



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis de la evacuación por tsunami en Lárnaca (Chipre)

Trabajo realizado por:
David Galán Pérez

Dirigido:
Ernesto Mauricio González Rodríguez
Ignacio Aguirre Ayerbe

Titulación:
**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, Septiembre de 2023

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis dos tutores de tesina, Mauricio y Nacho, por darme la oportunidad de participar en este proyecto que me ha permitido acabar mi formación en el Máster de Costas y Puertos. A ti Mauricio por darme la oportunidad de entrar a realizar las prácticas en IH Cantabria y poder aprender sobre un tema apasionante, además de toda la formación continua que me has dado durante el máster. A Nacho por estar enseñándome cada día y agradecer nuestros debates interminables sobre cosas que añadir o mejorar que me han enriquecido mucho. También agradecer a todos los compañeros del Grupo de Ingeniería de Costas y Gestión de Costa por todos los consejos y ayudarme en detalles de la tesina.

Gràcies als dos pilars de la meva vida com són els papis i tu carinyu, us estimo molt i gràcies per donar-me ànims en tota aquesta experiència. I mil gràcies carinyo per venir a viure amb mi aquesta expèriencia que com t'he dit molts cops, sense tu no hagués sigut el mateix.

Agradecer a todos mis compañeros y profesores del máster por este año tan intenso y productivo donde he aprendido muchísimo de todos y todas. Y remarcar a Gabriel que me ha ido ayudando en muchas cosas mientras hacíamos nuestras horas de prácticas y TFM. También a todos mis amigos y amigas y familia que desde la distancia me han dado apoyo y tanto nos hemos echado de menos pero sus visitas a Santander me han dado energía durante el verano.

¡Os quiero! Us estimo!

¡Muchas gracias! Moltes gràcies!

Confidencialidad del trabajo

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), National Observatory of Athens (NOA), Department of Lands and Surveys of Cyprus proporcionó la información para la realización del presente estudio condicionada a una protección de datos y confidencialidad de los resultados del trabajo.

Es por lo que se llevó a cabo una solicitud de confidencialidad del TFM, aprobada por la Comisión de Posgrado de la ETSICCP el 27 de julio de 2023.

Por lo tanto, el alcance de este documento, donde se incluye la introducción, los objetivos, la descripción de la zona de estudio, la metodología de la simulación de la inundación y la metodología del modelo de evacuación se acoge a la Normativa de Gestión Académica de los Estudios Oficiales de Máster, y más específicamente en el numeral: *13. TRABAJOS FIN DE MÁSTER SOMETIDOS A PROCESOS DE PROTECCIÓN DE DATOS O TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA O CONOCIMIENTO*".

RESUMEN

Título: Análisis de la evacuación por tsunami en Lárnaca (Chipre)

Autor: David Galán Pérez

Directores: Mauricio González Rodríguez e Ignacio Aguirre-Ayerbe

Fecha de presentación: Septiembre 2023

Este trabajo se enmarca en el contexto del proyecto CoastWAVE*, uno de cuyos objetivos es aplicar el programa de IOC UNESCO Tsunami Ready en 7 comunidades de la región NEAM (North Eastern Atlantic and Mediterranean region). El proyecto se enmarca en el desarrollo de un proyecto específico titulado "Modelización de tsunamis, cartografía de inundación y evacuación en la zona de Larnaka" con el propósito de preparar la ciudad de Lárnaca en Chipre ante eventos de tsunami.

El objetivo del trabajo es elaborar mapas de evacuación diseñados para ser comprensibles para la población, con el propósito de preparar a la ciudadanía ante la posible llegada de un tsunami en la ciudad de Lárnaca (Chipre). Empieza con una revisión de los modelos actuales de evacuación en la mitigación de tsunamis, seguida por un análisis detallado de la zona de estudio, presentación de mapas de peligrosidad y cálculo de cuánta gente y edificios críticos quedarían expuestos según el tsunami de impacto. Posteriormente, se aplica un modelo de evacuación que conduce a la identificación de rutas óptimas de evacuación en diferentes puntos clave, previamente seleccionados en el análisis del área de estudio.

La adopción de medidas basadas en la preparación es fundamental para reducir el riesgo ante tsunamis y enfrentar el impacto de estos eventos naturales. La mentalidad proactiva desempeña un papel crucial en la disminución significativa del riesgo y en la capacidad de estar preparados para cualquier eventualidad.

A pesar de que Lárnaca ya dispone de un sistema de alerta temprana ante tsunamis, adolece de medidas de preparación dirigidas a la población (Georgiou et al., 2010). Para complementar el sistema mencionado previamente, este proyecto radica en la implementación del modelo IH-META, con la finalidad de adquirir rutas de evacuación óptimas. Mediante esta iniciativa, se fortalecerán las estrategias de mitigación ante tsunamis al presentar cartografía de evacuación específica para estos eventos, colmando de esta manera la carencia en la preparación de los residentes de Lárnaca.

Palabras claves:

Tsunamis, Lárnaca, evacuación, TsunamiReady, mapas de evacuación, gestión de riesgos, peligrosidad por tsunami

¹: "Adapt Global Tsunami Ready Standards and Guidelines and pilot Tsunami Ready within the framework of the ICG/NEAMTWS"

ABSTRACT

Title: Tsunami Evacuation Analysis in Lárnaca (Cyprus)

Author: David Galán Pérez

Directors: Mauricio González Rodríguez e Ignacio Aguirre-Ayerbe

Date of presentation: September 2023

"This work is part of the CoastWAVE project*, one of whose objectives is to implement the IOC UNESCO Tsunami Ready program in 7 communities in the NEAM region (North Eastern Atlantic and Mediterranean region). The project falls within the framework of a specific project titled "Tsunami Modeling, Flood Mapping, and Evacuation in the Larnaka Area" with the purpose of preparing the city of Larnaca in Cyprus for tsunami events.

The aim of the work is to create evacuation maps designed to be comprehensible to the population, with the purpose of preparing the citizens for the possible arrival of a tsunami in the city of Larnaca (Cyprus). It begins with a review of current evacuation models in tsunami mitigation, followed by a detailed analysis of the study area, presentation of hazard maps, and calculation of how many people and critical buildings would be exposed based on the impact tsunami. Subsequently, an evacuation model is applied, leading to the identification of optimal evacuation routes at various key points, previously selected in the area study analysis.

The adoption of preparedness-based measures is fundamental to reducing the risk of tsunamis and addressing the impact of these natural events. A proactive mindset plays a crucial role in significantly reducing risk and being prepared for any eventuality.

Despite Larnaca already having a tsunami early warning system, it lacks population-focused preparedness measures (Georgiou et al., 2010). To complement the previously mentioned system, this project focuses on the implementation of the IH-META model in order to acquire optimal evacuation routes. Through this initiative, tsunami mitigation strategies will be strengthened by providing specific evacuation mapping for these events, thereby addressing the lack of preparedness among Larnaca residents."

Keywords:

Tsunamis, Larnaca, evacuation, evacuation maps, risks management, TsunamiReady, tsunami threat

¹: *"Adapt Global Tsunami Ready Standards and Guidelines and pilot Tsunami Ready within the framework of the ICG/NEAMTWS"*

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Objetivo.....	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
1.2 Datos utilizados.....	3
1.3 Organización del trabajo	4
2.1 Definición de tsunami	5
2.2 Definición de términos.....	5
2.3 Estrategia para la gestión del riesgo frente a tsunamis	6
2.4 Metodología para la evaluación de la amenaza de tsunami en Lárnaca.....	9
2.5 Metodología para la evaluación de la evacuación en Lárnaca	14
3. Zona de estudio	25
3.1 Actividad sísmica.....	26
3.2 Topobatemetría de Lárnaca	27
3.3 Descripción de Lárnaca.....	27
3.4 Población.....	27
3.5 Distribución edificios críticos	27
4. Mapas de peligrosidad	28
5. Exposición ante tsunami en Lárnaca.....	28
6. Mapas de evacuación	28
7. Discusión de resultados.....	28
8. Conclusiones	28
9. Bibliografía	29
ANEXO	33

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Registro histórico de sismos y tsunamis. Fuente: Evelpidou et al. 2022.....	2
Figura 2 Esquema del NTHMP donde muestra las tres partes del programa de mitigación ante la amenaza de tsunamis. Fuente: NTHMP.....	6
Figura 3. Ciclo de gestión del riesgo de desastres. Fuente: Aguirre Ayerbe et al., 2018.....	7
Figura 4. Imagen izquierda: Ejemplo de evacuación vertical en Japón. Imagen derecha: Ejemplo de evacuación horizontal en Tailandia. Fuentes: Izquierda: Steel Construction. Derecha: Alexander Klink	9
Figura 5. Mapa que muestra la distribución geográfica de las tasas anuales de terremotos (escala logarítmica común) para $M_w \geq 6.0$. Fuente: (Basili et al., 2021).	10
Figura 6. (A) Ejemplo de un conjunto de curvas de peligro calculadas para un punto de interés. Cada curva representa un percentil diferente de todos los modelos que abarcan la incertidumbre epistémica. (B) Mapa de peligrosidad para un periodo de retorno dado, para mostrar los valores de la altura máxima de inundación (MIH, en metros) en cualquier punto de interés (POI), obtenido al cortar las curvas de peligro en una probabilidad de diseño determinada de superarse en 50 años. (C) Mapa de probabilidad producido para mostrar la probabilidad de superarse en 50 años en cualquier punto de interés, obtenida al cortar las curvas de peligro en un nivel de tolerancia determinado de la altura máxima de inundación. Fuente: (Basili et al., 2021).....	12
Figura 7. Definición de parámetros de inundación. Fuente: Aniel-Quiroga, 2018.....	13
Figura 8. Flujo de trabajo para la obtención de mapas de evacuación. Fuente: IH Cantabria	19
Figura 9. Ilustración de distribución de las personas en evacuación. Fuente: Muhammad et al., 2021	21
Figura 10. Ejemplo de función de Tobler donde se calcula la velocidad de senderismo según el pendiente del terreno.Fuente: Van Etten, 2017	22
Figura 11. División política de la República de Chipre e imagen satelital. Fuente: Alexander-Michael Hadjilyra (izquierda) y Google Earth (derecha).....	25
Figura 12. Ubicación y contexto geotécnico de Chipre. (PTZ: Falla Transformante de Paphos; DSF: Falla del Mar Muerto; M-KFZ: Zona de Falla Misis-Kyrenia; OFZ: Falla de Ovgos). Fuente:Evelpidou et al., 2022	26

1. Introducción

Según la ONU, en el período comprendido entre 1998-2017, más de 250.000 personas fallecieron debido a tsunamis. Estos fenómenos naturales, son una serie de ondas de período y longitud altamente largos que se producen debido a una perturbación bajo el agua, generalmente asociada con los terremotos que ocurren en el fondo del océano o cerca de él.

Eventos como el tsunami del Océano Índico en 2004, Chile en 2010 o Japón en 2011 hicieron aumentar la conciencia global del peligro generado por esta amenaza. A raíz del evento sucedido en 2004, la Unidad de Tsunamis de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO fue establecida. El principal objetivo era y es el de prevenir pérdidas de vidas y bienes económicos causados por los tsunamis ofreciendo el análisis de riesgos mediante el TWS (Tsunami Warning System) y capacitando a las comunidades con medidas de preparación para una gestión adecuada del riesgo (COI de la UNESCO. 2022).

Es fundamental implementar estrategias para gestionar eficazmente los riesgos asociados a los tsunamis. En este sentido, es necesario contar con mapas de inundación y evacuación que permitan una respuesta rápida y efectiva después de recibir un mensaje de alerta. Estas acciones complementarán las medidas de predicción y fortalecerán la capacidad de respuesta ante un evento de tsunami.

En 2001, la NOAA estableció el programa Tsunami Ready © con la finalidad de fomentar y reconocer la preparación comunitaria ante tsunamis. Este programa tiene como objetivo ayudar a reducir los riesgos relacionados con estos fenómenos para individuos y comunidades. Ya en el marco internacional, desde 2015 la IOC-UNESCO ha estado promoviendo el reconocimiento del programa. Tsunami Ready fomenta una preparación ante tsunami a través de una colaboración entre agencias nacionales y locales de alerta y gestión de emergencias, protección civil y otras autoridades gubernamentales, científicos, líderes comunitarios y el público (COI de la UNESCO. 2022). Dentro de los indicadores que se encuentran para la acreditación está la elaboración de mapas de inundación y evacuación de la localidad.

El potencial de destrucción costera en Lárnaca debido a tsunamis de origen sísmico es significativo. Este hecho se sustenta en registros históricos y estudios estadísticos recientes realizados por Fokaefs y Papadopoulos (2007). Estos estudios demuestran mediante indicadores geológicos y geomorfológicos que todas las partes de Chipre han sido inundadas al menos una vez por un tsunami o evento extremo. En la zona del mar Levantino, se han identificado 24 tsunamis, incluyendo eventos notables como los de 1202, 1222, 1408 y 1953 (**Figura 1**). Este último tsunami ocurrió tras un evento sísmico bimodal que cobró la vida de más de 40 personas en Paphos (*in-cyprus.com (philenews.com)*). (2023, 9 de noviembre). *World Tsunami Awareness Day: Risk of one occurring in Cyprus is real*. *in-cyprus.com / Latest News in Cyprus (philenews.com)*.

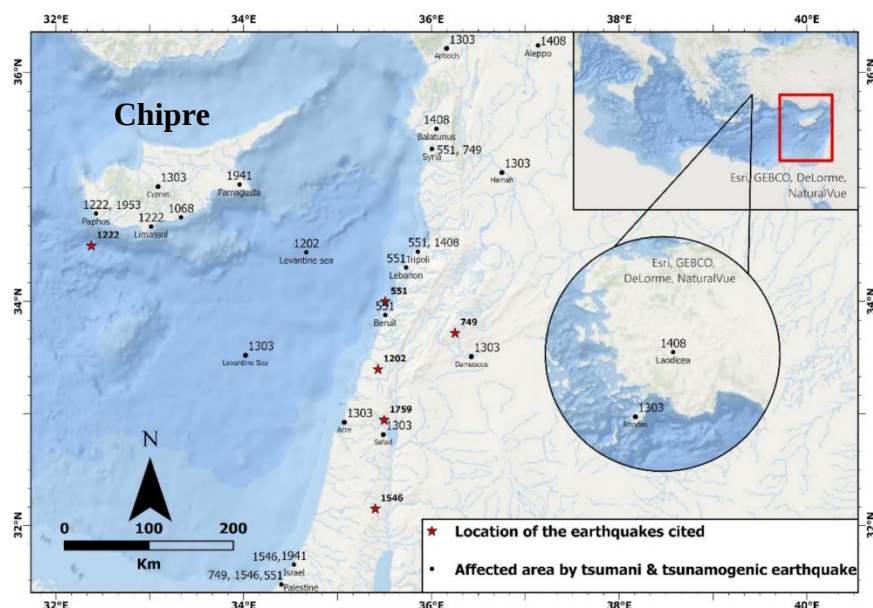


Figura 1. Registro histórico de sismos y tsunamis. Fuente: Evelpidou et al. 2022

Dentro del marco del proyecto CoastWAVE¹, uno de cuyos objetivos es implementar el programa IOC UNESCO Tsunami Ready en 7 comunidades de la región NEAM (North Eastern Atlantic and Mediterranean region), se busca preparar la ciudad de Lárnaca en Chipre para formar parte del programa Tsunami Ready. Este trabajo tiene como finalidad establecer rutas de evacuación y elaborar mapas de evacuación para la ciudad de Lárnaca, con el fin de reducir el riesgo para la población ante la eventual llegada de un tsunami.

La evacuación es una medida sumamente efectiva para disminuir la cantidad de víctimas en caso de un tsunami. Es fundamental llevar a cabo una adecuada modelización y planificación, que incluya la validación en el terreno y la participación activa de la comunidad. Esto es esencial para preparar a la comunidad, reducir su vulnerabilidad y prevenir la pérdida de vidas.

Un plan de evacuación requiere de un análisis del territorio y de los elementos imprescindibles, modelización de la evacuación y la propuesta de alternativas para aquellas zonas más limitadas (P. González-Riancho et al., 2013). Tal como describen los escritores, la evacuación se basa en tres fases: análisis, modelización y planificación. La primera de ella consiste en analizar la peligrosidad de la ciudad de Lárnaca. La segunda consiste en aplicar un modelo de evacuación y finalmente se aplicarán los resultados mediante la participación de los actores interesados dando como resultado final las rutas y mapas de evacuación.

¹: “Adapt Global Tsunami Ready Standards and Guidelines and pilot Tsunami Ready within the framework of the ICG/NEAMTWS”

1.1 Objetivo

El propósito de este estudio es elaborar mapas de evacuación por tsunami en la ciudad de Lárnaca, Chipre. Además, este trabajo tiene un objetivo académico, que es complementar la formación como estudiante del Máster en Costas y Puertos, aplicando las diversas herramientas adquiridas durante el curso.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Aplicación del modelo IH-META y su adaptación para el caso de estudio
2. Elaboración de mapas de peligrosidad
3. Elaboración de mapas de evacuación
4. Selección de puntos de acogida para la evacuación

1.2 Datos utilizados

Con el fin de llevar a cabo este proyecto, se ha hecho uso de una serie de datos proporcionados por diversas entidades, con el objetivo de garantizar su correcta ejecución.

- Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV): Proporciona diferentes archivos vectoriales de inundación obtenidos mediante un método probabilístico que será explicado posteriormente. En este, se tienen valores de cota de inundación en metros.
- Geological Survey Department (GSD): Proporción de información SIG en formato vectorial y ortofoto. Carreteras, edificios, puntos de accesos a playas, límites administrativos, censo poblacional del 2011, línea de costa del 2014, ortofoto de 2014 de la zona costera.
- Department of Lands and Surveys of Cyprus: Provisión de la batimetría y topografía para el área de estudio. MDT de malla de 5 metros.

A continuación, se anuncian las partes locales involucradas en el proyecto:

- Lárnaca Municipality: Participación en talleres de mapas de inundación y evacuación por tsunami; toma de decisiones sobre las rutas de evacuación y áreas de reunión seleccionadas; aprobación de mapas de inundación y evacuación por tsunami.
- Cyprus Marine and Maritime Institute: Soporte técnico para el ayuntamiento de Lárnaca.
- Local civil protection units: Contribución a la respuesta de emergencia local; participación en talleres y ejercicios.

A continuación, se anuncian las partes nacionales involucradas en el proyecto:

- Cyprus Civil Defence: Coordinadores del proyecto; jefes de la junta nacional de tsunamis.
- Cyprus Geological Survey Department: Participación en talleres de mapas de inundación y evacuación por tsunami.

Con tal de complementar datos no disponibles como usos de suelo, se utilizaron los datos de fuente abierta de OpenStreetMap para poder completar mejor los mapas.

1.3 Organización del trabajo

Capítulo 1. Introducción: Explicación detallada sobre la razón del proyecto, los objetivos que se persiguen y datos utilizados.

Capítulo 2. Marco teórico y metodológico: En este apartado se describen los diferentes mecanismos de formación de tsunamis, la estrategia contra tsunamis, la metodología para evaluar la inundación incluyendo el tsunami y la metodología para evaluar la evacuación donde se describe el modelo y la adaptación para el caso de estudio.

Capítulo 3. Zona de estudio: En este capítulo se hace una descripción de todos los ámbitos (geográfica, geológica, social...) del área de estudio.

Capítulo 4. Mapas de peligrosidad: En este apartado se presentan los mapas de peligrosidad.

Capítulo 5. Exposición: Análisis de la cuánta población y edificios críticos serían expuestos en diferentes escenarios de tsunamis.

Capítulo 6. Mapas de evacuación: Presentación de los mapas de evacuación finales con la introducción de los resultados de las rutas de evacuación obtenidas de IH-META.

Capítulo 7. Discusión: Análisis de los resultados obtenidos de las rutas y mapas de evacuación.

Capítulo 8. Conclusiones: Descripción de las conclusiones obtenidas del trabajo del estudio de rutas de evacuación en Lárnaca.

Capítulo 9. Bibliografía: Presentación de la lista bibliográfica de donde se ha extraído información.

Anexos: Presentación de mapas y materiales complementarios del trabajo.

2. Marco teórico y metodológico

En este capítulo se describen diferentes conceptos teóricos necesarios para entender el contexto del proyecto y que metodología se ha llevado a cabo para cumplir con los objetivos de este.

2.1 Definición de tsunami

Son series de ondas de longitud y períodos largos que se propagan como ondas gravitacionales los periodos del cual son de 5 a 60 minutos. Estas olas pueden extenderse a grandes distancias y recorrer todo el océano sin perder mucha energía, según lo mencionado por la IOC en 2013. Mayoritariamente el origen de estos fenómenos es tectónico, pero también puede ser volcánico, deslizamiento de tierra submarinos, derrumbes de montañas en zonas cerca de costa y el impacto de un meteorito de dimensiones elevada (COI, 2013).

Cabe destacar que estos fenómenos se propagan en aguas someras, donde su longitud de onda es muy grande en comparación con la profundidad, y la velocidad de la onda solo depende de la gravedad y la profundidad.

2.2 Definición de términos

Durante el desarrollo de este proyecto se habla de los términos de peligrosidad y amenaza, junto a vulnerabilidad, exposición y riesgo. A continuación, se definen para entender los conceptos.

Amenaza, Peligro o Peligrosidad: Es el proceso, fenómeno natural o actividad humana que conlleva el potencial de causar pérdidas de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos o degradación del medio ambiente. Los peligros pueden ser de origen natural o antropogénico y pueden caracterizarse por su ubicación, probabilidad de ocurrencia, intensidad o magnitud, duración y extensión. Las amenazas pueden ser eventos de aparición repentina (por ejemplo, inundaciones repentinas, tormentas, flujos de lodo, deslizamientos de tierra, terremotos) o bien procesos graduales (por ejemplo, sequías, salinización) (UNDRR, 2016).

Los tsunamis son difíciles de clasificar: aunque son provocados por terremotos y otros fenómenos geológicos submarinos, básicamente se convierten en un proceso oceánico que se manifiesta en forma de amenaza costera relacionada con el agua (UNDRR, 2016).

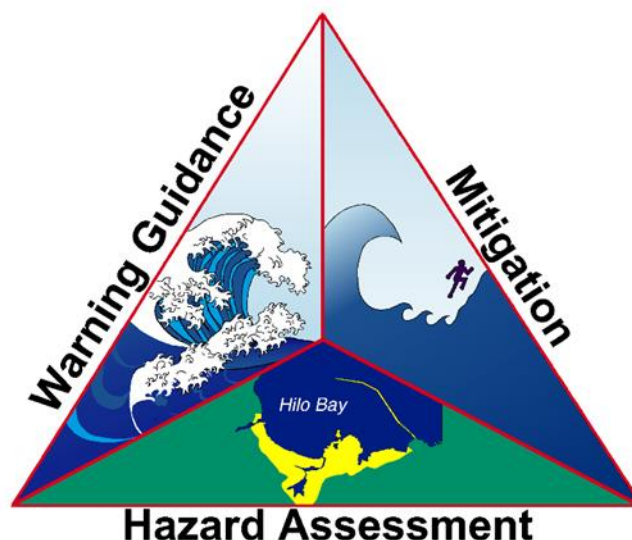
Vulnerabilidad: Condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una persona, una comunidad, los bienes o los sistemas a los efectos de las amenazas (UNDRR, 2016).

Exposición: Situación en que se encuentran las personas, las infraestructuras, las viviendas, las capacidades de producción y otros activos humanos tangibles situados en zonas expuestas a amenazas (UNDRR, 2016).

Riesgo: Riesgo es la posibilidad de que se produzcan consecuencias o impactos adversos debido a la interacción entre una o más amenazas naturales o inducidas por el hombre, la exposición de las personas las infraestructuras y los ecosistemas, y las condiciones de vulnerabilidad del sistema (UNDRR, 2016).

2.3 Estrategia para la gestión del riesgo frente a tsunamis

En la **Figura 2**, se muestra el esquema del Programa Nacional de Mitigación del Riesgo de Tsunamis de la NTHMP de la NOA desarrollado en 1995 donde se observan las tres líneas de acción a seguir, las cuáles se describen a continuación.



*Figura 2 Esquema del NTHMP donde muestra las tres partes del programa de mitigación ante la amenaza de tsunamis.
Fuente: NTHMP.*

El "Hazard Assessment" o evaluación de la peligrosidad por tsunamis es un paso fundamental para comprender y prevenir los peligros asociados a estos eventos naturales catastróficos. Esta evaluación se centra en la identificación y análisis de las fuentes de tsunami, así como en la estimación de la amenaza que representan para las áreas costeras vulnerables.

El análisis de la peligrosidad de tsunamis involucra varios componentes esenciales. En primer lugar, dado que los terremotos son una de las principales causas desencadenantes de tsunamis se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la sismicidad histórica y de las fallas tectónicas cercanas a la costa. Se estudian eventos pasados para comprender la frecuencia, magnitud y ubicación potencial de futuros terremotos capaces de generar tsunamis.

A partir de modelos numéricos, se calcula que región costera quedaría inundada en caso de tsunami. Para ello, se calculan diferentes parámetros como la cota de inundación o la altura de ola del tsunami. (UNESCO-IOC, 2009).

Las "Guías de Advertencias" (*Warning Guidance*) representan una medida crucial para notificar a la población sobre la posible llegada de un tsunami y concienciar sobre una situación de emergencia extrema. Este plan de emergencia incluye la implementación de mensajes de alerta, la realización de ejercicios y simulacros en áreas vulnerables, y la colocación de carteles informativos. Todo esto tiene como objetivo asegurar la efectividad y la preparación adecuada del sistema de alerta, en caso de que su activación sea necesaria (National Tsunami Hazard Mitigation Strategic Plan, 2018-2023).

Existen diferentes tipos de sistemas de alerta que pueden estar vinculados a los sistemas de detección de terremotos. Por un lado, los que identifican las señales sísmicas y

posteriormente evalúan la posibilidad de generar tsunamis bajo esas condiciones sísmicas. Por otro lado, se encuentran los sistemas basados exclusivamente en el análisis del tsunami a través de boyas DART (Meining et al., 2005), las cuales monitorean el océano profundo. Estos últimos deben ubicarse a cierta distancia de la costa, considerando que la ola tarde al menos una hora en llegar. Es relevante resaltar que, cuando se combinan con el análisis de terremotos, los resultados obtenidos son aún más precisos.

En última instancia, encontramos las "Medidas de Mitigación" (Mitigation) para la reducción del riesgo de tsunami, que comprenden acciones destinadas a disminuir el impacto mediante estrategias, enfoques y medidas con el objetivo primordial de mitigar el riesgo de tsunami (UNISDR, 2009).

Para una actualización más reciente de la gestión del riesgo por tsunami encontramos este esquema presentado en la **Figura 3** del estudio realizado por Aguirre Ayerbe et al. 2018.

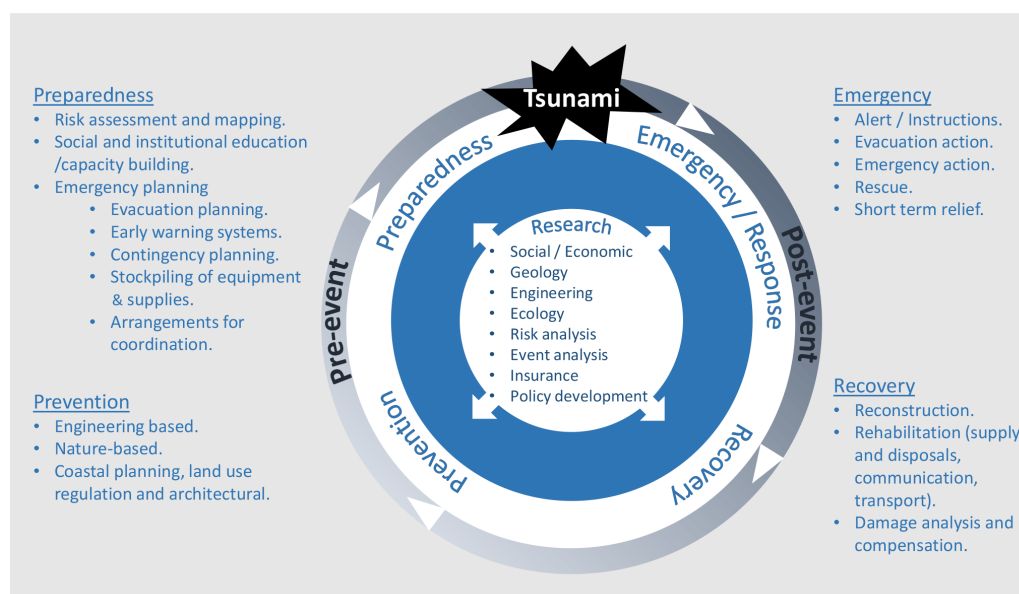


Figura 3. Ciclo de gestión del riesgo de desastres. Fuente: Aguirre Ayerbe et al., 2018

Como señala el autor, existen principalmente dos enfoques pre evento: prevención y preparación, cada uno con sus diversas aplicaciones.

El enfoque de prevención busca reducir el impacto del tsunami. Para ello, se implementan medidas ingenieriles de protección frente al tsunami, así como la planificación y el control del desarrollo costero para reducir la exposición de la población y las infraestructuras a los riesgos asociados con estos eventos naturales.

La prevención se define, según Aguirre Ayerbe et al., 2018, como acciones y políticas que permiten reducir la amenaza de tsunami. Dentro de esta, existen diferentes:

- Medidas de ingeniería: Estructura físicas tales como muros marítimos o espigones.
- Medidas basadas en la naturaleza: Aplicación de medidas basadas en el medio ambiente como restauración de dunas o alimentación de playas.
- Medidas de planificación: Creación de normas o recomendaciones para una conducta adecuada en la construcción o en la planificación en zonas costeras.

Por otro lado, el enfoque de preparación se centra en la capacidad de respuesta y la gestión de emergencias. Esto incluye la capacitación y preparación de la población en cómo reaccionar adecuadamente ante una alerta de tsunami, la planificación de rutas de evacuación y la construcción de infraestructuras resilientes para minimizar los daños en caso de que un tsunami ocurra.

La preparación se define, según Aguirre Ayerbe et al., 2018, como la educación de la población para poder anticiparse a un problema o saber actuar en el momento que impacta un tsunami. Encontramos tres medidas:

- Mapas: Material visual y entendible que permite a la población guiarse en una situación de emergencia.
- Medidas sociales: Concienciación de la población susceptible de ser afectada por un tsunami y así prepararla para estas amenazas.
- Medidas de emergencia: Actuaciones que se realizan para saber qué hacer en caso de tsunami como por ejemplo evacuación vertical o elaboración de sistemas de alerta.

Por otro lado, se encuentra la fase post evento: emergencia y recuperación. Las medidas de emergencia garantizan la seguridad pública al emitir alertas y planificar la evacuación de personas y ciertos bienes (por ejemplo, embarcaciones) en riesgo hacia áreas seguras o refugios cuando se detecta un tsunami (Aguirre-Ayerbe et al., 2018). La recuperación es la restauración o mejora de los medios de vida y la salud, así como de los activos, sistemas y actividades económicos, físicos, sociales, culturales y medioambientales de una comunidad o sociedad afectada por un desastre, alineándose con los principios del desarrollo sostenible y "reconstruir mejor", con el fin de evitar o reducir el riesgo de futuros desastres (UNDRR, 2016).

En este proyecto se trabajará en medidas para la reducción del riesgo de tsunamis mediante la obtención de mapas de evacuación.

La NTHMP en su documento (National Tsunami Hazard Mitigation Strategic Plan, 2018-2023), define los mapas de evacuación por tsunami como representaciones gráficas detalladas que indican las áreas costeras que deben ser evacuadas para evitar daños causados por las olas de tsunami. Estos mapas están diseñados para proporcionar información clara y específica a las comunidades expuestas, con el fin de guiarlos hacia lugares seguros y fuera de la zona de riesgo ante una amenaza de tsunami.

La evacuación es una medida tomada ante la inminente o prevista amenaza de inundaciones que podrían poner en peligro la vida, la salud o el bienestar. Consiste en que las personas se desplacen desde sus hogares o lugares de trabajo hacia lugares considerados 'seguros', fuera de la zona de riesgo de inundación, donde puedan protegerse hasta que sea seguro y adecuado regresar (Flood Hazard Research Centre, 1996).

Existen dos tipos de evacuación, vertical y horizontal (**Figura 4**). La primera, es una evacuación alejándose de la costa hacia la zona segura ante un tsunami utilizando (preferentemente) el desplazamiento a pie en lugar de en coche. Esta estrategia necesitará de la red viaria, para poder realizar la evacuación a través de las diferentes calles. Por otra parte, encontramos la evacuación vertical que se basa en dirigirse hacia terrenos más elevados. Para

poder encontrar estos puntos potenciales, se necesita de información sobre la altura y resistencia de los materiales de los edificios.



Figura 4. Imagen izquierda: Ejemplo de evacuación vertical en Japón. Imagen derecha: Ejemplo de evacuación horizontal en Tailandia. Fuentes: Izquierda: Steel Construction. Derecha: Alexander Klink

Tal como se explica en el FLOODsite project (HR Wallingford, 2006) existen seis fases en cualquier evacuación.

1. Preparación pre-evacuación
2. Fase de emergencia por inundación
3. Evacuación
4. Refugio de emergencia (conocido en inglés Assembly Area)
5. Retorno a lugares de origen
6. Recuperación a largo plazo

2.4 Metodología para la evaluación de la amenaza de tsunami en Lárnaca

En el campo de la evaluación de amenazas, existen dos enfoques principales para evaluar las amenazas: el determinista y el probabilístico. Los enfoques deterministas se basan en uno o unos pocos escenarios específicos, asumiendo el peor caso posible o una serie de escenarios representativos de lo peor esperado. Estos escenarios no están vinculados a ningún período de retorno y buscan producir el resultado negativo máximo. Por otro lado, los enfoques probabilísticos buscan cubrir toda la variabilidad mediante el uso de tasas de recurrencia e incertidumbre. Utilizan numerosos escenarios y diferentes técnicas estadísticas para abarcar las incertidumbres aleatorias y epistémicas, considerando la diversidad natural de posibles escenarios con diferentes tasas de recurrencia y teniendo en cuenta posibles deficiencias en el conocimiento. En resumen, mientras que el enfoque determinista se centra en escenarios específicos y extremos, el enfoque probabilístico considera la incertidumbre y utiliza un enfoque más amplio y completo en la evaluación de riesgos (Annaka et al., 2007, Behrens et al., 2021).

En este trabajo, se ha utilizado una zona de inundación por tsunami derivada de un análisis probabilístico desarrollado por el Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, donde los resultados obtenidos han sido entregados para el presente TFM mediante un raster de inundación con un valor de periodo de retorno y percentil.

El periodo de retorno es el intervalo medio de tiempo, generalmente expresado en años, al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso de una determinada magnitud. El percentil representa la incertidumbre.

La caracterización de la amenaza se hizo en dos partes: una previa caracterización de las fuentes de tsunami, desagregación y selección final de la fuente para el análisis de PTHA local, y una segunda, de simulaciones de inundación para fuentes seleccionadas utilizando un cómputo de alto rendimiento (clúster).

En esta primera parte, se llevó a cabo un análisis completo de la amenaza y una caracterización de la fuente de tsunami. Para abordar la gran variabilidad de terremotos y sus consecuencias, en este caso, tsunamis, es necesario simular un gran número de eventos. La **Figura 5** proporciona una representación visual de cómo se distribuyen geográficamente las tasas anuales de terremotos de magnitud 6.0 o superior, utilizando diferentes modelos sísmicos y criterios de separación en función de las distancias de corte utilizadas en el análisis.

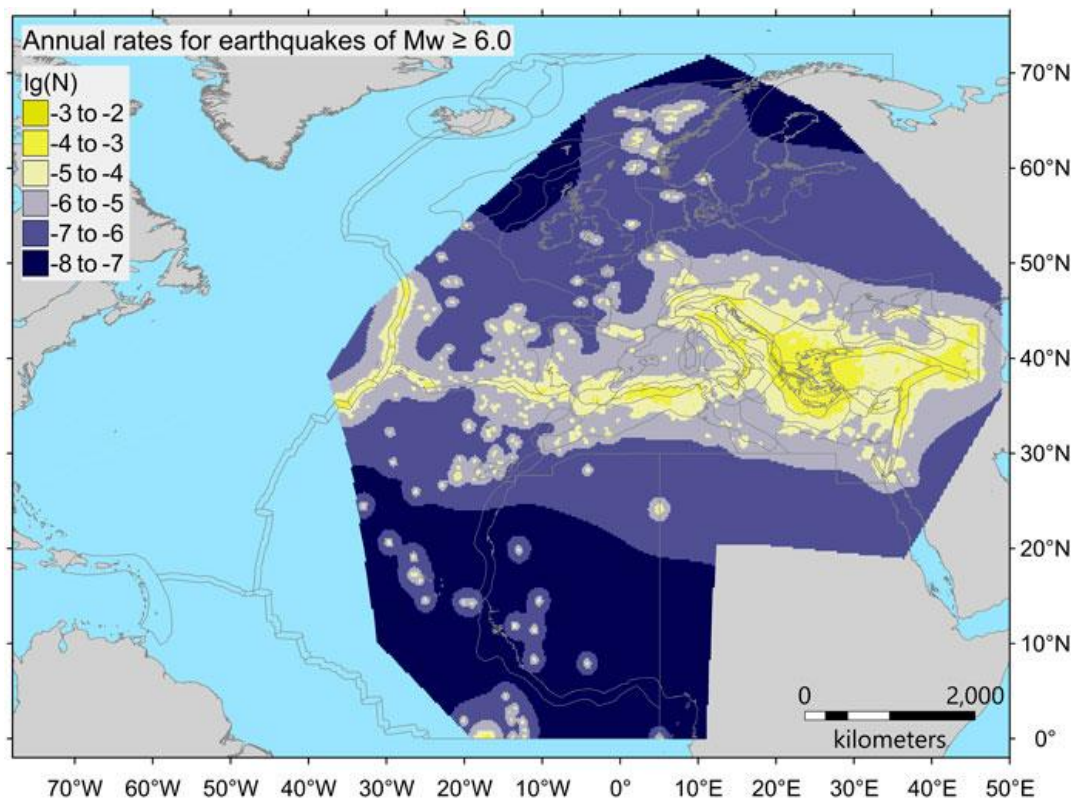


Figura 5. Mapa que muestra la distribución geográfica de las tasas anuales de terremotos (escala logarítmica común) para $M_w \geq 6.0$. Fuente: (Basili et al., 2021).

Esta figura es relevante para comprender la amenaza de tsunami en el contexto del análisis general. En este mapa, se ha aplicado una distancia de separación de 5 km para clasificar los terremotos entre los tipos PS (Principal Seismicity) y BS (Background seismicity).

El PS engloba los terremotos de mayor magnitud generados por fallas importantes reconocidas, como los límites de placas y las interfaces de subducción. Por otra parte, el BS abarca toda la actividad sísmica difusa dentro de una región definida por la tectónica. Incluye terremotos que no necesariamente están relacionados con fallas mayores reconocidas, pero que contribuyen a la sismicidad general de la zona. Las fuentes bajo el tipo BS muestran mayor variabilidad debido a un conocimiento limitado, especialmente en el caso de terremotos de magnitudes más bajas. Esta separación se realiza asignando los terremotos ubicados dentro de la distancia de corte dada desde las fuentes PS a los tipos PS/SPS (Special Principal Seismicity), mientras que los terremotos restantes se asignan a los tipos BS/SBS (Special Background Seismicity). El modelo de peligro sísmico también incluye la distribución de las tasas anuales de terremotos calculadas con una distancia de corte de 10 km (Basili et al., 2021).

Para ello se realiza una desagregación (Tonini et al., 2021) basada en el sitio de estudio donde se estiman las amenazas regionales en el NEAMTHM18 (Basili et al., 2021). El algoritmo de desagregación clasifica los escenarios que contribuyen al sitio objetivo en función de su importancia relativa para el peligro local marino. Luego, se define un "grado de precisión" para aproximar el peligro local en términos de similitud con las curvas de peligro originales.

El resultado es una lista de escenarios de terremotos con sus parámetros necesarios para simular tsunamis y sus tasas de ocurrencia. Dado que el objeto del trabajo de este TFM no son los mapas de inundación se remite al lector a NEAMTHM18 (Basili et al., 2021), donde se pueden consultar los detalles.

Para la segunda parte, fue necesario, escoger los tsunamis y simularlos mediante el modelo numérico Tsunami-HySEA (Macías et al., 2017) el cual aplica las ecuaciones no lineales en profundidades reducidas mediante (Okada, 1985) y la condición de (Kaijura, 1963). El resultado que se nos transfirió fue la cota de inundación y la probabilidad por escenario en Lárnaca. A continuación, se almacenaron los máximos durante cada simulación de escenario en cada punto de la cuadrícula interna de 10 m para tres parámetros hidrodinámicos del tsunami: la profundidad del flujo, la velocidad y la cantidad de flujo de momento (velocidad al cuadrado multiplicada por la profundidad del flujo).

Las curvas de peligrosidad se calcularán en cada punto de la cuadrícula de 10 m para los diferentes parámetros del tsunami. Para cada parámetro y umbral (Percentil), se determina la probabilidad de excedencia observando la intensidad máxima en cada simulación y sumando su probabilidad a la de otros escenarios que superan el umbral. En la **Figura 6** se muestra un ejemplo de las funciones de distribución en un punto de la malla en la zona inundada, y su aplicación pasa por elaborar mapas de peligrosidad para un periodo de retorno dado.

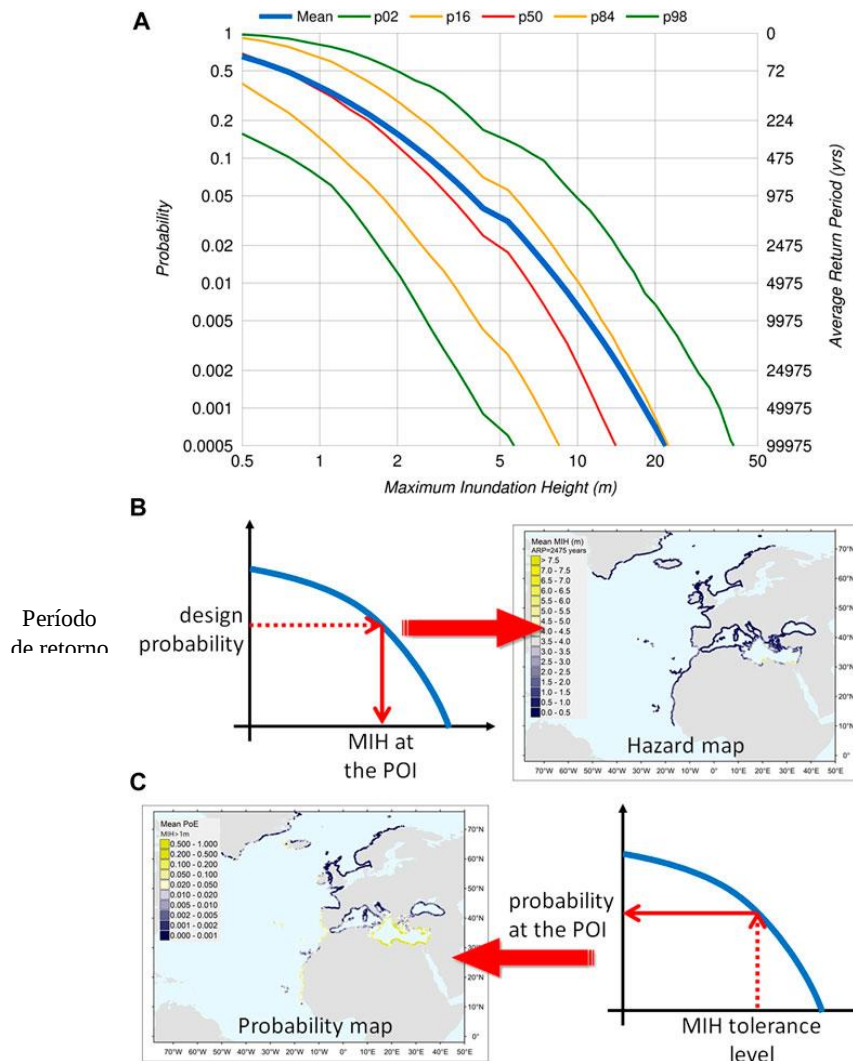


Figura 6. (A) Ejemplo de un conjunto de curvas de peligro calculadas para un punto de interés. Cada curva representa un percentil diferente de todos los modelos que abarcan la incertidumbre epistémica. (B) Mapa de peligrosidad para un periodo de retorno dado, para mostrar los valores de la altura máxima de inundación (MIH, en metros) en cualquier punto de interés (POI), obtenido al cortar las curvas de peligro en una probabilidad de diseño determinada de superarse en 50 años. (C) Mapa de probabilidad producido para mostrar la probabilidad de superarse en 50 años en cualquier punto de interés, obtenida al cortar las curvas de peligro en un nivel de tolerancia determinado de la altura máxima de inundación. Fuente: (Basili et al., 2021).

Los escenarios simulados representan múltiples modelos alternativos que abarcan la incertidumbre epistémica, y se calcularán diversas curvas que reflejen la incertidumbre del modelo. A partir de estas curvas, se generarán varios mapas de peligrosidad para diferentes valores de probabilidad, incluyendo un conjunto de periodos de retorno promedio fijos y diferentes percentiles de la incertidumbre epistémica. Estos mapas muestran cómo varía en el espacio diferentes combinaciones de parámetros hidrodinámicos de tsunamis y periodos de retorno.

Finalmente fue seleccionado para el mapa de evacuación la amenaza de 10000 años de periodo de retorno y percentil 84.

En los mapas de peligrosidad, se refiere a la variable de profundidad máxima de agua como cota de inundación. En la **Figura 7** se presenta de forma esquemática los parámetros de inundación.

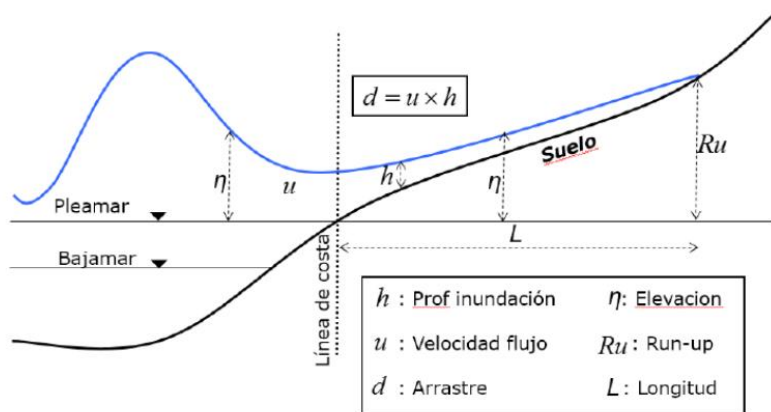


Figura 7. Definición de parámetros de inundación. Fuente: Aniel-Quiroga, 2018

A continuación, se explican brevemente las variables definidas en la **Figura 7**. Estos parámetros han sido definidos en el TFM titulado “Evaluación de la peligrosidad por tsunami en el municipio de Chipiona, Cádiz, 2020”.

- i. Elevación máxima de altura de ola en el mar (η): Definida como la altura que tiene la superficie libre del mar medida desde el datum vertical de referencia que se realice la inundación.
- ii. Profundidad de inundación (h): Elevación de la lámina de agua respecto al suelo, es decir, la diferencia entre la elevación máxima de altura de ola y el terreno. En los mapas de peligrosidad del proyecto, se ha trabajado con esta variable.
- iii. Velocidad de flujo (u): Velocidad de las partículas.
- iv. Arrastre (d): Refleja el producto de las variables velocidad de flujo y profundidad de inundación. Dicha variable nos sirve para cuantificar el riesgo de arrastre de una persona.
- v. Run-up (Ru): Es la elevación hasta el punto donde llegó la máxima inundación en tierra. (Elevación medida desde el nivel de referencia vertical). Dicho valor es igual al valor de la cota del terreno en el último punto del terreno inundado.
- vi. Longitud de inundación (L): distancia desde la línea de costa hasta el punto del terreno inundado más alejado.
- vii. Tiempo de llegada (t): Tiempo mínimo de la onda desde la generación al punto de estudio.

2.5 Metodología para la evaluación de la evacuación en Lárnaca

Según el proyecto FLOODsite (HR Wallingford, 2006) se proponen tres tipos de modelos para llevar a cabo la modelación de la evacuación:

- Modelos de simulación de tráfico: Estos modelos se centran en simular el flujo de tráfico y la movilidad de las personas durante una evacuación. Ayudan a comprender cómo se puede ver afectado el tráfico en carreteras y otras vías de evacuación, permitiendo identificar posibles congestiones y problemas logísticos.
- Modelos de comportamiento de evacuación: Estos modelos se enfocan en entender cómo las personas toman decisiones durante una evacuación, incluyendo factores como la percepción del riesgo, el conocimiento de las rutas de evacuación, y la influencia de otras personas. Estos modelos ayudan a prever el comportamiento humano durante situaciones de evacuación, lo que es crucial para diseñar estrategias eficaces de evacuación.
- Modelos de gestión de línea de tiempo/ruta crítica: Estos modelos proporcionan una representación visual de los eventos y actividades clave durante una evacuación. Permiten identificar las etapas críticas y el orden de las acciones necesarias para una evacuación exitosa. Estos modelos son útiles para la planificación y coordinación de la evacuación, asegurando que cada paso se realice en el momento adecuado y en la secuencia correcta.

En este apartado, se explica el proceso llevado a cabo en el trabajo para la aplicación del modelo de evacuación IH-META, diseñado por IHCantabria. Esta herramienta tiene como fin el poder obtener la ruta óptima por lo tanto pertenece al tercer grupo de los mencionados anteriormente.

Metodología para aplicar el modelo IH-META en Lárnaca

A continuación, se describe la metodología seguida para obtener los mapas de evacuación en Lárnaca, la cual se resume en las siguientes fases:

1. Recopilación y validación de la información existente

La fase inicial requirió de la recolección y verificación de la información necesaria para garantizar la ejecución adecuada y exitosa del mismo. En ciertos casos, fue necesario utilizar datos de fuentes abiertas para completar información necesaria como los usos de suelo.

2. Análisis preliminar

Esta segunda etapa involucra una minuciosa exploración de la zona de estudio con el propósito de obtener un diagnóstico preliminar del área de estudio, incluyendo la distribución de la población y las infraestructuras humanas.

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del territorio, prestando especial atención a todos los factores que influyen en la planificación e implementación de un plan de evacuación. Esto abarcó el estudio de la población, considerando su densidad y distribución en diferentes distritos, así como grupos más sensibles ante tsunamis. También se analizó detalladamente el relieve topográfico, incluyendo el MDT y la pendiente del terreno. Además, se examinaron los elementos físicos urbanos y el ordenamiento territorial, incluyendo la organización de la ciudad, el acceso a las playas y la infraestructura vial. Asimismo, se efectuó una evaluación de los edificios otorgando especial importancia a edificios críticos como se verá más

adelante. Durante el análisis, se prestó especial atención a identificar áreas que pudieran ser utilizadas como puntos de reunión en caso de un evento de maremoto.

Por otra parte, uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de este proyecto es la información sobre la inundación por tsunami. En este sentido, se empleó como dato de entrada la zona de inundación por tsunami correspondiente con un periodo de retorno de 10000 años, cuyo modelo fue ejecutado por el INGV en el marco del proyecto.

A continuación, se presentan en diferentes subapartados las características a estudiar de la zona de estudio.

Zonas de acogida:

En primer lugar, se identificaron las áreas de acogida, definidas como las áreas a las que serán dirigidas las personas que evacúen. De acuerdo con Scheer et al., 2011, estas áreas deben cumplir una serie de requisitos.

En primer lugar, un área segura que no quede afectada por la inundación. En segundo lugar, que tenga capacidad de carga adecuada para poder albergar suficiente gente evacuada. Por último, presencia de suministros básicos, es decir, un lugar con acceso a agua potable, electricidad, cobertura telefónica y packs de emergencia.

Para calcular la capacidad de carga de estos puntos, se han considerado diferentes referencias sobre evacuación. Para llegar a un consenso, se ha tomado un valor medio siguiendo las diferentes referencias revisadas. Por una parte, Doga Dinemis Aman y Gulsen Aytac en 2022, estiman que 1 m² por persona en una situación post terremoto sería adecuado. Por otra parte, la Oficina de Gestión de Desastres de la República de Vanuatu requiere 1.5 m² en un ambiente abierto y en una estancia de corto plazo (Oficina Nacional de Gestión de Desastres del Gobierno de la República de Vanuatu, 2016). Otro estudio de la Cruz Roja en Mozambique describe 1.5 m² en centros de evacuación o 3.5 en refugios temporales (Community Shelter Guidelines, 2013). Finalmente, Nakai et al., 2021, diseñaron áreas de acogida para la evacuación de personas frente a tsunamis considerando 2 m² por persona. A partir de la bibliografía mencionada se valoró un espacio de 2 m²/persona.

La capacidad de carga de las zonas de acogida se calcula dividiendo el área de cada uno de los puntos, después de ser digitalizados mediante ArcGis Pro, por los 2 m² mencionados anteriormente. Este número se utilizará para calcular cuántas personas podrían caber en cada punto de acogida una vez se evalúe la peligrosidad ya que de ahí sabremos las personas necesarias a ser evacuadas.

A más, en este proyecto se han considerado aspectos como la accesibilidad y buenas condiciones generales de la superficie, que han sido revisados a partir de GoogleEarth y con las capas de usos de suelo.

Edificios críticos:

En segundo lugar, uno de los aspectos cruciales es la identificación de edificios críticos. Estas infraestructuras se han clasificado en tres categorías: edificios sensibles durante la evacuación debido a que albergan mucha población y/o población vulnerable, edificios de emergencia y edificios sin necesidad de ser identificados como críticos. Cada una de estas categorías desempeña un papel importante en la preparación y respuesta ante un posible tsunami.

Por un lado, los edificios de evacuación se refieren a las infraestructuras que pueden albergar una gran cantidad de personas durante el momento de impacto de un tsunami, ya sea debido a que son destinos turísticos, instituciones educativas o lugares de culto. En estas ubicaciones, se requiere la evacuación de un número significativo de individuos en caso de un tsunami.

- Hospitales
- Colegios
- Edificios religiosos (mezquitas e iglesias)
- Aeropuerto
- Edificios gubernamentales

Por otro lado, los edificios de emergencia son de vital importancia para asegurar la continuidad de los servicios y funciones esenciales de una comunidad después de un evento de tsunami. Estas edificaciones desempeñan un rol fundamental en la recuperación y prestación de asistencia en situaciones de emergencia.

- Estaciones de policía y bomberos
- Centros de comando y control
- Instalaciones de suministro de energía y agua

A estos lugares, también fueron introducidos como críticos algunos sitios turísticos ya que en diferentes momentos del día pueden agrupar a un gran número de personas como el Fuerte de Lárnaca y el Museo de Pierides.

Puntos de origen

Por otro lado, se requiere seleccionar los puntos de origen que también serán introducidos en el modelo. La selección de estos reviste una significativa importancia, y por ende, se ha tomado especial atención en su determinación. Estos puntos de origen son ubicados de manera planificada en edificios críticos, considerando que estos espacios suelen albergar una alta densidad de personas en el día a día y así tener controlados estos lugares en situación de evacuación.

Adicionalmente, se han añadidos puntos de origen ubicados en las zonas costeras. Esta decisión se fundamenta en la intención de diseñar rutas de evacuación que abarquen un trayecto más prolongado, orientado hacia la seguridad.

Y por último, se han introducido puntos en zonas densificadas de edificios con tal de marcar origen en partes donde puede vivir gran cantidad de gente y que les sea complicado buscar una ruta óptima para evacuar.

Red viaria:

Otro componente principal del análisis es conocer la red viaria, ya que la evacuación se realizará a través de estas vías y es esencial comprender el terreno. A partir del análisis de las vías incluidas en los datos de entrada, empleando imágenes satelitales de la zona de estudio, se obtiene una red viaria compuesta por 4 clases de vías. Los carriles de las calles son, en general, aproximadamente, 2,5-3 metros de anchura.

A continuación, se describen las diferentes clases y sus características:

- Clase 7: Callejones
- Clase 4: Un carril, anchura promedia de 2.75 metros
- Clase 3: Dos carriles, anchura promedia de 5.5 metros
- Clase 2: Cuatro carriles, anchura promedia de 11 metros

Distribución población:

Para el análisis de la población de Lárnaca, se emplearon los datos censales, que se encuentran distribuidos por áreas correspondientes a diferentes códigos postales. Se calcula la densidad poblacional en cada una de estas áreas, considerando también los grupos de más de 65 años y menos de 14 años de edad. Se asume que la población se encuentra distribuida de manera equitativa mediante las siguientes fórmulas:

- $Densidad\ poblacional\left(\frac{hab}{km^2}\right) = \frac{Población\ código\ postal}{Área\ de\ código\ postal}$
- $Densidad\ poblacional > 65\ años\left(\frac{hab}{km^2}\right) = \frac{Población > 65\ años\ código\ postal}{Área\ de\ código\ postal}$
- $Densidad\ poblacional < 14\ años\left(\frac{hab}{km^2}\right) = \frac{Población < 14\ años\ código\ postal}{Área\ de\ código\ postal}$

Esta distribución de población proporciona una perspectiva detallada sobre cómo está distribuida la ciudadanía según los censos y las categorías demográficas presentes en cada uno de ellos. Se refiere a esta población como "sensible" debido a que, en situaciones de evacuación, puede mostrar una velocidad inferior a la de un adulto promedio o presentar ciertos niveles de dependencia al comenzar el proceso de evacuación. Por esta razón, resulta crucial identificar y ubicar a este grupo demográfico específico.

Exposición por tsunami:

La evaluación de la exposición por tsunami, se ha abordado en dos etapas. En primer lugar, se ha determinado la población que se vería afectada por inundación. Por otro lado, se ha llevado a cabo un estudio detallado de los edificios críticos susceptibles de resultar perjudicados por dicho fenómeno. Previamente, se ha realizado un cálculo del área inundada por código postal, permitiendo así estimar la proporción en relación al área no afectada.

Para obtener estos resultados, se ha diseñado un código en Python que permite estimar la cantidad de personas y edificios expuestos. Estas herramientas están formadas por procedimientos de geoprocésamiento en ArcGis, y proporcionan una información importante que permite estimar la distribución de la población y la identificación de edificaciones críticas expuestas en diferentes escenarios de inundación. Estos instrumentos se pueden observar en el **Anexo I y II** (herramienta llamada Model Builder en ArcGis).

Para calcular la población afectada, se efectúa a través de esta fórmula:

- Población afectada = Área inundada x Densidad poblacional
- Población > 65 años afectada = Área inundada x Densidad poblacional > 65 años
- Población < 14 años afectada = Área inundada x Densidad poblacional < 14 años

En el caso de los edificios críticos, se sigue el criterio de notificar como afectados aquellos que entran en contacto con la inundación. Para lograr esto, se utiliza la técnica de intersección en ArcGIS, que consiste en cruzar las dos capas de datos correspondientes: la capa de edificios críticos y la capa de inundación. Si se produce una intersección entre ambas capas, se considera que el edificio crítico ha sido afectado por la inundación. Esta metodología permite identificar de manera precisa los edificios que están expuestos ante el fenómeno de inundación, proporcionando información relevante para la planificación y la adopción de medidas de protección y mitigación.

A través de estos resultados, se busca comprender en qué medida afectaría a la población una inundación u otra, dependiendo del periodo de retorno que se seleccione. A más, permite estimar la población expuesta a la zona de inundación por tsunami modelada y se han identificado los edificios críticos afectados.

Con estos conocimientos detallados sobre la distribución de la población expuesta, la ubicación de los edificios críticos y las características de la red vial, se puede determinar de manera precisa las áreas de evacuación y rutas seguras para cada uno de los diferentes escenarios de inundación. Esta información es esencial para diseñar un mapa de evacuación efectivo que guíe a la población hacia lugares seguros en caso de una amenaza de inundación, y para garantizar una respuesta rápida y coordinada ante un evento de desastre.

3. Modelado numérico

Los datos redactados y analizados en la fase anterior, hacen parte de los datos de entrada del modelo IH-META (Model for Evacuation Assessment) desarrollado por IH Cantabria. Este modelo de evacuación se basa en un sistema de información geográfica y tiene como objetivo principal determinar la delimitación de áreas seguras y definir las rutas óptimas.

El IH-META se clasifica como un tipo de modelo de gestión de ruta crítica, y su funcionalidad radica en calcular la ruta de evacuación óptima y eficiente (menos costosa) desde cualquier ubicación dentro de una zona peligrosa hasta un punto seguro. Utiliza técnicas avanzadas de análisis espacial y algoritmos de coste mínimo (Least Cost Distance) para llevar a cabo esta tarea de manera precisa y científicamente fundamentada.

Al aprovechar la información geoespacial y los datos recopilados durante el primer punto, el modelo IH-META es capaz de proporcionar unos resultados que nos permiten posteriormente una planificación eficiente de la evacuación en caso de una situación de desastre o emergencia causada por inundaciones. Esto garantiza una toma de decisiones informada y efectiva, lo que contribuye a mejorar la seguridad y proteger a la población en riesgo durante un evento de evacuación.

IH-META emplea algoritmos basados en geoprocursos del software ArcGIS, adaptados y programados para crear un sistema modular que permite ejecutar diferentes códigos de forma independiente. Esta flexibilidad y eficiencia han sido fundamentales para analizar la evacuación de manera ágil y obtener resultados precisos. La incorporación de herramientas avanzadas de geoprocuremento en ArcGIS ha potenciado la capacidad de análisis.

Los datos de entrada en el modelo de evacuación son:

- Zona inundada
- Profundidad de inundación (opcional)
- Edificios, incluyendo los definidos como críticos y de emergencia
- Puntos de acogida
- Puntos de origen, incluyendo accesos a playas y cercanías a edificios críticos
- Red viaria, incluyendo su clasificación en cuanto a anchura y tipo de pavimento
- Modelo digital de terreno (MDT)

A lo que se ha añadido, para la elaboración de los mapas:

- Cartografía base incluyendo elementos singulares del municipio.
- Toponimia base.

En la **Figura 8** se adjunta el proceso desarrollado por el Grupo de Gestión e Ingeniería de la Costa de IHCantabria con el fin de obtener los mapas de evacuación. En él, se pueden ver los diferentes datos de entrada y pasos a realizar para llegar al resultado final.

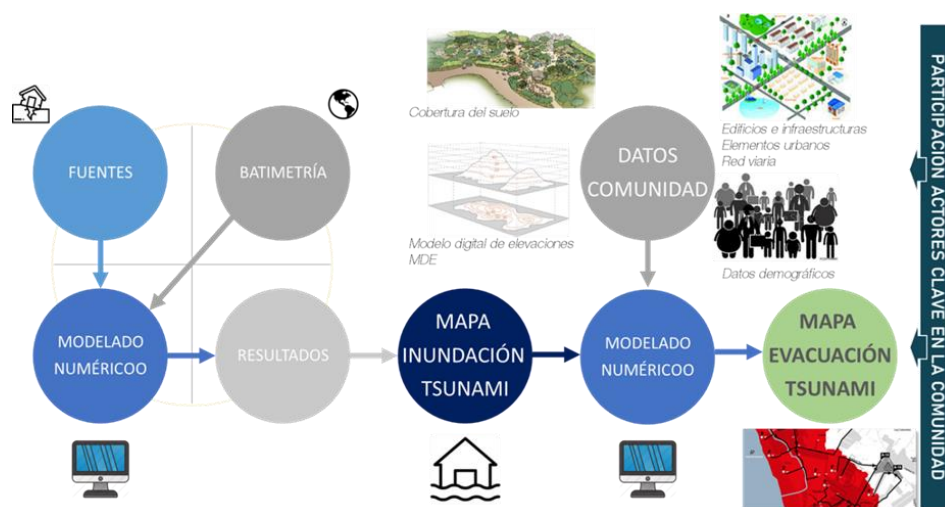


Figura 8. Flujo de trabajo para la obtención de mapas de evacuación. Fuente: IH Cantabria

A continuación, se explican los diferentes módulos ejecutados en el modelo de evacuación IH-META.

Preparación del área de estudio:

En este módulo, se introduce el Modelo Digital del Terreno (MDT) como herramienta esencial para analizar la topografía. El MDT se ajusta al sistema geoespacial correcto para garantizar precisión en los datos. Además, se delimita con detalle la zona de estudio siguiendo criterios rigurosos, asegurando su relevancia y representatividad. Esta elección precisa es crucial para resultados aplicables y válidos. En resumen, el módulo resalta la importancia del MDT en el análisis y destaca la necesidad de una delimitación precisa para asegurar la calidad de los resultados.

Preproceso de las capas vectoriales:

Mediante el uso de herramientas de geoprocesamiento, se obtiene una capa vectorial válida con la referencia espacial adecuada para el área de estudio, previamente ajustada mediante el MDT.

Preproceso de raster:

Asimismo, a través de herramientas de geoprocesamiento, se genera un raster válido con la referencia espacial correspondiente al área de estudio.

Zonificación - Evaluación de Seguridad Horizontal:

Dentro de este módulo, se establece el área de seguridad, que abarca la región no impactada por la amenaza de inundación (cota de inundación). Esto se logra al intersectar el raster de amenaza con la zona de estudio, generando dos capas distintas: la zona afectada por el tsunami y la zona libre de su impacto.

Valor de corrección de velocidad para una vía (SCV: Speed Correction Value)

Este módulo tiene como propósito principal generar un raster a partir de una capa de carreteras, en la que se incorpora un valor de corrección de velocidad único para cada categoría de vía. La misión fundamental de este módulo es ajustar y optimizar la velocidad de evacuación de las personas a lo largo de las calles presentes en la zona de estudio.

Las correcciones implementadas en el módulo, con valores de 0.8, 0.9 y 1, implican una reducción de la velocidad de evacuación en un 20% o 10%, respectivamente. Este enfoque permite considerar las diferencias inherentes a cada tipo de vía y su impacto en la velocidad de desplazamiento. El resultado obtenido es un raster que refleja las diversas clases de las vías, asignando los valores mencionados (0.8, 0.9 y 1) a cada segmento de calle en función de sus características específicas. Esta distribución de valores proporciona una representación de las variaciones en la velocidad de evacuación a lo largo de las distintas vías.

Para justificar estas cifras, en primer lugar, se ha calculado la densidad real de las calles de Lárnaca en función de la población expuesta en cada código postal. Para este cálculo, se ha asumido que la población expuesta evacuaría por las calles afectadas de cada barrio.

Primero, se ha asumido una anchura de 2.75 metros para las calles de la Clase 4, 5.5 metros para las de la Clase 3 y 11 metros para las de la Clase 2. Seguidamente, se suma la longitud de las calles de cada una de las clases por barrio y se multiplicó por el valor de anchura

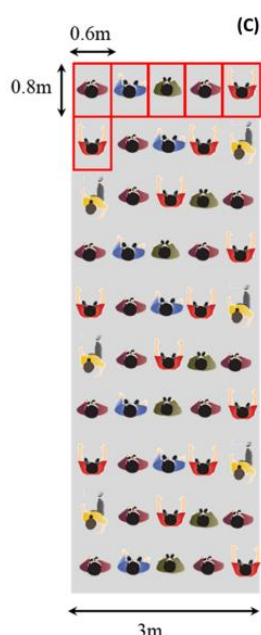
correspondiente a la clase. De esta manera, teníamos el área de cada clase de calle por código postal afectado por el tsunami, es decir, tres valores de área de calle para cada código postal.

El siguiente paso es dividir la población expuesta de cada zona censada entre el área de cada clase de calle según el código postal. Finalmente, se puede clasificar esas densidades según clase de calle y sumar todas ellas para encontrar la densidad real de la calle (cada clase) durante la evacuación.

Tabla 1. Características de las vías de comunicación de la zona de estudio en Lárnaca

Clase calle	Densidad máxima (personas/m ²)	Densidad real (personas/m ²)
2 (Cuatro carriles)	0.54	0.304
3 (Dos carriles)	1.09	0.76
4 (Un carril)	2.22	0.88

Para el cálculo de la densidad máxima observada en la **Tabla 1**, se ha utilizado la metodología del estudio realizado por Muhammad et al., 2021 donde ilustran el espacio necesario para una persona durante una evacuación (**Figura 9**).



Para nuestro caso de estudio, se ha introducido la anchura de las calles, y se ha podido extraer el área requerida para cada persona. Tal como se ve en la **Tabla 1**, la densidad real en ningún caso supera la densidad máxima; por lo tanto, no sería necesaria una corrección de la velocidad debido a la densidad de las personas según características de la calle.

Cabe recordar que las rutas de evacuación son recomendaciones; así que, para estar del lado de la seguridad, se ha decidido introducir unos parámetros correctores. En situaciones de evacuación, hay muchos factores que ahora no se pueden controlar; por ende, se quiere introducir estos parámetros de seguridad con tal de obtener las rutas más seguras posibles. Además, se han realizado las hipótesis de la anchura de las calles y el cálculo de la densidad real de la población en las calles, como que evacuarían por todas las vías de esas clases.

Figura 9. Ilustración de distribución de las personas en evacuación. Fuente: Muhammad et al., 2021

Estos valores (1, 0.9 y 0.8) se derivan de la observación de que el número de personas en una calle estrecha es menor que en una calle ancha. En situaciones de evacuación, esto se traduce en un mayor número de personas tratando de desalojar un espacio más limitado, lo que puede ralentizar la velocidad de evacuación. Por lo tanto, se ha ajustado esta velocidad para enfatizar que la elección de rutas más anchas es fundamental para optimizar la evacuación.

Asignación de Distancias en Rutas (Path Distance Allocation (PDA)):

El módulo "PDA (Asignación de Distancias en Rutas)" es una herramienta diseñada para encontrar las ubicaciones más eficientes en términos de costos para cada área en estudio. Emplea un enfoque de acumulación de costos sobre una superficie para identificar la alternativa más viable. Este proceso considera tanto la distancia en esa superficie como otros factores de costo relevantes en un contexto horizontal.

En este módulo también se introducen los parámetros correctores en función de la pendiente y de los SCV calculados previamente, que en este caso es en función de la anchura de la calle. Cabe destacar que en este proyecto, no se ha introducido velocidad media pero se le introduce al modelo las vías que supondrían una disminución de la velocidad y así poder marcarle cuál serían los caminos más costosos.

Dentro de este módulo, se generan diversos "raster" que actúan como pasos previos al módulo subsiguiente. Uno de ellos es el "*Backlink*", identifica la celda que está justo al lado en el camino menos costoso y que lleva al destino más óptimo. Además, se obtiene "*Path Distance*" que calcula el camino de menos coste desde un punto de origen a un destino. Por último, el "*Cost Allocation*" calcula para celda la ubicación más óptima considerando la información sobre los costos acumulados en esa superficie

Adicionalmente, se incorpora la función de escalado de Tobler et al., 1993, (**Figura 10**) que es una función exponencial que determina la velocidad de senderismo, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación del terreno. Esta función es relevante para ajustar y considerar los costos de desplazamiento en terrenos inclinados. Este ajuste matemático se introduce mediante un documento de texto en el cual aplica unos factores de coste dependiendo de la inclinación de la celda.

En resumen, las rutas de evacuación del modelo de las personas dependerán del pendiente del terreno mediante la función de Tobler y de los parámetros correctores de la anchura de las calles (SCV).

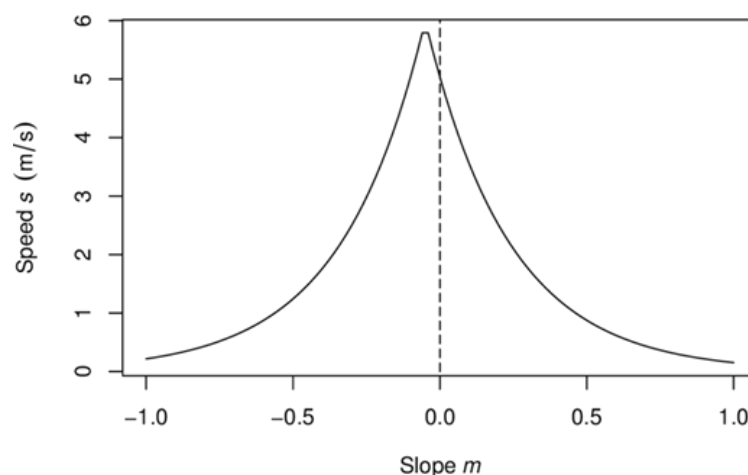


Figura 10. Ejemplo de función de Tobler donde se calcula la velocidad de senderismo según el pendiente del terreno. Fuente: Van Etten, 2017

Los resultados de este módulo nos permiten zonificar hacia que punto de evacuación tendrá que ir la población según estén dentro del área de ese punto o no. Así como estimar la gente necesaria a evacuar en cada uno de los puntos con nuestro periodo de retorno de estudio.

Se realiza un cruce (**Anexo III**) entre las personas expuestas al tsunami (calculadas en el apartado exposición por tsunami) y el área inundada para determinar cuántas personas deben ser evacuadas de cada censo poblacional, dependiendo de si se encuentran cerca de un punto de evacuación específico o de otro. Este cálculo se basa en la hipótesis de proporcionalidad que se ha utilizado previamente para estimar el número de personas afectadas por el tsunami.

Población expuesta a punto de evacuación

$$= \text{Población total de censo expuesta} \times \frac{\text{Área de censo a punto de evacuación}}{\text{Área total de censo afectada}}$$

Gracias a esta fórmula, podemos determinar cómo se distribuirá la población de un código censal entre los distintos puntos de evacuación de la ciudad, lo que nos permite estimar la cantidad de personas que necesitarán ser evacuadas desde las zonas expuestas hacia los puntos de destino designados.

Es importante destacar que estos puntos de evacuación deben contar con espacio adicional, ya que en las ciudades siempre hay personas no censadas que también necesitan ser evacuadas. En otras palabras, no solo buscamos atender a los censados, sino que también prevemos espacio para los no censados.

Rutas de evacuación óptima:

La implementación de este módulo se lleva a cabo mediante la herramienta de geoprocetamiento denominada "Cost Path". Esta herramienta genera una polilínea de salida que registra la ruta o rutas de menor costo desde las fuentes hasta el destino más cercano, definido dentro de la superficie del PDA. En el contexto de este estudio, se calculan las rutas de evacuación óptimas desde los puntos de origen hasta los puntos de destino (áreas seguras).

Dentro de esta herramienta, se ingresan los puntos de inicio y todos los rasters obtenidos en el paso anterior, como el "Cost Back Link", "Cost Distance" y "Cost Allocation", que proporcionan información crucial sobre cuál es la ruta más práctica.

Utilizando estos inputs, que funcionan como instrucciones para el modelo en la aplicación de la herramienta Cost Path, se busca determinar la ruta que minimice el costo en términos de distancia, ubicación del punto de destino y giros, con el objetivo de ser lo más directa posible. La polilínea de salida proporciona una representación gráfica detallada de estas rutas, lo que facilita la comprensión y la planificación efectiva de la evacuación.

Mediante este proceso, se generan las rutas de evacuación más eficientes y seguras, asegurando que las personas puedan desplazarse de manera óptima desde los puntos de origen hasta las áreas seguras durante una situación de riesgo.

4. Elaboración de mapas de evacuación

Una vez aplicado el modelo, donde se extraen las rutas óptimas de evacuación, se integran en mapas diseñados para ser comprensibles para la población con indicadores visuales. Este enfoque transforma los datos en una herramienta comunicativa que capacita a las personas para tomar decisiones informadas en momentos críticos.

Los mapas que se generan para este proyecto deben cumplir con criterios específicos: ser simples, cartográficamente precisos, útiles, atractivos y comprensibles tanto para la población en general como para los responsables y técnicos encargados de la gestión de emergencias por tsunami. Esto representa un desafío, ya que se deben incluir múltiples tipos de información formal, cartográfica, técnica y toponímica de manera adecuada para lograr mapas que se ajusten a los requisitos mencionados anteriormente proporcionados por el National Tsunami Hazard Mitigation Program (2016).

Desde el punto de vista de la comunicación, también es crucial considerar la configuración y formato final de los mapas, incluyendo fuentes tipográficas, símbolos, colores, tamaños de impresión y el tipo de formato (póster, cartel, folleto, etc.). Los mapas deben ser atractivos, legibles y fáciles de entender para cualquier persona, independientemente de su nivel educativo o conocimiento técnico (National Tsunami Hazard Mitigation Program (2016)).

Como resultado del proceso realizado hasta este punto, se obtuvieron los mapas preliminares de evacuación, que deben ser sometidos a una validación pública con actores clave y validación de rutas en campo, que considere diversos aspectos: aspectos técnicos en relación con los resultados del modelo de inundación y evacuación, consideraciones técnicas de comunicación, aspectos vinculados a la gestión de emergencias (adaptación a los mapas existentes, validación por parte de los gestores locales de emergencias, superposición con otros elementos, planes o programas, etc.), y la aceptación social.

3. Zona de estudio

Lárnaca es una importante ciudad costera situada en la parte sur de la isla de Chipre. Como la tercera ciudad más grande de Chipre, es reconocida como uno de los principales centros turísticos del país. Lárnaca también se destaca como la capital de uno de los seis distritos que conforman la República de Chipre, llevando el mismo nombre, Lárnaca (**Figura 11**).

Según el censo del 2011, proporcionado por el GSD, la ciudad cuenta con una población de 51,500 habitantes. Ocupa una superficie de 32.44 km² y presenta una densidad poblacional de 1,587.54 habitantes por kilómetro cuadrado. Su ubicación privilegiada en el mar Levantino del Mar Mediterráneo le brinda una extensa línea de costa, que abarca aproximadamente 12 kilómetros.

Lárnaca posee una rica historia y una atractiva oferta turística, convirtiéndola en un destino popular tanto para los residentes locales como para los visitantes internacionales. Su ubicación estratégica junto al mar la convierte en un lugar con alto potencial de exposición ante eventos naturales como las inundaciones, lo que hace que la planificación adecuada de evacuación sea crucial para la seguridad y bienestar de su población.

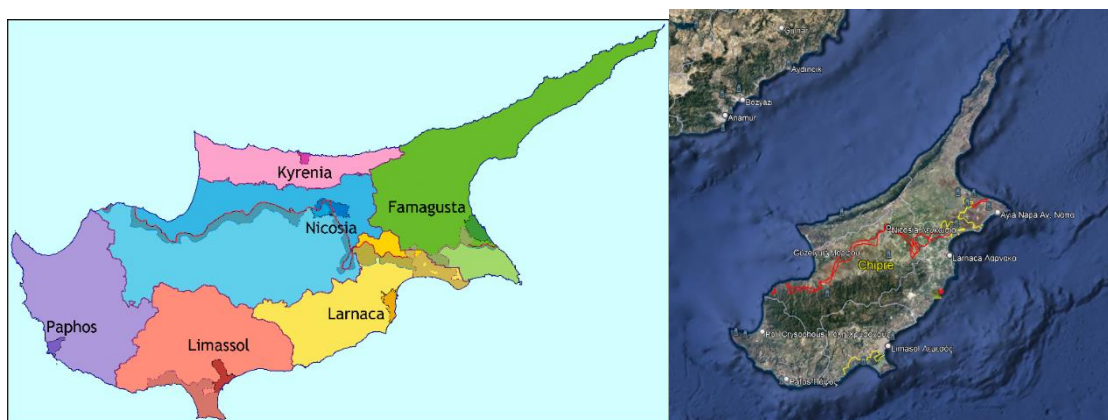


Figura 11. División política de la República de Chipre e imagen satelital. Fuente: Alexander-Michael Hadjilyra (izquierda) y Google Earth (derecha).

Durante las épocas turísticas, la ciudad experimenta un notable aumento de población debido a la afluencia de visitantes que vienen a disfrutar de sus playas, sitios históricos, y atractivos culturales. Esta situación plantea desafíos adicionales en términos de planificación y gestión de la evacuación, ya que la capacidad de respuesta y seguridad de la ciudad deben adaptarse a estas variaciones poblacionales (*Lárnaca Municipality*).

A continuación, se muestran los datos necesarios de la zona de estudio en los diferentes apartados para calcular la peligrosidad, exposición, distribución de la población y las rutas de evacuación.

3.1 Actividad sísmica

La isla de Chipre, ubicada en el sudeste del Mar Mediterráneo, se encuentra en una región geológicamente activa y compleja. Esta área está influenciada por el arco de Chipre y la falla de Levante, lo que resulta en una actividad sísmica significativa. Los terremotos de poca y media profundidad en el arco de Chipre ocurren principalmente bajo el agua, lo que los convierte en potenciales generadores de tsunamis intensos (Evelpidou et al., 2022).

La deformación del terreno debido a los terremotos a lo largo del arco de Chipre y el arco Helénico se debe a la convergencia entre diferentes placas tectónicas, como la del Egeo, Anatolia, Eurasia y el Mediterráneo oriental. Estas placas están conectadas a través de movimientos laterales, empujes y fallas normales, lo que crea un contexto tectónico complejo en la región (**Figura 12**) (Evelpidou et al., 2022).

La distribución espacial de los tsunamis en la región de Chipre y el Mar Levantino está estrechamente relacionada con la geología y la tectónica de la región más amplia. Se han identificado dos zonas principales donde se generan tsunamis (Evelpidou et al., 2022). En primer lugar, en el sur de Chipre, la actividad sísmica se desarrolla a lo largo del arco de Chipre, y la generación de tsunamis se favorece principalmente por fuentes sísmicas submarinas debido a las dislocaciones cosísmicas (desplazamientos o deformaciones de una falla geológica durante un terremoto, son el resultado directo de la liberación de energía acumulada en la corteza terrestre cuando las placas se deslizan, se separan o se desplazan (Introduction to Seismology, 2009)) en las fallas submarinas.

En segundo lugar, en el Mar Levantino, al norte de Gaza, los terremotos relacionados con tsunamis están principalmente asociados con el sistema de fallas de desgarre lateral izquierda de la falla Levantina. En este último caso, las fuentes sísmicas son terrestres y no submarinas, lo que presenta un desafío en la explicación del mecanismo que da lugar a la generación de los tsunamis en esta área.

El conocimiento de la geología y la tectónica de la región es esencial para comprender y prever los posibles eventos de tsunamis en la zona costera de Chipre.

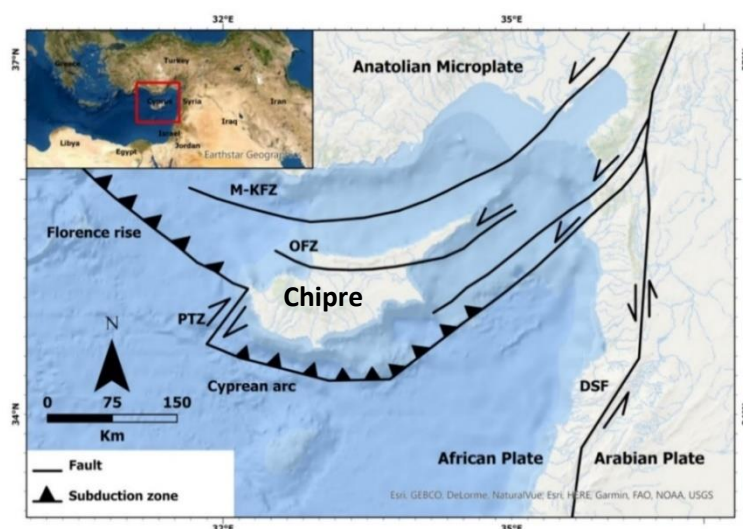


Figura 12. Ubicación y contexto geotécnico de Chipre. (PTZ: Falla Transformante de Paphos; DSF: Falla del Mar Muerto; M-KFZ: Zona de Falla Misis-Kyrenia; OFZ: Falla de Ovgos). Fuente: Evelpidou et al., 2022

3.2 Topobatimetría de Lárnaca

3.3 Descripción de Lárnaca

3.4 Población

3.5 Distribución edificios críticos

Los datos correspondientes a la topobatimetría, la descripción local a nivel municipio, distribución de población y edificios críticos no se pueden mostrar debido a la confidencialidad del trabajo.

4. Mapas de peligrosidad

Los mapas de peligrosidad por tsunami no se pueden mostrar debido a la confidencialidad del proyecto.

5. Exposición ante tsunami en Lárnaca

Los resultados de población expuesta por tsunami no se pueden mostrar debido a la confidencialidad del proyecto.

6. Mapas de evacuación

Los mapas de evacuación no se pueden mostrar debido a la confidencialidad del proyecto.

7. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos no se pueden discutir debido a la confidencialidad del proyecto.

8. Conclusiones

Las conclusiones del trabajo no se pueden mostrar debido a la confidencialidad del proyecto.

9. Bibliografía

- Aguirre-Ayerbe, I., Martínez Sánchez, J., Aniel-Quiroga, Í., González-Riancho, P., Merino, M., Al-Yahyai, S., González, M., and Medina, R.: From tsunami risk assessment to disaster risk reduction – the case of Oman, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2241–2260, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2241-2018>, 2018.
- Aniel-Quiroga. impacto de tsunamis en la costa: cálculo de la máxima inundación y análisis de la estabilidad de diques rompeolas de materiales sueltos. 2018. (PhD thesis, Universidad de Cantabria, España). Dirigida por: GONZÁLEZ R, MAURICIO.VIDAL P. CÉSAR.
- Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T. et al. Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts. *Pure appl. geophys.* 164, 577–592 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0174-3>.
- Basili R., Brizuela B., Herrero A., Iqbal S., Lorito S., Maesano F.E., Murphy S., Perfetti P., Romano F., Scala A., Selva J., Taroni M., Tiberti M.M., Thio H.K., Tonini R., Volpe M., Glimsdal S., Harbitz C.B., Løvholt F., Baptista M.A., Carrilho F., Matias L.M., Omira R., Babeyko A., Hoechner A., Gürbüz M., Pekcan O., Yalçiner A., Canals M., Lastras G., Agalos A., Papadopoulos G., Triantafyllou I., Bencheikroun S., Agrebi Jaouadi H., Ben Abdallah S., Bouallegue A., Hamdi H., Oueslati F., Amato A., Armigliato A., Behrens J., Davies G., Di Bucci D., Dolce M., Geist E., Gonzalez Vida J.M., González M., Macías Sánchez J., Meletti C., Ozer Sozdinler C., Pagani M., Parsons T., Polet J., Power W., Sørensen M. and Zaytsev A. (2021) The Making of the NEAM Tsunami Hazard Model 2018 (NEAMTHM18). *Front. Earth Sci.* 8:616594. doi: 10.3389/feart.2020.616594
- Battjes, J. A. A. (1986). *Communications on hydraulic and geotechnical engineering.* 1–23.
- Behrens Jörn, Løvholt Finn, Jalayer Fatemeh, Lorito Stefano, Salgado-Gálvez Mario A., Sørensen Mathilde, Abadie Stephane, Aguirre-Ayerbe Ignacio, Aniel-Quiroga Iñigo, Babeyko Andrey, Baiguera Marco, Basili Roberto, Belliazzi Stefano, Grezio Anita, Johnson Kendra, Murphy Shane, Paris Raphaël, Rafliana Irina, De Risi Raffaele, Rossetto Tiziana, Selva Jacopo, Taroni Matteo, Del Zoppo Marta, Armigliato Alberto, Bureš Vladimír, Cech Pavel, Cecioni Claudia, Christodoulides Paul, Davies Gareth, Dias Frédéric, Bayraktar Hafize Başak, González Mauricio, Gritsevich Maria, Guillas Serge, Harbitz Carl Bonnevie, Kânoğlu Utku, Macías Jorge, Papadopoulos Gerassimos A., Polet Jascha, Romano Fabrizio, Salamon Amos, Scala Antonio, Stepinac Mislav, Tappin David R., Thio Hong Kie, Tonini Roberto, Triantafyllou Ioanna, Ulrich Thomas, Varini Elisa, Volpe Manuela, Vyhmeister Eduardo, *Probabilistic Tsunami Hazard and Risk Analysis: A Review of Research Gaps*, *Frontiers in Earth Science*, 9, 2021.
- COI de la UNESCO. 2022. *Directrices generales del programa de reconocimiento Tsunami Ready*. París. (Manuales y guías de la COI, 74).
- COMMUNITY SHELTER GUIDELINES, ACCOMMODATION CENTRES IN EXISTING BUILDINGS, Javier Cidón Martínez e Virginia A. Navaza, 2013, Mozambique.
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. *Glosario de tsunamis*. Colección Técnica de la COI Nº 85 rev. 2. París, UNESCO, 2013. Español/francés/inglés/árabe) (IOC/2008/TS/85 rev. 2).
- Cyprus Oceanography Centre – University of Cyprus (ucy.ac.cy)

- *Doga Dinemis Aman, Gulsen Aytac, Multi-criteria decision making for city-scale infrastructure of post-earthquake assembly areas: Case study of Istanbul, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 67, 2022, 102668, ISSN 2212-4209.*
- *Evacuation Centre minimum requirements check list, Government of the Republic of Vanuatu National Disaster Management Office.*
- *Evelpidou N, Karkani A, Polidorou M, Saitis G, Zerefos C, Synolakis C, Repapis C, Tzouxanioti M, Gogou M. Palaeo-Tsunami Events on the Coasts of Cyprus. Geosciences. 2022; 12(2):58. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020058>.*
- *FLOOD HAZARD RESEARCH CENTRE (1996a) Flood evacuation in the UK: The emergency planning perspective, March 1996*
- *FLOOD HAZARD RESEARCH CENTRE (1996b) EuroFlood, Technical annex 14: Evacuation*
- *Fokaefs, Anna & Papadopoulos, Gerassimos. (2007). Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: Strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea. Natural Hazards. 40. 503-526. 10.1007/s11069-006-9011-3.*
- *Georgiou, Georgios & Clark, Andrew & Zodiatis, George & Hayes, D. & Glekas, Dimitris. (2010). Design of a prototype Tsunami Warning and Early Response system for Cyprus - TWERC. 1 - 5. 10.1109/OCEANSSYD.2010.5603936.*
- *González-Riancho, P., Aguirre-Ayerbe, I., Aniel-Quiroga, I., Abad, S., González, M., Larreynaga, J., Gavidia, F., Gutiérrez, O. Q., Álvarez-Gómez, J. A., and Medina, R.: Tsunami evacuation modelling as a tool for risk reduction: application to the coastal area of El Salvador, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 3249–3270, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3249-2013>, 2013.*
- *Hisao Nakai, Tomoya Itatani, Ryo Horiike, Construction of an evacuee placement model for tsunami shelters considering physical distancing to prevent COVID-19 infection, Progress in Disaster Science, Volume 11, 2021, 100183, ISSN 2590-0617, <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100183>.*
- *HR Wallingford: Review of evacuation rescue methods and models, FLOODsite Project, Report Number T17-07-04, published online, available at: http://www.floodsite.net/html/cd_task17-19/review_evac_models.html (last access: 11 November 2013), 2006.*
- *<https://www.un.org/es/observances/tsunami-awareness-day>*
- *Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción del riesgo de desastres,*
- *INTERCULTURAL CITIES INDEX ANALYSIS 2022, European Union and co-funded by the Council of Europe.*
- *Introduction to Seismology, 2009, Peter M. Shearer, Cambridge University Press.*
- *IPCC, 2012: Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564.*

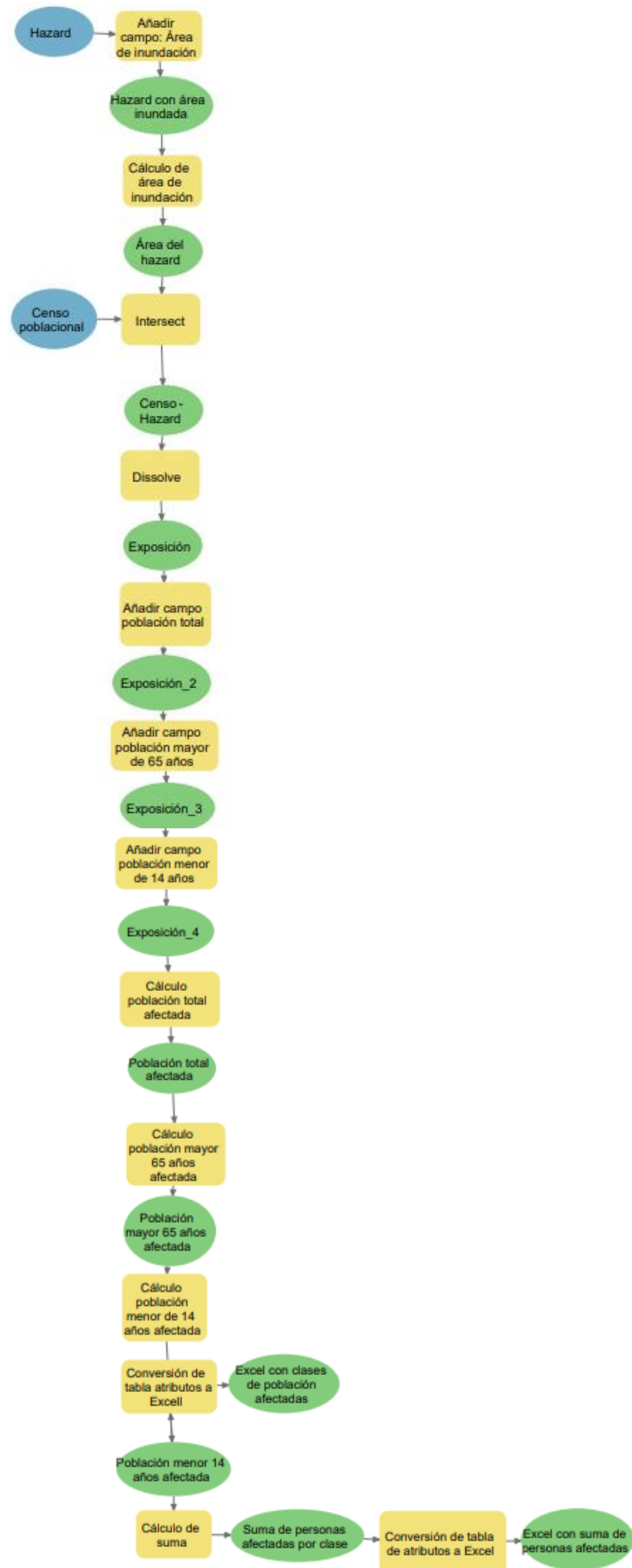
- IPCC, 2018: Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]
- Kemal Gökkaya (2016) *Geographic analysis of earthquake damage in Turkey between 1900 and 2012*, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7:6, 1948-1961, DOI: [10.1080/19475705.2016.1171259](https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1171259).
- Macías, J., Castro, M.J., Ortega, S., Escalante, C. and González-Vida, J.M. (2017). *Performance benchmarking of tsunami-HySEA model for NTHMP's inundation mapping activities*. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3147-3183.
- Masamitsu MOHRI Hiroshi TSUKAGUCHI Shinya TAKASIMA, "DETERMINING THE WIDTH
- Muhammad, A., De Risi, R., De Luca, F. et al. *Are current tsunami evacuation approaches safe enough?*. *Stoch Environ Res Risk Assess* 35, 759–779 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02000-5>
- Nakai H, Itatani T, Horiike R. *Construction of an evacuee placement model for tsunami shelters considering physical distancing to prevent COVID-19 infection*. *Prog Disaster Sci*. 2021 Oct;11:100183. doi: 10.1016/j.pdisas.2021.100183. Epub 2021 Jun 16. PMID: 34151247; PMCID: PMC8205553.
- *National Tsunami Hazard Mitigation Program Strategic Plan, 2018-2023*
- Okada, Y. (1985). *Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space*. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 1135–1154. doi:10.1785/bssa0750041135.
- OpenStreetMap Lárnaca.
- Padilla Álvarez, Sergio, 2020. *Evaluación de la peligrosidad por tsunami en el municipio de Chipiona, Cádiz*. Tesis Maestría, Universidad de Cantabria. Dirigida por: Iñigo Aniel-Quiroga Zorrilla, Ernesto Mauricio González Rodríguez.
- *Preparación para evacuaciones de comunidades en caso de tsunami: de mapas de inundación a mapas de evacuación, planes de respuesta y simulaciones*, COI, 2020.
- *Real-Time Deep-Ocean Tsunami Measuring, Monitoring, and Reporting System: The NOAA DART II Description and Disclosure*, 2005.
- *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction*, UNDRR, 2016.
- *R Package gdistance: Distances and Routes on Geographical Grids*, van Etten, Jacob, 2017.
- *Steel Construction: Today and Tomorrow. Steel-structure Technologies Conducive to Securing Earthquake and Tsunami Safety*, 2016. The Japan Iron and Steel Federation and Japanese Society of Steel Construction

- *Tinti, Stefano & Pagnoni, Gianluca & Armigliato, Alberto & Georgiou, Georgios. (2013). Tsunami hazard and vulnerability assessment for the south coast of Cyprus. 6270-.*
- *Tobler W (1993) Three Presentations on Geographical Analysis and Modeling: Non- Isotropic Geographic Modeling; Speculations on the Geometry of Geography; and Global Spatial Analysis (93- 1). University of California at Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis., 26. <https://escholarship.org/uc/item/05r820mz>*
- *Tsunami Modeling and Mapping: Guidelines and Best Practices Part IV: Tsunami Evacuation Maps 1 National Tsunami Hazard Mitigation Program Mitigation and Education Subcommittee, 2016.*
- *Tsunami risk assessment and mitigation for the Indian Ocean; knowing your tsunami risk – and what to do about it.IOC Manuals and Guides No. 52, Paris: UNESCO, Second edition 2015 (English).*
- *UNESCO/IOC. 2022. Standard Guidelines for the Tsunami Ready Recognition Programme. Paris. (IOC Manuals and Guides,74).*
- *[La ONU cifra en más de 250.000 los muertos por tsunamis en 20 años \(elperiodico.com\)](#)*
- *[World Tsunami Awareness Day: Risk of one occurring in Cyprus is real | in-cyprus.com \(philenews.com\)](#)*

ANEXO

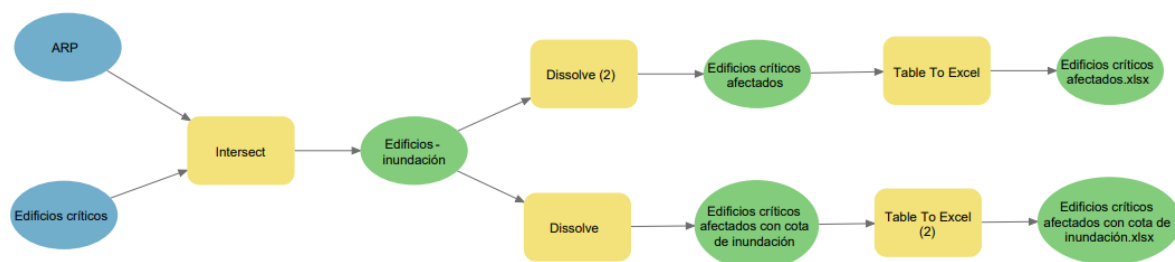
ANEXO I

Esquema Model Builder para la ejecución de la exposición de la población a la inundación



ANEXO II

Esquema Model Builder para la ejecución de la exposición de los edificios críticos a la inundación



ANEXO III

Esquema Model Builder para la ejecución de población evacuada

