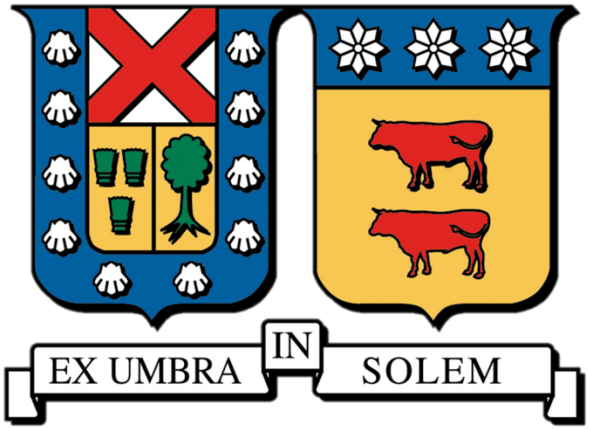
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO, CHILE



"HACIA EL MODELADO DE TSUNAMIS EN TIEMPO REAL: ¿RAPIDEZ O PRECISIÓN?"

Memoria presentada por:

FRANCO JAVIER MIGLIARO GAJARDO

Para optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía:
Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca

Comisión Revisora:
Alejandra Gubler
Megan Williams

Agosto, 2019

Resumen

Los tsunamis en Chile a veces pueden proporcionar un intervalo de tiempo lo suficientemente acotado entre su generación y su impacto en la costa como para descartar simulaciones en tiempo real para modelar y predecir su inundación. Es por lo anterior que se hace necesario buscar métodos que permitan disminuir los tiempos de simulación y que a su vez no arrojen resultados con una pérdida de precisión que se traduzca en predicciones muy alejadas de la realidad.

En el presente documento se analizan en paralelo dos formas que buscan disminuir el tiempo requerido para la simulación computacional o pronóstico de la inundación de tsunamis producidos por terremotos de falla convergente, sobre los cuales se realiza un análisis de calidad de predicción o de precisión. Estos son, en primer lugar la utilización de Tsunami-HySEA, software que modela inundación por tsunami desarrollado por el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga, cuya característica principal es estar optimizado para trabajar en GPU y en segundo lugar, el método NearTIF, desarrollado por Gusman et al., 2014, que en forma indirecta y basado en una serie de escenarios permite encontrar similitudes en las series de tiempo y pronosticar inundación.

Cabe destacar que ambos análisis se sometieron al tsunami generado por el terremoto del Maule 2010 para las ciudades de San Antonio, Constitución y Talcahuano.

Se utilizó Tsunami-HySEA para generar cinco configuraciones topo-batimétricas sobre las cuales se analizaron diversos parámetros con fin de pesquisar el efecto en la calidad del resultado al variar la resolución de la morfología de las localidades en cuestión. Se concluyó que es posible utilizar ciertas configuraciones específicas, dependiendo de la calidad de información a emplear, sin perder presición excesiva y logrando disminuir los tiempos de cálculo a un cuarto del tiempo original (modelo completo).

Para poder verificar el comportamiento de la metodología NearTIF, se generaron sus componentes (base de datos y algoritmo de búsqueda) y se ejecutó, teniendo resultados dispares entre las tres ciudades bajo análisis. En tanto San Antonio y Talcahuano tuvieron un pronóstico deseable, Constitución tuvo una gran sobreestimación en el pronóstico de inundación.

En términos generales, se observó que ambos métodos logran disminuir los tiempos de simulación lo suficiente como para incluirlos en un sistema de alerta temprana de aproximadamente una hora a unos cuantos minutos (entre uno y seis, dependiendo del método), considerando algunas mejoras que afectaron la precisión de las predicciones en algunos casos particulares.

Abstract

The limited time interval between the generation of tsunamis in Chile and their impact on the coast rules out simulations in real time to model and predict their flooding. For this reason, it is necessary to look for methods that reduce the simulation times and that in turn do not give results with a loss of precision that translates to predictions very far from the reality.

In this document, two methods are analyzed in parallel that seek to reduce the time required for computational simulation or flood forecasting of convergent fault tsunamis, on which an analysis of prediction or precision quality is performed. These are, in the first place the use of Tsunami-HySEA, software developed by the EDANYA group of the University of Málaga by Macías et al., (2017), whose main characteristic is to be optimized to work on GPU and secondly, the NearTIF method, developed by Gusman et al., (2014).

The analyses were performed using the tsunami generated by the 2010 Maule earthquake, for the cities of San Antonio, Constitución and Talcahuano.

Tsunami-HySEA was used to generate five topo-bathymetric configurations on which various parameters were analyzed in order to investigate the effect on the result's quality. The previous varying the resolution of the morphology of the localities of interest. It was concluded that it is possible to use some specific configurations, depending on the quality of the information to be used, without losing excessive precision, reducing the calculation times to approximately one quarter of the complete model.

In order to verify the behavior of the NearTIF methodology, its parts (database, and algorithm) were generated and executed, with varying results among the three cities under analysis. While San Antonio and Talcahuano had a desirable forecast, Constitution had a large overestimation in the forecast.

In general terms, it was observed that both methods manage to reduce simulation times enough to add it to a warning system, considering some improvements that affected the accuracy of the predictions in some particular cases.

Agradecimientos

Antes que todo, agradecer al Profesor Patricio Catalán por introducirme en el mundo hidráulico de la Ingeniería Civil, que me fue encantando de a poco y ahora es en lo que me veo en el futuro, a pesar de que ni siquiera sabía de su existencia al momento de entrar a estudiar la carrera. Gracias Profe por darme la oportunidad de trabajar con usted en el área que le apasiona y siempre estar dispuesto a guíarme, resolver dudas o simplemente corregirme cuando era necesario.

A mis papás, Víctor y Sylvia, por haberme dado la oportunidad de estudiar y nunca haber tenido ni sentido la preocupación económica que esto conlleva, por haberme inculcado la resiliencia y siempre apoyarme a lo largo de este proceso que ya suma casi 8 años, junto con mis hermanos.

También a mis papás adoptivos, Marcelo, Margarita, Héctor y Ximena, que me recibieron en sus casas como un hijo más, por casi la mitad de la carrera y haberme dado todas las comodidades para hacerme sentir como en casa, y así siempre lo sentí.

A mi hermano Stefano, por aguantarme un año entero viviendo solos cuando él partía su carrera también. El desorden y las comidas simples abundaban.

A Blas, Daggo, Benja, Ferna, Schilling, Guille, formamos un excelente grupo, tanto de estudio como de viajes o actividades "extra-curriculares", logramos hacer agradables muchas tardes de mil cosas que hacer y con el estrés por las nubes.

A Alejandra y Natalia, por enseñarme a usar softwares y conceptos y estar siempre dispuestas para guíar, o simplemente resolver dudas.

Finalemente agredecer a CONICYT, CIGIDEN (FONDAP 15110017) y a FONDEF IT15I1001 por apoyar económicamente esta investigación.

Glosario

Antes de desarrollar el tema de la investigación como tal, es necesario definir ciertos parámetros o conceptos que se abordan en la misma, comenzando por los parámetros sísmicos (características de la falla) que generan el tsunami, seguido por parámetros hidrodinámicos del maremoto, que son útiles para describir su impacto y comportamiento.

Parámetros Sísmicos

Los términos que se detallan a continuación se presentan en la Figura 1. Dados por la Guía para la estimación de Peligro de Tsunami Ver 1. (Proyecto SATREPS Tsunami).

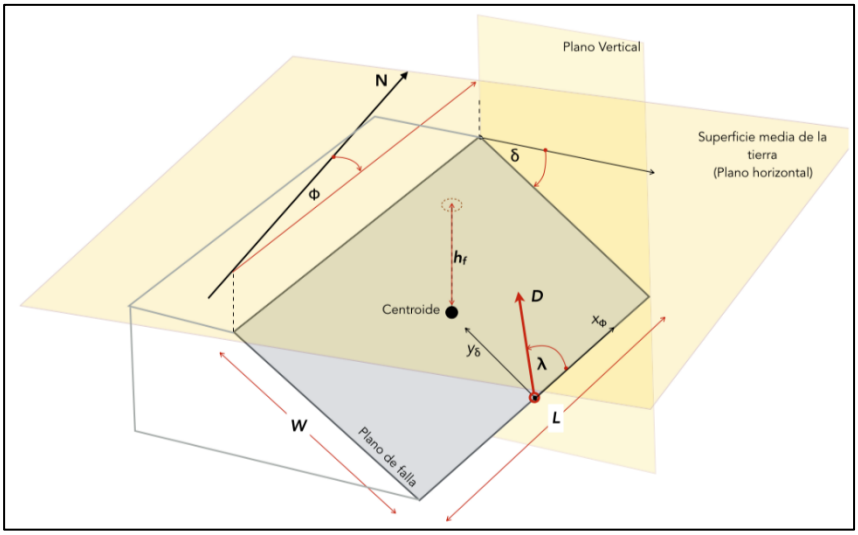


Figura 1 Esquema representativo de un plano de falla, y parámetros de posición, geometría y deslizamiento.

(Fuente: Guía para la Estimación de Peligro de Tsunami Ver1. Proyecto SATREPS Tsunami.)

"**Ángulo de manteo,** δ (*dip angle* en inglés)**:** También llamado ángulo de buzamiento, y corresponde al ángulo medido en un plano vertical comprendido entre la superficie media de la tierra (plano de referencia horizontal) y el plano de falla, medido desde la superficie media de la tierra hacia abajo hasta el plano de falla. El plano vertical donde se mide este ángulo, queda definido por la línea de máxima pendiente de la traza horizontal del plano de falla."

"**Ángulo de deslizamiento,** λ (*rake angle* en inglés)**:** Ángulo que describe el movimiento relativo del bloque superior, respecto del bloque inferior de la falla, considerado este último en reposo. Este ángulo se mide sobre el plano de falla mismo, desde la horizontal hasta la nueva ubicación del punto que se encontraba inmediatamente adyacente en el plano que se quedó en reposo."

"**Área de ruptura:** Superficie de la zona de ruptura, medidad en el plano de falla. Queda definida por su longitud L y ancho W, medidas en la dirección del rumbo y del manteo, respectivamente."

"**Deslizamiento, D** (dislocación, *slip* en inglés)**:** Desplazamiento relativo, en la dirección definida por el ángulo de deslizamiento, entre los bloques superior e inferior de la falla, medido en el plano de la falla."

"**Magnitud de momento, Mw:** Magnitud de un terremoto obtenida utilizando el momento sísmico. Esta escala no se satura para terremotos grandes y es por esto que es la que mejor los caracteriza."

"**Plano de falla:** Representación idealizada de la interfaz entre dos placas tectónicas colindantes donde ocurre un movimiento relativo durante un sismo. Se define como un área rectangular donde los bordes superiores e inferiores son paralelos a la superficie media de la tierra (plano horizontal). La posición, orientación y movimiento del plano de falla queda dado por la ubicación de su centro (latitud, longitud, profundidad focal), por los ángulos de manteo y rumbo y por el deslizamiento y ángulo de deslizamiento. Los sismos pueden ser idealizados como un movimiento de uno o varios planos de falla."

"**Profundidad focal, h_f :** Distancia vertical medida entre el centro del plano de falla y su proyección sobre la superficie media de la tierra (plano de referencia horizontal)."

"Rumbo, ϕ (*strike angle* en inglés)**:** Corresponde al rumbo o azimut de la traza de la falla, medido en un plano horizontal, con sentido horario y con origen en el norte geográfico. Los valores del ángulo de rumbo se suelen establecer entre 0-360º."

Parámetros Hidrodinámicos

Los términos que se detallan a continuación fueron extraídos de la Guía para la estimación de Peligro de Tsunami Ver 1. (Proyecto SATREPS Tsunami).

"**Altura de Inundación,** $h\ (x,y)$**:** Elevación alcanzada por el agua del mar en el lado tierra medida respecto a un datum dado por el nivel de referencia del evento (NRE) en una distancia de inundación específica. La altura de inundación es la suma de la profundidad de inundación y la cota de elevación del terreno local. Su unidad de medida es el metro (m)."

"**Cota de terreno,** $\mathbf{z}(x,y)$**:** Cota de elevación del terreno, referida al Nivel de Referencia Topobatimétrico (NRTB). Su unidad de medida es el metro (m)."

"**Cota batimétrica:** Profundidad del fondo marino, referida al Nivel de Referencia Topobatimétrico (NRTB). Su unidad de medida es el metro (m)."

"**Desnivelación,** $\eta\ (x,y,t)$**:** Distancia vertical entre el Nivel de Referencia del Evento (NRE) y la superficie de agua en cada instante y punto del dominio. Puede adoptar valores tanto positivos como negativos. Su unidad de medida es el metro (m)."

"**Nivel Medio del Mar:** Corresponde al plano en torno al cual oscila la marea y calcula mediante promedio aritmético de observaciones horarias de altura de la marea y puede ser diario, semanal, mensual y anual. Métodos más sofisticados utilizan filtros numéricos de paso bajo para eliminar las mareas y oleajes antes de obtener el promedio."

"**Nivel de Reducción de Sonda:** Corresponde al plano donde están referidas las sondas o profundidades de una localidad, el cual representa la mínima profundidad que se puede encontrar en un punto, a partir de un análisis armónico de la señal de marea del lugar. Por consiguiente, el NRS es un valor local, no siendo a priori extrapolable ni interpolable entre localidades contiguas."

"**Nivel de Referencia Topobatimétrico, NRTB:** Nivel vertical único al cual deben estar referidas las cotas topográficas y batimétricas en la zona de estudio, el cual debe ser un valor común, que garantice la congruencia entre cotas topográficas y batimétricas. Este nivel puede ser el NRS o el NMM."

"**Nivel de Referencia del Evento, NRE:** Nivel vertical único referido al NRTB, que representa el nivel del mar al momento del evento. De modo conservador, se sugiere utilizar el nivel de la pleamar máximo en sizigias, la cual puede ser estimada a partir de las Tablas de Marea Astronómica, provistas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile."

"**Profundidad de Inundación,** *d (x,y)*: También llamada profundiad de flujo, es la profundidad del agua del tsunami sobre la cota del terreno medido en un sitio específico."

Su unidad de medida es el metro (m). De acuerdo a las definiciones anteriores, se puede establecer la siguiente relación:

$$h(x,y) = d(x,y) + z(x,y) \qquad (1)$$

"**Runup, *R* *(x,y)*:** Diferencia entre la cota de terreno en el punto de máxima inundación horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia del tsunami NRE. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R(x,y) = z\big(I(x,y)\big) - NRE \qquad (2)$$

Se debe notar que para una zona de estudio dada, el valor de runup no es único, ya que es función de la topografía. Su unidad de medida es el metro (m)."

"**Tiempo de arribo del tsunami:** Tiempo de llegada del primer tren de ondas a un determinado sitio. Corresponde al tiempo transcurrido entre el inicio del sismo y el comienzo de la desnivelación $\eta(x,y,t)$ descontando la marea."

Índice de Contenidos

Pág.

1. Introducción 1

2. Estado del Arte 4

3. Objetivos 9

4. Metodología 10

4.1. Topo-batimetrías 11

4.2. Softwares utilizados 14

4.2.1. Tsunami - HySEA 14

4.2.2. COMCOT 1.9 16

4.2.3. MATLAB 17

4.3. Corridas Base 17

4.4. Configuraciones en HySEA 19

4.5. NearTIF 20

4.5.1. Base de datos 23

4.5.2. Simulación en tiempo real 26

4.5.3. Algoritmo 27

4.6. Variables a analizar 28

5. Resultados 31

5.1. Corridas Base 31

5.1.1. Tsunami-HySEA 31

5.1.2. COMCOT 1.9v 32

5.2. Configuraciones HySEA 34

5.3. NearTIF 35

5.4. Variables de interés en Configuraciones HySEA y NearTIF 41

5.4.1. Run-Up 41

5.4.2. Relación de Área de Inundación (RAI) 44

5.4.3. Parámetros estadísticos del Error (mediana, P5% y P95%) 46

6. Discusión 51

6.1. Configuraciones HySEA 51

6.2. NearTIF 53

6.3. Desafío hacia el futuro 57

7. Conclusión 61

8. Referencias 63

ANEXO A 66

A.1 Base de Datos de NearTIF 67

ANEXO B **73**
B.1. Resultados Configuración P84 ..... **74**
B.2. Resultados Configuración P88 ..... **77**
B.3. Resultados Configuración P8-3 ..... **80**
B.4. Resultados Configuración P82-3 ..... **83**
B.5. Resultados Configuración P84-3 ..... **86**
B.6. Resultados NearTIF **89**
ANEXO C **92**
C.1. Topobatimetrías y niveles utilizados en la investigación **93**
ANEXO D **95**
D.1. Máxima intrusión horizontal modelos de San Antonio **96**
D.2. Máxima intrusión horizontal modelos de Constitución **97**
D.3. Máxima intrusión horizontal modelos de Talcahuano **97**

Índice de Figuras

Pág.

Figura 2.1 Esquema funcionamiento del SATT, con sus proyecciones 5
Figura 4.1 Distribución espacial de resoluciones topobatimétricas 13
Figura 4.2 Capacidad flotante computacional de GPUs y CPUs 15
Figura 4.3 Provecho y Rapidez de simulación de Corrida Base según número de GPUs .. 16
Figura 4.4 Distribución espacial del deslizamiento en metros (slip) obtenido por Yue et al., (2014) 18
Figura 4.5 Esquema del funcionamiento del método NearTIF 22
Figura 4.6 Ubicación de boyas virtuales en (a) San Antonio, (b) Constitución y (c) Talcahuano 24
Figura 4.7 Ubicación de puntos centrales oeste de fallas en la base de datos y ejemplos de fallas planas utilizadas por el método (rectángulos en color blanco). 25
Figura 4.8 (a) Serie de tiempo simulada (punteada azul), serie de tiempo desplazada en el time shift óptimo (τo) y serie de tiempo del mejor escenario encontrado (naranjo). (b) Gráfica del error medio cuadrático en función del time shift en minutos 28
Figura 5.1 Profundidades de Inundación de la corrida base de HySEA de (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. En magenta el 50% de las fallas de Cienfuegos. Notar diferencias en escalas 31
Figura 5.2 Profundidades de Inundación de la corrida base de COMCOT de (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. En magenta el 50% de las fallas de Cienfuegos. Notar diferencias en escalas entre ciudades 32
Figura 5.3 Distribución espacial del error asociado a las Profundidades de Inundación de la corrida base de HySEA versus la corrida base de COMCOT para las ciudades de (a)

Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. Notar diferencias en escalas entre ciudades. 33
Figura 5.4 (a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 337 de la base de datos de las 7 boyas empleadas en San Antonio. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico). 38
Figura 5.5 a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 183 de la base de datos de las 6 boyas empleadas en Constitución. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico). 39
Figura 5.6 (a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 318 de la base de datos de las 8 boyas empleadas en Talcahuano. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico). 40
Figura 5.7 (a) Profundidad de inundación Corrida Base COMCOT de San Antonio, (b) Profundidad de inundación pronóstico NearTIF para San Antonio, (c) Error espacial en metros en San Antonio 41
Figura 5.8 Ubicación y magnitud del run-up máximo de configuraciones HySEA y NearTIF, junto con mediciones de terreno (color rojo) en (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. 42
Figura 5.9 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Constitución 44
Figura 5.10 Relaciones de Áreas de Inundación de las configuraciones HySEA y resultados NearTIF 45
Figura 5.11 Histograma del error en profundidad de inundación del pronostico NearTIF para San Antonio 47
Figura 5.12 Comportamiento del error en San Antonio de configuraciones HySEA y caso 337 de base de datos de NearTIF 47
Figura 5.13 Comportamiento del error en Constitución de configuraciones HySEA y caso 183 de base de datos de NearTIF 48
Figura 5.14 Comportamiento del error en Talcahuano de configuraciones HySEA y caso 318 de base de datos de NearTIF 49
Figura 6.1 Series de tiempo boya a mayor profundidad para Constitución y Talcahuano.. 55
Figura 6.2 Dominios de simulación para impacto en una hora o menos desde la generación de tsunami y dimensión propuesta para cubrir este impacto en función de la magnitud de momento sísmico (Mo). 58
Figura 6.3 Dominios de simulación para impacto en una hora o menos desde la generación de tsunami y dimensión propuesta para cubrir este impacto en función de la magnitud de momento (Mw) 59
Figura 9.1 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de San Antonio 74
Figura 9.2 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de Constitución 75
Figura 9.3 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de Talcahuano 76

Figura 9.4 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de San Antonio 77
Figura 9.5 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de Constitución 78
Figura 9.6 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de Talcahuano 79
Figura 9.7 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de San Antonio 80
Figura 9.8 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de Constitución 81
Figura 9.9 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de Talcahuano 82
Figura 9.10 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de San Antonio 83
Figura 9.11 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de Constitución 84
Figura 9.12 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de Talcahuano 85
Figura 9.13 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de San Antonio 86
Figura 9.14 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de Constitución 87
Figura 9.15 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de Talcahuano 88
Figura 9.16 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de San Antonio 89
Figura 9.17 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de Constitución 90
Figura 9.18 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de Talcahuano 91
Figura 9.19 Topobatimetrías y su distribución para San Antonio 93
Figura 9.20 Topobatimetrías y su distribución para Constitución 93
Figura 9.21 Topobatimetrías y su distribución para Talcahuano 94
Figura 9.22 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de San Antonio 96
Figura 9.23 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Constitución 97
Figura 9.24 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Talcahuano 97

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 4.1 Topo-batimetrías utilizadas según ciudad y resolución 12
Tabla 4.2 Detalle topo-batimétrico de escenarios a analizar 20
Tabla 5.1 Detalle de tiempos de cálculo y nivel de detalle de cada configuración 34
Tabla 5.2 Resultados de NearTIF para las tres ciudades analizadas 36
Tabla 9.1 Detalle de cada falla que comone la Base de Datos generada para NearTIF 72

1. Introducción

Chile a lo largo de su historia ha estado expuesto y ha sido víctima de diversos tipos de desastres naturales, tales como: aludes, inundaciones, incendios forestales, erupciones volcánicas, terremotos o tsunamis. Dadas las características geológicas de nuestro país, por su magnitud, y recurrencia, probablemente las últimas tres son las que mayor daño provocan al asolar nuestro territorio.

Tanto terremotos como tsunamis, a diferencia de la mayoría de las erupciones volcánicas, brindan un muy acotado intervalo de tiempo para advertir a la población sobre las características del fenómeno que se avecina. Es por esto que muchos esfuerzos científicos en los últimos años han estado enfocados en sistemas de alerta temprana, de manera de poder tomar medidas relacionadas con la seguridad de la población en caso de emergencia, en base a información cada vez mas precisa del fenómeno. Estos esfuerzos alcanzaron mayor vigor luego de la fallida experiencia provocada por el terremoto de 2010 en la región del Maule y su posterior tsunami, materia aludida en esta investigación.

Si bien los tsunamis no son repentinos y existe una ventana de tiempo entre su generación y el arribo a la costa, no es tarea sencilla modelar la falla, propagar y simular la inundación que éste podría generar en este intervalo de tiempo, debido a la gran complejidad del fenómeno físico que se está tratando y por consecuencia al requerimiento computacional que ello necesita para arrojar sus resultados. Dado esto, se ha ido avanzando en términos computacionales y electrónicos para ofrecer a la ciencia y a otros ámbitos, dispositivos capaces de procesar más información en menor tiempo. Ejemplo de aquello son los computadores con unidades GPU (*Graphics Processing Unit* o Unidad de Procesamiento Gráfico), las cuales pueden ser usadas para procesar una tarea en específico, acelerando la simulación de gran forma en comparación a un ordenador común CPU *(Central Processing Unit* o Unidad Central de Procesamiento*)*.

Si bien es considerable la ganancia al trabajar con esta herramienta, cada segundo que se puede llegar a ganar es vital, dado que existe evidencia de que el arribo del maremoto puede ser menor a treinta minutos desde su generación a las costas del país (e.g Fritz et al., 2011 para el terremoto del Maule 2010). Por tanto, se hace necesario realizar un análisis de las variables y el nivel de sofisticación de los modelos que deben ser empleados para llegar a resultados satisfactorios en el menor tiempo posible, y así generar un sistema en el corto plazo que funcione de forma continua frente a este tipo de fenómenos.

En particular, esta investigación tiene por objeto analizar la posible reducción de precisión que se obtiene como consecuencia de simplificar el modelo con el que se simula o que pretende predecir el fenómeno. Esto se puede abordar alterando diversas propiedades o variables, como por ejemplo; aumentar el intervalo de tiempo entre iteraciones del software a utilizar, disminuir el tiempo de vida del tsunami a simular, disminuir la resolución topo-batimétrica en las ciudades o sus alrededores, modelar la falla como un desplazamiento uniforme de geometría rectangular, realizar interpolaciones basadas en una base de datos de tsunamis pre-calculados, generar algún algoritmo que permita predecir en forma indirecta el fenómeno, entre otras.

Todas las modificaciones al modelo enunciadas anteriormente debieran tender a disminuir los tiempos de cálculo computacional y al mismo tiempo se diferencian dos métodos generales de realizar lo que motiva a esta investigación, y estas son; (i) simplificar el modelo en un software apropiado o (ii) generar un método predictor aproximado e indirecto del impacto del tsunami.

Basado en lo anterior y con objetivo de abarcar los dos medios identificados se decidió (i) variar configuraciones topo-batimétricas para obtener la inundación en el software HySEA y (ii) verificar el comportamiento del algoritmo NearTIF (Gusman et al., 2014) para el terremoto del 27 de febrero de 2010, en las ciudades de San Antonio, Constitución y Talcahuano mediante el modelo COMCOT 1.9v.

Finalmente se busca poder generar una estrategia general en el marco del sistema de alerta temprana, en cuanto a dominios de cálculo, topo-batimetrías y métodos a utilizar, y así, poder enfocar posteriores investigaciones en este ámbito.

2. Estado del Arte

Un maremoto se define, según la Real Academia Española (RAE), como "una agitación violenta de las aguas del mar a consecuencia de una sacudida del fondo, que a veces se propaga hasta las costas dando lugar a inundaciones". Precisando mediante una definición mas técnica del fenómeno, como por ejemplo la adoptada por UNESCO (2013), lo define como "una serie de ondas marinas de longitud y periodo sumamente largos de ocurrencia natural que resulta de una perturbación rápida y a gran escala de una masa de agua, causada entre otros, por terremotos interplaca asociados a zonas de subducción, movimientos de masa, erupciones volcánicas o impacto de meteoritos". Definición utilizada también por la Guía para la estimación de Peligro de Tsunami Ver 1. (Proyecto SATREPS Tsunami).

La sacudida o perturbación que se alude en la definiciones anteriores, hablando en la generalidad de las costas chilenas, se deberá a terremotos interplaca de magnitud media-alta (Magnitud de momento 7 Mw aproximadamente o mayores) según la expresión obtenida por Silgado et al., (1978) y con ciertas condiciones de distribución del deslizamiento relacionado a la falla y su ubicación geográfica.

Por otro lado, como lo indica la definición, estos tsunamis pueden generar a veces inundaciones, y por lo tanto son un peligro para la infraestructura presente en zonas cercanas a la costa y más importante aún, las vidas que puedan encontrarse en zonas de riesgo al momento del siniestro, que representa el principal objetivo de un SATT (Sistema de Alerta de Temprana de Tsunamis) (Wächter et al., 2012).

Debido a lo anterior, hace muchos años se ha ido tratando de avanzar en métodos, sistemas o protocolos que ayuden a alertar a la población costera en caso de que se presente este tipo de evento natural. Pero debido a la alta complejidad del fenómeno en cuanto a las variables involucradas y la difícil tarea que significa obtener información de calidad sobre la falla que genera el tsunami, aún se puede realizar mucho trabajo con miras a mejorar el sistema existente a lo largo del mundo, considerando además, que la información que se hace pública debe tener un alto grado de certeza.

Chile, actualmente cuenta con el sistema SIPAT (Sistema Integrado de Predicción y Alarma de Tsunamis), que se basa en una serie de escenarios pre-calculados, que se asocian a la falla real obtenida en forma rápida por entidades sismológicas luego que el sismo ocurre. En este contexto, la Figura 2.1. esquematiza, tanto el sistema existente SIPAT (negro), como las mejoras que se debe hacer (naranjo) y las fuentes externas al sistema como CSN (Centro Sismológico Nacional), ONEMI (Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior y Seguridad Pública), USGS (United States Geological Survey), etc. que proporcionan la información de la falla (rojo), además de el tiempo y los parámetros de entrada al método (gris), que en este caso corresponde a una solución sísmica con magnitud y ubicación del epicentro del terremoto causante del tsunami.

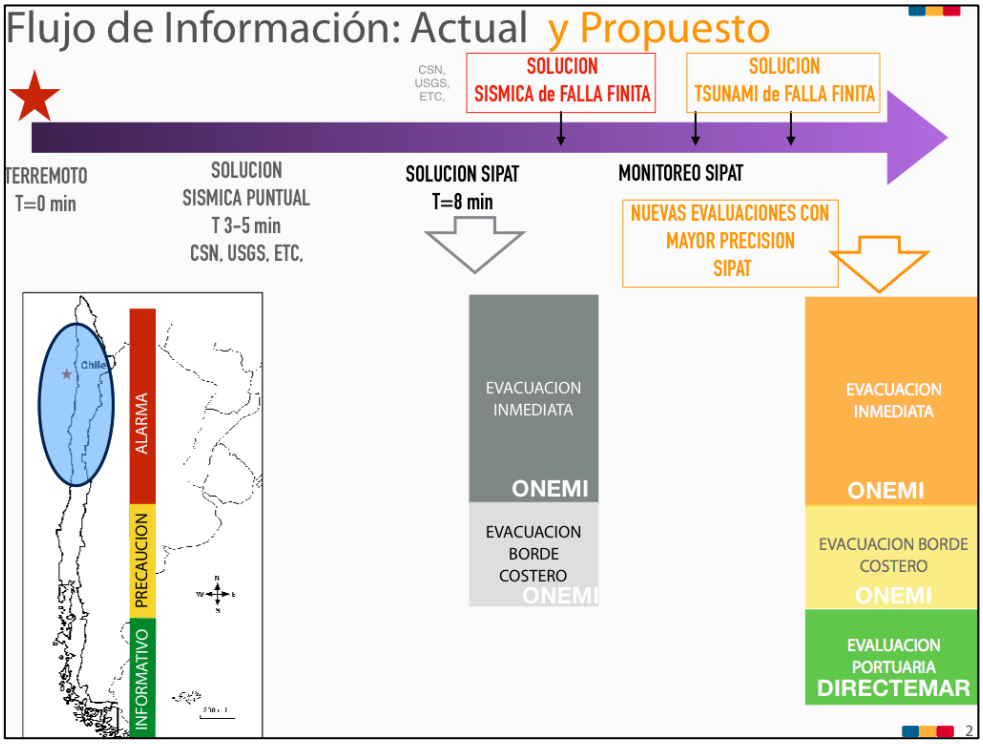


Figura 2.1 Esquema funcionamiento del SATT, con sus proyecciones

(Fuente: Catalán et al., (2018) Concurso IDeA I+D 2018, CONICYT, Ministerio de Educación, Gobierno de Chile.)

Precisamente lo que realiza SIPAT es interpolar de esta base de datos, los escenarios basándose en la magnitud y epicentro de las ondas sísmicas obtenidas por una red de observaciones en tiempo real en la costa (Tatehata et al., 1997). Cabe destacar que Japón utiliza un método similar basado en este mismo principio.

Se puede observar que el objeto de las investigaciones que se están realizando en el área, tanto en esta casa de estudios como en otras a lo largo del país y el mundo, se enfocan en aportar una solución alternativa y de mayor precisión al sistema existente que permita, luego de transcurrido un tiempo mayor, pero razonable, reevaluar la evacuación o cancelación de la alerta en el caso que corresponda. Cuestión presente en la Figura 2.1. en color naranjo en la fase de monitoreo del método SIPAT y las alternativas de mayor precisión que se proponen.

En síntesis, el método que actualmente opera en el país (SIPAT), no considera calcular la inundación probable de forma directa, debido a los costos computacionales que esto significa. Esto se suple generando una solución conservadora considerando aumento de magnitud siguiendo a Burbidge et al., (2015), que, si bien le asegura resguardo a la población, puede generar falsos positivos que le restan eficiencia al método y trae consecuencias negativas en la ciudadanía, como la desconfianza en los organismos del estado. Como por ejemplo el caso de Illapel 2015, donde se alertó de evacuar a poblados lo suficientemente alejados de la fuente para no presentar riesgo y donde, por distintas razones finalmente no se hizo necesaria la medida.

En el contexto mundial, y por ende en Chile también, se pretende incluir en el sistema de alerta temprana de tsunami (SATT) dos aspectos fundamentales para mejorar la precisión y hacer la reevaluación de la alerta con información de mayor calidad: (i) la posibilidad de simular en tiempo cercano al real (NRT), lo que daría como resultado inundaciones sin la necesidad de utilizar bases de datos que en teoría inducen a mayor error y (ii) la incertidumbre al obtener la falla y sus características.

Dada esta necesidad, se plantea realizar una modelación del tsunami de forma directa y así obtener, más que orden de magnitud del fenómeno, sus características reales en la zona, y con ellas su inundación. Con este propósito se desarrollaron programas y equipos para aumentar la capacidad computacional. Ejemplo de lo anterior es Tsunami-HySEA (Macías et al., 2017), que al trabajar en el ámbito GPU arroja resultados de simulaciones en NRT en

tiempos menores a los del un computador común, pudiendo permitir a futuro reemplazar a métodos actuales de predicción, como SIPAT (Melgar et al., 2016).

Macías et al., (2017) plantean que HySEA cumple con los requisitos de validación del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, US), por ende, posee las condiciones para utilizarlo, o más bien, probarlo en un posible SATT a implementar. Además, también ha sido utilizado por Lynett et al., (2017) para la estimación de corrientes en puertos con resultados comparables y en algunos casos mejores que softwares similares.

Por más que se llegara a introducir este tipo de tecnologías en el sistema, no se debe dejar de considerar que estas modelaciones estarán siempre condicionadas por la información de entrada y a su forma de cálculo, por lo que es un aspecto de gran importancia las propiedades de la falla que se simula, dado que puede inducir a errores significativos (Cienfuegos et al., 2018). Como la importancia de la falla que se introduce al modelo es realmente significativa (Geist & Dmowska, 1999) y su incertidumbre puede afectar los resultados, se ha trabajado en metodologías para abarcar esta fuente de error de mejor forma. Ejemplo de aquello son la incorporación de elementos como el acoplamiento intersísmico y la generación de diversos escenarios con deslizamientos estocásticos basados en la representación espectral desarrollado inicialmente por Mai & Beroza (2002) y modificado por Goda et al., (2014).

Dado que la utilización de este tipo de metodologías generará la necesidad de simular una serie de posibles fallas y con ello un aumento del tiempo requerido en el procesamiento computacional del total de posibles escenarios, es que se hace interesante buscar además otros métodos de cálculo indirecto, como es el caso de NearTIF, postulado por Gusman et al., (2014), el cual permite obtener inundación en forma rápida, utilizando un computador común mediante la comparación de series de tiempo con una base de datos pre-calculada. Si este método se utiliza de forma adecuada permitiría cubrir la necesidad de simular sucesivas fallas en corto tiempo y por ello, también será aludido en este documento.

En síntesis, los desafíos actuales del sistema, se pueden resumir en los siguientes tópicos que deberían ser incorporados al SIPAT:

1. Investigar e implementar un algoritmo que considere una estimación de la incertidumbre asociada a la inversión sísmica provista por fuentes externas, para así, contar con un conjunto de escenarios posibles que serían sujetos a simulación por el modelado en tiempo cercano al real.
2. Implementar en SIPAT los algoritmos de inversión de tsunami, considerando la incertidumbre como elemento adicional para la determinación de condiciones iniciales.
3. Determinar e implementar una estrategia de modelado que permita el cálculo en tiempos compatibles con un sistema operacional.

Uno de los principales desafíos es incorporar los desarrollos que deben apuntar a los primeros dos puntos enunciados (que no son abarcados en esta investigación) en el punto tres, que básicamente es el objetivo general de esta memoria de título y por lo tanto se abarca en profundidad.

Dicho esto, este documento se enfoca en analizar y verificar la calidad de dos métodos diferentes para simular inundación en un tiempo acotado. Estos dos métodos son: (i) usar un modelo completo en HySEA evaluando la configuración óptima que permita calcular inundación en un tiempo compatible con la operación de un sistema de alerta sin sacrificar excesiva precisión y (ii) generar y aplicar un método indirecto y de interpolación como NearTIF para predecir inundación.

Ambos métodos se someterán al mismo terremoto (Maule 2010) con el objetivo de evaluar el rendimiento de cada uno de ellos y con esa información intentar identificar la mejor estrategia de modelado.

3. Objetivos

Como objetivo general de esta memoria de título se tiene: evaluar y comparar métodos de estimación rápida de la inundación generada por tsunamis en el contexto de un sistema de alerta temprana.

Los objetivos particulares de esta investigación son:

- Identificar una configuración topo-batimétrica óptima en cuanto a un rápido tiempo de cálculo computacional sin sacrificar demasiada precisión de inundación. Lo anterior se refiere a las resoluciones adecuadas y su distribución en el dominio de cálculo de inundaciones y para ello se debe generar distintos modelos topo-batimétricos y comparar la inundación simulada con una corrida base, en este caso utilizando el software numérico Tsunami-HySEA, siempre sometidos al mismo terremoto.

- Verificar el comportamiento del método aproximado NearTIF. Para lo cual se debe generar y ejecutar el algoritmo planteado por Gusman et al., (2014) y así realizar un análisis de pérdida de precisión al realizar este tipo de pronóstico considerando el tiempo que demora en arrojar la geometría de la inundación. Cuestión que se llevará a cabo en el modelo COMCOT 1.9v.

- Plantear estrategias que podrían emplearse en el futuro al momento de requerir resultados en un corto período de tiempo y con precisión razonable, siempre en el marco del sistema de alerta temprana (SATT).

4. Metodología

En este trabajo se busca analizar modelos para calcular inundación en forma rápida, pero eso se debe realizar comparando los distintos modelos y verificando su similitud con una inundación en común para todos, por tanto, se debió tomar una decisión en cuanto a cuál es la inundación "real". Para este particular se procedió a simular en los dos softwares a utilizar en este estudio (Tsunami-HySEA y COMCOT 1.9v) la falla obtenida por Yue et al., (2014) del terremoto acontecido en 2010 en el Maule, ya que Cienfuegos et al., (2018), indica que genera una inundación similar a la observada en terreno.

De esta forma, se puede tener un punto en común entre las configuraciones a analizar, y por ende la posible configuración mas eficiente y precisa debe generar inundaciones que en el mejor de los casos debiera ser muy similar en toda medida a esta inundación de modelo completo, que desde ahora en adelante denominará **Corrida Base.**

Para el caso de las configuraciones topo-batimétricas a modelar en Tsunami-HySEA, la corrida base será utilizada para comparar entre sí la calidad de la inundación. Cuestión algo distinta en la ejecución de NearTIF, ya que en este caso será utilizada para verificar la calidad del método.

Este cálculo previo se realizó con igual nivel de detalle para las ciudades de San Antonio (33º35'36''S 71º37'18''W), Constitución (35º20'S 72º25'W) y Talcahuano (36º43'0''S 73º07'19''W), urbes icónicas por su nivel de destrucción debido al maremoto del 2010, además de ser localidades con gran número de habitantes en la zona afectada por el evento natural. Al mismo tiempo, estas tres ciudades fueron seleccionadas debido a que se ubican abarcando en forma envolvente la zona de mayores desplazamientos del terremoto utilizado para el análisis y son relativamente equidistantes entre sí.

Por último, cada una de ellas posee diferentes características morfológicas locales, lo que permite analizar de forma más robusta los modelos, dado que, por ejemplo; al existir lomas

de altura considerable flanqueando un estuario (caso de Constitución), las diferencias en el resultado de las simulaciones alterando el modelo se reflejarán en cambios de run-up y profundidades de inundación más que en área inundada. Contrario a cuando existe una gran planicie sin grandes relieves (Talcahuano), donde existirán diferencias apreciables en el área de inundación mas no en las otras dos variables (Cienfuegos et al., 2018).

Con la corrida base establecida para las tres localidades mencionadas, se decidió analizar tres variables con objeto de determinar si los resultados de cada modelo simplificado son adecuados: (i) relación entre áreas de inundación, cuyo valor indicará de grueso modo la similitud en extensión del impacto del tsunami en tierra, (ii) magnitud y ubicación de run-up máximo, que debería proporcionar información de la capacidad que posee el tsunami de alcanzar puntos altos del relieve y (iii) el error asociado profundidades de inundación en el espacio, que proporcionará una idea de la calidad del pronóstico en forma global.

Estas variables, más un análisis estadístico del error brindarán una caracterización simplificada de cada modelo abreviado, ayudando a visualizar con mayor facilidad los defectos y virtudes de cada uno de ellos.

A continuación, se detalla la metodología empleada con mayor detalle:

4.1. Topo-batimetrías

Una pieza fundamental al momento de simular computacionalmente un tsunami es precisamente la morfología del entorno de generación, propagación e inundación del fenómeno y estas características son ingresadas al modelo mediante matrices de datos con diferentes niveles de detalle que contienen latitud, longitud y altura (batimétrica o topográfica) en diferentes puntos del dominio de cálculo deseado.

Dado a que uno de los objetivos de esta investigación es precisamente analizar la configuración topo-batimétrica óptima en cuanto a tiempo y precisión, se hace necesario detallar este dato de entrada de los modelos a simular.

Para poder realizar los escenarios, tanto para HySEA y NearTIF, se utilizaron las mismas fuentes de información topo-batimétrica, de manera tal de evitar que las diferencias entre modelos se atribuyan a datos de entrada (diferencias en el relieve o batimetría), si no que mas bien a una consecuencia del nivel de detalle que se les proporciona a diferentes zonas a simular en cada configuración. En el caso de las grillas madre, que definirán el dominio de cálculo del modelo, se obtuvieron de GEBCO2014 (120, 60 y 30 segundos de arco). En tanto que, para modelar la inundación se utilizó la mejor calidad de información disponible, que se resume en la Tabla 4.1 que indica las resoluciones empleadas y la fuente de información de cada grilla, donde se observan cooperaciones de instituciones como la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas de Chile (DOP) y la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA).

Ciudad	Resolución [sa]	Fuente
San Antonio	10	GEBCO2014
	3	CARTA NAUTICA SHOA – TOPOGRAFÍA OPENTOPO
	1	CARTA NAUTICA SHOA
Constitución	10	GEBCO2014
	3	CARTA NÁUTICA SHOA - DOP
	1	CARTA NÁUTICA SHOA - DOP
Talcahuano	10	GEBCO 2014 - CARTA NAUTICA SHOA
	3	CARTA NAUTICA SHOA - JICA
	1	CARTA NAUTICA SHOA - JICA

Tabla 4.1 Topo-batimetrías utilizadas según ciudad y resolución

Con relación a las topobatimetrías utilizadas para generar la base de datos de NearTIF, se puede decir que se emplearon once grillas anidadas: la más amplia (conteniendo todas las fallas) de un minuto de arco, seguido por una más pequeña de treinta segundos de arco, y para cada ciudad una serie de tres grillas de diez, tres, y un segundo de arco para focalizar el analisis en esas zonas, las tres ciudades previamente mencionadas.

La Figura 4.1. muestra esquemáticamente la distribución de las grillas recién mencionadas, utilizadas para la totalidad de configuraciones presentes en esta invesigación, con pequeños ajustes de resolución y ubicación de bordes debido a restricciones en el modelo Tsunami-HySEA.

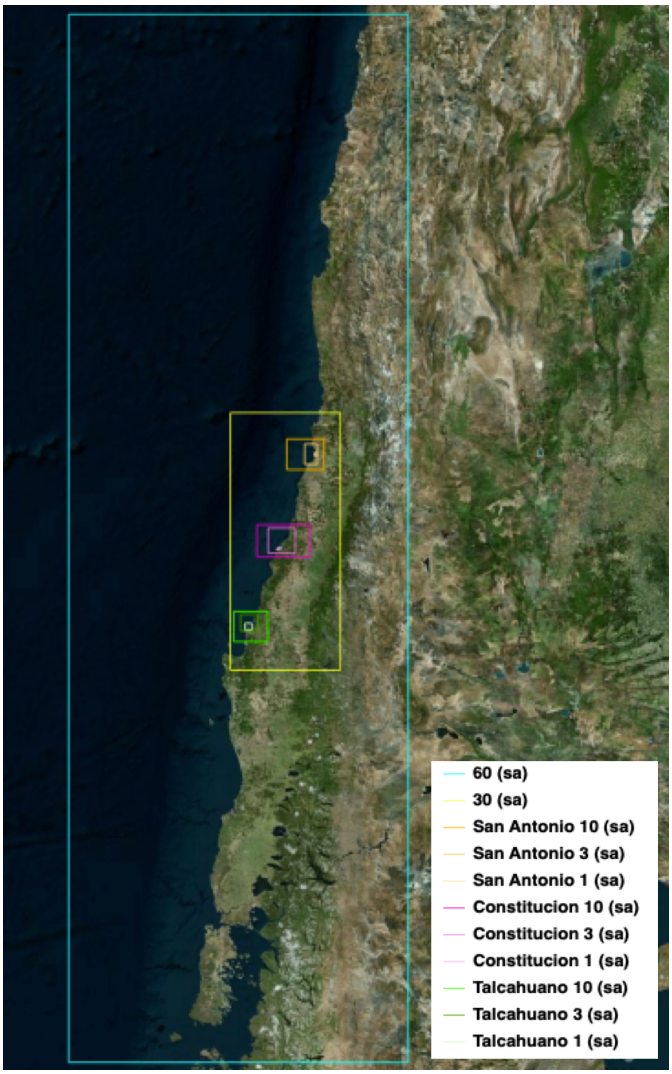


Figura 4.1 Distribución espacial de resoluciones topobatimétricas

Se observa que además de los dos niveles principales de 60 (o 120) y 30 segundos de arco, existen los tres niveles de 10, 3 y 1 segundo de arco para cada ciudad analizada. Para mas detalle de distribución de resoluciones en cada ciudad revisar Anexo C.

4.2. Softwares utilizados

En la siguiente sección se especifican los softwares utilizados, de que forma se emplearon y sus condiciones:

4.2.1. Tsunami - HySEA

Es un modelo numérico basado en GPU para simulaciones de tsunami, desarrollado por la Universidad de Málaga (Macías et al., 2017). Posee la propiedad de dar resultados en forma rápida, comparado con otros softwares de mayor antigüedad y de menor tecnología. Es por esto que se presenta como una herramienta sumamente útil en el marco de la simulación en tiempo real. Además de que existen investigaciones que validan su funcionamiento en el estudio de peligro de tsunami (González-Vida et al., 2013 & 2014). Su funcionamiento consiste en aprovechar la ventaja computacional que brindan las tarjetas GPU para simular en forma simultánea la propagación e inundación del tsunami mediante la operación de las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas.

En la Figura 4.2. las curvas celeste y azul muestran la capacidad computacional de la CPUs en miles de millones (gigas) de operaciones de coma flotante por segundo o GFLOP/s (del inglés *floating point operations per second*) y las verdes lo análogo en las GPUs, desde el año 2000 al 2014. Esta imagen se presenta debido a se puede apreciar fácilmente la ventaja computacional que significa contar con la tecnología GPU dada su capacidad de procesamiento de información de estos sistemas, y que esa ventaja irá aumentando con el pasar de los años, según la tendencia observada.

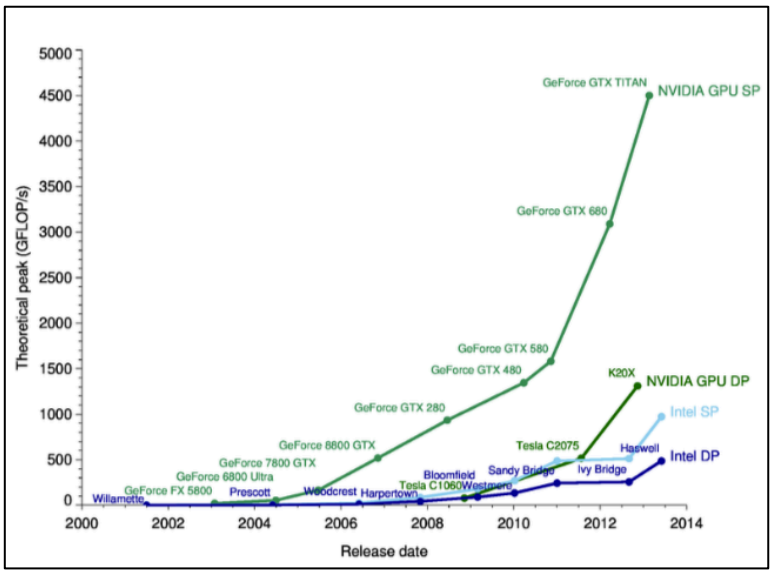


Figura 4.2 Capacidad flotante computacional de GPUs y CPUs

(Fuente: HySEA-tsunami model: A GPU implementation for the Italian TEWS (Gonzalez-Vida et al., 2014).)

Se observa con claridad que las tarjetas gráficas (GPU) pueden procesar hasta diez veces más información que su símil CPU, por lo que se hace deseable introducir este tipo de tecnología en procesos de gran costo computacional como es la simulación de tsunamis.

Este modelo permite que se emplee más de una GPU, y lógicamente al aumentar esa cantidad es posible procesar más información, debido a que se divide la misma cantidad de tareas en un mayor número de núcleos. Pero al mismo tiempo se ve mermado el provecho que se puede obtener de cada tarjeta en forma individual debido a la existencia de la limitante asociado a la comunicación y tráfico de información entre tarjetas asociado al procesador. Lo anterior se observa en la Figura 4.3. donde para más de cuatro tarjetas, la eficiencia de cada una de ellas es muy pequeña (menor al 40% de su potencial), y al mismo tiempo, cuando se sobrepasa este umbral de cuatro tarjetas, la tasa de cambio de la velocidad de simulación del tsunami disminuye significativamente. Por lo que se tomará cuatro GPUs para todos los próximos cálculos en Tsunami-HySEA, con objeto de disminuir el tiempo que el software demora en arrojar los resultados cuidando no subutilizar los recursos disponibles, desde el punto de vista computacional.

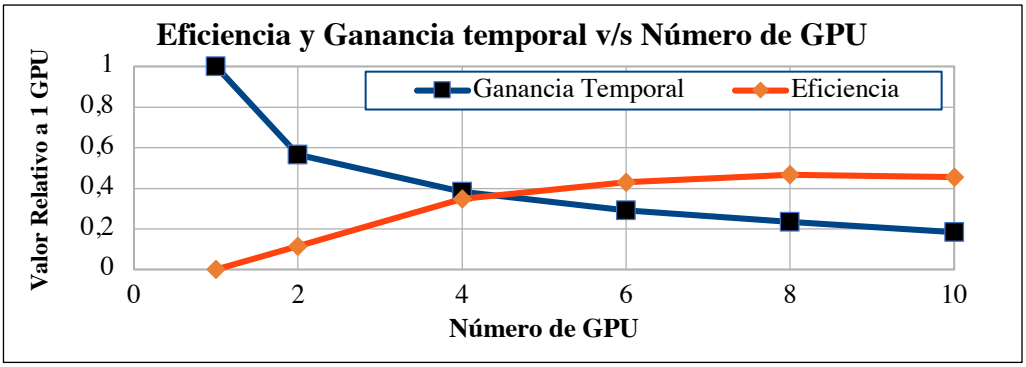


Figura 4.3 Provecho y Rapidez de simulación de Corrida Base según número de GPUs

El clúster utilizado para obtener estos cálculos posee CPUs Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2643 v2 @ 3.50 GHz y las dos tarjetas utilizadas (con dos nodos) corresponden a nVidia Tesla K-20M.

A este software se le debe ingresar como datos de entrada, la misma información requerida por cualquier modelo numérico de simulación de tsunamis: tanto los parámetros físicos del sismo (fuente), la morfología del lugar que se pretende simular (topografías con "*grid ratio*" con potencias de dos, batimetría, rugosidad y condiciones de borde), como los parámetros que definen la simulación (tiempo de simulación, diferencia de tiempo para salida de información y variables de salida requeridas).

4.2.2. COMCOT 1.9

El software COMCOT, desarrollado por la Universidad de Cornell (del inglés *Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) es capaz de simular toda la vida de un tsunami, desde su generación, pasando por su propagación y finalmente su inundación o arribo a la costa. Ha sido ampliamente utilizado en la investigación relacionada con tsunamis (eg. Liu et al., 1995; Wang & Liu et al., 2005 & 2006), donde se mostró que es posible utilizar esta herramienta como válida para estos efectos.

Funciona de forma similar a Tsunami-HySEA de modo que requiere la misma información y se puede elegir las variables de salida utilizar. Se diferencian en que este paquete no trabaja en base a GPUs, por lo que se encuentra en desventaja en relación al tiempo de cálculo para

iguales condiciones de morfología, falla y precisión de resultados. Pero, este software permite trabajar en computadores comunes, más accesibles de adquirir y poner en funcionamiento. Además de ya haber sido ampliamente utilizados en el pasado en el campo de esta investigación.

4.2.3. MATLAB

Es una herramienta de software matemático que ofrece un lenguaje de programación propio. En esta investigación se utilizó para manejar y ejecutar el algoritmo de NearTIF, que consiste en poseer un gran número de terremotos pre-simulados (410) con sus series de tiempo respectivas en puntos estratégicos, además de su respectiva inundación, lo que involucra una cantidad de información considerable.

Se trabajó con matrices de tres dimensiones en este software debido a la facilidad de manejo de datos que proporciona y del mismo modo realizar la búsqueda del mejor escenario mediante una rutina en este lenguaje considerando las series de tiempo de una falla simulada en tiempo real (la que debería ser proporcionada en el momento del evento natural) y realizando un análisis del error medio cuadrático de cada escenario.

4.3. Corridas Base

En esta sección se detalla la configuración y características tanto de la falla empleada para representar el terremoto del 27 de febrero de 2010, como de las Corridas Base o de "*benchmarking*".

Para representar la deformación inicial asociada al terremoto del 27 de febrero de 2010 del Maule, se decidió utilizar la falla obtenida por Yue et al., (2014), ya que fue categorizada como de buen desempeño a la hora de calcular inundación que genera (Cienfuegos et al., 2018). La falla esta compuesta por 90 subfallas con diferentes características (*strike, dip, y slip*), donde este último esta representado en la Figura 4.4. que muestra que el desplazamiento sísmico se encuentra concentrado en gran parte entre las latitudes 33º30' y 36º30' S, lo que

justifica la selección de las tres ciudades a analizar, cuyas ubicaciones se encuentran en frente de aquellos grandes deslizamientos.

Por consecuencia, dichos poblados debieran encontrarse más expuestos al tren de olas generado por el terremoto, en comparación a otros que se encuentran más al norte o al sur, cuestión observada por el impacto en costa del tsunami del 27 de febrero de 2010. También se aprecia que el valor máximo aproximado de slip máximo obtenido por Yue et al., (2014) es de siete metros, frente a las costas de la ciudad de Pichilemu.

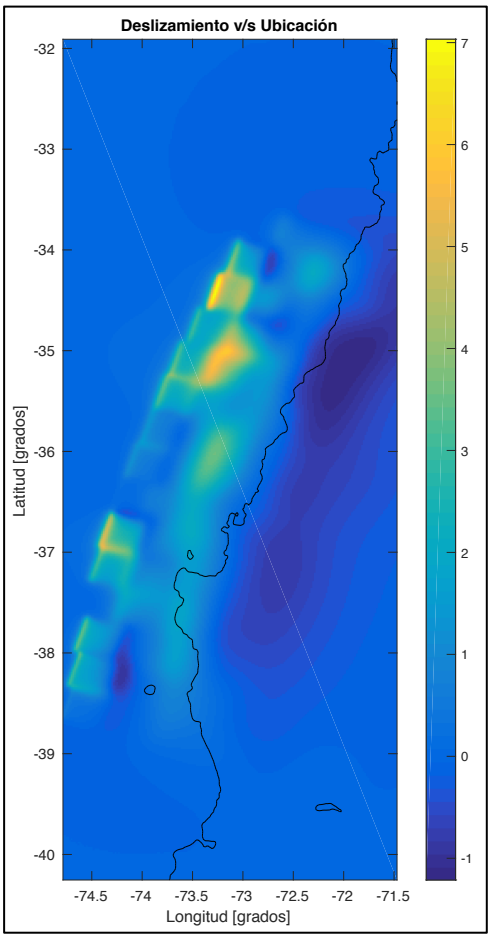


Figura 4.4 Distribución espacial del deslizamiento en metros (slip) obtenido por Yue et al., (2014)

Cabe destacar que la información de la falla fue simulada en los dos modelos numéricos a utilizar en la investigación arrojando resultados similares, que pueden observarse en detalle en secciones siguientes.

4.4. Configuraciones en HySEA

Como uno de los objetivos principales de esta investigación es el de encontrar o al menos acercarse a una configuración topo-batimétrica óptima en cuanto a tiempo y precisión de inundación simulada, se generaron una serie de modelos con diferentes resoluciones, tanto en las cercanías de las ciudades a analizar como en las mismas, y de ese modo, luego de realizar la simulación en Tsunami-HySEA, poder compararlos y analizar hasta que punto y con cuanta cercanía a las urbes se puede disminuir la resolución topo-batimétrica manteniendo una inundación similar al modelo completo.

Para poder analizar la influencia de la variación y simplificación en la configuración topo-batimétrica en el modelo, se procedió a generar cinco modelos distintos, utilizando la misma fuente de información que las Corridas Base e interpolando para obtener las resoluciones deseadas en caso de ser necesario.

Es preciso mencionar que para calcular inundaciones se debe tener una resolución en los lugares de interés lo suficientemente alta como para extraer el detalle de profundidades de inundación y configuración de la zona afectada y predecir de forma adecuada el fenómeno (Tang et al., 2009). Para esto, se definió una resolución mínima en las ciudades a inundar de tres segundos de arco, lo que corresponde aproximadamente a noventa metros, con lo que se obtiene un nivel de detalle suficiente en cuanto al detalle de la zona inundada.

Los escenarios recién descritos se detallan en la Tabla 4.2. que indica el nombre que se asignará a cada uno, sus topo-batimetrías originales y las interpolaciones que se requirieron en caso de ser necesarias, debido a la restricción del modelo numérico HySEA de anidar grillas de resolución con potencia de dos entre madre e hija.

Nombre	Batimetrías Originales [sa]	Configuración Utilizada [sa]
Corrida Base HySEA	30” - 10” - 3” - 1”	30” - 7,5” - 3,75” - 0,9375”
P84	30” - 3” - 1”	30” - 3,75” 0,9375”
P88	60” - 10” - 1”	60” - 7,5” - 0,9375”
P8-3	30” - 3”	30” - 3,75”
P82-3	60” - 10” - 3”	60” - 7,5” - 3,75”
P84-3	120” - 10” - 3”	120” - 15” - 3,75”

Tabla 4.2 Detalle topo-batimétrico de escenarios a analizar

Se observa que existen dos configuraciones con resolución máxima de 0,9375 segundos de arco (P84 y P88), con diferencias en el nivel de detalle de las grillas madre, lo cual dará una idea acerca de la injerencia que tiene la resolución de la batimetría asociada al dominio de cálculo (grilla de mayor tamaño y menor resolución) y de las cercanías de los poblados a inundar (grilla intermedia entre la madre y la de detalle).

Además de lo anterior, se generaron tres configuraciones adicionales con resolución máxima de 3,75 segundos de arco con objeto de visualizar el nivel de precisión que se pierde al tener menor información en la zona inundada y al mismo tiempo generar variaciones de las grillas madre con miras a relacionar ese comportamiento en forma general.

Con todo lo anterior, se debería estar en condiciones de comparar y analizar las inundaciones de cada una de las cinco configuraciones y la corrida base de Tsunami-HySEA, teniendo en cuenta el tiempo que se gana al disminuir la precisión en distintas medidas y el sacrificio en cuanto a la calidad del área inundada obtenida en cada simulación mediante las variables previamente mencionadas.

4.5. NearTIF

NearTIF es una metodología desarrollada por Gusman et al., (2014) que pretende pronosticar la inundación luego de un sismo, en un tiempo muy reducido mediante un computador común. Por esto es totalmente atingente a esta investigación, por lo que será analizado y verificada su capacidad predictiva en forma paralela a las cinco configuraciones a analizar en HySEA. Esta metodología se basa en el supuesto razonable que consiste en que, si dos

terremotos distintos generan similares series de tiempo en distintas ubicaciones cerca de la costa y la ciudad en cuestión, estos producirán similares inundaciones (Gusman et al., 2014).

Su funcionamiento se basa en la utilización de dos elementos fundamentales: una base de datos y la simulación simplificada en tiempo real, a la que se llamará de ahora en adelante **Serie Real**. El primero que se menciona consiste es un conjunto de terremotos pre-simulados de falla plana a los que se debe extraer series de tiempo en puntos específicos a definir (boyas virtuales) y las inundaciones que cada falla genera en la ciudad que se requiera cubrir. El segundo, como lo dice su nombre, es una simulación generada por la falla del terremoto real en una grilla de resolución de treinta segundos de arco, a la que se debe extraer las series de tiempo en las mismas ubicaciones de las boyas virtuales que se posee en la base de datos.

El método se pone en funcionamiento cuando se calcula el error medio cuadrático entre las series de tiempo de la simulación en tiempo real y los terremotos que componen la base de datos (para cada ciudad en forma independiente). Este error medio cuadrático se calcula promediando el cuadrado del error para cada unidad de tiempo en el itervalo deseado en todas las boyas de cada ciudad, mediante la expresión (3):

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (E_i)^2} \quad ; \quad \text{con } E_i = (h_{simulación} - h_{escenario})_i \qquad (3)$$

Donde:
E_i: Error entre la serie de tiempo simulada y cada terremoto en la base de datos
n: Tiempo sobre el cual se calcula la raíz del error medio cuadrático
h: altura instantáea del nivel del mar en boya virtual

Se puede apreciar en la Figura 4.5. que la entrada al sistema es la información de la fuente del tsunami, en este caso, la falla del terremoto que acontece en caso de emergencia. Luego, se tiene la simulación en tiempo real de las series de tiempo en las ubicaciones de las boyas virtuales que se comparan con las de la base de datos, compuesta por las series de tiempo de los tsunamis pre-simulados. Seguido de eso, se realiza la comparación de aquellas series de tiempo con las simuladas en tiempo real, y así, entregar como la inundación pronosticada, la

asociada al escenario de la base de datos con menor error, estimado como la raíz del error medio cuadrático.

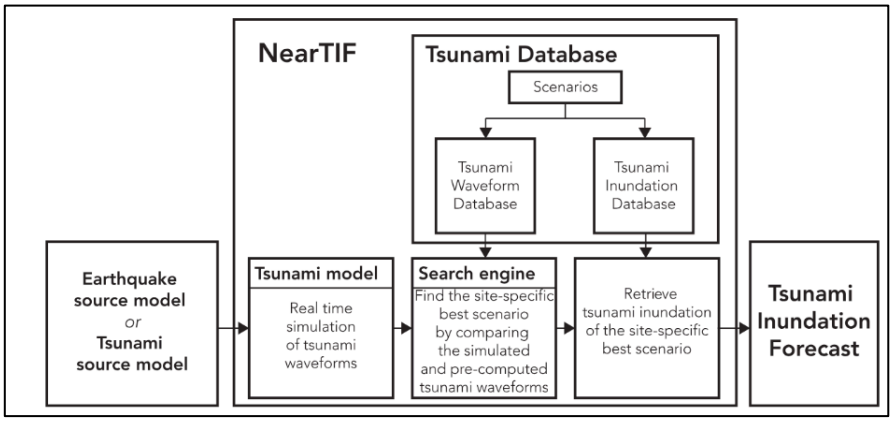


Figura 4.5 Esquema del funcionamiento del método NearTIF

(Fuente: A methodology for near-field tsunami inundation forecasting (Gusman et al., 2014).)

Se debe agregar que el proceso mencionado se debe realizar de forma independiente para cada ciudad sobre la cual se quiere predecir la inundación. Es decir, se realizará la comparación de errores medios cuadráticos de cada una de las boyas presentes en la ciudad bajo análisis para el primer escenario de la base de datos y esto arrojará un valor de error para ese caso en esa ciudad, cuestión que deberá replicarse para todos los terremotos pre-simulados presentes en la base de datos de 410 escenarios, obtenidos a partir de la distribución y distanciamientos de hipocentros utilizados por el autor del método y las magnitudes de terremotos que pueden causar tsunamis en las costas de Chile. En otras palabras, se trató de reproducir el método de la generación de la base de datos de Gusman et al., (2014), considerando una magnitud de momento máximo de terremotos en la base de datos de Mw 9,5 debido al precedente de Valdivia en 1960.

La expresión (4) resume lo previamente mencionado:

$$E^{j}_{\text{total ciudad}} = \sum_{k=1}^{n} E^{k}_{\text{rms}} \qquad (4)$$

Donde:
n: número de mediciones en la ciudad
j: caso analizado de la base de datos

Considerando que para este caso, se utiliza el número de mediciones como la cantidad de bpoyas asignadas para cada ciudad bajo análisis.

Entonces, el primer paso es generar tanto las series de tiempo como las inundaciones en las tres ciudades bajo análisis de los 410 terremotos (escenarios) que se asignaron para reproducir este método en las costas del país. Cuestión que se explica detalladamente a continuación.

4.5.1. Base de datos

La pieza fundamental del método es la base de datos, y al mismo tiempo es la que mayor tiempo requiere para su construcción. En los siguientes párrafos se detallan las consideraciones y la forma de trabajo que se empleó para construirla.

Para comenzar, se tuvo que ubicar geográficamente las boyas virtuales en las 3 ciudades analizadas (San Antonio, Constitución y Talcahuano). Teniendo en cuenta como consideración principal que, al ubicar las boyas, la profundidad del lugar elegido debe estar entre 30 y 50 metros o cercano a ese rango planteado por el autor del método NearTIF. Por otro lado, se eligieron puntos con objeto de cubrir de la mejor forma posible diferentes ángulos de incidencia del tren de olas para la ciudades en cuestión, cuidando mantener un número reducido de boyas con objeto de mantener similitud con lo realizado por Gusman et al., (2014).

La Figura 4.6. muestra los nombres y ubicaciones de las boyas virtuales para las tres ciudades analizadas en este documento, con un número de siete boyas para San Antonio, seis para Constitución y ocho para Talcahuano, que resultaron de la iteración de la restricción de profundidades enunciada con anterioridad (causa principal de la peculiar distribución planteada para San Antonio).

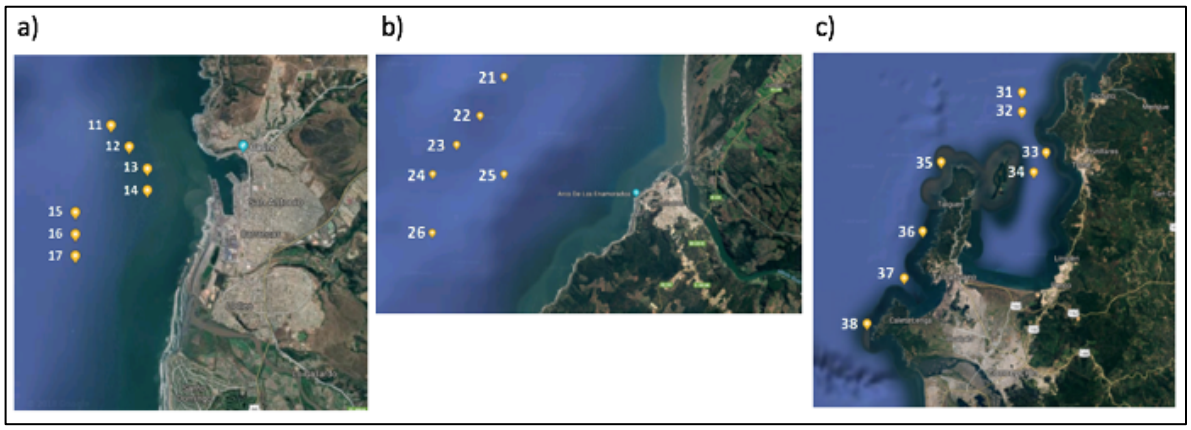


Figura 4.6 Ubicación de boyas virtuales en (a) San Antonio, (b) Constitución y (c) Talcahuano

Con las ubicaciones de las boyas virtuales establecidas, se posicionaron las fallas planas para obtener las series de tiempo en las ubicaciones recién mostradas para generar la la base de datos. Para esto, se tomó ubicaciones de epicentros de forma tal de cubrir las tres ciudades junto con un margen al norte de San Antonio y al sur de Talcahuano. La parte central oeste de cada falla plana generada se observa en la Figura 4.7, que plantea en forma esquemática la forma que poseen tres fallas generadas desde un punto de la primera columna de los terremotos a simular para dar lugar a la base de datos. En la primera columna de puntos se dispusieron terremotos de Mw 8,0 a 9,0, para la segunda magnitudes de Mw 8,0 a 9,3 y finalmente la columna de puntos mas cercana a la costa posee terremotos entre Mw 8,0 a 9,5. Considerando siempre un incremento entre magnitudes de Mw 0,1 para cada uno de los puntos en la imagen.

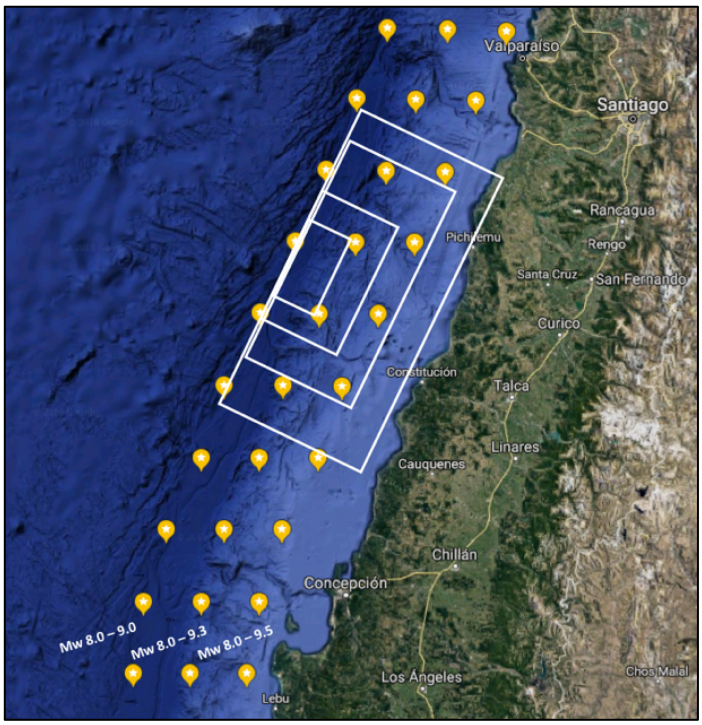


Figura 4.7 Ubicación de puntos centrales oeste de fallas en la base de datos y ejemplos de fallas planas utilizadas por el método (rectángulos en color blanco).

Lo anterior dió por resultado, 410 terremotos de falla plana de caracteristicas que se definieron según las siguientes propiedades:

1. **Rigidez**: Se consideró con un valor de 3×10^{10} [Pa], para relacionar la magnitud con las dimensiones de la falla generada.

2. **Leyes de escalamiento**: La expresión utilizada para relacionar la magnitud del sismo con sus dimensiones fueron las planteadas por Papazachos et al., 2004 dadas por las expresiones (5) y (6):

   - $\mathrm{Log(L)} = 0{,}55\mathrm{Mw} - 2{,}19$; con L en [km] (5)
   - $\mathrm{Log(W)} = 0{,}31\mathrm{Mw} - 0{,}63$; Con W en [km] (6)

3. **Ángulos**: el ángulo de rumbo de cada falla se obtuvo aproximando en tres tramos rectos la orientación de la falla, resultando (de norte a sur) en 28,37º para las seis primeras filas, 26,57º para las dos siguientes y 16,70º para las dos restantes (ver

Figura 4.7). El ángulo de manteo se obtubo de SLAB 1.0 (Hayes et al., 2012), el ángulo de deslizamiento se tomó constante, dado que cambios en este parámetro no afecta de forma significativa al tren de olas (Titov et al., 1999), con un valor de 90º.

4. **Deslizamiento**: (D) Fue calculado según las expresiones (7) y (8) que relacionan el momento sísmico (Mo) con la magnitud de momento (Mw) y los parámetros físicos de la falla, como son el área (A) y deslizamiento (D):

- $\mathrm{Mo} = \mu * \mathrm{D} * \mathrm{A}$; con $\mathrm{A} = \mathrm{L}*\mathrm{W}$ (7)
- $\mathrm{Mw} = \frac{2}{3} * \log(\mathrm{Mo}) - 10{,}7$ (8)

Al mismo tiempo, el coeficiente de Manning utilizado para las grillas de detalle (10, 3 y 1 segundo de arco) fue de 0,025 (Imamura, 2009) de forma de emular al autor del método. Este valor es utilizado en el cálculo de los efectos de fricción presentes en las ecuaciones que deben resolver los modelos.

Tomando toda la información anterior, se almacenó cada una de las series de tiempo, de cada boya perteneciente a los 410 terremotos y para cada ciudad en archivos .mat para su fácil manejo con el algoritmo de búsqueda. La forma de estos archivos corresponde al número de boyas de la ciudad en cuestión, escenario y tiempo simulado (tres horas), por lo que los archivos de base de datos de cada ciudad son de las siguientes dimensiones: San Antonio (7x410x10802), Constitución (6x410x10802) y Talcahuano (8x410x10802).

4.5.2. Simulación en tiempo real

La otra pieza fundamental del método NearTIF es la simulación abreviada en tiempo real, que fue modelada por dos grillas (60 y 30 segundos de arco), que corresponden a las de menos resolución que forman la base de datos. Esta simulación se realizó en un computador de procesador 2.5 GHz Intel Core i5 que cuenta con 4 GB de memoria RAM utilizando el Software COMCOT 1.9v.

4.5.3. Algoritmo

Se generó un algoritmo, cuyo objetivo es buscar entre los escenarios presentes en la base de datos para cada ciudad, cual de los 410 casos posee el menor error cuadrático medio y así, asumir que la inundación generada por el tsunami será muy similar a este caso. Para ello se analizan todas las series de tiempo simuladas y las series de cada boya en cada ciudad a realizar el pronóstico.

Para realizar este procedimiento, se tomaron algunas consideraciones:

- Para realizar los cálculos de error, se tomó el equivalente en tiempo de 1,5 veces el periodo de la serie de tiempo del tsunami simulado, dado que al aumentar ese intervalo analizar, obligaba tanto a la base de datos como a la serie real a aumentar los tiempos de simulación del tsunami debido a que hay escenarios en los que no se alcanza a contener dos periodos (intervalo de análisis utilizado por autor del método NearTIF) del tren de olas simulado en ese tiempo, además de que desde un inicio se buscó generar una base de datos homóloga a la de Gusman et al., (2014) que poseía esos tiempos de simulación. Por esto, se decidió utilizar el equivalente temporal a cuatro cruces por cero de la serie de tiempo del tsunami (equivalente a una ola y media) y no cinco (equivalente a dos olas) para el algoritmo de búsqueda.
- Con objeto de disminuir el tiempo de búsqueda se descartaron los escenarios de la base de datos cuya amplitud máxima o mínima superen o sean inferiores en un 30% de la serie de tiempo simulada, para cualquier boya de cada ciudad.
- Debido a las posibles diferencias de fase entre las series de tiempo a comparar, se evaluó en forma paralela si la generación de un desfase temporal (τ) provocaba una disminución en el error medio cuadrático, realizando estas pruebas a intervalos de un segundo.

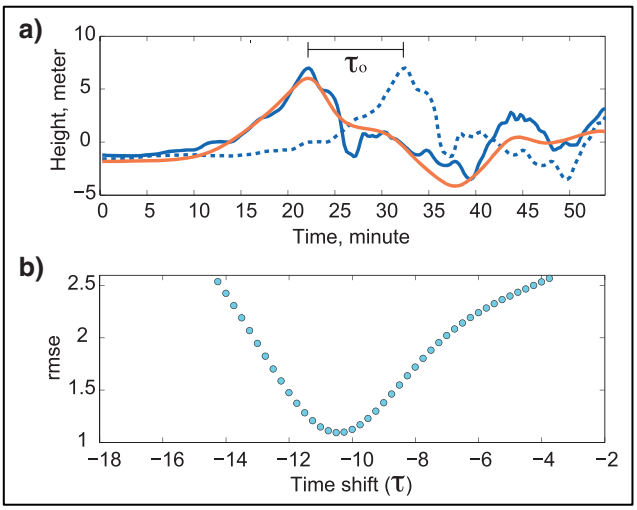


Figura 4.8 (a) Serie de tiempo simulada (punteada azul), serie de tiempo desplazada en el time shift óptimo (τ_o) y serie de tiempo del mejor escenario encontrado (naranjo). (b) Gráfica del error medio cuadrático en función del time shift en minutos

(Fuente: A methodology for near-field tsunami inundation forecasting (Gusman et al., 2014).)

El Figura 4.8 realizada por Gusman et al., (2014) muestra de forma esquemática el funcionamiento deseado del algoritmo que se encarga de comprar la serie real con un escenario particular de la base de datos (en este caso). En (a) se muestra el nivel de ajuste o similitud que posee la serie de tiempo simulada con el escenario elegido por el algoritmo de búsqueda, que al desfasarse en un tiempo τ_0 logra el mejor ajuste relacionado con el valor del error cuadrático medio que se observa en la la imagen (b).

Este detalle permite al algoritmo no descartar a escenarios que demoran más en influenciar a los punto de observación virtuales en comparación a la serie real. De hecho, el resultado del algoritmo al momento de realizar las pruebas siempre fue con desfases distintos de cero, cuestión que se abordará en capítulos posteriores.

4.6. Variables a analizar

Para realizar una comparación objetiva entre los casos de reducido tiempo de simulación con las corridas base se hace necesario definir las variables del tsunami que se utilizará para cada ciudad de forma independiente:

1. **Run-up máximo:** Cota máxima asociada a todos los puntos de la grilla que componen la inundación generada por el tsunami. Tomando en cuenta también su ubicación geográfica con objetivo de dar una noción general del nivel de penetración que tiene el tsunami en cada ciudad analizada, además de mostrar, en forma esquemática la zona inundada con mayor impacto relacionada con la columna de agua.

2. **Relación área de inundación (RAI):** Cociente entre el área inundada en el escenario analizado y el área de inundación de la Corrida Base. Por lo que valores menores a uno señalarán una subestimación de la inundación y un valor mayor a uno mostrará una sobreestimación. Lo anterior se calcula mediante la expresión (9):

   - $$\mathrm{RAI} = \frac{(\text{N° de ptos inundados})_{\text{Escenario}} * \text{Área tributaria}}{(\text{N° de ptos inundados})_{\text{Corrida Base}} * \text{Área tributaria}} = \frac{(\text{Área Inundada})_{\text{Escenario}}}{(\text{Área Inundada})_{\text{Corrida Base}}} \qquad (9)$$

   El uso de esta variable se atribuye a que, con solamente un número, brinda una idea general del impacto en la inundación pronosticada, lo cual facilita la comparación entre las corridas simplificadas y el modelo completo. Aunque posee la desventaja de que no considera la geometría del área inundada, por lo que no es concluyente por si sola. Esto conduce a analizar las diferencias de profundidad en la totalidad del área, por lo que surgen las siguientes tres indicadores adicionales.

3. **Error:** Calculada como la diferencia espacial entre la profundidad de inundación en el dominio de cada ciudad generada por la Corrida Base y su par del escenario analizado. De esta forma, valores menores a cero señalarán una sobreestimación de la profundidad de inundación en un punto y un valor mayor a cero una subestimación de ésta. Esta variable se calcula mediante la expresión (10):

$$\mathrm{Error}(x, y) = \mathrm{d}_{\text{Corrida Base}}(x, y) - \mathrm{d}_{\text{Escenario}}(x, y) \qquad (10)$$

4. **Mediana del error:** Percentil 50 del histograma generado al ordenar los valores del error en el escenario analizado para todos los puntos (x,y) en el dominio espacial. Por

consiguiente, si es más cercano a cero es indicio de un buen desempeño y dará una muestra de la tendencia central del error. La expresión (11) muestra lo previamente mencionado:

$$\text{Mediana del error} = \text{Me}(\{\text{Error}(x, y)\}) \qquad (11)$$

5. **Variabilidad del error:** Diferencia entre el percentil 95 y el percentil 5 del histograma generado por el error de la profundidad de inundación en el escenario analizado. Este parámetro podrá indicar el grado del error atribuible a zonas con gran diferencia en la profundidad de inundación entre la corrida base y el modelo simplificado, lo que podría descartar un buen desempeño, aunque se esté en presencia de un RAI cercano a uno, considerando que existe una compensación de áreas inundadas en distintas zonas de alguna ciudad. Por lo que desea que este parámetro sea el mas pequeño posible y puede ser representado mediante la expresión (12):

$$\text{Variabilidad del Error} = \text{P95\%}(\{\text{Error}(x, y)\}) - \text{P95\%}(\{\text{Error}(x, y)\}) \qquad (12)$$

La idea principal en relación con las variables previamente mencionadas es analizar todos sus valores para cada modelo simplificado (corridas HySEA y NearTIF), además de una inspección visual a la zona inundada ya que no tienen un sentido por si solas y como se puede prever de párrafos anteriores, deben trabajar en conjunto.

Por último, se hace preciso mencionar que, dependiendo del método empleado para la obtención de inundación, fue seleccionada la Corrida Base a comparar con dicha simulación, con objetivo de no considerar como fuente de error el uso de distintos modelos para generar el pronóstico. Por lo que al utilizar las cinco configuraciones de Tsunami-HySEA previamente descritas, se aplicó la Corrida Base del mismo Software y de forma análoga, al utilizar el método NearTIF se comparó con la Corrida Base generada por COMCOT 1.9v. Todo esto a menos que se logre comprobar que ambas son lo suficientemente similares para usar una de ellas y asegurar que los valores de las variables recién enunciadas no se ven afectadas o amplificadas por la elección de la inundación “real”.

5. Resultados

En esta sección se procede a presentar la información obtenida al ejecutar la metodología enunciada en el capítulo anterior, junto con un pequeño comentario e ideas generales que serán analizadas en profundidad en la discusión de esta investigación.

5.1. Corridas Base

En esta sección se muestran las corridas base en ambos modelos utilizados en esta investigación con un tiempo de simulación de tres horas, junto con la inundación generada por el 50% de las fallas simuladas por Cienfuegos et al., (2018) en forma aproximada, para efectos comparativos:

5.1.1. Tsunami-HySEA

La Figura 5.1. Muestra las profundidades de inundación en metros en las tres ciudades en análisis, tomando la falla de Yue et al., (2014), simulados en el modelo Tsunami-HySEA, que se empleará como corrida base para las cinco configuraciones simplificadas enunciadas con anterioridad.

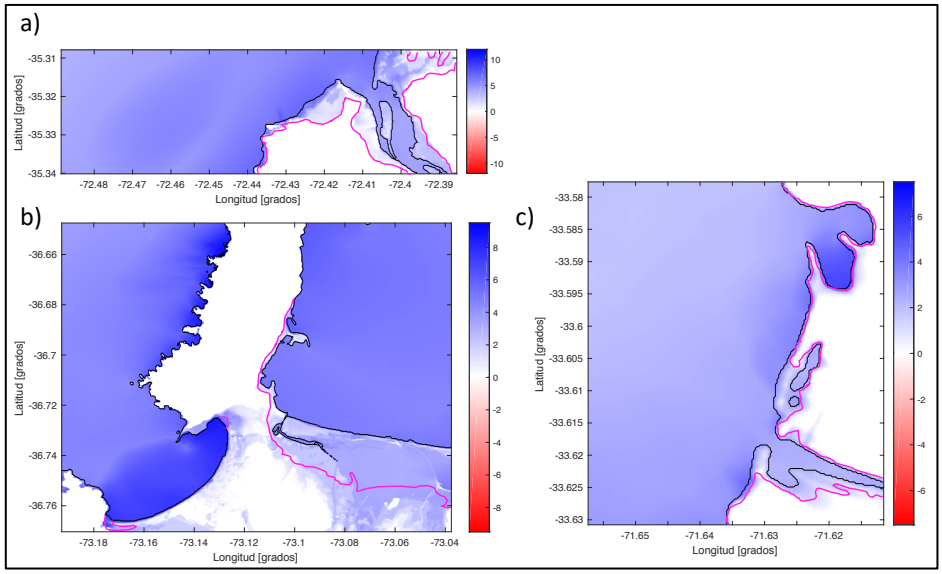


Figura 5.1 Profundidades de Inundación de la corrida base de HySEA de (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. En magenta el 50% de las fallas de Cienfuegos. Notar diferencias en escalas

5.1.2. COMCOT 1.9v

La Figura 5.2. Muestra las profundidades de inundación de las tres ciudades en análisis, tomando la falla de Yue et al., (2014), simulado en el software COMCOT, que se empleará como corrida base para el método NearTIF con objetivo de analizar la calidad de los pronósticos de inundación.

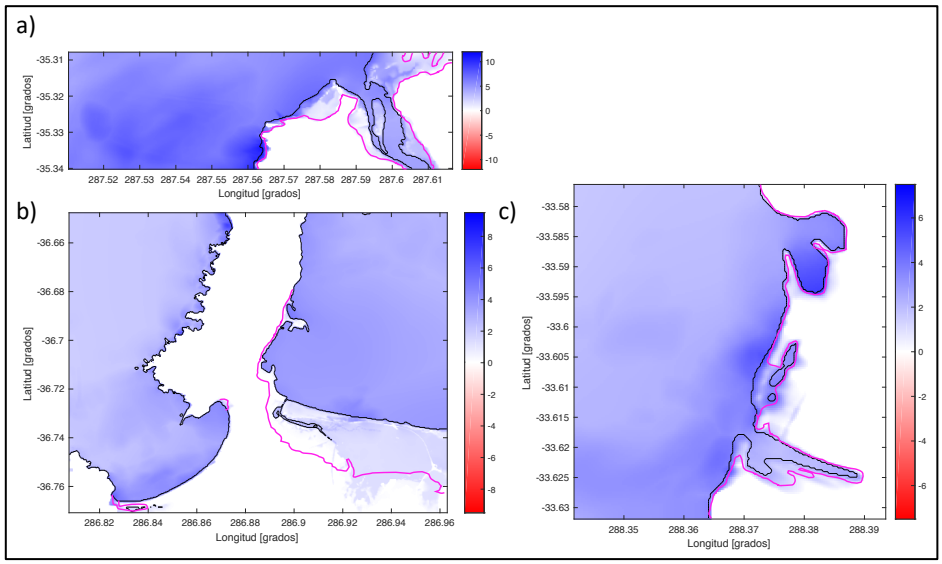


Figura 5.2 Profundidades de Inundación de la corrida base de COMCOT de (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. En magenta el 50% de las fallas de Cienfuegos. Notar diferencias en escalas entre ciudades

Se observa que existen diferencias notorias entre los modelos utilizados para la ciudad de Talcahuano, tanto en los valores de profundidad de inundación, como en la forma y tamaño del área inundada, cuestión contraria en Constitución y San Antonio, donde ambos modelos coinciden a grueso modo en los resultados de la simulación. Produciéndose lo mismo comparando con la mediana de las 19 fallas estudiadas por Cienfuegos et al., (2018). Estas diferencias entre ambas inundaciones se pueden deber a la utilización de ecuaciones lineales en el cálcuo de la corrida base de COMCOT.

Al realizar una comparación con los datos obtenidos por Fritz et al., (2011) para las ciudades de Constitución (profundidades de inundación medidas rondan los diez metros) y Talcahuano (profundidades de inundación medidas rondan los ocho metros), se observa que los valores de profundidad de inundación máximos de las simulaciones mostrados en las Figuras 5.1. y 5.2. concuerdan en forma global con las obtenidas en aquella investigación a pesar de las

diferencias en la forma del área inundada entre ambas corridas base generadas para las tres urbes, incluyendo a Talcahuano, que es la ciudad donde mas se aprecian estas diferencias.

A causa de lo anterior, y con objeto de determinar si es posible utilizar solo una corrida base para calcular errores de los métodos apróximados, se obtuvo la diferencia espacial de profundidades de inundación entre ambas corridas base con el fin de cuantificar si la influencia del modelo de cálculo de la Corrida Base (HySEA y COMCOT) es despreciable comparado con la pérdida de presición asociada a la utilización de los métodos aproximados que se pretende analizar en este documento.

La Figura 5.3. muestra el error asociado a la resta espacial entre la Corrida Base de Tsunami-HySEA y COMCOT donde se observan las magnitudes de la diferencia en cada punto del dominio de las tres ciudades bajo análisis.

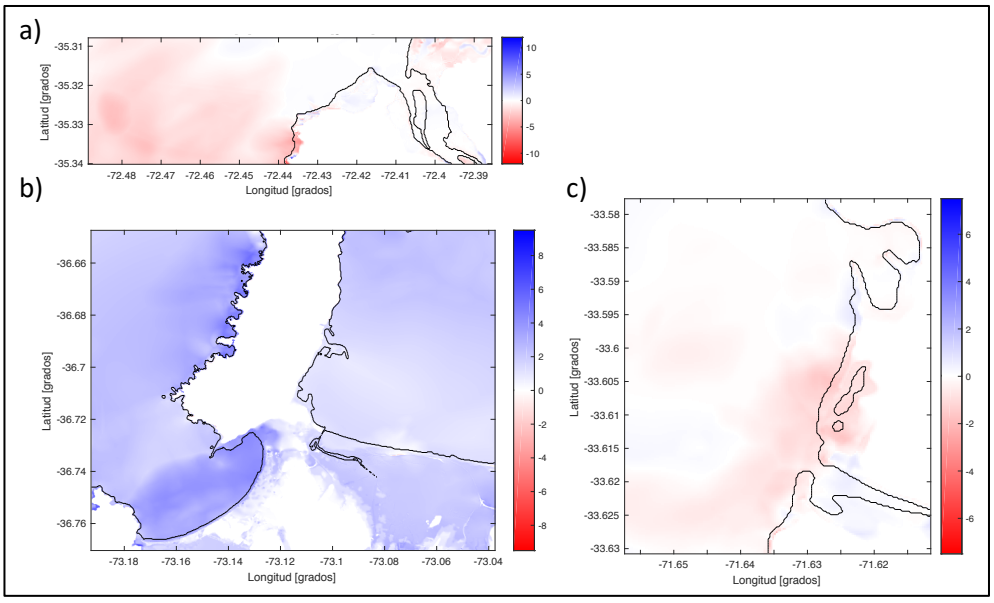


Figura 5.3 Distribución espacial del error asociado a las Profundidades de Inundación de la corrida base de HySEA versus la corrida base de COMCOT para las ciudades de (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio. Notar diferencias en escalas entre ciudades.

Se observa que existen zonas con una magnitud de error considerable que puede deberse a las diferencias en la interpolación de los dominios topobatimétricos, entre otras causas. Esta magnitud de diferencia en la profundidad de inundación es comparable a la posterior pérdida

de precisión entre las corridas base y los modelos simplificados generados, por lo que se decide utilizar ambas corridas base según el método aproximado a analizar, por tanto para las configuraciones HySEA se compararan con la corrida base de HysEA y NearTIF con su símil de COMCOT, con objeto de que el error asociado al cálculo de la inundación de los métodos aproximados no se vea afectado por la elección del método de obtención de la inundación "real" para calcular el error de cada uno. Por esta misma razón, la base de datos de NearTIF se realizó con el modelo COMCOT 1.9v.

Para revisar visualmente las diferencias entre las corridas base y las pérdidas de precisión de los modelos simplificados se recomienda comparar la Figura 5.3. y las pertenecientes al Anexo B.

5.2. Configuraciones HySEA

Como fue mencionado previamente, se realizaron cinco simulaciones con diferentes configuraciones batimétricas con el objeto de analizar su comportamiento en cuanto a rapidez y precisión para tres horas de simulación, cuyas características son mostradas en la Tabla 5.1. que muestra los tiempos de cálculo en el clúster previamente descrito, junto con el número de puntos sobre los cuales se ingresó la configuración topo-batimétrica y la relación de velocidad asociada en cantidad de información con el tiempo que demoró en arrojar resultados:

Nombre	Número de Nodos	Tiempo [min]	Velocidad [ptos/s]
Corrida Base HySEA	1.057.456	00:05:24	3263,8
P84	961.524	00:04:47	3350,3
P88	1.219.114	00:04:01	5058,6
P8-3	595.204	00:01:31	6540,7
P82-3	1.294.946	00:04:30	4796,1
P84-3	650.400	00:01:44	6253,8

Tabla 5.1 Detalle de tiempos de cálculo y nivel de detalle de cada configuración

Se observó una ganancia considerable en el tiempo de simulación en relación a su corrida base con comportamiento sobresaliente para las configuraciones P8-3 y P84-3, además de una eficiencia en cuanto a la velocidad relacionada con la cantidad de información que logra

simular en un segundo en promedio, es decir, mostrando la mayor velocidad relativa de simulación, que fue obtenida como la cantidad de puntos presentes en la topo-batimetría ingresada al modelo simplificado dividido por el tiempo que demora el modelo en arrojar sus resultados. Éstas asoman en primera instancia, como opciones tentativas en el marco de esta investigación y serán evaluadas, junto con las demás en ese contexto.

Además, se observa en la Tabla 5.1. que las configuraciones P88 y P82-3 requieren menor tiempo para simular que la corrida base, a pesar de poseer una mayor cantidad de puntos. Este efecto que en primera instancia parece ser contradictorio, se produce debido a la distribución espacial de los puntos. Tanto P88 como P82-3 poseen un mayor porcentaje de puntos en aguas profundas o a gran distancia de la zona a inundar, que es la de mayor demanda computacional. Y a su vez eso se debe a que ambos modelos simplificados poseen una grilla madre de mayor resolución a la utilizada para defnir el dominio de cálculo de la corrida base (ver Tabla 4.2.).

Detalles de inundaciones, histogramas de error y su distribución espacial se puede encontrar en Anexo B para cada una de las cinco configuraciones de Tsunami-HySEA y las tres ciudades bajo análisis.

5.3. NearTIF

Luego de haber generado, tanto la base de datos, modelado y corrido la simulación con resolución de treinta segundos de arco, que corresponde al dato de entrada de NearTIF, se procedió a ejecutar la rutina de Matlab que tiene por objeto encontrar cuál de los 410 escenarios pre-simulados posee las series de tiempo con mayor similitud a las “reales”, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.2, que muestra el tiempo total que requiere el método para arrojar su pronóstico (suma de simulación de entrada al método y el algoritmo de NearTIF, que se denominó Tiempo NearTIF), además del valor del error medio cuadrático del caso seleccionado, junto con el desfase requerido para minimizar su valor.

San Antonio			
Tiempo Total (Generación de Series Reales y Algoritmo NearTIF) [min]	**00:05:43**	Error [m]	0,2730
Tiempo Algoritmo NearTIF [s]	00:00:07	CASO	**337**
Casos analizados	7	Desfase [s]	855
Constitución			
Tiempo Total (Generación de Series Reales y Algoritmo NearTIF) [min]	**00:05:45**	Error [m]	1,0966
Tiempo Algoritmo NearTIF [s]	00:00:09	CASO	**183**
Casos analizados	14	Desfase [s]	74
Talcahuano			
Tiempo Total (Generación de Series Reales y Algoritmo NearTIF) [min]	**00:05:42**	Error [m]	1,2146
Tiempo Algoritmo NearTIF [s]	00:00:06	CASO	**318**
Casos analizados	2	Desfase [s]	48

Tabla 5.2 Resultados de NearTIF para las tres ciudades analizadas

Se puede apreciar que, si bien los tiempos no son lo suficientemente rápidos como para acercarse a los logrados por Tsunami-HySEA, tienen el potencial de disminuir si se utilizara un equipamiento computacional de mayor capacidad u otro modelo para simular, considerando que la simulación de las series de tiempo reales es el limitante en esta modelación ya que el autor del método obtiene tiempos similares en la búsqueda del mejor escenario (entre dos y diez segundos) y se acerca a los dos minutos en simular las series reales, no los cinco minutos y medio que tarda COMCOT 1.9v.

También se observa que al descartar de la búsqueda los escenarios de amplitudes máximas con una ventana de 30% en su máxima altura (ver metodología NearTIF), disminuye el universo de búsqueda del algoritmo, haciéndolo más eficiente, pero en el caso más crítico solo llega a comparar el error asociado a dos casos de la base de datos para la ciudad de Talcahuano (Tabla 5.2), lo que podría indicar la necesidad de una base de datos más grande.

Por otro lado, se observa la utilidad del desfase, dado a que, por ejemplo, para la ciudad de San Antonio, las series de tiempo de la base de datos de mayor parecido a las simuladas provienen de la falla 337, cuyo centroide se ubica en latitud -37,16 aproximadamente, bastante lejano a ella, por lo que se obtiene un valor de $\tau = 855$ s de desfase, que es el tiempo que demora el tren de olas asociado a ese terremoto en llegar a San Antonio. Si no se hubiera considerado este desfase para analizar la similitud con las series simuladas, este escenario

llevaría asociado un error de gran magnitud y claramente no hubiera sido seleccionado como el de menor error, dado que el algoritmo, sin la presencia de esta variable, solamente analizaría a las fallas pertenecientes a la base de datos que se encuentran en las cercanías de la falla real, dado a que tienen un tiempo similar de arribo a la ciudad en cuestión, lo que disminuiría aún más la calidad del método.

Prueba de lo anterior, es la buena calidad del pronóstico para la ciudad de San Antonio, teniendo en cuenta el bajo valor de error (ver Tabla 5.2). Por el contrario, en Constitución y Talcahuano se obtuvo un valor de error bastante grande (aproximadamente cuatro veces el obtenido en San Antonio), y se observará en párrafos siguientes que la primera ciudad posee un desempeño de mediana calidad, a diferencia del segundo que, si bien posee un error mayor, su pronóstico es bastante acertado, al menos visualmente. Indicando la necesidad de generar otros parámetros para indicar la calidad en inundación, además del error que se obtiene de la búsqueda del mejor escenario de NearTIF. Lo que puede deberse a que no existe una correlación absoluta entre el parecido de las series de tiempo comparadas y sus inundaciones absolutas, al menos para esta base de datos.
En la Figura 5.4. Se muestran tanto las series de tiempo del caso 337 de la base de datos (escenario elegido por el algoritmo generado) como la simulada, de cada boya en la ciudad de San Antonio, desplazadas un tiempo igual al desfase obtenido por el método, para poder apreciar el nivel de similitud de cada una. Notar que se grafica solamente el periodo de tiempo analizado en el algoritmo de NearTIF y que cada gráfica posee el nombre de la boya sobre la cual se extrajo la información.

Se puede observar que, salvo algunos pequeños detalles, las series de tiempo simuladas y las pertenecientes a la base de datos para esta ciudad son casi equivalentes. Esto ratifica el pequeño valor de error asociado a este pronóstico, en relación con el obtenido en Constitución y Talcahuano (ver Tabla 5.2). En el período de tiempo analizado, el tren de olas simulado con la falla de Yue et al., (2014) en todos los puntos de observación de San Antonio poseen una baja complejidad, es decir, está conformado por una ola de periodo largo que logra ser representado de buena forma por el escenario 337 de la base de datos de NearTIF, cuestión

que se debe a que esta data fue generada en su totalidad por terremotos de falla plana que tienen por consecuencia series de tiempo de baja complejidad.

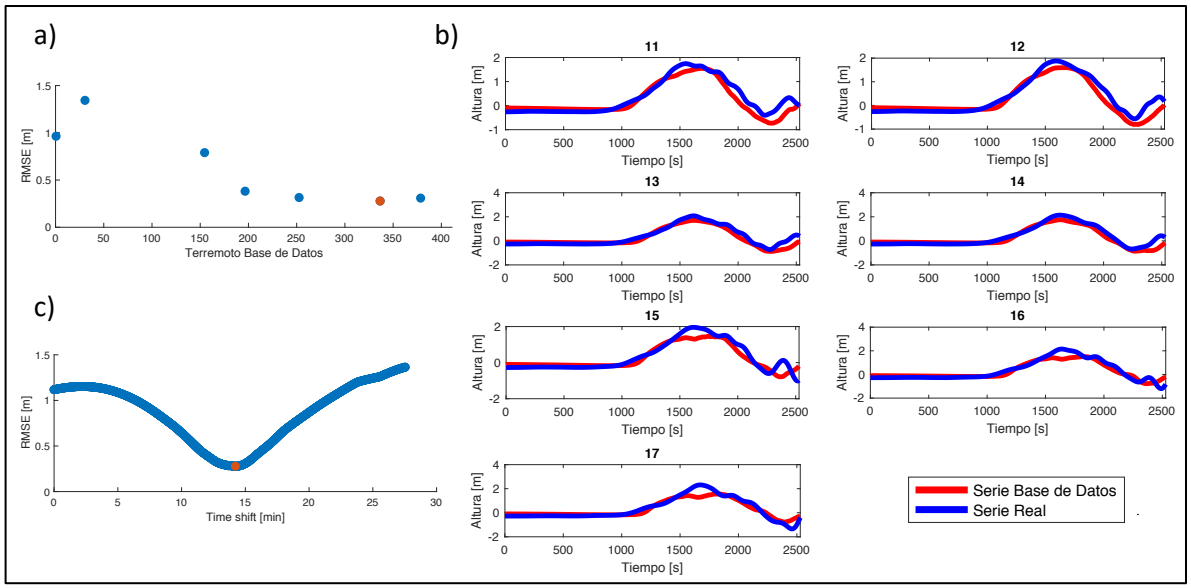


Figura 5.4 (a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 337 de la base de datos de las 7 boyas empleadas en San Antonio. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico).

En cuanto a Constitución, la Figura 5.5. muestra análogamente, tanto las series de tiempo obtenidas de la simulación como las asociadas al escenario elegido por el algoritmo de búsqueda (caso 183) de cada uno de los seis puntos de observación elegidos para esta ciudad, junto con las gráficas del error medio cuadrático para los escenarios analizados y el comportamiento del mismo error para el caso seleccionado considerando distintos desfases (en color rojo los óptimos). Se observa para esta ciudad en general una adecuada similitud visual de las waveforms en forma global, con menor nivel que la anterior debido a la mayor complejidad de la falla en la simulación (Serie Real), que claramente es mayor a la de San Antonio. Este detalle dificulta al algoritmo de NearTIF encontrar un terremoto dentro de la base de datos generada con este nivel de complejidad y, por ende, en todo momento donde la serie real se diferencia del caso 183 el error va aumentando, arrojando un valor de 1,09 metros, que en relación con la ciudad anterior es significativamente superior.

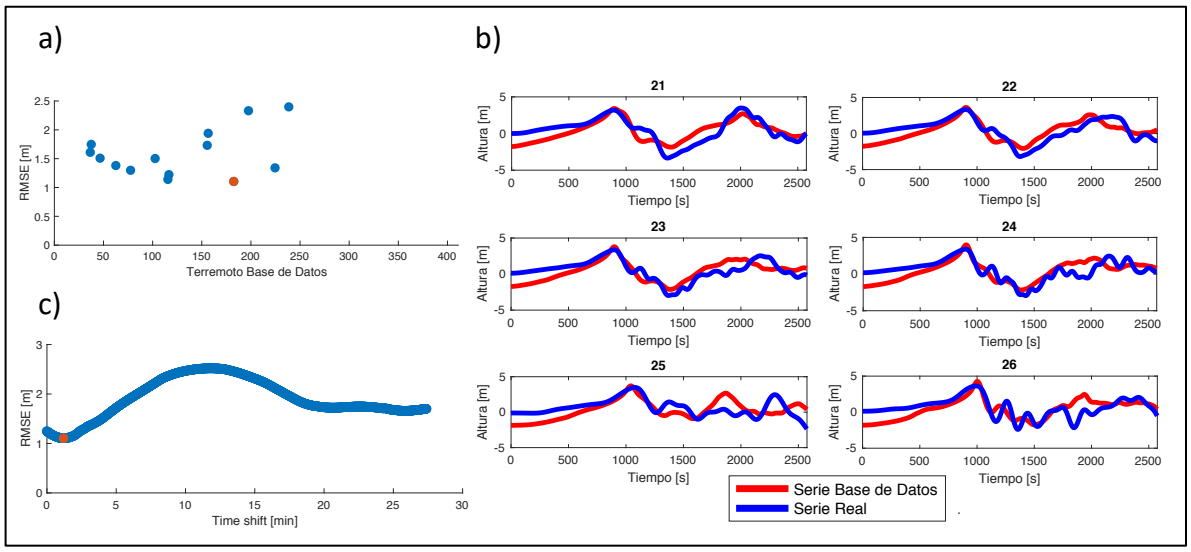


Figura 5.5 a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 183 de la base de datos de las 6 boyas empleadas en Constitución. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico).

Se puede agregar que este comportamiento también se observa en las investigaciones realizadas por Tanioka et al., (2014) y Setiyono et al., (2017), donde se muestra también la dificultad que posee el método NearTIF en reproducir series de tiempo cuando éstas poseen mayor complejidad y esta característica se muestra como una limitante del método dado a que las series de tiempo asociadas a estas dos investigaciones y la de Gusman et al., (2014) siempre son una especie de versión simplificada o suavizada de las series simuladas con la falla real.

Por último, en la Figura 5.6. se muestra el resultado de la búsqueda del mejor escenario para Talcahuano, que en este caso corresponde al caso 318 de la base de datos, que se grafica junto a las series de tiempo simuladas con la falla real para efectos comparativos.

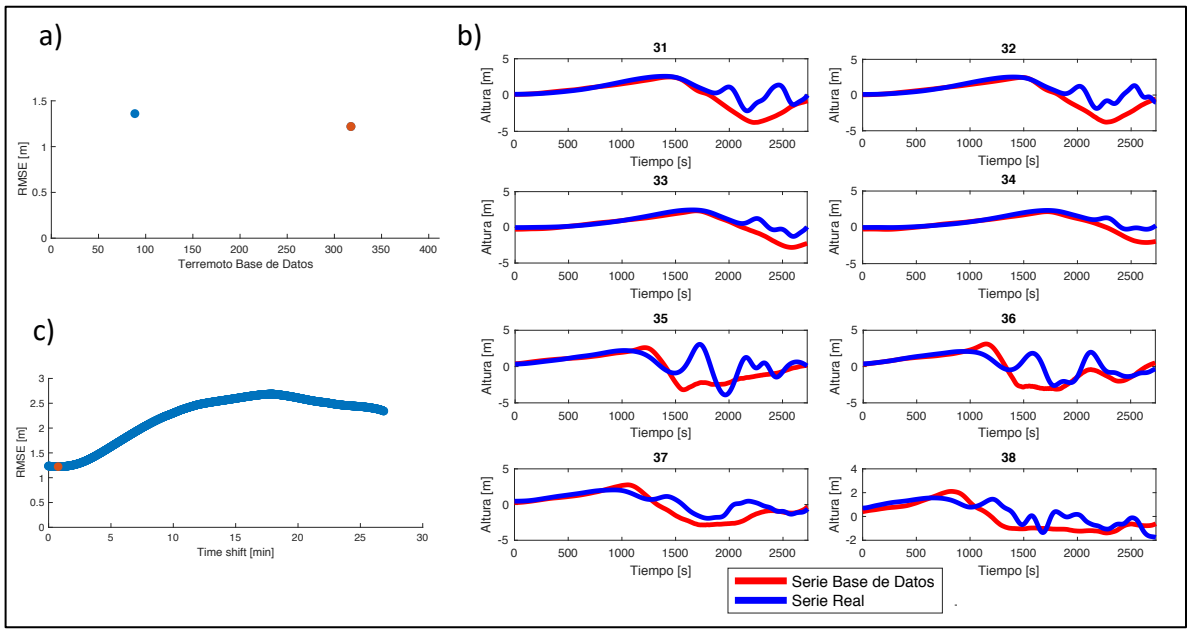


Figura 5.6 (a) RMSE para cada terremoto analizado (punto rojo muestra el pronóstico), (b) Comparación de series de tiempo simuladas y caso 318 de la base de datos de las 8 boyas empleadas en Talcahuano. Notar diferencias de escala, (c) RMSE y time shift óptimo (punto rojo muestra el pronóstico).

Para la ciudad de Talcahuano se observa un ajuste de las series de tiempo no observado en las ciudades anteriores, las boyas 31, 32, 33 y 34 presentan un adecuado comportamiento en cuanto al parecido a las reales debido a la baja complejidad de sus *waveforms*. En cambio, las boyas 35, 36, 37 y 38 se comportan en forma mas compleja, emulando en parte al fenómeno presente en Constitución junto con una diferencia notable en el tiempo de arribo del tren de olas entre las series simuladas con la falla real y las asociadas al escenario 318.

En resumen, para esta ciudad se aprecia en definitiva que las boyas ubicadas al este de la península de Tumbes en Talcahuano son las que aportaron en mayor forma a la elección del pronóstico NearTIF y contrariamente, las ubicadas al oeste de la península fueron responsables del valor de error encontrado en este caso (1,21 metros). Se observa que, en este caso, debido a que estos puntos se encuentran en bahías diferentes, se comportan en forma independiente, mostrando indicios de la importancia en la ubicación de los puntos de observación virtual. A pesar de haber obtenido el mayor error medio cuadrático entre las tres ciudades bajo análisis, para la ciudad de Talcahuano se obtuvo un desempeño en cuanto a inundación satisfactorio en relación a las variables que a continuación se presentan.

5.4. Variables de interés en Configuraciones HySEA y NearTIF

A continuación, se procede a mostrar los resultados de las variables de interés de cada configuración simulada en Tsunami-HySEA con objeto de analizar el comportamiento al variar la resolución y configuración topo-batimétrica, junto con las variables de interés asociadas a los casos arrojados por NearTIF, mostrados en la sección anterior.

Con objeto de graficar el proceso de obtención de las variables de error y sus parámetros estadísticos se presenta la Figura 5.7, que muestra la tanto la inundación asociada a la corrida base para la ciudad de San Antonio, el pronóstico NearTIF y la resta espacial de ellas con lo cual se obtuvo histogramas, sumado a la mediana y la variabilidad presentadas en capítulos anteriores.

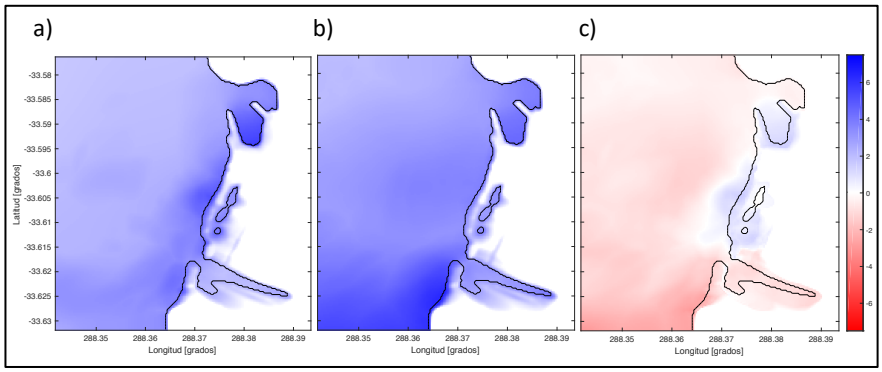


Figura 5.7 (a) Profundidad de inundación Corrida Base COMCOT de San Antonio, (b) Profundidad de inundación pronóstico NearTIF para San Antonio, (c) Error espacial en metros en San Antonio.

5.4.1. Run-Up

Es sabido que esta variable no posee un valor único, dado a que depende de la topografía, pero para efectos de esta investigación se tomó su máximo como variable de interés, junto con su ubicación. Lo anterior, con objeto de dar un parámetro simple que muestre el grado de intrusión del tsunami en la costa, sabiendo que con ello se pierde información valiosa en cuanto a la configuración de la penetración del tsunami en tierra. Cabe destacar que fueron eliminados los valores de máximo run-up, si estos se encontraban en los bordes del dominio de cálculo y así evitar errores numéricos asociados a la ubicación del punto.

La Figura 5.8. muestra la distribución y magnitud del máximo run-up de cada configuración y las corridas base para la ciudad de San Antonio, Constitución y Talcahuano, además de mediciones realizadas por Fritz et al., (2011). En general se observa una dispersión apreciable tanto en la ubicación como en la magnitud del run-up máximo, mostrando lo sensible que puede ser esta variable a cambios en los modelos. La Figura 5.8. (a) muestra la distribución y magnitud del máximo run-up de cada configuración simulada para la ciudad de Constitución. En esta ciudad, se observa una gran diferencia en magnitud y ubicación del máximo run-up entre las corridas base (COMCOT y HySEA) y también entre las configuraciones HySEA. Esto se debe a la forma geográfica de Constitución, con plataformas costeras que terminan en acantilados, lo que genera grandes variaciones en el run-up al cambiar ciertas variables en el modelo a simular y por ende su ubicación y magnitud, como fue descrito por Cienfuegos et al., (2018). El valor de run-up máximo medido en terreno por Fritz et al., (2011) en la ciudad de Constitución fue de aproximadamente 7,5 metros (M21) y su ubicación no se acerca a ninguna de las simulaciones simplificadas, ni tampoco a las corridas base.

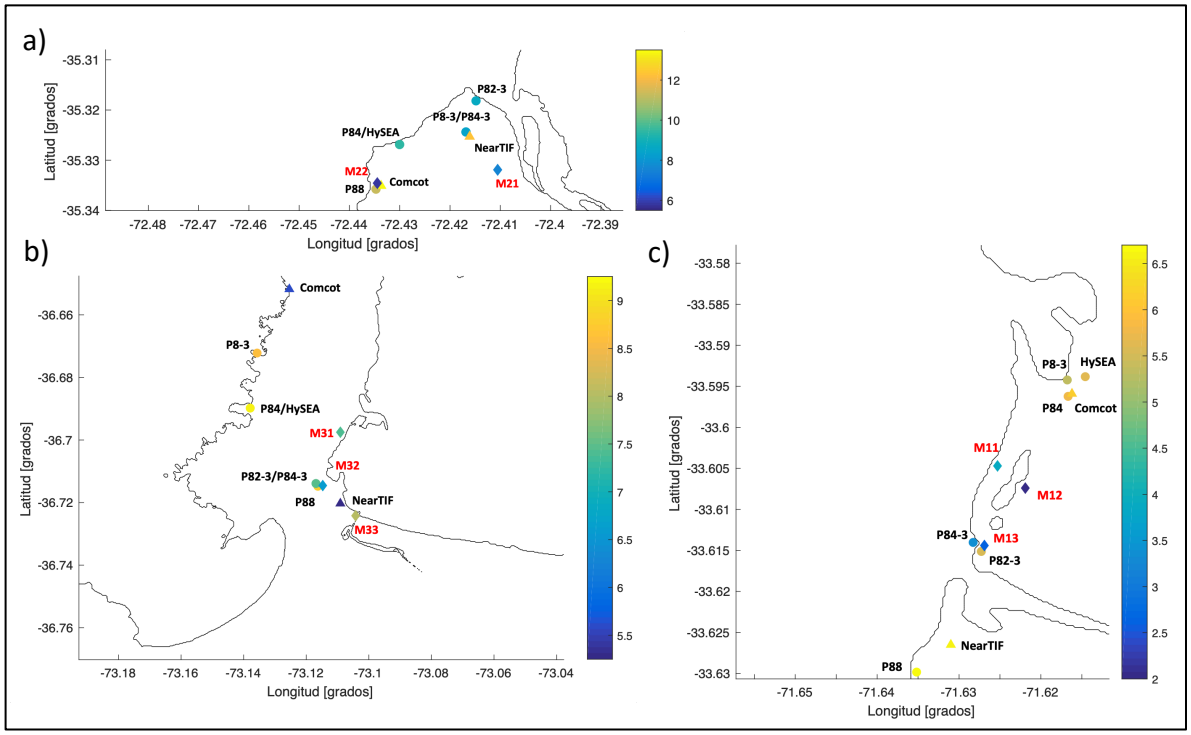


Figura 5.8 Ubicación y magnitud del run-up máximo de configuraciones HySEA y NearTIF, junto con mediciones de terreno (color rojo) en (a) Constitución, (b) Talcahuano y (c) San Antonio.

Por otro lado, la Figura 5.8 (b) muestra la misma información, ahora en la ciudad de Talcahuano. Donde se observa la mayor variación posicional en forma visual de las tres ciudades bajo análisis, donde ni siquiera existen zonas de mayor concentración de run-ups máximos para los ocho modelos simulados. P84 posee el mejor comportamiento dado que se encuentra con la misma magnitud y ubicación que su corrida base (HySEA). Fritz et al., 2011 obtuvo un valor de 8,0 metros en su investigación, por lo que en este caso las simulaciones se encuentran mas cerca de los valores reales, pero hasta ahora sin igualarlo, ni en magnitud ni en ubicación, dado que los dos mayores run-ups registrados entre los ocho modelos (P84 y HySEA) se encuentran al oeste de la península de Tumbes en Talcahuano, y las mediciones en terreno indicaron que los máximos valores de esta variable fueron hacia el este de esta península y esto no fue replicado por ninguno de los ocho modelos propuestos. NearTIF en esta caso fue el más cercano en ubicación al dato medido en terreno.

Respecto del comportamiento relativo a la corrida base, nuevamente P84 posee el mejor desempeño para esta variable, a la que podrá sumarse P8-3 como segundo candidato para la ciudad de Talcahuano

Para el caso de San Antonio, la Figura 5.8 (c) muestra que existen tres zonas sobre las cuales existen run-ups máximos. Aunque existe cierta tendencia de P8-3 y P84 a acercarse tanto en magnitud, como ubicación a la corrida base de HySEA. Esto es un buen indicio de la calidad de estos escenarios para esta ciudad. Las mediciones en terreno del run-up en esta ciudad arrojaron un valor máximo aproximado de 3,9 metros, siendo doblado en promedio por los escenarios de mayor magnitud entre los ocho modelos generados.

De forma general, se puede extraer en relacion a esta variable, que en ningún caso se logran resultados cercanos a la realidad, y en la mayoría ni siquiera similares a su corrida base. A pesar de lo anterior, si se tuviera que nombrar los modelos simplficados de mejor desempeño relativo, se tiene a P8-3 y P84 que se acercan en mayor forma a su corrida base que los demás modelos simplificados .

Como se pudo observar, esta variable esta sujeta a gran incertidumbre, dada la gran dispersión en los resultados y al no lograr replicar en ningún caso de buena forma los valores y ubicaciones reales, y por consecuencia se tiene que sus resultados no aportan información precisa acerca del tsunami. Por tanto, será tomado solo como referencia general del desempeño, restándole importancia en relación a las demás (RAI y parámetros estadísticos del error).

Dado lo anterior, se requiere un indicador adicional para calificar la precisión en la forma de la inundación predecida. Cuestión que se soluciona graficando esquemáticamente las lineas de máxima intrusión horizontal de cada configuación simplificada (modelos HySEA y pronóstico NearTIF) y sus respectivas corridas base. A modo de ejemplo, la Figura 5.9. muestra las lineas de máxima inundación generadas por los diferentes modelos en la ciudad de Constitución, para obtener mayor detalle de la misma y ver los análogos para San Antonio y Talcahuano ver Anexo D.

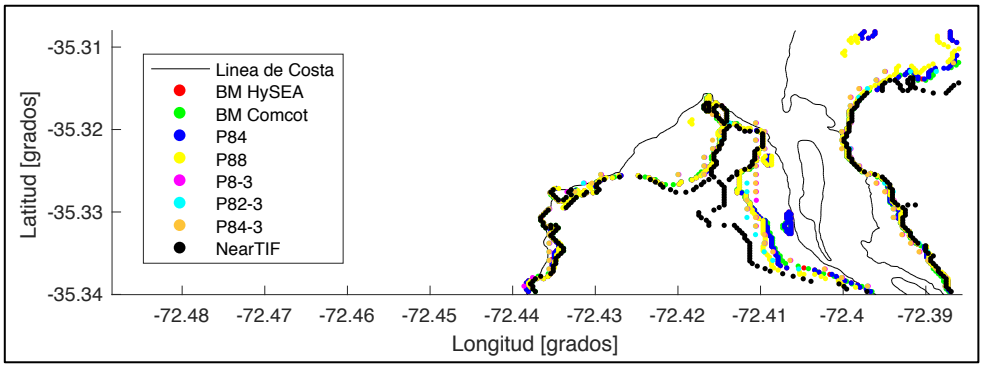


Figura 5.9 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Constitución.

5.4.2. Relación de Área de Inundación (RAI)

Con objeto de tener otro parámetro que complemente al run-up máximo y permita tener un valor que represente el grado de penetración del tsunami se calculó esta variable, que compara el área de inundación de la configuración versus la asociada a la corrida base correspondiente (cociente entre ambas), por lo que valores mayores a uno es muestra de una sobreestimación de la inundación por parte del modelo abreviado y, en forma contraria, valores de RAI menores a uno indican una subestimación.

El área de cada modelo simplificado, además de las corridas base se calculó a partir de la máxima profundidad de inundación, donde se realizó un conteo de los puntos en tierra sobre los cuales existía un valor mayor a la cota y asociando la resolución de la grilla en la zona inundada a un área. Por tanto, el área total inundada resulta del producto del número de puntos inundados y el área unitaria de la grilla para cada modelo simplificado y las corridas base.

Se debe tener en cuenta que esta relación genera la pérdida de información relacionada con la geometría de la inundación, por lo que debe ser analizada en conjunto con el error y sus parámetros estadísticos. Además de considerar el área que aporta cada nodo mojado dependediendo de la resolución de cada configuración.

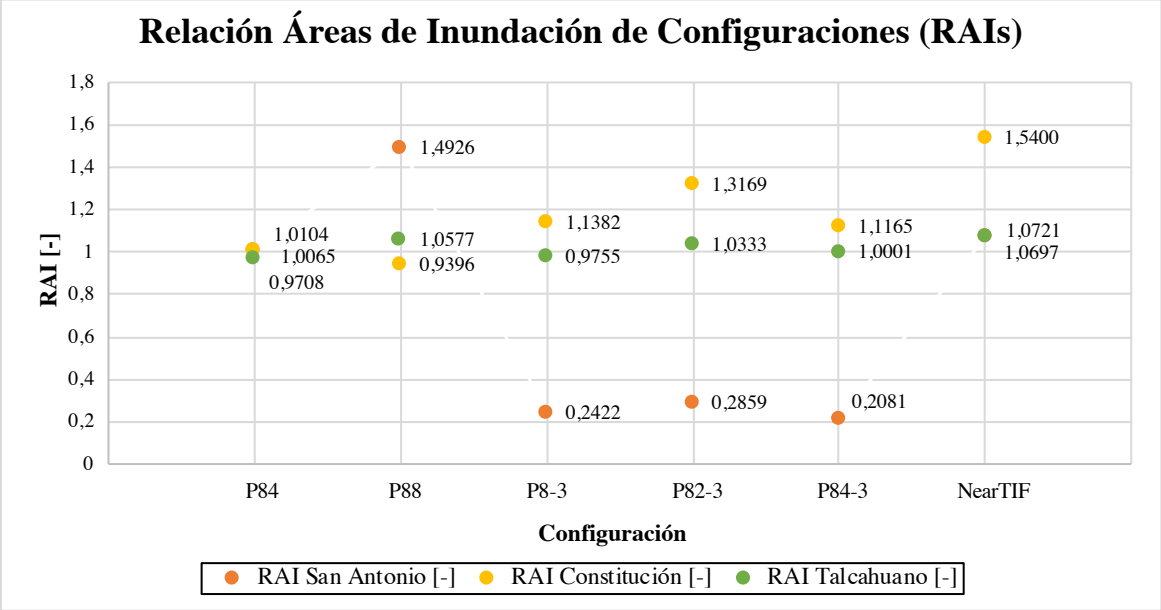


Figura 5.10 Relaciones de Áreas de Inundación de las configuraciones HySEA y resultados NearTIF

Se observa en la Figura 5.10. la relación de áreas de inundación en cada ciudad, representadas por colores, sobre cada uno de los seis modelos abreviados de cálculo (cinco configuraciones HySEA y NearTIF). Se puede apreciar en forma general que para las configuraciones HySEA, el comportamiento de las RAIs es satisfactorio, dado a que son cercanas a uno (el modelo abreviado genera un área de inundación similar a la corrida base). Salvo para los casos de resolución máxima de 3,75 segundos de arco, donde se subestima en gran forma el

área de inundación en San Antonio al disminuir la resolución en la zona de detalle de la ciudad. Esto se puede deber a la calidad de la información ingresada al Software y será sometido a discusión (ver sección 6.1)

En particular, en las configuraciones P8-3, P82-3 y P84-3 esta gran diferencia en áreas de inundación se debe a que al realizar la interpolación de las topografías se generó una pérdida de la calidad de reproducción de la desembocadura del río Maipo, es decir, la cota que se informa para esa zona es mayor a la real, y por tanto el tsunami no es capaz de sobrepasarlo (ver Anexo B). Caso contrario a las configuraciones con 0,9375" de resolución máxima, dado que en estos casos si se logra representar bien esta zona y el agua es capaz de penetrar sin problemas por ese lugar y como consecuencia, parecerse a la inundación obtenida en la corrida base. Este problema podría solucionarse, mejorando la calidad de la interpolación al momento de modelar y teniendo extremo cuidado con estos puntos bajos o detalles de importancia para la entrada del tren de olas.

El pronostico de NearTIF logra RAIs de alto desempeño (cercano a uno) debido a que no requiere de interpolaciones en zonas críticas, por lo que pronostica de muy buena forma para la ciudad de San Antonio y Talcahuano y se observa una sobreestimación del 54% del área inundada, entre lo pronosticado y la corrida base de COMCOT para la ciudad de Constitución, debiéndose principalmente a la baja capacidad de la base de datos generada para simular las series de tiempo asociadas a la corrida base para esta ciudad.

5.4.3. Parámetros estadísticos del Error (mediana, P5% y P95%)

Los parámetros estadísticos fueron generados a partir del histograma del error en la profundidad de inundación y a modo de ejemplo se muestra el histograma asociado al error entre la corrida base y el pronóstico de NearTIF para la ciudad de San Antonio en la Figura 5.11.

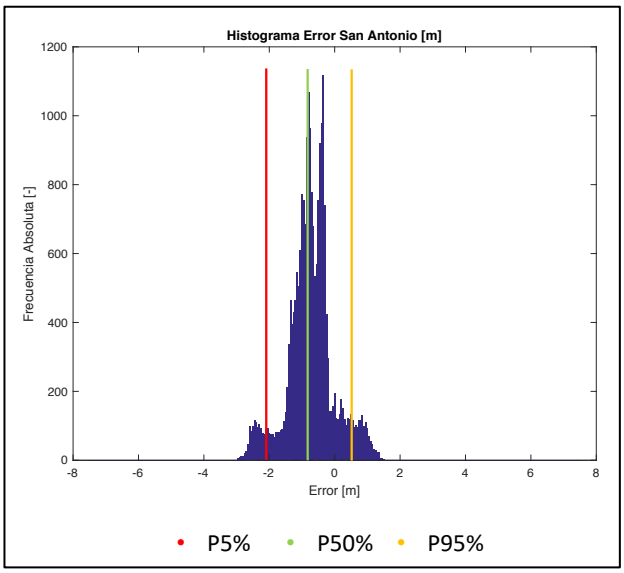


Figura 5.11 Histograma del error en profundidad de inundación del pronostico NearTIF para San Antonio.

Este error fue generado restando la profundidad de inundación de la corrida base correspondiente con la configuración analizada, sólo en los puntos del dominio donde alguna de estas dos magnitudes fuera distinta de cero, es decir, no se consideró ni la zona marítima ni la que no alcanza a ser inundada.

Los tres valores elegidos muestran esquemáticamente la configuración de este histograma y da a conocer el comportamiento espacial de la profundidad de inundación. La Figura 5.12. muestra el comportamiento del error para las configuraciones HySEA y el caso 337 de la base de datos de NearTIF para la ciudad de San Antonio, mostrando los tres percentiles mencionados anteriormente pertenecientes a los histogramas de cada modelo abreviado generado en esta investigación para la ciudad en cuestión.

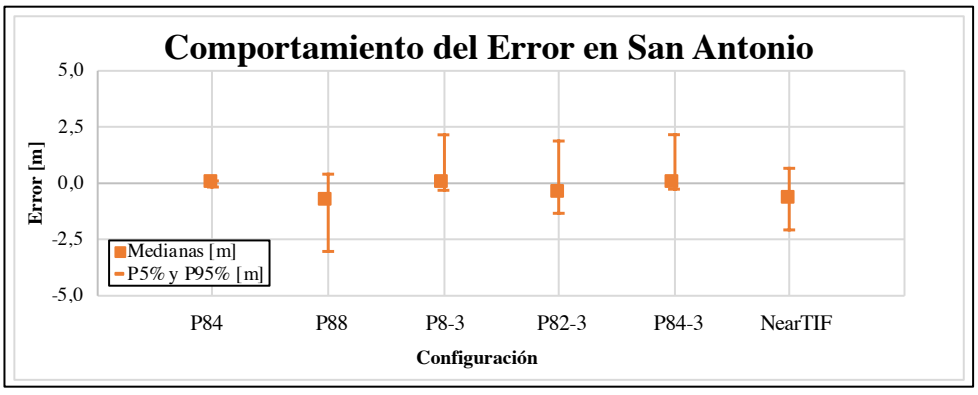


Figura 5.12 Comportamiento del error en San Antonio de configuraciones HySEA y caso 337 de base de datos de NearTIF

Se observa que en general el promedio del error es cercano en cero, y al mismo tiempo, que la configuración P84 muestra el mejor resultado en cuanto a la distribución del error (media y grado de dispersión), como era de esperarse, dado que es la distribución batimétrica de mejor calidad, de hecho su histograma es tan cercano a la media que el P5% y P95% no logran observarse en la Figura 5.12 (efecto que se replica en la Figura 5.13 y Figura 5.14). Se puede agregar que P8-3 y P84-3 presentan un resultado de mejor calidad que P82-3. Aunque se debe tener cuidado con el detalle de la subestimación en P8-3, P82-3 y P84-3, que se refleja en el alto valor del P95% cercano a los 2,5 metros. Por último, la inundación pronosticada por NearTIF es bastante simétrica, lo que puede ser un buen indicador de la calidad del resultado. Posee un error medio comparable con las configuraciones HySEA, y considerando las limitaciones de un método de pronóstico indirecto de inundación podría hablarse de un desempeño satisfactorio para esta variable.

Por último, sorprende el mal desempeño de P88, dado que posee resolución máxima igual a la corrida base y se esperaba un comportamiento similar a P84. Esto muestra que la inundación es muy susceptible a la resolución de batimetrías que se ingresa al modelo.

De forma análoga, la Figura 5.13. muestra el comportamiento del error para las configuraciones HySEA y el caso 183 de la base de datos de NearTIF para la ciudad de Constitución.

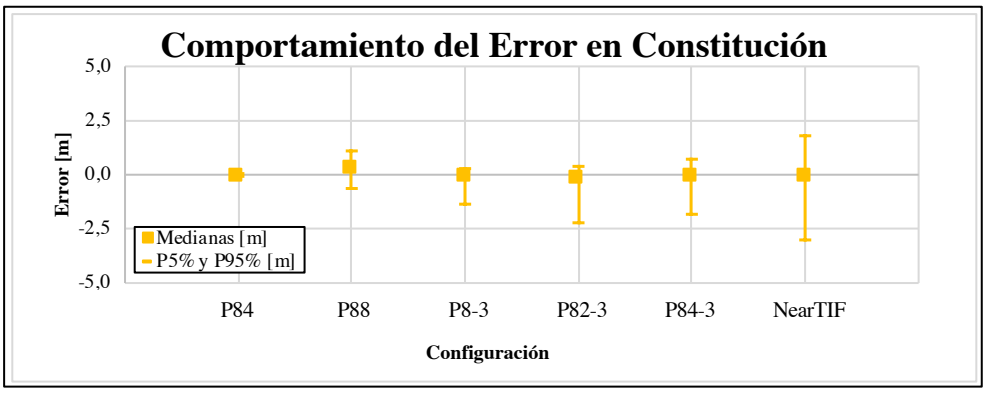


Figura 5.13 Comportamiento del error en Constitución de configuraciones HySEA y caso 183 de base de datos de NearTIF

Es evidente la alta dispersión del pronóstico NearTIF comparado con los otros modelos abreviados, lo que es consecuente con la sobreestimación del área inundada mostrada en el ítem anterior. Por el contrario, las configuraciones de Tsunami-HySEA presentan un mejor comportamiento que para San Antonio. Esto se debe a que la calidad de la batimetría en esta ciudad es mejor y las configuraciones con resolución máxima de 3,75" representan de forma adecuada la morfología del lugar como consecuencia de la interpolación para esta ciudad, en comparación a sus homólogos de mal desempeño para San Antonio.

La Figura 5.14. muestra el comportamiento del error para las configuraciones HySEA y el caso 318 de la base de datos de NearTIF para la ciudad de Talcahuano.

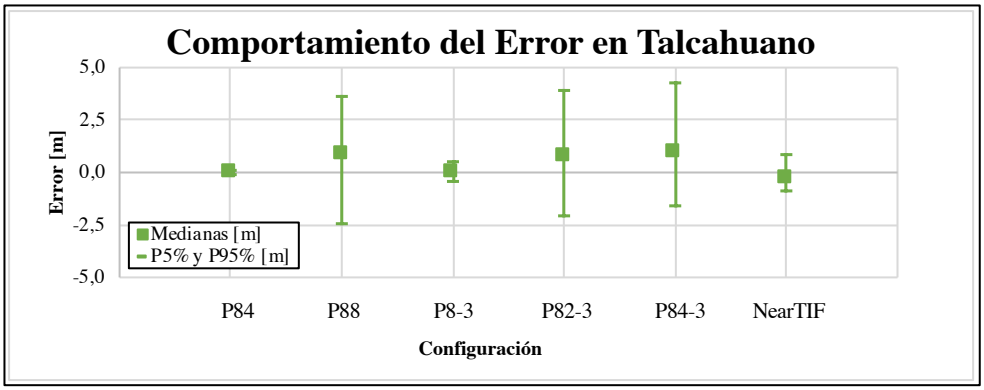


Figura 5.14 Comportamiento del error en Talcahuano de configuraciones HySEA y caso 318 de base de datos de NearTIF

Se observa, la mayor variabilidad en cuanto a la dispersión del error entre modelos abreviados que se genera en Talcahuano, en comparación a las otras ciudades analizadas, esto puede sostenerse debido a la geografía donde se emplaza la ciudad, donde se tienen grandes planicies y por ende al tener pequeñas variaciones en el fondo marino, o la topografía se traducen en grandes diferencias en el área de inundación y por consecuencia en su profundidad. Cuestión similar a lo propuesto por Cienfuegos et al., 2018 que analizó la variabilidad del área de inundación en las mismas tres ciudades estudiadas en este documento al simular 19 fallas del terremoto del Maule de 2010, concluyendo que, para esta ciudad en particular, al simular la inundación con estas diferentes fallas, se obtenía una dispersión mayor en el área inundada que en las dos ciudades mencionadas con anterioridad. Al mismo

tiempo, se observa la mejoría en cuanto al pronostico dado por NearTIF en relación con el resultado del mismo método de Constitución, llegando a una distribución bastante similar a la de San Antonio, que al mostrar una variabilidad menor da cuenta de un pronóstico mas acertado (Ver Anexo B.6.).

6. Discusión

En la sección anterior se detallaron los resultados de cada una de las configuraciones generadas junto con el pronóstico NearTIF. En la siguiente sección se procederá a unificar, discutir y detallar la importancia de la información obtenida con miradas hacia un avance real en el camino simulación en tiempo real de tsunamis en el marco de la alerta temprana.

6.1. Configuraciones HySEA

Respecto de las cinco distintas configuraciones batimétricas generadas en esta investigación, el objetivo era relacionar la calidad de los resultados versus el tiempo que éstas tardaban en procesarse en el clúster de la Universidad. Bajo ese contexto, se le daría más importancia a las de menor tiempo posible, donde las de mejor desempeño en este aspecto fueron P8-3 y P84-3, de forma relativamente esperable debido a que no poseen una resolución en las áreas a inundar mayor que P84 y P88, lo que se traduce en un menor número de puntos que componen el dominio de cálculo (ver Tabla 5.1). Aunque esto fue un apronte de las configuraciones a tomar en cuenta, que luego de realizado el análisis de resultados de inundación mostraron algunos inconvenientes, además de las otras generadas en esta investigación.

En cuanto a P84, se obtienen excelentes resultados en todas las variables, como era de esperarse, debido a su gran parecido a su corrida base. Un RAI cercano a uno y teniendo su peor desempeño para la ciudad de Talcahuano (ver Figura 5.10) y la imperceptible dispersión del error en la profundidad de inundación en las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 son prueba de aquello. Pero dado esta misma similitud, su tiempo de cálculo no disminuye lo suficiente como para cumplir con el objetivo de esta investigación.

Al mismo tiempo, sorprende la mala calidad de P88, sobretodo en la distribución y magnitud del error en San Antonio y Talcahuano, donde se diferencia significativamente de su corrida base. Esto puede causarse debido a que para esta configuración existe una trascición drástica

entre la grilla de 10” a 1” en los bordes del dominio a inundar, de tal forma que no existe una zona de resolución intermedia mas grande que la requerida para el detalle de inundación, que en esta investigación esta representada por las grillas de 3”. Por esto, queda descartado su uso en algún sistema de alerta temprana. Considerando además, que su tiempo de cálculo es bastante similar a P84 con resultados de peor calidad.

Estos resultados poco satisfactorios llevaron a generar tres configuraciones con resolución un poco menor en las zonas a inundar (de 0,9375” a 3,75”) con objeto de disminuir los tiempos de cálculo y obtener resultados similares a P84. En este contexto, P82-3 se perfila como la menos certera, tanto en área de inundación (ver Figura 5.10) como en el error asociado a la corrida base (ver Figuras 5.12, 5.13 y 5.14), mostrando en forma global un desempeño de peor calidad que sus homólogos de igual resolución en la zona de inundación, es decir, P8-3 y P84-3.

Respecto de P8-3 y P84-3, se observa un bajo desempeño en cuánto al RAI para la ciudad de San Antonio, donde se obtienen valores cercanos al 25% de la corrida base, que corresponde a una subestimación considerable del daño que potencialmente generaría un tsunami de las características del terremoto acontecido en el Maule en febrero de 2010. Por lo mismo es necesario analizar el porqué de esta situación, que llama la atención dado el correcto desempeño de esta variable en las otras dos ciudades analizadas. Al observar la distribución de la profundidad de inundación de las configuraciones con resolución máxima de 3,75” se extrae que en general poseen un comportamiento similar a la corrida base, salvo en la zona sur del dominio de cálculo en San Antonio, por lo que se decidió analizar la calidad de la batimetría del modelo, donde se observó una cota promedio relativamente alta en la extensión de la desembocadura del río Maipo, por lo que su representación de la realidad no era satisfactoria.

Para verificar esta hipótesis de causa del bajo desempeño de estas configuraciones, se simuló nuevamente utilizando la grilla de un segundo de arco para interpolar a los 3,75” necesarios para esta configuración y los resultados mejoraron apreciablemente, pasando de un RAI de 0,24 al valor de 1,23 en la configuración P8-3, mostrando una mejora en esta variable de un

53%, considerando el valor unitario como el desempeño perfecto. Con esto se logra solucionar el detalle negativo que poseía la configuración P8-3, pudiendo también mejorarse en forma análoga en este parámetro las otras configuraciones con resolución de 3,75" (P82-3 y P84-3). Esto resalta la importancia de la calidad de la batimetría a utilizar como fuente para generar la que irá en la simulación en caso de emergencia, dado a que pequeños detalles en zonas críticas como una desembocadura, genera inundaciones radicalmente distintas.

Respecto del error entre la profundidad de inundación entre la corrida base de Tsunami-HySEA y cada configuración, se pudo apreciar que la mejor opción en este caso es utilizar P8-3, debido a que posee las distribuciones mas uniformes o de menor dispersión del error y de mayor proximidad de la mediana al valor nulo. Estos resultados indican que es perfectamente posible obtener la inundación, con ciertos errores claramente, pero de calidad aceptable en un tiempo de aproximadamente un minuto y medio mediante la utilización de GPUs, con la distribución topo-batimétrica que compone a la configuración P8-3 (30" de forma global y 3,75" para cada ciudad que lo requiera).

6.2. NearTIF

Evaluar el método NearTIF, se hace algo complejo, debido al dispar comportamiento que se observa en las tres ciudades, donde los pronósticos para las ciudades de San Antonio y Talcahuano son de mayor precisión que los obtenidos en Constitución. Sin embargo, considerando lo rápido que se ejecuta el algoritmo todas las variables arrojan valores aceptables, al menos en orden de magnitud. Analizando en detalle los resultados, para San Antonio y Talcahuano, la calidad del pronóstico se asemeja a la de P8-3, elegida previamente como la de mejor desempeño. Y al mismo tiempo, las series de tiempo simuladas logran ser bien representadas por la base de datos, salvo para las boyas 35, 36, 37 y 38 que presentan falencias debido a su ubicación al oeste de la península de Tumbes (perteneciendo a otra bahía) y diferencias topo-batimétricas presentes en el modelo simulado y la base de datos. A pesar de que lo anterior incremente el valor del error de NearTIF para la ciudad de Talcahuano, ambas ciudades mencionadas poseen pronósticos de excelente calidad, si se

comparan los valores de las variables analizadas con las configuraciones HySEA, que poseen la ventaja de obtener la inundación en forma directa.

Por el contrario, para la localidad de Constitución: todas las series de tiempo simuladas poseen una gran cantidad de olas en el período analizado por el algoritmo de búsqueda y no logran ser bien representadas por el caso perteneciente a la base de datos con menor error cuadrático medio. Esto se refleja en el valor del error NearTIF para esa ciudad (1,09 metros) en comparación a los obtenidos en las otras dos ciudades y la visible sobreestimación de la inundación generada. Como se dijo anteriormente, esta fuente de error se debe a la forma de las fallas de la base de datos, cuya simplicidad les da a sus series de tiempo una suavidad que no logra representar el tren de olas que se obtiene al simular la falla compleja del terremoto de 2010 en el Maule. Al mismo tiempo, surge la hipótesis de que, como esta ciudad posee una plataforma de baja profundidad, este fenómeno puede verse aumentado por efectos no lineales. No obstante, analizando la distribución del error en la profundidad de inundación se observa que la distribución de la misma es similar a la de su corrida base, y el 54% de sobreestimación (ver Figura 5.9) esta bien distribuido en una franja angosta a lo largo de la costa (Ver Anexo B.6).

Al analizar el comportamiento de las boyas de mal desempeño en Talcahuano, podría suponerse la misma hipótesis de no linealidad que se recoge de Constitución, pudiendo cusarse debido a la cercanía de las boyas 35, 36, 37 y 38 a los acantilados de la zona oeste de la Península de Tumbes.

Por otro lado, otra fuente de error podría estar relacionada con las magnitudes de deslizamiento de cada sub-falla obtenida por Yue et al., (2014), que posee una mayor dispersión y valores mas grandes en las cercanías de Constitución, donde en consecuencia cobrará mas importancia en los resultados del método, cuestión que se ratifica con la consideración de que el método trabaja con la primera interacción tsunami-costa, por lo que siempre será la deformación mas cercana a la ciudad en cuestión la que define el pronóstico.

También, en la ciudad de Talcahuano se puede suponer que, debido a que no se emplaza unicamente en una bahía, el sistema compuesto por las boyas 35, 36, 37 y 38 se comporta

de forma “independiente” a las boyas 31, 32, 33, y 34. Cuestión que puede se apreciar al comprar los trenes de olas simulados de ambos sistemas de boyas (ver Figura 5.6) , ya que si bien, los casos de la base de datos generan un tren de olas similar para las dos bahías, las series generadas a partir de la falla de Yue et al., (2014) muestran un comportamiento distinto entre estos dos conjuntos. De hecho, para efectos del cálculo del pronóstico NearTIF en este caso, las cuatro boyas de mal desempeño no aportan. Su único efecto es aumentar el valor del error cuadrático medio (ver Figura 5.6), por lo que es importante evaluar la ubicación de las boyas en lugar que representen de buena forma el comportamiento de la bahía que se analiza, abarcando en extensión las direcciones de arribo del tren de olas y considerar solo una bahía para pronosticar en cada ciudad, que en caso de poseer más, se deberían trabajar en forma independiente (como si de ciudades diferentes se tratara).

Con el fin de analizar con más información las hipótesis anteriormente mencionadas, se decidió agregar una boya virtual con mayor lejanía a la costa en ambas ciudades con boyas de bajo rendimiento (120 metros de profundidad aproximadamente) y así eludir de alguna forma el fenómeno no lineal posible. La Figura 6.1. muestra las series de tiempo en estos puntos de observación virtual de la base de datos, para el caso pronosticado de cada ciudad y de la simulación dada por la falla de Yue et al., (2014).

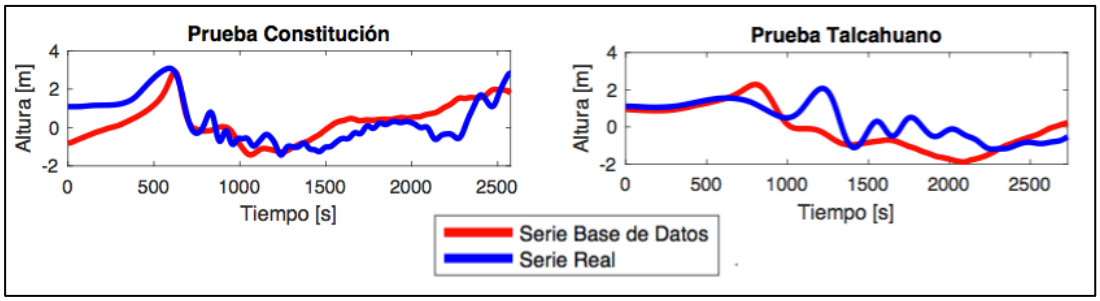


Figura 6.1 Series de tiempo boya a mayor profundidad para Constitución y Talcahuano

Se puede apreciar claramente que el fenómeno se mantiene, existe una gran complejidad en la serie de tiempo real, que el caso 183 de la base de datos no es capaz de reproducir. El comportamiento es análogo para la boya extra de Talcahuano, donde el caso 318 no logra reproducir fielmente la serie de tiempo. Lo anterior descarta el problema de la profundidad

para ambas localidades y la no linealidad que esta conlleva. Por esto, se atribuye el mal resultado para la ciudad de Constitución a la mala capacidad de reproducción de las series de tiempo causado por el tipo de fallas con que se generó la base de datos. Al mismo tiempo, el resultado de la boya en Talcahuano indica la veracidad de la suposición de que la complejidad de la falla es un limitante claro del método, cuestión que debería perfeccionarse con miras a instaurar el método en algún sistema de alerta mediante la incorporación de subfallas con diferentes características que le brinden a las serires de tiempo de la base de datos mayor similitud a la realidad..

A modo de evaluar el desempeño general de NearTIF se puede decir que presenta un comportamiento aceptable (si comparamos los resultados con las configuraciones HySEA, que poseen la ventaja intrínseca de obtener la inundación en forma directa), al cual, en el futuro, con objeto de mejorar sus pronósticos, se puede aumentar el número de fallas que constituye la base de datos, tendiendo a fallas mas complejas (slip no uniforme) teniendo en cuenta las deformaciones acumuladas en las zonas de interés con el concepto de acoplamiento intersísmico y así, en teoría, lograr menores valores de error cuadrático medio y por ende pronósticos de inundación mas precisos.

Otra razón para adoptar la medida anterior es el análisis realizado por el algoritmo de búsqueda para Talcahuano, que sólo pudo optar por dos casos de la base de datos (ver Tabla 5.2). Teniendo una base de datos con el doble o triple de tamaño, existe una mucho mayor probabilidad de encontrar un pronóstico de mejor desempeño. Dado que el ideal del método es llegar a valores cercanos al obtenido en San Antonio en esta investigación, que además son las magnitudes obtenidas por el autor de la metodología y la investigación realizada por Setiyono et al., (2017). Realizando esa mejora al método se podría emplear otro modelo numérico para lograr tiempos de simulación y obtención del pronóstico ostensiblemente menores a los de COMCOT 1.9v, como por ejemplo Tsunami-HySEA.

Pensando en lo anterior, se generaron las series reales con Tsunami-HySEA con el mismo nivel de detalle que se utilizó para generarlas en NearTIF, es decir, una grilla de treinta segundos de arco. Básicamente se replicó el proceso en el nuevo modelo, donde la simulación

demoró tan sólo doce segundos en arrojar los resultados, y con ello las series de tiempo para las 21 boyas virtuales de las tres ciudades bajo análisis. Este tiempo representa el 6,25% del requerido por COMCOT 1.9v para la obtención del input del algoritmo de NearTIF.
Este cambio en la implementación del método permite simular una serie de fallas, permitiendo introducir la incertidumbre asociada a la obtención de la caracterización de la falla. Pudiendo así, mejorar probabilísticamente el pronóstico y por ende ser capaces de tomar decisiones adecuadas en cuanto a evacuación de la población, que es el fin último y principal bajo este tipo de emergencias.

6.3. Desafío hacia el futuro

Existe la tendencia mundial a tratar de simular en tiempo real fenómenos naturales de esta índole, cuestión que hace algunos años era impensado debido al gran costo computacional que esto requiere. Mas, debido a la irrupción de los GPUs como herramienta válida en la simulación de toda la vida de un tsunami y su propagación en tierra permiten ilusionarse con esa idea.

En el contexto de un SATT, de igual forma se hace necesario acotar tanto los dominios de simulación como el nivel de resolución a ingresar al modelo para obtener tiempos de la menor magnitud posible, sin sacrificar de forma notoria la calidad del resultado. Luego de haber analizado los resultados obtenidos en esta investigación podría decirse que es razonable utilizar la configuración P8-3 para simular el fenómeno. Esto es, una grilla madre con resolución de treinta segundos de arco (925 metros aproximadamente) debe ser acotado espacialmente y tendría que contener una serie de grillas del tamaño del área de interés en todas las ciudades expuestas al posible desastre, con una resolución de 3,75” de arco (115 metros aproximadamente).

El dominio de la grilla madre no puede ser aleatorio, ya que podría generar demoras innecesarias en la simulación. Por lo que para ese efecto se tomó como referencia lo que alcanza a abarcar el tsunami en una hora, desde la generación (el sismo) hasta el arribo a las

respectivas localidades, con objeto de acotar el dominio de simulación. La Figura 6.2 muestra las distancias que logra viajar el tren de olas en una 1 hora de simulación del tsunami para terremotos de falla plana con magnitudes 7, 8,5 y 9,5 Mw según su momento sísmico respectivo y a esa distancia se le denominó *Área de Influencia*.

Tomando los mayores valores de Influencia en una hora de cada magnitud analizada, y aproximando a un número entero cercano, se realizó un ajuste logarítmico (a causa de la definición de la Escala de Magnitud de Momento), cuya ecuación se muestra en la Figura 6.2.

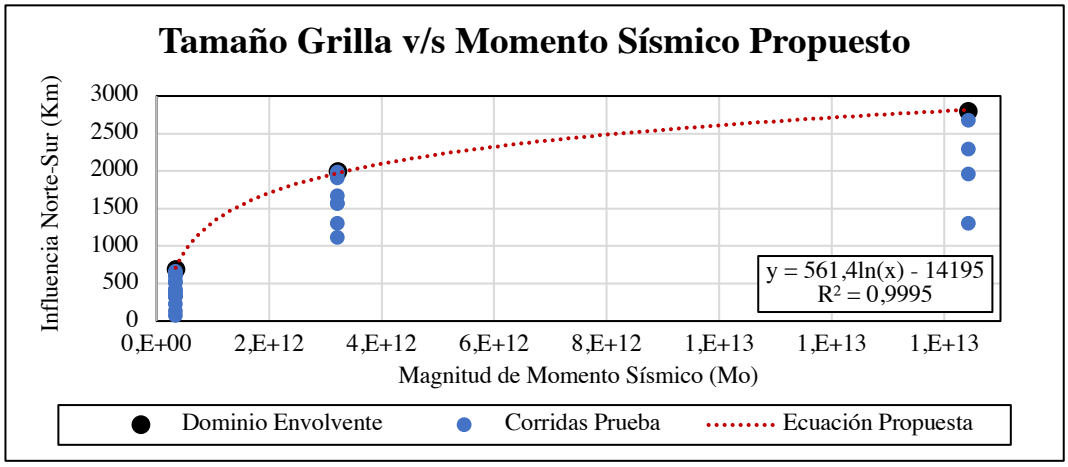


Figura 6.2 Dominios de simulación para impacto en una hora o menos desde la generación de tsunami y dimensión propuesta para cubrir este impacto en función de la magnitud de momento sísmico (Mo).

Esta expresión podría ser tomada como recomendación de tamaño de dominio para la simulación en el marco de alerta temprana, tomando como dato de entrada la magnitud preliminar del sismo, debido a que la población que se encuentra a una hora de la inundación o menos es la de mayor exposición al peligro y requiere información adecuada en el menor tiempo posible.

Ahora, a modo de mostrar la ecuación propuesta pero en unidades mas comunes, como es la escala de Magnitud de Momento (Mw) se propone la Figura 6.3. donde se observa una tendecia lineal que representa la misma ecuación propuesta en la Figura 6.2. Lo anterior se

debe a la relación logarítmica entre momento sísmico (Mo) y la escala de Magnitud de Momento (Mw).

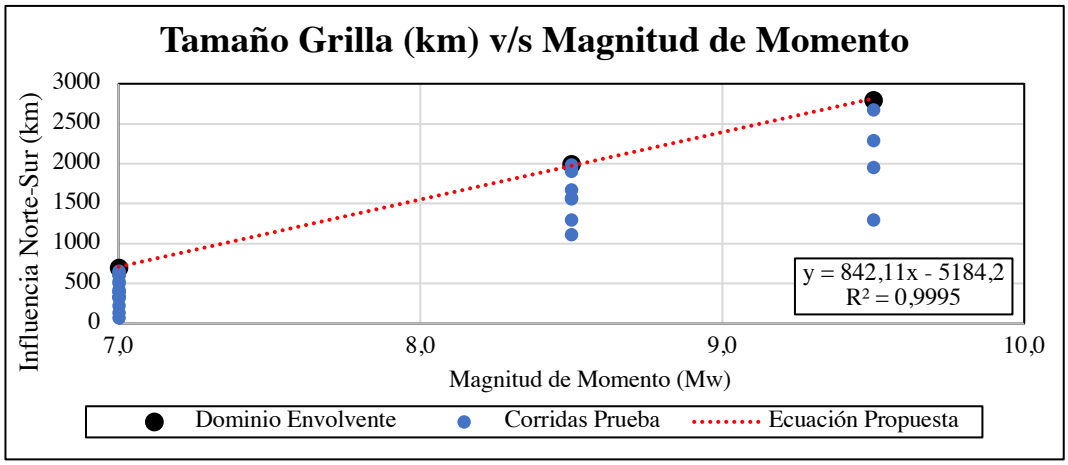


Figura 6.3 Dominios de simulación para impacto en una hora o menos desde la generación de tsunami y dimensión propuesta para cubrir este impacto en función de la magnitud de momento (Mw).

Se observa que el nivel de ajuste es el mismo para ambas ecuaciones con un $R^2 = 0,9995$, prueba de que las ecuaciones propuestas son idénticas y se deberían usar dependiendo de la unidad de magnitud del sísmo que se quiera utilizar en la variable independiente de las ecuaciones propuestas.

El dominio que se utilizó en esta investigación fue de aproximadamente 500 km para un sismo de 8,8 Mw, por lo que estaría bastante bajo la curva recomendada y por ende dentro del dominio adecuado existiría el doble o triple de localidades bajo amenaza. Este inconveniente claramente aumentaría los tiempos de cálculo. Aunque, los nuevos equipos adquiridos por el SHOA poseen mayor capacidad flotante que las empleadas en este estudio, por lo que se podrían contrarrestar estos efectos y sumado a que es posible minimizar las áreas asociadas a grillas de 3,75 segundos de arco, en principio es razonable pensar en tiempos iguales o menores a los que se refiere este documento.

En cuanto a los tiempos de simulación de los escenarios planteados en la Figura 6.2. se puede decir que no son relevantes en este marco debido a que se realizaron con un computador común con objeto de determinar las Influencias de los sismos y la recomendación radica en

realizar las simulaciones en ordenadores que trabajen en el ámbito GPU, que logra disminuir estos plazos en forma considerable.

Esto significaría que el sistema de alerta debería contar con una batería de topo-batimetrías de resolución de treinta segundos de arco, de diversos tamaños (dada la magnitud del terremoto) y con diferentes ubicaciones a lo largo de la costa del país para abarcar cualquier posible centroide geométrico aproximado de la falla que genera el tsunami. Junto con lo anterior, se debería tener una topo-batimetría de cada ciudad relativamente importante expuesta a tsunamis y así ingresarlas a la simulación si es que ésta pertenece al dominio expresado en el párrafo anterior.

Para poder realizar esta estrategia propuesta de simulación en tiempo real, es necesario contar con el hardware adecuado, un clúster con las especificaciones necesarias, que ya ha sido comprado y estará a disposición, en el corto plazo, de los organismos pertinentes (ONEMI y SHOA), por tanto, es totalmente aplicable y razonable esta idea que se plantea.

7. Conclusión

Luego de haber realizado esta investigación, se llega a resultados que permiten evaluar la posibilidad de realizar analisis en tiempo real en el sistema de alerta del país. Considerando que los tiempos que aquí se manejaron y teniendo en cuenta que aún puede perfeccionarse el método, manteniendo obviamente una precisión adecuada, en poco tiempo podría implementarse.

Respecto de los objetivos planteados al inicio de esta investigación se puede decir que se cumplen a cabalidad. Se logró analizar distintas configuraciones y se determinó la importacia a la hora de elegir la topo-batimetría a emplear. Es más, se logró determinar que la configuración que presta el mejor comportamiento rapidez-precisón es P8-3, que consta de una grilla madre de 30" con hijas de 3" para las ciudades que se desea inundar. Donde se debe tener siempre en consideración la calidad de la información a introducir en el modelo, con el fin de reproducir la realidad. Por consecuencia, se debe tener especial énfasis de revisión de la topografía en lugares de baja cota, desembocaduras de ríos, lagunas u otro que afecte la simulación. Ademas, se observó que el análisis de la ubicación y magnitud del run-up máximo para cada modelo no aporta información certera acerca de la inundación, razón por la cual en futuras investigaciones se recomienda avarcarla en forma global a lo largo de la costa, como linea de máxima inundación y no en el punto especifico del dominio donde este valor alcanza su mayor cota.

En lo que a la metodología NearTIF se refiere, se logró implementar de forma adecuada. Llegando a buenos resultados para las ciudades de San Antonio y Talcahuano, donde se logra reproducir las series de tiempo simuladas, salvo las boyas en la costa que mira Costa Larga en Talcahuano (oeste de Península de Tumbes). Para Constitucion y las boyas recien mencionadas, su comportamiento indica la importancia de generar una base de datos de alta calidad, tanto en número como en la complejidad de sus fallas para arrojar pronósticos de mayor presición. Si bien el resultado no es del todo insatisfactorio, para esta ciudad se

sobreestima el impacto del tsunami y para efectos de medidas sobre la población, este no es un resultado deseable.

Luego de todo lo anterior, se puede agregar que al realizar los cambios o mejoras expuestas a lo largo de este documento, este método podría consegir una precisión y rapidez necesaria para ser parte del sistema de alerta que todos anhelamos pueda existir, en un futuro cercano.

8. Referencias

- *Burbidge, D., Mueller, C., Power, W. (2015). The effect of uncertainty in earthquake fault parameters on the maximum wave height from a tsunami propagation model. Natural Hazards Earth System Sciencie, 15(10), 2299-2312.*
- *Cienfuegos, R., Catalán, P. A., Urrutia, A., Benavente, R., Aranguiz, R., González, G. (2018). What can we do to forecast tsunami hazards in the near field given large epistemic uncertainty in rapid seismic source inversions?. Geophysical Reseach Letters, 45(10), 4944-4955.*
- *Fritz, H., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Wiess, R., Barrientos, S. E., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, C., Papadopoulos, R., Contreras, M., Almar, R., Dominguez, J. C., Synolakis, C E. (2011). The Chile tsunami of 27 February 2010: Field survey and modeling. Pure and Applied Geophysics, 168(11), 1989-2010.*
- *Geist, E. L., Dmowska, R. (1999). Local tsunamis and distributed slip at the source, in Seismogenic and Tsunamigenic Processes in Shallow Subduction Zones. Pure and Applied Geophysics, 154(1999), 405-407.*
- *Goda, K., Mai, P. M., Yasuda, T., Mori, N. (2014), Sensitivity of tsunami wave profiles and inundation simulations to earthquake slip and fault geometry for the 2011 tohoku earthquake. Earth Planets and Space, 66(105).*
- *González-Vida J. M., Macías J., Castro, M. J., Sánchez-Linares, C., de la Asunción, M., Ortega, S. (2013). Mega-tsunami of Lituya Bay (Alaska, 1958). Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(2), 369-388.*
- *Gonzalez-Vida, J. M., Castro, M. J., Macías, J., de la Asunción, M., Molinari, I., Melini, D., Romano, F., Tonini, R., Lorito, S., Piatanesi, A. (2014). HySEA-tsunami model: A GPU implementation for the Italian TEWS. Conference: Perspectives of GPU Computing in Physics and Astrophysics, Rome.*
- *Gusman, A. R., Tanioka, Y., MacInnes, B. T., Tsushima, H. (2014). A methodology for near-field tsunami inundation forecasting: Application to the 2011 Tohoku tsunami. J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 8186-8206.*

- *Hayes, G. P., Wald, D. J., Johnson, R. L. (2012). SLAB 1.0: A tree dimensional model of global subduction zone geometries. J. Geophys. Res., 117.*
- *Imamura, F. (2009). Tsunami Modeling: calculating inundation and hazard maps. In: Bernard E. E., Robinson, R. A. (eds) The Sea, Volume 15: Tsunamis. Harvard University Press, Cambridge MA, 321-332.*
- *Lynett, P. J., Gately, K., Wilson, R., Montoya, L., Arcas, D., Aytore, B., Bai, Y., Bricker, J. D., Castro, M. J., Cheung, K. F., David, C. G., Doğan, G. G., Escalante, C., González-Vida, J. M., Grilli, S. T., Heitmann, T. W., Horrillo, J. J., Kânoglu, U., Kian, R., Kirby, J. T., Li, W., Macías, J., Nicolsky, D. J., Ortega, S., Pampell-Manis, A., Park, Y. S., Roeber, V., Sharghivand, N., Shelby, M., Shi, F., Tehranirad, B., Tolkova, E., Thio, H. K., Velioğlu, D., Yalçiner A. C., Yamazaki, Y., Zaytsev, A., Zhang, Y. J. (2017). Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents. Ocean Modeling. 114, 14-32.*
- *Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C., Gonzalez-Vida, J. M. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. Pure and Applied Gephysics, 174(8), 3147-3183.*
- *Mai, P. M., Beroza, G. C. (2002). A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B11).*
- *Melgar, D., Richard, M., Riquelme, S., Geng, J., Bravo, F., Baez, J. C., Parra, H., Barrientos, S., Fang, P., Bock, Y., Bevis, M., Caccamise II, D. J., Vigny, C., Moreno, M., Smalley, R. (2016). Local Tsunami Warnings: Perspectives from recent large events. Geophysical Research Letters, 43(3), 1109-1117.*
- *Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Karakaisis, G. (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes. Bulletin of the Geological Society of Greece, 25, 1-8.*
- *Proyecto SATREPS Tsunami (2016). Guía para la estimación de Peligro de Tsunami Ver. 1.*
- *Setiyono, U., Gusman, A.R., Satake, K., Fujii, Y. (2017). Pre-computed tsunami inundation database and forecast simulation in Pelabuhan Ratu, Indonesia. Pure and Applied Geophysics, 174(8), 3219-3235.*

- *Silgado, E. (1978). Recurrence of tsunamis in the western coast of South America. Merine Geodesy, 1(4), 347-354.*
- *Tang, L., Titov, V. V., Chamberlin, C. D. (2009). Development, testing, and applications of site-specific tsunami inundation models for real-time forecasting. Journal og Geophysical Research: Oceans, 114(C12).*
- *Tanioka, Y., Gusman, A.R., Ioki, K., Nakamura, Y. (2014). Real-Time Tsunami Inundation Forecast for a Recurrence of 17th Century Hokkaido Earthquake in Japan. Journal of Disaster Research, 9(3), 358-364.*
- *Tatehata H. (1997). The New Tsunami Warning System of the Japan Meteological Agency. In: Hebenstreit, G. (ed.), Perspectives of Tsunami Hazard Reduction. Kluwer, 175-188.*
- *Titov, V. V., Mofjeld, H. O., Gonzalez, F. I., Newman, J. C. (1999). Offshore Forecasting of Hawaiian Tsunamis Generated in Alaskan Aleutian Subduction Zone. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL – 114, 22 p.*
- *UNESCO. (2013). UNESCO-IOC. Tsunami Glosary. IOC Information document No. 1221. Paris, UNESCO, 2006, updated 2013.*
- *Wächter, J., Babeyko, A., Fleischer, J., Häner, R., Hammitzsch, M., Kloth, A., Lendholt, M. (2012). Development of tsunami early warning systems and futures challenges. Narutal Hazards Earth System Science, 12(6), 1923-1935.*
- *Yue, H., Lay, T., Rivera, L., An, C., Vigny, C., Tong, X., Báez Soto, J. C. (2014). Localized fault slip to the trench in the 2010 Maule, Chile Mw=8.8 erathquake from joint inversion of high-rate GPS, teleseismic body waves, InSAR, campaign GPS, and tsunami observations. J. Geophys Res. Solid Earth, 119, 7786-7804.*

ANEXO A

Detalle de fallas que componen la Base de Datos de NearTIF

A.1 Base de Datos de NearTIF

CASO	Mw	Profundidad [km]	L [km]	W [km]	Dislocación [m]	Strike [º]	Dip [º]	Rake [º]	Latitud [º]	Longitud [º]	Nota
1	8	6,92	162,18	70,79	7,0	28,37	3,8	90	-33,152	287,531	-
2	8,1	11,91	184,08	76,03	8,3	28,37	9,8	90	-33,163	287,551	-
3	8,2	12,23	208,93	81,66	9,9	28,37	10,2	90	-33,175	287,574	-
4	8,3	12,51	237,14	87,70	11,8	28,37	10,4	90	-33,188	287,598	-
5	8,4	12,84	269,15	94,19	14,0	28,37	10,8	90	-33,202	287,623	-
6	8,5	13,49	305,49	101,16	16,6	28,37	11,4	90	-33,217	287,651	-
7	8,6	13,85	346,74	108,64	19,7	28,37	11,7	90	-33,233	287,681	-
8	8,7	14,50	393,55	116,68	23,5	28,37	12,2	90	-33,250	287,712	-
9	8,8	14,89	446,68	125,31	27,9	28,37	12,5	90	-33,268	287,747	-
10	8,9	15,66	506,99	134,59	33,1	28,37	13,1	90	-33,288	287,783	-
11	9	16,47	575,44	144,54	39,4	28,37	13,6	90	-33,309	287,823	-
12	9,1	17,38	653,13	155,24	46,8	28,37	14,1	90	-33,332	287,865	-
13	9,2	18,75	741,31	166,72	55,6	28,37	14,9	90	-33,357	287,911	-
14	9,3	19,75	841,40	179,06	66,1	28,37	15,4	90	-33,383	287,960	-
15	9,4	21,40	954,99	192,31	78,6	28,37	16,1	90	-33,412	288,012	-
16	9,5	22,55	1083,93	206,54	93,4	28,37	16,6	90	-33,442	288,069	-
17	8	21,27	162,18	70,79	7,0	28,37	16,3	90	-33,152	288,031	-
18	8,1	21,83	184,08	76,03	8,3	28,37	16,5	90	-33,163	288,051	-
19	8,2	22,44	208,93	81,66	9,9	28,37	16,8	90	-33,175	288,074	-
20	8,3	23,03	237,14	87,70	11,8	28,37	17,0	90	-33,188	288,098	-
21	8,4	23,67	269,15	94,19	14,0	28,37	17,3	90	-33,202	288,123	-
22	8,5	24,95	305,49	101,16	16,6	28,37	17,8	90	-33,217	288,151	-
23	8,6	25,63	346,74	108,64	19,7	28,37	18,1	90	-33,233	288,181	-
24	8,7	26,94	393,55	116,68	23,5	28,37	18,6	90	-33,250	288,212	-
25	8,8	27,65	446,68	125,31	27,9	28,37	18,8	90	-33,268	288,247	-
26	8,9	29,06	506,99	134,59	33,1	28,37	19,3	90	-33,288	288,283	-
27	9	30,51	575,44	144,54	39,4	28,37	19,9	90	-33,309	288,323	-
28	9,1	32,03	653,13	155,24	46,8	28,37	20,4	90	-33,332	288,365	-
29	9,2	34,28	741,31	166,72	55,6	28,37	21,1	90	-33,357	288,411	-
30	9,3	35,83	841,40	179,06	66,1	28,37	21,6	90	-33,383	288,460	-
31	8	38,62	162,18	70,79	7,0	28,37	22,4	90	-33,152	288,531	-
32	8,1	39,42	184,08	76,03	8,3	28,37	22,6	90	-33,163	288,551	-
33	8,2	40,24	208,93	81,66	9,9	28,37	22,8	90	-33,175	288,574	-
34	8,3	41,04	237,14	87,70	11,8	28,37	23,0	90	-33,188	288,598	-
35	8,4	41,86	269,15	94,19	14,0	28,37	23,2	90	-33,202	288,623	-
36	8,5	43,48	305,49	101,16	16,6	28,37	23,7	90	-33,217	288,651	-
37	8,6	44,31	346,74	108,64	19,7	28,37	23,9	90	-33,233	288,681	-
38	8,7	45,92	393,55	116,68	23,5	28,37	24,2	90	-33,250	288,712	-
39	8,8	46,75	446,68	125,31	27,9	28,37	24,4	90	-33,268	288,747	-
40	8,9	48,37	506,99	134,59	33,1	28,37	24,8	90	-33,288	288,783	-
41	9	50,00	575,44	144,54	39,4	28,37	25,1	90	-33,309	288,823	-
42	8	9,74	162,18	70,79	7,0	28,37	7,1	90	-33,652	287,281	-
43	8,1	9,98	184,08	76,03	8,3	28,37	7,4	90	-33,663	287,301	-
44	8,2	10,30	208,93	81,66	9,9	28,37	7,7	90	-33,675	287,324	-
45	8,3	10,54	237,14	87,70	11,8	28,37	7,9	90	-33,688	287,348	-
46	8,4	11,12	269,15	94,19	14,0	28,37	8,5	90	-33,702	287,373	-
47	8,5	11,45	305,49	101,16	16,6	28,37	8,8	90	-33,717	287,401	-
48	8,6	12,07	346,74	108,64	19,7	28,37	9,4	90	-33,733	287,431	-
49	8,7	12,33	393,55	116,68	23,5	28,37	9,6	90	-33,750	287,462	-
50	8,8	12,98	446,68	125,31	27,9	28,37	10,2	90	-33,768	287,497	-
51	8,9	13,67	506,99	134,59	33,1	28,37	10,7	90	-33,788	287,533	-
52	9	14,38	575,44	144,54	39,4	28,37	11,3	90	-33,809	287,573	-
53	9,1	15,27	653,13	155,24	46,8	28,37	11,9	90	-33,832	287,615	-
54	9,2	16,08	741,31	166,72	55,6	28,37	12,5	90	-33,857	287,661	-
55	9,3	16,94	841,40	179,06	66,1	28,37	13,0	90	-33,883	287,710	-
56	9,4	18,41	954,99	192,31	78,6	28,37	13,9	90	-33,912	287,762	-
57	9,5	19,82	1083,93	206,54	93,4	28,37	14,6	90	-33,942	287,819	-
58	8	17,00	162,18	70,79	7,0	28,37	13,4	90	-33,652	287,781	-
59	8,1	17,39	184,08	76,03	8,3	28,37	13,7	90	-33,663	287,801	-
60	8,2	17,89	208,93	81,66	9,9	28,37	13,9	90	-33,675	287,824	-
61	8,3	18,30	237,14	87,70	11,8	28,37	14,2	90	-33,688	287,848	-
62	8,4	19,27	269,15	94,19	14,0	28,37	14,7	90	-33,702	287,873	-
63	8,5	19,84	305,49	101,16	16,6	28,37	15,0	90	-33,717	287,901	-
64	8,6	20,90	346,74	108,64	19,7	28,37	15,5	90	-33,733	287,931	-
65	8,7	21,38	393,55	116,68	23,5	28,37	15,7	90	-33,750	287,962	-

66	8,8	22,53	446,68	125,31	27,9	28,37	16,2	90	-33,768	287,997	-
67	8,9	23,74	506,99	134,59	33,1	28,37	16,7	90	-33,788	288,033	-
68	9	25,01	575,44	144,54	39,4	28,37	17,2	90	-33,809	288,073	-
69	9,1	26,51	653,13	155,24	46,8	28,37	17,7	90	-33,832	288,115	-
70	9,2	27,91	741,31	166,72	55,6	28,37	18,3	90	-33,857	288,161	-
71	9,3	29,36	841,40	179,06	66,1	28,37	18,8	90	-33,883	288,210	-
72	8	30,34	162,18	70,79	7,0	28,37	19,5	90	-33,652	288,281	-
73	8,1	31,03	184,08	76,03	8,3	28,37	19,8	90	-33,663	288,301	-
74	8,2	31,84	208,93	81,66	9,9	28,37	20,1	90	-33,675	288,324	-
75	8,3	32,54	237,14	87,70	11,8	28,37	20,4	90	-33,688	288,348	-
76	8,4	34,08	269,15	94,19	14,0	28,37	20,9	90	-33,702	288,373	-
77	8,5	34,93	305,49	101,16	16,6	28,37	21,2	90	-33,717	288,401	-
78	8,6	36,53	346,74	108,64	19,7	28,37	21,7	90	-33,733	288,431	-
79	8,7	37,28	393,55	116,68	23,5	28,37	22,0	90	-33,750	288,462	-
80	8,8	38,92	446,68	125,31	27,9	28,37	22,5	90	-33,768	288,497	-
81	8,9	40,60	506,99	134,59	33,1	28,37	23,0	90	-33,788	288,533	-
82	9	42,30	575,44	144,54	39,4	28,37	23,4	90	-33,809	288,573	-
83	8	9,20	162,18	70,79	7,0	28,37	6,6	90	-34,152	287,031	-
84	8,1	9,47	184,08	76,03	8,3	28,37	6,8	90	-34,163	287,051	-
85	8,2	9,87	208,93	81,66	9,9	28,37	7,1	90	-34,175	287,074	-
86	8,3	10,15	237,14	87,70	11,8	28,37	7,4	90	-34,188	287,098	-
87	8,4	10,57	269,15	94,19	14,0	28,37	7,7	90	-34,202	287,123	-
88	8,5	11,28	305,49	101,16	16,6	28,37	8,3	90	-34,217	287,151	-
89	8,6	11,72	346,74	108,64	19,7	28,37	8,6	90	-34,233	287,181	-
90	8,7	12,31	393,55	116,68	23,5	28,37	9,1	90	-34,250	287,212	-
91	8,8	12,78	446,68	125,31	27,9	28,37	9,5	90	-34,268	287,247	-
92	8,9	13,57	506,99	134,59	33,1	28,37	10,1	90	-34,288	287,283	-
93	9	14,40	575,44	144,54	39,4	28,37	10,7	90	-34,309	287,323	-
94	9,1	15,46	653,13	155,24	46,8	28,37	11,5	90	-34,332	287,365	-
95	9,2	16,75	741,31	166,72	55,6	28,37	12,5	90	-34,357	287,411	-
96	9,3	17,72	841,40	179,06	66,1	28,37	13,1	90	-34,383	287,460	-
97	9,4	19,41	954,99	192,31	78,6	28,37	14,2	90	-34,412	287,512	-
98	9,5	20,51	1083,93	206,54	93,4	28,37	14,9	90	-34,442	287,569	-
99	8	16,74	162,18	70,79	7,0	28,37	12,5	90	-34,152	287,531	-
100	8,1	17,09	184,08	76,03	8,3	28,37	12,8	90	-34,163	287,551	-
101	8,2	17,67	208,93	81,66	9,9	28,37	13,1	90	-34,175	287,574	-
102	8,3	18,05	237,14	87,70	11,8	28,37	13,4	90	-34,188	287,598	-
103	8,4	18,66	269,15	94,19	14,0	28,37	13,8	90	-34,202	287,623	-
104	8,5	19,70	305,49	101,16	16,6	28,37	14,4	90	-34,217	287,651	-
105	8,6	20,37	346,74	108,64	19,7	28,37	14,8	90	-34,233	287,681	-
106	8,7	21,22	393,55	116,68	23,5	28,37	15,3	90	-34,250	287,712	-
107	8,8	21,94	446,68	125,31	27,9	28,37	15,7	90	-34,268	287,747	-
108	8,9	23,14	506,99	134,59	33,1	28,37	16,3	90	-34,288	287,783	-
109	9	24,40	575,44	144,54	39,4	28,37	16,9	90	-34,309	287,823	-
110	9,1	26,04	653,13	155,24	46,8	28,37	17,6	90	-34,332	287,865	-
111	9,2	27,98	741,31	166,72	55,6	28,37	18,4	90	-34,357	287,911	-
112	9,3	29,45	841,40	179,06	66,1	28,37	19,0	90	-34,383	287,960	-
113	8	28,03	162,18	70,79	7,0	28,37	18,1	90	-34,152	288,031	-
114	8,1	28,62	184,08	76,03	8,3	28,37	18,3	90	-34,163	288,051	-
115	8,2	29,54	208,93	81,66	9,9	28,37	18,6	90	-34,175	288,074	-
116	8,3	30,15	237,14	87,70	11,8	28,37	18,8	90	-34,188	288,098	-
117	8,4	31,11	269,15	94,19	14,0	28,37	19,2	90	-34,202	288,123	-
118	8,5	32,74	305,49	101,16	16,6	28,37	19,7	90	-34,217	288,151	-
119	8,6	33,77	346,74	108,64	19,7	28,37	20,0	90	-34,233	288,181	-
120	8,7	35,14	393,55	116,68	23,5	28,37	20,4	90	-34,250	288,212	-
121	8,8	36,21	446,68	125,31	27,9	28,37	20,6	90	-34,268	288,247	-
122	8,9	38,04	506,99	134,59	33,1	28,37	21,1	90	-34,288	288,283	-
123	9	39,92	575,44	144,54	39,4	28,37	21,5	90	-34,309	288,323	-
124	8	9,06	162,18	70,79	7,0	28,37	6,7	90	-34,652	286,781	-
125	8,1	9,29	184,08	76,03	8,3	28,37	6,9	90	-34,663	286,801	-
126	8,2	9,66	208,93	81,66	9,9	28,37	7,3	90	-34,675	286,824	-
127	8,3	9,91	237,14	87,70	11,8	28,37	7,5	90	-34,688	286,848	-
128	8,4	10,58	269,15	94,19	14,0	28,37	8,0	90	-34,702	286,873	-
129	8,5	11,02	305,49	101,16	16,6	28,37	8,4	90	-34,717	286,901	-
130	8,6	11,78	346,74	108,64	19,7	28,37	9,0	90	-34,733	286,931	-
131	8,7	12,10	393,55	116,68	23,5	28,37	9,2	90	-34,750	286,962	-
132	8,8	12,94	446,68	125,31	27,9	28,37	9,8	90	-34,768	286,997	-
133	8,9	13,84	506,99	134,59	33,1	28,37	10,4	90	-34,788	287,033	-
134	9	14,78	575,44	144,54	39,4	28,37	11,0	90	-34,809	287,073	-
135	9,1	15,96	653,13	155,24	46,8	28,37	11,8	90	-34,832	287,115	-
136	9,2	17,00	741,31	166,72	55,6	28,37	12,5	90	-34,857	287,161	-

137	9,3	18,08	841,40	179,06	66,1	28,37	13,2	90	-34,883	287,210	-
138	9,4	19,91	954,99	192,31	78,6	28,37	14,4	90	-34,912	287,262	-
139	9,5	21,60	1083,93	206,54	93,4	28,37	15,4	90	-34,942	287,319	-
140	8	17,34	162,18	70,79	7,0	28,37	12,8	90	-34,652	287,281	-
141	8,1	17,76	184,08	76,03	8,3	28,37	13,1	90	-34,663	287,301	-
142	8,2	18,41	208,93	81,66	9,9	28,37	13,5	90	-34,675	287,324	-
143	8,3	18,84	237,14	87,70	11,8	28,37	13,8	90	-34,688	287,348	-
144	8,4	19,97	269,15	94,19	14,0	28,37	14,5	90	-34,702	287,373	-
145	8,5	20,68	305,49	101,16	16,6	28,37	15,0	90	-34,717	287,401	-
146	8,6	21,88	346,74	108,64	19,7	28,37	15,7	90	-34,733	287,431	-
147	8,7	22,37	393,55	116,68	23,5	28,37	16,0	90	-34,750	287,462	-
148	8,8	23,64	446,68	125,31	27,9	28,37	16,7	90	-34,768	287,497	-
149	8,9	24,96	506,99	134,59	33,1	28,37	17,5	90	-34,788	287,533	-
150	9	26,34	575,44	144,54	39,4	28,37	18,2	90	-34,809	287,573	-
151	9,1	28,09	653,13	155,24	46,8	28,37	19,0	90	-34,832	287,615	-
152	9,2	29,57	741,31	166,72	55,6	28,37	19,7	90	-34,857	287,661	-
153	9,3	31,10	841,40	179,06	66,1	28,37	20,4	90	-34,883	287,710	-
154	8	29,48	162,18	70,79	7,0	28,37	19,6	90	-34,652	287,781	-
155	8,1	30,05	184,08	76,03	8,3	28,37	19,8	90	-34,663	287,801	-
156	8,2	31,00	208,93	81,66	9,9	28,37	20,2	90	-34,675	287,824	-
157	8,3	31,59	237,14	87,70	11,8	28,37	20,4	90	-34,688	287,848	-
158	8,4	33,18	269,15	94,19	14,0	28,37	21,0	90	-34,702	287,873	-
159	8,5	34,19	305,49	101,16	16,6	28,37	21,4	90	-34,717	287,901	-
160	8,6	35,86	346,74	108,64	19,7	28,37	21,9	90	-34,733	287,931	-
161	8,7	36,51	393,55	116,68	23,5	28,37	22,0	90	-34,750	287,962	-
162	8,8	38,24	446,68	125,31	27,9	28,37	22,5	90	-34,768	287,997	-
163	8,9	40,03	506,99	134,59	33,1	28,37	22,8	90	-34,788	288,033	-
164	9	41,89	575,44	144,54	39,4	28,37	23,2	90	-34,809	288,073	-
165	8	9,58	162,18	70,79	7,0	28,37	6,7	90	-35,152	286,481	-
166	8,1	9,77	184,08	76,03	8,3	28,37	6,9	90	-35,163	286,501	-
167	8,2	10,11	208,93	81,66	9,9	28,37	7,3	90	-35,175	286,524	-
168	8,3	10,32	237,14	87,70	11,8	28,37	7,5	90	-35,188	286,548	-
169	8,4	10,90	269,15	94,19	14,0	28,37	8,2	90	-35,202	286,573	-
170	8,5	11,28	305,49	101,16	16,6	28,37	8,5	90	-35,217	286,601	-
171	8,6	11,92	346,74	108,64	19,7	28,37	9,2	90	-35,233	286,631	-
172	8,7	12,17	393,55	116,68	23,5	28,37	9,4	90	-35,250	286,662	-
173	8,8	12,87	446,68	125,31	27,9	28,37	10,0	90	-35,268	286,697	-
174	8,9	13,62	506,99	134,59	33,1	28,37	10,7	90	-35,288	286,733	-
175	9	14,42	575,44	144,54	39,4	28,37	11,3	90	-35,309	286,773	-
176	9,1	15,49	653,13	155,24	46,8	28,37	12,1	90	-35,332	286,815	-
177	9,2	16,42	741,31	166,72	55,6	28,37	12,8	90	-35,357	286,861	-
178	9,3	17,42	841,40	179,06	66,1	28,37	13,4	90	-35,383	286,910	-
179	9,4	19,16	954,99	192,31	78,6	28,37	14,4	90	-35,412	286,962	-
180	9,5	20,81	1083,93	206,54	93,4	28,37	15,3	90	-35,442	287,019	-
181	8	16,45	162,18	70,79	7,0	28,37	12,4	90	-35,152	286,981	-
182	8,1	16,86	184,08	76,03	8,3	28,37	12,6	90	-35,163	287,001	-
183	**8,2**	**17,52**	**208,93**	**81,66**	**9,9**	**28,37**	**13,0**	**90**	**-35,175**	**287,024**	**Pronóstico Constitución**
184	8,3	17,96	237,14	87,70	11,8	28,37	13,3	90	-35,188	287,048	-
185	8,4	19,11	269,15	94,19	14,0	28,37	13,9	90	-35,202	287,073	-
186	8,5	19,83	305,49	101,16	16,6	28,37	14,3	90	-35,217	287,101	-
187	8,6	21,07	346,74	108,64	19,7	28,37	15,0	90	-35,233	287,131	-
188	8,7	21,58	393,55	116,68	23,5	28,37	15,3	90	-35,250	287,162	-
189	8,8	22,90	446,68	125,31	27,9	28,37	16,0	90	-35,268	287,197	-
190	8,9	24,28	506,99	134,59	33,1	28,37	16,7	90	-35,288	287,233	-
191	9	25,71	575,44	144,54	39,4	28,37	17,3	90	-35,309	287,273	-
192	9,1	27,54	653,13	155,24	46,8	28,37	18,2	90	-35,332	287,315	-
193	9,2	29,10	741,31	166,72	55,6	28,37	18,8	90	-35,357	287,361	-
194	9,3	30,71	841,40	179,06	66,1	28,37	19,5	90	-35,383	287,410	-
195	8	29,27	162,18	70,79	7,0	28,37	19,1	90	-35,152	287,481	-
196	8,1	29,88	184,08	76,03	8,3	28,37	19,4	90	-35,163	287,501	-
197	8,2	30,85	208,93	81,66	9,9	28,37	19,8	90	-35,175	287,524	-
198	8,3	31,48	237,14	87,70	11,8	28,37	20,1	90	-35,188	287,548	-
199	8,4	33,12	269,15	94,19	14,0	28,37	20,7	90	-35,202	287,573	-
200	8,5	34,16	305,49	101,16	16,6	28,37	21,1	90	-35,217	287,601	-
201	8,6	35,89	346,74	108,64	19,7	28,37	21,7	90	-35,233	287,631	-
202	8,7	36,56	393,55	116,68	23,5	28,37	21,9	90	-35,250	287,662	-
203	8,8	38,34	446,68	125,31	27,9	28,37	22,4	90	-35,268	287,697	-
204	8,9	40,16	506,99	134,59	33,1	28,37	22,9	90	-35,288	287,733	-
205	9	42,02	575,44	144,54	39,4	28,37	23,4	90	-35,309	287,773	-
206	8	9,36	162,18	70,79	7,0	28,37	6,7	90	-35,652	286,181	-
207	8,1	9,61	184,08	76,03	8,3	28,37	7,0	90	-35,663	286,201	-

208	8,2	9,98	208,93	81,66	9,9	28,37	7,4	90	-35,675	286,224	-
209	8,3	10,23	237,14	87,70	11,8	28,37	7,6	90	-35,688	286,248	-
210	8,4	10,87	269,15	94,19	14,0	28,37	8,3	90	-35,702	286,273	-
211	8,5	11,25	305,49	101,16	16,6	28,37	8,6	90	-35,717	286,301	-
212	8,6	11,92	346,74	108,64	19,7	28,37	9,3	90	-35,733	286,331	-
213	8,7	12,19	393,55	116,68	23,5	28,37	9,6	90	-35,750	286,362	-
214	8,8	12,89	446,68	125,31	27,9	28,37	10,2	90	-35,768	286,397	-
215	8,9	13,62	506,99	134,59	33,1	28,37	10,9	90	-35,788	286,433	-
216	9	14,38	575,44	144,54	39,4	28,37	11,6	90	-35,809	286,473	-
217	9,1	15,33	653,13	155,24	46,8	28,37	12,4	90	-35,832	286,515	-
218	9,2	16,17	741,31	166,72	55,6	28,37	13,0	90	-35,857	286,561	-
219	9,3	17,04	841,40	179,06	66,1	28,37	13,7	90	-35,883	286,610	-
220	9,4	18,53	954,99	192,31	78,6	28,37	14,7	90	-35,912	286,662	-
221	9,5	19,92	1083,93	206,54	93,4	28,37	15,6	90	-35,942	286,719	-
222	8	16,43	162,18	70,79	7,0	28,37	13,2	90	-35,652	286,681	-
223	8,1	16,78	184,08	76,03	8,3	28,37	13,4	90	-35,663	286,701	-
224	8,2	17,35	208,93	81,66	9,9	28,37	13,8	90	-35,675	286,724	-
225	8,3	17,72	237,14	87,70	11,8	28,37	14,1	90	-35,688	286,748	-
226	8,4	18,71	269,15	94,19	14,0	28,37	14,7	90	-35,702	286,773	-
227	8,5	19,33	305,49	101,16	16,6	28,37	15,1	90	-35,717	286,801	-
228	8,6	20,40	346,74	108,64	19,7	28,37	15,7	90	-35,733	286,831	-
229	8,7	20,85	393,55	116,68	23,5	28,37	16,0	90	-35,750	286,862	-
230	8,8	22,00	446,68	125,31	27,9	28,37	16,6	90	-35,768	286,897	-
231	8,9	23,22	506,99	134,59	33,1	28,37	17,2	90	-35,788	286,933	-
232	9	24,49	575,44	144,54	39,4	28,37	17,7	90	-35,809	286,973	-
233	9,1	26,08	653,13	155,24	46,8	28,37	18,4	90	-35,832	287,015	-
234	9,2	27,48	741,31	166,72	55,6	28,37	18,9	90	-35,857	287,061	-
235	9,3	28,95	841,40	179,06	66,1	28,37	19,4	90	-35,883	287,110	-
236	8	28,37	162,18	70,79	7,0	28,37	18,8	90	-35,652	287,181	-
237	8,1	29,00	184,08	76,03	8,3	28,37	19,1	90	-35,663	287,201	-
238	8,2	29,94	208,93	81,66	9,9	28,37	19,4	90	-35,675	287,224	-
239	8,3	30,59	237,14	87,70	11,8	28,37	19,6	90	-35,688	287,248	-
240	8,4	32,24	269,15	94,19	14,0	28,37	20,1	90	-35,702	287,273	-
241	8,5	33,24	305,49	101,16	16,6	28,37	20,5	90	-35,717	287,301	-
242	8,6	34,97	346,74	108,64	19,7	28,37	21,0	90	-35,733	287,331	-
243	8,7	35,68	393,55	116,68	23,5	28,37	21,2	90	-35,750	287,362	-
244	8,8	37,47	446,68	125,31	27,9	28,37	21,6	90	-35,768	287,397	-
245	8,9	39,29	506,99	134,59	33,1	28,37	22,1	90	-35,788	287,433	-
246	9	41,16	575,44	144,54	39,4	28,37	22,5	90	-35,809	287,473	-
247	8	8,95	162,18	70,79	7,0	26,57	6,8	90	-36,143	285,985	-
248	8,1	9,35	184,08	76,03	8,3	26,57	7,1	90	-36,153	286,006	-
249	8,2	9,65	208,93	81,66	9,9	26,57	7,4	90	-36,164	286,029	-
250	8,3	10,37	237,14	87,70	11,8	26,57	7,9	90	-36,177	286,053	-
251	8,4	10,67	269,15	94,19	14,0	26,57	8,2	90	-36,190	286,079	-
252	8,5	11,09	305,49	101,16	16,6	26,57	8,5	90	-36,204	286,108	-
253	8,6	11,84	346,74	108,64	19,7	26,57	9,1	90	-36,219	286,138	-
254	8,7	12,60	393,55	116,68	23,5	26,57	9,7	90	-36,235	286,170	-
255	8,8	13,05	446,68	125,31	27,9	26,57	10,0	90	-36,252	286,205	-
256	8,9	13,84	506,99	134,59	33,1	26,57	10,6	90	-36,271	286,242	-
257	9	14,65	575,44	144,54	39,4	26,57	11,2	90	-36,291	286,282	-
258	9,1	15,49	653,13	155,24	46,8	26,57	11,8	90	-36,313	286,325	-
259	9,2	16,73	741,31	166,72	55,6	26,57	12,6	90	-36,336	286,372	-
260	9,3	17,63	841,40	179,06	66,1	26,57	13,2	90	-36,361	286,421	-
261	9,4	18,97	954,99	192,31	78,6	26,57	14,0	90	-36,387	286,475	-
262	9,5	20,54	1083,93	206,54	93,4	26,57	14,9	90	-36,416	286,532	-
263	8	16,97	162,18	70,79	7,0	26,57	13,3	90	-36,143	286,485	-
264	8,1	17,51	184,08	76,03	8,3	26,57	13,6	90	-36,153	286,506	-
265	8,2	17,88	208,93	81,66	9,9	26,57	13,9	90	-36,164	286,529	-
266	8,3	18,83	237,14	87,70	11,8	26,57	14,5	90	-36,177	286,553	-
267	8,4	19,23	269,15	94,19	14,0	26,57	14,8	90	-36,190	286,579	-
268	8,5	19,82	305,49	101,16	16,6	26,57	15,1	90	-36,204	286,608	-
269	8,6	20,84	346,74	108,64	19,7	26,57	15,7	90	-36,219	286,638	-
270	8,7	21,90	393,55	116,68	23,5	26,57	16,2	90	-36,235	286,670	-
271	8,8	22,55	446,68	125,31	27,9	26,57	16,5	90	-36,252	286,705	-
272	8,9	23,68	506,99	134,59	33,1	26,57	17,0	90	-36,271	286,742	-
273	9	24,85	575,44	144,54	39,4	26,57	17,6	90	-36,291	286,782	-
274	9,1	26,07	653,13	155,24	46,8	26,57	18,0	90	-36,313	286,825	-
275	9,2	27,86	741,31	166,72	55,6	26,57	18,7	90	-36,336	286,872	-
276	9,3	29,18	841,40	179,06	66,1	26,57	19,1	90	-36,361	286,921	-
277	8	28,40	162,18	70,79	7,0	26,57	19,3	90	-36,143	286,985	-
278	8,1	29,21	184,08	76,03	8,3	26,57	19,6	90	-36,153	287,006	-

279	8,2	29,80	208,93	81,66	9,9	26,57	19,7	90	-36,164	287,029	-
280	8,3	31,26	237,14	87,70	11,8	26,57	20,2	90	-36,177	287,053	-
281	8,4	31,89	269,15	94,19	14,0	26,57	20,3	90	-36,190	287,079	-
282	8,5	32,77	305,49	101,16	16,6	26,57	20,5	90	-36,204	287,108	-
283	8,6	34,34	346,74	108,64	19,7	26,57	20,9	90	-36,219	287,138	-
284	8,7	35,95	393,55	116,68	23,5	26,57	21,2	90	-36,235	287,170	-
285	8,8	36,90	446,68	125,31	27,9	26,57	21,4	90	-36,252	287,205	-
286	8,9	38,57	506,99	134,59	33,1	26,57	21,7	90	-36,271	287,242	-
287	9	40,28	575,44	144,54	39,4	26,57	22,0	90	-36,291	287,282	-
288	8	7,91	162,18	70,79	7,0	26,57	5,7	90	-36,643	285,685	-
289	8,1	8,21	184,08	76,03	8,3	26,57	6,0	90	-36,653	285,706	-
290	8,2	8,42	208,93	81,66	9,9	26,57	6,2	90	-36,664	285,729	-
291	8,3	8,95	237,14	87,70	11,8	26,57	6,7	90	-36,677	285,753	-
292	8,4	9,17	269,15	94,19	14,0	26,57	6,9	90	-36,690	285,779	-
293	8,5	9,50	305,49	101,16	16,6	26,57	7,2	90	-36,704	285,808	-
294	8,6	10,09	346,74	108,64	19,7	26,57	7,7	90	-36,719	285,838	-
295	8,7	10,72	393,55	116,68	23,5	26,57	8,2	90	-36,735	285,870	-
296	8,8	11,09	446,68	125,31	27,9	26,57	8,4	90	-36,752	285,905	-
297	8,9	11,78	506,99	134,59	33,1	26,57	8,9	90	-36,771	285,942	-
298	9	12,50	575,44	144,54	39,4	26,57	9,4	90	-36,791	285,982	-
299	9,1	13,27	653,13	155,24	46,8	26,57	9,8	90	-36,813	286,025	-
300	9,2	14,42	741,31	166,72	55,6	26,57	10,5	90	-36,836	286,072	-
301	9,3	15,23	841,40	179,06	66,1	26,57	11,0	90	-36,861	286,121	-
302	9,4	16,45	954,99	192,31	78,6	26,57	11,7	90	-36,887	286,175	-
303	9,5	17,80	1083,93	206,54	93,4	26,57	12,4	90	-36,916	286,232	-
304	8	15,14	162,18	70,79	7,0	26,57	11,1	90	-36,643	286,185	-
305	8,1	15,62	184,08	76,03	8,3	26,57	11,4	90	-36,653	286,206	-
306	8,2	15,99	208,93	81,66	9,9	26,57	11,6	90	-36,664	286,229	-
307	8,3	16,87	237,14	87,70	11,8	26,57	12,1	90	-36,677	286,253	-
308	8,4	17,26	269,15	94,19	14,0	26,57	12,3	90	-36,690	286,279	-
309	8,5	17,77	305,49	101,16	16,6	26,57	12,6	90	-36,704	286,308	-
310	8,6	18,70	346,74	108,64	19,7	26,57	13,1	90	-36,719	286,338	-
311	8,7	19,65	393,55	116,68	23,5	26,57	13,6	90	-36,735	286,370	-
312	8,8	20,20	446,68	125,31	27,9	26,57	13,9	90	-36,752	286,405	-
313	8,9	21,19	506,99	134,59	33,1	26,57	14,3	90	-36,771	286,442	-
314	9	22,20	575,44	144,54	39,4	26,57	14,8	90	-36,791	286,482	-
315	9,1	23,24	653,13	155,24	46,8	26,57	15,3	90	-36,813	286,525	-
316	9,2	24,78	741,31	166,72	55,6	26,57	15,9	90	-36,836	286,572	-
317	9,3	25,88	841,40	179,06	66,1	26,57	16,3	90	-36,861	286,621	-
318	**8**	**25,69**	**162,18**	**70,79**	**7,0**	**26,57**	**16,8**	**90**	**-36,643**	**286,685**	**Pronóstico Talcahuano**
319	8,1	26,35	184,08	76,03	8,3	26,57	17,1	90	-36,653	286,706	-
320	8,2	26,86	208,93	81,66	9,9	26,57	17,3	90	-36,664	286,729	-
321	8,3	28,06	237,14	87,70	11,8	26,57	17,7	90	-36,677	286,753	-
322	8,4	28,59	269,15	94,19	14,0	26,57	17,9	90	-36,690	286,779	-
323	8,5	29,29	305,49	101,16	16,6	26,57	18,1	90	-36,704	286,808	-
324	8,6	30,56	346,74	108,64	19,7	26,57	18,5	90	-36,719	286,838	-
325	8,7	31,85	393,55	116,68	23,5	26,57	18,8	90	-36,735	286,870	-
326	8,8	32,59	446,68	125,31	27,9	26,57	19,0	90	-36,752	286,905	-
327	8,9	33,92	506,99	134,59	33,1	26,57	19,3	90	-36,771	286,942	-
328	9	35,28	575,44	144,54	39,4	26,57	19,7	90	-36,791	286,982	-
329	8	7,90	162,18	70,79	7,0	16,70	5,4	90	-37,092	285,505	-
330	8,1	8,08	184,08	76,03	8,3	16,70	5,6	90	-37,098	285,528	-
331	8,2	8,45	208,93	81,66	9,9	16,70	6,0	90	-37,106	285,552	-
332	8,3	8,70	237,14	87,70	11,8	16,70	6,2	90	-37,114	285,578	-
333	8,4	8,89	269,15	94,19	14,0	16,70	6,4	90	-37,122	285,606	-
334	8,5	9,34	305,49	101,16	16,6	16,70	6,9	90	-37,131	285,636	-
335	8,6	9,55	346,74	108,64	19,7	16,70	7,1	90	-37,141	285,669	-
336	8,7	10,03	393,55	116,68	23,5	16,70	7,5	90	-37,151	285,703	-
337	**8,8**	**10,48**	**446,68**	**125,31**	**27,9**	**16,70**	**7,9**	**90**	**-37,162**	**285,741**	**Pronóstico San Antonio**
338	8,9	11,01	506,99	134,59	33,1	16,70	8,3	90	-37,174	285,781	
339	9	11,52	575,44	144,54	39,4	16,70	8,7	90	-37,187	285,824	-
340	9,1	12,11	653,13	155,24	46,8	16,70	9,1	90	-37,201	285,870	-
341	9,2	13,04	741,31	166,72	55,6	16,70	9,7	90	-37,216	285,919	-
342	9,3	14,06	841,40	179,06	66,1	16,70	10,2	90	-37,232	285,973	-
343	9,4	14,75	954,99	192,31	78,6	16,70	10,6	90	-37,249	286,030	-
344	9,5	16,25	1083,93	206,54	93,4	16,70	11,4	90	-37,267	286,091	-
345	8	14,01	162,18	70,79	7,0	16,70	10,3	90	-37,092	286,005	-
346	8,1	14,36	184,08	76,03	8,3	16,70	10,4	90	-37,098	286,028	-
347	8,2	15,08	208,93	81,66	9,9	16,70	10,8	90	-37,106	286,052	-
348	8,3	15,50	237,14	87,70	11,8	16,70	11,0	90	-37,114	286,078	-
349	8,4	15,87	269,15	94,19	14,0	16,70	11,2	90	-37,122	286,106	-

350	8,5	16,68	305,49	101,16	16,6	16,70	11,7	90	-37,131	286,136	-
351	8,6	17,06	346,74	108,64	19,7	16,70	11,8	90	-37,141	286,169	-
352	8,7	17,90	393,55	116,68	23,5	16,70	12,3	90	-37,151	286,203	-
353	8,8	18,69	446,68	125,31	27,9	16,70	12,6	90	-37,162	286,241	-
354	8,9	19,57	506,99	134,59	33,1	16,70	13,0	90	-37,174	286,281	-
355	9	20,40	575,44	144,54	39,4	16,70	13,4	90	-37,187	286,324	-
356	9,1	21,31	653,13	155,24	46,8	16,70	13,8	90	-37,201	286,370	-
357	9,2	22,69	741,31	166,72	55,6	16,70	14,4	90	-37,216	286,419	-
358	9,3	24,10	841,40	179,06	66,1	16,70	15,0	90	-37,232	286,473	-
359	8	24,17	162,18	70,79	7,0	16,70	15,2	90	-37,092	286,505	-
360	8,1	24,64	184,08	76,03	8,3	16,70	15,4	90	-37,098	286,528	-
361	8,2	25,60	208,93	81,66	9,9	16,70	15,8	90	-37,106	286,552	-
362	8,3	26,16	237,14	87,70	11,8	16,70	16,0	90	-37,114	286,578	-
363	8,4	26,65	269,15	94,19	14,0	16,70	16,2	90	-37,122	286,606	-
364	8,5	27,72	305,49	101,16	16,6	16,70	16,5	90	-37,131	286,636	-
365	8,6	28,23	346,74	108,64	19,7	16,70	16,7	90	-37,141	286,669	-
366	8,7	29,33	393,55	116,68	23,5	16,70	17,1	90	-37,151	286,703	-
367	8,8	30,40	446,68	125,31	27,9	16,70	17,4	90	-37,162	286,741	-
368	8,9	31,54	506,99	134,59	33,1	16,70	17,7	90	-37,174	286,781	-
369	9	32,65	575,44	144,54	39,4	16,70	18,1	90	-37,187	286,824	-
370	8	7,95	162,18	70,79	7,0	16,70	5,3	90	-37,592	285,405	-
371	8,1	7,95	184,08	76,03	8,3	16,70	5,3	90	-37,598	285,428	-
372	8,2	8,33	208,93	81,66	9,9	16,70	5,7	90	-37,606	285,452	-
373	8,3	8,55	237,14	87,70	11,8	16,70	5,8	90	-37,614	285,478	-
374	8,4	8,75	269,15	94,19	14,0	16,70	6,0	90	-37,622	285,506	-
375	8,5	9,17	305,49	101,16	16,6	16,70	6,4	90	-37,631	285,536	-
376	8,6	9,38	346,74	108,64	19,7	16,70	6,6	90	-37,641	285,569	-
377	8,7	9,82	393,55	116,68	23,5	16,70	7,0	90	-37,651	285,603	-
378	8,8	10,25	446,68	125,31	27,9	16,70	7,3	90	-37,662	285,641	-
379	8,9	10,73	506,99	134,59	33,1	16,70	7,7	90	-37,674	285,681	-
380	9	11,20	575,44	144,54	39,4	16,70	8,1	90	-37,687	285,724	-
381	9,1	11,72	653,13	155,24	46,8	16,70	8,4	90	-37,701	285,770	-
382	9,2	12,54	741,31	166,72	55,6	16,70	9,0	90	-37,716	285,819	-
383	9,3	13,42	841,40	179,06	66,1	16,70	9,5	90	-37,732	285,873	-
384	9,4	14,02	954,99	192,31	78,6	16,70	9,8	90	-37,749	285,930	-
385	9,5	15,35	1083,93	206,54	93,4	16,70	10,5	90	-37,767	285,991	-
386	8	13,49	162,18	70,79	7,0	16,70	9,7	90	-37,592	285,905	-
387	8,1	13,79	184,08	76,03	8,3	16,70	9,8	90	-37,598	285,928	-
388	8,2	14,43	208,93	81,66	9,9	16,70	10,2	90	-37,606	285,952	-
389	8,3	14,79	237,14	87,70	11,8	16,70	10,4	90	-37,614	285,978	-
390	8,4	15,13	269,15	94,19	14,0	16,70	10,5	90	-37,622	286,006	-
391	8,5	15,86	305,49	101,16	16,6	16,70	10,9	90	-37,631	286,036	-
392	8,6	16,22	346,74	108,64	19,7	16,70	11,0	90	-37,641	286,069	-
393	8,7	16,97	393,55	116,68	23,5	16,70	11,4	90	-37,651	286,103	-
394	8,8	17,70	446,68	125,31	27,9	16,70	11,7	90	-37,662	286,141	-
395	8,9	18,47	506,99	134,59	33,1	16,70	12,0	90	-37,674	286,181	-
396	9	19,24	575,44	144,54	39,4	16,70	12,3	90	-37,687	286,224	-
397	9,1	20,04	653,13	155,24	46,8	16,70	12,6	90	-37,701	286,270	-
398	9,2	21,25	741,31	166,72	55,6	16,70	13,1	90	-37,716	286,319	-
399	9,3	22,51	841,40	179,06	66,1	16,70	13,6	90	-37,732	286,373	-
400	8	22,82	162,18	70,79	7,0	16,70	13,9	90	-37,592	286,405	-
401	8,1	23,25	184,08	76,03	8,3	16,70	14,0	90	-37,598	286,428	-
402	8,2	24,13	208,93	81,66	9,9	16,70	14,4	90	-37,606	286,452	-
403	8,3	24,59	237,14	87,70	11,8	16,70	14,5	90	-37,614	286,478	-
404	8,4	25,04	269,15	94,19	14,0	16,70	14,7	90	-37,622	286,506	-
405	8,5	25,97	305,49	101,16	16,6	16,70	15,0	90	-37,631	286,536	-
406	8,6	26,43	346,74	108,64	19,7	16,70	15,1	90	-37,641	286,569	-
407	8,7	27,39	393,55	116,68	23,5	16,70	15,4	90	-37,651	286,603	-
408	8,8	28,36	446,68	125,31	27,9	16,70	15,7	90	-37,662	286,641	-
409	8,9	29,35	506,99	134,59	33,1	16,70	16,0	90	-37,674	286,681	-
410	9	30,36	575,44	144,54	39,4	16,70	16,3	90	-37,687	286,724	-

Tabla 9.1 Detalle de cada falla que comone la Base de Datos generada para NearTIF

ANEXO B

Resultados Configuraciones HySEA

B.1. Resultados Configuración P84

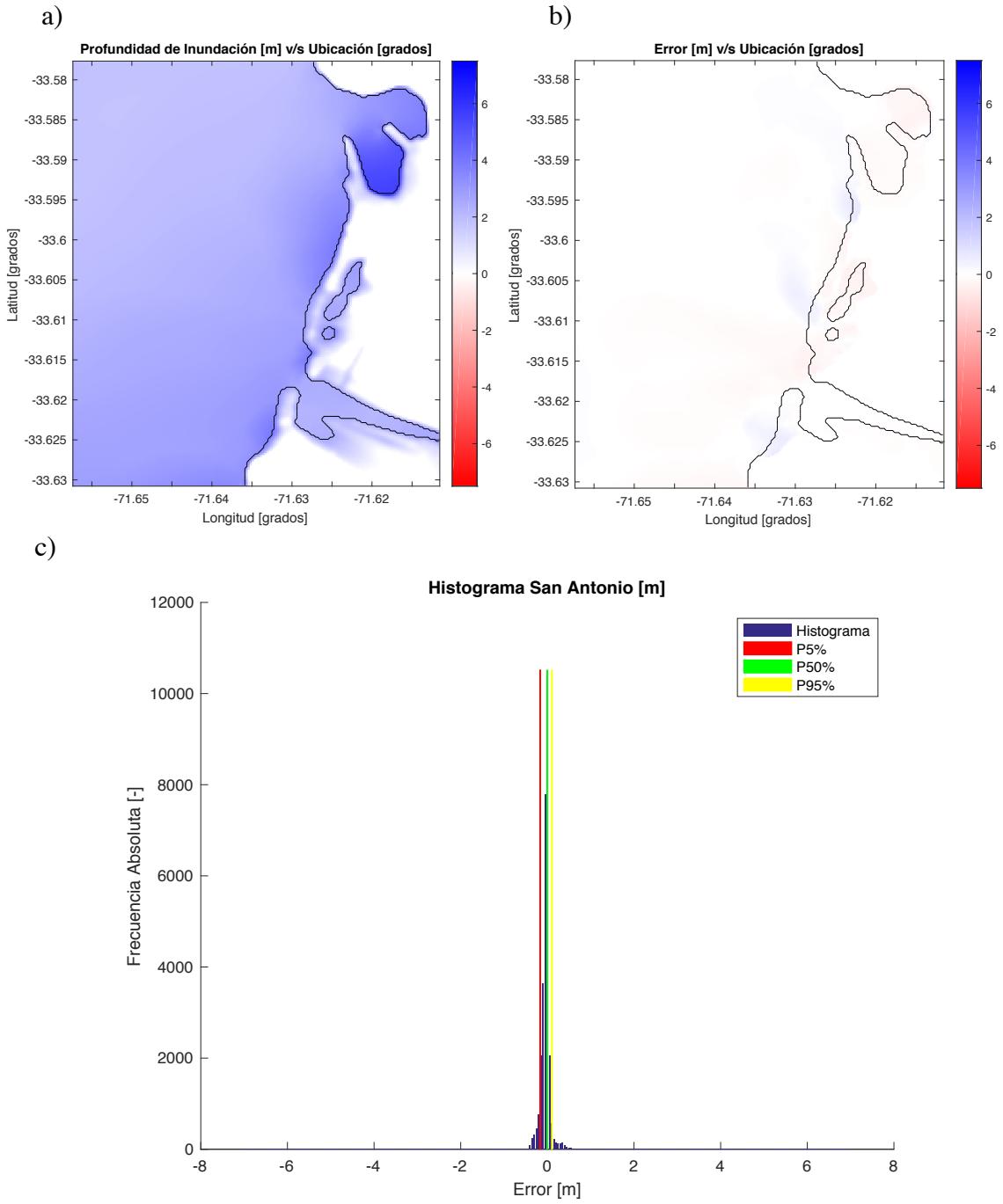
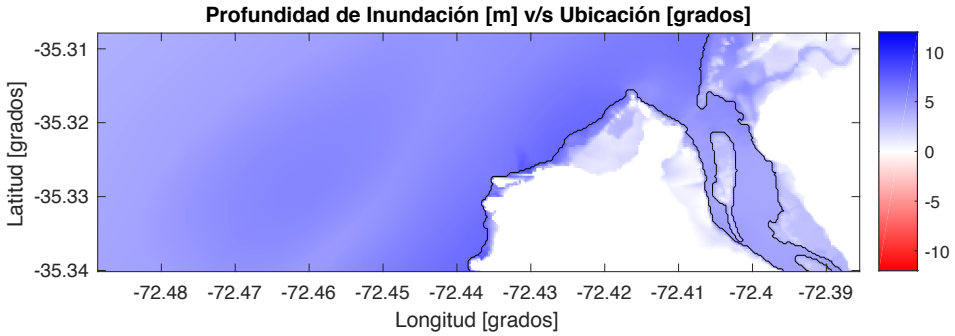
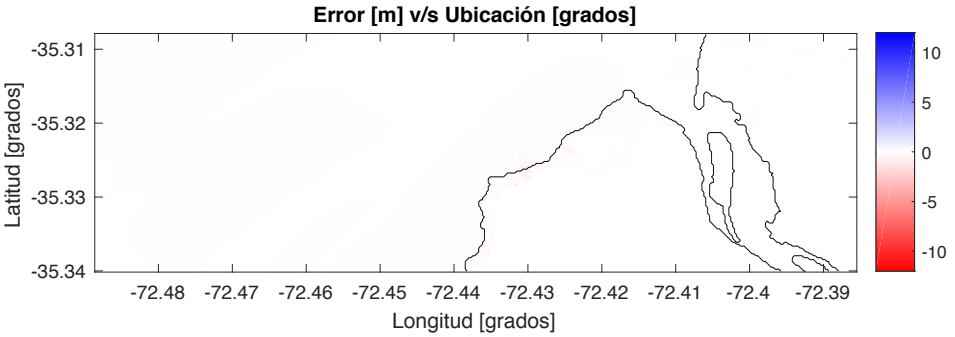


Figura 9.1 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

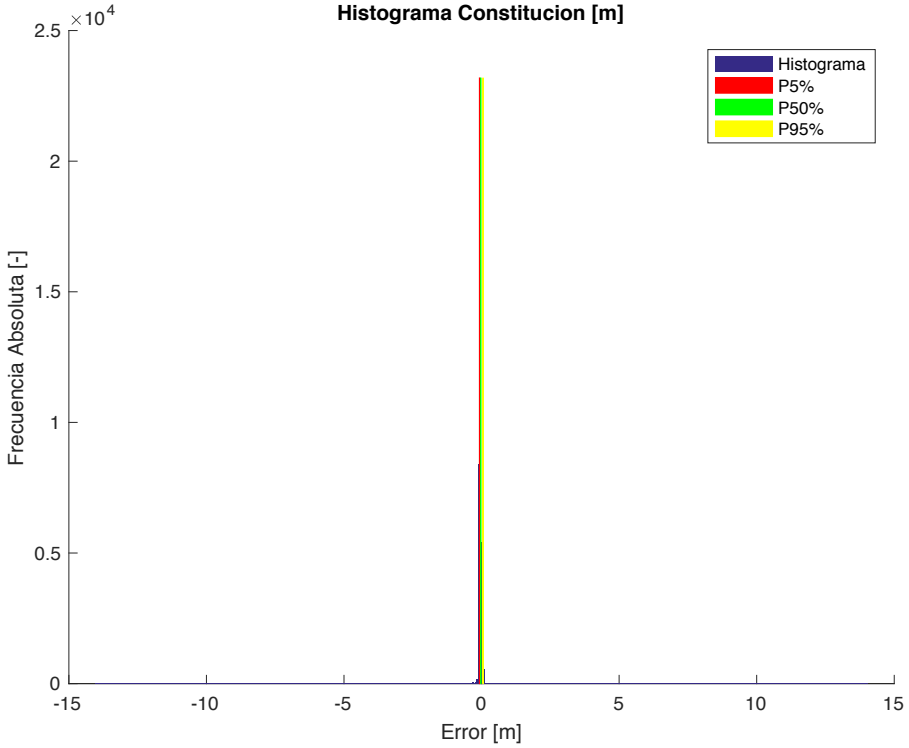
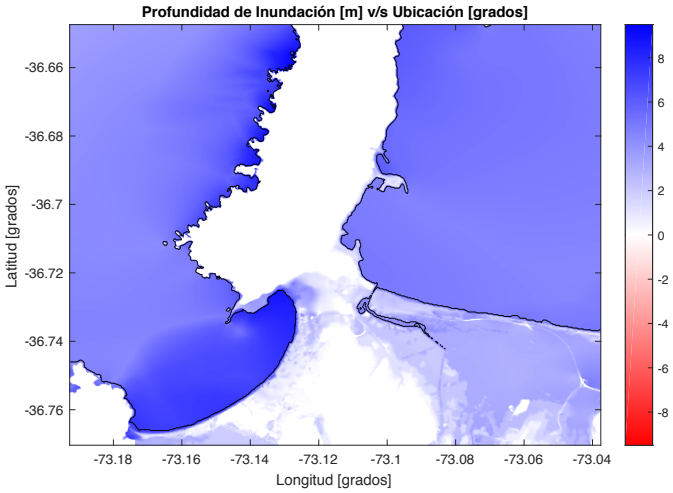
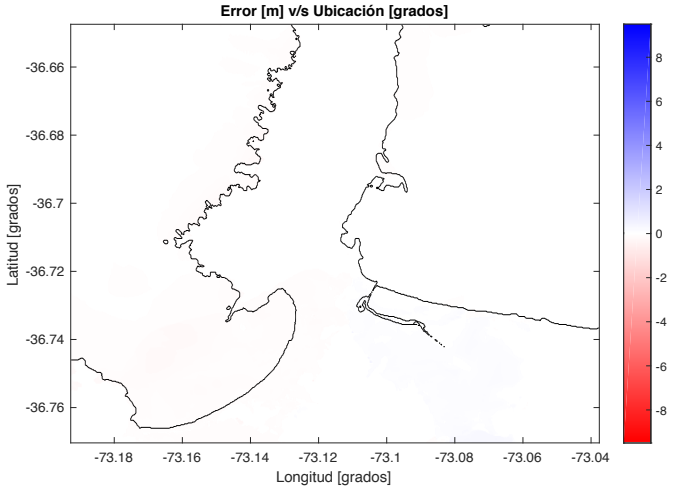


Figura 9.2 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

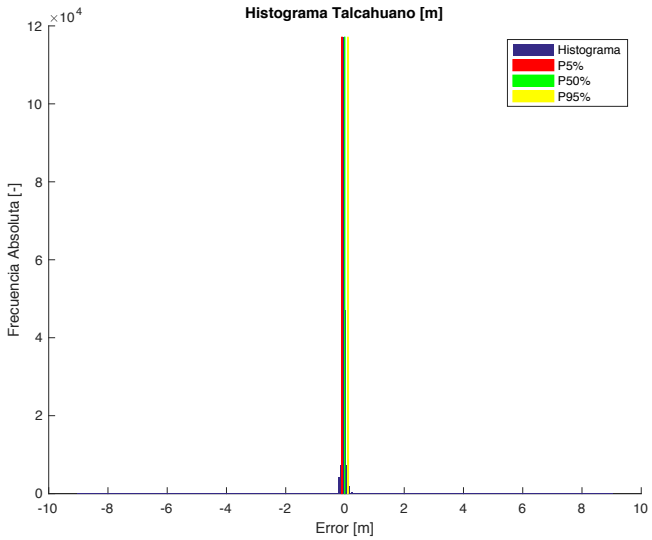


Figura 9.3 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84 en la ciudad de Talcahuano

B.2. Resultados Configuración P88

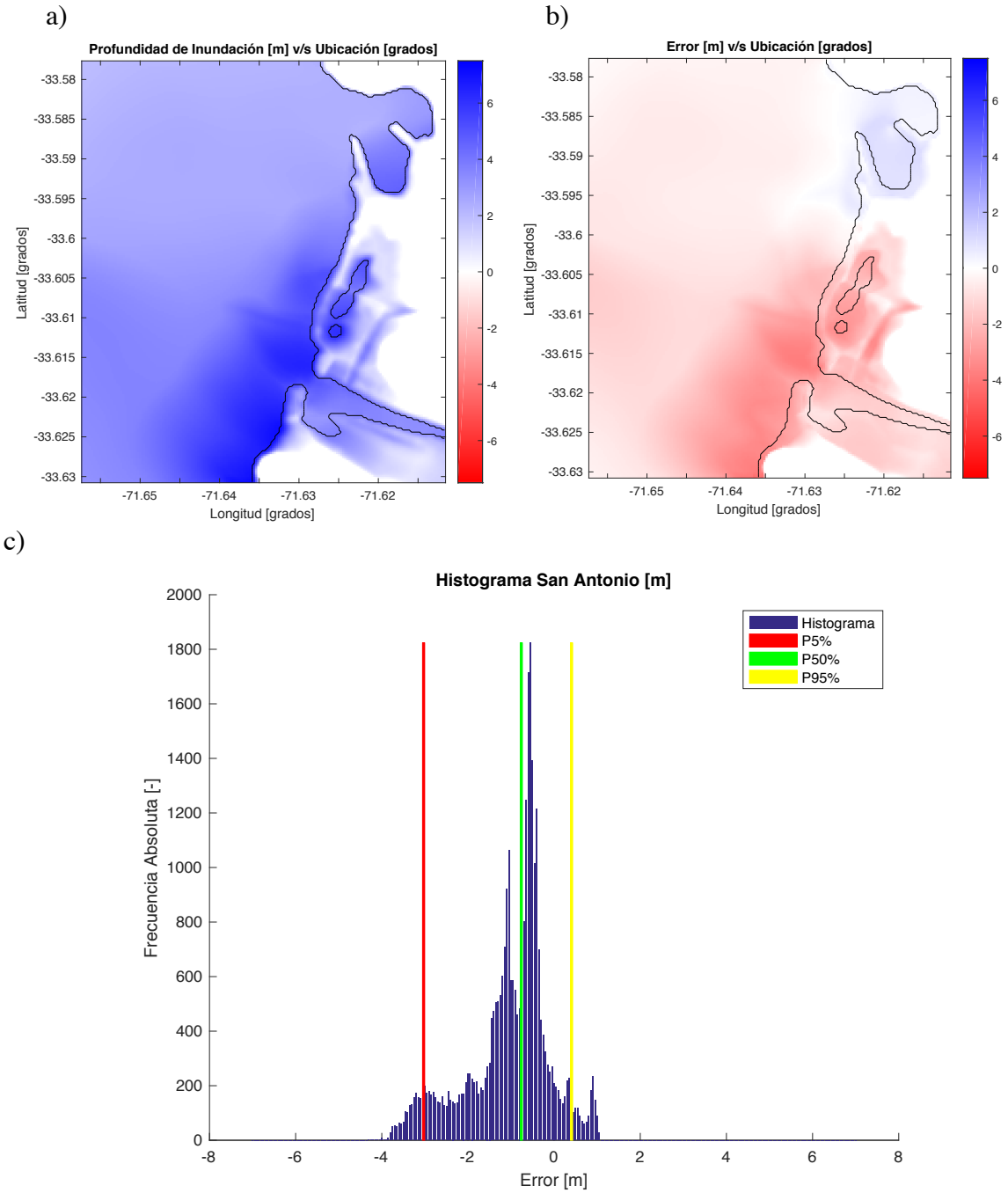
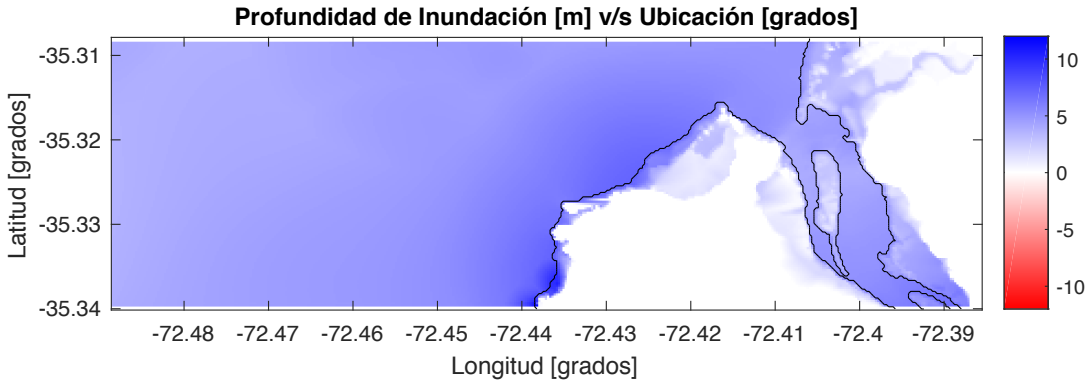
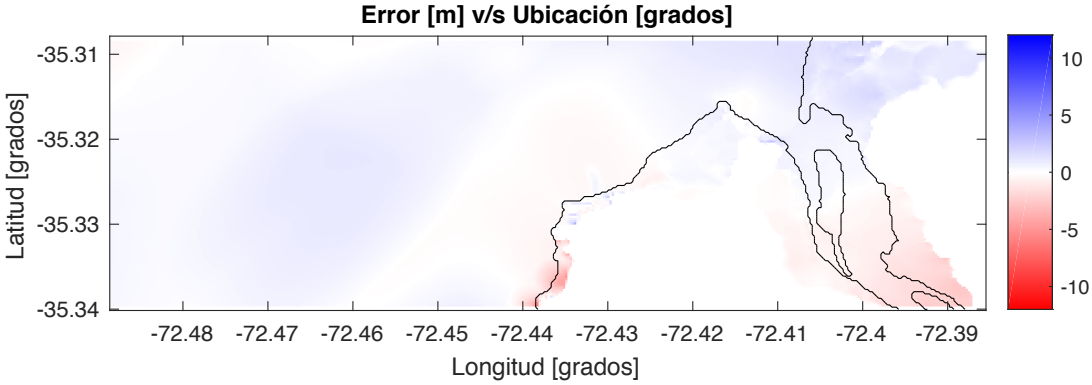


Figura 9.4 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

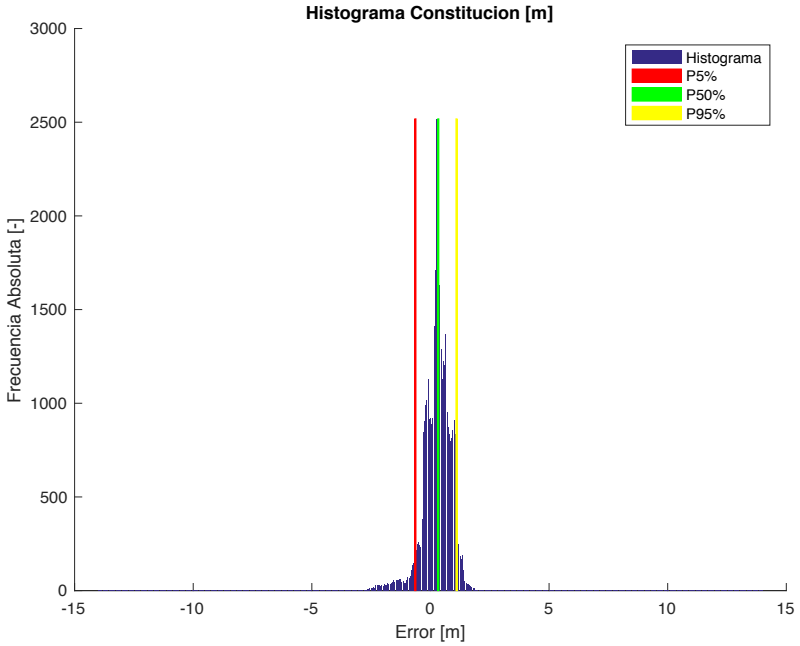
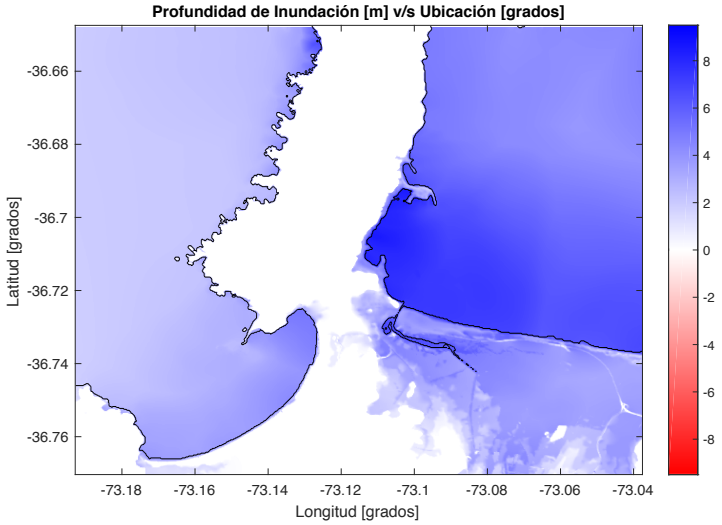
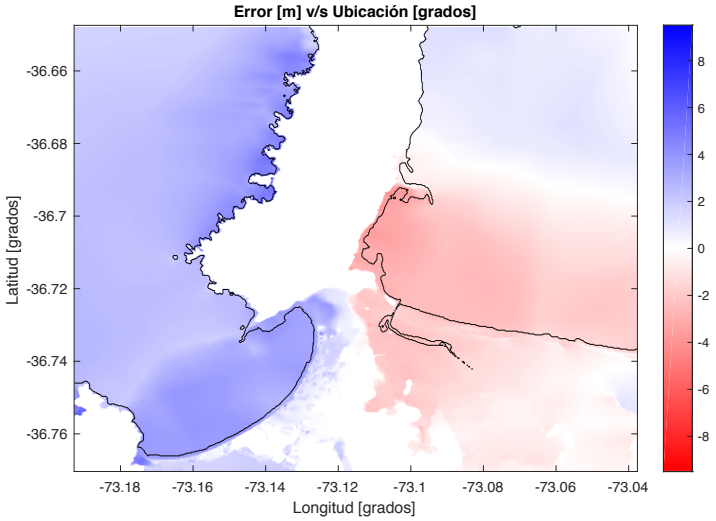


Figura 9.5 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

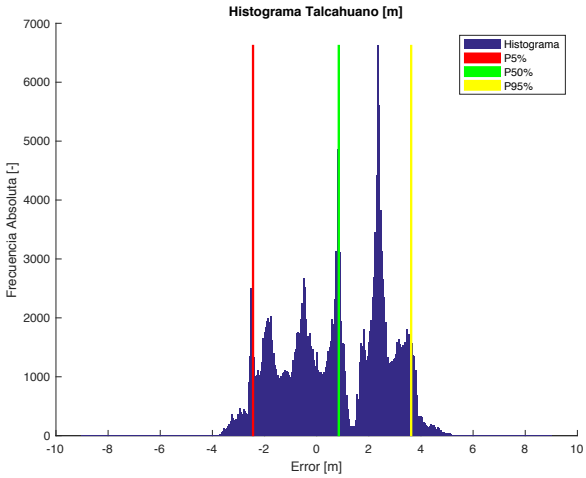
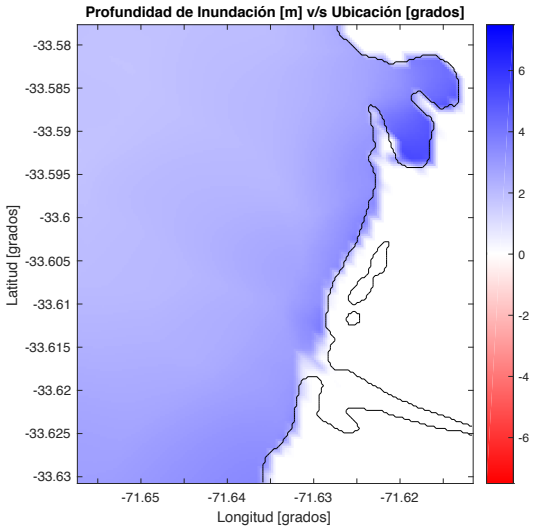


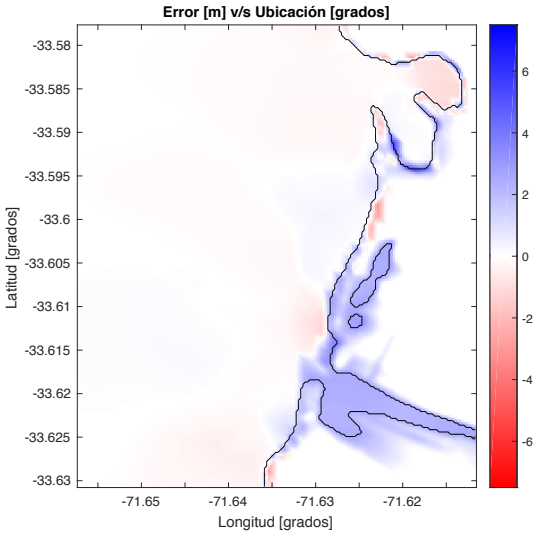
Figura 9.6 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P88 en la ciudad de Talcahuano

B.3. Resultados Configuración P8-3

a)



b)



c)

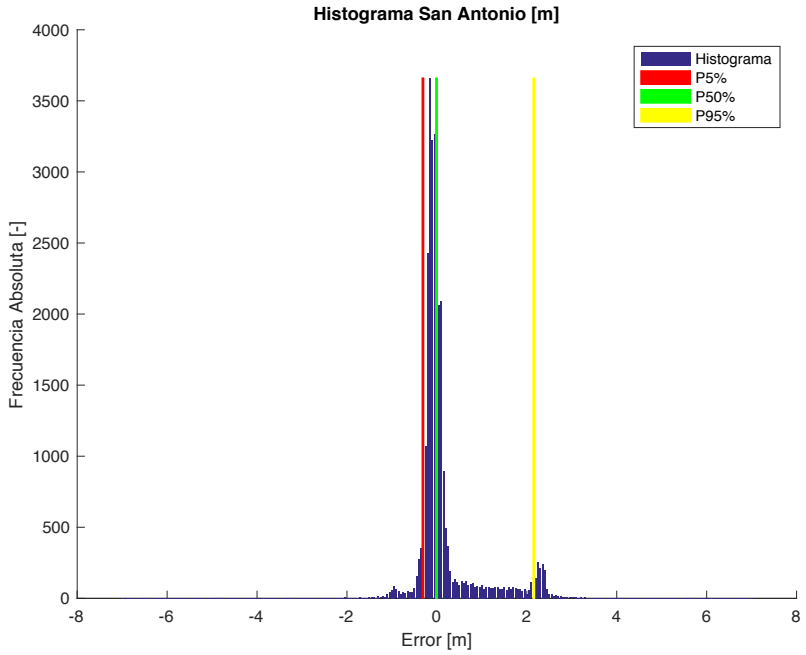
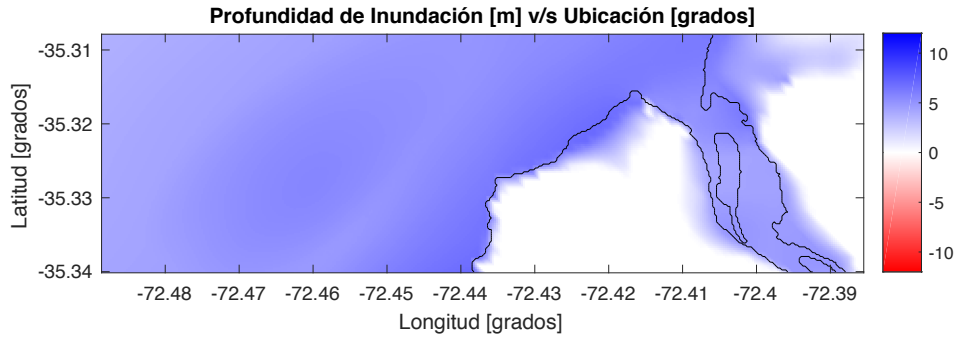
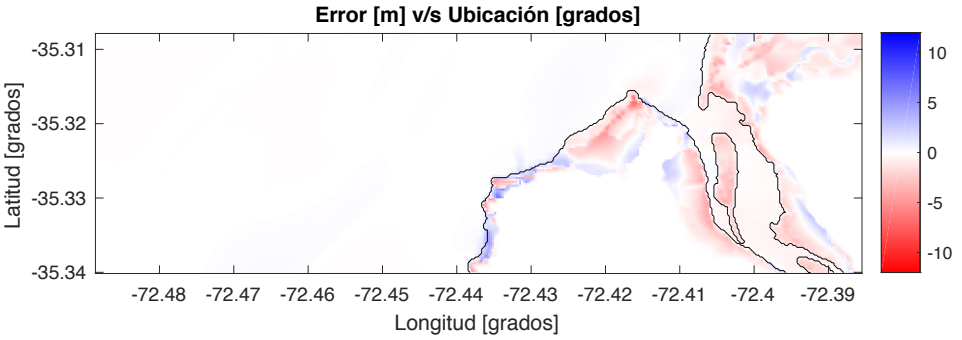


Figura 9.7 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

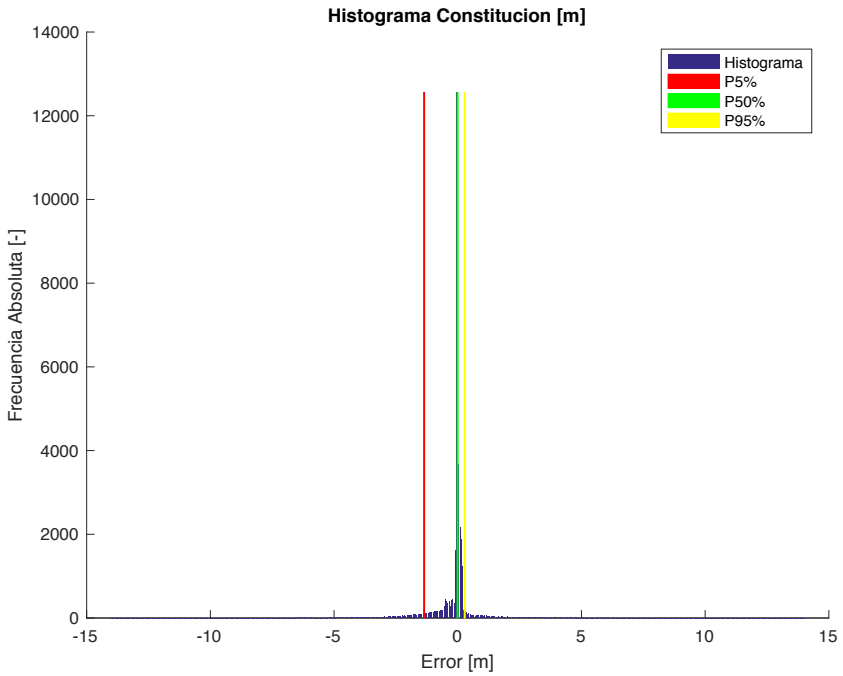
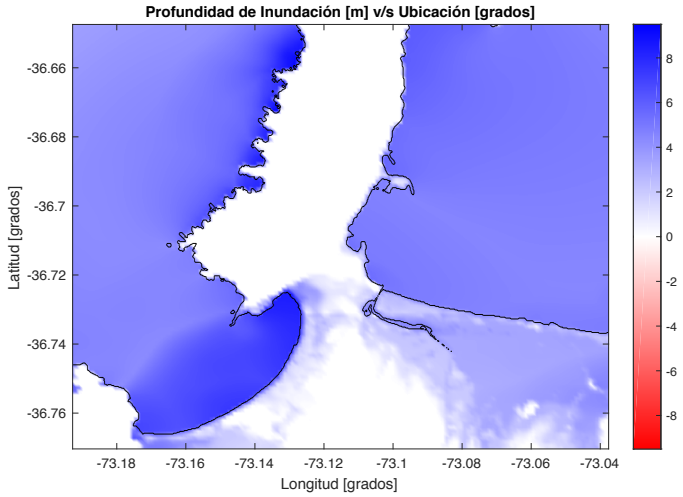
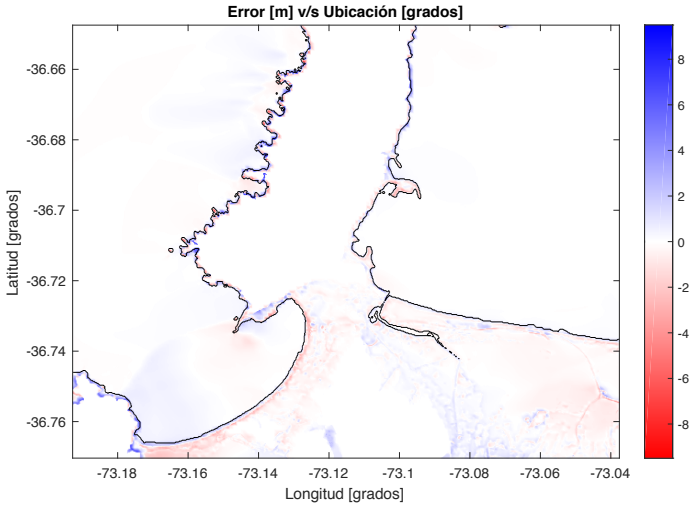


Figura 9.8 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

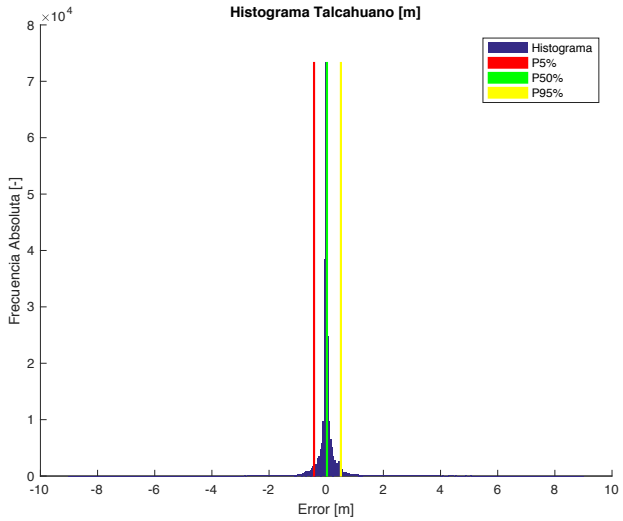


Figura 9.9 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P8-3 en la ciudad de Talcahuano

B.4. Resultados Configuración P82-3

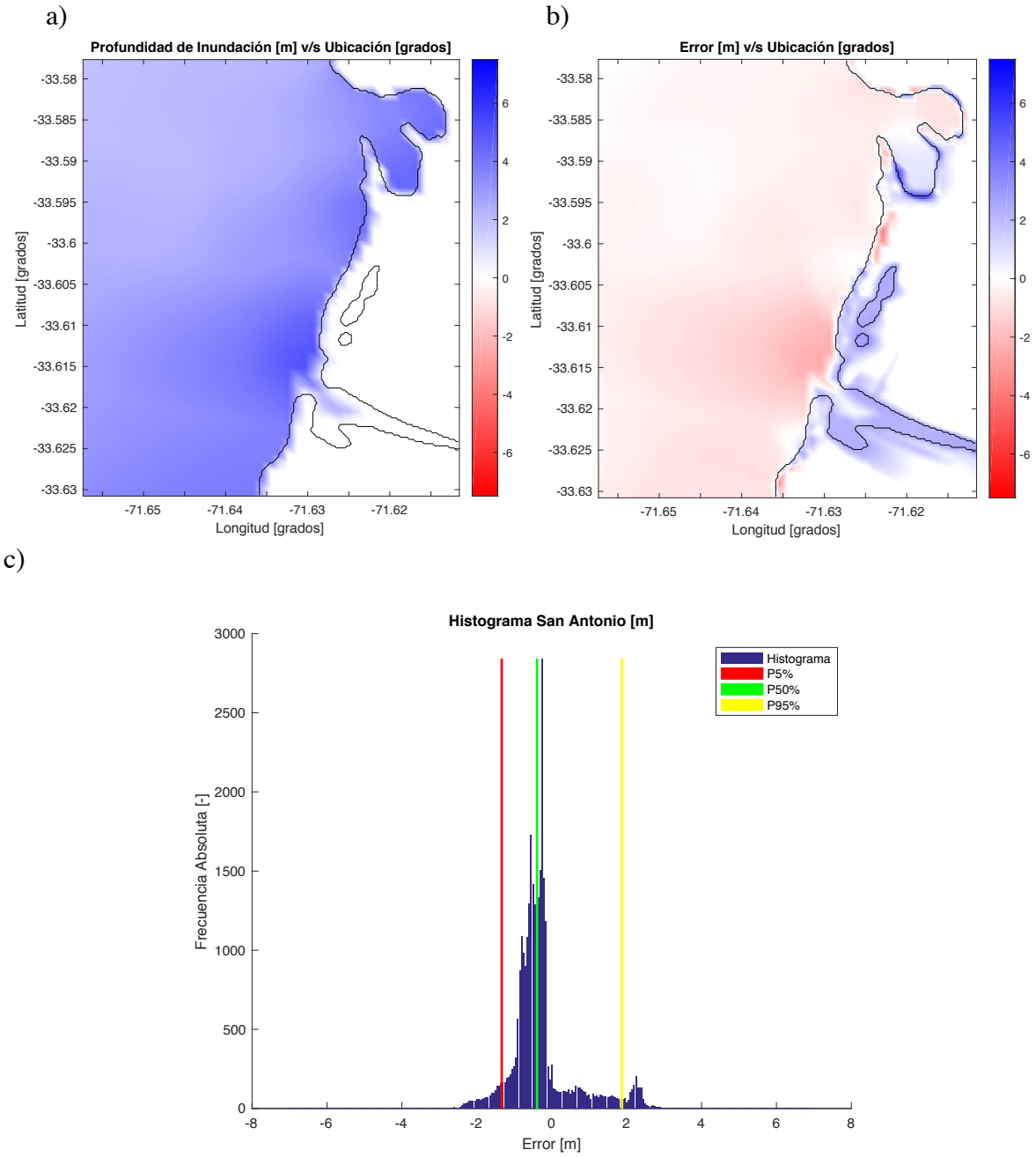
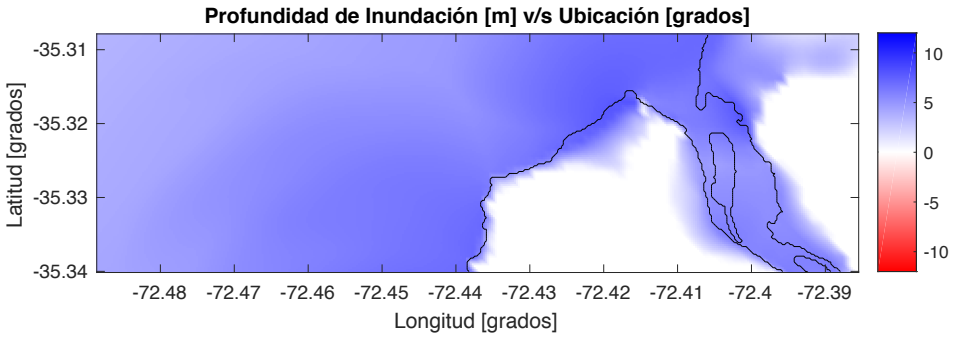
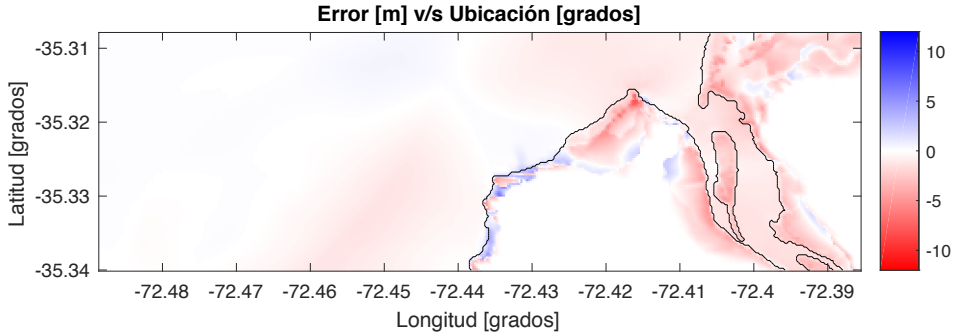


Figura 9.10 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

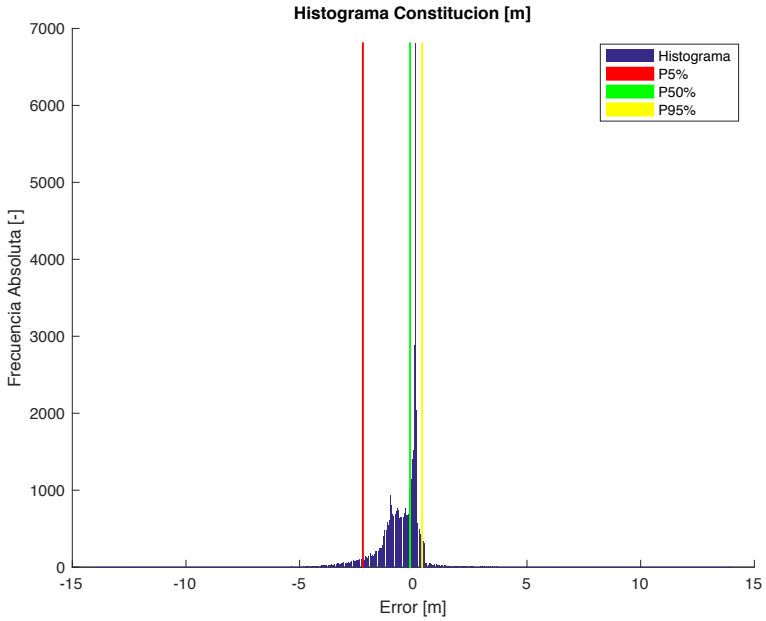
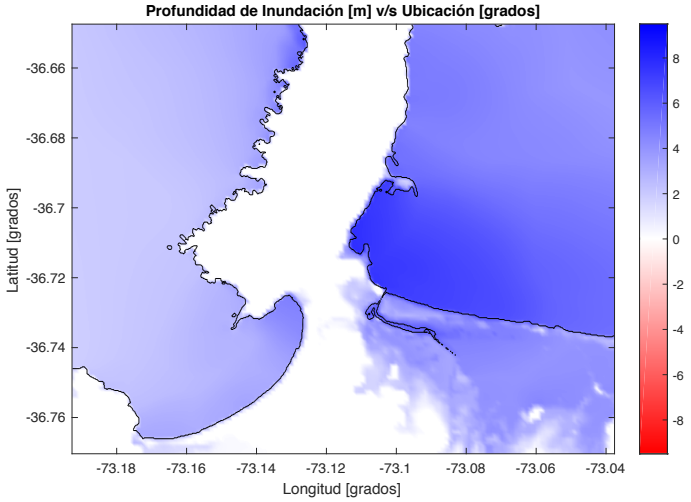
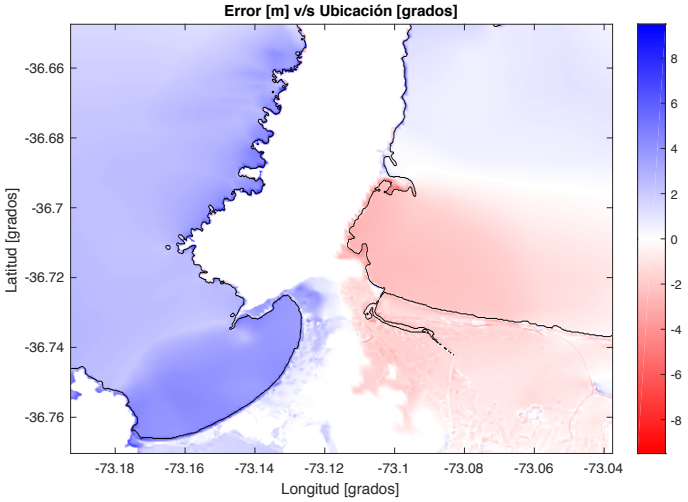


Figura 9.11 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

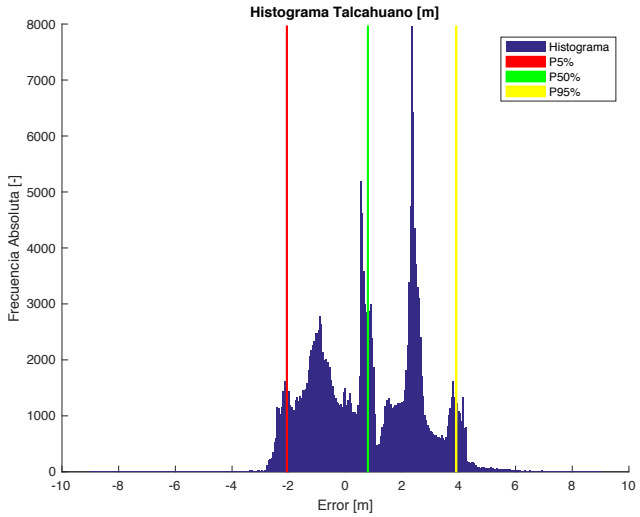


Figura 9.12 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P82-3 en la ciudad de Talcahuano

B.5. Resultados Configuración P84-3

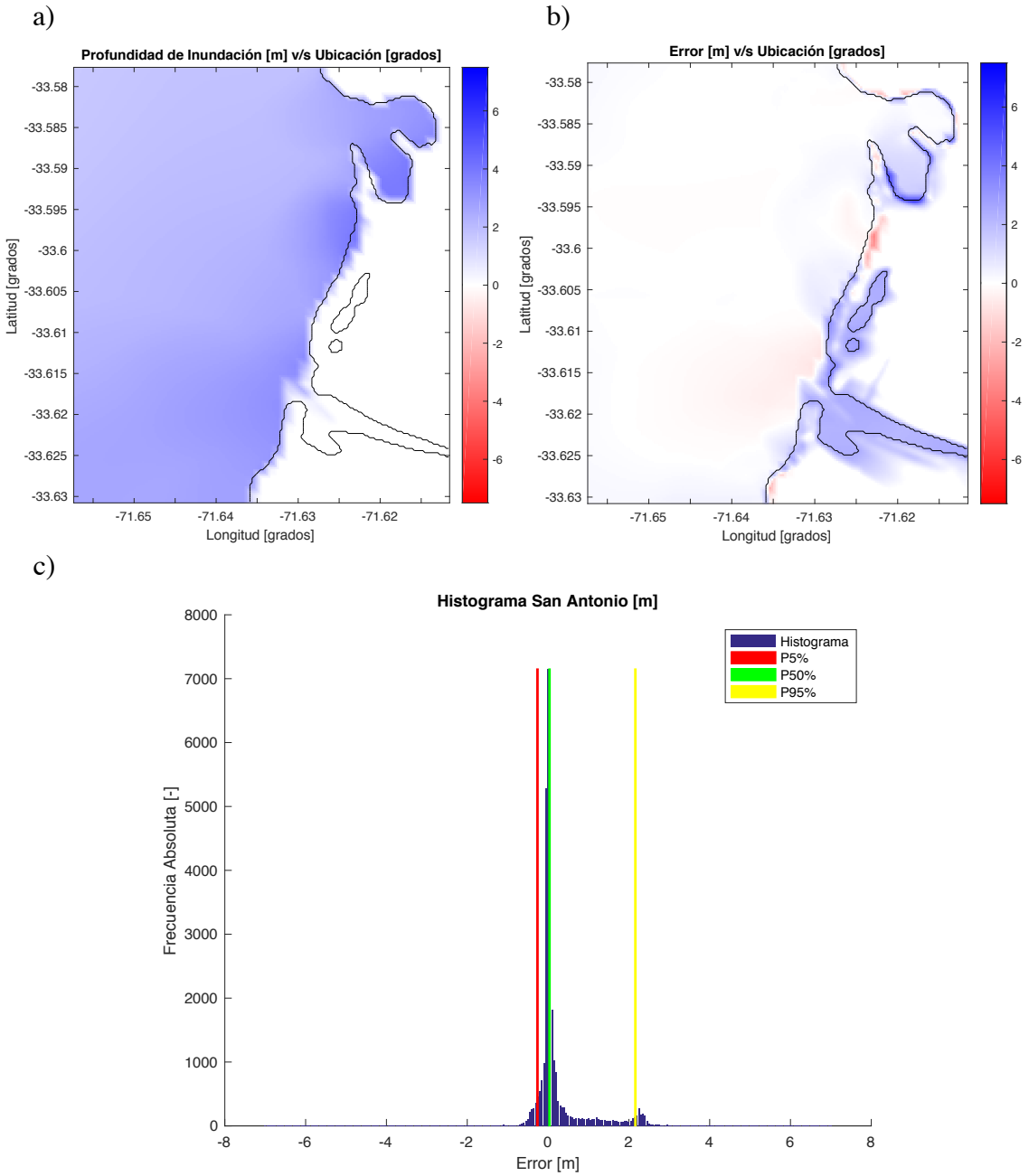
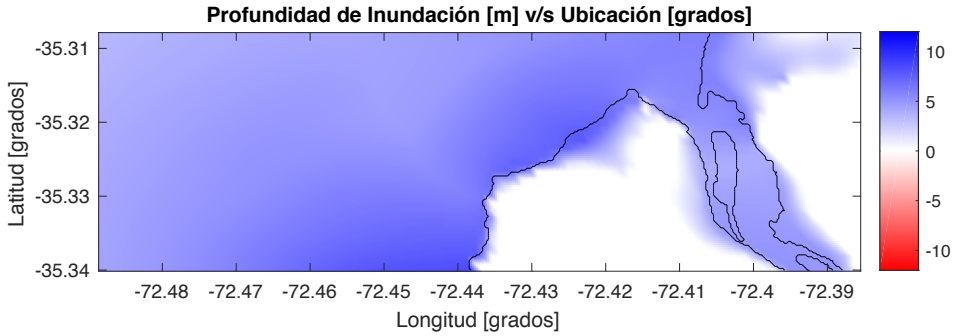
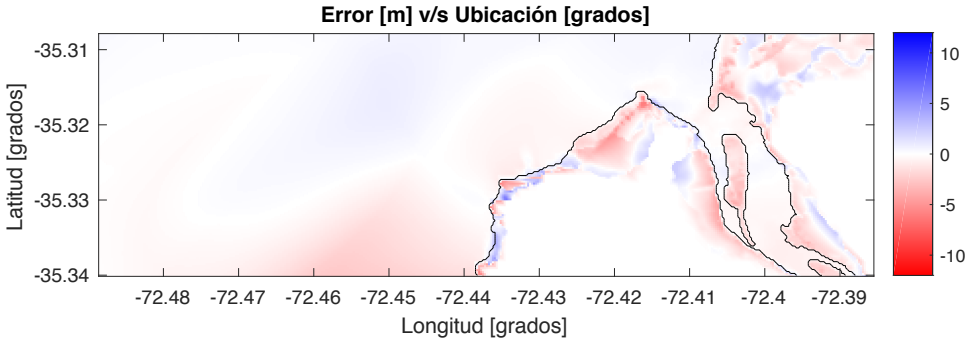


Figura 9.13 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

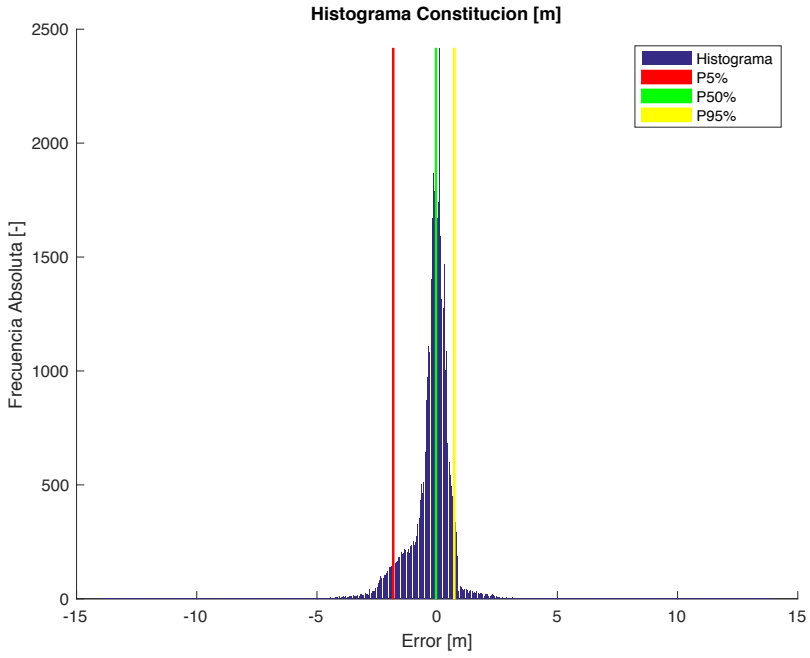
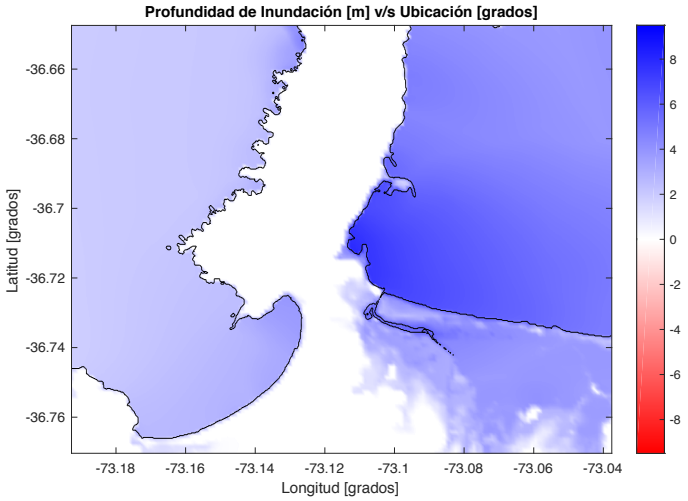
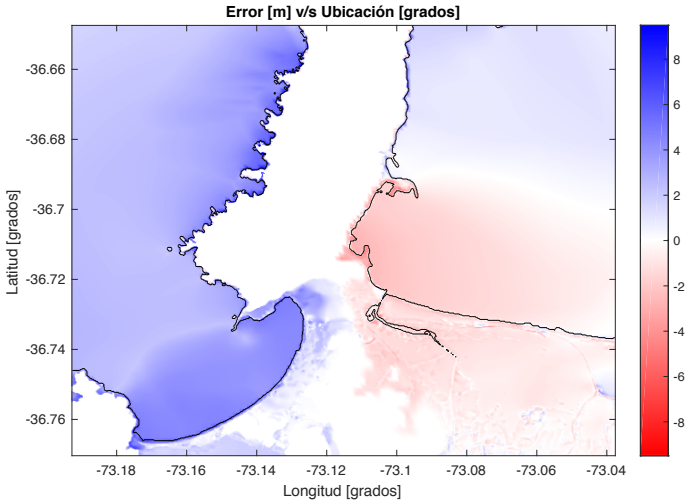


Figura 9.14 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

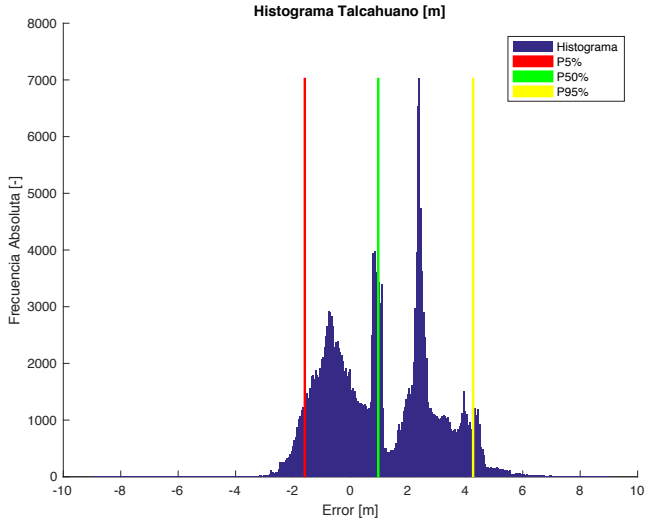
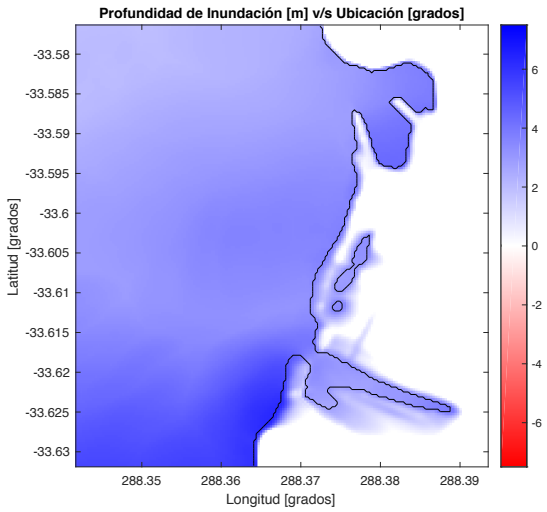


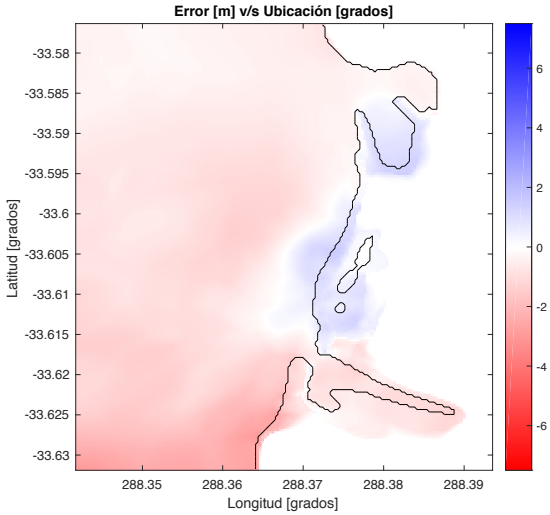
Figura 9.15 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error de la configuración P84-3 en la ciudad de Talcahuano

B.6. Resultados NearTIF

a)



b)



c)

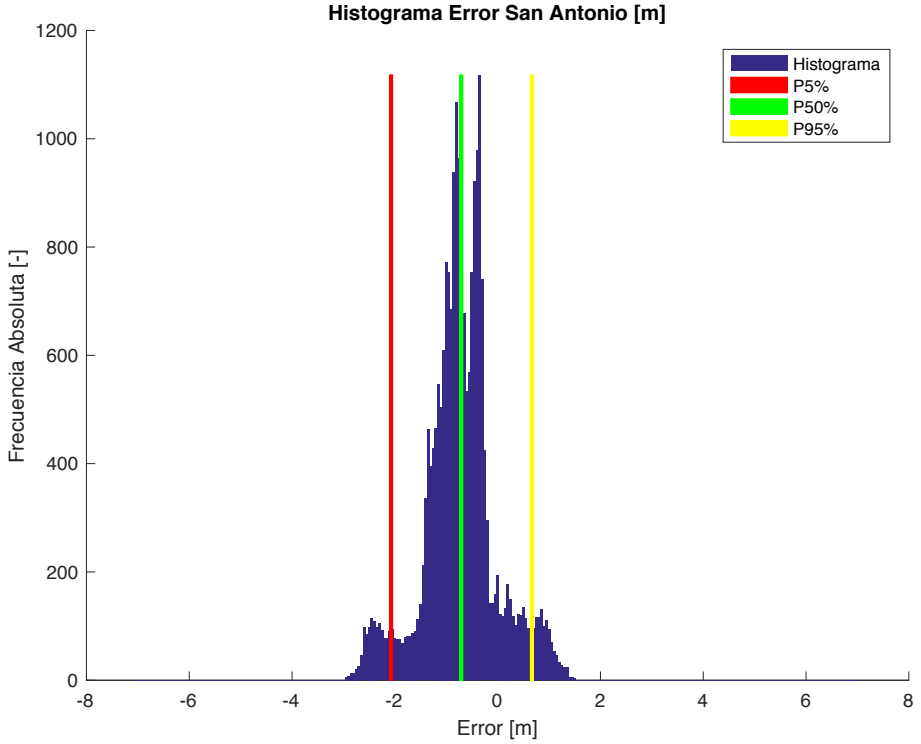
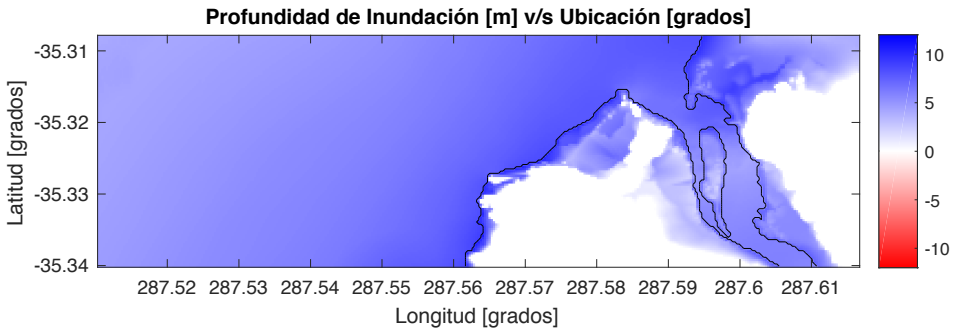
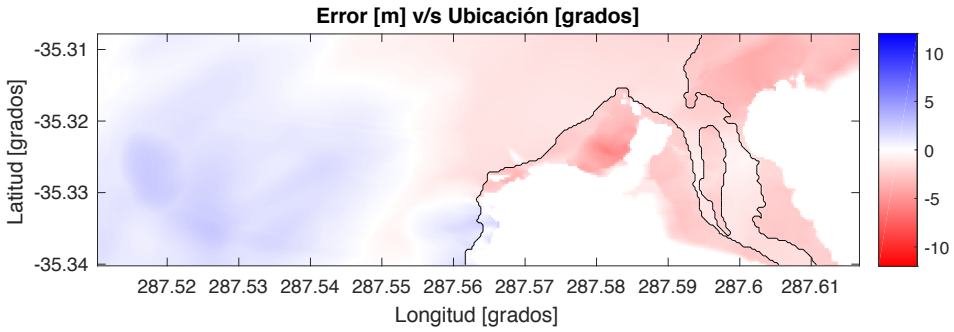


Figura 9.16 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de San Antonio

a)



b)



c)

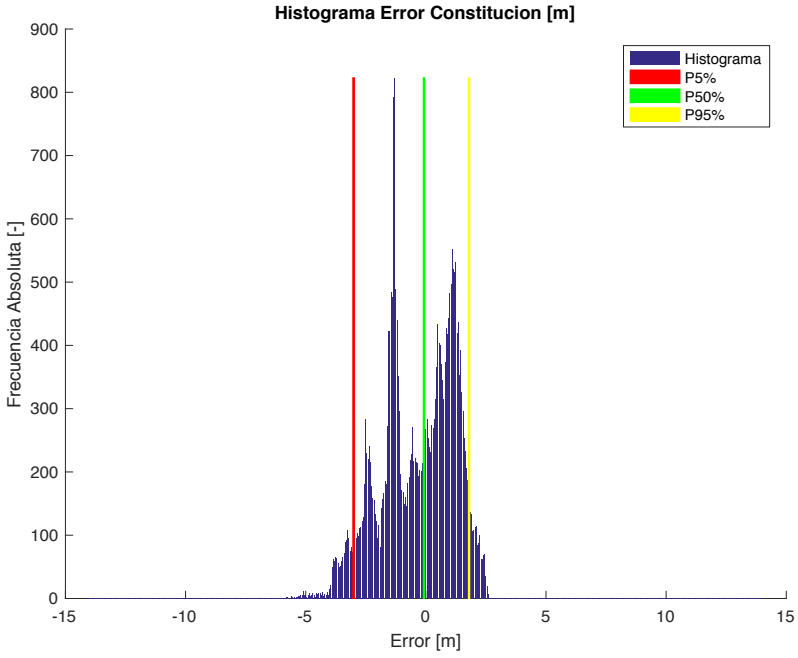
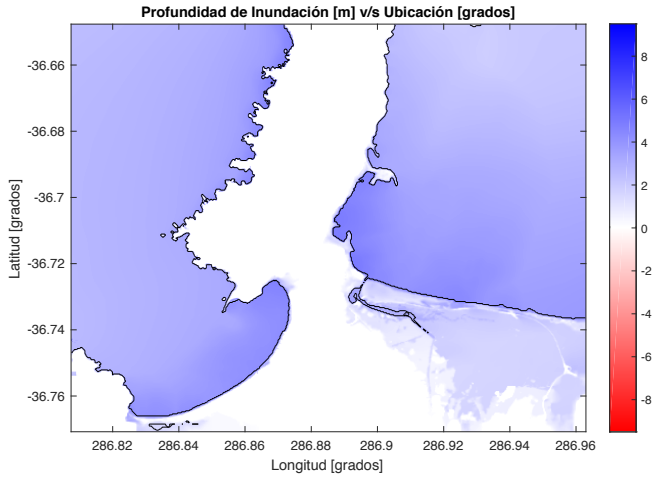
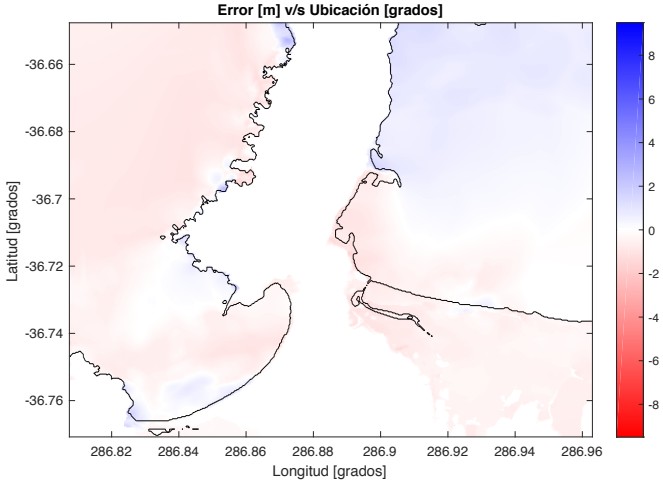


Figura 9.17 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de Constitución

a)



b)



c)

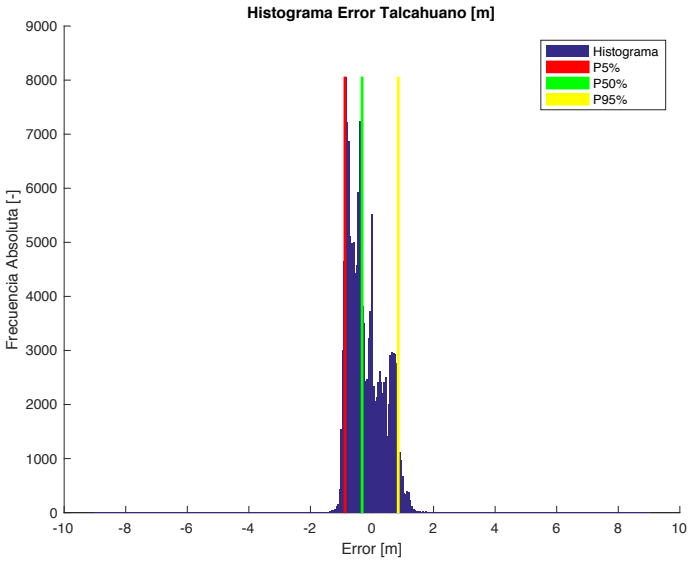


Figura 9.18 (a) Profundidad de Inundación, (b) Error, (c) Histograma del Error del pronóstico NearTIF para la ciudad de Talcahuano

ANEXO C

Distribución de resoluciones topobátimétricas

C.1. Topobatimetrías y niveles utilizados en la investigación

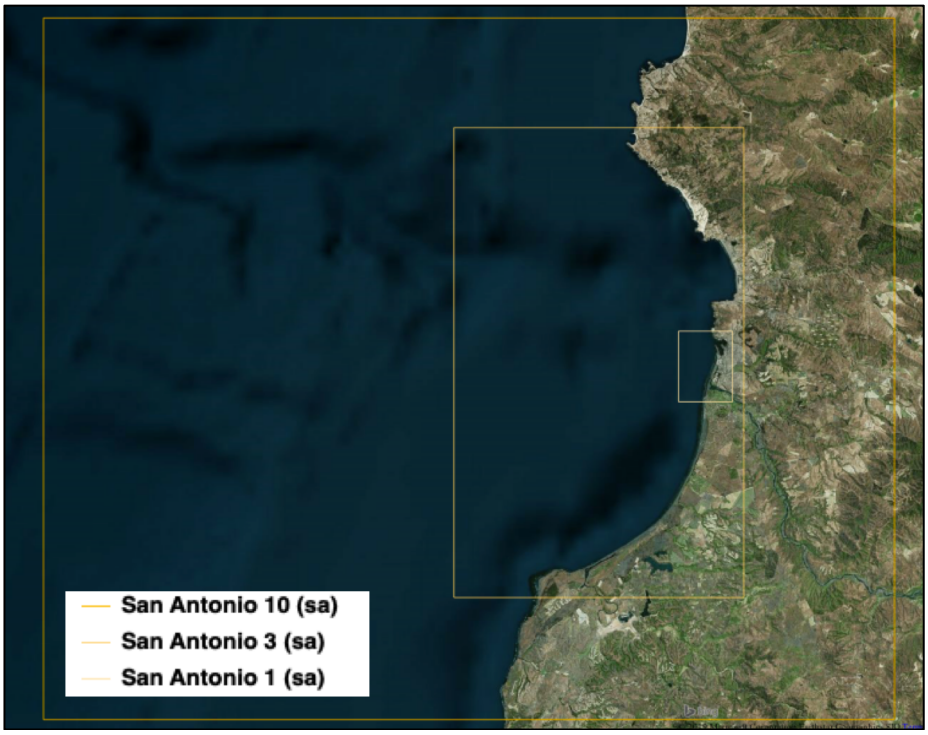


Figura 9.19 Topobatimetrías y su distribución para San Antonio

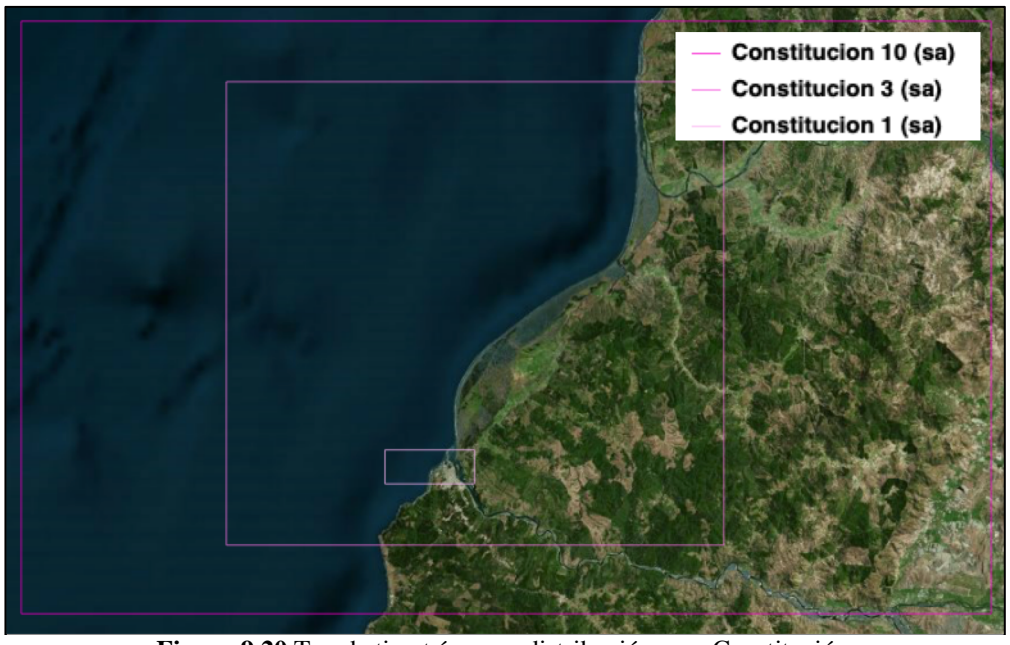


Figura 9.20 Topobatimetrías y su distribución para Constitución

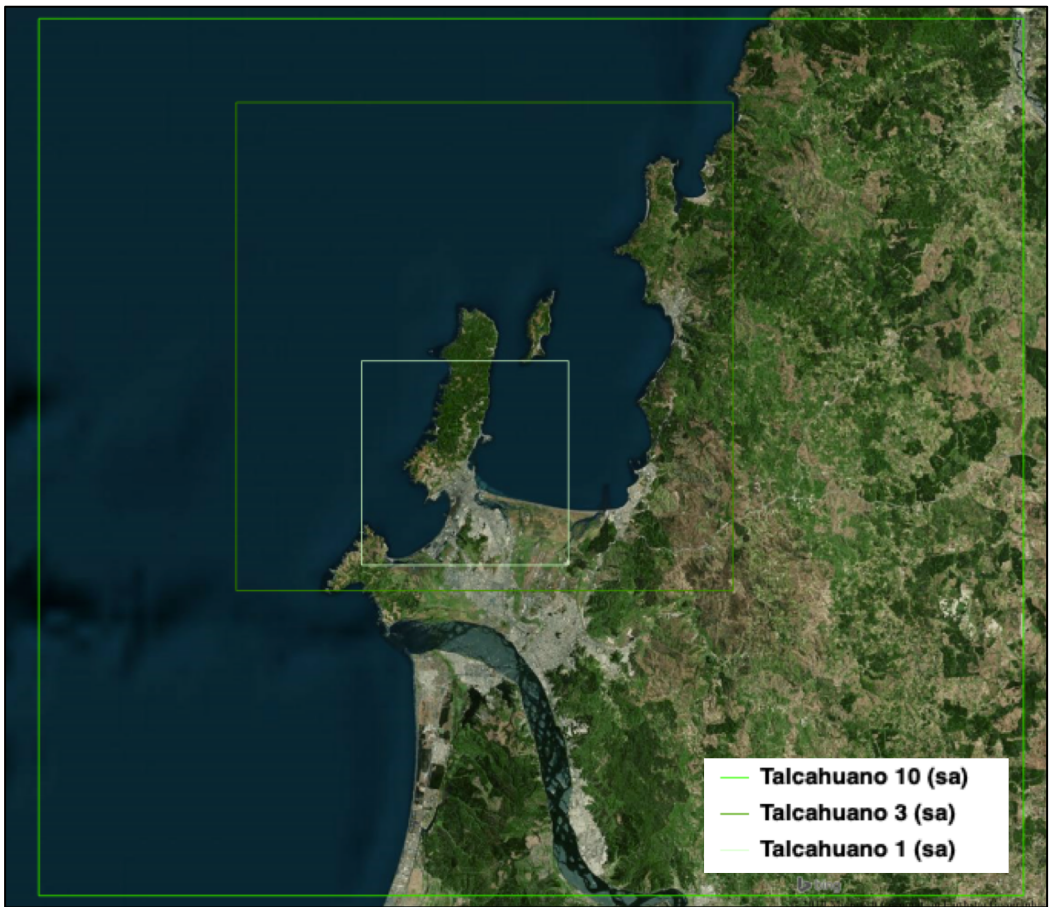


Figura 9.21 Topobatimetrías y su distribución para Talcahuano

ANEXO D

Líneas de máxima intrusión horizontal

D.1. Máxima intrusión horizontal modelos de San Antonio

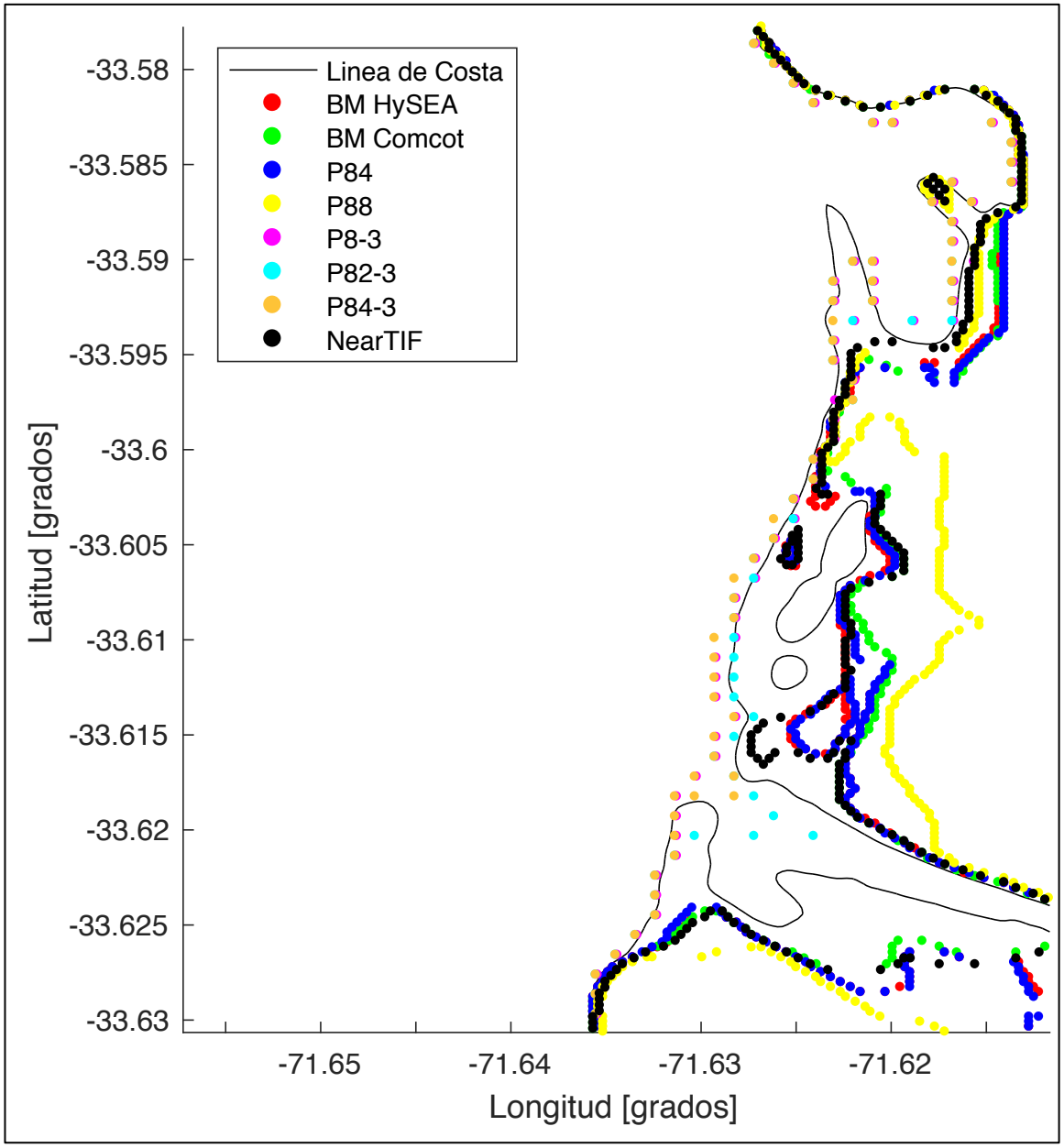


Figura 9.22 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de San Antonio

D.2. Máxima intrusión horizontal modelos de Constitución

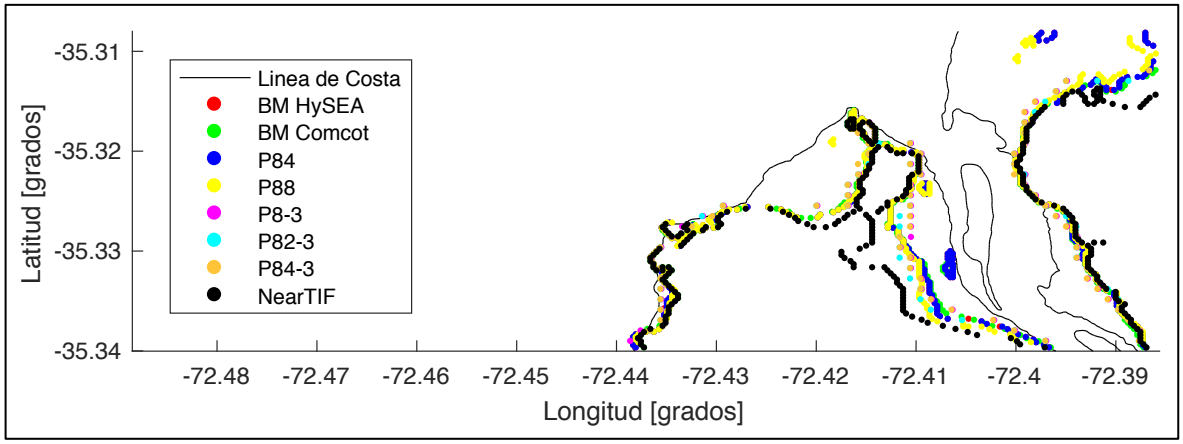


Figura 9.23 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Constitución

D.3. Máxima intrusión horizontal modelos de Talcahuano

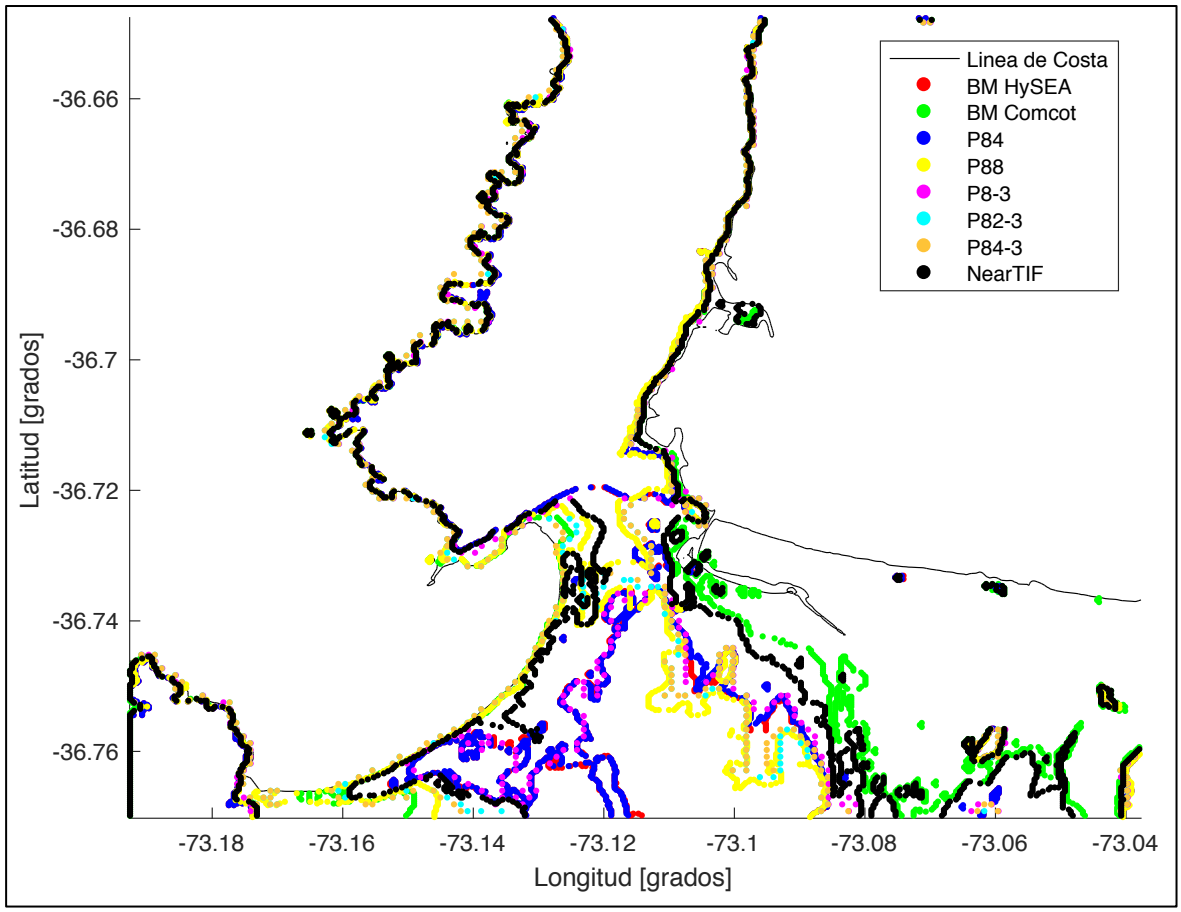


Figura 9.24 Líneas de máxima intrusión horizontal de configuraciones y corridas base de Talcahuano