa sur de Perú y ha sufrido 3 terremotos de magnitud cercana a 8.8 en menos de 300 años (1604, 1784 y 1868), por lo que se determina que eventos de este tipo tienen un periodo de retorno de 111 ± 33 años (Comte & Pardo, 1991). En 2001 un sismo $M_w = 8.4$ abarcó más de la mitad del área usual de ruptura de esta falla, por lo cual se espera que de ocurrir un sismo en el futuro cercano éste comenzaría bajo el límite sur del último evento, es decir, entre Ilo y Arica (Ver Figura 1.4).



Figura 1.4: Extensión aproximada de rupturas con magnitud mayor a 8 en la zona norte de Chile y sur de Perú. Fuente: Modificado de Aránguiz, et al., (2014), (USGS, 2014).

La segunda zona comprende desde el sur de Arica hasta el norte de Antofagasta, habiendo fallado completamente en 1877 con una magnitud estimada de $M = 8.8$. En el año 2007 ocurrió una ruptura en el extremo sureste de esta falla, registrándose una magnitud de momento $M_w = 7.7$.

En 2011 un estudio estimó que un terremoto de magnitud de momento cercana a 8.8 podría ocurrir entre la zona sur de Perú y norte de Chile (600 km), basándose en la energía acumulada debido al déficit de desplazamiento relativo de las placas de Nazca y Sudamericana, desde 1877 en Chile y 1868 en Perú y descontando la energía liberada por los sismos descritos anteriormente (Chlieh, et al., 2011).

En Abril de 2014 un evento $M_w = 8.1$ remeció la costa de Iquique, producto del cual se estimó que alrededor de un 20% del total de energía acumulada en la brecha ha sido liberada, provocando que el área de ruptura esperada se divida en dos tramos, uno que se

extienda entre Ilo y Arica y otro que una el sur de la reciente falla y Antofagasta (Aránguiz, et al., 2015) (ver Figura 1.4).

En la Tabla 1.1 se muestran los tsunamis con mayor run up que posee el registro de la NGDC para la zona norte, entre las latitudes -16° y -24°.

Tabla 1.1: Máximos run up por tsunami entre las latitudes -16° y -24°.

Fecha					Mag. Sismo	Origen, parámetros y efectos del Tsunami					
Año	Mes	Día	h	Mn		País	Latitud	Longitud	Alt. máx. agua [m]	Núm. de runups	Muertes
1705	11	26				CHILE	-18.6	-70.2	8	1	
1868	8	13	21	30	8.5 (Ms)	CHILE	-18.6	-71	18	119	25000
1877	5	10	0	59	8.3 (Ms)	CHILE	-21.5	-70.5	24	105	2477

Fuente: (NGDC, 2014)

En los Registros Históricos de Tsunamis que posee el Servicio Hidrográfico Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 1995), los eventos de 1868 y 1877 se califican con una magnitud Richter de 8.8.

Hatori (1968) propone alturas de inundación para el evento de 1877 cercanas a 12 metros en Arica, 6 m en Iquique, 10 m en Mejillones y una máxima de 24 m en Tocopilla.

Kulikov, et al. (2005) presenta una estimación distinta para el evento de 1877, con alturas de inundación de 14 m en Arica y Mejillones. Mientras que para el terremoto y tsunami de 1868 estipula alturas cercanas a 15 m en Arica, 12 en Iquique y 6 en Antofagasta.

Luego del terremoto y tsunami de Chile en 2010, las autoridades locales han aumentado los esfuerzos por educar y orientar a la población general en temas referentes a evacuación y concientización del peligro de tsunami existente en las localidades costeras. También ha incrementado el apoyo a investigadores y centros de investigación con la finalidad de adquirir los conocimientos necesarios para convertir a Chile en una sociedad capaz de afrontar y superar eficientemente los daños que provocan los desastres naturales. Principal ejemplo de ello es el proyecto de investigación denominado “Mejoramiento de tecnologías

para el desarrollo de comunidades resiliente frente a tsunamis”, el que se desprende del programa gubernamental de cooperación internacional SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development) y es auspiciado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST).

Este estudio se enmarca en una pequeña parte de ese proyecto, y pretende aportar al mejoramiento de la comunidad mediante la explicación de una metodología sencilla para realizar una predicción de daños en estructuras utilizando las características hidrodinámicas del flujo de inundación de un modelo de tsunami esperado en la zona norte de Chile.

1.3 Área de Estudio

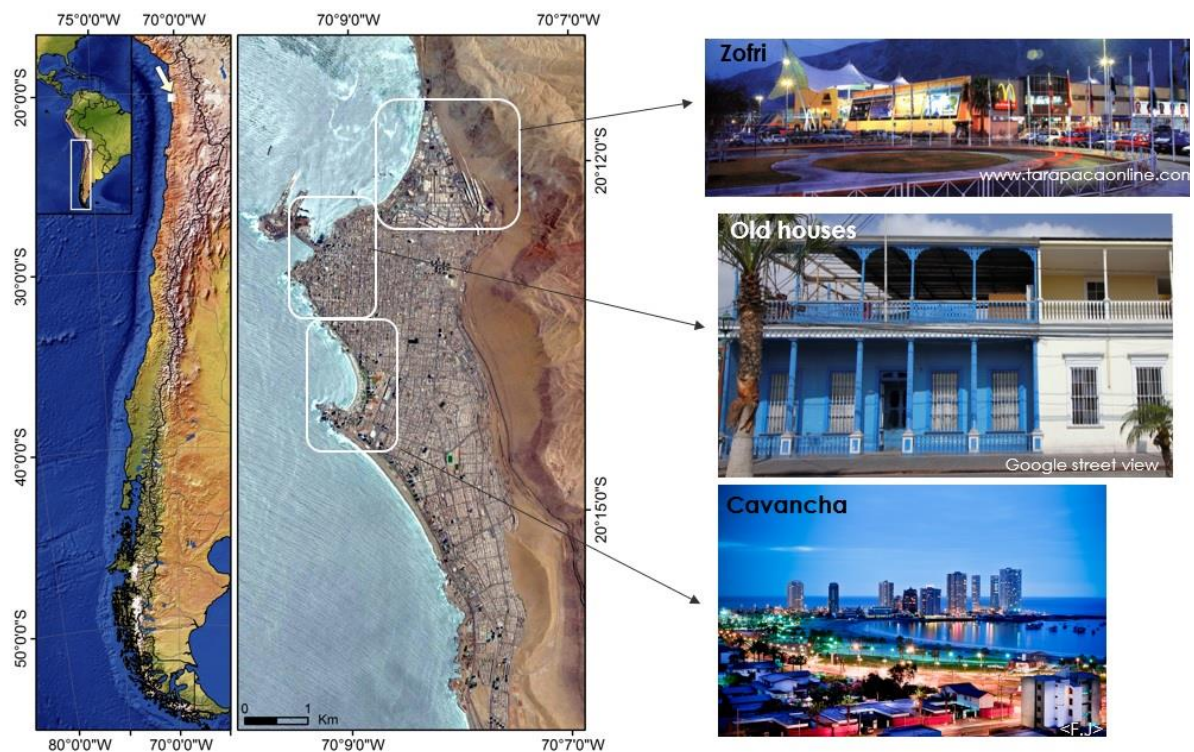


Figura 1.5: Área de Estudio: Iquique-Chile.

La ciudad de Iquique está localizada en la zona norte de Chile, I Región de Tarapacá (Ver Figura 1.5). Posee playas muy atractivas, edificios históricos y un excelente clima durante todo el año, por lo que el turismo tiene una fuerte influencia en la economía. Además cuenta con derechos de puerto libre, por lo cual comercializa a través del océano Pacífico con Perú, Brasil, China, Hong Kong y Taiwán entre otros.

Iquique también cuenta con el puerto pesquero más grande de Chile, el cual cubre un 30% de la demanda nacional de anchoveta y jurel y el 50% y 60% de la producción de harina y aceite de pescado respectivamente.

El área norte de la ciudad es utilizada por Zofri (Zona Franca de Iquique) y se compone principalmente por bodegas de dos o tres pisos con muros de albañilería, popularmente

llamado “barrio industrial”, en el cual se realiza la carga/descarga de camiones y comercio al por mayor. Zofri cubre un área de 240 [ha] de la cual aproximadamente el 70% se encuentra bajo una elevación de 10 [m], lo que la convierte en una zona altamente inundable.

Al sur de la zona franca comienza el sector antiguo de Iquique, lugar en que se encuentran los edificios históricos y donde las viviendas son predominantemente de madera. Desde Playa Cavanca hacia Playa Brava cambia gradualmente la materialidad de las estructuras al tratarse de construcciones más recientes, siendo en su mayoría de hormigón armado o albañilería. La pendiente entre la playa y la cota 10 m es aproximadamente 1.1% en Cavanca y 2.5% en Playa Brava, considerando una línea perpendicular a la costa.

Estas características delimitan el área de estudio entre Zofri y Playa Cavanca.

1.4 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es la estimación del daño estructural en Iquique producto del tsunami generado por un posible evento sísmico de magnitud de momento mayor o igual a $M_w = 8.8$.

La estimación que se pretende aplicar consiste en predecir el nivel de daño estructural que sufrirían distintos tipos de edificaciones en caso de ser impactadas por un tsunami con determinadas características hidrodinámicas y proponer una zonificación que permita desarrollar conciencia sobre el nivel de riesgo al construir en determinados lugares.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran:

- Identificar el tipo de material con el cual están construidas las estructuras en Iquique y generar una base de datos georreferenciada.
- Modelar numéricamente los escenarios de tsunami probables que pudiesen generar las mayores inundaciones en la zona de estudio.
- Crear mapas de inundación a partir de los posibles escenarios de tsunami que afectarían la ciudad.
- Generar mapas de daño estructural que incluyan las zonas de Zofri, el sector antiguo de Iquique, y Cavanca.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Tsunami: Generación, propagación y efecto en la costa

“Tsunami” es un palabra de origen Japonés compuesta por dos vocablos cuyo significado literal es “Ola de Puerto” (津: Tsu: puerto y 波: Nami: ola).

A grandes rasgos, se puede definir un Tsunami como una serie de ondas largas generadas por una perturbación violenta del fondo marino. En el océano posee una longitud de onda del orden de cientos de kilómetros, una amplitud de 30 cm a 60 cm, periodos entre 15 y 60 minutos, y velocidades cercanas a 600 km/h. Mientras que en la costa la velocidad disminuye pudiendo superar los 10 m/s y la altura podría aumentar varios metros.

2.1.1 Generalidades de una onda

Como se explicará más adelante, el tsunami se comporta como una onda, por ello es recomendable recordar ciertos conceptos.

Una onda es la propagación de una perturbación desde el punto en que se originó a través del medio que lo rodea. Las ondas únicamente transportan energía, no materia.

Si descompusiéramos una onda en muchos puntos veríamos que cada punto permanece siempre en la misma ubicación horizontal, aunque su posición vertical varía en el tiempo. Sin embargo, las ondas en el océano son un poco distintas pues las partículas realizan movimientos oscilatorios.

Algunos elementos de la onda de tsunami que se mencionan en este texto son:

- Longitud de onda (L): Distancia horizontal entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas. Posee valores entre 20 y 300 km.
- Amplitud (A): Distancia desde el punto más alto de la onda hasta el eje horizontal de equilibrio.
- Altura (H): Distancia desde el punto más alto al más bajo. Corresponde a dos veces la amplitud.

- Periodo (T): Tiempo empleado por la onda en completar una longitud de onda.
- Velocidad (c): La velocidad a la que se propaga el movimiento ondulatorio depende de la profundidad oceánica.
- Altura de inundación (z): Elevación o cota en la que se registró inundación, medida con respecto al nivel medio del mar.
- Profundidad de inundación: Diferencia local entre la elevación de la marca de agua y la elevación del terreno.
- Refracción: Cambio de dirección de la onda debido a un cambio en la profundidad. Cuando la profundidad oceánica disminuye la velocidad del frente de onda también disminuye y aumenta su altura.
- Difracción: Dispersión de la energía debido a obstáculos, apareciendo pequeños sistemas de ondas.
- Reflexión: Se produce cuando la onda choca contra un obstáculo y se refleja con el mismo ángulo de incidencia.

2.1.2 Generación de Tsunamis

Los tsunamis se generan por perturbaciones del fondo oceánico como terremotos, derrumbes submarinos o erupciones volcánicas, no obstante, en las costas de Chile se gatillan principalmente por sismos de gran magnitud capaces de desplazar verticalmente el fondo del mar una distancia de unos cuantos metros.

En la costa norte de Chile, la placa de Nazca empuja el fondo oceánico a una velocidad constante aproximada de 73 mm/año (Rhea, et al., 2010), sin embargo, su movimiento se encuentra trabado por la fuerza de roce que existe con la placa continental. Si la fuerza producto de la energía de deformación acumulada en la zona interplaca es mayor a la fuerza de roce, podría generarse una ruptura brusca que permita el desplazamiento. A este movimiento se le conoce como terremoto interplaca.

Actualmente la intensidad de un sismo se evalúa mediante la magnitud de momento M_W . Este valor es adimensional y depende de la energía total liberada en un terremoto, el área de ruptura, el desplazamiento promedio y la rigidez del suelo.

La ecuación para estimar esta magnitud viene dada por:

$$M_W = \frac{2}{3}(\log_{10} M_0 - 9.1) \quad (1)$$

El momento sísmico M_0 representa energía, por lo que se mide en unidades de fuerza y desplazamiento (N* m) y su ecuación es:

$$M_0 = \mu Av \quad (2)$$

Donde μ es el módulo de deformación del suelo (30 GPa generalmente), A es el área de ruptura de la falla y v es el desplazamiento promedio de A.

A la deformación inicial de la superficie de agua se le denomina “condición inicial” (Ver Figura 2.1-2) y se considera igual al desplazamiento vertical del fondo marino producto del sismo.



Figura 2.1: Condición inicial de un tsunami
Fuente: (Comunidad andina, PREDECAN, s.f.)

2.1.3 Propagación

La masa de agua levantada intentará inmediatamente volver a la posición de equilibrio, por lo que transmitirá su energía en todas direcciones, generando así la primera onda del tsunami.

La profundidad media en el Océano Pacífico es cercana a los 4 km, muy inferior a los cientos de kilómetros que caracterizan la longitud de onda de un tsunami, por lo cual es posible estudiar su comportamiento mediante la teoría de ondas largas.

Esta teoría de aproximación puede aplicarse a ondas que poseen una profundidad relativa pequeña, es decir, cuando la longitud de onda (L) es al menos 20 veces mayor a la profundidad del agua (h).

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad (3)$$

Para este tipo de ondas, la aceleración vertical de las partículas de agua es despreciable en comparación con la aceleración de gravedad, por lo que el movimiento vertical no tiene efectos en la distribución de presiones, siendo una buena aproximación asumir que la presión es hidrostática.

Toda onda tiene un efecto orbital que alcanza una profundidad igual a la mitad de su longitud de onda, es decir, el agua siente la influencia de la superficie hasta una profundidad H igual a:

$$H \leq \frac{L}{2} \quad (4)$$

Lo que aplicado a la onda del tsunami provoca que el efecto orbital sea constante en toda la profundidad. Por ello se asume que la velocidad horizontal es verticalmente uniforme. Así, la velocidad de propagación del tsunami depende únicamente de la profundidad oceánica y puede ser calculada como:

$$c \leq \sqrt{g \cdot h} \quad (5)$$

Donde c es la Celeridad, g es la aceleración de gravedad (9.81 m/s^2) y h corresponde a la profundidad media del fondo marino. Lo que daría una velocidad de propagación aproximada en el Océano Pacífico de 713 km/h.

Cuando se arroja una piedra al agua en reposo, es posible observar que se propagan varias ondas cuya diferencia de velocidades provoca que se vayan distanciando entre sí. Este

efecto se conoce como “dispersión” y se produce por la separación de ondas de una misma frecuencia.

La distancia entre el lugar de origen del tsunami y el punto en que debe comenzar a considerarse el efecto de la dispersión en la propagación, se obtiene como el producto entre la velocidad de la onda ($\approx 600 \text{ km/hr}$) y el tiempo requerido para que el primer grupo de ondas se retrase una distancia igual a la longitud de onda. Es decir, para tsunamis de campo cercano, como los que afectan mayormente a Chile ($\approx 100 \text{ km}$ entre la fosa oceánica y la costa), el efecto de dispersión se desprecia.

Las ondas lineales se propagan en una sola dimensión o rayo y obedecen el principio de superposición lineal, es decir, si dos o más ondas viajeras se están moviendo a través de un medio, la función de onda resultante en cualquier punto es la suma algebraica de las funciones de las ondas individuales. Un ejemplo sencillo para visualizar el concepto de onda lineal (o no lineal) es mediante la luz. Una onda lineal estaría representada por el rayo de luz de un láser y una onda no lineal sería la luz que emana una lámpara. Así, en el océano la onda de tsunami se considera lineal y al acercarse a la costa se trata como una onda no lineal.

2.1.4 Modificación y efectos del tsunami en la costa

Cuando la onda de tsunami se acerca a la costa, la linealidad deja de ser representativa y el estudio comienza a considerar la onda como no lineal, además, los conceptos de reflexión, refracción y difracción comienzan a tomar importancia. La pendiente del fondo marino, así como el ángulo de incidencia del frente de onda con respecto a la costa influyen fuertemente en la altura que alcanzará. La topografía por su parte, afecta a la velocidad, la profundidad y la cota de inundación máxima.

Una costa con cambios de pendiente bruscos hará que la onda de tsunami pierda gradualmente la energía cinética y potencial, por lo que la cota de inundación será menor. En cambio, una costa con pendiente suave sólo presentará pérdidas de energía por roce, provocando que la energía del tsunami sea transmitida en su totalidad, dando paso así a mayores alturas de inundación.

Dependiendo de las profundidades y las velocidades que presente el flujo de inundación, los daños estructurales pueden llegar a ser realmente devastadores, arrasando edificaciones desde sus cimientos.

La Figura 2.2 muestra algunos ejemplos del nivel de daño que provocó el tsunami de 2010 en Chile.



Figura 2.2: Daños del tsunami de 2010 en Chile

A continuación se definen conceptos claves para caracterizar el área de inundación por tsunami.

- Inundación horizontal: Distancia horizontal inundada medida desde la línea de costa y generalmente medida en forma perpendicular a la costa.
- Máxima intrusión horizontal: máximas distancias de inundación horizontal alcanzadas para una zona costera determinada. Es posible que su determinación considere más de un evento de tsunami, en cuyo caso corresponderá a la envolvente de las Líneas de Inundación de eventos individuales.
- Línea de Inundación, $I(x, y)$: Lugar geométrico de todos los puntos correspondientes a la máxima intrusión horizontal del tsunami. Es posible que su determinación considere más de un evento de tsunami, en cuyo caso corresponderá a la envolvente de las Líneas de Inundación de eventos individuales.
- Runup, $R(x, y)$: Diferencia entre la cota del punto de máxima intrusión horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami NRE . Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R(x, y) = z(I(x, y)) - NRE \quad (1)$$

Se debe notar que para una zona de estudio dada, el valor de runup no es único, ya que es función de la topografía. En lugares donde la cota no está medida en relación a la máxima intrusión horizontal, esta diferencia se llama altura o cota de inundación. Su unidad de medida es en metros.

- Distribución de Runup: conjunto de valores que alcanza el runup a lo largo de una zona costera determinada.
- Altura o Cota de Inundación, $h(x, y)$: Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido en cada punto durante el evento y el nivel de referencia del evento NRE relevante al tsunami para una distancia de inundación específica. Su unidad de medida es en metros.

- Profundidad de Inundación, $d(x, y)$: Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido durante el evento y la cota de terreno existente en el mismo punto. Su unidad de medida es en metros. De acuerdo a las definiciones anteriores, puede ser estimado como:

$$d(x, y) = h(x, y) - z(x, y) \quad (2)$$

- Velocidad del flujo, $\vec{U}(x, y, t)$: Vector de velocidad del flujo en cada punto del dominio. Es una cantidad variable en el tiempo, tanto en sentido como magnitud. Su unidad de medida es en metros por segundo.
- Tiempo de arribo del tsunami: Tiempo de llegada de la primera onda del tsunami. Los mapas de tiempo de arribo consideran el minuto en que se produce el primer contacto entre el flujo de agua y la tierra.

2.2 Métodos de estimación de daños

2.2.1 Estimación de daños según Shuto (1993)

Shuto (1993) trabajó con registros históricos de tsunamis en Japón, como por ejemplo, del Gran tsunami de Meiji Sanriku 1896, que inundó hasta una elevación de 38 metros sobre el nivel medio del mar dejando un total de 22.000 fallecidos. También trabajó con algunos registros extranjeros, como del tsunami de Chile en 1960.

De los datos empíricos que extrajo, definió una intensidad de tsunami “ i ” como función de la altura local de inundación “ H ”:

$$i = \log_2 H \quad (12)$$

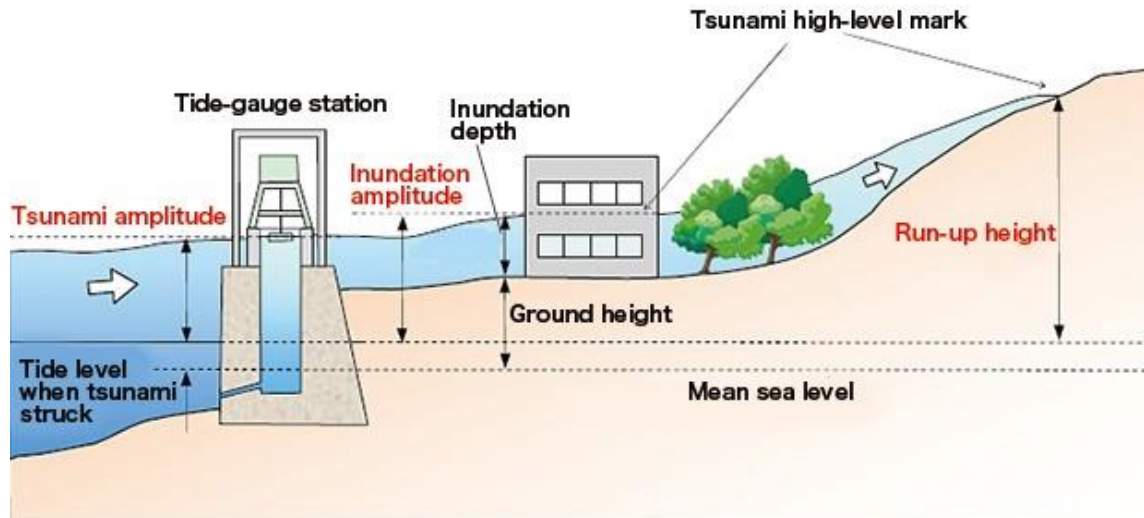


Figura 2.3: Medidas de un tsunami
Fuente: (Japan Weather Association, n.d.)

También definió la probabilidad de daño “ P_D ” que podían sufrir estructuras como, casas, edificios o botes de pesca. La estimación de daños de casas es la más utilizada y está dada por:

$$P_D = \frac{a + b + c/2}{a + b + c + d} \quad (13)$$

Donde a, b, c y d son el número de casas arrastradas, completamente destruidas, con daños moderados o sólo inundadas, respectivamente.

Finalmente, creó una escala de intensidad de tsunami para clasificar el grado de daño que sufrirían distintas estructuras (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Escala de intensidad y daño de tsunami propuesta por Shuto

Intensidad	0	1	2	3	4	5
Casa de madera	Daño Parcial	Destruida				
casa de piedra	Sobrevive		Destruida			
Edificio de hormigón armado	Sobrevive			Destruido		
Altura maxima de Runup [m]	1	2	4	8	16	32

Fuente: Modificada de Shuto (1993)

La escala de intensidad y daño creada por Shuto (1993) fue ampliamente utilizada por el gobierno de Japón para tener una medida de estimación de daño estructural, y por otros autores como base para la creación de nuevas escalas de intensidad de tsunami.

2.2.2 Estimación de daños según Papadopoulos (2001)

Papadopoulos & Imamura (2001) propusieron una escala de intensidad de tsunami de 12 grados, la cual está relacionada con los 12 grados de intensidad sísmica de la escala de Mercalli.

Explicaron que esta escala de intensidad de tsunami poseía independencia de parámetros físicos, ya que no consideraba la altura de la onda, la dirección del flujo, ni la duración de la perturbación del agua. Tenía una gran sensibilidad, ya que incorporaba un adecuado número de grados para describir pequeñas diferencias en el efecto del tsunami, y por último, poseía una descripción detallada del impacto humano, ambiental y estructural que podría provocar cada grado de intensidad (Ver Tabla 2.2).

Tabla 2.1: Escala de intensidad y daño de tsunami propuesta por Papadopoulos

Escala de intensidad de tsunami			
Intensidad	Efecto en personas	Efecto en objeto	Daño de estructuras
I Indetectable	Indetectable incluso bajo las más favorables circunstancias	Sin efectos	Sin daños
II Ligeramente detectable	Detectable por algunas personas a bordo de pequeños barcos. No observable desde la costa.	Sin efectos	Sin daños
III Débil	Detectable por personas a bordo de pequeños barcos. Observable por algunos desde la costa.	Sin efectos	Sin daños
IV Observado en gran medida	Detectable por todos a bordo de barcos chicos y algunos a bordo de barcos grandes. Observable por casi	Movimiento ligero de algunos barcos pequeños en la costa	Sin daños

		todos desde la costa.		
V	Fuerte	Detectable por todos a bordo de barcos grandes. Observable por todos desde la costa. Algunas personas se asustadas corren a tierras más elevadas	Muchos barcos pequeños se mueven fuertemente en la costa, algunos chocan entre sí. Leves inundaciones en suelos cultivables	Leves inundaciones fuera de las instalaciones (ej.: Jardines)
VI	Ligeramente dañino	Muchas personas se asustan y corren a tierras más elevadas	Gran parte de los barcos pequeños se mueven violentamente en la costa y chocan entre sí con mucha fuerza.	Daño e inundaciones en algunas estructuras de madera. Las edificaciones de albañilería resisten
VII	Dañino	Muchas personas se asustan y corren a tierras más elevadas	Muchos barcos pequeños dañados. Algunos barcos grandes se mueven violentamente. Objetos de tamaño variado se vuelcan y van a la deriva. Algunas balsas de acuicultura son arrastradas por el flujo.	Muchas estructuras de madera dañadas, algunas destruidas o arrasadas. Daños leves e inundación en algunas edificaciones de albañilería
VIII	Muy dañino	Todas las personas escapan a tierras elevadas, algunas son arrastradas por el flujo	La mayor parte de los barcos pequeños están dañados, muchos fueron arrastrados. Algunos barcos grandes se mueven violentamente y chocan entre ellos. Objetos de gran tamaño van a la deriva. Extensas inundaciones. Muchas balsas de acuicultura son arrastradas y algunas parcialmente dañadas	La mayor parte de las estructuras de madera destruidas o arrasadas. Daños de grado 2 en algunas edificaciones de albañilería. La mayor parte de las edificaciones de hormigón armado resisten sin daño, algunas presentan daños de grado 1 e inundación

IX Destructivo	Muchas personas son arrastradas por el flujo	La mayor parte de los barcos pequeños son destruidos o arrasados. Muchos barcos grandes se mueven violentamente, algunos destruidos. La mayor parte de las balsas de acuicultura son arrasadas y muchas parcialmente dañadas	Daños de grado 3 en muchas edificaciones de albañilería. Algunas estructuras de hormigón armado sufren daños de grado 2
X Muy destructivo	Pánico general. La mayor parte de las personas son arrastradas	Casi todos los barcos grandes se mueven violentamente en tierra, muchos están destruidos o collisionan con las edificaciones. Pequeñas rocas del fondo marino se mueven tierra adentro. Los autos se vuelcan y van a la deriva. Derrames de petróleo e incendios. Extensos hundimientos de suelo	Daños de grado 4 en muchas edificaciones de albañilería. Algunas estructuras de hormigón armado sufren daños de grado 3.
XI Devastador		Grandes incendios. Grandes rocas del fondo marino se mueven tierra adentro. Autos y objetos grandes se vuelcan y van a la deriva.	Daños de grado 5 en muchas edificaciones de albañilería. Algunas estructuras de hormigón armado sufren daños de grado 4, muchas sufren daños grado 3.
XII Totalmente devastador			Prácticamente todas las edificaciones de albañilería son destruidas. La mayor parte de las estructuras de hormigón armado sufren daños de grado 3.

Fuente: (Papadopoulos & Imamura, 2001)

Finalmente, crearon una correlación entre la escala propuesta por ellos y la escala de intensidad y altura de inundación propuesta por Shuto (1993) (Tabla 2.3)

Tabla 2. 2 Relación entre la intensidad propuesta por Papadopoulos y la propuesta por Shuto

Papadopoulos 2001	Shuto 1993	
Intensidad	Intensidad	H (m)
I - V	0	<1.0
VI	1	2
VII - VIII	2	4
IX - X	3	8
XI	4	16
XII	5	32

Fuente: (Papadopoulos & Imamura, 2001)

2.2.3 Estimación de daños según Papathoma (2003)

El modelo de evaluación de vulnerabilidad ante tsunamis de Papathoma fue desarrollado utilizando información detallada sobre impactos de tsunamis históricos, estudios post-tsunami y evaluaciones de daño de edificaciones. Como su finalidad es identificar y cuantificar la vulnerabilidad a un tsunami hipotético, no considera factores como la región de origen, dirección de aproximación de la onda, batimetría, configuración costera o procesos hidrodinámicos. Éste es el primer método que no generaliza la estimación de daños, sino todo lo contrario, realiza un análisis independiente para cada lugar estudiado, es decir, analiza y clasifica individualmente cada edificación y espacio abierto dentro de la zona de inundación (Papathoma et al. (2003), Papathoma & Dominey-Howes, (2003)).

El proceso de evaluación consta de 4 pasos:

- I. Identificación de la zona de inundación y de las zonas de profundidad de inundación:
La zona de inundación corresponde al área entre la línea de la costa y la curva de nivel correspondiente a la máxima altura de inundación del tsunami. Esta cota se define a través del peor escenario posible, por ejemplo, suponiendo que se repetirá un tsunami de altura similar al ocurrido hace un siglo atrás.
Las zonas de profundidad de inundación se obtienen subdividiendo la zona de inundación cada ciertas curvas de nivel, pues se entiende que la profundidad de agua del tsunami variará con la elevación del suelo. Además, se asume que a mayor profundidad de inundación, mayor vulnerabilidad.
- II. Identificación de los factores que afectan la vulnerabilidad de edificaciones y personas.
Recolección de estos datos:
Existen varias características que pueden aumentar la vulnerabilidad de las edificaciones dentro de la zona de inundación y deben evaluarse para cada una de las construcciones de manera individual. (Anexo 2.1)
- III. Cálculo de la vulnerabilidad de edificaciones individuales dentro de la zona de inundación usando un método de evaluación multi-criterio:

Los datos obtenidos en el punto anterior se estandarizan de la siguiente forma:

$$\text{Puntaje estandarizado de } \alpha = \text{puntaje de } \alpha / \text{puntaje máximo}$$

La vulnerabilidad de cada edificio (BV) está dada por:

$$BV = 7 \cdot a + 6 \cdot b + 5 \cdot c + 4 \cdot d + 3 \cdot e + 2 \cdot f + 1 \cdot g \quad (14)$$

Donde a, b, c, d, e, f y g son los puntajes estandarizados del material del edificio; las barreras del edificio; el número de pisos del edificio; el entorno de construcción; la condición de la planta baja del edificio; la defensa contra el mar en frente del edificio y; la anchura de la zona intertidal en frente del edificio, respectivamente.

La vulnerabilidad humana (HV) de cada edificio está dada por:

$$HV = BV \cdot P \quad (15)$$

Donde P: Población.

IV. Presentación de la vulnerabilidad de edificaciones y de la vulnerabilidad humana.

La distribución de la vulnerabilidad se muestra a través de un sistema de información geográfica (GIS), en el que previamente se han introducido todas las condiciones y parámetros evaluados.

La Figura 2.4 muestra el resultado de una evaluación de vulnerabilidad de edificios utilizando este método. La zona de inundación corresponde al área comprendida entre la línea de costa y la última curva de nivel. Las zonas de profundidad de inundación están divididas en High, Medium, Low y Very Low ID Zone. La vulnerabilidad de cada una de las edificaciones dentro de la zona de inundación está clasificada en High, Medium y Low Vulnerability.



Figura 2.4: Ejemplo de evaluación de vulnerabilidad según Papathoma
Fuente: (Papathoma & Dominey-Howes, 2003)

2.2.4 Estimación de daños según Koshimura (2009)

Koshimura, et al. (2009) propusieron la utilización de curvas de fragilidad como un nuevo método para evaluar el daño estructural sufrido por una localidad impactada por tsunami. Estas curvas son distribuciones de probabilidad Normal o Lognormal que representan la probabilidad de ocurrencia de daño acumulada, dadas por las ecuaciones (16) o (17).

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dt \quad (16)$$

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi t} \exp \left(-\frac{(\ln t - \lambda)^2}{2\xi^2} \right) dt \quad (17)$$

Donde $P_D(x)$ representa la probabilidad de daño estructural o la tasa de fatalidad, Φ representa la función de distribución normal o lognormal estandarizada (con media igual a 0 y desviación estándar igual a 1), x (o $\ln x$) se evalúa con las características hidrodinámicas del flujo de inundación (profundidad de inundación, velocidad del flujo y fuerza hidrodinámica), μ (o λ) es la media y σ (o ξ) es la desviación estándar.

Suponiendo que existen dos ciudades idénticas sometidas a un mismo evento y donde la única diferencia es que las edificaciones de la ciudad "A" son en su mayoría de materiales livianos (madera) y las estructuras de la ciudad "B" son principalmente de albañilería. La curva de fragilidad hipotética de cada ciudad sería similar a las que se muestran en la Figura 2.5.

De esto es posible extraer, por ejemplo, que de todas las estructuras afectadas por una inundación local de 3 [m], en las ciudades "A" y "B" colapsarían un 45% y 20% de ellas respectivamente. Esta información, cruzada con un mapa de inundación nos muestra cuales son las zonas más vulnerables de la localidad (estructuralmente).

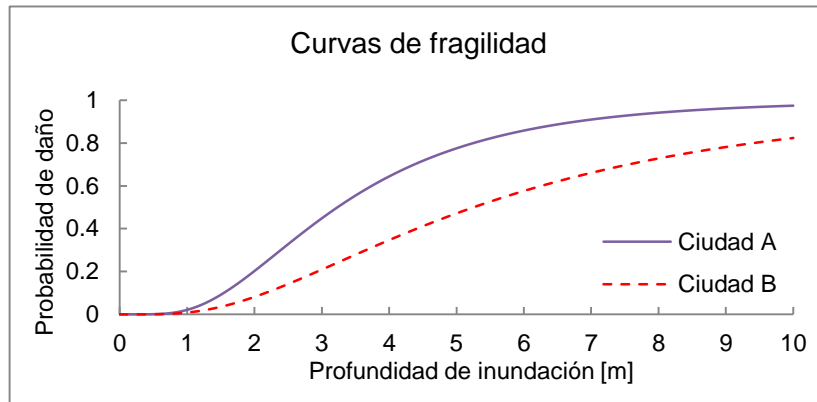


Figura 2.5: Curvas de fragilidad hipotéticas

En la Figura 2.6 se observan las curvas de fragilidad para cada uno de los parámetros hidrodinámicos del flujo de inundación, desarrolladas por Koshimura, et al. (2009) para estudiar los daños causados por el gran tsunami de Sumatra-Andaman en 2004.

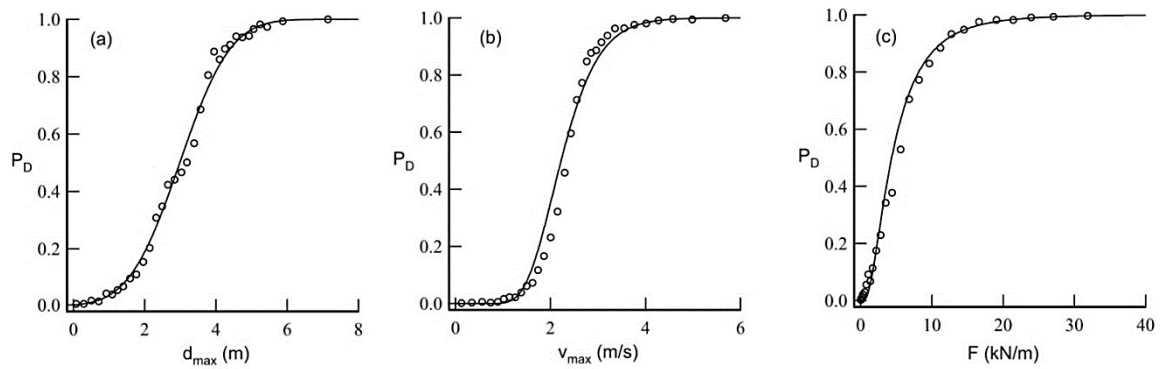


Figura 2.6: Curvas de fragilidad para el tsunami de 2004 en Banda Aceh, Indonesia. Fuente: Koshimura, et al. (2009)

Existen tres métodos principales y muy utilizados para construir curvas de fragilidad:

- Mediante teledetección por satélite y modelación numérica
- Mediante teledetección por satélite y trabajo de campo
- Mediante teledetección por satélite, modelación numérica y trabajo de campo

Sin embargo, antes de describir los distintos procedimientos es necesario comprender el enfoque con que se utilizan estas herramientas,

Teledetección por satélite:

En la actualidad existen satélites comerciales dedicados a tomar fotografías georreferenciadas de cualquier parte del planeta a muy alta resolución, ejemplo de ello son los satélites QuickBird, IKONOS-2 o WorldView-2, los que poseen una resolución espacial de 0.65 m, 0.82 m y 2 m respectivamente.

La teledetección por satélite se basa en estudiar el cambio en el estado del techo de los edificios mediante comparación de imágenes pre y post tsunami. En áreas pequeñas es posible evaluar el cambio mediante inspección visual, sin embargo, para localidades de mayor extensión suele trabajarse con análisis espectrales, automatizando la evaluación.

Para imágenes con buena resolución ($0.6 \times 0.6 \text{ m}^2$), Gokon, et al., (2010) propone cuatro niveles de clasificación de daño, los que visualmente pueden estudiarse con la comparación del estado de los techos en áreas puntuales, como por ejemplo, las delimitadas por círculos en la Figura 2.7. El criterio utilizado para la clasificación se explica en la Tabla 2.4.



Figura 2.7: Niveles de daño por teledetección.

Fuente: Gokon, et al., (2010)

Tabla 2.4: Niveles de daño mediante clasificación por satélite.

Clasificación	Criterio
Sobrevivió	No se observan cambios en la forma antes y después del tsunami
Mayor	Es posible observar un pequeño cambio en techo al comparar las imágenes pre y post tsunami
Colapso	Se observa claramente que una gran parte del techo desapareció
Arrasado	Sólo quedan las fundaciones de la estructura

Fuente: Gokon, et al., (2010)

Cuando la resolución espacial del set de imágenes es menor ($1 \times 1 \text{ m}^2$), se dificulta la evaluación detallada de las estructuras, por lo que Suppasri, et al., (2011) propone una clasificación de daños utilizando sólo dos niveles (Ver Figura 2.8).

- Destruída: Estructuras colapsadas en las que el techo ha desaparecido.
- Sobreviviente: Estructuras sin daño o con daño leve.



Figura 2.8: Niveles de daño por teledetección.

Fuente: Suppasri, et al., (2011)

Cabe destacar que el análisis por teledetección sólo permite evaluar el estado de los techos, por lo cual es muy probable que edificaciones con daños en el primer piso no sean correctamente evaluadas si sus techos se encuentran en buen estado.

Trabajo de campo:

En lo que a calidad de información se refiere es por lejos el método más completo. Permite registrar las alturas de inundación y clasificar el daño en tantos niveles como el estudio posterior lo requiera, además de incluir variables como el número de pisos y la materialidad. Dos aspectos negativos que posee son:

- La dificultad de realizar una evaluación en los días inmediatamente posteriores al evento tsunamigénico, pues en muchos casos los caminos de acceso a la localidad se encuentran bloqueados (resultado del sismo) y/o los servicios básicos están fuera de funcionamiento.
- Se requiere de mucho tiempo y capital humano, lo que se traduce en una fuerte inversión monetaria. Además, al tratarse de una inspección netamente visual el grupo de trabajo debe tener un mismo criterio evaluador.

Gokon, et al., (2010) propuso seis niveles de daño para realizar una clasificación mediante inspección en terreno (Ver Figura 2.9). El criterio de clasificación utilizado se resume en la Tabla 2.5:



Figura 2.9: Niveles de daño mediante encuestas de campo (Gokon).

Fuente: Gokon, et al., (2010).

Tabla 2.5: Niveles de daño mediante clasificación en terreno (Gokon).

Clasificación	Criterio
Sin daños	No presenta inundación
Inundación leve	Sólo las ventanas sufrieron daño
Moderado	Las paredes presentan daño
Mayor	Se destruyó una pequeña parte de la edificación
Colapso	Se destruyó una gran parte de la edificación
Arrasado	Sólo quedan las fundaciones de la estructura
Desconocido	No es posible clasificar

Fuente: Gokon, et al., (2010).

Más tarde ese mismo año Murao, et al., (2010) propuso cuatro niveles de daño para realizar la clasificación mediante inspección física (Ver Figura 2.10). La Tabla 2.6 explica el criterio utilizado.



Figura 2.10: Niveles de daño mediante encuestas de campo (Murao).

Fuente: Murao, et al., (2010)

Tabla 2.6: Niveles de daño mediante clasificación en terreno (Murao).

Clasificación	Criterio
Sin daño	No se observan daños
Daño moderado	No se observan daños estructurales. Reusable.
Daño grave	Posee daños estructurales. Inutilizable
Daño total	Daño estructural completo

Fuente: Murao, et al., (2010)

Además, incorporó una clasificación estructural para cada edificación según las combinaciones más recurrentes entre material de construcción y número de pisos: (Figura 2.11 y Tabla 2.7)

Tabla 2.7: Clasificación de edificaciones (Murao).

Tipo	Edificaciones livianas	Edificaciones reforzadas
Estructura (material)	Albañilería, bloque, madera	Hormigón armado, acero
Número de pisos	Uno o dos	Dos o más.
Utilización	Habitacional o comercial	Público, comercial, oficinas

Fuente: Murao, et al., (2010)



Figura 2.11: Clasificación de estructuras (Murao).

Fuente: Murao, et al., (2010)

Suppasri , et al., (2012a) (2012b) utilizó la información recolectada por el Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo de Japón (MLIT) para el gran tsunami de Japón en 2011, la que considera seis niveles de daño estructural, las mismas utilizadas por Gokon, et al., (2010), y 4 clases de materialidad (Madera, albañilería, Hormigón armado, y acero).

Modelación Numérica:

La modelación numérica se utiliza para obtener las características hidrodinámicas del flujo de inundación del tsunami, es decir, la profundidad de inundación, velocidad, y fuerza hidrodinámica.

Para realizar la estimación se utilizan los valores máximos de inundación y velocidad, sin importar el tiempo de ocurrencia, por lo que este tipo de mapas siempre muestra una inundación mayor a la que realmente ocurre en un sólo instante de tiempo. La extracción de las mayores magnitudes registradas se realiza porque, independiente del momento en que ocurra, en algún intervalo durante la inundación las edificaciones se verán afectadas a ese flujo y la finalidad es evaluar su comportamiento ante el peor escenario.

Para validar el modelo, se compara la profundidad de inundación que éste entrega con los datos recaudados en las encuestas de campo o por registros de mareógrafos cercanos.

Finalmente, pero no menos importante, es la utilización de softwares GIS. Estos se utilizan para:

- Clasificación de estructuras: Cuando no existen planos de edificaciones georreferenciados, se puede realizar un levantamiento utilizando softwares de uso libre como Google Earth o de pago como GIS, en combinación con estudios de campo o Google Street View. El procedimiento es simple y consiste en representar las estructuras con un polígono de atributos comunes para cada categoría. Lo más sencillo es utilizar el nombre de la figura como atributo, nombrando del mismo modo todos los edificios con características comunes (ej: todos los edificios de madera de un piso poseerán polígonos llamados "M1").
- Integrar la información hidrodinámica del flujo de inundación y limpiar los datos. Muchas veces los modelos numéricos entregan resultados del orden de centésimas o con signos contrarios al utilizar elevaciones batimétricas, por lo que la manipulación y extracción de la inundación sólo en suelo seco es un punto fuerte de GIS.
- Una de las formas de visualizar y manipular los datos en GIS es mediante tablas, lo que permite correlacionar en el espacio el daño que sufrió cada una de las estructuras con las variables hidrodinámicas del tsunami modelado.
- Por último, a través de mapas permite visualizar la extensión y distribución del daño según los niveles que uno quiera estudiar.

A continuación se explicarán los tres métodos más recurrentes en la construcción de curvas de fragilidad para estimar daños por tsunamis.

Construcción de curvas de fragilidad mediante teledetección por satélite y modelación numérica:

Un ejemplo de estimación de daños utilizando este método se puede encontrar en el trabajo desarrollado por Suppasri, et al., (2011), en el cual desarrollan las curvas de fragilidad para Tailandia luego de haber sido impactada por el tsunami que afectó el Océano Índico en 2004.

El procedimiento se podría resumir en los siguientes 8 pasos:

- i. Clasificar mediante teledetección el daño de cada una de las viviendas dentro de la zona de inundación del tsunami.
- ii. Obtener para cada edificación, la profundidad de inundación máxima (d_{max}), velocidad máxima (v_{max}) y máxima fuerza hidrodinámica ejercida por el flujo (F_{max}) (mediante modelación numérica).

La máxima fuerza hidrodinámica está definida como la máxima fuerza de arrastre por unidad de ancho de la estructura (kN/m) y se obtiene de la siguiente ecuación:

$$F_{max} = \frac{1}{2} C_D \rho \max\{v^2 d\} \cdot 10^{-3}$$

Donde: C_D es el coeficiente de arrastre (normalmente 1), $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (18) (densidad del agua) y v y d son la velocidad (m/s) y profundidad (m) de flujo que afectan a la edificación en cada intervalo de tiempo.

- iii. Utilizar un sistema de información geográfica para ensamblar los datos obtenidos en los pasos anteriores y crear relaciones entre: $d_{max} - \text{daño}$, $v_{max} - \text{daño}$ y $F_{max} - \text{daño}$ para cada una de las estructuras afectadas.
- iv. Crear un histograma apilado que relacione el número de edificaciones destruidas (en la parte superior) y sobrevivientes (en la base), en función de los 3 parámetros hidrodinámicos. Utilizar rangos que posean una cantidad similar de estructuras.

- v. Calcular la probabilidad de daño dentro cada rango

$$P_D = \frac{n^\circ \text{ de estructuras destruidas}}{n^\circ \text{ de estructuras del rango}} \quad (19)$$

Calcular la mediana de cada rango y graficar la relación entre cada variable hidrodinámica y su probabilidad de daño asociada.

- vi. Graficar x (o $\ln x$) vs Φ^{-1} en papel de probabilidad normal (o lognormal), recordando que "x" corresponde a la mediana de cada rango y Φ^{-1} es la inversa de la función de probabilidad estandarizada, con $P(x)$ ya conocido, media igual a 0 y desviación estándar 1.
- vii. Realizar un ajuste de mínimos cuadrados y obtener la media (punto en que la recta corta el eje de las ordenadas) y la desviación estándar (coeficiente angular) dadas por la siguiente ecuación:

$$x = \sigma \Phi^{-1} + \mu \quad (20)$$

- viii. Construir las curvas de fragilidad utilizando la función (normal o log normal) que más se ajuste a cada parámetro.

Se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente con la excepción de que sólo se podrá trabajar con la profundidad de flujo registrada en terreno.

Mas, et al., (2012) desarrolló curvas de fragilidad en Dichato para estimar el daño que causó el tsunami de 2010 en Chile.

Al procedimiento descrito en el método anterior se le debe modificar el segundo paso (paso "ii") de la siguiente manera:

ii. Obtener un registro con las profundidades de inundación y delimitar el área inundada, con una separación entre puntos de máximo 100 metros. Realizar una interpolación para generar un mapa con la distribución de profundidades.

Esta aplicación se utiliza cuando no es posible obtener la información topobatimétrica del área de estudio y por consiguiente la modelación numérica se hace imposible.

Construcción de curvas de fragilidad mediante teledetección por satélite, modelación numérica y trabajo de campo

Este tipo de estimación de daños es el más completo, pues usualmente el trabajo de campo se utiliza para realizar una clasificación de materialidad y daño, además de registrar profundidades de inundación para posteriormente validar el modelo numérico.

Koshimura, et al., (2009) utilizó un procedimiento similar para estimar el daño estructural en Banda Aceh, Indonesia, luego del terremoto y tsunami de Sumatra – Andaman en 2004.

Se utiliza el procedimiento descrito para la “Construcción de curvas de fragilidad mediante teledetección por satélite y modelación numérica”, pero al disponer de mayor información es posible modificar levemente el primer paso (paso “i”) de la siguiente forma:

- i. Clasificar el daño estructural utilizando, por ejemplo, las categorías descritas en las tablas 2.4, 2.5 o 2.6.
Clasificar la materialidad y/o el número de pisos de las edificaciones según lo planteado en la tabla 2.7 o según lo planteado por Suppasri , et al., (2012a) (2012b).

3 MATERIALES Y MÉTODO

3.1 Mapas de inundación por tsunami

Para crear un mapa con el flujo de inundación que provocaría un posible evento tsunamigénico es necesario modelar numéricamente la generación, propagación e inundación de éste.

A continuación se exponen las etapas que hacen posible la generación de mapas de alturas de inundación, profundidad de flujo, área inundable, velocidad y tiempos de arribo de un tsunami.

3.1.1 Elección de un evento tsunamigénico probable

Para determinar el evento de tsunami a modelar, es posible evaluar dos líneas de información. La primera supone que podría ocurrir un tsunami de magnitud similar al máximo del que se tenga registro. La segunda alternativa analiza los terremotos históricos y los escenarios de futuros sismos probables para modelar y evaluar numéricamente el tsunami que estos generarían. Para ellos se estudian:

- Registro histórico de tsunamis: Puede utilizarse la base de datos de tsunami del National Geophysical Data Center (<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>). También trabajos como tsunamis in Peru-Chile (Lockridge, 1985), Catalog of Tsunamis in the Pacific (Soloviev et al, 1992) y el Registro histórico de tsunamis de SHOA (http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf).
- Registro histórico de sismos: Existe una base de datos de NGDC con registro de sismo a nivel mundial (<http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml>). USGS NEIC también posee una base de datos (<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>).

- Finalmente, lo que suele realizarse es un trabajo multidisciplinario junto a profesionales con conocimiento y experiencia en eventos sísmicos, y evaluar los tsunamis que se generaría con las posibles rupturas que ellos estudian y proponen.

En base al potencial sísmico calculado por Chlieh, et al., (2011) para la zona de subducción en el norte de Chile, Yagi, et al., (2014) propuso un escenario de ruptura con una distribución de slip que obedece a la premisa de que fallaría un área correspondiente a la del terremoto de 1877 más la porción sur de la falla de 1868. Por ello, el evento de diseño viene dado por un sismo de magnitud de momento $M_w = 8.81$ y slip máximo cercano a 7 [m].

Tanto la magnitud del sismo como la extensión del área inundada por el terremoto y tsunami de Japón oriental en el año 2011 son muy similares a las del terremoto y tsunami de Jogan en 869, por lo cual se podría relacionar que eventos como éste, de magnitud $M_w = 9.0$, podrían poseer un periodo de retorno cercano a 1100 años (Minoura, et al., 2001). Sin embargo, esta conjetura sólo fue posible después de ocurrido el actual evento, antes del cual se estimaba que un sismo de magnitud cercana a 8.0 tendría un 99% de probabilidad de ocurrir antes del año 2040 (SENDAI CITY, 2010).

Debido al corto registro de la historia sísmica en Chile (SHOA, 1995), sería posible que algo similar pudiese ocurrir al estimar la magnitud de un escenario máximo posible basados en periodos de retorno de rupturas ocurridas entre la actualidad y hace unos cientos de años, desconociendo eventos tsunamigénicos que hubiesen ocurrido antes de este periodo. Basados en este antecedente se presenta un segundo evento de estudio, el cual considera la misma extensión planteada anteriormente pero incrementando al doble los desplazamientos, dando como resultando un sismo de magnitud $M_w = 9.0$.

Finalmente, se estudiará un tercer evento suponiendo que la energía liberada por el sismo de 2014 en la costa de Iquique fue suficiente para evitar que falle la porción norte. Es importante señalar que esta modificación se hará al escenario $M_w = 9.0$ por lo que se mantiene la misma distribución y magnitud de slip en cada sub-falla y se reduce el área total de ruptura, resultando en un sismo con $M_w = 8.9$.

3.1.2 Antecedentes Topobatimétricos

Extensión espacial del dominio de cálculo

Identificar la extensión geográfica de interés depende principalmente de dos aspectos:

- Determinación de las fuentes tsunamigénicas de interés: El dominio de cálculo deberá ser lo suficientemente extenso para permitir la propagación desde la fuente hasta la zona de interés.
- En segundo lugar, un dominio demasiado extenso incurre en demasiados recursos computacionales, por lo que el dominio debe ser al mismo tiempo lo más acotado posible.

En Chile los tsunamis se generan por subsidencia, debido a ello la fosa oceánica es usualmente uno de los límites del primer dominio. Además, el evento a modelar abarca desde el sur de Perú hasta Antofagasta (Ver Figura 3.1-a). Por otra parte, el último dominio debe cubrir desde Zofri hasta el norte de Playa Brava (Ver Figura 3.1-b), con lo cual sería posible determinar una extensión inicial del dominio de estudio y así obtener información topobatimétrica acotada.

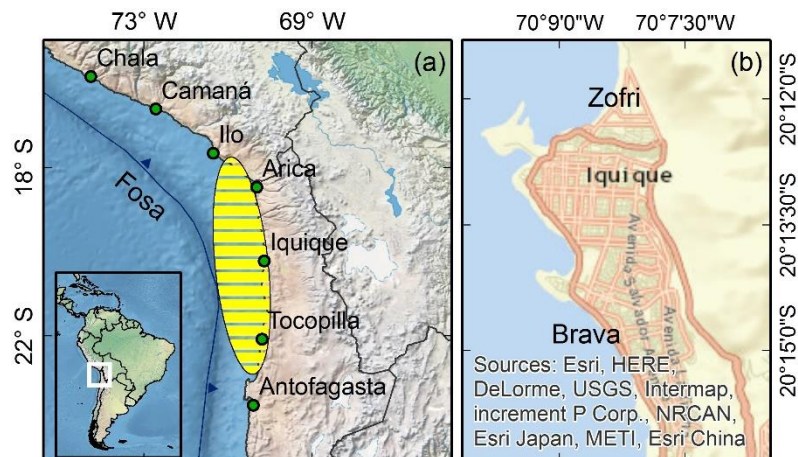


Figura 3.1: Extensión aproximada del dominio de cálculo.

Una información topobatimétrica deficiente que no incluya estructuras morfológicas relevantes, provocará que los resultados de la modelación no sean representativos para la zona de estudio, por ello, la calidad de la información topobatimétrica de cada grilla es crucial para obtener buenos resultados.

Algunas fuentes de datos batimétricos disponibles actualmente son:

- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO): Hasta el momento posee una resolución máxima de 30 segundos de arco (aproximadamente 926 metros).
- Carta Náuticas (CN): Dado que su foco principal es la navegación, las profundidades de agua se encuentran referidas al Nivel de Reducción de Sonda (NRS) y poseen poca información en profundidades menores a 10 m
- Información topográfica y batimétrica de detalle: Para zonas en las que no se cuente con información de resolución suficiente será necesario realizar levantamientos topobatimétricos específicos. En el caso de información topográfica a nivel de zonas pobladas, la metodología tradicional descarta la presencia de estructuras, en lo que se asume es una condición favorable ya que permite un flujo libre del tsunami asumiéndose que podrá alcanzar una mayor penetración horizontal, sin embargo, fuera del modelo numérico se podría observar que el flujo presente aceleraciones locales debido a la influencia de los edificios lo que tal vez ocasionaría un mayor daño.

Se han utilizado tres archivos con distinta calidad de resolución, los que por simplicidad llamaremos TB 1, 2 y 3:

TB-1: Obtenida de la base de datos GEBCO, posee una resolución de 30" (alrededor de 925 [m]) y con ella se generaron el primer y segundo dominio (Figura 3.2 (a)).

TB-2: Corresponde a cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Posee una resolución mayor a 6" (185 [m]) y se utilizó para crear una malla intermedia (Figura 3.2 (b)).

TB-3: Es una topobatimetría de detalle, que combina cartas náuticas del SHOA y batimetrías aportadas por la Dirección de Obras Portuarias (DOP). Cuenta con una

resolución espacial de 0.15" (aproximadamente 4.5 [m]), la que se utilizó para caracterizar el área de interés (Figura 3.2 (c)).

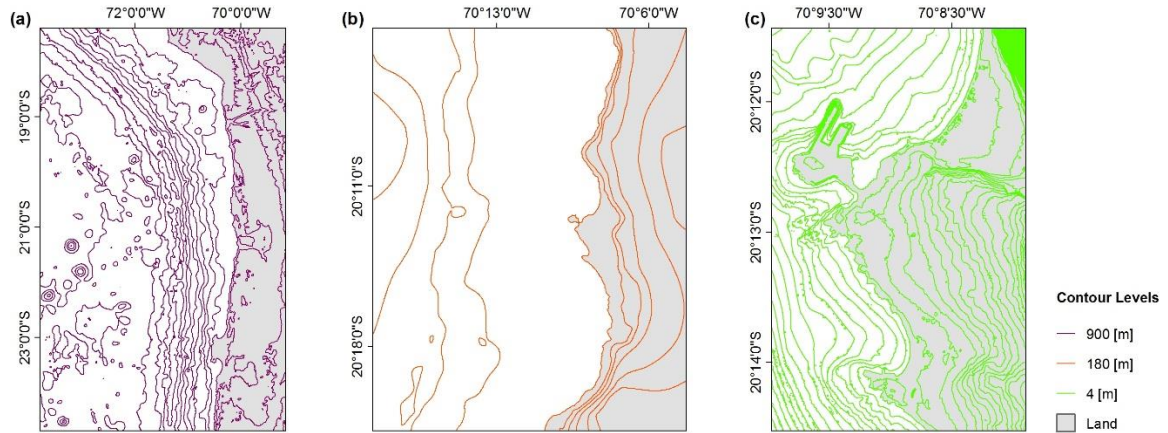


Figura 3.2: Topobatimetría de distinta resolución. (a) TB-1. (b) TB-2. (c) TB-3.

Estandarización de datos batimétricos

Al utilizar información topográfica y batimétrica de distinta procedencia, suele ocurrir que posean distintas referencias. Por ello debe realizarse una estandarización horizontal y vertical de los datos.

Lo usual es utilizar el nivel medio del mar como Nivel de Referencia Topográfica y Batimétrica (NRTB) trabajando las elevaciones resultantes en función de la batimetría. Luego se estandarizan horizontalmente al sistema de coordenadas geográficas o al sistema Universal Transversal de Mercator (UTM).

Toda la información topográfica y batimétrica se refirió al nivel medio del mar, trabajando las elevaciones resultantes en función de la batimetría. Luego se estandarizó horizontalmente al sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) en el huso 19 sur.

3.1.3 Condición Inicial

Mansinha y Smylie (1971) definieron que la deformación en la superficie del océano ocurría de manera casi instantánea a la ruptura y que esta era idéntica al desplazamiento vertical del fondo marino.

Varios años después, Okada (1985) plantea parámetros de desplazamiento para caracterizar el sismo mediante los parámetros estáticos de una dislocación elástica (Ver Figura 3.3). Los parámetros dinámicos como velocidad y tiempo de ruptura se descartan en sismos de longitud de ruptura pequeña, sin embargo, no pueden ser descartados en la modelación de mega terremotos porque generalmente el proceso de ruptura involucra poseer una mayor variación temporal y las áreas de ruptura también son más grandes (Suppasri, et al., 2010)

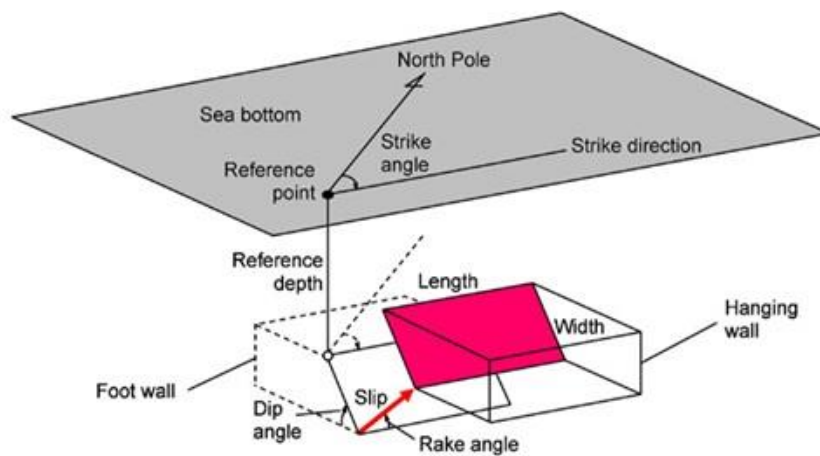


Figura 3.3: Parámetros de una falla planar
Fuente: Yamazaki, et al. (2011)

A pesar de que las expresiones de Okada (1985) se basan en una distribución uniforme de deslizamiento, es posible aproximar una distribución no uniforme utilizando una superposición de fallas puntuales.

Esta formulación, además de utilizar el momento y magnitud del sismo, considera los siguientes parámetros:

- Slip: Magnitud del desplazamiento relativo del plano de falla.
- Width: Ancho del plano de falla.
- Length: Largo del plano de falla.
- Dip angle: Ángulo de ruptura con respecto al plano vertical.
- Rake angle: Ángulo de deslizamiento en el plano de falla.
- Strike angle: Dirección de la falla con respecto al norte y en sentido horario.
- Reference Depth: Distancia desde la superficie del océano hasta el origen de la falla.
- Reference point: Ubicación del punto inferior izquierdo (suroeste) de la falla en el sistema de coordenadas.

En Chile, las zonas de falla poseen normalmente un ángulo dip de 20° , pues es el ángulo con que la placa de nazca se introduce bajo la placa continental. Un ángulo rake entre 100° y 110° , aunque normalmente se considera como 90° por tratarse de un caso más desfavorable el asumir que la falla ocurre en la misma dirección en la que avanza la placa de nazca. Y un ángulo strike cercano a los 330° en el extremo norte (Arica) y alrededor de 2° en Iquique y Antofagasta, lo que corresponde al ángulo de la fosa oceánica con respecto al norte.

Hasta el momento no existe correlación entre la magnitud de un sismo y la magnitud del tsunami que éste pudiese generar, debido a que el tsunami se evalúa según la altura de inundación, las profundidades de flujo, el run up y las velocidades que se registran en la localidad, lo que depende fuertemente de la ubicación de la falla con respecto a la costa y la topografía propia del sector.

Los dos primeros escenarios poseen 335 subfallas, mientras que el tercero posee sólo 192. Cada una de ellas tiene un área de 20×20 [km²], un ángulo strike entre 336° y 2° , y un dip y slip constantes de 20° y 90° respectivamente. Las coordenadas, el deslizamiento y la profundidad focal de cada sub-falla del escenario Mw=8.81 se detallan en el Anexo 3.1.

3.1.4 Modelo numérico

TUNAMI-N2 fue creado por la universidad de Tohoku como parte del proyecto TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange). Utiliza la teoría lineal de onda larga sin fricción de fondo en aguas profundas, considerando despreciable la aceleración vertical de las partículas y por consiguiente el movimiento vertical no tiene efecto en la distribución de presiones.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

En aguas someras calcula con las ecuaciones de movimiento no lineal integradas verticalmente en tierra modela la inundación con la ecuación de run up.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (10)$$

Donde:

x, y, t : Corresponde a las dos coordenadas geográficas (sólo considera el plano horizontal), y el tiempo respectivamente.

M, N : Componentes verticales del flujo transportado integradas por unidad de ancho en la horizontal, y en la vertical respectivamente.

η : Es el desplazamiento vertical con respecto al nivel de mar inmediatamente antes de la perturbación.

g, D : Aceleración de gravedad y profundidad de agua respectivamente.

n : Coeficiente de fricción de fondo de Manning (normalmente 0.025)

3.1.5 Mallas: Resolución espacial y temporal

Las grillas utilizadas para modelación numérica en TUNAMI deben respetar un incremento en la resolución espacial Δx y temporal Δt de 1:3 desde el dominio de mayor extensión al que se encuentra anidado dentro de él, por ejemplo, el dominio 2 debe tener una resolución espacial y temporal 3 veces mayor que el dominio 1. Dichas condiciones son recomendaciones propuestas por sus autores para una menor probabilidad de inestabilidad en el modelo.

El tiempo de integración depende del número de Courant, y se recomiendan valores cercanos a $C_{m\acute{a}x} = 0.5$:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t \sqrt{gh_{max}}} \leq C_{max} \quad (11)$$

Para modelar numéricamente la ruptura del fondo oceánico, la condición inicial del tsunami, su propagación e inundación en Iquique se utilizaron 5 mallas anidadas con resolución espacial de 810, 270, 90, 30 y 10 [m] desde el primer al último dominio respectivamente.

La Figura 3.4 muestra los 5 dominios de cálculo, donde las elevaciones se encuentran en función de la batimetría debido a que así lo requiere el código TUNAMI.

A pesar de que todas las mallas poseen información topográfica y batimétrica, por simplicidad sólo se detalla la topografía en la última grilla, pues es en la cual se estudiará la inundación.

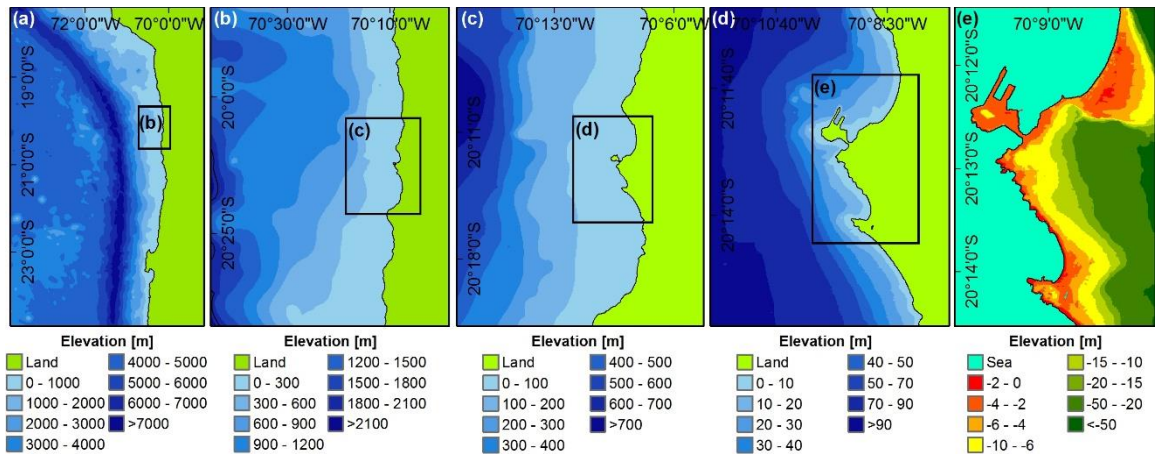


Figura 3.4: Extensión de los dominios 1 a 5, figuras (a) a (e) respectivamente. Poseen resolución espacial: (a) 810 m. (b) 270 m. (c) 90 m. (d) 30 m. (e) 10 m.

Se utilizó un tiempo de integración constante para las 5 mallas, el cual corresponde al menor entre ellas. Es decir, para cada grilla se calculó el tiempo de integración que arrojaba un número de Courant cercano a 0.5, y se seleccionó el menor de ellos.

El menor tiempo $\Delta t = 0.2 \text{ seg}$ se extrae de la última grilla.

Finalmente, se consideró un coeficiente de rugosidad de Manning constante e igual a 0.025 para el fondo marino y para tierra seca.

3.2 Estimación de daños

3.2.1 Clasificación de estructuras

La clasificación de las estructuras es independiente del o los niveles de daño que se quieran evaluar, pues no depende de la respuesta al evento sino de la materialidad de las edificaciones.

No fue posible conseguir un plano urbano de Iquique que detallase las estructuras existentes en la ciudad, el número de pisos y/o la materialidad de ellas, por lo que se utilizó la vista satelital de la superficie para delimitar el área horizontal de las edificaciones,

asignando a cada estructura un único polígono y resguardando el no superponer los límites de unos con otros. Los atributos de interés (Materialidad y número de pisos) se obtuvo con la herramienta “Street view” y luego se estableció éste en el nombre, por ejemplo, todas las edificaciones de madera de uno y dos niveles se representaron con polígonos de nombre “M”, además a cada grupo se le asignaron distintos colores (Ver Tabla 3.1) para analizar visualmente la distribución de materialidades.

Tabla 3.3: Categorización de estructuras.

Material	N° de pisos	Color
Madera	1 - 2	Blue
Albañilería	1 - 2	Yellow
Hormigón armado	≥ 3	Orange
Acero	-	Pink

3.2.2 Set de Curvas de Fragilidad

Se han seleccionado las curvas de fragilidad desarrolladas por Suppasri, et al., (2012b) para la evaluación de daños que provocó el gran tsunami de Japón en 2011. Estas se construyeron con la función de probabilidad Log Normal (Ec. 17) a partir de una evaluación de campo a más de 250.000 edificaciones y se encuentran clasificadas por materialidad, número de pisos y 6 niveles de daños.

Los parámetros estimados por Suppasri, et al., (2012b) se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros estadísticos del set de curvas de fragilidad.

Categoría	Parámetros	Nivel de daño					
		1	2	3	4	5	6
Madera 1 o 2 pisos	μ'	-1.7268	-0.858	0.0481	0.6872	0.8134	1.1733
	σ'	1.1462	0.9395	0.7115	0.5288	0.5941	0.5756
	R^2	0.98	0.98	0.97	0.98	0.97	0.98
Albañilería 1 y 2 pisos	μ'	-2.113	-1.1573	0.1059	0.9043	1.1918	1.6583
	σ'	1.3362	1.04	0.7693	0.5746	0.6821	0.6913
	R^2	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97
H. armado 3 pisos o más	μ'	-2.7757	-0.9784	0.1489	1.1408	2.3491	2.7121
	σ'	1.6594	1.022	0.66	0.7981	0.7898	0.4966
	R^2	0.91	0.97	0.93	0.86	0.72	0.56
Acero	μ'	-1.6956	-0.8982	0.0662	0.7061	1.4575	2.279
	σ'	1.1013	0.8835	0.7171	0.668	0.8938	0.7362
	R^2	0.95	0.99	0.99	0.93	0.93	0.94

Fuente: Suppasri, et al., (2012b)

Cada nivel de daño representa un rango visual del estado físico de las estructuras luego de ser impactadas por un tsunami, sin embargo, se debe recordar que un porcentaje de este daño fue provocado por el movimiento sísmico que le precedió y como hasta el momento no ha sido posible diferenciarlos se asumirá que la condición final de las edificaciones se debe principalmente a la inundación. La descripción de cada grado de daño se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Clasificación de seis niveles de daño estructural.

Nivel	Daño	Descripción	Condición
1	Daño menor	No existe un daño estructural o no estructural significativo, posiblemente sólo un poco de inundación	Es posible utilizarlo inmediatamente luego de una limpieza menor
2	Daño moderado o	Daño leve a elementos no estructurales	Es posible utilizarlo luego de unas reparaciones leves
3	Daño grave	Daño grave a algunas paredes pero a ninguna columna	Posible utilizarlo luego de grandes reparaciones
4	Daño completo	Daño grave a paredes y algunas columnas	Necesita una reparación completa
5	Colapso	Daño muy destructivo a paredes y columnas	Pérdida de funcionalidad. No es posible una reparación.
6	Arrasado	La estructura fue arrasada por el flujo. Sólo es posible identificar las fundaciones.	Imposible reparar. Requiere una reconstrucción total.

Fuente: Suppasri, et al., (2012b)

La Figura 3.5 muestra el conjunto de curvas que se utilizará para realizar la estimación de daños.

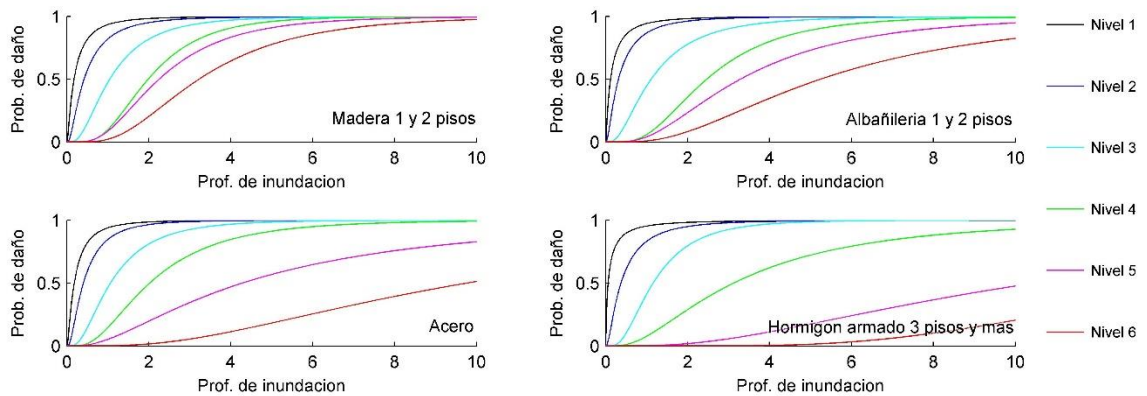


Figura 3.5: Set de curvas de fragilidad utilizadas.

Fuente: Suppasri, et al., (2012b)

Es necesario aclarar que estas curvas consideran a las edificaciones con daño nivel 6 dentro de todas las curvas de menor nivel y así sucesivamente, por lo que por ejemplo, a la probabilidad que existe de que un grupo de edificaciones de albañilería sometidas a una inundación de 4 [m] sufran daño nivel 3 se le debe descontar la probabilidad de que sufrieran también daño de nivel 4.

Los tipos de daño descritos en la Tabla 3.3 son útiles desde un punto de vista ingenieril, pues permiten estimar la resistencia estructural de las edificaciones en función de una profundidad de flujo, sin embargo, entregan información tan detallada que podría generar confusión en la comunidad local.

Basando el objetivo de la estimación en evaluar la vulnerabilidad estructural de los habitantes luego de ser golpeados por un tsunami, se propone utilizar una segunda clasificación que solamente cuente con dos niveles de daño, uno de “Sobrevive” que incorporará los grados 1, 2 y 3 y otro de “Colapsa” que abarcará los daños de nivel 4, 5 y 6.

Para entrelazar la información existente en el mapa de inundación con la del mapa de estructuras se utilizó un Sistema de Información Geográfica (GIS). Mediante este tipo de

software es posible asignar a cada edificio la profundidad de inundación a la que se ve afectado y trabajar o extraer estos datos en forma de tabla.

El primer paso para realizar la estimación de daños es separar los datos según las distintas categorías y trabajar de manera independiente la estimación de daños para edificaciones de madera, albañilería, hormigón o acero. Luego se deben ordenar los datos de forma creciente o decreciente en función de la variable hidrodinámica a utilizar y crear clases de similar tamaño y rango. Se recomienda ordenar los valores de mayor a menor por simplicidad al momento de calcular la probabilidad de daño exclusiva de cada nivel. Cada clase se evalúa en los 6 niveles de daño utilizando la mediana como variable "x". El resultado es una probabilidad de daño que se utiliza como el porcentaje de edificaciones dañadas en cada clase y nivel.

4 RESULTADOS

4.1 Mapas de inundación

La deformación inicial de la superficie de agua (Ver Figura 4.1) se obtuvo mediante la formulación de Okada (1985) para una distribución de desplazamiento estático y no uniforme utilizando fallas finitas.

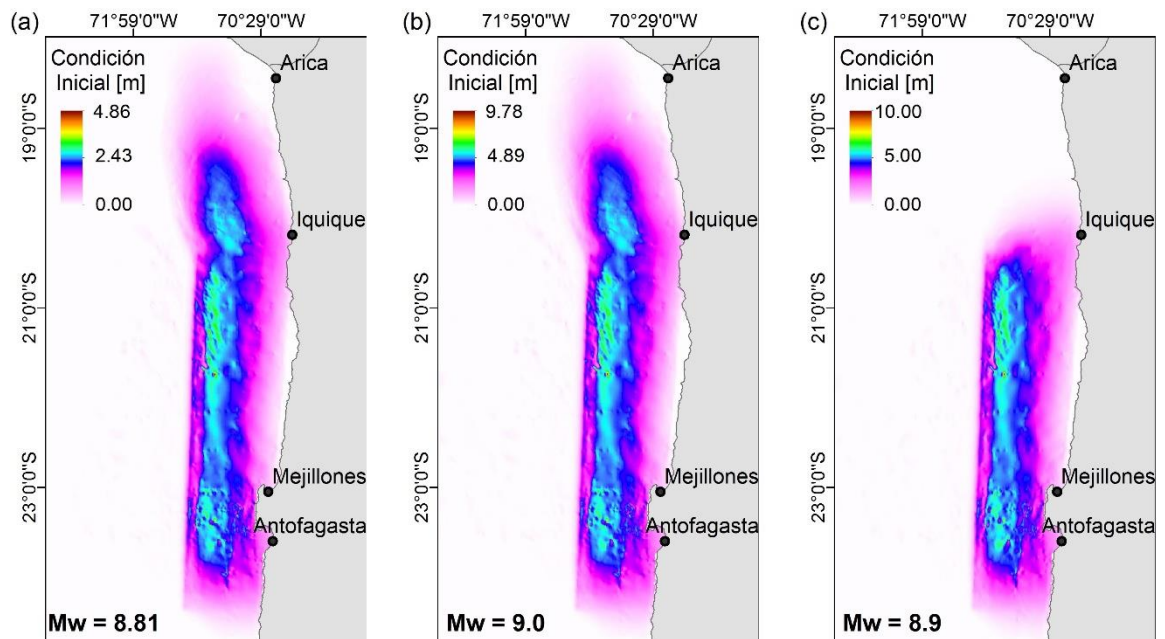


Figura 4.1: Condición inicial del tsunami para cada evento: (a) $M_w = 8.81$. (b) $M_w = 9.0$. (c) $M_w = 8.9$.

Todos los escenarios se simularon por 4 horas porque las mayores inundaciones ocurren dentro de este periodo.

La Figura 4.2 muestra la máxima profundidad de inundación de cada escenario junto con la curva de nivel de terreno más cercana al runup (3 m en los escenarios $M_w = 8.81$ y $M_w = 8.89$, y 10 m en el evento $M_w = 9.0$).

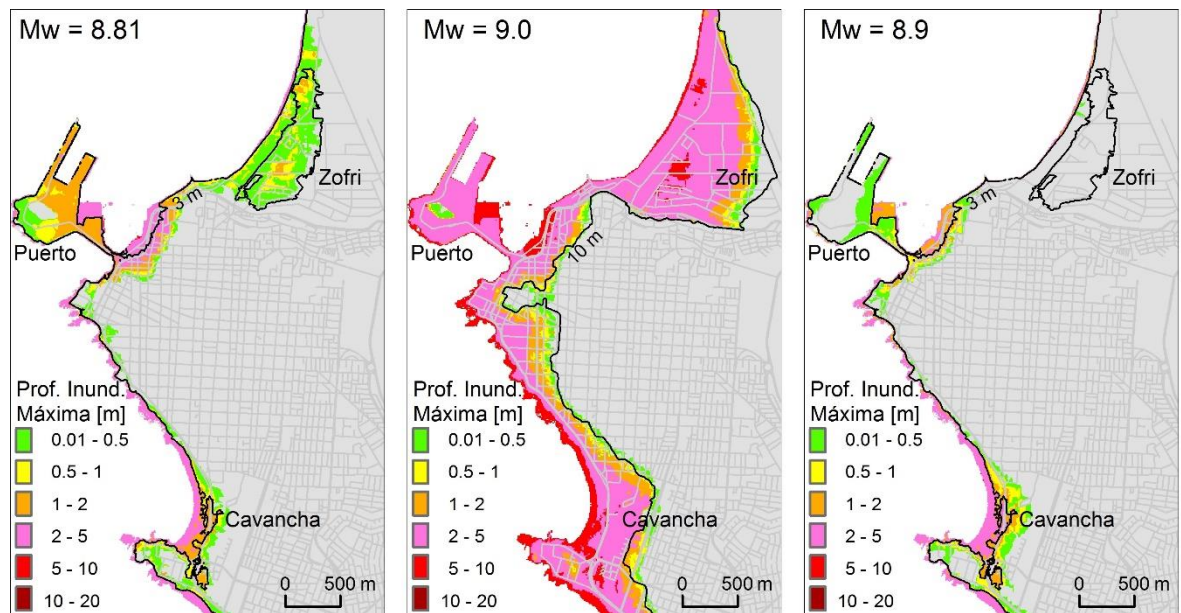


Figura 4.2: Profundidad de Inundación de los escenarios $M_w = 8.81$, $M_w = 9.0$ y $M_w = 8.9$ respectivamente, utilizando TUNAMI-N2.

Es posible observar que el evento de magnitud $M_w = 8.9$ genera en Iquique una menor inundación que el evento $M_w = 8.81$, a pesar de poseer mayores desplazamientos. Esto se debe a la posición del área de ruptura con respecto a la costa de Iquique, pues la falla del evento $M_w = 8.9$ se encuentra principalmente entre el sur de Iquique y Antofagasta.

De los tres eventos modelados se analizará en detalle el que genera mayor inundación, correspondiente al evento de magnitud $M_w = 9.0$ (Ver Figura 4.3).

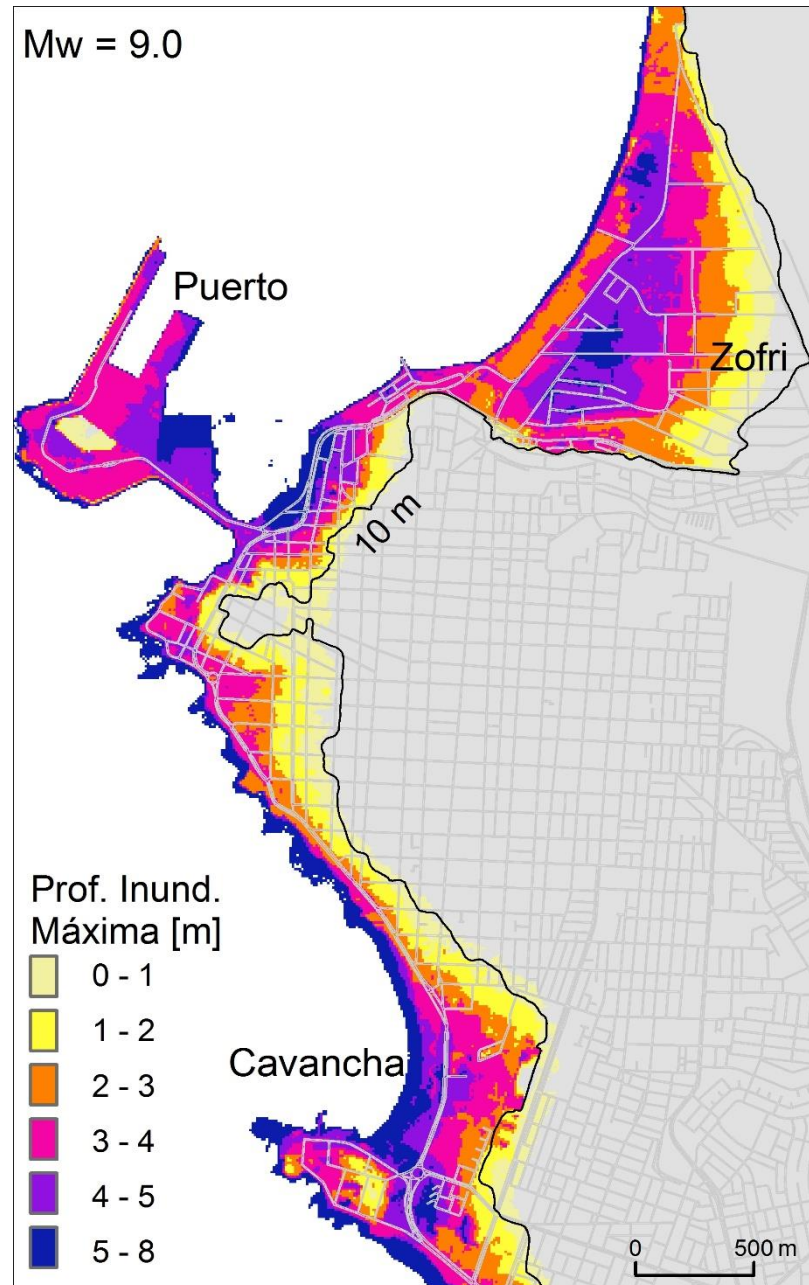


Figura 4.3: Profundidad de inundación máxima para el escenario $M_w = 9.0$ utilizando TUNAMI-N2.

La Figura 4.4 muestra los mareogramas en dos sectores de Iquique, uno frente al sector de Zofri y otro frente a Cavancha. Es posible observar que la máxima inundación se obtiene para la primera onda y que 3 ondas grandes inundan Iquique, la primera arriba a los 10 minutos y avanza durante 12 minutos antes de retroceder. La segunda y tercer ondas inundan durante 5 minutos y llegan a los 69 y 85 minutos aproximadamente.

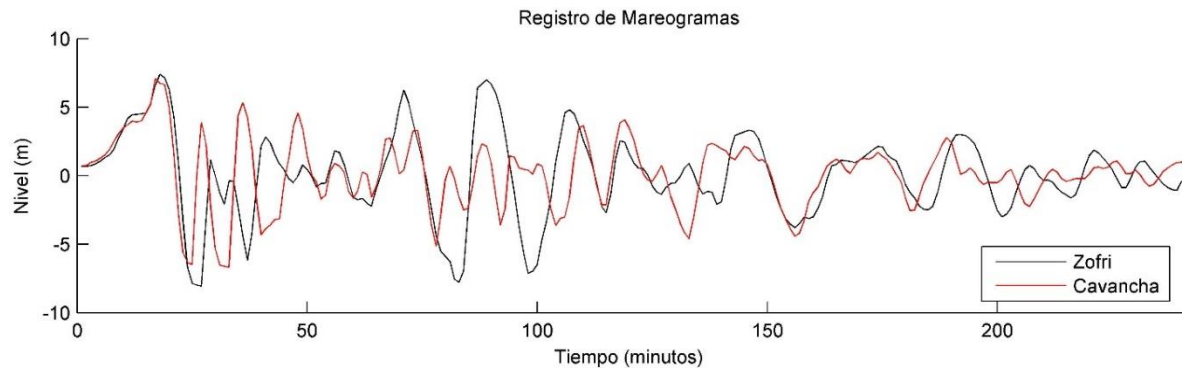


Figura 4.4: Mareogramas virtuales en Zofri y Cavancha para el escenario $M_w = 9.0$ utilizando TUNAMI-N2.

4.2 Estimación de daños

4.2.1 Clasificación de Estructuras

Se clasificó la materialidad y el número de pisos de cada una de las estructuras hasta una cota de terreno cercana a 10 m (Ver Figura 4.5). Sin embargo, con Google Street View no fue posible obtener información referente a las estructuras del puerto por lo que ellas no fueron incluidas en el análisis.

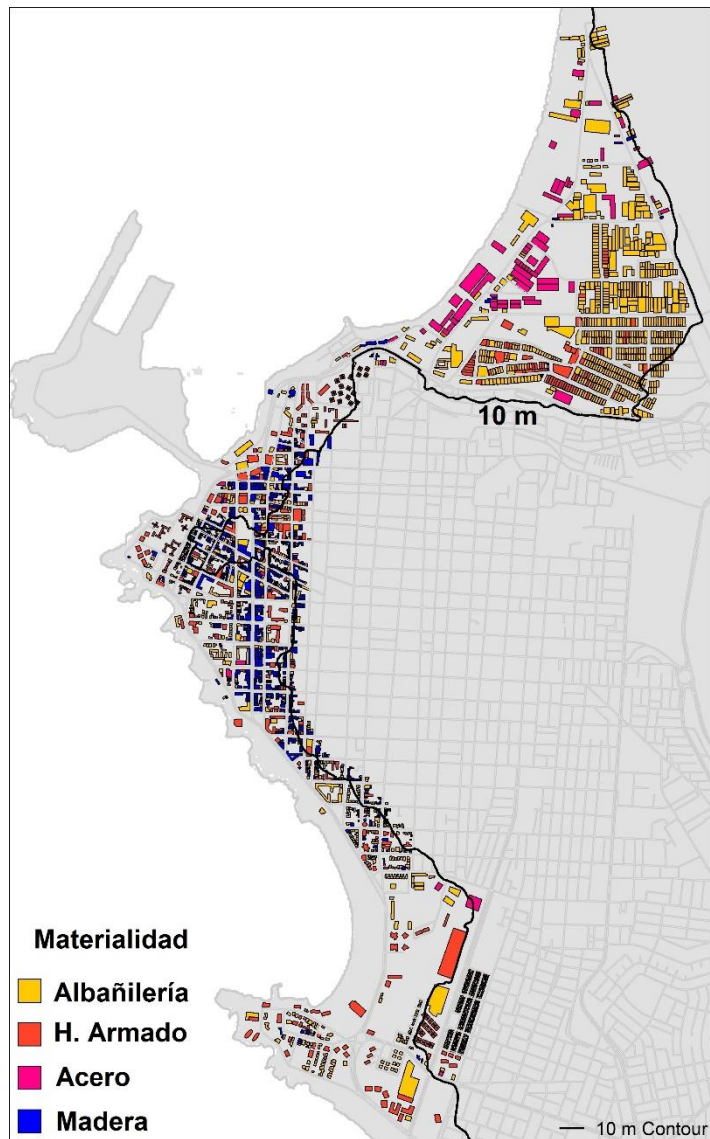


Figura 4.5: Clasificación de materialidades en la ciudad de Iquique

4.2.2 Estimación de daños

Se realizó la estimación de daños utilizando los seis niveles de las curvas de fragilidad desarrolladas por Suppasri, et al., (2012b) para cada una de las cuatro categorías de materialidad, evaluando con respecto a la máxima profundidad de inundación del escenario $M_w = 9.0$ (Ver Figura 4.6)

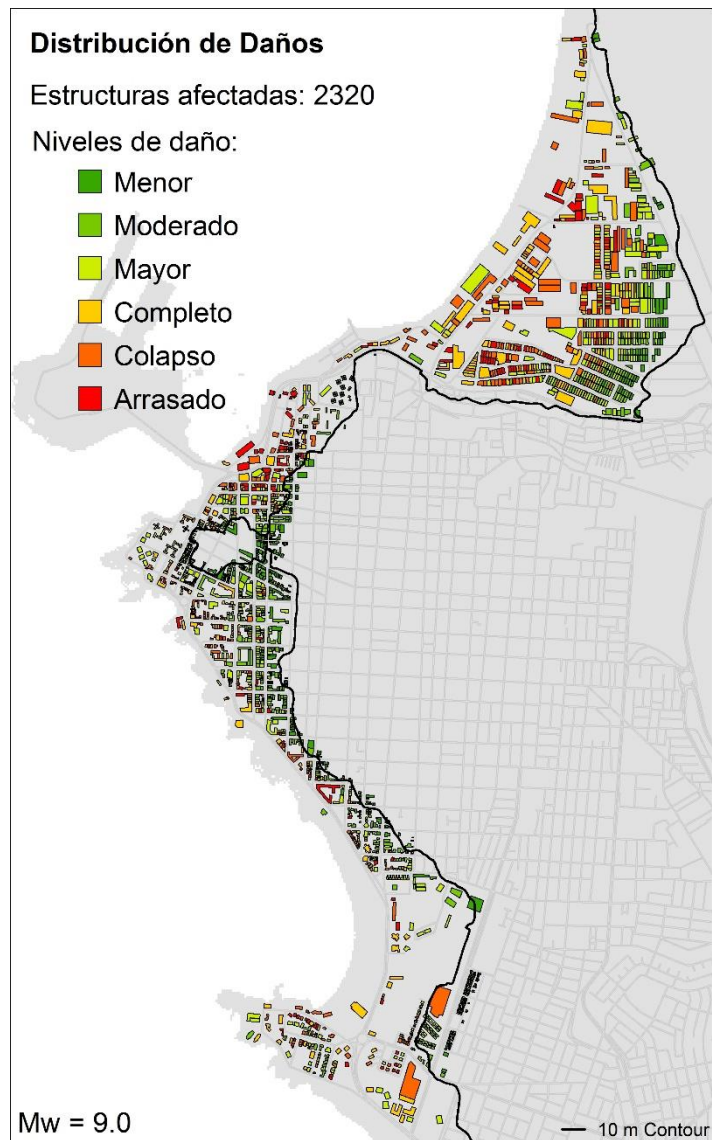


Figura 4.6: Estimación de daño en seis niveles.

La inundación podría afectar aproximadamente 2320 estructuras, de las cuales un poco más de 1200 edificios serían de albañilería y alrededor de 630 de madera.

Las pérdidas se concentran en la línea de costa, en la zona central de Zofri y en el sector antiguo de la ciudad. Además, no se observan edificios de hormigón armado que fuesen completamente destruidos. Un 11% y 16% de las estructuras de albañilería y madera podrían ser arrasadas.

A continuación se presentan los mismos daños en dos formatos diferentes. En primer lugar, la Figura 4.7 agrupa los tres primeros niveles (Menor, Moderado y Mayor) y los considera como estructuras sobrevivientes clasificándolas en "Sobrevive". De la misma manera se agrupan los peores tres niveles de daño y se consideraron como edificaciones completamente destruidas en una categoría llamada "Colapsa". El criterio para determinar el límite entre estas dos categorías se basa en considerar como "Destruídas" todas aquellas estructuras que requerirían como mínimo una reparación completa luego del evento.

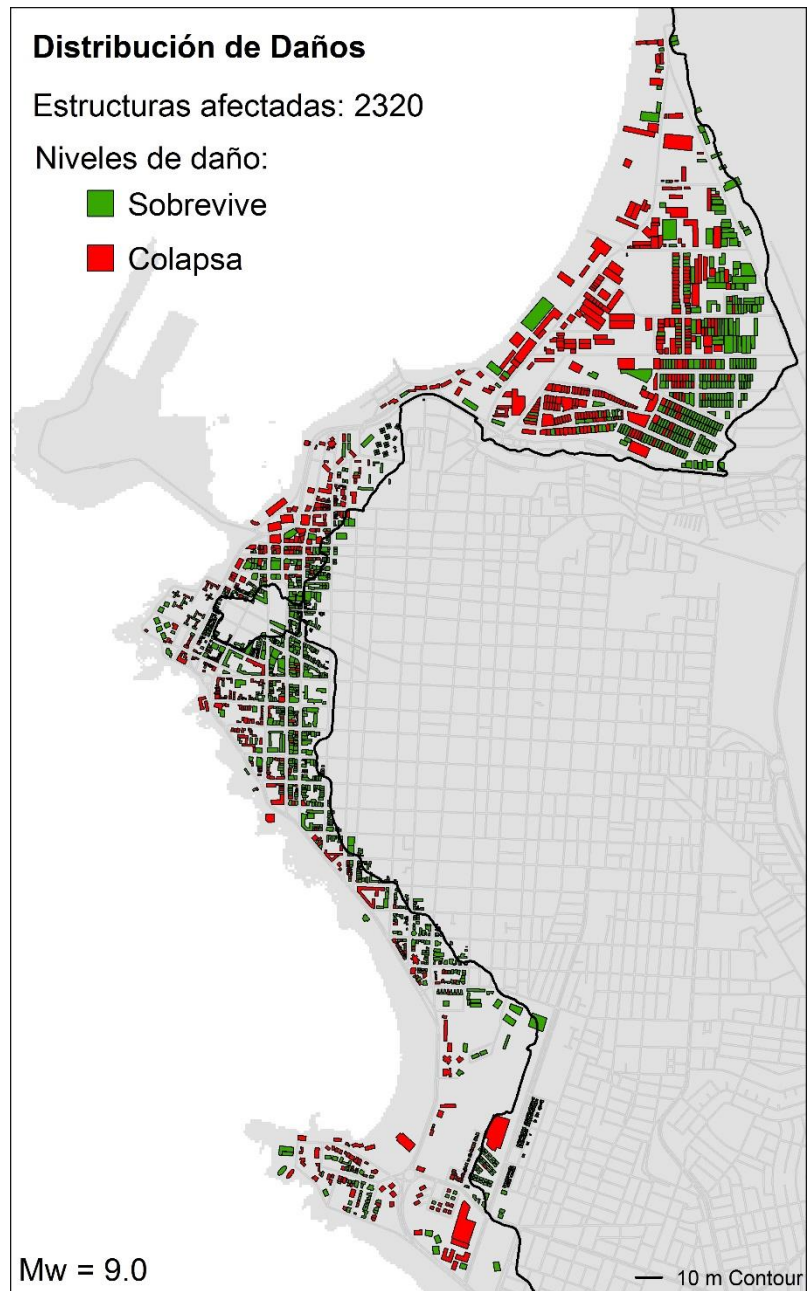


Figura 4.7: Distribución del daño considerando dos niveles.

Un tipo de presentación alternativa se observa en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10. Para construirla se utilizó el mapa de profundidades de inundación máxima (Figura 4.3) y la curva de fragilidad “Arrasado” (nivel 6) de las edificaciones de madera, albañilería y hormigón armado respectivamente (Tabla 3.2).

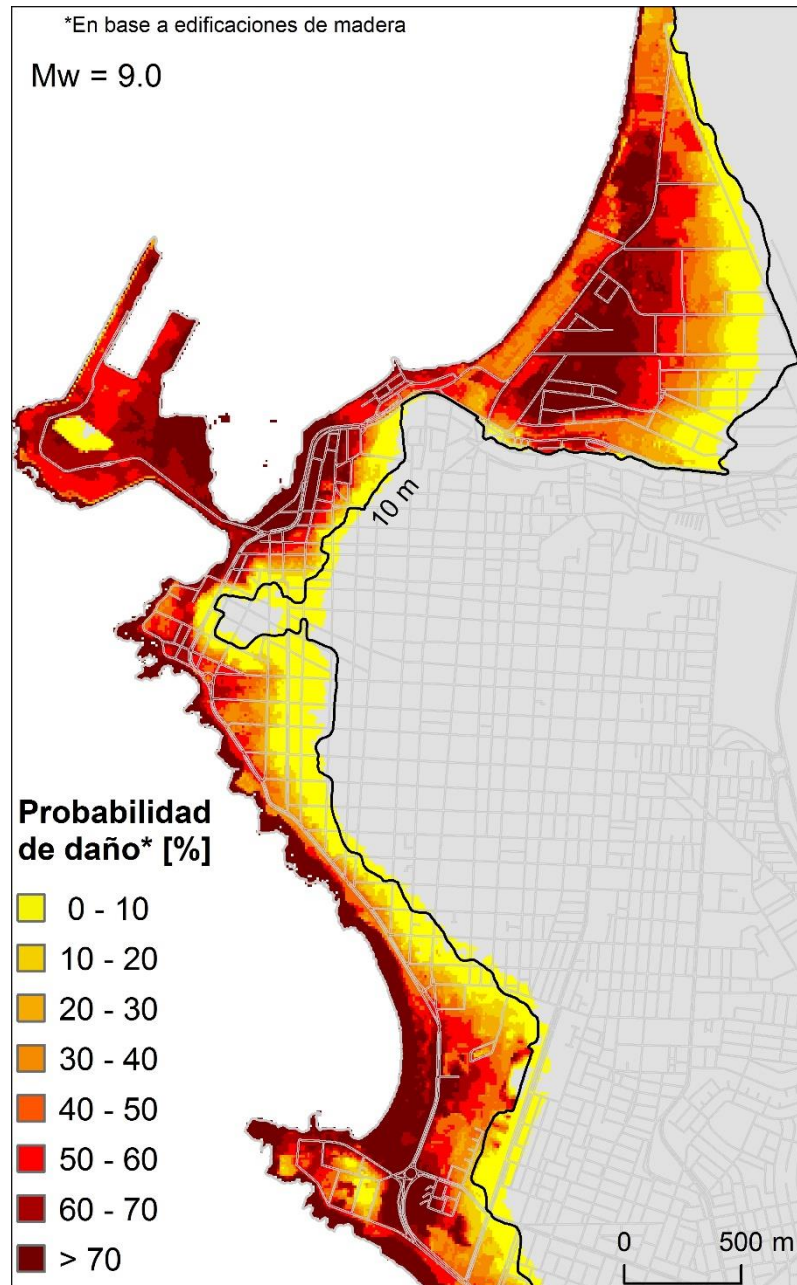


Figura 4.8: Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de madera.

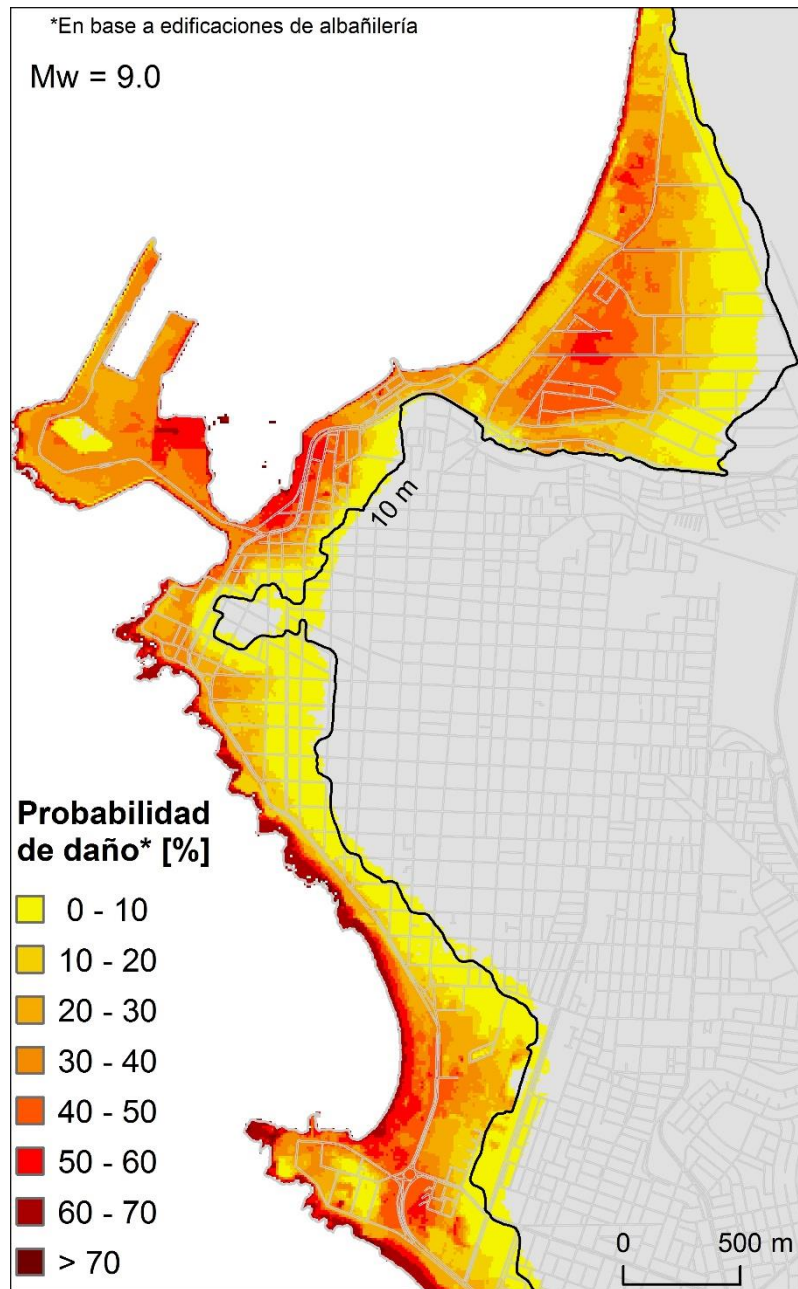


Figura 4.9: Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de albañilería.

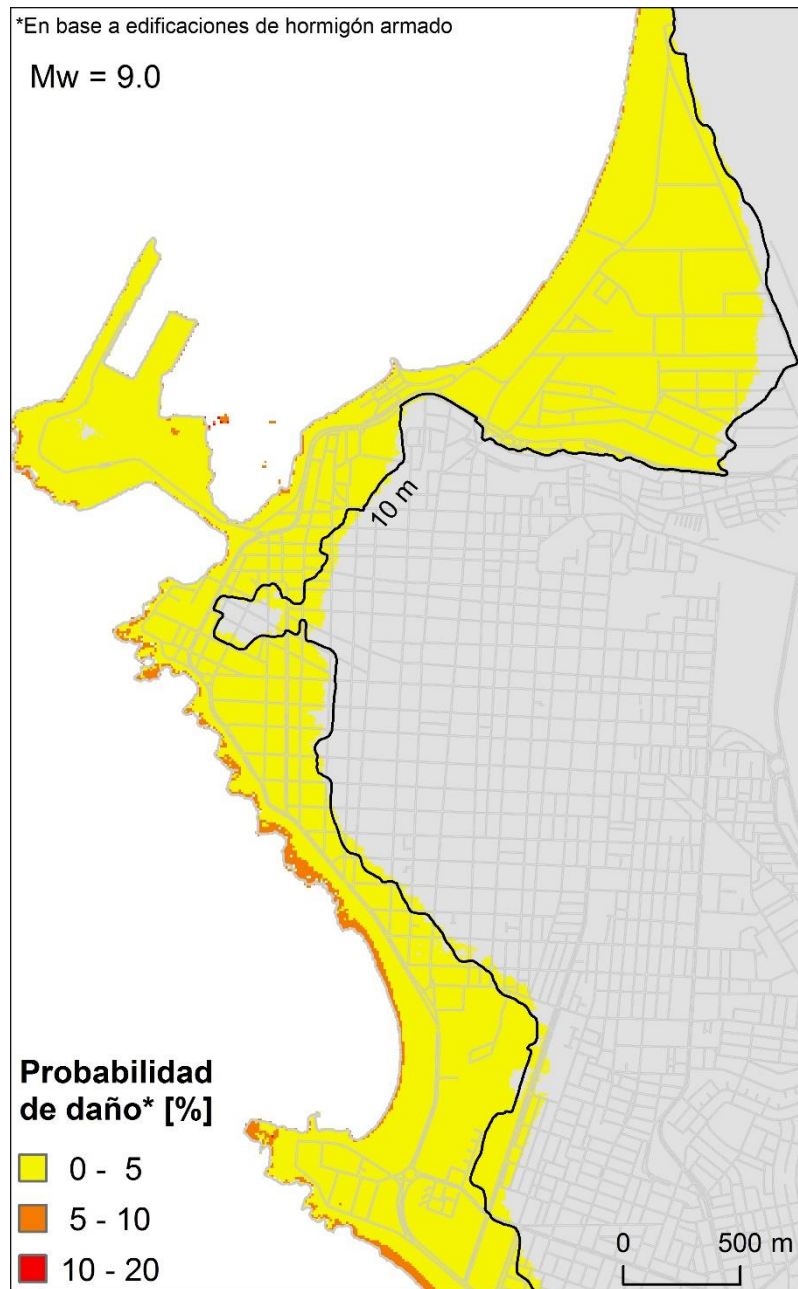


Figura 4.10: Zonificación de la probabilidad de daño para edificaciones de hormigón armado.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Utilizando el código TUNAMI-N2, se modelaron tres escenarios de ruptura que cubren la brecha sísmica en la zona norte de Chile. El primero de ellos fue propuesto por Yagi, et al., (2014) y posee una magnitud de $M_W = 8.81$. El segundo escenario posee la misma extensión que el primero y un desplazamiento dos veces mayor, alcanzando una magnitud de $M_W = 9.0$. Finalmente, el tercer escenario se obtiene disminuyendo la longitud del área de ruptura del $M_W = 9.0$ al suponer que la extensión del sismo de 2014 en Iquique provocó que en un futuro evento no rompa la porción norte de la falla.

5.1 Condición Inicial

La deformación inicial máxima de la superficie del océano para el escenario de $M_W = 8.81$ alcanza una altura de 4.82 m, aunque sólo corresponde al resultado de algunas sub-fallas puntuales, por lo que si se considera una deformación máxima más extensa esta sería cercana a los 3m (Figura 3.3-a).

Para el escenario de $M_W = 9.0$ ocurre exactamente lo mismo, en que la máxima deformación puntual alcanza los 9.78 m, pero una deformación de 7 m correspondería a una máxima de mayor extensión espacial (Figura 3.3-b).

El caso $M_W = 8.9$ presenta una deformación inicial puntual máxima de 10 m, aunque un valor medio de deformación máxima sería aproximadamente 7 m (Figura 3.3-c).

5.2 Máximas profundidades de flujo

5.2.1 Escenario $M_W = 8.81$

Con respecto a las máximas profundidades de flujo, el evento $M_W = 8.81$ (Figura 4.1-a) registra 4 m a lo largo de la línea de costa.

Zofri

En Zofri las profundidades de inundación son en general de medio metro, aunque en el punto de menor cota llega a ser cercana a 1.5 m. El flujo ingresaría alrededor de 400 m y afectaría un área cercana a 55 hectáreas.

Puerto

El puerto se ve más afectado por la inundación en el sector norte, con profundidades que varían desde 2.5 m en el borde hasta 1.5 metros en el centro, que corresponde a la zona de mayor elevación.

Cavancha

En Cavancha el agua ingresa cerca de 200 m, inundando principalmente la playa.

5.2.2 Escenario $M_W = 9.0$

El escenario $M_W = 9.0$ (Figura 4.2) genera una altura de inundación de 7 m a lo largo de la línea de costa.

Zofri

En el área central de Zofri se registran profundidades máximas de 5 m. El agua ingresa una distancia de 900 m y afecta aproximadamente 120 hectáreas. Es posible observar que el puerto se inunda completamente con profundidades que van desde 5.5 m a 3.5 m.

Sector antiguo

Al Sureste del puerto, entre Zofri y Cavancha se ubica la zona antigua de Iquique, compuesta principalmente por casas de madera y adobe, y con algunos edificios recientes de hormigón armado. Aquí la pendiente del suelo, entre la línea de costa y la cota de 10 m, es cercana a 2%. A una distancia horizontal de 500 m medidos perpendiculares a la playa, la inundación decrece desde 7 m hasta alrededor de 3 m.

Cavancha

En Cavancha las profundidades también decrecen hasta 2 m en una distancia de 0.5 km de la línea de costa.

5.2.3 Escenario $M_W = 8.89$

Zofri

Debido a la ubicación del área de falla del evento $M_W = 8.9$ con respecto a la configuración costera de Iquique, éste no provoca inundación en Zofri, y los límites del puerto se inundan cerca de medio metro.

Sector Antiguo

En el sector antiguo de Iquique el flujo avanza hasta una cota cercana a 5 m.

Cavancha

La inundación en Cavancha es mayor que la generada por el escenario $M_W = 8.81$, alcanzando profundidades de flujo máximas de 5 m en la línea de costa. El flujo avanza hasta una distancia horizontal aproximada de 400 m (Figura 4.1-c).

5.3 Estimación de daños

La estimación de daños se desarrolló para el escenario con las mayores profundidades de flujo, es decir, el evento $M_W = 9.0$.

5.3.1 Cantidad y distribución de edificaciones inundadas

Analizando el nivel de daño (Figura 4.4), el evento $M_W = 9.0$ inundaría aproximadamente 2320 estructuras, de las cuales alrededor de 660 se encuentran en el sector de Zofri, 1050 en el sector antiguo de Iquique y 610 en área de Cavancha.

La distribución del tipo de estructuras inundadas en cada sector se detalla en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Distribución de posibles estructuras inundadas por un $M_W = 9.0$

Sector	Tipo de estructura				Total
	Madera	Albañilería	Acero	H. Armado	
Zofri	15	505	60	80	660
Sector antiguo	530	310	15	195	1050
Cavancha	90	400	5	115	610
Total	635	1215	80	390	2320

5.3.2 Cantidad y distribución de estructuras con daño nivel 3 o superior.

La tabla 5.2 muestra la cantidad de estructuras que podrían ser destruidas por el flujo en cada sector al considerar los últimos tres niveles de daño (Niveles 4, 5 y 6) como estructuras irreparables.

Es posible observar que la relación entre el número de edificaciones destruidas de madera versus las de albañilería es cercana a 1:2, al igual que el número total de estructuras inundadas (Tabla 5.1). Sin embargo, esta proporción no guarda directa relación con la distribución por sector, debido a las características constructivas de Zofri y el sector antiguo.

Tabla 5.1: Distribución de estructuras con daño nivel 3 o superior

Sector	Tipo de estructura				Total
	Madera	Albañilería	Acero	H. Armado	
Zofri	15	370	56	75	516
Sector antiguo	280	190	12	110	592
Cavanca	50	190	2	75	317
Total	345	750	70	260	1425

5.3.3 Análisis de la distribución de daño

La proporción cercana a 2:1 entre construcciones de albañilería y madera puede analizarse por lo menos bajo dos contextos distintos.

Punto de vista comercial

Si se quiere estudiar el daño estructural desde el punto de vista económico-laboral, es necesario tener en cuenta que más de 500 bodegas de albañilería se verían afectadas por el flujo de inundación en Zofri, y 130 de ellas podrían colapsar o ser completamente arrasadas (Según nivel de daño 6).

Los niveles de daño en Zofri y el sector antiguo de Iquique parecen similares, no obstante, son producto de distintas condiciones. Las estructuras de Zofri (albañilería) son más resistentes que las edificaciones de madera presentes hacia el sur, pero las características topográficas que posee la Zona Franca no son tan favorables. Luego de la línea de costa la pendiente incrementa rápidamente hasta la cota 4 m, desde donde comienza a disminuir hasta una elevación cercana a 2 m en su punto más bajo. En consecuencia, el área potencialmente inundable es más extensa, las profundidades de flujo son mayores y el nivel de daño aumenta.

Punto de vista habitacional

Desde un punto de vista habitacional, podrían ser afectadas cerca de 700 edificaciones de albañilería distribuidas desde el sector antiguo de Iquique hasta Cavanca, de las cuales 150 presentarían una alta probabilidad de colapsar o ser completamente arrasadas.

Casi 500 de las 630 estructuras de madera inundadas se encuentran concentradas en el sector antiguo de Iquique. Considerando seis niveles de daño, aproximadamente 150 sufrirían colapso o serían completamente destruidas.

La pendiente en el sector antiguo es relativamente alta, ya que a 300 m de la línea de costa la cota de terreno alcanza 7 m de elevación, lo que resulta en un área inundable de menor extensión y menos estructuras destruidas.

5.3.4 Análisis de los mapas de zonificación

La Figura 4.8 representa la variación espacial de la probabilidad que tendría una estructura de madera de ser completamente arrasada por el flujo del tsunami. Lo mismo que representan las Figuras 4.9 para las estructuras de albañilería y la 4.10 para edificaciones de hormigón armado.

Al trabajar estos mapas en conjunto es posible realizar una zonificación que recomiende construir según materialidad. Algunos ejemplos serían recomendar “No construir” edificaciones de madera en aquellas zonas que presenten una probabilidad de daño igual o mayor a 50%, o recomendar/favorecer las construcciones de hormigón armado cerca de la costa, pues son aquellas que presentan un menor daño debido a tsunamis y además podrían actuar como una primera línea de bloqueo parcial del flujo.

6 CONCLUSIONES

Si ocurriese un evento con magnitud de momento $M_w=9.0$ en la brecha sísmica del norte de Chile, el tsunami generado llegaría a la costa de Iquique con una amplitud de onda aproximada de 7 m e inundaría hasta una cota cercana a 10 m.

En Zofri, el flujo del tsunami registraría la mayor intrusión horizontal (alrededor de 1 km), además de las mayores profundidades de inundación lejos de la costa (profundidades cercanas a 5 m). Más de 600 estructuras se verían afectadas, de las cuales un poco más de 500 sufrirían daños graves o destrucción total.

En el sector antiguo de la ciudad se produce la menor intrusión horizontal, mayormente 300 m desde la línea de costa aunque con algunas excepciones en que el flujo ingresaría hasta 500 m. Más de mil estructuras se encontrarían dentro de la zona inundada y la mitad de ellas sufrirían daños irreparables.

En Cavancha el agua ingresa una distancia horizontal mayor a 500 m, sin embargo, las profundidades de inundación son principalmente cercanas a 3 m en el sector poblado. 600 edificaciones se verían afectadas por el agua y la mitad de ellas podrían quedar inutilizables.

Considerando solamente el impacto del tsunami entre el extremo norte de Zofri y el límite sur de la península de Cavancha, un total de 2320 estructuras se verían inundadas, de las que 1425 podrían sufrir daño nivel 3 o superior, es decir, prácticamente irreparables.

En este análisis no se consideró el tipo de uso de las estructuras, sin embargo, existe una diferencia en el impacto que traería consigo la destrucción de una vivienda en comparación con la destrucción de una escuela o de un patrimonio histórico. Es por ello que sería posible sugerir distintas recomendaciones. Por ejemplo, en el caso de edificios y patrimonios históricos que podrían sufrir daños producto de una inundación (Palacio Astoreca, Museo histórico Militar, Teatro Municipal), la finalidad de una reconstrucción post-tsunami estaría enfocada en recrear sin alteraciones estas estructuras, por lo que un catastro detallado antes de que ocurra un evento sería necesario. Viviendas de madera o albañilería cerca de la costa no son recomendadas, por lo que modificaciones al planeamiento urbano así como

mejoras estructurales son una buena alternativa. Por otro lado, las instituciones que posean registro escrito sin respaldo digital deberían optar por guardar esta información en los niveles superiores del edificio para prevenir la pérdida de documentos importantes. Finalmente, el área central de Zofri se caracteriza por las múltiples bodegas de albañilería que se encuentran, las cuales podrían ser reformadas a estructuras de hormigón armado.

7 REFERENCIAS

Aránguiz, R., Shibayama, T. & Yamazaki, Y., 2014. Tsunamis from the Arica-Tocopilla source region and their effects on ports of Central Chile. *Nat Hazards*, pp. 175-202.

Aránguiz, R., Urra, L., Gonzalez, J., Jager, T., Wester, F., Smoor, A & Tiehatten, B., 2015. Numerical simulation of new proposed tsunami scenarios for Iquique, Chile. The Hague, the Netherlands, s.n.

Bordas, A., Lerda, J., Aceituno, P. & Lagos, M., 2006. Políticas públicas para enfrentar los desastres naturales en Chile

Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J-P., Remy, D., Nocquet, J-M., Rolandone, F., Bondoux, F., Gabalda, G & Bonvalot, S., 2011. Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 116(B12405), pp.1-21. Comte, D. & Pardo, M., 1991. Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps. *Natural Hazards*, pp. 23-44.

Comunidad andina, PREDECAN, s.f. [En línea]
Disponible en: <http://www.comunidadandina.org>

DigitalGlobe, 2004. DigitalGlobe. [En línea]
Disponible en: <http://www.digitalglobe.com/>

Emol, 2010. El Mercurio Online. [En línea]
Disponible en: <http://www.emol.com/>

Gokon, H., Koshimura, S. & Matsuoka, M., 2010. Proceedings of the 8th International Workshop on Remote Sensing for Post Disaster Response. Tokyo.

Google Maps, n.d. Google Maps. [En línea]
Disponible en: <https://www.google.com/maps/>

Hatori, T., 1968. Study on distant tsunamis along the Coast of Japan. Part 2, tsunamis of South American origin. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Issue 46, pp. 345 - 359.

Japan Weather Association, n.d. Japan Weather Association. [En línea] Disponible en: <https://www.jwa.or.jp/english/>

Koshimura, S., Namegaya, Y. & Yanagisawa, H., 2009. Tsunami Fragility – A New Measure to Identify Tsunami Damage –. Journal of Disaster Research, pp. 479-488.

Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. & Imamura, F., 2009. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. 51(3).

Kulikov, E., Rabinovich, A. & Thomson, R., 2005. Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile. Volume 35, p. 185–209.

Mansinha, L. & Smylie, D. E., 1971. The displacement fields of inclined faults. Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 1433-1440.

Mas, E., Koshimura, S., Suppasri, A., Matsuoka, M., Matsuyama, M., Yoshii, T., Jimenez, C., Yamazaki, F & Imamura, F., 2012. Developing Tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato. Volume 12.

Minoura, k., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y & Iwasaki, T, 2001. The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan. 23(2).

Murao, O. & Nakazato, H., 2010. Vulnerability functions for buildings based on damage survey data in Sri Lanka after the 2004 Indian Ocean Tsunami. Kandy, 371-378.

NGDC, 2014. [En línea] Disponible en: http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?bt_0=&st_0=&type_3=Exact&query_10=Non+Selected&op_12=eq&v_12=&type_14=Exact&query_14=89&op_3=eq&v_3=CHILE&type_4=Like&query_4=&bt_17=&st_17=&st_5=-16&bt_6=&st_6=&bt_5=-

24&type_3=Exact&query_15=None+Selected&bt

[Último acceso: 2014].

Okada, Y., 1985. Surface deformation of shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, p. 1135 –1154.

Osso, F. Dall., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G & Dominey-Howes, D., 2009. A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 1557–1565.

Papadopoulos, G. & Imamura, F., 2001. A proposal for a new tsunami intensity scale. *ITS*, pp. 569-577.

Papathoma, M. & Dominey-Howes, 2003. Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 733–747.

Papathoma, M., Dominey-Howes, D., Zong, . Y. & Smith, D., 2003. Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, p. 377–389.

Paris, R., Lavigne, F., Wassimer, P. & Sartohadi, J., 2006. "Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Marine Geology*, Volume 238, pp. 93-106.

Rhea, S., Tarr, A.C., Hayes, G., Villaseñor, A., Furlong, K.P & Benz, H.M, 2010. Seismicity of the Earth 1900-2007, Nazca plate and South America. s.l.:U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1083-E, 1 map sheet, scale 1:12,000,000..

Riquelme, S., Barrientos, S., Hayes, G., Herman, M., Barnhart, W., Furlong, K., Benz, H., Bergman, E., Earle, P & Samsonov, S, 2014. Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake. *Nature Letters*, Volume 512, pp. 295 - 298.

RMS, 2011. The 2010 Maule, Chile Earthquake: Lessons and Future Challenges, USA: Risk Management Solutions.

SENDAI CITY, 2010. Possibility of the Miyagi Sea earthquake. [En línea]
Disponible en: <http://www.city.sendai.jp/syoubou/bousai/kakuritu/index.html>

Shibayama, T., Esteban, M., Ioan, N., Hiroshi, T., Nguyen, D., Ryo, M., Takahito, M., Aranguiz, R., Ravindra, J. & Koichiro, O., 2013. Classification of Tsunami and Evacuation Areas. pp. 365-386.

SHOA, 1995. [En línea]
Disponible en: http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf

Shuto, N., 1993. Tsunami Intensity and Disasters. In: Tsunamis in the World. s.l.:Springer Netherlands, pp. 197-216.

Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., Abe, Y. & Imamura, F., 2012a. Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. Nat Hazards.

Suppasri, A., Imamura, F. & Koshimura, S., 2010. Effects of the Rupture Velocity of Fault Motion, Ocean Current and Initial Sea Level on the Transoceanic Propagation of Tsunami. Coastal Engineering Journal, Volume 52(02), p. 107–132.

Suppasri, A., Koshimura, S. & Imamura, F., 2011. Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modeling of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, Issue 11, p. 173–189.

Suppasri, A. & Mas, E., 2012b. DEVELOPING TSUNAMI FRAGILITY CURVES FROM THE SURVEYED DATA OF THE 2011 GREAT EAST JAPAN TSUNAMI IN SENDAI AND ISHINOMAKI PLAINS. Coastal Engineering Journal, 54(1).

USGS, 2004. USGS. [En línea]
Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/#summary>
[Accessed 2014].

USGS, 2014. USGS. [En línea]
Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/>

USGS, 2014. USGS. [En línea]
Disponble en:
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/poster/2014/20140401.php>

Yagi, Y. et al., 2012. Rupture process of the 2014 Iquique Chile Earthquake in relation with the foreshock activity. *Geophys. Res. Lett.*, Volume 41, p. 4201–4206.

Yagi, Y., Takahashi, . T., Okumura, Y. & Aránguiz, R., 2014. Tsunami hazard estimation: Case of Iquique, in Seminar on Disaster Mitigation for Earthquake and Tsunami Countries of Latin America.

Yamazaki, Y., Cheung, K. F. & Kowalik, Z., 2009. Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, p. 473–497.

Yamazaki, Y., Cheung, . K. F. & Kowalik, Z., 2011. Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, p. 2081–2107.

8 ANEXOS

8.1 Anexo 2.1: Factores que afectan la vulnerabilidad según Papathoma

1. El entorno construido

i. Número plantas de cada edificio:

- Sólo un piso (evacuación vertical es imposible. Alta vulnerabilidad).
- Más de un piso (Es posible una evacuación vertical. Vulnerabilidad moderada).

ii. Descripción de la planta baja:

- Abierta con objetos móviles como mesas y sillas (alta vulnerabilidad a lesiones).
- Abierta o con grandes ventanas sin objetos móviles (vulnerabilidad moderada).
- Ninguna de las anteriores (baja vulnerabilidad).

iii. Alrededor de la construcción:

- Ninguna barrera (vulnerabilidad muy alta).
- Terraplén bajo estrecho (vulnerabilidad alta).
- Muro de hormigón bajo o estrecho (vulnerabilidad moderada).
- Muro de hormigón alto (baja vulnerabilidad).

iv. Materiales de construcción, edad, diseño:

- Edificaciones de fieldstone (piedras recolectadas en el campo), sin reforzar, desmoronadas (alta vulnerabilidad).
- Edificios de ladrillos, mortero cemento, sin refuerzo (vulnerabilidad moderada).
- Esqueleto de hormigón prefabricado, hormigón armado (baja vulnerabilidad).

v. Objetos móviles:

- Objetos móviles (son aquellos que pueden causar lesiones a personas, dañar edificios o bloquear las vías de evacuación, por ejemplo, coches viejos, barriles, refrigeradores, contenedores, materiales de construcción, partes de automóviles, etc.) (Alta vulnerabilidad).
- No hay objetos móviles (baja vulnerabilidad).

2. Datos sociológicos
 - i. Densidad de población:
 - Densidad de población durante la noche y el día, en verano e invierno
 - ii. Número de personas por edificio
 - Hartas o pocas (vulnerabilidad alta o baja respectivamente)

3. Datos económicos
 - i. Uso de suelo
 - Comercial (tiendas, almacenes, tabernas, hoteles, etc)
 - Residencial
 - Servicio (escuelas, hospitales, centrales eléctricas, etc)

4. Datos ambientales y físicos (para evaluar protección contra inundación)
 - i. Barreras/defensas marinas naturales o hechas por el hombre
 - Natural (Playa de arena o marisma) (vulnerabilidad alta)
 - Terraplén del suelo (vulnerabilidad moderada)
 - Muro de piedra y hormigón (vulnerabilidad baja)
 - ii. Entorno natural:
 - Amplia zona intertidal (baja vulnerabilidad).
 - Zona intertidal media (vulnerabilidad moderada)
 - Zona intertidal estrecha (vulnerabilidad alta)
 - iii. Recubrimiento del suelo – vegetación
 - Sin vegetación (alta vulnerabilidad)
 - Matorrales y vegetación baja (vulnerabilidad moderada)
 - Árboles y matorrales densos (baja vulnerabilidad)

A cada clasificación se le asigna arbitrariamente un puntaje, para poder estandarizar la información.

8.2 Anexo 3.1: Escenario Mw=8.81 Yagi (2014)

slip	lonR	latR	dR	L	W	strike	dip	rake
0.54	-70.18987446	-24.37596214	51.3828	20	20	2	20	90
1.17	-70.3751899	-24.36993912	44.5424	20	20	2	20	90
3.14	-70.5604042	-24.36391531	37.702	20	20	2	20	90
2.89	-70.74571739	-24.35779059	30.8616	20	20	2	20	90
2.27	-70.93092951	-24.35176508	24.0212	20	20	2	20	90
2.08	-71.11624061	-24.34573866	17.1808	20	20	2	20	90
1.53	-71.30145055	-24.33971145	10.3404	20	20	2	20	90
1.23	-71.48675939	-24.33358334	3.5	20	20	2	20	90
3.61	-70.18282801	-24.19537382	51.3828	20	20	2	20	90
5.61	-70.36814249	-24.18935165	44.5424	20	20	2	20	90
6.08	-70.55335582	-24.18332869	37.702	20	20	2	20	90
5.5	-70.73866805	-24.17720482	30.8616	20	20	2	20	90
4.47	-70.9238792	-24.17118016	24.0212	20	20	2	20	90
4.06	-71.10918934	-24.16515458	17.1808	20	20	2	20	90
2.87	-71.29439832	-24.15912822	10.3404	20	20	2	20	90
1.95	-71.47970619	-24.15300095	3.5	20	20	2	20	90
4.23	-70.17588306	-24.01478537	51.3828	20	20	2	20	90
6.77	-70.3610965	-24.00876411	44.5424	20	20	2	20	90
7.08	-70.54640893	-24.00274194	37.702	20	20	2	20	90
6.92	-70.73162013	-23.99661898	30.8616	20	20	2	20	90
6.31	-70.91693039	-23.9905951	24.0212	20	20	2	20	90
5.56	-71.1021395	-23.98457044	17.1808	20	20	2	20	90
3.83	-71.28744759	-23.97854486	10.3404	20	20	2	20	90
2.29	-71.47265445	-23.97241851	3.5	20	20	2	20	90
4.65	-70.16883945	-23.83419692	51.3828	20	20	2	20	90
6.91	-70.35405193	-23.82817651	44.5424	20	20	2	20	90
7.18	-70.5393634	-23.82215519	37.702	20	20	2	20	90
7.17	-70.72457364	-23.81603308	30.8616	20	20	2	20	90
7.09	-70.90988294	-23.81001005	24.0212	20	20	2	20	90
6.83	-71.09509109	-23.80398623	17.1808	20	20	2	20	90
5.48	-71.28039815	-23.79786151	10.3404	20	20	2	20	90
3.41	-71.46560413	-23.791836	3.5	20	20	2	20	90
4.78	-70.16179726	-23.6536084	51.3828	20	20	2	20	90
6.93	-70.34700878	-23.64758885	44.5424	20	20	2	20	90
7.18	-70.53231928	-23.64156837	37.702	20	20	2	20	90
7.18	-70.71752857	-23.63544711	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.90283691	-23.62942493	24.0212	20	20	2	20	90
7.08	-71.08804411	-23.62340197	17.1808	20	20	2	20	90
6.27	-71.27335021	-23.6172781	10.3404	20	20	2	20	90
4.15	-71.45855524	-23.61125344	3.5	20	20	2	20	90
4.98	-70.15475646	-23.47301982	51.3828	20	20	2	20	90
6.7	-70.34006708	-23.46700105	44.5424	20	20	2	20	90
6.91	-70.52527649	-23.46088149	37.702	20	20	2	20	90
7.14	-70.71058496	-23.45486102	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.89579229	-23.44883976	24.0212	20	20	2	20	90

7.17	-71.08109859	-23.44281758	17.1808	20	20	2	20	90
6.82	-71.26630368	-23.43669462	10.3404	20	20	2	20	90
4.7	-71.45160782	-23.43067075	3.5	20	20	2	20	90
3.97	-70.14771705	-23.29243116	51.3828	20	20	2	20	90
5.02	-70.33302672	-23.28641325	44.5424	20	20	2	20	90
5.38	-70.51823517	-23.28029455	37.702	20	20	2	20	90
6.93	-70.70354269	-23.27427492	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.88874906	-23.26825451	24.0212	20	20	2	20	90
7.15	-71.07405442	-23.26223319	17.1808	20	20	2	20	90
6.73	-71.25925856	-23.25611109	10.3404	20	20	2	20	90
4.61	-71.44456175	-23.25008807	3.5	20	20	2	20	90
4.19	-70.14077909	-23.11184238	51.3828	20	20	2	20	90
4.82	-70.32598774	-23.10582538	44.5424	20	20	2	20	90
5.14	-70.5112953	-23.09970747	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.69650181	-23.09368876	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.88180729	-23.08766914	24.0212	20	20	2	20	90
7.01	-71.06701164	-23.08164874	17.1808	20	20	2	20	90
5.78	-71.25231489	-23.07552743	10.3404	20	20	2	20	90
3.65	-71.43751708	-23.06950532	3.5	20	20	2	20	90
4.19	-70.13374244	-22.93125359	51.3828	20	20	2	20	90
4.82	-70.31895014	-22.92523744	44.5424	20	20	2	20	90
5.14	-70.50425675	-22.91912039	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.6894623	-22.91310254	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.87476684	-22.90708378	24.0212	20	20	2	20	90
6.99	-71.05997024	-22.90106423	17.1808	20	20	2	20	90
5.64	-71.24527255	-22.89494377	10.3404	20	20	2	20	90
3.57	-71.4304738	-22.88892252	3.5	20	20	2	20	90
3.71	-70.12670716	-22.75066473	51.3828	20	20	2	20	90
4.74	-70.31191391	-22.74464944	44.5424	20	20	2	20	90
5.14	-70.49721957	-22.73853324	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.68242418	-22.73251625	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.86772777	-22.72649834	24.0212	20	20	2	20	90
6.99	-71.05293023	-22.72047965	17.1808	20	20	2	20	90
5.71	-71.23823159	-22.71436005	10.3404	20	20	2	20	90
3.98	-71.4234319	-22.70833966	3.5	20	20	2	20	90
3.17	-70.11967323	-22.5700758	51.3828	20	20	2	20	90
4.66	-70.30497909	-22.56406131	44.5424	20	20	2	20	90
5.14	-70.49018375	-22.55794603	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.67548747	-22.55192983	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.86069006	-22.54591284	24.0212	20	20	2	20	90
6.99	-71.04599164	-22.53989494	17.1808	20	20	2	20	90
5.72	-71.23119201	-22.53377626	10.3404	20	20	2	20	90
4.05	-71.41649144	-22.52775667	3.5	20	20	2	20	90
2.64	-70.11264066	-22.3894868	51.3828	20	20	2	20	90
4.57	-70.29794557	-22.38347317	44.5424	20	20	2	20	90
5.14	-70.48314929	-22.37735875	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.66845207	-22.37134341	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.85365371	-22.36532728	24.0212	20	20	2	20	90

7	-71.03895428	-22.35921024	17.1808	20	20	2	20	90
5.79	-71.22415378	-22.35319242	10.3404	20	20	2	20	90
4.06	-71.40945228	-22.34717368	3.5	20	20	2	20	90
1.94	-70.10570948	-22.20889767	51.3828	20	20	2	20	90
4.4	-70.29091333	-22.20278496	44.5424	20	20	2	20	90
5.13	-70.47621623	-22.19677134	37.702	20	20	2	20	90
6.9	-70.66141801	-22.19075692	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.84671878	-22.18474159	24.0212	20	20	2	20	90
7.08	-71.03191834	-22.17862548	17.1808	20	20	2	20	90
6.28	-71.21721697	-22.17260845	10.3404	20	20	2	20	90
4.21	-71.40241447	-22.16659063	3.5	20	20	2	20	90
0.87	-70.09867959	-22.02830853	51.3828	20	20	2	20	90
4.1	-70.28388249	-22.02219668	44.5424	20	20	2	20	90
5.33	-70.46918445	-22.01618392	37.702	20	20	2	20	90
6.93	-70.65438529	-22.01017037	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.83968512	-22.0041559	24.0212	20	20	2	20	90
7.17	-71.02488376	-21.99804064	17.1808	20	20	2	20	90
6.81	-71.21018145	-21.99202447	10.3404	20	20	2	20	90
4.63	-71.39537802	-21.98600752	3.5	20	20	2	20	90
2.15	-70.09165101	-21.84771932	51.3828	20	20	2	20	90
5.75	-70.27685298	-21.84160834	44.5424	20	20	2	20	90
6.85	-70.462154	-21.83559644	37.702	20	20	2	20	90
7.14	-70.64735391	-21.82958374	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.8326528	-21.82357014	24.0212	20	20	2	20	90
7.16	-71.01785051	-21.81745575	17.1808	20	20	2	20	90
6.74	-71.20314727	-21.81144044	10.3404	20	20	2	20	90
4.28	-71.38834291	-21.80542434	3.5	20	20	2	20	90
1.91	-70.08462376	-21.66713004	51.3828	20	20	2	20	90
5.88	-70.26992484	-21.66101986	44.5424	20	20	2	20	90
7.08	-70.45512488	-21.65500889	37.702	20	20	2	20	90
7.18	-70.64042391	-21.64899699	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.82562181	-21.64298431	24.0212	20	20	2	20	90
7.09	-71.01091864	-21.63687072	17.1808	20	20	2	20	90
6.33	-71.19611442	-21.63085634	10.3404	20	20	2	20	90
4.15	-71.38140919	-21.62484105	3.5	20	20	2	20	90
1.51	-70.07759782	-21.48654069	51.3828	20	20	2	20	90
5.43	-70.26289797	-21.48043138	44.5424	20	20	2	20	90
7.02	-70.44809707	-21.47442126	37.702	20	20	2	20	90
7.18	-70.63339517	-21.46841024	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.81859214	-21.46239842	24.0212	20	20	2	20	90
7.09	-71.00388804	-21.45628569	17.1808	20	20	2	20	90
6.33	-71.1890829	-21.45027218	10.3404	20	20	2	20	90
4.15	-71.37437673	-21.44425775	3.5	20	20	2	20	90
2.39	-70.07067324	-21.30595121	51.3828	20	20	2	20	90
5.58	-70.2558724	-21.29984282	44.5424	20	20	2	20	90
7.02	-70.44117063	-21.29383352	37.702	20	20	2	20	90
7.18	-70.62636774	-21.28782341	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.81166384	-21.2818124	24.0212	20	20	2	20	90

7.17	-70.99685876	-21.2757006	17.1808	20	20	2	20	90
6.75	-71.18215274	-21.26968789	10.3404	20	20	2	20	90
4.29	-71.3673456	-21.26367438	3.5	20	20	2	20	90
3.48	-70.0636499	-21.12536172	51.3828	20	20	2	20	90
6.21	-70.24884813	-21.1192542	44.5424	20	20	2	20	90
7.09	-70.43414543	-21.11324576	37.702	20	20	2	20	90
7.18	-70.61934161	-21.10723652	30.8616	20	20	2	20	90
7.18	-70.80463672	-21.10112638	24.0212	20	20	2	20	90
7.16	-70.98983079	-21.09511544	17.1808	20	20	2	20	90
6.8	-71.17512384	-21.08910359	10.3404	20	20	2	20	90
4.63	-71.36031578	-21.08309096	3.5	20	20	2	20	90
4.17	-70.05662785	-20.94477216	51.3828	20	20	2	20	90
6.77	-70.24182516	-20.9386655	44.5424	20	20	2	20	90
7.17	-70.42712153	-20.93265793	37.702	20	20	2	20	90
7.16	-70.61231678	-20.92664956	30.8616	20	20	2	20	90
7.11	-70.79761097	-20.92054029	24.0212	20	20	2	20	90
7.08	-70.98280411	-20.91453022	17.1808	20	20	2	20	90
6.32	-71.16809624	-20.90851924	10.3404	20	20	2	20	90
4.14	-71.35328727	-20.90250747	3.5	20	20	2	20	90
4.65	-70.04960702	-20.76408253	51.3828	20	20	2	20	90
6.91	-70.23490352	-20.75807668	44.5424	20	20	2	20	90
7.15	-70.42009891	-20.75207003	37.702	20	20	2	20	90
6.93	-70.6053933	-20.74606248	30.8616	20	20	2	20	90
6.51	-70.79058651	-20.73995413	24.0212	20	20	2	20	90
6.82	-70.97587878	-20.73394487	17.1808	20	20	2	20	90
6	-71.16106994	-20.72793481	10.3404	20	20	2	20	90
3.55	-71.3463601	-20.72192385	3.5	20	20	2	20	90
4.71	-70.04258753	-20.58349282	51.3828	20	20	2	20	90
6.92	-70.22788311	-20.57748784	44.5424	20	20	2	20	90
7.01	-70.41307757	-20.57148207	37.702	20	20	2	20	90
5.97	-70.59837104	-20.56547538	30.8616	20	20	2	20	90
5.37	-70.78356333	-20.5593679	24.0212	20	20	2	20	90
5.65	-70.96885468	-20.55335951	17.1808	20	20	2	20	90
4.44	-71.15404493	-20.54735033	10.3404	20	20	2	20	90
2.56	-71.33933417	-20.54134023	3.5	20	20	2	20	90
4.46	-70.03556931	-20.40290304	51.3828	20	20	2	20	90
6.68	-70.22086396	-20.39689894	44.5424	20	20	2	20	90
6.86	-70.40605751	-20.39089403	37.702	20	20	2	20	90
5.17	-70.59135006	-20.38488821	30.8616	20	20	2	20	90
4.52	-70.77654143	-20.37878161	24.0212	20	20	2	20	90
4.34	-70.96183187	-20.37277409	17.1808	20	20	2	20	90
1.08	-71.1470212	-20.36676577	10.3404	20	20	2	20	90
0.34	-71.33230952	-20.36075655	3.5	20	20	2	20	90
2.67	-70.02865241	-20.22231314	51.3828	20	20	2	20	90
4.61	-70.21384609	-20.21630996	44.5424	20	20	2	20	90
5.31	-70.39913877	-20.21030587	37.702	20	20	2	20	90
1.33	-70.58433034	-20.20430098	30.8616	20	20	2	20	90
0.62	-70.76962085	-20.19819519	24.0212	20	20	2	20	90

0.58	-70.95481032	-20.19218859	17.1808	20	20	2	20	90
0.08	-71.14009879	-20.18618109	10.3404	20	20	2	20	90
0	-71.32528609	-20.18007281	3.5	20	20	2	20	90
0	-69.34329544	-19.61702004	78.5	20	20	336	20	90
0	-69.50913418	-19.68697679	72.3197	20	20	336	20	90
0.02	-69.67497352	-19.75683229	66.1393	20	20	336	20	90
0.29	-69.84081353	-19.82678652	59.959	20	20	336	20	90
1.04	-70.00665416	-19.8966395	53.7786	20	20	336	20	90
2.84	-70.17249545	-19.96659123	47.5983	20	20	336	20	90
5.07	-70.33833739	-20.03654169	41.418	20	20	336	20	90
6.52	-70.50417994	-20.10639091	35.2376	20	20	336	20	90
6.36	-70.67002316	-20.17633887	29.0573	20	20	336	20	90
5.08	-70.83586698	-20.24618558	22.8769	20	20	336	20	90
2.86	-71.00161141	-20.31613106	16.6966	20	20	336	20	90
1.32	-71.16745654	-20.38607526	10.5163	20	20	336	20	90
0.94	-71.33330229	-20.45591822	4.3359	20	20	336	20	90
0	-69.42090483	-19.45180344	78.5	20	20	336	20	90
0	-69.58674229	-19.52165999	72.3197	20	20	336	20	90
0.33	-69.75258043	-19.59161529	66.1393	20	20	336	20	90
0.95	-69.9184192	-19.66156932	59.959	20	20	336	20	90
2.14	-70.08425858	-19.73142211	53.7786	20	20	336	20	90
3.9	-70.24999856	-19.80137366	47.5983	20	20	336	20	90
5.76	-70.41583921	-19.87122393	41.418	20	20	336	20	90
6.86	-70.58168054	-19.94117295	35.2376	20	20	336	20	90
7.12	-70.7475225	-20.01112071	29.0573	20	20	336	20	90
6.86	-70.91336507	-20.08096722	22.8769	20	20	336	20	90
5.78	-71.07920831	-20.15091247	16.6966	20	20	336	20	90
3.18	-71.24505215	-20.22075648	10.5163	20	20	336	20	90
0.92	-71.41089667	-20.29069923	4.3359	20	20	336	20	90
0	-69.49841349	-19.28658693	78.5	20	20	336	20	90
0.1	-69.66424972	-19.35644328	72.3197	20	20	336	20	90
1.08	-69.83008662	-19.42639838	66.1393	20	20	336	20	90
2.63	-69.99592412	-19.49625222	59.959	20	20	336	20	90
3.65	-70.16176229	-19.56620481	53.7786	20	20	336	20	90
5.07	-70.32760109	-19.63615613	47.5983	20	20	336	20	90
6.69	-70.4934405	-19.70600621	41.418	20	20	336	20	90
7.09	-70.65928058	-19.77595502	35.2376	20	20	336	20	90
7.17	-70.82512126	-19.84580259	29.0573	20	20	336	20	90
6.79	-70.99096261	-19.9157489	22.8769	20	20	336	20	90
5.26	-71.15680459	-19.98569395	16.6966	20	20	336	20	90
2.45	-71.32264718	-20.05553776	10.5163	20	20	336	20	90
0.46	-71.48849043	-20.12548031	4.3359	20	20	336	20	90
0	-69.57602155	-19.12127046	78.5	20	20	336	20	90
0.34	-69.74185657	-19.19122662	72.3197	20	20	336	20	90
1.78	-69.90769223	-19.26118152	66.1393	20	20	336	20	90
4.01	-70.0735285	-19.33103517	59.959	20	20	336	20	90
5.07	-70.23936543	-19.40098755	53.7786	20	20	336	20	90
6.12	-70.40520296	-19.47083868	47.5983	20	20	336	20	90

7.15	-70.57104116	-19.54078856	41.418	20	20	336	20	90
7.18	-70.73687999	-19.61073717	35.2376	20	20	336	20	90
6.95	-70.90271942	-19.68058454	29.0573	20	20	336	20	90
5.89	-71.06855952	-19.75053065	22.8769	20	20	336	20	90
3.81	-71.23440021	-19.82037551	16.6966	20	20	336	20	90
1.24	-71.40014151	-19.89031915	10.5163	20	20	336	20	90
0.01	-71.5659835	-19.9602615	4.3359	20	20	336	20	90
0.02	-69.65362898	-18.95605407	78.5	20	20	336	20	90
0.38	-69.81946278	-19.02601003	72.3197	20	20	336	20	90
1.61	-69.98529718	-19.09586473	66.1393	20	20	336	20	90
3.71	-70.15113224	-19.16581818	59.959	20	20	336	20	90
5.35	-70.31696793	-19.23577037	53.7786	20	20	336	20	90
6.65	-70.48280422	-19.3056213	47.5983	20	20	336	20	90
7.1	-70.64854111	-19.37557101	41.418	20	20	336	20	90
7.02	-70.81437866	-19.44541943	35.2376	20	20	336	20	90
6.67	-70.98021688	-19.5153666	29.0573	20	20	336	20	90
4.85	-71.14605573	-19.58531251	22.8769	20	20	336	20	90
2.1	-71.31189517	-19.65515717	16.6966	20	20	336	20	90
0.43	-71.47773529	-19.72510058	10.5163	20	20	336	20	90
0	-71.64357599	-19.79494274	4.3359	20	20	336	20	90
0.09	-69.7311357	-18.79083777	78.5	20	20	336	20	90
0.26	-69.89696827	-18.86079354	72.3197	20	20	336	20	90
1.07	-70.06280144	-18.93064804	66.1393	20	20	336	20	90
2.63	-70.22863526	-19.00060129	59.959	20	20	336	20	90
4.37	-70.39446969	-19.07045329	53.7786	20	20	336	20	90
5.28	-70.56030478	-19.14040402	47.5983	20	20	336	20	90
5.75	-70.72614049	-19.2103535	41.418	20	20	336	20	90
6.12	-70.89197681	-19.28020173	35.2376	20	20	336	20	90
6.11	-71.05781378	-19.35014869	29.0573	20	20	336	20	90
4.08	-71.22365135	-19.41999441	22.8769	20	20	336	20	90
1.2	-71.38948958	-19.48993887	16.6966	20	20	336	20	90
0	-71.55532844	-19.55988208	10.5163	20	20	336	20	90
0	-71.7211679	-19.62972404	4.3359	20	20	336	20	90
0.87	-69.80874184	-18.62562152	78.5	20	20	336	20	90
1.23	-69.97457315	-18.69547709	72.3197	20	20	336	20	90
0.97	-70.14040512	-18.7654314	66.1393	20	20	336	20	90
1.63	-70.30623772	-18.83538445	59.959	20	20	336	20	90
2.41	-70.47207091	-18.90523625	53.7786	20	20	336	20	90
2.7	-70.63790477	-18.97518679	47.5983	20	20	336	20	90
3.75	-70.80373921	-19.04503607	41.418	20	20	336	20	90
4.42	-70.96957432	-19.1149841	35.2376	20	20	336	20	90
4.21	-71.13541005	-19.18493087	29.0573	20	20	336	20	90
2.53	-71.30124638	-19.25477639	22.8769	20	20	336	20	90
0.52	-71.46708337	-19.32472065	16.6966	20	20	336	20	90
0	-71.63292094	-19.39456367	10.5163	20	20	336	20	90
0	-71.79865911	-19.46450546	4.3359	20	20	336	20	90
1.65	-69.88634733	-18.46040534	78.5	20	20	336	20	90
1.59	-70.05217742	-18.53026071	72.3197	20	20	336	20	90

0.6	-70.21800817	-18.60021483	66.1393	20	20	336	20	90
0.36	-70.38383951	-18.67006768	59.959	20	20	336	20	90
0.46	-70.5496715	-18.74001928	53.7786	20	20	336	20	90
0.73	-70.71550412	-18.80996962	47.5983	20	20	336	20	90
1.97	-70.88133733	-18.87981871	41.418	20	20	336	20	90
2.75	-71.04707114	-18.94976657	35.2376	20	20	336	20	90
2.42	-71.2129056	-19.01961315	29.0573	20	20	336	20	90
0.89	-71.37874072	-19.08955847	22.8769	20	20	336	20	90
0	-71.54457646	-19.15950253	16.6966	20	20	336	20	90
0	-71.71041279	-19.22934535	10.5163	20	20	336	20	90
0	-71.87624979	-19.29928691	4.3359	20	20	336	20	90
1.44	-69.96385209	-18.29508926	78.5	20	20	336	20	90
1.1	-70.12968098	-18.36504444	72.3197	20	20	336	20	90
0.12	-70.2955105	-18.43499835	66.1393	20	20	336	20	90
0.07	-70.46134062	-18.50485102	59.959	20	20	336	20	90
0.58	-70.62717139	-18.57480242	53.7786	20	20	336	20	90
1.05	-70.79300274	-18.64465257	47.5983	20	20	336	20	90
1.42	-70.95883476	-18.71460145	41.418	20	20	336	20	90
1.65	-71.12466739	-18.78454909	35.2376	20	20	336	20	90
1.13	-71.29050062	-18.85439547	29.0573	20	20	336	20	90
0.25	-71.4563345	-18.92434059	22.8769	20	20	336	20	90
0	-71.62216897	-18.99418447	16.6966	20	20	336	20	90
0	-71.78800409	-19.06412708	10.5163	20	20	336	20	90
0	-71.95383984	-19.13406845	4.3359	20	20	336	20	90
0.5	-70.04145629	-18.12987322	78.5	20	20	336	20	90
0.34	-70.20728397	-18.19982821	72.3197	20	20	336	20	90
0	-70.37311224	-18.26968193	66.1393	20	20	336	20	90
0.3	-70.53894116	-18.33963439	59.959	20	20	336	20	90
1.07	-70.7047707	-18.4095856	53.7786	20	20	336	20	90
1.98	-70.87060083	-18.47943555	47.5983	20	20	336	20	90
2.15	-71.03643162	-18.54938424	41.418	20	20	336	20	90
1.43	-71.20226299	-18.61923168	35.2376	20	20	336	20	90
0.45	-71.36809501	-18.68917786	29.0573	20	20	336	20	90
0	-71.53392766	-18.75912279	22.8769	20	20	336	20	90
0	-71.69976089	-18.82896647	16.6966	20	20	336	20	90
0	-71.86559477	-18.89890889	10.5163	20	20	336	20	90
0	-72.03142924	-18.96875006	4.3359	20	20	336	20	90
0	-70.11905986	-17.96465726	78.5	20	20	336	20	90
0	-70.28488632	-18.03461205	72.3197	20	20	336	20	90
0.03	-70.45071337	-18.10446558	66.1393	20	20	336	20	90
0.36	-70.61654107	-18.17441784	59.959	20	20	336	20	90
0.83	-70.78236935	-18.24426886	53.7786	20	20	336	20	90
2.04	-70.94819829	-18.31421861	47.5983	20	20	336	20	90
2.32	-71.11402785	-18.38416711	41.418	20	20	336	20	90
1.17	-71.27975793	-18.45401438	35.2376	20	20	336	20	90
0.17	-71.44558872	-18.52396037	29.0573	20	20	336	20	90
0	-71.6114201	-18.5938051	22.8769	20	20	336	20	90
0	-71.77725213	-18.66374858	16.6966	20	20	336	20	90

$$\begin{array}{l} 0 \\ 0 \end{array} \left| \begin{array}{l} -71.94308477 \\ -72.108918 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} -18.7336908 \\ -18.80353178 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 10.5163 \\ 4.3359 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 20 \\ 20 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 20 \\ 20 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 336 \\ 336 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 20 \\ 20 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} 90 \\ 90 \end{array} \right|$$