

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RUTAS DE EVACUACIÓN EN CASO DE TSUNAMI APLICADO A LA COSTA DEL PACÍFICO NORTE Y CENTRAL DE COSTA RICA

Fabio Rivera¹

Universidad Nacional de Costa Rica
Heredia, Costa Rica
fabiorivera@gmail.com

Isabel Arozarena Llopis²

Universidad Nacional de Costa Rica
Heredia, Costa Rica
iarozarena@gmail.com

Silvia Chacón Barrantes³

Universidad Nacional de Costa Rica
Heredia, Costa Rica
silviachaconb@gmail.com

Gustavo Barrantes Castillo⁴

Universidad Nacional de Costa Rica
Heredia, Costa Rica
gbarrantes@gmail.com

Recibido 4 de abril de 2016 • Corregido 04 de mayo de 2016 • Aceptado 15 de mayo de 2016

Resumen

Se ha diseñado un método con el objetivo de elaborar una cartografía de rutas de evacuación en caso de tsunami a escala 1:10.000, basado en las directrices establecidas por la Comisión Europea. Las áreas de estudio son las localidades del Pacífico Norte y Central identificadas como más vulnerables ante tsunamis. Dicha metodología está basada en el modelado a baja resolución de 35 escenarios de posibles tsunamis, la vulnerabilidad física y poblacional del lugar; y está adaptada a los datos con los que el país cuenta en este momento. Se emplea una metodología de análisis de redes en un sistema de información geográfica, para determinar los costos superficiales y con ello, la ruta óptima a recorrer para evacuar desde la zona inundable hasta los refugios horizontales (lugares que por su elevación no se inundan en caso de tsunami) o verticales (edificios situados en la zona inundable, que por su altura y capacidad sirven de refugio). En Costa Rica, la metodología dictada por la Comisión Europea debe ser adaptada a la disponibilidad de datos. Muchos de ellos se obtienen a través de instancias públicas nacionales, mientras que otros han tenido que ser creados. Asimismo, se realizan comprobaciones en campo de algunos de los grupos de datos necesarios. El método de análisis de rutas utilizado debe ser forzado

en algunos casos para lograr que la evacuación sea completa.

Palabras clave: Tsunamis, Planificación, Planes de prevención, Rutas de evacuación.

Abstrac

A method designed with the objective of developing a mapping evacuation routes in case of tsunami at scale 1: 10,000, based on guidelines set by the European Commission. The areas of study are the localities Northern and Central Pacific identified as most vulnerable to tsunamis. Based on low-resolution modeling of 35 scenarios of possible tsunamis, physical and population vulnerability of the site, and is adapted to the data with which the country has at this time. a methodology of network analysis in a geographic information system is used to determine the surface and thus costs, optimum to travel to evacuate from the flood zone to the horizontal shelters (places for its elevation not flooded in the event route tsunami) or vertical (buildings located in the floodplain, which by its height and serve as shelter capacity). In Costa Rica, the methodology issued by the European Commission must be adapted to the availability of data. Many of them obtained through national public authorities, while others have had created. In addition, checks field some of the data sets required made. The analysis method used routes must be forced in some cases to make the evacuation is complete.

¹ Pertenece al Programa RONMAC, Departamento de Física.

² Pertenece al Programa RONMAC, Departamento de Física.

³ Pertenece al Programa RONMAC, Departamento de Física.

⁴ Pertenece a la Escuela de Ciencias Geográficas.



Keywords: Tsunamis, Planning, Prevention plans, Evacuation routes.

Introducción

Al menos 12 tsunamis lejanos (Figura 1) y 17 tsunamis locales (Figura 2) han llegado a las costas costarricenses (entre los años 1539 y 2015): 24 en la costa del Pacífico y 5 en la del Caribe (NGDC/WDS, 2016; Fernández 2002). Algunos de estos tsunamis sólo han sido observados en mareógrafos pero otros han causado daños materiales y uno de ellos causó la muerte de dos personas.

El 15 de agosto del año 2007, luego de un terremoto en Perú, el Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC) emitió un boletín de tsunami provocando que las autoridades nacionales ordenaran la evacuación de sectores como Puntarenas, Jacó y Quepos. Este evento, sumado a los tsunamis de Chile de 2010 y Japón de 2011, puso de manifiesto la potencialidad de este país a sufrir un evento de este tipo y la escasa preparación del mismo en tal situación. En el caso del terremoto de Perú del 2007, la desesperación se apoderó de la población costera al no tener claras las medidas a seguir, lo que provocó, más que una evacuación, un estampida en lugares como Puntarenas y Jacó (Solano et al., 2007).

La falta de preparación de la población en materia de evacuación se vio reiterada cuatro años después con el terremoto de Japón, cuando nuevamente la población desconocía los sitios seguros y las mejores rutas para

llegar a ellos, y el mensaje de alerta solamente insistía en la necesidad de abandonar las playas para refugiarse en lugares altos (López et. al, 2011). Por ello, una buena gestión de la información dirigida a examinar y divulgar las medidas a tomar en caso de llegada de un tsunami a la costa, deberían constituir el siguiente y urgente paso a seguir por parte de las autoridades del país.

El crecimiento inmobiliario de la zona costera, aunado a la falta de planificación que lo ha caracterizado (Román, 2007), así como la afluencia de miles de turistas en temporada alta, provocan una situación de riesgo inaceptable.

En vista de que los tsunamis no son muy frecuentes en el país y no se esperan olas muy altas generadas localmente (Chacón y Protti, 2011), solamente se registran iniciativas aisladas y locales en materia de prevención y no un plan de acción a escala nacional.

Los últimos terremotos del 2012 en Sámara, El Salvador y Guatemala no hicieron más que aumentar la creciente preocupación por la ocurrencia de un fenómeno de este tipo de carácter severo. Dada la situación geotectónica del país y sus costas, se hace necesario comenzar a trabajar en la dirección de la prevención y abordarla desde varios puntos de vista. El primero de ellos es la elaboración de mapas de rutas de evacuación para las localidades consideradas más vulnerables ante este fenómeno, previa valoración de la amenaza en la costa pacífica y de la vulnerabilidad de las diferentes localidades que en ella se encuentran.

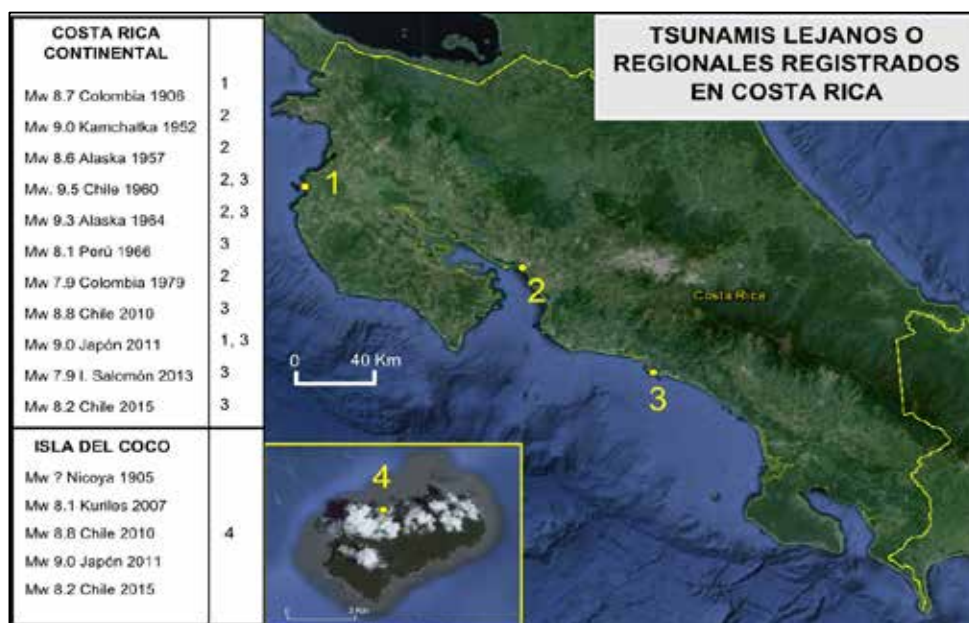


Figura 1. Tsunamis lejanos y regionales registrados históricamente en Costa Rica continental y la Isla del Coco. Los números marcan el lugar del instrumento o del avistamiento. Fuente: Elaboración propia.

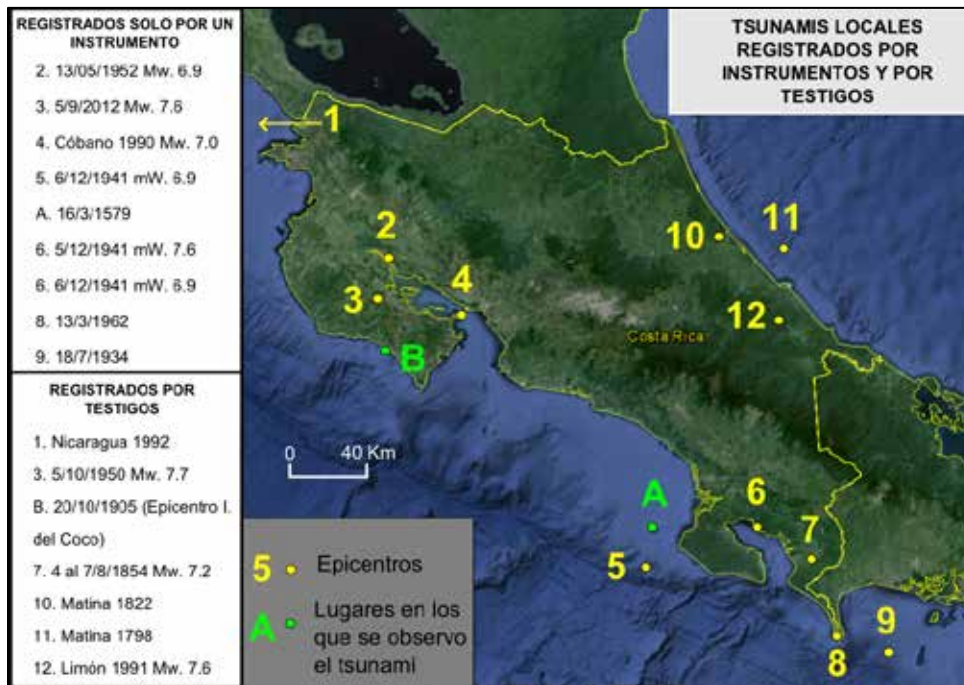


Figura 2. Registro de tsunamis locales que golpearon Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.

La preparación de la población para actuar en caso de alerta por tsunami requiere, por un lado, de la estimación de la amenaza, y por el otro, de una serie de insumos que permitan establecer, de manera adecuada, las acciones por tomar en caso de alerta por tsunami. En este último sentido, alarmar a la población sin que ésta tenga claras las pautas por seguir, significa un aumento del riesgo por la acción caótica que esto puede generar.

Entre los insumos requeridos para establecer un sistema de alerta temprana por tsunami, están la creación de mapas de evacuación por tsunami que implican: la identificación de las áreas potencialmente inundables, la ubicación de los sitios seguros, la identificación de las rutas de evacuación, y en los casos que lo ameriten, estudios de tiempos de evacuación para la planificación de la optimización de las rutas, tomando en consideración la evacuación vertical (entendida como la evacuación hacia edificios de una altura superior a tres pisos y suficientemente resistentes para aguantar el paso del tsunami). Pero la elaboración de mapas de rutas de evacuación es solo una parte de lo que debería ser un Plan de evacuación por Tsunami, el cual debe también comprender otras fases como la elaboración de sistemas de alerta temprana, la correcta señalización de las vías y el trabajo con las comunidades para asegurarse que el plan se desarrollará con éxito llegado el caso. Este trabajo está enmarcado en el Proyecto “Uso de una plataforma SIG para la elaboración de mapas de evacuación por tsunami. Etapa 1: desde Bahía Santa Elena hasta Ventanas de Osa, Litoral Pacífico Costarricense” del Departamento de Física de la Universidad Nacional y financiado por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias que, pretende ser la semilla que lleve al

Estado Costarricense a continuar con la elaboración de planes de evacuación en las distintas localidades costeras vulnerables del país.

Área de estudio

El área de estudio abarca las playas del Pacífico Norte y Central (desde El Golfo del Papagayo, en Guanacaste, hasta Playa Ventanas de Osa, en el Pacífico Sur), con la intención de aplicar el método al resto de costas del país, una vez aplicado y validado en este primer sector.

La costa de Guanacaste es eminentemente rocosa y muy irregular, caracterizada por puntas y bahías, que dan lugar a condiciones oceanográficas muy diferentes entre playas cercanas, cosa que tiene importantes implicaciones a la hora de valorar el riesgo por tsunami, pues las consecuencias de este fenómeno y las condiciones para una evacuación son notablemente diferentes en una playa respecto de otra próxima. Otra característica de la costa guanacasteca es la cercanía del talud continental a la costa, o inicio de la fosa Mesoamericana, que se encuentra, en algunos puntos, a una distancia de algo más de 11 Km de la costa (zona de playa Marbella).

La costa del Pacífico Central, por otro lado, presenta características marcadamente diferentes a la de Guanacaste y la Península de Nicoya; es una costa fundamentalmente rectilínea, caracterizada por largas playas arenosas, muy abiertas y orientadas, en su mayoría, hacia el SW. La distancia de la costa al talud continental es mucho mayor que en el caso de Guanacaste, con mínimos de 22 km (frente a la costa de Quepos) y máximos de cerca de 60 km, para Puntarenas o Playa Ventanas de Osa (Pacífico Sur).

Desde el punto de vista de la evacuación, Guanacaste presenta la ventaja de ser un territorio muy montañoso por lo que es relativamente fácil encontrar vías que accedan a los refugios horizontales (determinados por una cota). Sin embargo, puede haber zonas muy pobladas, localizadas en sectores planos que pueden complicar puntualmente las evacuaciones y de ahí la importancia de este trabajo. El Pacífico Central, al contrario, presenta amplias llanuras costeras que, en principio, hacen a la zona altamente vulnerable debido a las grandes distancias a recorrer para alcanzar la altura de seguridad en caso de que se verifique un tsunami. Sin embargo, es necesario evaluar el potencial de amenaza, es decir, las alturas de ola esperables en esta zona, para determinar la urgencia en establecer rutas de evacuación en las playas de este sector.

Materiales y metodología

Para elegir las localidades sobre las cuales se va a aplicar el análisis de rutas para elaborar mapas de evacuación (1:3,000 o 1:10,000) se tiene en cuenta la amenaza dada por las alturas máximas de tsunami combinadas, y la vulnerabilidad física y social de cada playa. Para la primera se asigna un valor a los distintos sectores de costa según la altura máxima de las olas, cuantificando así la amenaza. Seguidamente, se valora la vulnerabilidad de las localidades desde dos puntos de vista; uno referido a la cantidad de población

permanente, entendido como la cantidad de habitaciones presentes en el lugar. La segunda, se refiere a la condición topográfica del lugar, indicativa de la facilidad de evacuación de una localidad determinada. En este caso, se aplica este método al área de estudio, de forma que se categorizan cada una de las playas en rangos de riesgo por tsunamis. Las playas con el porcentaje de riesgo más alto tendrán prioridad en el estudio, por ende, se seleccionaron 16 sectores de playa cuyo porcentaje de riesgo es alto y que además cuentan con información detallada (Tabla 1).

Una vez seleccionadas las localidades a mapear, se decide la forma de definir el área inundable, ya sea por medio de una altura fija, en cuyo caso los mapas serán preliminares (UNESCO, 2014), o bien por medio de modelado de inundación de tsunamis a pequeña escala, en cuyo caso se requiere la medición de datos batimétricos de detalle en la localidad. Adicionalmente, se recopila la información existente, como calles, edificios importantes o peligrosos, necesaria para el cálculo de rutas de evacuación. Seguidamente se empleará la herramienta de análisis de redes en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), siguiendo la metodología propuesta por la Comisión Europea (Sheer, Gardi, Guillande, Eftichidis, Varela, de Vanssay y Colbeau-Justin, 2011) para la elaboración de Planes de Evacuación en caso de tsunami, adaptada a la disponibilidad de datos con la que se cuenta.

Playa	PF	PP	VF	A	V	R
Sámara	3	3	3	3	3	6
Bahía Potrero	3	3	3	3	3	6
Tamarindo	3	3	3	3	3	6
Puntarenas	3	3	3	3	3	6
Guiones	3	3	3	3	3	6
Garza	3	3	3	3	3	6
San Miguel de Jabilla	3	3	3	3	3	6
Avellanas	3	2	3	3	2.66	5.83
Hermosa de Cóbano	3	2	3	3	2.66	5.83
Santa Teresa	3	3	2	3	2.66	5.83
Malpaís	3	3	2	3	2.66	5.83
Hermosa	3	2	3	3	2.66	5.83
Ostional	3	3	3	2	3	5.5
Tivives	3	3	3	2	3	5.5
Carrillo	3	1	3	3	2.33	5.67
Bejuco Guanacaste	3	1	3	3	2.33	5.67
Caletas	2	1	3	3	2	5.5
Pencal	2	1	3	3	2	5.5
Manzanillo Río Ario	2	2	2	3	2	5.5

Tabla 1. Playas seleccionadas por su alto valor de riesgo, obtenido combinando PF (Población fluctuante), PP (Población permanente), VF (Vulnerabilidad física), A (amenaza), V (vulnerabilidad) y R (riesgo).



Estimación de la amenaza

La amenaza es el peligro de riesgo externo de un sujeto, representado como un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre (Cárdenas, 1944). La amenaza en caso de un tsunami se valora en función de la magnitud del fenómeno que impacta generando el desastre; para determinar el nivel de amenaza se toman en cuenta la capacidad de una serie de terremotos costeros que puedan generar tsunamis que lleguen a la costa del Pacífico costarricense.

Para la estimación de la magnitud de la amenaza, se realizaron simulaciones a dos escalas: por un lado se simularon 30 terremotos lejanos con magnitudes de hasta 9.3 Mw; por otro lado, se simularon 5 escenarios locales con una magnitud no mayor a los 8 Mw, ambos en dos mallas anidadas a 60 y 12 arcsec⁵. La batimetría de las dos mallas se construyó fundiendo datos de batimetría global de GEBCO a 30 arcsec y datos provenientes de cartas náuticas de diversas escalas digitalizadas, se usaron mallas de baja resolución para cubrir una mayor parte de la costa y poder identificar las localidades con mayor peligrosidad. La topografía provino de datos de SRTM (Jarvis, Reuter, Nelson y Guevara, 2008) y datos LIDAR (levantados por Aerodiva y procesados por Stereocarto, por orden de la CNE, en 2012) medidos cerca de la costa. El resultado de la modelación es la superposición de 35 escenarios de tsunamis, con sus correspondientes alturas de ola estimadas. Debido a la importancia de la amenaza en la estimación del riesgo, ésta representa el 50% en la ecuación del riesgo para la elección de las playas a estudiar.

Estimación de la vulnerabilidad

El otro 50% se distribuye en vulnerabilidad, considerando ésta como la exposición de un sujeto ante una amenaza latente (Camilo, 1944). La vulnerabilidad se puede medir bajo una gran cantidad de formas, pero en caso de una línea de borde litoral en el Pacífico de Costa Rica se trabajarán con dos, la vulnerabilidad física (exposición) y la densidad demográfica. La vulnerabilidad física corresponde a la distribución topográfica de los sitios a evacuar y además, la distribución de la red vial según la pendiente del área inundable. La densidad de población corresponde a la cantidad de población que estaría dentro del área de inundación. Las playas de Costa Rica se caracterizan por una amplia visitación turística en cualquier época del año, por eso la vulnerabilidad demográfica se divide en turismo y la población permanente.

Valoración del riesgo y selección de localidades

El riesgo es el elemento más importante, éste según Cárdenas (1944) "se define como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre un elemento o comunidad como la ocurrencia de una intensidad mayor o igual a i , es decir, la probabilidad de exceder una consecuencia social y económica durante un tiempo dado". Según Cárdenas (1944), el riesgo es la interacción entre la vulnerabilidad y la amenaza, y aunque no existe una fórmula definitiva para la estimación del riesgo debido a que la amenaza y la vulnerabilidad son elementos fijos, se ¿cuantifican? en una operación en todos los casos.

La cuantificación del riesgo ante un tsunami ha sido determinada por medio de una suma entre los términos amenaza y vulnerabilidad, a los cuales se les ha atribuido un valor de uno a tres, en donde, uno es bajo y tres es alto. Se escogió la operación suma por facilidad, pero con cualquier tipo de operación matemática el orden de prioridad de playas resultante sería el mismo.

Como se explica anteriormente, existen una gran cantidad de variables para identificar la vulnerabilidad, pero para el caso de riesgo de tsunamis en Costa Rica se utilizará la física y la demográfica, debido a que son las que tienen una mayor relevancia directa. Las playas con alta vulnerabilidad física son las que tiene pendientes muy altas o muy bajas, puesto que ambas situaciones dificultan la evacuación, una por imposibilidad de superar laderas muy escarpadas, y la otra por la gran extensión del área inundable. La vulnerabilidad demográfica se toma por medio de la cantidad de personas que viven o el promedio de la demanda hotelera.

$$R = A + \frac{VF + \frac{PF+PP}{2}}{2}$$

Nota: PF y PP se dividen entre dos para que sea proporcional a la VF, de la misma forma, VF y el resultado de $\frac{PF+PP}{2}$, para que sea proporcional a A.

Nombre	Variable	RANGOS		
		Bajo	Medio	alto
A: Amenaza	Altura de ola	1m al 5m	5m a 9m	9m a 12m
VF: vulnerabilidad física	Pendiente en por ciento	Mayor a 5 y menor a 20	0 a 5 y de 20 a 30	Mayores de 30
PF: población fluctuante (turismo)	Cantidad de hoteles	0 a 3	3 a 10	10 a más
PP: Población permitente	Cantidad de UGM	Menos a 50	50 a más	150 a más
R: Riesgo	Resultado	1 a 2	3 a 4	5 a 6

Tabla 2. Estimación de la vulnerabilidad.

⁵ Arcosecante: En trigonometría, es la función inversa de la secante de un ángulo. Nota del editor.

Bajo este método se clasifican las playas, asignándoles un valor entre 1 y 3 a la vulnerabilidad física, a la población y a la amenaza. De esta forma se eligieron las 16 playas con mayores valores de riesgo; se eligen cuatro para trabajar a una escala de 1:3.000 determinando el área inundable por medio de modelado numérico de inundación por tsunami y las otras 11 se trabajarán preliminarmente a 1:10.000 determinando el área inundable por medio de una cota fija.

Análisis de redes para determinación de rutas seguras para evacuar

Según el método propuesto en Sheer, et al. (2011), en las directrices para la elaboración de planes de evacuación en caso de tsunami, publicado por la Comisión Europea en el marco del programa SCHEMA (Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management), los mapas de rutas de evacuación deben ser elaborados a través del análisis de redes, que

consiste en analizar la ruta óptima para evacuar desde un punto dado del área de estudio, teniendo en cuenta los costos de superficie que existen en el terreno y en las condiciones de las vías de evacuación. Se entiende costo de superficie como aquel elemento que determina la mayor o menor conveniencia de usar una determinada ruta (por ejemplo: la existencia de una fábrica peligrosa en un camino dado, es un costo que puede determinar que el análisis elija otra ruta, aunque ésta sea más larga). El análisis de costos de superficie consiste en evaluar una serie de elementos o circunstancias que condicionan la validez o idoneidad de una ruta como ruta de evacuación. El objetivo es encontrar rutas que presenten la menor cantidad de costos; los costos pueden ser distancia a la red, condiciones de la calle, acumulaciones de población, pendiente demasiado altas o elementos espaciales alrededor de los caminos que puedan generar algún tipo de barrera o dificultad de acceso.

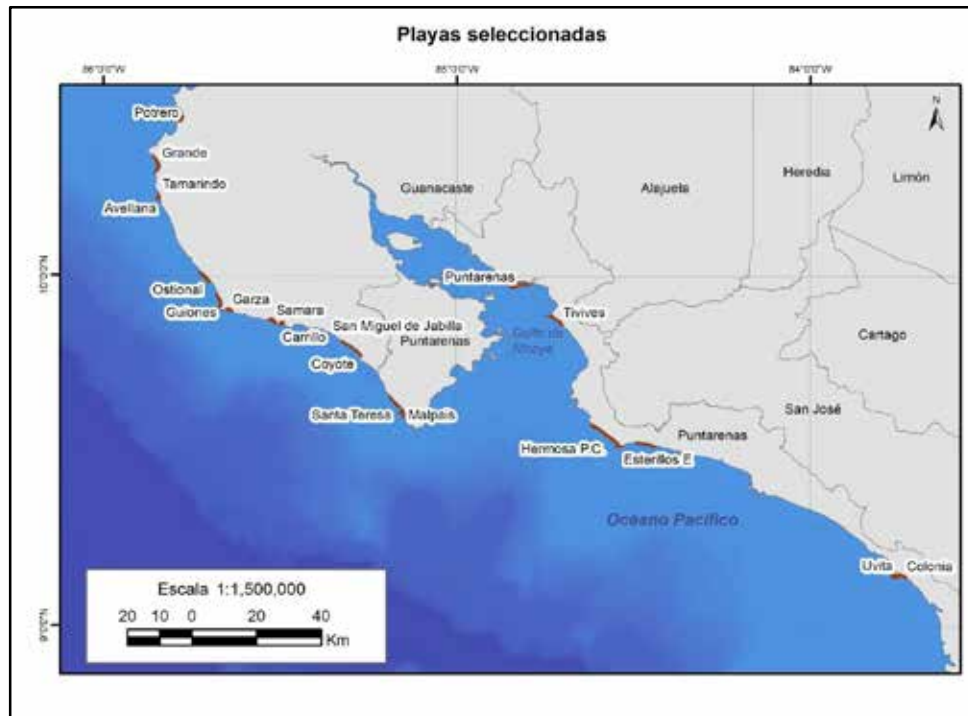


Figura 3. Posición geográfica de las 16 playas seleccionadas para aplicarles el análisis de rutas y elaborar sus respectivos mapas de evacuación por tsunami. Fuente: Elaboración propia.

La información cartográfica de las instituciones estatales de Costa Rica en su mayoría no están con niveles de detalle lo suficientemente altos para poder desarrollar los modelados de tsunamis a 1:3.000, por ende, la mayoría no pueden ser recopilados y tienen que ser construidos para la presente investigación.

1) **Datos topográficos:** tienen dos funciones en el desarrollo de este análisis. El primero es delimitar el área de estudio en los mapas con escalas de 1:10.000 hasta los 20 metros de altitud (delimitación del área inundable por cota en vez de por simulación de la inundación), así como el costo de superficie según los rangos de pendiente en esa área. Se

usaron las imágenes del proyecto BID catastro, a escala 1:1000; esta información fue complementada con los modelos digitales del terreno obtenidos a partir de datos LIDAR (levantados por Aerodiva y procesados por Stereocarto, por orden de la CNE, en 2012) van cada 1 m del valor z (este proyecto no abarca toda el área de estudio, por eso, hay que completar con la topografía del BID catastro).

2) **Distribución de la población:** dentro del área de inundación, es otro de los elementos importantes que influyen en la evacuación, debido a que en las zonas más pobladas un mayor número de personas deben ser



evacuadas y el modelo debe de dar seguridad para evacuar a toda la población que esté inmersa en él, mientras en los sectores que la población es menor, con pocas redes el modelo encuentra una óptima evacuación. En Costa Rica existen playas muy diversas desde el punto de vista poblacional, en donde, algunas de ellas la trasplaya está altamente poblada por facilidades turísticas, pero en la mayoría de los casos en los alrededores se desarrollan fincas ganaderas o bosque. En el caso de la población se toman los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) del censo del 2011. La población turística se calculará basada en la demanda hotelera para cada uno de los sectores, por medio de la información que

maneja el Instituto Costarricense de Turismo (ICT).

- 3) **Red vial:** por sí misma es un costo de superficie, la distancia más corta es el principio que el modelo toma para evacuar, pero adicional a esto, se toman el ancho y el material de la misma. En el país existe una gran cantidad de archivos con la información de la red vial para autos, pero la evacuación en caso de tsunami ha de efectuarse caminando, por ende se ha procedido a digitalizar e incluir en la red vial cualquier tipo de espacio caminable para todas las playas del área de estudio, por medio de las imágenes del proyecto de Stereocarto y el BID del catastro. Posteriormente, todas las vías utilizadas fueron recorridas in campo para comprobar su existencia y características.

DIFICULTAD DE ACCESO (DA)				
Identificación	Punto del GPS		Número de fotografía	
Condición	Tipo de red	Calle	Elementos afectante	
		Playa		
	Grado de afectación		Estacionalidad	
Observación extras:				
POR DIGITALIZAR (CD)				
Identificación	Punto del GPS		Número de fotografía	
Condiciones del camino	Ancho		Destino	
	Material		¿Por qué no se ve en la foto?	
Observaciones				
ELIMINACIÓN DE LAS CALLES (EC)				
Identificación	Punto del GPS		Número de fotografía	
Categoría	Privada	No existe	Destino	
Observación extras:				

Figura 4. Algunas de las fichas de trabajo de campo. Fuente: Elaboración propia.

- 4) **Contexto espacial:** en los alrededores de las vías es el último costo de superficie a valorar y se divide en tres partes: el primero los lugares peligrosos, que son los lugares que pueden representar un peligro añadido en caso de verificarse un tsunami (explosiones, vertido de tóxicos, etc.). Para el caso de Costa Rica estos sitios no son muy abundantes debido a que el sector industrial en las orillas de las playas es prácticamente inexistente. Segundo los lugares de importancia, que son sitios de reunión popular, tales como las plazas de fútbol, colegios y

escuelas, iglesias, entre otros. Tercero lugares especiales, los cuales son los que se encuentran con poblaciones que pueden presentar condiciones especiales para la evacuación, tales como centros médicos, jardines de niños, guarderías, hogares para personas de la tercera edad, entre otros. Estos sitios se toman por medio de los puntos y polígonos de referencia del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2011).

5) Refugios verticales: en algunos lugares y en determinadas circunstancias puede ser recomendable evacuar hacia un refugio vertical en vez de uno horizontal (determinado por la cota de seguridad). Se entiende refugio vertical aquellos edificios de más de tres plantas cuya estructura sea resistente al paso de un tsunami (Sheer et al., 2011). Para determinar a priori la existencia de edificios con las características de altura necesarios para que se puede usar como refugio vertical, se utilizó el modelo digital del terreno (MDT) y el modelo digital de superficie (MDS). El MDS fue restado al MDT de forma que se obtiene la altura de los elementos que se encuentran por encima de la superficie del terreno, como edificios, árboles, etc. Se seleccionaron las áreas que hayan dado un valor de esta resta igual o mayor de 10 m. Seguidamente, se superponen las fotografías de BID catastro, con el objeto de eliminar los elementos con altura superior a 10 m que se corresponden con arboledas u otros elementos que no sirvan como refugios verticales. Se digitalizan los edificios restantes y se comprueba en campo la idoneidad del mismo como refugio (accesibilidad, cantidad de personas, etc.).

Trabajo de campo

De forma paralela a la recopilación de datos digitales y su ensamblaje para preparar el análisis de rutas, es fundamental la comprobación en campo de muchos de los elementos que forman parte del mapa. Para ello, se han realizado diversas giras en las que se recorren todas las rutas obtenidas hasta el momento y se anotan otras particularidades del terreno que no han podido ser detectadas a partir de la información utilizada previamente.

Con objeto de ir tomando nota de las distintas peculiaridades observadas, se procedió a la elaboración de varios modelos de fichas de campo; cada una de ellas se utiliza en un tipo de elemento. Las fichas más utilizadas en campo son tres (Figura 4): (1) aquellas que revelan zonas en las que puede haber una obstaculización de la evacuación (puentes angostos, alambradas, etc.); (2) las que ponen de manifiesto la presencia de un camino o calle no digitalizada y (3) las que ponen de manifiesto que alguna calle presente en los datos debe ser eliminada, por no existir o por ser imposible el tránsito por ella.

Análisis de rutas de evacuación

Con cada uno de los elementos anteriores contempla los costos de superficie y determina las rutas con menor costo al evacuar. La labor del modelo es contemplar cada uno de los elementos y elegir solo las que tienen menor cantidad de costos de superficie y desechar las otras.

Resultados y discusión

Los resultados hasta el momento son preliminares y sirven para dar una idea de cómo se aplica este método SIG de análisis de rutas a la resolución de las vías de evacuación por tsunami en localidades costeras.

Uno de los principales resultados hasta el momento es la selección de 4 localidades en las que, la realización de mapas de rutas de evacuación es más urgente, tanto por la amenaza (alturas de ola estimadas) como por la vulnerabilidad (exposición y población). Estas 4 localidades son Sámara, Bahía Potrero, Tamarindo y Puntarenas. De ellas, Sámara es en la que se ha avanzado más y ya se cuenta con el área inundable para 3 casos posibles (Figura 5). El primero de ellos, se refiere exclusivamente a la cota 20 m; esta cota proviene de la altura máxima obtenida con el modelado grueso, que fue de 12 m, pero tuvo que ser redondeada a 20 por las características de los datos topográficos utilizados. Los otros dos casos, se refieren a la modelización de tsunamis locales y de tsunamis regionales y lejanos. Cada uno de estos 3 casos presenta un área inundable diferente.

La zona inundable obtenida para la altura máxima de ola proveniente de tsunamis locales tiene un área de 0.993888 Km², mientras que el área obtenida para los tsunamis regionales y lejanos es de 3.026669 Km², más de tres veces mayor que el escenario local. El escenario para tsunamis locales cuenta con 48 refugios horizontales a los que se accede a través de la red vial existente, mientras que para el escenario de los tsunamis regionales y lejanos, se cuenta con apenas 28 refugios, también accesibles desde la red vial. En algunos casos, el área inundable fue ampliada manualmente hasta hacerla llegar a una carretera o camino, con el objeto de hacer la información clara para el público y mostrar el punto exacto en el que estarían seguros. Si estas pequeñas correcciones no se hicieran, el público al leer el mapa no sabría en qué punto exacto estarían seguros.

Otro aspecto que es importante señalar es el hecho de que para el escenario de tsunamis locales, aunque la evacuación es más sencilla dada la menor extensión de la zona inundable y el mayor número de refugios, la llegada de un posible tsunami de estas características ocurriría en escasos minutos desde que se produjera el terremoto y por tanto el tiempo de evacuación sería mínimo. Por ello, se considera importante mostrar y valorar conjuntamente ambos escenarios, aunque se utilice como caso general el de mayor extensión del área inundable.

Ambos escenarios, el de tsunamis locales y el de regionales y lejanos, muestran áreas inundables considerablemente menores que la definida por la cota de 20 m, a la que se había llegado a partir de un modelaje grueso y un redondeado de la cota máxima. En el sector oeste la diferencia entre los 3 escenarios no es tan marcada debido a las altas pendientes que



caracterizan la zona; sin embargo, en la zona este de la playa, sí se observa que el escenario de la cota 20m se amplía mucho hacia tierra, debido a las bajas pendientes en este sector (Figura 5).

También debido a la diferencia de pendientes entre un extremo y otro de la playa, el área inundable para los casos de tsunami regional y lejano, y cercano, es mucho más amplia en la zona este de la playa, que en la zona central y oeste.

En las primeras pruebas que se han realizado del análisis de rutas, en las que se definirá a qué refugio debe dirigirse cada grupo de población, se ha visto que, en algunos casos, determinados sectores quedan sin ser evacuados. La razón de esto es que el análisis de rutas se creó con una finalidad más comercial que

la aplicación a gestión de desastres, como el encontrar la gasolinera más cercana o el recorrido más eficiente de los camiones que recogen la basura; por ello, el modelo deja en ocasiones algunas poblaciones sin evacuar pues considera que no es “rentable”, según su lógica, ir del punto donde se encuentra esa población hasta el lugar seguro, basándose en los tiempos para recorrerlo y los costos. Esta situación, que de seguro se nos presentará en más de un lugar, obliga a revisar cada modelo minuciosamente y de forma manual, y forzarlo a evacuar a toda la población. Este tipo de forzamientos pueden ayudarnos a sugerir a las comunidades implicadas la introducción de algunos cambios, como puede ser la creación de algún camino nuevo, la apertura de alguna cerca, incluso la construcción de refugios verticales.

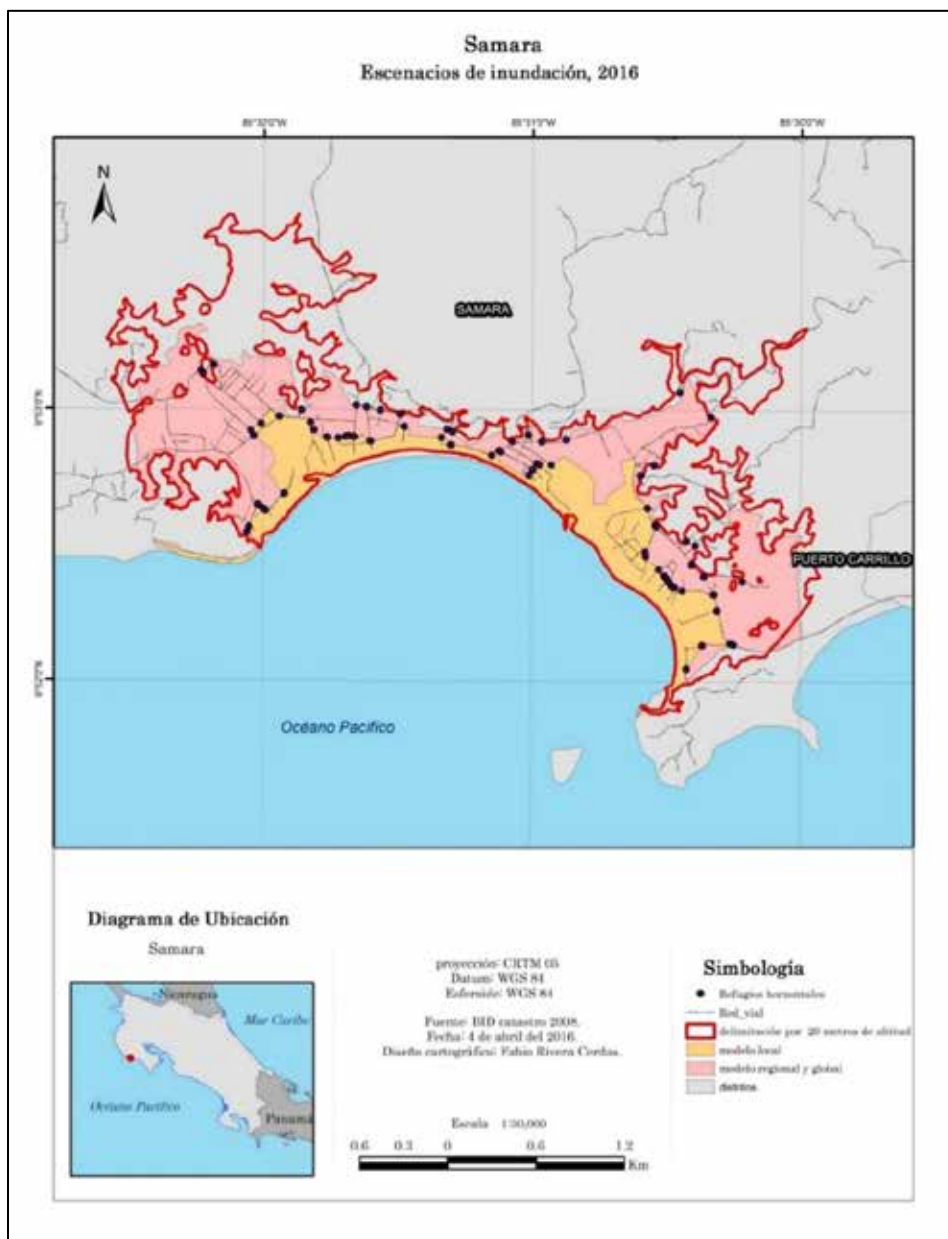


Figura 5. Zonas inundables para los escenarios de cota 20 m, tsunamis locales y tsunamis regionales o lejanos. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La metodología aplicada, basada en las directrices descritas en el Handbook of Tsunami Evacuation Planning, elaborado por Sheer et al. (2011), publicado por la Comisión Europea y adaptada a la actual disponibilidad de datos espaciales en Costa Rica, es la metodología más óptima y relativamente sencilla para elaborar los primeros mapas de rutas de evacuación por tsunami del país. El progreso de este trabajo llevó a establecer las zonas seguras en caso de tsunami en 16 localidades del Pacífico costarricense, a elaborar un mapa virtual de la posición de las señales que indican la ruta a seguir y a sugerir mejoras en el terreno para que toda la población pueda evacuar a tiempo.

El área inundable para Sámara en caso de tsunami local es cerca de tres veces menor que para el caso de tsunamis regionales o lejanos, aunque el tiempo de evacuación es mucho menor. Se utilizará el escenario de tsunamis regionales o lejanos como caso de estudio general.

La evacuación es más sencilla en la zona este y central de Sámara que en la zona oeste, debido a las bajas pendientes que caracterizan esta última zona.

La cantidad de refugios horizontales en Sámara para ambos escenarios es suficiente para evacuar a la población de esta playa y no parece necesaria la construcción de refugios verticales.

En algunos casos, tanto en Sámara como en las siguientes playas a estudiar, habrá que forzar manualmente el modelado para asegurarse que éste evacúa a toda la población afectada.

Referencias bibliográficas

- Camilo, C. (1944). Riesgo y crisis sociales. En Cárdenas, C. *Desarrollo humano, riesgos y crisis sociales*. Santa Fé de Bogotá: CORPREVER.
- Cárdenas, C. (1944). Riesgos y crisis sociales En Cárdenas, C. *Desarrollo humano, riesgos y crisis sociales*. Santa Fé de Bogota : CORPREVER.
- Chacón, S. y Protti, M. (2011). Modeling a tsunami from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap and its potential impact in Puntarenas. *Journal of South American Earth Sciences*. 31 (4), pp. 372-382.
- Fernández, M. (2002). Daños, afectos y amenaza de Tsunami en América Central. *Revista Geológica de América Central* (26). pp 71-83
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (Costa Rica). (2011). X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda. San José, C.R. : INEC.
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A; Guevara, E. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m database*. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

López , A.; Martín, R. y Rodríguez, P. (12 de marzo del 2011). Gran susto por alerta de tsunami. *Al Día*. Recuperado de: http://www.aldia.cr/ad_ee/2011/marzo/12/nacionales2711738.html

National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA). (s.f.). National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS) *Global historical tsunami database* [Archivo de datos]. Doi:10.7289/V5PN93H7

Román, M. (2007). *XIII Informe del Estado de la Nación : desarrollo turístico e inmobiliario costero y preocupaciones ambientales*. San José, C.R.: Estado de la Nación en Desarrollo Sostenible.

Sheer, S.; Gardi, A.; Guillande, R.; Eftichidis, G.; Varela, V.; de Vanssay, B. y Colbeau-Justin, L. (2011). *Handbook of tsunami evacuation planning. schema (scenarios for hazard-induced emergencies management)*. Luxemburgo: European Commission, JRC, IPSC.

Solano, H.; Castillo, D.; Chinchilla, P.; Avilés, R.; Boza, P.; Quesada, A. y Peña, J. (16 de agosto del 2007). Susto en el Pacífico por alerta de Tsunami. *Al Día*. Recuperado de: http://www.aldia.cr/ad_ee/2007/agosto/16/nacionales1206310.html

UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission. (2015). *Reports of Meetings of experts and equivalent bodies : workshop on tsunami modelling and mitigation icg/caribe-ews working group 2, tsunami hazard assessment (ICG/CARIBE-EWS/WG2-THA/3)*. Cartagena de Indias, Colombia: UNESCO.

