



PUB. SHOA 3204 INSTRUCCIONES OCEANOGRÁFICAS N°4

Especificaciones Técnicas para la Elaboración
de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU)

1ª. EDICIÓN, 2015

I. INTRODUCCIÓN.....	4
II. DEFINICIÓN DE UNA CITSU	5
III. CONTENIDO MÍNIMO DE UNA CITSU.....	5
IV. FUENTES DE INFORMACIÓN	6
4.1 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA.....	6
4.2 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA.....	7
4.3 INFORMACIÓN PLANIMÉTRICA.....	7
V. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MODELACIÓN NUMÉRICA.....	8
5.1 INFORMACIÓN HISTÓRICA DE SISMOS Y TSUNAMIS	8
5.2 PARÁMETROS DE LA FUENTE	9
5.2.1 Fuente generadora por sismos de subducción	9
5.2.2 Otras fuentes generadoras	13
5.3 CONTROL DE CALIDAD Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS DATOS TOPOBATIMÉTRICOS	14
5.4 MODELO NUMÉRICO	15
5.5 DEFINICIÓN DE GRILLAS.....	16
5.6 DURACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y TIEMPO DE INTEGRACIÓN	17
5.7 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD	18
5.8 SALIDAS DEL MODELO NUMÉRICO	19
5.9 VALIDACIÓN DE LA MODELACIÓN	20
VI. ELABORACIÓN CARTOGRÁFICA.....	21
6.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	21
6.2 COMPILACIÓN Y GENERACIÓN DE LA BASE CARTOGRÁFICA	21
6.3 ADMINISTRACIÓN DE LAS COBERTURAS DE INFORMACIÓN	21

6.4	GENERACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN.....	22
6.4.1	<i>Conversión del resultado de la modelación a una capa de información.....</i>	22
6.4.2	<i>Determinación de los niveles de profundidad de inundación.....</i>	22
6.4.3	<i>Edición manual de la inundación</i>	22
6.5	GENERACIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE	23
6.6	ELABORACIÓN DEL PRODUCTO CARTOGRÁFICO FINAL.....	23
6.7	FORMATOS DE SALIDA DE LA CITSU	23
VII.	INFORME FINAL	24
7.1	CONTENIDO BÁSICO.....	24
7.2	FORMATO FINAL	25
VIII.	GLOSARIO.....	26
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	29
	ANEXO "A" EJEMPLO DE MEMORIA EXPLICATIVA	30
	ANEXO "B" GENERACIÓN PRELIMINAR DE LA INUNDACIÓN	31
	ANEXO "C" DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	32
	ANEXO "D" POLIGONIZACIÓN DE LOS NIVELES DE PROFUNDIDAD Y SUPERPOSICIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN	33
	ANEXO "E" RESULTADO FINAL EN NIVELES DE PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN	34
	ANEXO "F" APLICACIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE (HILLSHADE)	35
	ANEXO "G" PRODUCTO CARTOGRÁFICO FINAL EN FORMATO PDF.....	36
	ANEXO "H" PRODUCTO CARTOGRÁFICO FINAL EN FORMATO KMZ.....	37
	ANEXO "I" PRODUCTO CARTOGRÁFICO FINAL EN FORMATO VÍNCULO DE WEB	38

1ª edición, 2015 (sólo en formato PDF)

© SHOA, 2015.

Publicado por el
Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. 2015.
Errázuriz 254, Playa Ancha, Valparaíso.
Teléfono: 56-32-2266666. Fax: 56-32-2266542.
Correo electrónico: shoa@shoa.cl
<http://www.shoa.cl>

Pub. SHOA 3204. Instrucciones Oceanográficas N°4.

"Especificaciones Técnicas para la Elaboración de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU)

I. INTRODUCCIÓN

Chile es considerado uno de los países sísmicos más activos del mundo, debido a su localización geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo cual está sujeto a la interacción directa de la tectónica de placas. Gran parte del territorio continental chileno yace sobre la zona de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. La convergencia entre ambas placas a lo largo del plano de subducción, da lugar al acumulamiento de energía potencial elástica, la cual es parcialmente absorbida mediante el súbito deslizamiento de una placa sobre la otra, produciendo actividad sísmica y como resultado, la eventual generación de terremotos y tsunamis. Estudios recientes, indican que los procesos geodinámicos que intervienen y controlan la ocurrencia de grandes terremotos y tsunamis en Chile, confirman que el país está constantemente expuesto a este tipo de eventos.

El 22 de mayo de 1960, la ciudad de Valdivia fue escenario del terremoto más grande del cual se tenga registro en la historia, siendo éste de una magnitud 9,5 (Mw), luego del cual se produjo un tsunami que se propagó por todo el Océano Pacífico afectando entre otras zonas del sur de Chile, a Hawaii y Japón. A raíz de esta situación, el Estado de Chile creó una institucionalidad para abordar la problemática de tsunami con el propósito de manejar y controlar la emergencia y poder mitigar sus efectos. Es así como mediante Decreto Supremo N°26 de 1966, se creó el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) y su organización, dirección y control fue entregada al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y designándose a esta entidad como representante de Chile ante el Grupo de Coordinación Intergubernamental del Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico (ICG/PTWS). Dentro de este contexto, en el año 1995, el mencionado Servicio participó en el Proyecto TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange), iniciativa en la cual la comunidad científica internacional inserta dentro de este grupo, colocó a disposición de los Estados Miembros, asistencia técnica y códigos numéricos para realizar simulación con el objeto de desarrollar la investigación y elaborar Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU).

Considerando la experiencia adquirida a través de los años de elaboración de CITSU luego del término del proyecto, el SHOA resolvió emitir y publicar las especificaciones técnicas mínimas que se deberán cumplir en la elaboración de estas Cartas.

Este producto cartográfico permitirá entregar los antecedentes necesarios para optimizar la administración del borde costero, en materias tales como otorgamiento de concesiones marítimas, ordenamiento territorial y definición de usos y actividades que se desarrollan en el litoral, además de ser una herramienta fundamental en la elaboración de los planes de protección civil y en la aplicación de medidas de mitigación ante tsunamis.

II. DEFINICIÓN DE UNA CITSU

Las CITSU que elabora el SHOA, son la representación cartográfica de los diferentes niveles de inundación máxima producidos por un evento de tsunami, obtenido de una modelación numérica proveniente de un evento sísmico extremo conocido o bien de un evento extremo probable validado.

III. CONTENIDO MÍNIMO DE UNA CITSU

La carta CITSU deberá contener a lo menos la siguiente información:

- a) Curvas de nivel separadas a una altura equivalente a la milésima de la escala del plano. Para el ploteo en papel, el intervalo de las curvas de nivel será aquél que no sature el área.
- b) Línea de la costa, con delineamiento completo de obras artificiales, tales como: muelles, molos, malecones, entre otros.
- c) Identificación de avenidas y calles principales, caminos pavimentados, caminos de tierra, huellas y senderos. Éstos deben estar actualizados con los nombres pertinentes, a la fecha de la publicación de la carta.
- d) Selección de rótulos y nombres geográficos de acuerdo a la cartografía vigente del SHOA e Instituto Geográfico Militar (IGM).
- e) Grilla de coordenadas geográficas.
- f) Modelos de superficie presentados en sombreado para representar relieves.
- g) Área de inundación representada con los niveles máximos de profundidad de inundación expresados en metros. Considerar al menos 5 niveles en una escala de color en degradado:

Profundidad de la inundación en metros:

	0 a 1 m
	1 a 2 m
	2 a 4 m
	4 a 6 m
	6 y más

- h) Viñeta con el nombre de la carta, identificación del ejecutor, fecha de elaboración, escala gráfica, sistema de referencia y cuadro de simbología.
- i) Memoria explicativa, la cual debe entregar un resumen de los antecedentes considerados en la elaboración de la CITSU. La Memoria deberá contener al menos los siguientes puntos (ver Ejemplo en Anexo "A"):
 - Introducción, en la cual se describa el contexto en el cual se elabora la CITSU.
 - Antecedentes sísmicos y de tsunamis históricos, del área de estudio.
 - Antecedentes sobre los parámetros utilizados en la modelación numérica y de base para la CITSU.
 - Referencias.
 - alguna conclusión relevante sobre el contenido de la CITSU.

IV. FUENTES DE INFORMACIÓN

Uno de los aspectos fundamentales para el modelado de tsunamis lo constituye la información topobatimétrica disponible, ya que determina la configuración y dominio geográfico sobre el cual se propaga el evento de tsunami. Por lo cual, los principales insumos para la elaboración de una carta, corresponden a los antecedentes batimétricos y topográficos de la zona de estudio, los que alimentarán el modelo de simulación numérica.

Posteriormente, la información topográfica y planimétrica será utilizada en el proceso de edición cartográfica final de la carta.

Las fuentes de información para la elaboración de las CITSU, deben provenir de organismos e instituciones que generen cartografía de carácter oficial y que cuenten con los estándares nacionales e internacionales pertinentes. La información contenida en una CITSU es la siguiente:

4.1 Información batimétrica

- Cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

- Base de datos global General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) de la Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) de UNESCO y la International Hydrographic Organization (IHO).
- Base de datos global ETOPO1 del National Geophysical Data Center (NGDC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos.
- Estudios batimétricos específicos, que cuenten con la cobertura espacial suficiente para poder caracterizar adecuadamente fenómenos locales en toda la zona de interés.

4.2 Información topográfica

- Cartografía del Instituto Geográfico Militar.
- Planos de Borde costero aprobados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, según Pub. SHOA N°3110.
- Imágenes aéreas, satelitales, modelos de elevación y planos fotogramétricos del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF).
- Base de datos global General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) de la Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) de UNESCO y la International Hydrographic Organization (IHO).
- Base de datos global ETOPO1 del National Geophysical Data Center (NGDC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos.
- Base de datos global ASTER GDEM de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de Estados Unidos y el Ministerio de Economía, comercio e Industria (METI) de Japón.
- Estudios topográficos específicos, que cuenten con la cobertura espacial suficiente para poder caracterizar adecuadamente toda la zona de interés.

4.3 Información Planimétrica

- Planimetría urbana contenida en Planes Reguladores Comunes, de los Municipios.
- Planes Reguladores Intercomunales del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU).
- Cartografía regional de la red vial del Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- Estudios planimétricos que cuenten con información urbana validada.

V. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MODELACIÓN NUMÉRICA

Las CITSU que elabora el SHOA, representan el potencial de inundación por tsunami bajo el concepto de "amenaza de tsunami máxima estimada", lo que está sujeto a la premisa de que el objetivo principal del estudio es salvaguardar la vida humana.

Para efectos de esta metodología, la amenaza máxima de un tsunami estimada es aquella que determina el peligro máximo asociado a eventos de tsunami en una localidad en estudio. Ésta será determinada teniendo en cuenta el conocimiento existente, considerando aspectos científicos, hidrodinámicos, sísmicos, históricos, y otros.

La metodología supone un esquema jerárquico de la determinación del peligro asociado a tsunamis, en la cual se considera en primer lugar un análisis a escala regional y luego un análisis a escala local. El primero de ellos, tiene por objetivo la determinación de la ocurrencia de tsunamis a nivel general para una región, mientras que el análisis a escala local tiene como objetivo determinar la ocurrencia de otras fuentes tsunamigénicas registradas que sean relevantes a una escala local (del orden de la centena de kilómetros) de la zona de interés.

El resultado de este análisis regional y local deberá arrojar un listado comprehensivo de las posibles fuentes tsunamigénicas para la zona en estudio, el cual puede arrojar como resultado no sólo fuentes asociadas a terremotos de subducción. De estos eventos se debe seleccionar el que presente la mayor amenaza de tsunami en términos de inundación a nivel local y nunca a nivel regional, por lo que se deben evaluar todas las posibilidades de eventos, particularmente para los sismos de subducción y las diferentes posibilidades de áreas de ruptura.

5.1 Información histórica de Sismos y Tsunamis

La primera fuente de información referencial la constituyen los registros históricos, tanto de ocurrencia de sismos como de registros de los posibles tsunamis asociados. Si bien la premisa fundamental es que la ocurrencia histórica de un evento de cierta magnitud significa que un evento de magnitud similar podrá ocurrir en el futuro, esto no significa que sea ese el evento máximo posible que pueda generarse en dicha región.

Luego, la información histórica debe ser considerada como base y referencial, por lo que además, se recomienda considerar todos los nuevos antecedentes científicos existentes de la zona de estudio, que den cuenta de la existencia de una alta probabilidad de que ocurra un evento extremo, que genere una mayor amenaza de tsunami que la informada en los registros históricos de base.

Existe una variedad de fuentes de consulta, los cuales poseen distintos grados de información:

- Base de datos de tsunami del National Geophysical Data Center dependiente de la National Oceanic and Atmospheric Administration de Estados Unidos (NGDC y NOAA).
- Base de datos globales de sismos del United States Geological Service, National Earthquake Information Center (USGS - NEIC).
- Base de datos de sismos del Centro Sismológico Nacional (CSN).
- Tsunamis in Peru-Chile (Lockridge, 1985).
- Catalog of Tsunamis in the Pacific (Soloviev *et al.*, 1992)
- Registro Histórico de Tsunamis del SHOA.

5.2 Parámetros de la fuente

Los tsunamis se pueden originar cada vez que ocurre un desplazamiento repentino de una gran masa de agua debido a diferentes fuentes generadoras. Entre éstas fuentes, se encuentran varios tipos de terremotos, los deslizamientos de masa submarinos y subaéreos, los impactos de meteoritos y las erupciones volcánicas.

Para la elaboración de una Carta de Inundación utilizando modelación numérica, el paso más relevante es la adecuada caracterización de la fuente tsunamigénica y la deformación inicial de la superficie libre del cuerpo de agua. Para efectuar esta determinación se debe analizar las posibles de áreas de ruptura que produzcan la mayor inundación a nivel local, por lo que se deben analizar tanto eventos históricos, como probables. Esta evaluación inicial debe ser realizada específicamente para la zona de estudio y en términos de área y profundidad de inundación.

5.2.1 Fuente generadora por sismos de subducción

Los tsunamis generados por sismos de subducción, se producen a partir de la deformación de la superficie del océano producto de la transmisión de energía debido a la deformación cosísmica de la corteza terrestre. Esto se puede considerar como la traslación de un volumen de fluido. Por consiguiente, la magnitud del tsunami propiamente tal dependerá de las características geométricas de la ruptura, específicamente, la magnitud del deslizamiento vertical y de la cobertura espacial de océano afectado por éste. Por consiguiente, para que un sismo tenga potencial tsunamigénico, parte de su zona de ruptura debe quedar bajo la superficie del océano, y debe presentar un deslizamiento vertical suficiente.

Por lo tanto, el primer paso es determinar la deformación cosísmica asociada a un evento de un determinado momento sísmico M_o , el cual queda definido por:

$$M_o = \mu DA \quad (1)$$

Donde:

μ es la magnitud del módulo de corte de la corteza terrestre.

D es el deslizamiento medio sobre el área de ruptura A

Por otra parte, la escala de magnitud de momento M_w queda definida por:

$$M_w = 2/3 \log(M_o) - \alpha \quad (2)$$

Donde:

α es una constante que toma el valor 6 cuando M_o está en [N-m] ó $\alpha = 10,7$ para M_o está en [dina-cm].

Múltiples combinaciones de estos tres parámetros pueden conducir a un mismo momento sísmico. Desde el punto de vista tsunamigénico, son los parámetros D y A los que tendrán relación directa con el tamaño del tsunami.

No obstante lo anterior, es importante considerar el efecto que tendrá la ubicación espacial de la zona de ruptura del terremoto, ya que sismos de subducción de igual magnitud y deslizamiento pueden producir tsunamis significativamente distintos dependiendo de la profundidad del foco.

Un primer caso lo constituye un terremoto costero en el cual la ruptura es relativamente profunda y sólo una fracción de la zona de ruptura queda bajo el océano (Figura 1.a). En estos casos, parte de la subsidencia ocurre en tierra, mientras que la fracción de la ruptura bajo el océano ocurre en aguas relativamente someras. Adicionalmente, la gran profundidad de la ruptura induce una reducción en la amplitud del desplazamiento del fondo marino. Luego, una masa de agua relativamente pequeña es puesta en movimiento y el tsunami correspondiente es pequeño en comparación con la magnitud del terremoto.

Una segunda alternativa la constituyen los terremotos en la plataforma continental, en la cual la ruptura ocurre a profundidades intermedias (Figura 1.b). La zona de ruptura prácticamente completa se puede ubicar bajo el mar. En este caso, todo el deslizamiento vertical se transmite a la columna de agua. Por otra parte, el volumen de agua desplazado es moderado, resultando en un tsunami de mayor tamaño que el caso anterior.

La tercera alternativa la corresponden terremotos de foco poco profundo, en los cuales gran parte de la ruptura ocurre en aguas profundas en las cercanías a la fosa (Figura 1.c). En dicho caso, un gran volumen de agua es desplazado y en la medida que el tsunami se propaga hacia aguas poco profundas, el asomeramiento induce amplitudes de tsunami mucho más grandes que en los dos casos anteriores.

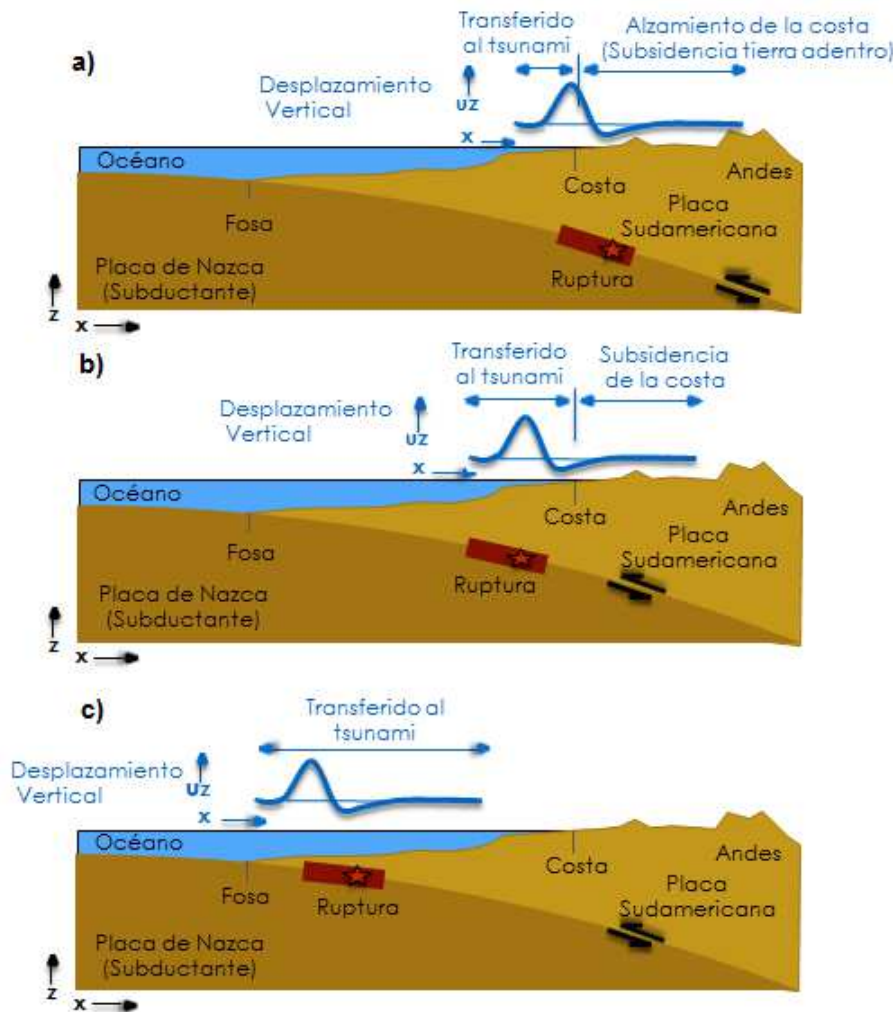


Figura 1. Representación de las diferencias en el efecto del tsunami producto de la ubicación espacial del terremoto, suponiendo eventos de igual magnitud. a) terremoto de ruptura a gran profundidad, b) terremoto de ruptura de profundidades intermedias, bajo plataforma continental, c) terremotos de ruptura poco profunda.

Evidentemente, terremotos de gran magnitud pueden cubrir las tres posibilidades anteriores de manera simultánea, dando como resultado tsunamis muy destructivos. Por otra parte, en términos de la determinación del desplazamiento vertical o parámetro D , para el modelamiento de tsunamis se puede considerar:

- Un deslizamiento D medio sobre el área en estudio A , lo que resulta en una distribución uniforme del mismo, conocido como una dislocación Volterra o distribución plana uniforme.
- Una distribución de deslizamiento bidimensional $D(x,y)$, donde x se mide a lo largo de la dirección de manto, e y a lo largo de la dirección del rumbo de la falla. Esto corresponde a una deformación Somigliana o distribución de falla no uniforme.

La definición del área de ruptura y su ubicación espacial juegan un rol importante en las características del tsunami. Para su estimación, la zona de ruptura se aproxima típicamente a un rectángulo de largo L (en dirección del rumbo de falla) y de ancho W (en la dirección de manto). La estimación de L y W se realiza mediante uso de las leyes de escalamiento sísmico, en las cuales L se determina a través de formulaciones empíricas que la relacionan con la magnitud M_w . Sin embargo, la determinación del ancho queda sujeta a restricciones físicas y geológicas de la zona posible de ruptura.

En el caso de Chile, eventos de gran magnitud presentan relaciones de aspecto que varían entre $L:W = 1:3$ hasta $1:5$.

De esta manera, la caracterización del evento sísmico queda definida por los siguientes parámetros principales:

- Ubicación hipocentral: latitud, longitud y profundidad.
- Módulo de corte μ .
- Deslizamiento medio D o distribución de deslizamiento $D(x,y)$
- Superficie de ruptura ($L \times W$)
- Ángulos de la zona de ruptura: manto/buzamiento (δ), rumbo (ϕ), ángulo de deslizamiento (λ).

Una vez determinada la geometría, ubicación y características del deslizamiento, se establece la deformación cosísmica del fondo marino inducida por el terremoto, la cual se puede realizar mediante las soluciones analíticas de la teoría de dislocación elástica, por ejemplo, Mansinha and Smylie (1971) y Okada (1985). Existen métodos alternativos que consideran el uso de modelos tridimensionales de elementos finitos elásticos (Yoshioka *et al.*, 1995), o bien el uso de modelos de agrietamiento, en los cuales el deslizamiento se determina a partir de distribuciones de las variaciones de esfuerzo inducidas por el terremoto.

Finalmente y dadas las diferencias en la velocidad de propagación de la ruptura sísmica con respecto a la velocidad de propagación del tsunami, se asume que la deformación cosísmica ocurre en forma instantánea. Adicionalmente, se asume que la deformación del fondo marino se transmite directamente a la superficie del mar, no considerando efectos de compresibilidad u otros. Con ello, con la determinación de la deformación cosísmica del fondo marino se define la deformación inicial de la superficie libre del océano, la cual induce la propagación del tsunami desde la zona de generación.

5.2.2 Otras fuentes generadoras

Los tsunamis producidos por fuentes diferentes a los sismos de subducción, dependerán de los parámetros particulares del tipo de fuente que lo generó. Por lo tanto para la elaboración de una Carta de Inundación con este tipo de fuentes, se deberán considerar los parámetros específicos que definan la condición inicial del modelo a utilizar, de tal forma de representar la transmisión de energía y deformación de la superficie del cuerpo de agua en estudio (océano, fiordos y lagos).

Los tsunamis originados por ejemplo por deslizamientos, tienen una dinámica de generación bastante diferente a los generados por desplazamientos cosísmicos, por lo que su estudio dependerá de diferentes factores, dentro de los cuales los más importantes tienen que ver con la extensión vertical del movimiento del centro de masa del volumen que se desliza, la profundidad del agua en el punto de generación y de la posterior zona de propagación. Es importante destacar que para que se origine un tsunami por un deslizamiento, debe existir algún fenómeno que sea gatillante del desprendimiento de un volumen suficiente para generar un tsunami, como por ejemplo un sismo, una erupción volcánica o una explosión de origen antrópica, que produzca una desestabilización y una remoción en masa.

De esta manera, si se considera efectuar una Carta de Inundación con una fuente de generación como un deslizamiento subaéreo o remoción en masa por ejemplo, los parámetros típicos para la definición de una condición inicial son:

- *Tiempo de generación del tsunami (segundos)*: este parámetro se refiere al momento en que se produce el tsunami desde el momento en que se inicia la dinámica que lo genera (remoción en masa).
- *Punto de entrada del deslizamiento (coordenadas)*: se refiere al lugar geográfico en el que la remoción ingresará al agua.
- *Profundidad del agua (metros)*: se refiere a la profundidad en la zona en la cual la remoción ingresa al agua.
- *Volumen del deslizamiento (m^3)*: corresponde al volumen potencial de la remoción.

- *Velocidad del deslizamiento (m/s)*: la velocidad de ingreso de la remoción al agua.
- *Recorrido (metros)*: es el recorrido horizontal de la remoción una vez que ingresó en el agua.
- *Tiempo de movimiento (segundos)*: corresponde al tiempo de movimiento de la remoción una vez en el agua.
- *Ancho de la masa (metros)*: corresponde al ancho de la masa que ingresa al agua.

5.3 Control de calidad y Estandarización de los datos topobatimétricos

El primer paso dentro de la modelación numérica, es generar las grillas pertinentes y por lo tanto se deben integrar las diferentes bases de datos batimétricas, de forma tal de unificar la referencia vertical y horizontal de cada una de ellas. Las fuentes de datos globales, tales como GEBCO, están referidas al Nivel Medio del Mar (NMM), mientras que las Cartas Náuticas lo hacen con respecto al Nivel de Reducción de Sonda (NRS). Por su parte, los datos topográficos debieran estar referidos al Sistema de Referencia Nacional, correspondiente al Sistema de Referencia Geocéntrico de las Américas (SIRGAS), el cual a su vez se basa en GRS-80, que en términos prácticos posee casi los mismos valores en elementos geométricos que el elipsoide WGS-84.

Por consiguiente, es necesario estandarizar las referencias verticales y horizontales para la unificación de las distintas fuentes de datos topobatimétricos en la generación de la grilla de modelación. Desde el punto de vista de la modelación, el nivel de referencia para esta fase lo constituye el Nivel Medio del mar (NMM), por lo que los datos topobatimétricos deberán ser referidos a él.

Al utilizar diferentes fuentes de información, es necesario realizar un detallado control de calidad de los datos topobatimétricos al momento de unificarlos, considerando que exista una correspondencia en términos de resolución y continuidad de la información, por ejemplo que las curvas de nivel no presenten discontinuidades o valores disímiles.

Por otra parte, el proceso de unificación de datos deberá considerar que la transición entre las distintas fuentes de datos tenga una continuidad de las estructuras morfológicas que puedan existir, tales como cañones submarinos, islas u otros.

5.4 Modelo Numérico

Dada la complejidad de la propagación de los tsunamis sobre la batimetría, el problema se ha resuelto tradicionalmente mediante modelación numérica, considerando así la propagación espacio-temporal del tsunami.

Teóricamente, el sistema de ecuaciones gobernantes son las ecuaciones de conservación de la masa y la segunda ley de Newton, de las que se derivan las ecuaciones de Navier-Stokes en el caso de un fluido newtoniano como el agua.

Sin embargo, si la viscosidad se desprecia, y si el tsunami es considerado no dispersivo, es posible reducir la ley de Newton a las llamadas Ecuaciones No Lineales de Aguas Someras. Para ello, considerando que la distribución de velocidad es prácticamente uniforme para ondas en aguas someras y se asume una distribución de presión hidrostática, es posible integrar las ecuaciones entre el fondo y la superficie libre en la dirección vertical, obteniéndose las siguientes ecuaciones para un sistema cartesiano de referencia:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right\} = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{M^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{MN}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + S_x = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{MN}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{N^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + S_y = 0 \quad (5)$$

Donde:

M y N representan los flujos volumétricos integrados en la vertical.

$M = u(h + \eta)$ y $N = v(h + \eta)$

η es el desplazamiento de la superficie libre respecto del nivel de referencia.

u, v son las componentes horizontales del vector de velocidad, en las direcciones x e y respectivamente.

H es la profundidad total del agua ($H = h + \eta$).

h es la profundidad estática.

g es la aceleración de gravedad

S representan términos fuente y de disipación.

Para el caso de propagación de tsunamis en dominios espaciales de menos de 1000 km, el uso de coordenadas cartesianas es suficiente. Para escalas mayores, típicas de tsunamis transoceánicos y de campo lejano, es necesario recurrir a la formulación en coordenadas cilíndricas e incluir efectos tales como la fuerza de Coriolis.

Entre los términos de disipación, el principal fenómeno físico es la disipación por fricción, la cual se suele aproximar por una formulación de tipo Manning.

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} M(M^2 + N^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} N(M^2 + N^2)^{1/2} \quad (7)$$

En la cual n es el coeficiente de fricción de Manning y es inversamente proporcional a H , por lo que su efecto es más notorio en profundidades bajas.

Existe una gran variedad de modelos numéricos que resuelven estas ecuaciones utilizando distintas implementaciones numéricas. Entre los más utilizados en Chile y que han demostrado su aplicabilidad se puede mencionar TUNAMI, COMCOT, NEOWAVE y MIKE21, entre otros. Es importante reconocer que puede existir variabilidad en la solución entre modelos incluso si todos los demás parámetros se mantienen constantes, por lo que su uso determinístico debe ser tratado con cautela. En el caso de utilizarse un modelo distinto a los mencionados, se deberá proveer de las referencias que validen su aplicabilidad para tsunamis, como por ejemplo ser respaldado mediante la verificación de casos de prueba estándar, disponibles en el NOAA Center for Tsunami Research (<http://nctr.pmel.noaa.gov/benchmark/>) y descritos en el documento *Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models*, (Synolakis et al., 2007).

5.5 Definición de Grillas

Una vez seleccionado el modelo numérico, se debe realizar la definición de la extensión del dominio de cálculo y las grillas a utilizar. Dado que cada modelo tiene sus propias características de solución de ecuaciones, el número de grillas y su nivel de resolución estará en directa relación con él. No obstante, para el modelamiento de tsunamis se suele utilizar la metodología de grillas anidadas, en las cuales la resolución espacial se va incrementando a medida que se acerca a la zona de interés. Dentro de este contexto, se debe considerar que el aumento de resolución de una grilla debe ser producto de contar con mayor cantidad de información topobatimétrica que permita su obtención.

La grilla de menor resolución, deberá tener la dimensión suficiente de tal modo de incluir completamente el área de origen del tsunami, como por ejemplo la zona de ruptura del evento a modelar ó falla del sismo y la zona de interés que desee representar la inundación (Figura 2).

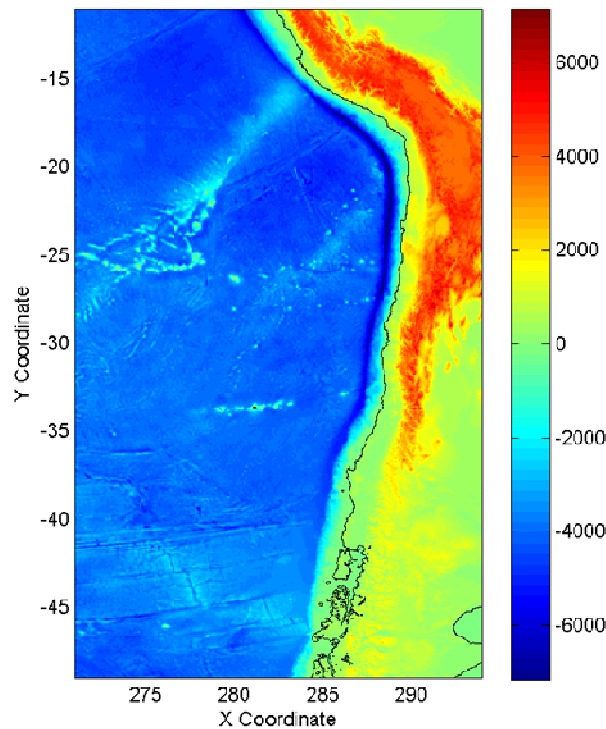


Figura 2. Ejemplo de grilla de amplia dimensión y baja resolución.

Por otra parte, la grilla de mayor resolución y que debe contener la zona de estudio, debe tener las dimensiones que permitan distinguir con claridad las singularidades de la topografía y batimetría, así como estructuras relevantes como rompeolas y muros, las que pueden generar interacciones complejas con la onda de tsunami. Dentro de esta grilla se obtienen los resultados de los diferentes niveles de profundidad de inundación del tsunami, por lo tanto se debe trabajar con resoluciones de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m) o menores. Las bases de datos mínimas que se deben utilizar para generar la grilla de alta resolución son obtenidas desde las Cartas Náuticas SHOA, Planos de Borde Costero y estudios batimétricos y/o topográficos específicos, que cuenten con la cobertura espacial suficiente para el nivel de resolución antes mencionado. Además, se deberá considerar como línea de costa la obtenida desde los Planos de Borde Costero, Carta Náutica o desde una restitución aerofotogramétrica de una imagen actualizada.

5.6 Duración de la Simulación y tiempo de Integración

El tiempo de simulación dependerá del tipo de fuente generadora del tsunami a modelar, del comportamiento local de este tsunami y de otros factores que se deben evaluar caso a caso. No obstante, cuando se esté modelando por una fuente sísmica de campo cercano, se debe considerar que el tiempo mínimo de simulación debe ser

de al menos 6 horas desde que se registre el arribo de la primera onda de tsunami en el borde costero de interés.

Para los casos, en los cuales se utilice otra fuente generadora de tsunami, el tiempo de modelación debe ser suficiente para describir el completo desarrollo del fenómeno y obtener la máxima superficie de intrusión y altura de inundación.

El tiempo de integración en cada grilla debe ser definido en función de la condición de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), con el fin de satisfacer la condición de estabilidad numérica:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t \sqrt{gh_{max}}} \leq C_{max} \quad (8)$$

Donde:

Δx es el espaciamiento de la grilla.

Δt el espaciamiento temporal.

h_{max} es la profundidad máxima en la grilla

g es la aceleración de gravedad.

El valor de C_{max} depende del método usado para resolver las ecuaciones. En general la estabilidad teórica se alcanza con un valor $C_{max} < 1$, pero es recomendable valores de $C_{max} \approx 0,7$.

5.7 Coeficiente de Rugosidad

Durante la propagación del tsunami en aguas cada vez menos profundas, y en la etapa de inundación, la resistencia del fondo se hace cada vez más relevante como elemento de disipación. Esta variable se incluye en los esquemas de modelado numérico a través de un término específico, el cual se basa en la formulación de Manning para el cálculo de la pérdida de energía por fricción, lo que se reduce finalmente a la determinación de un coeficiente empírico que determina el nivel de fricción de una celda.

La implementación de los términos de fricción varía entre modelos, existiendo algunos en los cuales sólo se pueden prescribir coeficientes de fricción globales a nivel de grilla de cálculo, mientras que algunos permiten tener variaciones espaciales de la fricción.

Es común usar un valor de coeficiente de rugosidad $n = 0,025 \text{ [s/m}^3\text{]}$ en zonas acuáticas, mientras que en zonas terrestres este coeficiente puede cambiar según el uso de suelo.

Uso de suelo	Coefficiente de rugosidad [s/m ³]
Área Residencial (densidad alta)	0,08
Área Residencial (densidad media)	0,06
Área Residencial (densidad baja)	0,04
Áreas industriales	0,04
Terrenos de cultivo	0,02
Bosques	0,03
Cuerpos de agua	0,025
Otros (sitios vacíos, áreas verdes)	0,025

Tabla 1. Ejemplo de coeficientes de rugosidad según uso de suelo (Kotani et al. 1998)

Es importante considerar que cuando hay presencia de estructuras de gran tamaño (rompeolas, diques, edificios) que pueden ser representados mediante datos topográficos, es necesario asignar un coeficiente de rugosidad equivalente a la categoría “otros”. Del mismo modo, si al momento de la modelación numérica el uso de suelo es desconocido o bien, se espera que gran cantidad de viviendas sean removidas por el tsunami en estudio, es posible utilizar un coeficiente único equivalente a la categoría “otros”.

5.8 Salidas del modelo numérico

Teniendo en cuenta que una Carta de Inundación es la representación cartográfica de la inundación potencial máxima de un evento de tsunami, las salidas mínimas requeridas que el modelo seleccionado debe entregar son:

- La estimación de la máxima superficie inundada $I(x, y)$.
- Los niveles máximos de profundidad de inundación $d(x, y)$
- Los tiempos de arribo de las distintas ondas.
- La estimación de la altura máxima o run-up $R(x, y)$

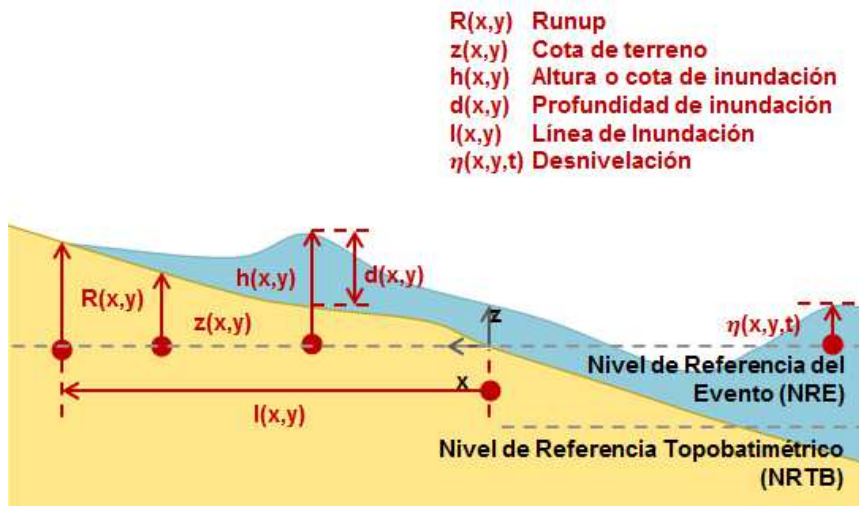


Figura 3. Definición de variables hidrodinámicas de un estudio de tsunami.

La máxima superficie inundada de un evento quedará determinada por el lugar geométrico de la máxima intrusión horizontal asociada a él. En este sentido, la relación entre la superficie inundada y un evento en particular será única y determinística. De manera similar, la máxima profundidad de inundación corresponde a un mapa con la distribución espacial del valor máximo que adquiere la profundidad de inundación para un evento dado.

En caso de usarse una definición distinta, los criterios utilizados deberán quedar debidamente justificados y respaldados por el conocimiento existente y verificable.

Las profundidades de inundación se pueden clasificar usando colores para mostrar los diferentes niveles de inundación.

5.9 Validación de la modelación

Se deberá efectuar una validación de los resultados obtenidos mediante la modelación numérica con antecedentes de registros de tsunamis medidos por estaciones de nivel del mar y con mediciones de áreas de inundación y run up obtenidas en terreno, cuando estos antecedentes se encuentren disponibles.

VI. ELABORACIÓN CARTOGRÁFICA

6.1 Consideraciones generales

Posterior a los procedimientos metodológicos descritos en la etapa de modelación numérica, se procede a la fase de edición cartográfica de la CITSU, en esta etapa igualmente se deben tener una serie de consideraciones que tienen que ver con la elección de un software GIS adecuado para la generación de cartografía temática, así como también con ciertos parámetros técnicos que son necesarios de tener en cuenta para este propósito. En este sentido, dichas consideraciones son las siguientes:

- Sistema de Coordenadas: Geográficas.
- Datum: SIRGAS - WGS84.
- Escala de trabajo: 5.000, 10.000, 15.000 o 25.000, dependiendo de las dimensiones del área de estudio.
- Tipo de Software de trabajo recomendado: ArcGIS v. 10.0 o superior con módulo 3D Analyst para generar el modelo de superficie (Hillshade).

6.2 Compilación y generación de la base cartográfica

Las coberturas de información base mínimas requeridas para la confección de una carta de inundación son:

- Línea de costa
- Topografía
- Caminos
- Modelo de superficie (Hillshade)
- Área de inundación

Las coberturas de información base para la confección de la CITSU se deben obtener a partir de los organismos que generan cartografía de carácter oficial, descritas en el capítulo IV.

6.3 Administración de las coberturas de información

Para producir una CITSU, se recomienda el uso de un software GIS adecuado para la

generación de cartografía temática. El SHOA utiliza el software ArcGIS 10.1, en su versión ArcMap - ArcInfo, y desde la interfaz de ArcMap, se administran todas las capas de información y se ejecutan los diferentes procesos que dan lugar a la edición final de la carta.

6.4 Generación del área de inundación

Para obtener el área de inundación que será representada en niveles de profundidad de inundación en la carta final, se deben seguir una serie de procedimientos, los que se describen a continuación:

6.4.1 Conversión del resultado de la modelación a una capa de información

El resultado de la inundación proveniente de la modelación numérica, corresponderá a un archivo de extensión XYZ, el cual contiene las coordenadas de inundación, es decir, latitud, longitud y profundidad. Para graficar este resultado como una capa de información geográfica se debe importar este archivo al Sistema de Información Geográfica que se esté utilizando.

Una vez realizado este procedimiento, se obtendrá una capa de tipo puntos, los cuales representan una primera aproximación de la inundación que se ha modelado para un evento en particular en un área de estudio determinada (Anexo "B").

6.4.2 Determinación de los niveles de profundidad de inundación

Una vez obtenida la inundación como una capa de puntos, se procede a reclasificar dicha información, generando una layer temática en la cual se representa la inundación diferenciada por niveles de profundidad en metros, en un rango de 5 clases (Anexo "C").

6.4.3 Edición manual de la inundación

Para obtener el área de inundación que represente los diferentes niveles de profundidad, se debe crear una nueva capa de información o un Shapefile de tipo polígono, que represente toda el área inundada obtenida preliminarmente como puntos de inundación, a la cual luego se la superpone con transparencia, sobre los puntos de inundación, y se procede a la poligonización de los niveles de profundidad de inundación (Anexo "D").

Una vez generados los diferentes niveles de profundidad de inundación, se procede a la reclasificación de los datos que deben ser almacenados en un nuevo campo de información, el cual contendrá la profundidad de la inundación en metros pero ahora como área (Anexo "E").

6.5 Generación del modelo de superficie

Se recomienda la generación de un modelo de superficie que permita gráficamente representar el relieve del área que abarca la carta (Anexo "F").

En el caso de las CITSU que produce el SHOA, para lograr este resultado, se utiliza la extensión 3d Analyst, la cual se integra a la interfaz de Arc Map y reúne un conjunto de herramientas y aplicaciones necesarias para generar este tipo de productos.

6.6 Elaboración del producto cartográfico final

Una vez que se ha elaborado la base cartográfica, se ha determinado la inundación y se ha generado el modelo de superficie, se procede a la edición del producto cartográfico final.

En esta última etapa, se ingresan todo el resto de componentes que configuran la cartografía final, como el bloque de título, la simbología, una memoria explicativa, la escala, el sistema de referencia y una malla de coordenadas, entre otros (Anexo "G").

6.7 Formatos de salida de la CITSU

El formato de salida de la carta de inundación debe ser tal que pueda ser utilizado en cualquier sistema de información geográfico y también para que pueda ser ploteado por cualquier usuario, conservando la escala original de la carta, un ejemplo de esto es crear un archivo PDF que contenga los atributos originales de la carta (Anexo "G").

También se recomienda generar una salida tipo archivo KMZ (Anexo "H") y como vínculo Web (Anexo "I"), los cuales permitirán visualizar el área de inundación sobre las imágenes aéreas y de satélite que ofrece Google Earth y desde el Servidor de Mapas de Google (Google Maps), respectivamente. Esta forma de visualización permite tener una estimación y aproximación más realista del comportamiento que tendría la inundación modelada sobre el territorio.

VII. INFORME FINAL

7.1 Contenido Básico

Uno de los productos que debe ser entregado al realizar una CITSU, es un Informe Técnico que contenga todos los aspectos más relevantes del proceso de elaboración de la Carta. El contenido mínimo debe ser el siguiente:

- Antecedentes generales de la zona de estudio.
- Información histórica de Sismos y Tsunamis.
- Fuentes de información topobatimétrica.
- Justificación de la fuente generadora de tsunami.
- Parámetros de la fuente generadora.
- Justificación de selección del modelo numérico.
- Descripción teórica del modelo numérico.
- Definición de grillas, tiempo de simulación e integración.
- Resultados y salidas gráficas del modelo.
- Descripción de la edición cartográfica.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.

Además se deberá entregar en formato digital lo siguiente:

- Archivos de cada una de las grillas utilizadas en la modelación numérica.
- Archivos de salida de propagación del modelo, incluyendo los obtenidos para cada grilla.
- Archivo de salida del modelo con el run up para la grilla de mayor resolución.
- Archivo de salida del modelo con la profundidad de inundación para la grilla de mayor resolución.
- Cobertura de línea de costa utilizada para la zona de estudio en formato shapefile, geodatabase, dwg, dxf, o similar para ambiente SIG.
- Cobertura topográfica utilizada para la zona de estudio en formato shapefile, geodatabase, dwg, dxf, o similar para ambiente SIG.
- Cobertura vial utilizada para la zona de estudio en formato shapefile, geodatabase, dwg, dxf, o similar para ambiente SIG.

7.2 Formato final

Se deberá entregar en formato papel y digital la CITSU con sus diferentes niveles de profundidad. Los formatos digitales serán de tipo Shapefile, PDF y KMZ.

VIII. GLOSARIO

Altura de tsunami: Valor absoluto de la diferencia entre una cresta y un valle consecutivos de una onda de tsunami o de la diferencia entre un valle y una cresta consecutivos.

Altura de Inundación, $h(x,y)$: Diferencia entre la superficie libre del fluido en cada punto durante el evento y el nivel de referencia de éste relevante al tsunami. Se mide en cualquier punto dentro del área de inundación.

Amplitud de la onda de tsunami: Diferencia entre el valor de la cresta de una onda de tsunami y el nivel de referencia del evento. Generalmente es medido por un mareógrafo.

Amplitud máxima del tsunami: Máxima amplitud de onda alcanzada durante un tsunami.

Ángulo de manto, δ (dip): 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 rumbo, ϕ (strike): Corresponde al rumbo o azimuth de la traza de la falla, medido en un plano horizontal, con sentido horario y con origen en el norte geográfico.

Ángulo de deslizamiento, λ (rake): 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.

Cota de terreno, $z(x,y)$: Cota de elevación del terreno, referida al *NRE*. Su unidad de medida es en metros.

Cota batimétrica: Profundidad del fondo marino, referida al *NRE*. Su unidad de medida es en metros.

Deslizamiento, D : 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.

Evento extremo probable validado: Terremoto de gran magnitud del cual no se tiene

registro instrumental, pero es validado mediante observaciones de campo y documentación histórica.

Inundación horizontal: Distancia horizontal que alcanza la inundación y la cual es medida desde la línea de costa hacia tierra adentro en forma.

Línea de Inundación: Lugar geométrico de todos los puntos correspondientes a la máxima intrusión horizontal del tsunami.

Longitud de ondas de un tsunami: Distancia horizontal entre dos crestas de ondas de tsunami consecutivas.

Magnitud de momento, M_w : Magnitud de un terremoto obtenida utilizando el valor de momento sísmico, esta escala no se satura para terremotos grandes por lo cual es la que mejor los caracteriza.

Nivel de Referencia Topobatimétrico, $NRTB$: Nivel vertical único al cual deben estar referidas las cotas topográficas y batimétricas en la zona de estudio. Éste debe ser un valor común, que garantice la congruencia entre cotas topográficas y batimétricas.

Nivel de Referencia del Evento, NRE : Nivel vertical único referido al $NRTB$, que representa el nivel del mar al momento del evento.

Periodo del tsunami: Tiempo en que una onda de tsunami completa un ciclo. Generalmente se mide como la diferencia de tiempo entre el tiempo de arribo de la onda de tsunami de mayor amplitud y el siguiente pico, medidos en un mareógrafo. Los periodos típicos de tsunamis varían entre 5 y 60 minutos.

Plano de falla: El plano de falla es una 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). Los sismos pueden ser idealizados como un movimiento de unos o varios planos de falla de orientaciones arbitrarias, donde 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 manto y rumbo y por el deslizamiento y ángulo de deslizamiento.

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).

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

$$d(x, y) = h(x, y) - z(x, y)$$

Tiempo de arribo del tsunami: Tiempo de llegada de la primera onda de tsunami a un punto de referencia.

Traza de la falla: Intersección del plano de falla con la superficie media de la tierra (plano de referencia horizontal).

Runup, $R(x, y)$: Diferencia entre la cota del punto de máxima intrusión horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami *NRE*. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R(x, y) = z(I(x, y)) - NRE.$$

Velocidad de propagación del tsunami: Velocidad de propagación de una onda de tsunami en el océano, cuya longitud de onda es lo suficientemente grande en comparación con la profundidad del agua.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

Kotani, M., F. Imamura & N. Shuto. (1998) Tsunami run-up simulation and damage estimation by using GIS. In: *Proc. of coastal eng.*, JSCE, 45 (1): 356 - 360 pp.

Lockridge, P. (1985) *Tsunamis in Chile-Perú. Report SE-39 Worl Data Center a for solid earth and Geophysics*. Boulder, Colorado.

Mansinha, L. & Smylie, D.E. (1971) The displacement field of inclined faults". *Bulletin Seismological Society of America*. 61:1433 - 1440 pp.

Okada, Y. (1985) Surface deformation of shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin Seismological society of America*. 75(4):1135 - 1154 pp.

Synolakis, C., E. Bernard, V. Titov, U. Kânoğlu, & F. González. (2007) *Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models*, NOAA Tech. Memo. ERL PMEL-135, 55 pp.

Soloviev, S., Ch. Go & Kh. Kim (1992) *Catalog of Tsunamis in the Pacific, 1969-1982*. (translate from Russian to English by Amerind Publishing Co., Pvt. Ltd., New Delhi, 1988), Academy of Sciences of the USSR, Soviet Geophysical Committee, Moscow, 208 pp.

Yoshioka, S & M. Wortel. 1995. 3-Dimensional numerical modeling of detachment of subducted lithosphere. *Journal of Geophysical Research*. 100(10): 20223 - 20244 pp.

ANEXO "A" EJEMPLO DE MEMORIA EXPLICATIVA

MEMORIA EXPLICATIVA CARTA DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI PICHILEMU

INTRODUCCIÓN

Las características físicas naturales del territorio donde se emplaza la localidad de Pichilemu sumado a la densidad poblacional y uso de su borde costero, plantean la necesidad de evaluar adecuadamente la amenaza de tsunami a la que se encuentra sometida.

Por lo anterior, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), ha elaborado una carta nueva que define las áreas que potencialmente podrían inundarse en caso que ocurriera un tsunami de gran tamaño. Dicha información se obtuvo mediante la aplicación de una metodología de simulación numérica, considerada hoy como *una de las técnicas más confiables para el estudio de estos fenómenos* (Wong et al., 2006). Este método utiliza básicamente datos topográficos y batimétricos junto con información sísmica, todo ello integrado a un modelo numérico de simulación que se resuelve mediante computadores.

La presente Carta de Inundación por Tsunami, se basa en el evento histórico de 1730 que afectaron la zona central de Chile. Por lo tanto, se está representando un "escenario extremo" en términos de los efectos que generaría un tsunami en el área de Pichilemu. Además se ha tomado en cuenta las recientes experiencias de los tsunamis ocurridos en Chile el año 2010 y Japón el año 2011, los que dejaron en evidencia la necesidad de considerar este tipo de escenarios desfavorables.

TSUNAMIS HISTÓRICOS EN PICHILEMU

Históricamente, se tiene registro que en Chile central han ocurrido al menos cuatro terremotos que generaron tsunamis: el 8 de julio de 1730, el 19 de noviembre de 1822, el 16 de agosto de 1906 y el más reciente ocurrido el 3 de marzo de 1985.

CARTA DE INUNDACIÓN DE PICHILEMU

La presente Carta de Inundación por Tsunami de la localidad de Pichilemu, se elaboró utilizando el modelo de simulación numérica COMCOT. Este modelo fue alimentado con la información topográfica, batimétrica y del plano urbano más actualizado disponible. La inundación modelada se representa en rangos de profundidad de inundación en metros, *determinados a base de parámetros ingenieriles japoneses de diseño de estructuras resistentes a tsunamis* (Shuto, 1992).

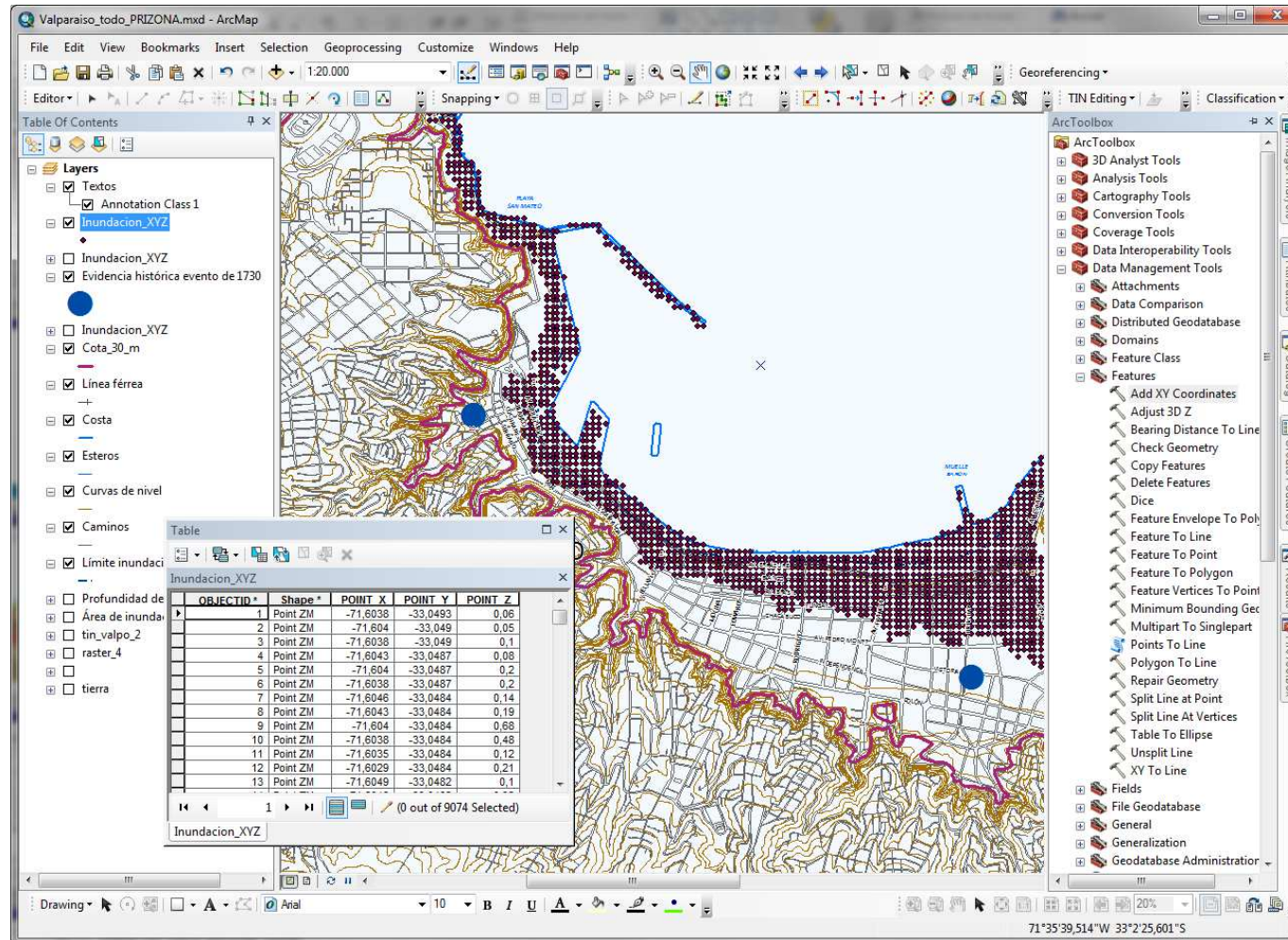
Para obtener los resultados de la inundación, los parámetros sísmicos utilizados en el modelo fueron estimados de acuerdo a la zona de ruptura del terremoto de 1730.

Referencias:

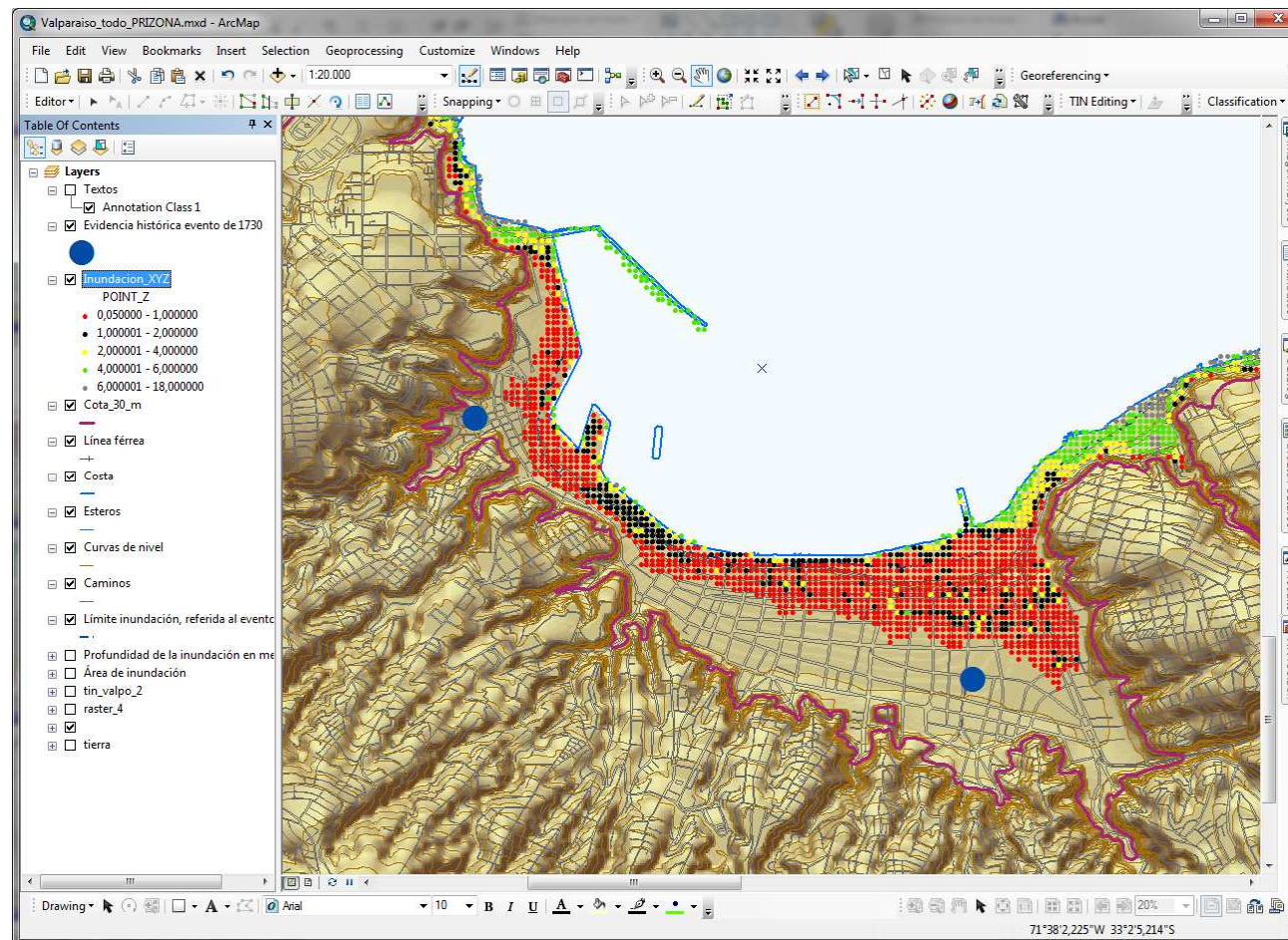
- Ramirez, D., 1988. "Estimación de algunos parámetros focales de grandes terremotos históricos chilenos". Memoria para obtener el grado académico de Magister en ciencia mención geofísica. Universidad de Chile.
- Shuto, N., 1992. "Tsunami intensity and damage". Tsunami Engineering Research Report. Tohoku University. Vol. 9, pp. 101-136.
- Wong, F. L., Venturato A.J. & Geist, E.L., 2006. Seaside, Oregon, tsunami pilot study- Modernization of FEMA flood hazard maps: GIS Data: U.S. Geological Survey.

NOTA IMPORTANTE: En el caso de ocurrir un tsunami, los niveles de inundación señalados por esta carta podrían ser diferentes, dependiendo de las características del terremoto que lo genere. Esta carta se basa en un modelo numérico, es decir, en una representación de la realidad en base a cálculos matemáticos.

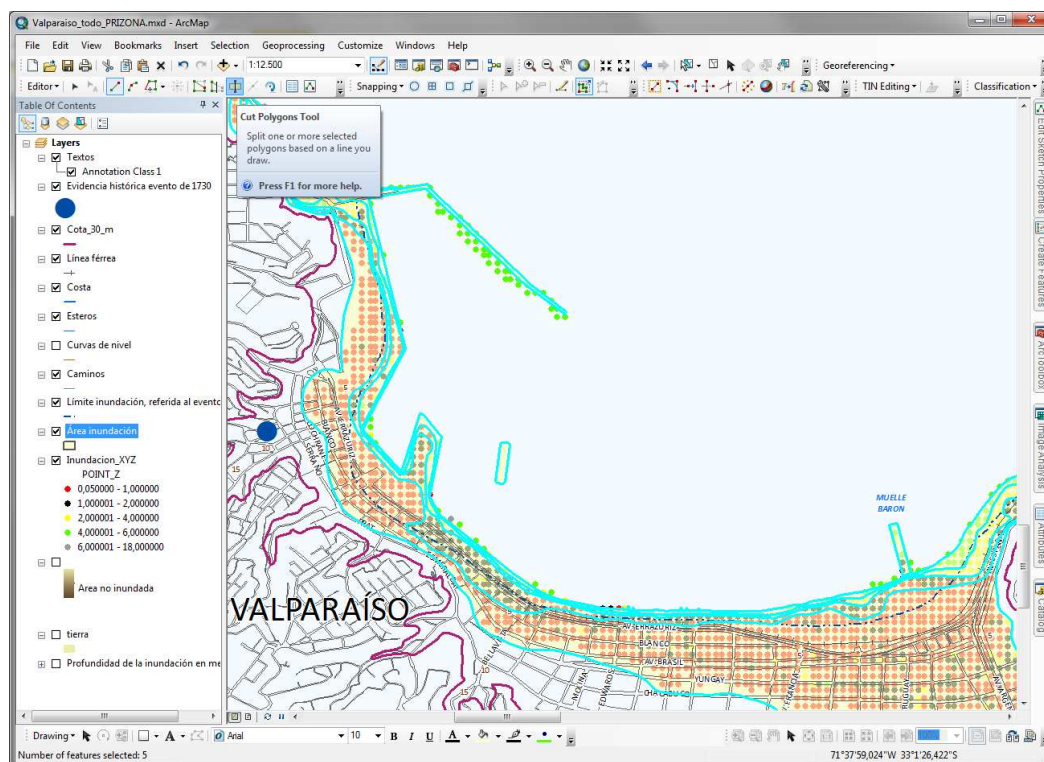
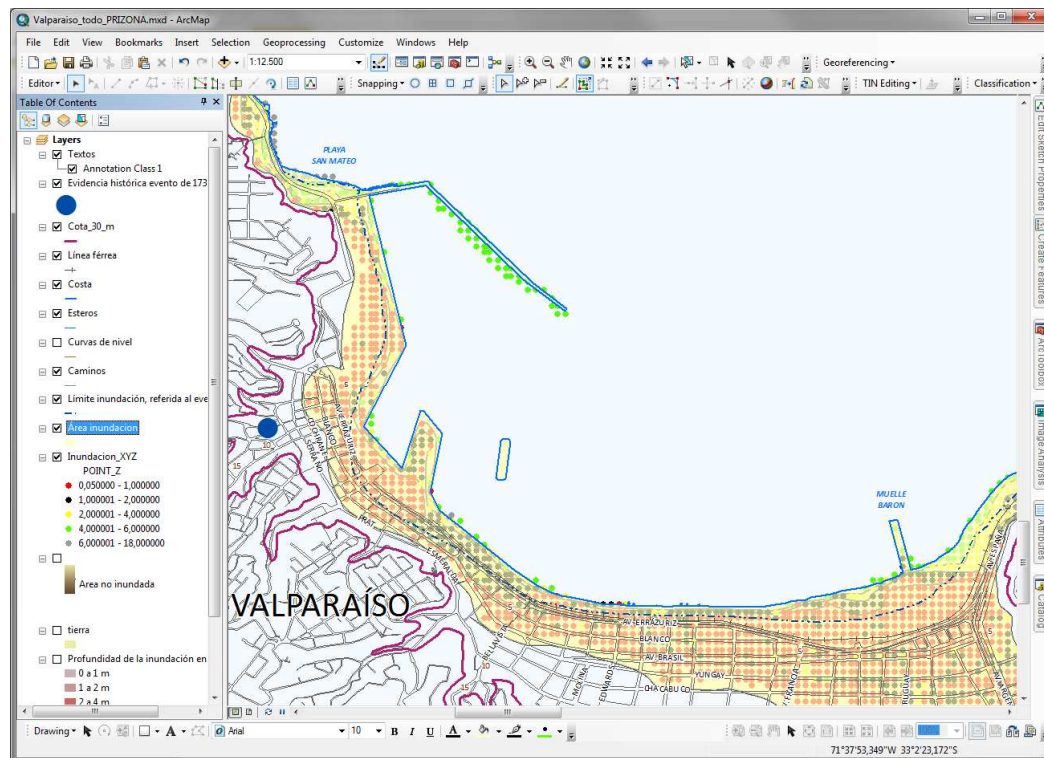
ANEXO "B" GENERACIÓN PRELIMINAR DE LA INUNDACIÓN



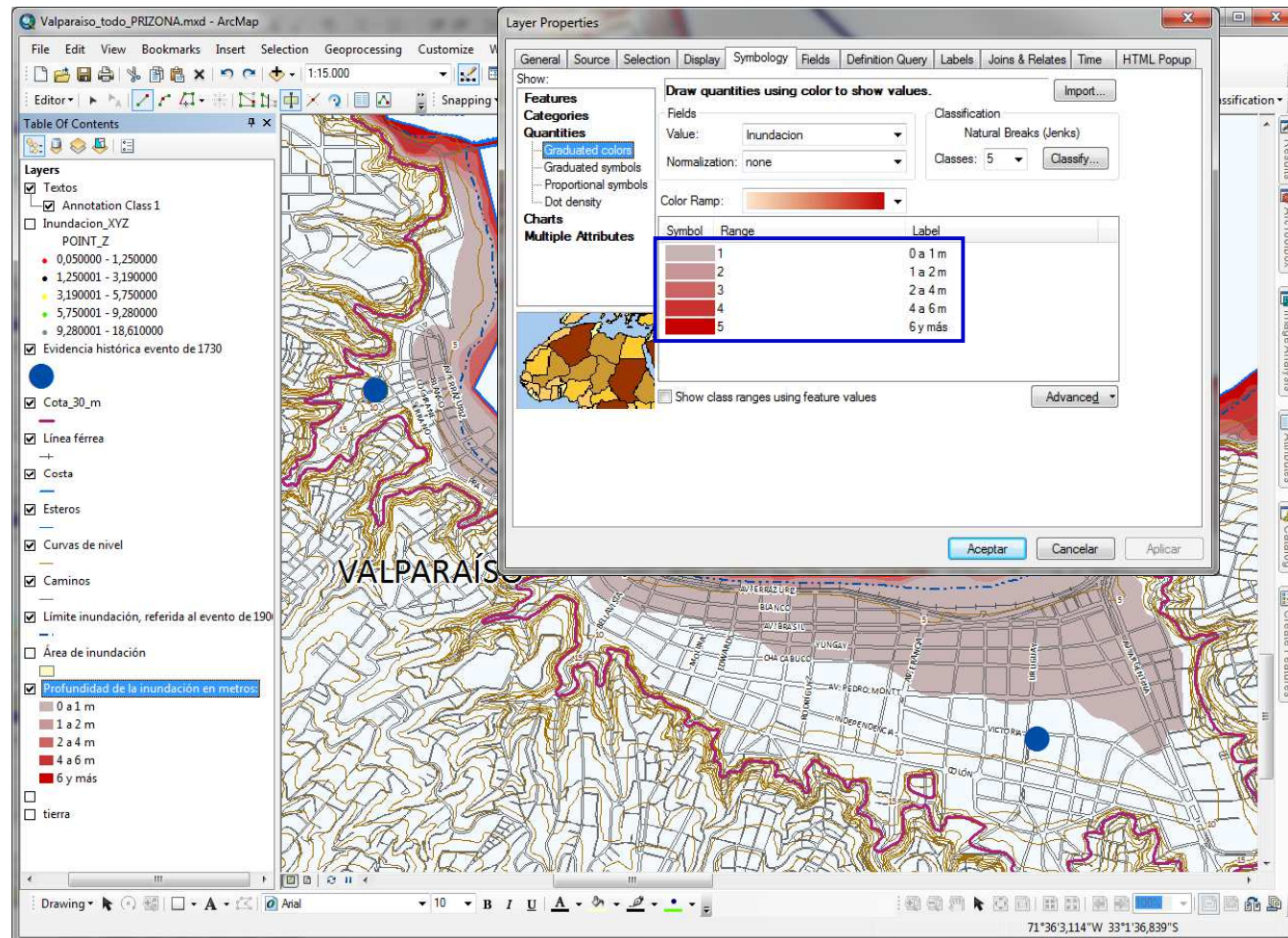
ANEXO "C" DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN



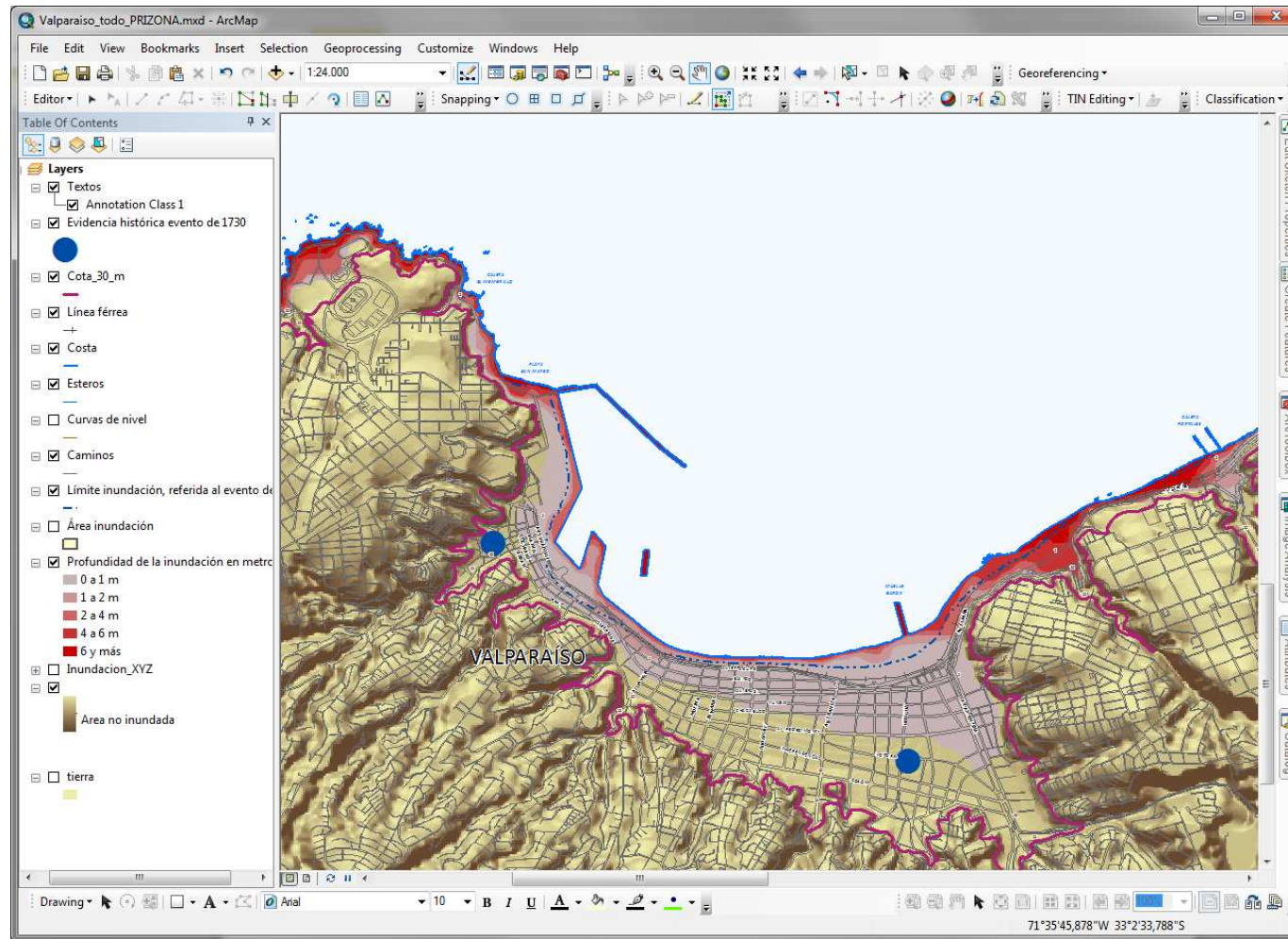
ANEXO "D" POLIGONIZACIÓN DE LOS NIVELES DE PROFUNDIDAD Y SUPERPOSICIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN



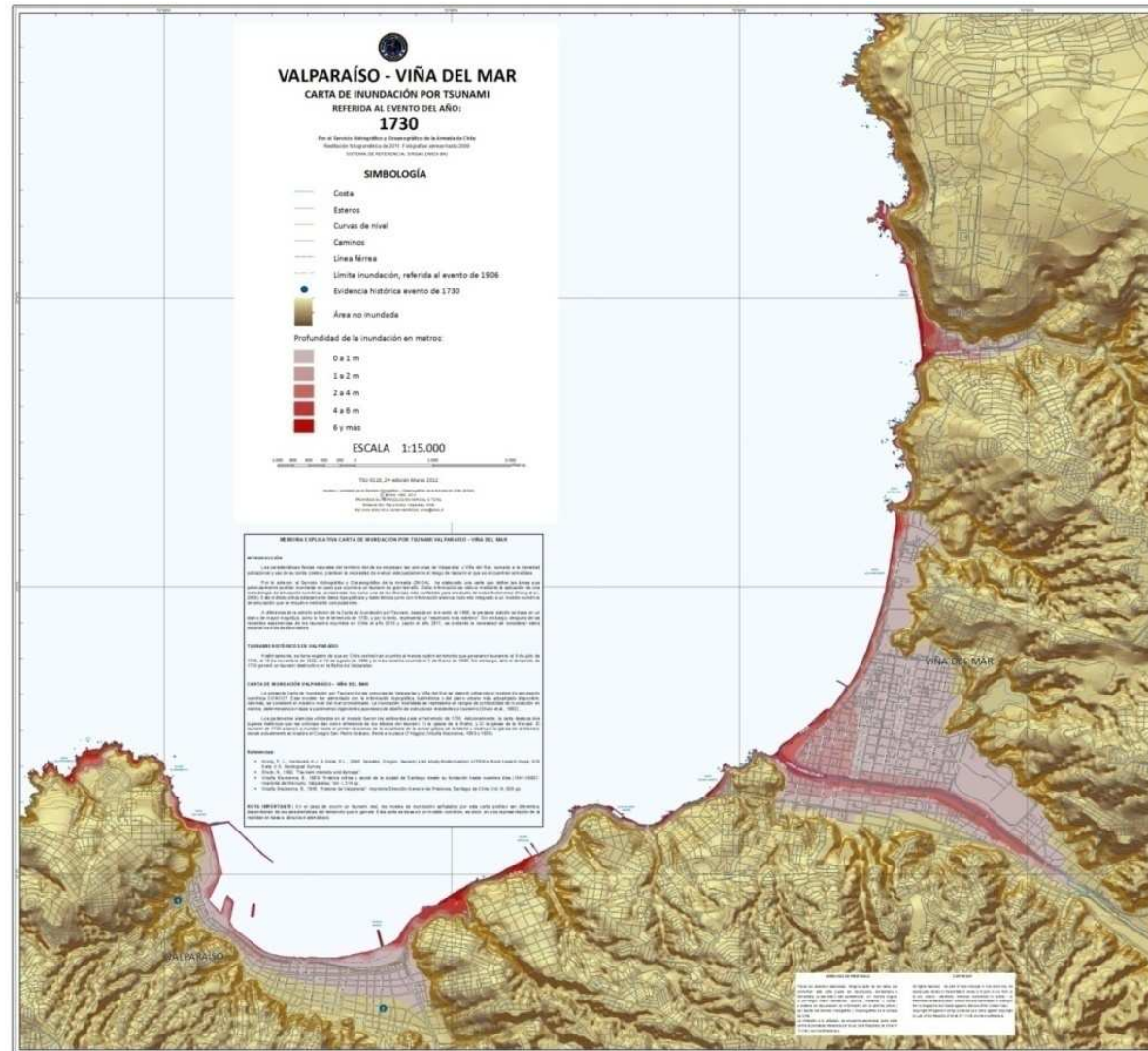
ANEXO "E" RESULTADO FINAL EN NIVELES DE PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN



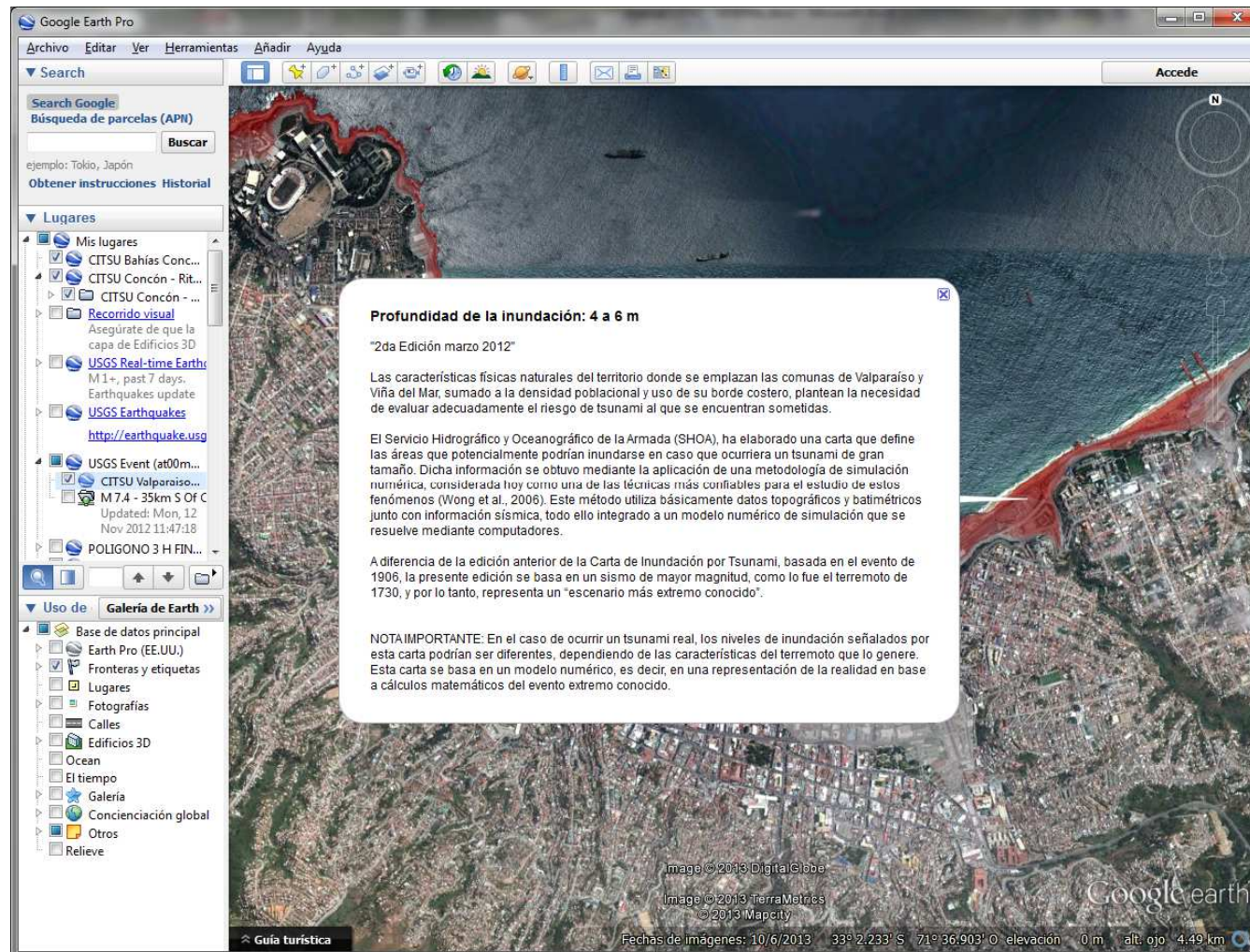
ANEXO "F" APLICACIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE (HILLSHADE)



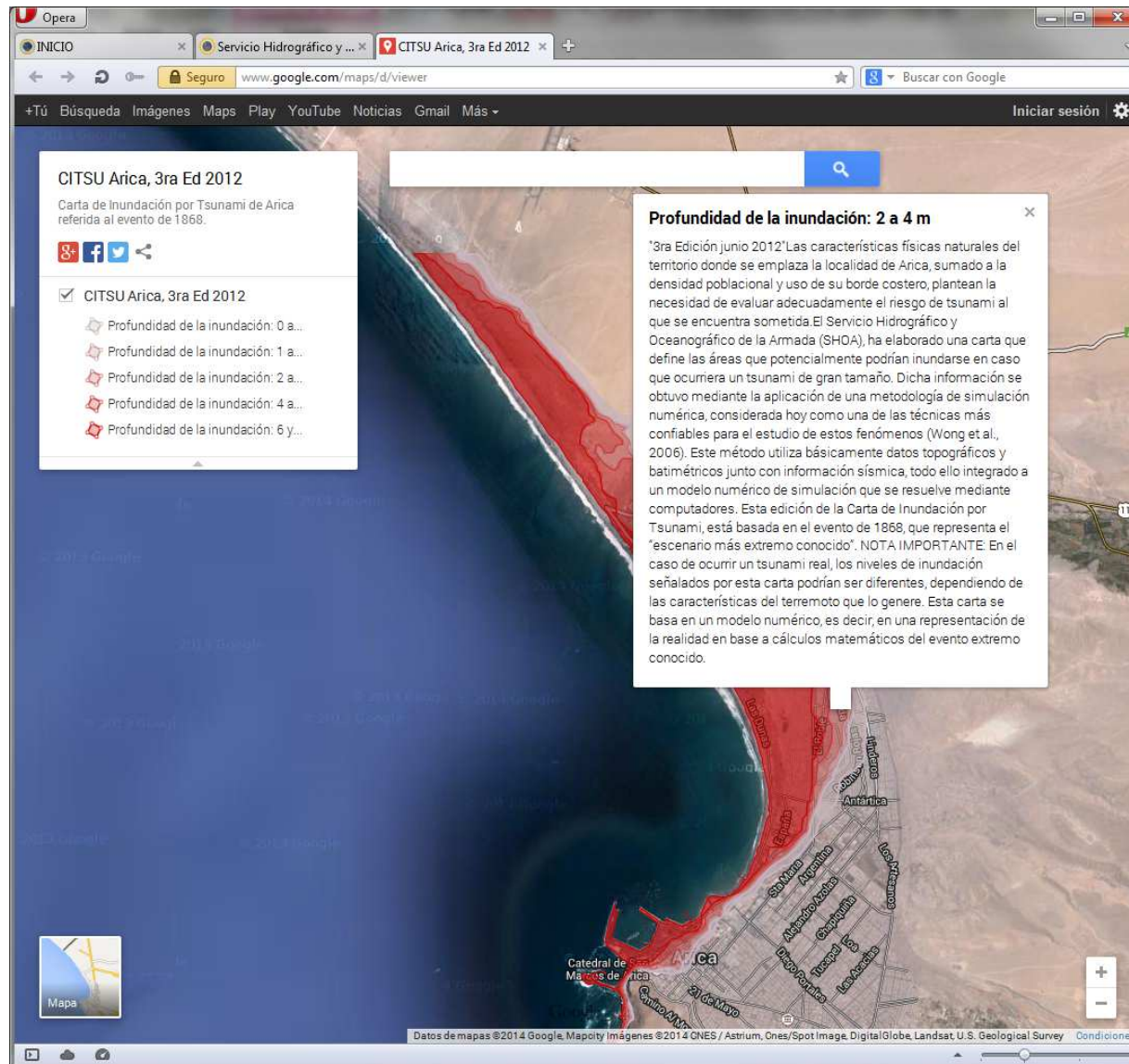
ANEXO "G" PRODUCTO CARTOGRAFICO FINAL EN FORMATO PDF



ANEXO "H" PRODUCTO CARTOGRÁFICO FINAL EN FORMATO KMZ



ANEXO "I" PRODUCTO CARTOGRAFICO FINAL EN FORMATO VÍNCULO DE WEB



**Títulos de la Serie “Instrucciones Hidrográficas y Oceanográficas”
del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
(SHOA)**

- SHOA Pub. 3101** - Instrucciones Hidrográficas N° 1.
“Líneas de Sondas para completar Sondaje de Cartas Náuticas”. 2ª Edición, 1983.
- SHOA Pub. 3103** - Instrucciones Hidrográficas N° 3.
“Determinación de Nombres Geográficos”. 2ª Edición, 1989.
- SHOA Pub. 3104** - Instrucciones Hidrográficas N° 4.
“Instrucciones para la Determinación de la Playa y Terreno de Playa en la Costa de Litoral y en la Ribera de Lagos y Ríos”. 4ª Edición, 2009.
- SHOA Pub. 3105** - Instrucciones Hidrográficas N° 5.
“Especificaciones Técnicas para la realización de Sondajes de Precisión”. 4ª Edición, 2003.
- SHOA Pub. 3106** - Instrucciones Hidrográficas N° 6.
“Instrucciones Generales para la Mantención y Actualización de los Derroteros de la Costa de Chile en Terreno”. 3ª Edición, 2003.
- SHOA Pub. 3107** - Instrucciones Hidrográficas N° 7.
“Especificaciones Técnicas para Sondaje Oceánico”. 1ª Edición, 1990.
- SHOA Pub. 3108** - Instrucciones Hidrográficas N° 8.
“Instrucciones para la Confección de Planos de Solicitudes y Concesiones de Acuicultura”. 4ª Edición, 2014.
- SHOA Pub. 3109** - Instrucciones Hidrográficas N° 9.
“Especificaciones Técnicas para el Empleo y Aplicación del Sistema de Posicionamiento Global en Trabajos Geodésicos, Hidrográficos y Topográficos”. 3ª Edición, 2005.
- SHOA Pub. 3110** - Instrucciones Hidrográficas N° 10.
“Especificaciones Técnicas para la Elaboración de Planos Marítimos del Borde Costero”. 2ª Edición, 2008.
- SHOA Pub. 3201** - Instrucciones Oceanográficas N° 1.
“Mediciones y Análisis Oceanográficos”. 3ª Edición, 2005.
- SHOA Pub. 3202** - Instrucciones Oceanográficas N° 2.
“Método Oficial para el cálculo de los valores no Armónicos de la Marea”. 2ª Edición, 1999.
- SHOA Pub. 3204** - Instrucciones Oceanográficas N° 4.
“Especificaciones Técnicas para la elaboración de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU)”. 1ª Edición, 2015.

Estas publicaciones se encuentran disponibles en www.shoa.mil.cl/descarga de publicaciones