

Impacto de tsunamis en Puerto Viejo, Limón, Tortuguero y Manuel Antonio mediante modelado numérico de grandes terremotos en el Caribe y Pacífico Central-Sur de Costa Rica

Impact of tsunamis in Puerto Viejo, Limón, Tortuguero, and Manuel Antonio through numerical modeling of large earthquakes in the Caribbean and Central-South Pacific off Costa Rica

Impacto dos tsunamis em Puerto Viejo, Limón, Tortuguero e Manuel Antonio através da modelagem numérica de grandes terremotos no Caribe e no Pacífico Central-Sul da Costa Rica

*Mario Arroyo-Solórzano*¹

Candidato a Doctor por la Universidad de Potsdam, Alemania



Resumen

Se modelan tres escenarios hipotéticos de tsunamis para Costa Rica, generados por dos posibles rupturas en el Caribe (M_w 7,9 y 7,6) y una en el Pacífico Central-Sur (M_w 8,1). Además de analizar la generación a partir de estas fuentes sísmicas, se evalúan los patrones de propagación del frente de ola, identificando diferencias en la dirección, velocidad y concentración de energía. Adicionalmente, se muestran las series temporales de altura de ola, derivadas de las simulaciones en algunas localidades costeras clave del país, tanto en el Caribe (Tortuguero, Limón y Puerto Viejo) como en el Pacífico (Manuel Antonio), todas ellas, con alta relevancia turística y poblacional. A partir de estas simulaciones se infiere el potencial impacto de inundación mediante las alturas de ola estimadas en la costa. Los resultados ofrecen insumos relevantes para planes de

1 * Magister en Riesgo Sísmico, Licenciado en Geología y Ciencias Geográficas y candidato a Doctor por la Universidad de Potsdam, Alemania. Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Alemania. Correo electrónico marroyo@gfz.de, código Orcid : <https://orcid.org/0000-0002-1653-2680>.

evacuación y constituyen una herramienta estratégica para el ordenamiento territorial, especialmente en zonas donde el desarrollo urbano y turístico debe considerar, de forma prioritaria, el riesgo por tsunamis.

Palabras claves: Costa Rica, inundación, modelado, ola, terremoto, tsunami.



Abstract

Three hypothetical tsunami scenarios are modeled for Costa Rica, generated by two potential ruptures in the Caribbean (M_w 7.9 and 7.6) and one in the Central-Southern Pacific (M_w 8.1). In addition to analyzing tsunami generation from these seismic sources, wavefront propagation patterns are evaluated, revealing differences in direction, speed, and energy concentration. Time series of wave height derived from the simulations are also presented for key coastal locations in the country, both in the Caribbean (Tortuguero, Limón, and Puerto Viejo) and the Pacific (Manuel Antonio), all of which are of high touristic and demographic importance. Based on these simulations, the potential flooding impact was inferred through estimated coastal wave heights. These results provide valuable input for evacuation planning and represent a strategic tool for land-use planning, especially in areas where urban and touristic development must prioritize tsunami risk.

Keywords: Costa Rica, Earthquake, Flood, Modeling, Tsunami, Wave



Resumo

São modelados três cenários hipotéticos de tsunamis para a Costa Rica, gerados por duas possíveis rupturas no Caribe (M_w 7,9 e 7,6) e uma no Pacífico Central-Sul (M_w 8,1). Além de analisar a geração a partir dessas fontes sísmicas, são avaliados os padrões de propagação da frente da onda, identificando diferenças na direção, velocidade e concentração de energia. Além disso, são mostradas as séries temporais da altura das ondas, derivadas das simulações em algumas localidades costeiras importantes do país, tanto no Caribe (Tortuguero, Limón e Puerto Viejo) como no Pacífico (Manuel Antonio), todas elas com grande relevância turística e populacional. A partir dessas simulações, infere-se o impacto potencial da inundação por meio das alturas estimadas das ondas na costa. Os resultados oferecem informações relevantes para planos de evacuação e constituem uma ferramenta estratégica para o ordenamento territorial, especialmente em áreas onde o desenvolvimento urbano e turístico deve considerar, de forma prioritária, o risco de tsunamis.

Palavras-chave: Costa Rica, inundação, modelagem, onda, terremoto, tsunami.

INTRODUCCIÓN

A diferencia de las olas del mar que se generan por la acción del viento, los tsunamis son provocados por una deformación del fondo marino o por un desplazamiento de la columna de agua que puede ser causada por terremotos, deslizamientos submarinos o subaéreos, y por erupciones

volcánicas ([Intergubernamental Oceanographic Commission, 2014](#)). Se diferencian en que los periodos y la longitud de onda de los tsunamis son significativamente mayores y afectan, de manera considerablemente intensa, las zonas costeras ([Pungh, 2004](#)). Además, estos pueden viajar a velocidades de hasta 500 millas por hora y tener longitudes de onda de cientos de kilómetros ([Friedman, 2019](#)).

Aunque los tsunamis son poco frecuentes, algunos estudios han demostrado que, a Costa Rica, en el periodo comprendido entre 1520 y el 2021, han arribado al menos 42 tsunamis entre locales, regionales y lejanos ([Chacón-Barrantes, Murillo y Rivera, 2021](#)). Las costas del Pacífico han experimentado una mayor cantidad de eventos (~37) debido al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe (y la microplaca de Panamá) a lo largo de la fosa Mesoamericana (Figura 1), a distintas velocidades de convergencia ([DeMets et al. 2010](#)). A pesar de esto, el sector Caribe también es de alta relevancia, con estructuras tectónicas como el Escaper de Hess y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP). En efecto, de los tsunamis confirmados hasta 2021, solo el evento de Limón en 1991 ha resultado en pérdidas humanas ([Chacón-Barrantes, Murillo y Rivera, 2021](#)). Con este antecedente, es claro que existe la probabilidad de que un evento tsunamigénico pueda afectar al país en ambas costas y en cualquier momento. Es por esto que la preparación y conocimiento de las áreas de inundación, mediante modelados, es fundamental para el ordenamiento territorial, especialmente en zonas donde el desarrollo urbano y turístico debe considerar, de forma prioritaria, el riesgo por tsunamis.

Estudios sobre tsunamis en Costa Rica han resaltado al menos diez tsunamis que causaron daños significativos, subrayando la importancia de fuentes sísmicas clave y las áreas con mayor potencial sísmico en ambas costas ([Fernández, 2002](#)). La amenaza por tsunami en ambas costas destaca la necesidad de implementar planes de capacitación ciudadana para enfrentar la vulnerabilidad y mitigar los riesgos asociados ([Fernández-Arce y Alvarado, 2013](#)). En respuesta a esta amenaza, se ha desarrollado un método para elaborar rutas de evacuación optimizadas en áreas vulnerables, como lo es el caso del Pacífico Norte y Central, con el objetivo de mejorar la preparación ante tsunamis ([Rivera et al., 2016](#)). Para entender mejor su dinámica territorial, estudios de campo han evaluado relatos de lo ocurrido durante el terremoto de 1991 ([Nishenko et al., 2021](#)), donde se evidencia

la vulnerabilidad de las comunidades costeras, con inundaciones de hasta 200 m tierra adentro, sobresaliendo la necesidad de los sistemas de alerta temprana.

Las simulaciones numéricas de tsunamis se realizan con modelos específicos, que son diseñados para conocer la propagación y la inundación de un potencial tsunami, conociendo, en este caso, los parámetros de una fuente de terremotos conocida, o científicamente determinada (Kânoğlu y Synolakis, 2015). Para poder hacer un modelado correcto se necesita tener una batimetría y topografía bien definida, con una resolución de 50 m a un máximo de 500 m para modelos globales, en cuanto a batimetría y de 5 a 10 metros para topografía terrestre (Dirección de Hidrografía y Navegación [DHN], 2020), donde la cota 0 esté bien establecida. Además, es necesario tener los parámetros de la falla sísmica, como lo son la profundidad epicentral, el largo y ancho de la falla, el deslizamiento de la falla y el mecanismo focal (*strike*, *dip* y *rake*), así como contar con un *software* para el modelado. En este trabajo se ha realizado el modelado de tsunamis de fuentes sísmicas por medio del programa COMCOT (Modelo Cornell Multi grid Coupled Tsunami) (Wang, 2009), en el Pacífico y el Caribe de Costa Rica.

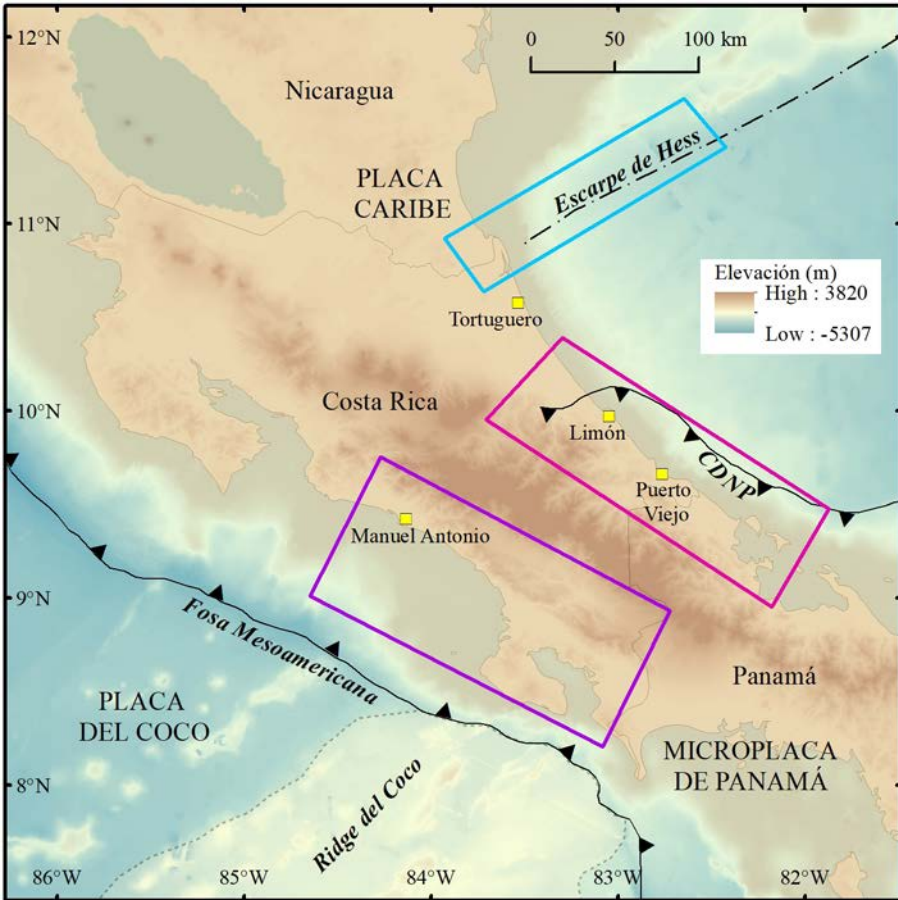
El objetivo de este trabajo es aproximar magnitudes máximas, a lo largo de posibles rupturas, para dos posibles fuentes sísmicas en el Caribe (M_w 7,6 y 7,9) con base en Zamora *et al.* (2021), y una en el Pacífico, de acuerdo con un hipotético peor escenario en los segmentos Central y Sur de la zona de subducción interplaca (M_w 8,1), de acuerdo con Arroyo-Solórzano y Linkimer (2021) (Figura 1). Finalmente, con base en los escenarios modelados, se muestran las series temporales de altura de ola, derivadas de las simulaciones en algunas de las costas más turísticas e importantes del Caribe (Tortuguero, Limón y Puerto Viejo) y del Pacífico de Costa Rica (Manuel Antonio).

El conocer el área de inundación de un potencial tsunami es fundamental no solo para la determinación de rutas de evacuación, sino también para una planificación territorial efectiva en zonas vulnerables. Si bien, existen estudios previos y mapas de evacuación aprobados por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), este estudio aporta un enfoque más detallado al integrar modelos de simulación de tsunamis que permiten evaluar escenarios específicos en localidades clave, considerando la relevancia turística y poblacional. Así, este trabajo representa un insumo hacia el ordenamiento

territorial y el desarrollo de estrategias más precisas para el ordenamiento de zonas costeras, donde el riesgo de tsunami debe ser considerado, de forma prioritaria, en proyectos de urbanización y desarrollo turístico.

Figura 1: Ruptura aproximada de las principales fuentes analizadas y sitios de medición de boya para altura de ola en las playas turísticas seleccionadas (cuadros amarillos).

Se muestra en rosado la ruptura para el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) en el sector Caribe Sur, en celeste para el Escarpe de Hess y en morado para el segmento centro-sur de la subducción de la fosa mesoamericana en el Pacífico



Fuente: Las elevaciones mostradas provienen de los modelos de batimetría global de [GEBCO \(2019\)](#).

DATOS Y MÉTODOS

Se modelaron tres escenarios para evaluar el potencial tsunami (Figura 1). El primer escenario se presenta en el Caribe Sur de Costa Rica, el cual se caracteriza por un fuerte régimen compresivo que pertenece al Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), correspondiendo con una ancha zona arqueada activa de pliegues y cabalgamientos, en el margen Caribe de Panamá (Silver *et al.*, 1990). En este sector, Arroyo y Linkimer (2021), sugieren, a partir de tomografías sísmicas, una zona de subducción incipiente. Un segundo escenario se propone para una hipotética ruptura en el Escarpe de Hess (HESS), la cual es una estructura tectónica que ha sido interpretada como falla de rumbo, con sentido noreste, y representa una zona de límite entre los bloques geológicos Chortis y Chorotega (MacKenzie *et al.*, 2008). Por último, el tercer escenario se propone en el Pacífico, en la región central-sur de esta vertiente, con epicentro cerca de la península de Osa y ruptura que se propague hacia el segmento central (Quepos) y hacia el sur (Península de Osa).

La Tabla 1, resume los parámetros de las rupturas sísmicas utilizadas para obtener la deformación de la corteza, que es la condición inicial en el modelado numérico de tsunamis. Esto se implementó en COMCOT, de acuerdo con los parámetros generales de la simulación de 180 minutos y con intervalos cada 60 segundos para cada uno de los escenarios (anexo 1). Este modelo utiliza mallas anidadas (topo-batimétricas), y datos de la fuente sísmica, lo que permite estimar los tiempos de arribo y el área de inundación, todo esto bajo principios matemáticos. Se basa en ecuaciones de aguas someras lineales, derivadas de una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles y homogéneos (Friedman, 2019).

Tabla 1: Parámetros que caracterizan las rupturas uniformes simuladas

Simulación	Long	Lat	Prof (km)	Largo (km)	Ancho (km)	Rumbo	Buz.	Rake	Desliz. (m)	M_w
Caribe Sur	-82.44	9.53	12	150	45	122	25	90	4.2	7,9
Escarpe de Hess	-83.00	11.14	16	110	40	50	45	-50	2.5	7,6
Pacífico Central-Sur	-83.65	8.72	12	160	95	300	30	90	6.5	8,1

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de ruptura se infirieron con base en las relaciones de escalamiento de magnitudes de Blaser *et al.* (2010) y Allen y Hayes

(2017). Estas relaciones son específicas para regímenes de subducción interplaca, y, además, para terremotos *offshore*. El deslizamiento en la falla se determinó usando como referencia la magnitud máxima asociada a cada escenario. En el caso del Escarpe de Hess la magnitud máxima (M_w 7,6) se estimó de acuerdo con las relaciones de escalamiento de [Blaser et al. \(2010\)](#), usando como referencia el estudio de [Zamora et al. \(2021\)](#), donde consideran el largo de falla.

En el caso del escenario en el Caribe Sur, la magnitud máxima se determinó a partir del momento sísmico acumulativo ([Makropoulos y Burton, 1983](#)) disponible en la zona sísmica, según la zonificación sísmica propuesta por [Alvarado et al. \(2017\)](#). El método de momento sísmico acumulativo transforma en magnitud la cantidad acumulada de momento sísmico medido entre dos curvas envolventes, según el catálogo de terremotos, en este caso, basado en el catálogo de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN-UCR), de acuerdo con [Arroyo-Solórzano y Linkimer \(2021\)](#). Por último, para el escenario del Pacífico Central-Sur, la ruptura se determinó a partir de la magnitud máxima inferida, de acuerdo con toda la sismicidad registrada en el país ([Arroyo-Solórzano y Linkimer, 2021](#)), asumiendo que esto ocurriera en los segmentos de Osa y Quepos ([Alvarado et al., 2017](#)). El mecanismo de las rupturas modeladas lo definimos en concordancia con la caracterización de estas fuentes, realizada por estudios anteriores ([Zamora et al., 2021](#); [Hidalgo-Leiva et al., 2023](#)). Los archivos de configuración general de cada una de las fuentes, donde se muestran sus dimensiones y mecanismos de ruptura, se muestran en los anexos 2, 3 y 4.

Para la ejecución del modelado en COMCOT, es necesario definir un sistema jerárquico de grillas batimétricas de distintos tamaños y resoluciones, que permitan refinar el modelado en áreas de interés. En este trabajo, se emplearon tres niveles de grilla. El nivel 1 abarca una región extensa del Caribe, utilizando datos de batimetría global [GEBCO \(2019\)](#) con una resolución de 1 arco minuto (aproximadamente 1.8 km). Para el nivel 2, se emplearon cartas náuticas digitalizadas del Caribe Sur, con una resolución de 16 segundos de arco (500 m), y para el nivel 3, centrado en zonas costeras clave como Puerto Viejo y Cahuita, se utilizó una resolución de 4 segundos de arco (120 m). Estas resoluciones representan el mínimo nivel de detalle posible con la información disponible.

Por último, se analizó la evolución del nivel del agua y el arribo de las olas en boyas hipotéticas o “virtuales” (Figura 1), localizadas en puntos turísticos clave en cada una de las costas. Para los escenarios del sector Caribe se seleccionaron las playas de Tortuguero, Limón y Puerto Viejo, mientras que, para el escenario en la costa del Pacífico, se tomó como punto de referencia la playa del Parque Nacional Manuel Antonio.

RESULTADOS

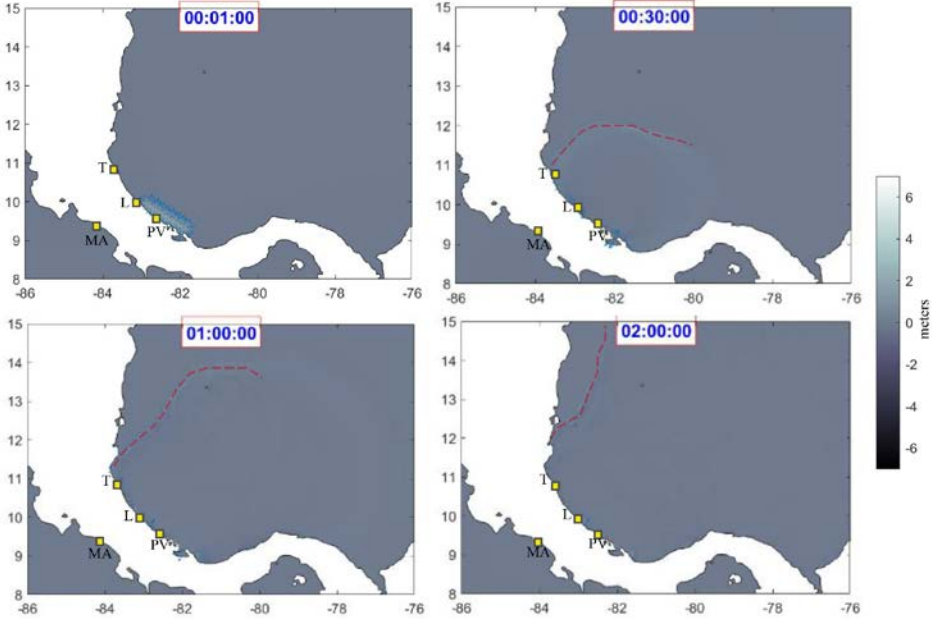
El potencial tsunamigénico se determina a partir de la generación, propagación e inundación regional de tsunamis, con base en simulaciones numéricas. Para cada escenario, se ha generado una “película” de lo que sería el proceso de simulación en los 180 minutos modelados. La configuración de los archivos de entrada para ejecutar estas simulaciones en COMCOT se puede visualizar en los anexos de este documento y se muestran capturas a 1 min, 30 min, 1h y 2h de las rupturas, para el escenario en el CDNP (Figura 2), para el Escarpe de Hess (Figura 3), y para el Pacífico Sur-Central (Figura 4).

La Figura 5 muestra las series de tiempo registradas en las cuatro boyas virtuales, según cada terremoto. En cada gráfico la amplitud de la ola y el tiempo de simulación numérica es de 3 horas (180 min). Con estas series de tiempo se observan los arribos y las amplitudes de la ola en aguas someras, cuyas primeras apariciones varían entre 5 y 20 minutos, según la distancia de la boya a la zona de deformación.

De los sitios estudiados para los tres escenarios modelados en este estudio, el evaluado a lo largo del Escarpe de Hess es el que podría generar mayor afectación, con un tsunami que afectaría toda la costa Caribe de Costa Rica y presentaría alturas máximas de 1,1 m en el sector de Tortuguero (Figuras 1 y 5b). Los escenarios del CDNP y Pacífico Central-Sur, a pesar de ser más grandes (M_w 7,9 y 8,1, respectivamente), generarían alturas máximas que no superan 1 m en los sitios turísticos mencionados. El escenario del Pacífico se consideró para el Parque Nacional Manuel Antonio, esto, debido a su relevancia, por ser uno de los sitios más visitados del país. Al respecto, en 2023, este parque nacional recibió un total de 419 876 visitantes, consolidándose como uno de los destinos más frecuentados de Costa Rica (SINAC, 2023). Sin embargo, este escenario no solo es importante para esta playa, ya que podría presentar también afectación en otras zonas costeras del Pacífico, lo cual se refleja en la secuencia de la simulación, con gran refracción de oleaje a lo largo de la costa (Figura 4).

Figura 2: Simulaciones de la propagación y altura de ola para el escenario sísmico en el CDPN (Limón Sur) a 1 min, 30 min, 1h y 2h de ocurrido el evento.

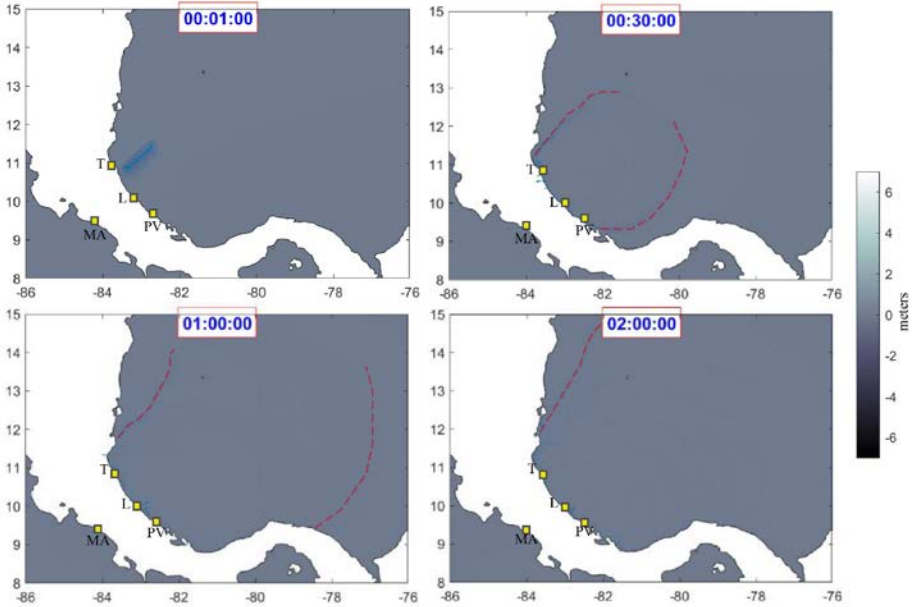
La línea roja punteada representa el frente de olas principal que se visualiza en la simulación. Los cuadros amarillos son las playas turísticas de interés como mediciones para la altura de ola. T: Tortuguero, L: Limón, PV: Puerto Viejo y MA: Manuel Antonio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Simulaciones de la propagación y altura de ola para el escenario sísmico en el Escarpe de Hess a 1 min, 30 min, 1h y 2h de ocurrido el evento.

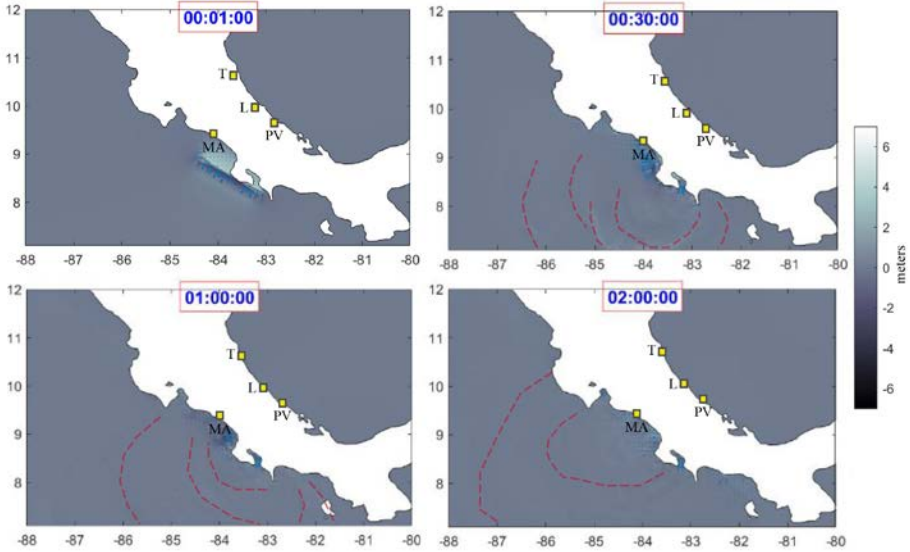
La línea roja punteada representa el frente de olas principal que se visualiza en la simulación. Los cuadros amarillos son las playas turísticas de interés como mediciones para la altura de ola. T: Tortuguero, L: Limón, PV: Puerto Viejo y MA: Manuel Antonio



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Simulaciones de la propagación y altura de ola para el escenario sísmico en el Pacífico Central-Sur a 1 min, 30 min, 1h y 2h de ocurrido el evento.

La línea roja punteada representa el frente de olas principal que se visualiza en la simulación. Los cuadros amarillos son las playas turísticas de interés como mediciones para la altura de ola. T: Tortuguero, L: Limón, PV: Puerto Viejo y MA: Manuel Antonio.



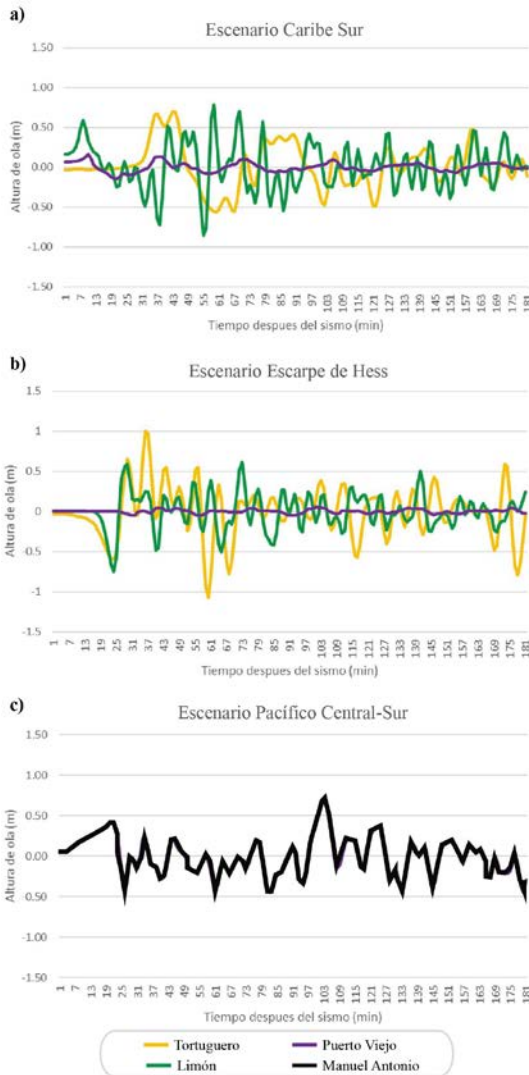
Fuente: Elaboración propia

El análisis conjunto de las alturas de ola y los tiempos de arribo permite medir no solo la magnitud del impacto esperado, sino también las condiciones para la evacuación y la planificación territorial. Para el escenario del Caribe Sur, por ejemplo, las alturas de ola simuladas para Limón alcanzan niveles que podrían generar inundación significativa en los sectores urbanos y portuarios, lo que, sumado al tiempo de arribo estimado, exige una capacidad de respuesta eficiente y protocolos claramente definidos. En Tortuguero, la combinación de olas de gran amplitud, con tiempos de llegada más reducidos en un escenario como el del Escarpe de Hess, sería particularmente desafiante para la evacuación, dada la morfología plana del terreno y las limitadas rutas de salida. En el caso del Pacífico, las alturas de ola proyectadas en zonas turísticas

tan importantes como el Parque Nacional Manuel Antonio, refuerzan la necesidad de considerar esta amenaza en el desarrollo costero.

Figura 5: Series de tiempo para cada escenario, registradas en cuatro boyas virtuales, frente a las costas de las playas turísticas e importantes, analizadas en este estudio.

La ubicación de las boyas virtuales se muestra en las figuras 1, 2, 3 y 4.



Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Un aspecto para resaltar de los resultados obtenidos es la influencia de la morfología costera. En el Caribe, la morfología predominante es de tipo lineal, con playas en flecha, lagunas costeras y sistemas de islas barrera, formados por sedimentación fluvial y marina (Barrantes-Castillo y Sandoval-Murillo, 2021), con baja energía de oleaje y alta dinámica sedimentaria (Ortiz-Malavassi, 2012). Para el Pacífico, la morfología costera es más extensa y variada, debido a los procesos tectónicos y fluviales, con acantilados, golfos, manglares y playas de alta energía (Ortiz-Malavassi, 2012). Estas diferentes morfologías, así como el proceso de ruptura y directividad de la fuente, tienen un impacto en la altura de ola y el momento del arribo de esta. Por ejemplo, para el escenario en el CDNP (Figura 5a), la llegada del tsunami a Puerto Viejo sería casi inmediata, pero con alturas muy bajas, mientras que, en ese mismo escenario, la altura es mayor en Limón o Tortuguero, al transcurrir 1 h. Esta situación morfo-costera de Puerto Viejo que, en cierta medida, lo protege de la influencia de tsunamis, se refleja y es consistente en los dos escenarios modelados para el Caribe (Figura 5a y 5b). Esto subraya la influencia de las barras arenosas, plataformas arrecifales y su localización dentro de una bahía parcialmente protegida, características propias de la morfología costera del Caribe costarricense (Barrantes-Castillo y Sandoval-Murillo, 2021; Ortiz-Malavassi, 2012).

El efecto de propagación resulta muy llamativo en los escenarios del Caribe Sur en el CDNP y del Pacífico Central-Sur, notándose una influencia directa de la batimetría en la propagación (Figura 1). Para el primero de estos, el Escarpe de Hess provoca una barrera importante, retrasando el arribo del tren de olas a las costas del Caribe de Nicaragua (Figura 2 y Figura 3). Para el Pacífico se observa lo mismo, debido a la cordillera submarina del Coco (Ridge del Coco), que se subduce cerca de la fuente modelada (Figura 1), donde se da gran cantidad de refracción de ondas, producto de la influencia de esta morfología (Figura 4).

Los patrones de propagación del frente de ola para los escenarios en el Caribe muestran diferencias en dirección, velocidad de llegada y concentración de energía en los puntos de interés evaluados (Figura 2 y Figura 3). En ambos escenarios, la dirección principal de propagación del frente de ola es hacia el noreste del Caribe, alejándose progresivamente de

la fuente sísmica. Aunque Puerto Viejo recibe la llegada del tsunami casi inmediatamente después del evento, la amplitud es muy baja, debido a su ubicación, fuera del eje principal de propagación. En contraste, Limón y Tortuguero, ubicadas en línea con la dirección de propagación, registran mayores amplitudes de onda, aproximadamente una hora después del evento, evidenciando una acumulación más significativa de energía en esas zonas.

En el escenario del Pacífico (Figura 4), el frente de ola, en dirección al continente, muestra una orientación preferencial hacia el este-noreste, impactando directamente las costas de Manuel Antonio con tiempos de llegada cortos, pero con amplitudes más altas que en Puerto Viejo. A diferencia del Caribe, en este caso se observa una mayor concentración de energía sobre el área cercana al epicentro, con una dispersión del frente de ola hacia mar abierto en las horas siguientes. Estas diferencias reflejan cómo la combinación de la ubicación de la fuente, la batimetría regional y la morfología costera modulan, significativamente, la propagación y energía del tsunami.

Con respecto a los tiempos de arribo, el escenario del Caribe Sur en el CDNP afectaría en mayor medida a Limón, con los arribos más perjudiciales en aproximadamente 1 hora (Figura 5a). Para el caso del escenario del Escarpe de Hess, esto sucede para Tortuguero, con los arribos más perjudiciales entre 30 y 40 minutos (Figura 5b). Este escenario es de interés para retomar en estudios futuros, ya que esta estructura tectónica presenta una morfología propensa a deslizamientos, con potencial de generación de tsunamis (Zamora *et al.*, 2021). Por último, en el escenario del Pacífico, la mayor afectación para Manuel Antonio se da 103 min después de la ruptura, lo cual resalta la importancia de los procesos de refracción y reflexión de ondas (Figura 5c).

Con base en las simulaciones numéricas se muestra que los tsunamis originados tendrían áreas de afectación limitadas a sus áreas de origen, esto, principalmente debido a la morfología del fondo marino y al potencial sísmico que presenta. Lo anterior se evidencia en especial para a los sismos simulados en el Caribe Norte de Costa Rica y al sur de Nicaragua, donde se generarían tsunamis locales. Además, se identificó que los sismos modelados permiten observar procesos de refracción y reflexión importantes. Esto es más evidente debido al patrón de propagación resultante, a partir del mayor potencial sísmico modelado en el Pacífico Central-Sur de Costa Rica. De

esta forma, se remarca la importancia de la obtención y generación de batimetrías de mejor detalle para estudios futuros, lo cual permitiría una mejor discriminación entre la influencia de las características de la ruptura en el patrón de la inundación, o la influencia del fondo marino en el flujo.

Los resultados obtenidos ofrecen además fundamentos técnicos concretos para medidas de prevención en el ámbito del ordenamiento territorial. Por ejemplo, se sugiere limitar el desarrollo urbano e infraestructura crítica en zonas de alta exposición y con poco margen de respuesta, establecer franjas costeras de protección sin construcción permanente, definir zonas de amortiguamiento para actividades turísticas, y la ubicación de albergues temporales en áreas elevadas y accesibles. Estas acciones, fortalecerían la resiliencia costera no solo ante eventos ya conocidos, sino también, frente a amenazas emergentes aún no consideradas en la planificación vigente.

En este contexto, cabe destacar el esfuerzo sostenido de la Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias (CNE) y el Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis (SINAMOT), que han venido trabajando con las comunidades costeras, preparándolos ante este tipo de eventos. Gracias a esta labor, las localidades como Puerto Viejo y Limón cuentan con mapas de inundación y evacuación, señalización e incluso procesos en marcha para formalizar planes de respuesta. En el caso del Pacífico, Manuel Antonio ha obtenido el reconocimiento *Tsunami Ready* por parte de la UNESCO. Sin embargo, Tortuguero es la única zona evaluada en nuestro estudio que aún no ha sido abordada por estas instituciones. Considerando los resultados del escenario del Escarpe de Hess, con tiempos de arribo cortos y una alta exposición a la inundación, esta omisión plantea una oportunidad para priorizar las acciones de preparación y la planificación territorial en la zona.

CONCLUSIONES

Se ha determinado el largo y ancho de hipotéticas rupturas a partir del recuento y simulación de posibles máximas magnitudes de terremotos (entre 7,6 y 8,1 M_w) en ambas costas de Costa Rica. Con base en esto, se simuló la propagación del tsunami y algunos de sus aspectos característicos, como la altura de ola, en algunos de los principales sitios turísticos del país, entre ellos: Puerto Viejo, Limón, Tortuguero y Manuel Antonio.

Del análisis de resultados se resalta que las características morfológicas de la costa y del fondo marino influyen, significativamente, en la propagación y amplitud del tsunami, modulando los tiempos de arribo y las zonas más afectadas por la inundación. Este efecto se observa con claridad en los sitios evaluados: por ejemplo, Puerto Viejo presenta tiempos de arribo muy cortos, pero alturas de ola reducidas debido a su ubicación, protegida por barras arenosas y plataformas arrecifales, mientras que, Limón y Tortuguero registran mayores alturas de ola, pero, con demoras de hasta una hora, y Manuel Antonio muestra una alta concentración de energía en tiempos relativamente breves. Estas diferencias refuerzan la importancia de considerar la variabilidad local en la gestión del riesgo.

A pesar de que en Costa Rica ya existen mapas de inundación y rutas de evacuación en diversas comunidades costeras, con programas como “*Tsunami Ready*”, este estudio aporta un enfoque complementario, mediante distintos escenarios tsunamigénicos. Las simulaciones presentadas permiten estimaciones de altura de ola, tiempo de arribo e intensidad de la inundación en sitios de interés, lo cual podría revelar diferencias respecto a los mapas preexistentes. Además, estos resultados no solo sirven para la potencial validación o ajuste de los planes de evacuación, sino que, también amplían el alcance hacia el ordenamiento territorial, al ofrecer criterios técnicos para la zonificación del riesgo y la planificación de infraestructura crítica. De esta manera, este estudio contribuye a una comprensión más integral y dinámica del riesgo por tsunamis y la planificación costera sostenible.

En Costa Rica ya hay varias comunidades costeras que han realizado esfuerzos importantes y cuentan con capacitación para la evacuación ante tsunamis. Sin embargo, el seguir refinando el análisis de las fuentes y su potencial, así como el impacto esperado, es clave para plantear aportes, en términos de gestión del riesgo sísmico y de tsunamis, lo que permitirá afinar los planes de preparativos y de respuesta.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Anthony Murillo-Gutiérrez por las observaciones en etapas tempranas del documento y por su apoyo en la obtención de la batimetría utilizada. Este trabajo también se deriva de un estudio de caso del curso de “Tsunamis” del Máster en Análisis del Riesgo Sísmico de la

Universidad Politécnica de Madrid, por lo tanto, se reconoce la importancia de los comentarios y sugerencias, en su momento, al profesor, Dr. Juan Rueda. Por último, se agradece a los editores de la revista y a la persona revisora, anónima, por sus valiosos comentarios, que permitieron mejorar la calidad del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, T. & Hayes, G. (2017). Alternative Rupture-Scaling Relationships for Subduction Interface and Other Offshore Environments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 107, No. 3, pp. 1240-1253. <https://doi.org/10.1785/0120160255>.
- Alvarado G, E., Benito B, Staller A, et al. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: Mutual consensus based on up-to-date seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Arroyo, I. y Linkimer, L. (2021). Modelo unidimensional de velocidades sísmicas y características tomográficas tridimensionales del Caribe Sur de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central, 30 aniversario del terremoto de Limón (1991-2021)*, 65, 1-15.
- Arroyo-Solórzano, M., y Linkimer, L. (2021). Spatial variability of the b-value and seismic potential in Costa Rica. *Tectonophysics*, 814 (2021) 228951, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228951>.
- Barrantes-Castillo, G, y Sandoval-Murillo, L. F. (2021). Cambios en la línea de costa en el Caribe Sur de Costa Rica durante el periodo 2005-2016. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 105-134. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.55-2.6>
- Blaser, L., Kruger, F., Ohrnberger, M. & Scherbaum, F. (2010). Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 2914-2926. <https://doi.org/10.1785/0120100111>.
- Chacón-Barrantes, S., Murillo, A., y Rivera, F. (2021). *Catálogo de tsunamis registrados en Costa Rica hasta el 2021* (Primera Edición). Heredia: EUNA.
- DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181, 1-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>

- Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN). (2020). *Normas Técnicas Hidrográficas N.º44*. <https://www.dhn.mil.pe/Archivos/Oceanografia/normastecnicas/NormasTecnicasHidrograficasN%C2%B044.pdf>
- Fernández-Arce, M. (2002). Daños, efectos y amenaza de tsunamis en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 26: 71-83.
- Fernández-Arce, M., y Alvarado-Delgado, G. (2013). Vulnerabilidad y capacitación comunitaria ante tsunamis en Costa Rica. *Revista Reflexiones*, 83 (2). <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11402/10751>
- Friedman, R. (2019). *Fundamentals of fluid mechanics* (6th ed.). Wiley.
- GEBCO(2019). The GEBCO_2019 Grid-A continuous terrain model of the global oceans and land. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre. https://www.bodc.ac.uk/data/published_data_library/catalogue/10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e/.
- Hidalgo-Leiva, D. A., Linkimer, I. G. Arroyo, Arroyo-Solórzano, M., Piedra, R., Climent, A., Schmidt Díaz, V., Esquivel, L. C., Alvarado, G. E. & Castillo, R. (2023). The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 23-40. <https://doi.org/10.1785/0120220119>
- Intergubernamental Oceanographic Commission. (2014). *The Great Waves*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000148609>.
- Kânoğlu, U., & Synolakis, C. E. (2015). Tsunami dynamics, forecasting, and mitigation. En J. F. Shroder, J. T. Ellis, & D. J. Sherman (Eds.), *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 15–57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396483-0.00002-9>.
- Makropoulos, K. & Burton, P. (1983). Seismic risk of circum-pacific earthquakes I. Strain energy release. *Pure Appl. Geophys.* 121 (2), 247-266.
- Ortiz-Malavasi, E. (2012). Cambios geomorfológicos en el litoral Caribe y Pacífico de Costa Rica. Caso del Complejo Déltico de Sierpe. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(15), pág. 45-54. Retrieved from <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/413>
- Pugh, D. (2004). *Tsunami: The underrated hazard*. Cambridge University Press.
- MacKenzie, L., Abers, G. A., Fischer, K. M., Syracuse, E. M., Protti, J. M., González, V. & Strauch, W. (2008). Crustal structure along the southern Central American volcanic front. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(8). <http://doi.org/10.1029/2008GC001991>.

- Nishenko, Stuart, Camacho, Eduardo, Astorga, Allan, Morales, Luis D, & Preuss, Jane. (2021). The 22 April 1991 Limón, Costa Rica tsunami field survey. *Revista Geológica de América Central*, (65), 253-268. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n65/0256-7024-rgac-65-253.pdf>
- Rivera, F., Arozarena Llopis, I., Chacón Barrantes, S., y Barrantes Castillo, G. (2016). Metodología para la evaluación de rutas de evacuación en caso de tsunami aplicado a la costa del Pacífico Norte y Central de Costa Rica. *Revista En Torno a la Prevención*, 16, 17-26.
- Silver, E. A., Reed, D. L., Tagudin, J. E. & Heil, D. J. (1990). Implications of the North and South Panama Thrust Belts for the origin of the Panama Orocline. *Tectonics*, 9(2), 261–281. <http://doi.org/10.1029/TC009i002p00261>.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). (2023). *Informe SEMEC 2023: Estadísticas de Visitación a Áreas Silvestres Protegidas*. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Gobierno de Costa Rica. <https://www.sinac.go.cr/ES/transprncia/Informe%20SEMEC/Informe%20SEMEC%202023.pdf>
- Wang, X. (2009). *User manual for comcot version 1.7*. Institute of Geological & Nuclear Science, New Zealand.
- Zamora, N., Arroyo-Solórzano, M., Porras, H., Rivera, F., Murillo-Gutiérrez, A., y Chacón- Barrantes, S. (2021). Evaluación potencial de tsunamis locales con base en análisis sismo-tectónico en el Caribe de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1-23. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n65/0256-7024-rgac-65-281.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. *Parámetros generales del archivo “comcot.ctl de configuración de los escenarios modelados*

```
#####
# #
# Control file for COMCOT program (v1.7) #
# #
#####
#--+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---7---+---8
#=====:=====
# General Parameters for Simulation : Value Field |
#=====:=====
#Job Description: NZ30sec bathymetry, Spherical Coordinates for code testing
Total run time (Wall clock, seconds) : 10800.000
Time interval to Save Data (unit: sec) : 60.0
Output Zmax & TS (0-Max Z;1-Timeseries;2-Both) : 2
Start Type (0-Cold start; 1-Hot start) : 0
Resuming Time If hot start (Seconds) : 800.00
Specify Min WaterDepth offshore (meter) : 0.00
Initial Cond. (0:FLT,1:File,2:WM,3:LS,4:FLT+LS): 0
Specify BC (0-Open;1-Sponge;2-Wall;3-FACTS) : 0
Specify Input Z filename (for BC=3, FACTS) : mw94_n22_nz_ha.xyt
Specify Input U filename (for BC=3, FACTS) : mw94_n22_nz_ua.xyt
Specify Input V filename (for BC=3, FACTS) : mw94_n22_nz_va.xyt
```

Anexo 2. *Parámetros de fuente sísmica del archivo “comcot.ctl” para el escenario de Limón sur en el Caribe de Costa Rica.*

```
=====:=====
# Parameters for Fault Model (Segment 01) :Values |
#=====:=====
No. of FLT Planes (With fault_multi.ctl if >1) : 1
Fault Rupture Time (seconds) : 0.0
Faulting Option (0: Model; 1- Data;) : 0
Focal Depth (meter): 12000.000
Length of source area (meter): 150000.000
Width of source area (meter): 45000.000
Dislocation of fault plate (meter): 4.200
Strike direction (theta) (degree): 122.000
Dip angle (delta) (degree): 25.000
Slip angle (lamda) (degree): 90.000
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lat, degree): 9.9
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lon, degree): -83.7
Epicenter: Latitude (degree): 9.53
Epicenter: Longitude (degree): -82.44
File Name of Deformation Data : segment_parameter.dat
Data Format Option (0-COMCOT; 1-MOST; 2-XYZ) : 2
```

Anexo 3. Parámetros de fuente sísmica del archivo “comcot.ctf” para el escenario del Escarpe de Hess en el Caribe de Costa Rica.

```

=====
# Parameters for Fault Model (Segment 01)      :Values |
=====
No. of FLT Planes (With fault_multi.ctf if >1) : 1
Fault Rupture Time (seconds)                   : 0.0
Faulting Option (0: Model; 1- Data;)           : 0
Focal Depth                                     (meter): 16000.000
Length of source area                          (meter): 110000.000
Width of source area                           (meter): 40000.000
Dislocation of fault plate                     (meter): 2.500
Strike direction (theta)                       (degree): 50.000
Dip angle (delta)                             (degree): 45.000
Slip angle (lamda)                            (degree): -50.000
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lat, degree): 10.85
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lon, degree): -83.25
Epicenter: Latitude                           (degree): 11.14
Epicenter: Longitude                          (degree): -83.00
File Name of Deformation Data                  : segment_parameter.dat
Data Format Option (0-COMCOT; 1-MOST; 2-XYZ)   : 2
    
```

Anexo 4. Parámetros generales y de fuente sísmica del archivo “comcot.ctf” para el escenario del Pacífico Central de Costa Rica.

```

=====
# Parameters for Fault Model (Segment 01)      :Values |
=====
No. of FLT Planes (With fault_multi.ctf if >1) : 1
Fault Rupture Time (seconds)                   : 0.0
Faulting Option (0: Model; 1- Data;)           : 0
Focal Depth                                     (meter): 12000.000
Length of source area                          (meter): 160000.000
Width of source area                           (meter): 95000.000
Dislocation of fault plate                     (meter): 6.500
Strike direction (theta)                       (degree): 300.000
Dip angle (delta)                             (degree): 30.000
Slip angle (lamda)                            (degree): 90.000
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lat, degree): 9.2
Origin of Comp. Domain (Layer 01) (Lon, degree): -85.0
Epicenter: Latitude                           (degree): 8.72
Epicenter: Longitude                          (degree): -83.65
File Name of Deformation Data                  : segment_parameter.dat
Data Format Option (0-COMCOT; 1-MOST; 2-XYZ)   : 2
    
```

