

Assessing the threat of tsunamis off Santa Elena coast using the numerical model TUNAMI-N2



Evaluando la amenaza de tsunamis frente a las costas de Santa Elena usando el modelo numérico TUNAMI-N2

Arreaga Vargas, Patricia; Noboa Terán, Sharl; Palacios, Othoniel

Patricia Arreaga Vargas

patricia.arreaga@inocar.mil.ec

Instituto Oceanográfico y Antártico, Ecuador

Sharl Noboa Terán sharl.noboa@inocar.mil.ec

Instituto Oceanográfico y Antártico, Ecuador

Othoniel Palacios

othoniel.palacios@upacifico.edu.ec

Universidad del Pacífico, Ecuador

ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO

Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, Ecuador

ISSN: 1390-129X

ISSN-e: 2806-5522

Periodicity: Semestral

vol. 3, no. 2, 2021

acta.oceanografica@inocar.mil

Received: 19 January 2021

Accepted: 09 July 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/648/6482952007/>

Abstract: The tsunami threat was evaluated off Santa Elena coast, in which 28 points have been, determined to calculate the arrival time and the expected wave height. For this, the use of the TUNAMI-N2 numerical model has been necessary, which requires: bathymetric and topographic information to describe the study area in four meshes of different spatial resolution (810m, 270m, 90m and 30m), a fault plane composed of 4 sub-faults, generating the initial disturbance. The 28 selected points are distributed along the study coasts in order to determine the arrival time as well as the estimated heights (or time series) of the tsunami waves. The time series show minimum times of 08.67 minutes and maximum heights of 11.72 meters in Salinas. They also show unusual behavior in several of stations; Therefore, it will be essential to expand the evaluation to new points in the province, as well as to determine these localized effects that occur after the arrival of tsunami waves, effects that will increase the amplitudes and heights of the tsunami as well as its effects on the coasts of study.

Keywords: tsunami, threat, TSUNAMI-N2, tide gauge.

Resumen: Se evaluó la amenaza de tsunami frente a las costas de Santa Elena, para lo cual se han determinado 28 puntos en los que se calcula el tiempo de arribo y la altura de ola esperada. Para esto ha sido necesario el uso del modelo numérico TUNAMI-N2 que requiere: información batimétrica y topográfica para describir el área de estudio en cuatro mallas de diferente resolución espacial (810m, 270m, 90m y 30m), un plano de falla compuesto de 4 sub-fallas, generando la perturbación inicial. Los 28 puntos seleccionados están distribuidos a lo largo de las costas de estudio a fin de determinar el tiempo de arribo así como las alturas estimadas (o series de tiempo) de las ondas del tsunami. Las series de tiempo muestran tiempos mínimos de 08.67 minutos y alturas máximas de 11.72 metros, en el sector de Salinas. Además muestran un comportamiento inusual en varias de las estaciones; por lo que será necesario ampliar la evaluación hacia nuevos puntos de la provincia, así como determinar estos efectos localizados que se producen luego del arribo de las ondas de tsunamis, efectos que ampliarán las amplitudes y alturas del tsunami así como sus efectos en las costas de estudio.

Palabras clave: tsunami, amenaza, TUNAMI-N2, mareograma.

Introducción

Santa Elena, es considerada como uno de los centros de civilización más antiguo de América de acuerdo a análisis realizados por arqueólogos nacionales y extranjeros. La Provincia de Santa Elena tiene una extensión de 3,762.8 km², distribuidas en sus tres cantones: el más grande es Santa Elena con 3,668.90 km² y una población de 144,076 habitantes, el cantón Salinas con 68.7 km² de extensión y 68,675 habitantes y el cantón La Libertad con 25.6 km² de área territorial y 95,942 habitantes (Inec 2010). Su orografía es en su mayoría plana; la parte más alta corresponde a la cordillera de Chongón-Colonche, ubicada al este y sureste de la península donde se encuentran alturas máximas de 300 metros sobre el nivel del mar. Las principales actividades de esta provincia son el comercio, la industria, la pesca y el turismo. La península tiene algunos puertos pesqueros: Santa Rosa, San Pedro y Chanduy, que se constituyen los más importantes centros de la zona. En cuanto al turismo, recibe en sus balnearios aproximadamente 80 mil turistas por temporada.

En la costa sur de Ecuador, donde se localiza la provincia de Santa Elena (Figura 1), existe un margen de subducción activo donde la placa oceánica de Nazca colisiona y subduce segmentos de la placa continental Sudamericana y el bloque Norandino. En esta región, los terremotos históricos documentados comenzaron a partir del 11 de junio de 1787. Sin embargo, los terremotos generadores de tsunamis en la costa sur de Ecuador están pobremente documentados; el terremoto del 7 de enero de 1901 con magnitud ~ 7.2 (otros catálogos y autores estiman como 7.6 y 7.8) costa afuera de la Península de Santa Elena a $\sim 2.0^{\circ}\text{S}$, 82.0°O no cuenta con suficiente documentación que permita evaluar los daños del tsunami en esta área. El tsunami del 2 de octubre de 1933 ($M_s \sim 6.9$) a $\sim 3.5^{\circ}\text{S}$, 80.0°O , con documentos de las oscilaciones del nivel del mar con olas de tsunami de 2 a 2.5 m, penetrando en forma de inundación pero no como olas turbulentas hacia el borde costero de Santa Elena (Chunga, 2013; Arreaga y Ortiz, 2002). El tsunami del 12 de diciembre de 1953 ($M_s \sim 7.8$) a $\sim 3.4^{\circ}\text{S}$, 80.6°O , se generó cerca de la costa de Tumbes (la frontera Ecuador - Perú) con olas reportadas de 20 cm en la ciudad de La Libertad y una rápida inundación en la costa de Salinas (Chunga, 2013; Silgado, 1957). Para el tsunami del 7 de febrero de 1959, $M_s \sim 7.5$ a $\sim 4.0^{\circ}\text{S}$, 81.5°O , no se conoce más información. Agregando la condición de la poca información a los terremotos en el área de estudio, se debe indicar que la parte más saliente de esta provincia es Salinas, se encuentra muy cerca de la zona de subducción (20 - 50 km), son áreas inundables y de acuerdo con el análisis sísmico local, desde 1959 existe una brecha sísmica en este lugar.

Estudios realizados a partir de simulaciones numéricas de la propagación de las olas de tsunami a partir de una fuente de origen hipotético viajando a lo largo de la Plataforma Continental (Hebenstreit et.al, 1.981), indicaron que los tsunamis que se originan frente a Chile y Perú, llegan a las costas del Ecuador con muy poca energía, debido a un efecto de protección por el cambio de dirección de la costa en el paralelo 5°S . Este resultado concuerda con lo observado en registros de varios tsunamis destructivos como el originado por el sismo del 22 de mayo de 1960 en la costa central de Chile donde el agua se elevó unos 25m., Soloviev

(1.975), menciona que en otros lugares del Pacífico se presentaron olas de 10.5m., en Hawaii, 6 a 9 m., en Oceanía, 3.5 m., en las costas de los Estados Unidos, y aún en Japón con 6.5 m. donde murieron cerca de 200 personas. En Ecuador, el tsunami fue registrado en la estación de La Libertad con una amplitud de 1.54 m. y 36 minutos de periodo (Rizzo, 1.977). Soloviev cita otras referencias de tsunamis registrados en la estación mareográfica de La Libertad que pueden ser observadas en la figura 2, como el tsunami del Golfo de Alaska (Prince William Sound) de marzo 28 de 1.964 registrado con una amplitud de 1.34m., el de las Islas Aleutianas de febrero 4 de 1.965 con una amplitud de 0.32m.; el tsunami del 27 de febrero de 2010 registró anomalías del nivel del mar que alcanzaron hasta 1.08m y 0.35m en Santa Cruz y Baltra respectivamente; en La Libertad se percibieron por lo menos tres crestas (de ondas) diferentes entre 0.20m.y 0.70m. (Moreano et al., 2012). Mientras que el tsunami de Japón 2011 registró cambios en el nivel del mar que llegaron 1.61m. Pese a lo que mencionan muchos autores en sus estudios, no se pueden subestimar los efectos destructivos de los tsunamis de origen lejano para las costas ecuatorianas. Muchos factores locales pueden cambiar su carácter de baja amenaza (marea alta, configuración de la playa entre otros) y tornarlos de alta peligrosidad.

Materiales y métodos

La evaluación cuantitativa de los efectos de un tsunami frente a las costas de Santa Elena se realizó al considerar los eventos de origen tectónico y en este campo, el modelamiento numérico ha sido la herramienta usada para este propósito. Se evalúa la amenaza de un tsunami determinado como peor escenario para las costas de la provincia de Santa Elena, mediante varias simulaciones. Se han seleccionado 28 puntos distribuidos a lo largo del perfil costero, tomando en consideración que cubran toda el área de estudio. En estos puntos se obtendrán las series de tiempo de las ondas de tsunami durante el período de simulación que es de 2 horas. El área de estudio se describe con datos batimétricos y topográficos mediante la elaboración de mallas de 810m, 270m, 90m y 30m de resolución espacial, las que se anidan en puntos específicos para dar continuidad al proceso físico del tsunami. La perturbación inicial se la genera a través de un plano de falla que para el presente trabajo está considerado de 4 sub-fallas. El análisis de resultados se ha basado en el cálculo de tiempos de arribo y altura estimada de las ondas de tsunamis, datos que se obtienen de las series de tiempo que arroja el modelo como resultado de la simulación en los 28 puntos seleccionados.

Modelo numérico

El modelo aplicado para la evaluación de la amenaza fue TUNAMI-N2, modelo numérico para investigación de tsunamis de campo cercano, desarrollado en el Disaster Control Research Center - DCRC de la Universidad de Tohoku, Japón. El modelamiento del área general de estudio está discretizada en mallas de diferente resolución espacial hasta llegar a las áreas de interés.

El software .ohoku .niversity .umerical .alysis .odel for .nvestigation of .ear-Field tsunami No.. TUNAMI-N2 o TUNAMI2 desarrollado por el Dr. Imamura y sus actualizaciones, está basado en la simulación numérica de un tsunami para resolver las ecuaciones de aguas someras de forma lineal para aguas profundas lejos de la costa y de forma no lineal para aguas cercanas a la costa

(Imamura, 2006). TUNAMI N2 es capaz de simular tres procesos evolutivos de los tsunamis, la generación de la onda, su propagación y la inundación; está restringido solamente para modelar un tsunami, es decir, no incluye olas de gravedad ni efectos del viento, por lo que se asume el nivel del agua constante durante el modelamiento.

El modelamiento del área general de estudio está discretizada o dividida en sub-áreas o mallas de diferentes resoluciones espaciales hasta llegar al área de interés que para el presente caso son los tres cantones de la provincia de Santa Elena (figura 3), de acuerdo a las coordenadas que se muestran en la tabla 1.



FIGURA 1

Área de estudio, provincia de Santa Elena. Elaborado por Noboa S. 2021.

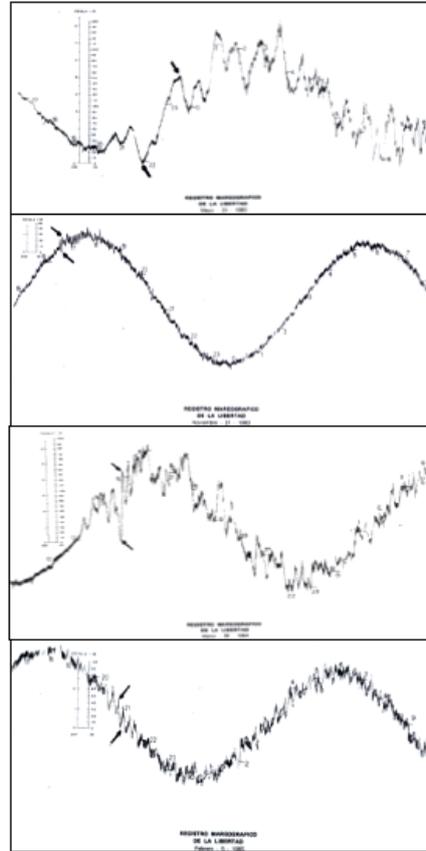


FIGURA 2

Mareogramas de la estación de mareas de La Libertad, en la que se puede apreciar los cambios del nivel del mar a consecuencia de los tsunamis lejanos de Chile y Alaska. Fuente: Inocar

TABLA 1

Coordenadas de Coordenadas y resolución de las tres grillas usadas para el modelamiento en el área de estudio.

GRILLA	LONGITUD		LATITUD		RESOLUCIÓN metros
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1	-84.6350	-76.8488	-4.3272	4.8774	810
2	-82.0541	-80.0848	-3.0555	-0.9722	270
3	-81.7898	-80.4681	-2.5558	-1.5023	90
4	-81.1456	-80.6792	-2.2510	-1.6953	30

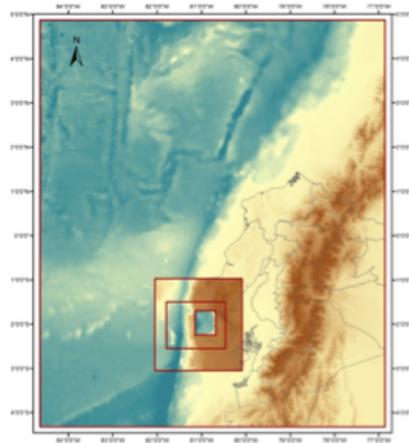


FIGURA 3

Mallas o grillas en las que se divide el área de estudio hasta llegar a la resolución deseada. En este caso han sido cuatro, siendo Santa Elena el punto de interés. Fuente: GEBCO, INOCAR, SNGRE, Gobiernos Autónomos Descentralizados costeros. Elaborado por INOCAR 2020.

Escenario

Los escenarios permiten representar los efectos de un fenómeno natural o situaciones de riesgo por medio de la caracterización de elementos que intervienen en el origen y desarrollo de éste, para el presente caso, el tsunami.

El escenario seleccionado para las simulaciones se seleccionó en base a eventos históricos o hipotéticos con el respectivo sustento técnico (Yoshimoto, M. et al, 2017). Para el presente caso, se ha empleado el tsunami del 31 de enero de 1906 cuya magnitud fue determinado inicialmente como 8.8Mw, sin embargo nuevos estudios han comprobado que la energía desplegada corresponde a un evento de Mw8.4. El plano de falla correspondiente a este escenario ha sido modificado en función de obtener el peor escenario para cada una de las localidades. Para el presente caso, ha sido necesario analizar los casos en que el sismo o terremoto origen del tsunami no genera levantamiento del área de afectación; esto puede incidir en una subestimación de las áreas inundables, sin embargo esto no se presenta en el presente estudio.

Otro punto que se ha incluido para la determinación del escenario es que el plano de falla no es estático, y por esa razón esta metodología describe una fuente sísmica consistente de diferentes fallas cuya energía sumada corresponderá al sismo que se requiere simular.

Esta fuente sísmica constituida de múltiples fallas tendrá diferentes levantamientos o uplift. Los segmentos que estén cerca a la fuente de generación como es de esperarse tendrán un mayor levantamiento disminuyendo conforme se alejen del foco sísmico de manera porcentual.

Datos

Los datos batimétricos y topográficos usados para las simulaciones para evaluar la amenaza de tsunamis de las costas de Santa Elena, se obtuvieron de diferentes fuentes como lo muestra la tabla 2.

Las características o parámetros del sismo generador que se ha tomado como escenario se describen en la tabla 3. La simulación concluye en un escenario máximo de magnitud 8.4 con un plano de falla de cuatro segmentaciones de

TABLA 4

Coordenada epicentral del evento y dimensiones de las sub-fallas en las que se ha dividido la fuente generadora del escenario final.

Coordenadas epicentral	2.02904°S 81.317247°W
Magnitud Mw	8.4
N° de fallas	4
Áreas de dislocación (kmxkm)	60x20, 60x50, 60x40, 240x100
Rango de profundidades (km)	4 - 19
Área geográfica	Costa afuera de la provincia de Santa Elena

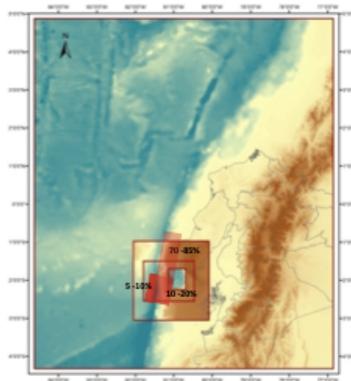


FIGURA 4

Fuente de generación. Para el presente estudio la fuente de generación consta de varias segmentaciones que crean perturbaciones con diferentes levantamientos de la corteza del suelo, pero cuyo M_0 corresponde a un sismo de Mw8.4. Fuente: GEBCO-INOCAR. Elaborado por INOCAR 2020.



FIGURA 5

Área general de dislocación, considerada como fuente generador del peor escenario de tsunami para las costas de Santa Elena. Fuente: GEBCO-INOCAR. Elaborado por INOCAR 2020.

TABLA 5

Coordenadas de estaciones distribuidas a lo largo de las costas norte de la provincia de Santa Elena.

N°	ESTACIONES	COORDENADAS			
		ESTE	NORTE	LONGITUD	LATITUD
1	LA_LIBERTAD	520289.5774	9762224.9652	-80.8175	-2.1512
2	PUNTA_SALINAS	498147.4455	9763265.6302	-81.0167	-2.1418
3	COMP_BASES	501948.4915	9755165.1262	-80.9825	-2.2151
4	MAR_BRAVO	504780.3205	9752274.4556	-80.9570	-2.2412
5	TG2	503724.0181	9753227.9778	-80.9665	-2.2326
6	TG3	499516.7924	9757668.4808	-81.0043	-2.1924
7	TG4	501490.8165	9759756.1265	-80.9866	-2.1736
8	TG5	503769.8435	9757810.2479	-80.9661	-2.1912
9	TG6	507374.8560	9756377.3112	-80.9337	-2.2041
10	TG7	510697.7711	9756499.8186	-80.9038	-2.2030
11	SAN_PABLO	493861.6507	9769820.0540	-81.0552	-2.0825
12	SP1	525770.8255	9764653.2369	-80.7682	-2.1292
13	PB1	519519.0059	9763114.6571	-80.8245	-2.1432
14	PB2	522367.6306	9763033.5489	-80.7988	-2.1439
15	MONTEVERDE	528174.6470	9768755.3529	-80.7466	-2.0921
16	MONTEV1	529243.0619	9772445.8309	-80.7370	-2.0587
17	MONTEV2	529234.5834	9776079.9583	-80.7371	-2.0258
18	AYANGUE	526356.7347	9781694.7717	-80.7630	-1.9751
19	AYANGUE1	527129.4594	9780945.0706	-80.7561	-1.9818
20	AYANGUE2	527183.0939	9782436.7424	-80.7556	-1.9683
21	VALDIVIA	530316.4665	9785245.4283	-80.7274	-1.9429
22	LIBERTADOR_BOLIVAR	529197.9465	9792380.3812	-80.7375	-1.8784
23	MANGLARALTO	528021.8400	9795552.1984	-80.7480	-1.8497
24	MONTAÑITA	527238.6378	9798104.2526	-80.7551	-1.8266
25	MONTANITA1	526581.3426	9798976.6306	-80.7610	-1.8187
26	OLÓN	526409.7494	9802249.2321	-80.7625	-1.7891
27	CURIA	525197.6653	9806315.9898	-80.7735	-1.7523
28	RINCONADA	522915.4645	9809957.3216	-80.7940	-1.7194



FIGURA 6

Ubicación de veinte y ocho estaciones virtuales para la obtención de las series de tiempo a lo largo de las costas del área de estudio. Fuente: Esri, GEBCO; National Geographic, Garmin, Geoname.org, NOAA NGDO, USGS, NPS. Elaborado por INOCAR 2020.

Resultados

Los resultados se presentan para tres zonas del área de estudio coincidente con su división cantonal. Para el sector de Salinas los tiempos de arribo oscilan en un

rango entre los 08.67 minutos y 22 minutos. Las primeras ondas arriban en la estación oceánica San Pablo. La máxima altura alcanza los 11.72 metros. en la estación TG3, ubicada en el sector de Mar Bravo. Para el sector de La Libertad se ha considerado dos estaciones una costera y otra oceánica, los tiempos estimados son de 24.33 minutos y las alturas esperados superan los 6 metros. Para el sector de Santa Elena (como cantón), el menor tiempo estimado es de 19.67 minutos en Libertador Bolívar. Para este sector de la provincia se estiman alturas muy altas, las que superan los 10 metros, como lo muestra la tabla 6.

La tabla 6 muestra además, los tiempos de llegada y alturas estimados para las cuatro primeras ondas en cada una de las estaciones. Estas series de tiempo para cada una de los puntos determinados como estaciones se presentan en las figuras 8 a la 14.

Tabla 6. Tiempos de arribo y alturas de ondas de tsunamis estimados.

Tabla 6
Tiempos de arribo y alturas de ondas de tsunamis estimados

TIEMPO DE ARRIBO/ALTURA DE ONDA								
Cantón Salinas								
ESTACIONES	1ra onda		2da onda		3ra onda		4ta onda	
	min.	m.	min.	m.	min.	m.	min.	m.
MAR_BRAVO	19.67	10.07	33.33	3.77	49.33	1.70	101.00	4.172
TG2	19.00	10.04	31.67	6.57	52.33	1.58	100.33	3.484
COMP_BASES	17.00	10.59	28.67	2.27	36.00	3.50	98.00	3.989
TG3	15.00	11.72	27.67	3.44	42.33	4.32	93.33	4.666
PUNTA_SALINAS	12.00	9.77	41.00	1.14	46.67	1.60	87.33	2.694
SAN_PABLO	08.67	9.66	35.67	1.35	83.67	1.91	88.67	1.108
TG4	15.33	11.21	44.67	2.82	91.67	4.08	116.00	2.522
TG5	18.00	7.30	46.67	1.82	95.00	4.82	116.00	3.062
TG6	22.00	5.89	53.00	1.41	103.67	1.58	108.00	4.665
TG7	19.67	1.17	25.00	5.23	29.33	6.16	105.33	7.289
Cantón La Libertad								
ESTACIONES	1ra onda		2da onda		3ra onda		4ta onda	
	min.	m.	min.	m.	min.	m.	min.	m.
LA_LIBERTAD	24.33	1.72	30.67	5.87	33.00	6.77	67.00	4.651
PB1	29.33	5.60	66.00	2.96	92.33	0.76	115.33	3.265
Cantón Santa Elena								
ESTACIONES	1ra onda		2da onda		3ra onda		4ta onda	
	min.	m.	min.	m.	min.	m.	min.	m.
PB2	31.67	6.08	35.00	6.11	65.00	6.41	113.00	4.390
SP1	35.00	7.01	59.33	4.42	93.33	0.64	116.67	3.052
MONTEVERDE	34.67	8.62	58.67	1.04	75.00	0.89	116.33	2.590
MONTEV1	34.00	8.16	54.00	1.23	78.00	2.28	110.33	1.489
MONTEV2	33.33	7.74	48.33	2.52	81.33	2.33	108.00	2.075
AYANGUE	21.67	1.30	30.67	9.31	60.00	0.95	105.00	1.314
AYANGUE1	23.33	1.38	31.67	8.69	47.67	1.56	108.00	1.569
AYANGUE2	23.67	1.29	30.67	7.65	60.33	2.82	114.33	1.654
VALDIVIA	21.33	1.36	34.33	7.94	58.67	1.37	96.00	1.927
LIBERTADOR_BOLÍVAR	19.67	1.34	34.00	7.72	65.00	3.53	99.67	1.946
MANGLARALTO	20.33	1.26	33.33	9.93	61.67	2.10	101.67	1.850
MONTAÑITA	22.00	1.22	33.33	10.49	93.00	1.60	105.67	1.933
MONTANITA1	23.33	1.19	32.00	9.71	67.97	1.951	105.67	2.020
OLON	30.67	2.01	32.33	6.62	34.00	7.518	36.00	5.852
CURIA	20.00	1.13	33.33	7.21	50.00	2.598	72.67	1.598
RINCONADA	28.33	2.94	47.67	2.21	54.00	1.391	117.00	3.011

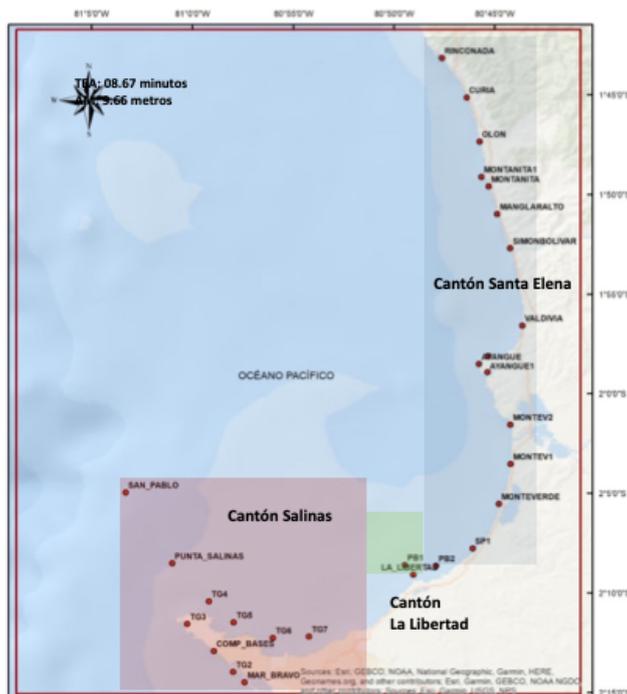


FIGURA 7

Distribución de las estaciones mareográficas de acuerdo a su división política para el análisis de las series de tiempo de las ondas de tsunami. Elaborado por INOCAR 2021.

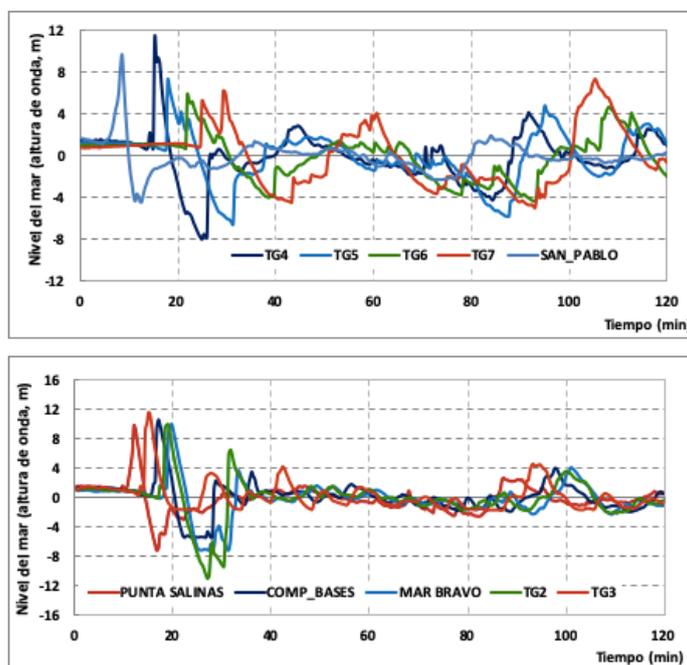


FIGURA 8

Gráficos superior e inferior, mareogramas sintéticos o series de tiempo para diez estaciones localizadas a lo largo de la costa de Salinas. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

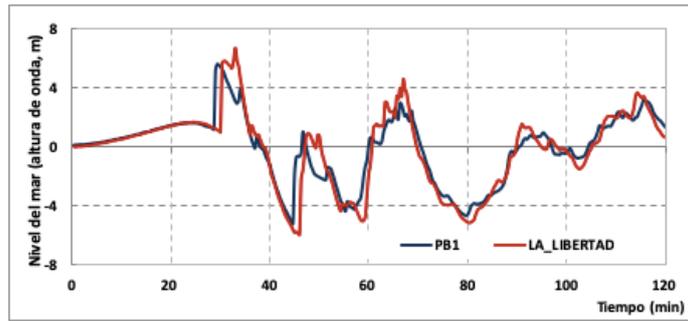


FIGURA 9

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de La Libertad. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

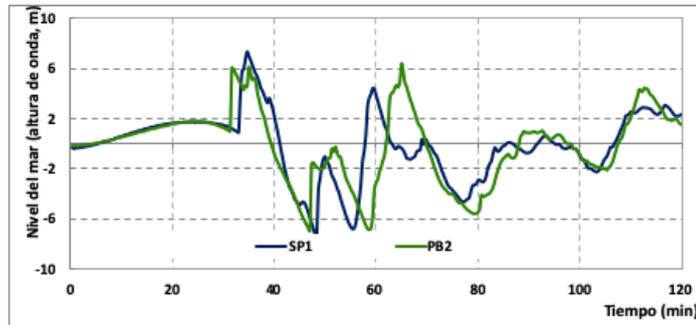


FIGURA 10

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de la zona Punta Blanca - San Pablo. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

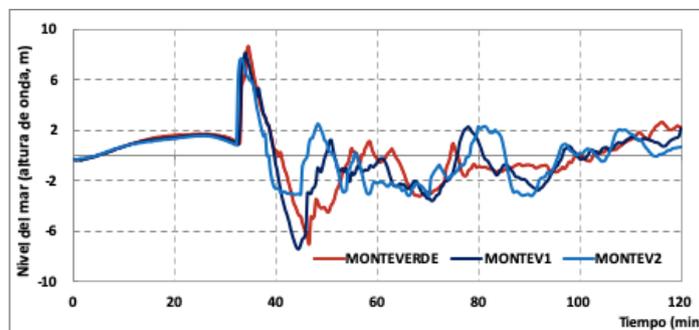


FIGURA 11

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de la zona de Monteverde. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

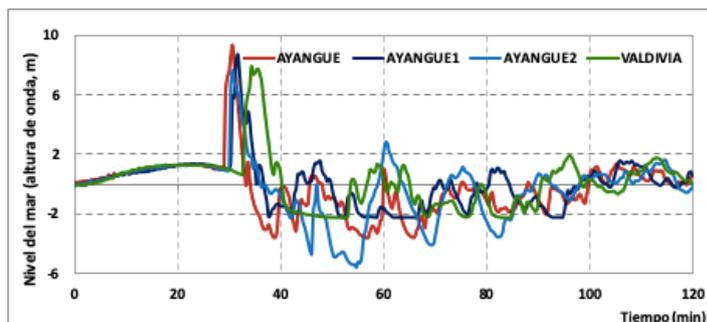


FIGURA 12

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de la zona Ayangue - Valdivia. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

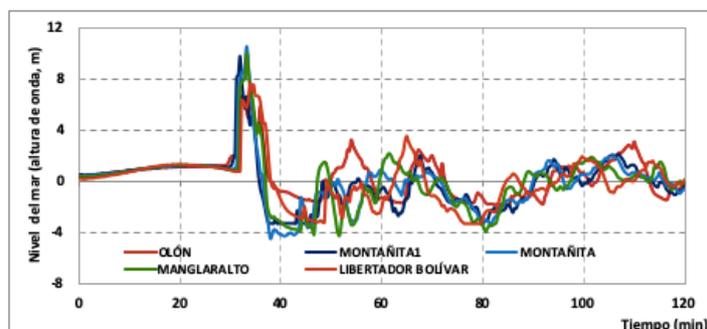


FIGURA 13

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de la zona Olón - Manglaralto - Montañaíta - Libertador Bolívar. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

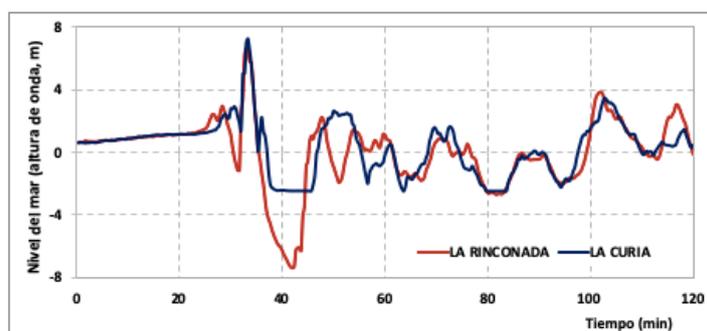


FIGURA 14

Mareogramas sintéticos o series de tiempo para estaciones localizadas a lo largo de la costa de la zona La Rinconada - La Curia. Fuente: INOCAR - JICA 2020.

Discusión

Salinas

Para el sector de Salinas, las ondas arriban en primer lugar a las estaciones costa fuera, a los 08.67 minutos, las ondas se observan en la estación San_Pablo, y a los 12 minutos en la estación Punta Salinas. A los 15.00 minutos las ondas impactan la costa en la estación TG3, la misma que se encuentra ubicada en la Punta Salinas. Las alturas esperadas sobrepasan los 11.72 metros. Como lo muestran la tabla 6 y

la figura 8. Como se puede apreciar el tiempo de respuesta de la columna de agua una vez que se genera el sismo generador del tsunami es muy corto.

Durante los primeros 40 minutos las ondas oscilaran con alturas que sobrepasan los 11 metros, hasta los 85 minutos las ondas disminuyen un poco, sobretodo en el sector de Mar Bravo donde alcanzan hasta 2 metros, mientras que el sector cercano a la fuente de generación del tsunami decrecen hasta los 4 metros. A partir de los 85 minutos en ambos sectores de esta área de estudio, se observa un repunte de las alturas de las ondas, hacia el este, las alturas sobrepasan los 7 metros y 4 metros hacia el oeste. Este tipo de efectos son característicos de cada localidad y está asociada a la forma de la bahía, estado de marea entre otros factores y se denominan efectos locales del tsunami, los cuales no han sido tomados en consideración para el presente estudio. El período analizado corresponde a 120 minutos o 2 horas.

La Libertad

Durante los primeros 30 minutos, las series de tiempo de las 2 estaciones mareográficas ubicadas en esta área de estudio, muestran un comportamiento similar, las ondas de tsunami incrementa de manera paulatina hasta alcanzar alturas que sobrepasan los 7 metros. La serie muestra que durante las dos horas, las oscilaciones no decaen en su totalidad, lo que debe tomarse en cuenta cuando se realicen los planes de evacuación de la localidad. Esto puede ser también un efecto local, por lo que es otro caso de estudio de respuesta de la bahía frente a las ondas de tsunamis, que debe ser ampliado para la determinación del riesgo de tsunamis en La Libertad.

Santa Elena

En el sector de San Pablo y Punta Blanca, las ondas de tsunamis arriban de manera paulatina en 30 minutos y con similitud a lo que se produce en La Libertad, las ondas mantienen similitud en sus oscilaciones, las ondas sobrepasan los 7 metros y en un período de 2 horas se conservan alturas que pueden llegar a 6 metros. Estos casos específicos deben ser ampliados con estudios que determinen los efectos de resonancia de la bahía, por efectos locales las bahías pueden mantener e incluso incrementar de una manera descomunal las alturas en estas áreas.

Para el área de Monteverde, la onda del tsunami avanza de manera paulatina por 30 minutos hasta llegar a su máxima altura sobrepasando los 8 metros disminuyendo conforme pasa el tiempo; a los 120 minutos se presentan oscilaciones que no superan los 3 metros como lo indica la figura 11. En este caso no se presentan cambios repentinos de altura, sin embargo a las 2 horas no se restablece el nivel del mar normal.

En la bahía de Ayanque y sectores de Valdivia la onda arriba de manera progresiva a los 30 minutos y alcanza una altura que sobrepasa los 9 metros, a los 60 minutos se presentan ondas que de no alcanzan los 3 metros, a los 120 minutos se observan alturas de 1 metro, con una tendencia a la normalidad.

En las costas desde Olón hasta Libertador Bolívar, el comportamiento es similar, las ondas llegan a los 30 minutos aproximadamente alcanzando alturas mayores a los 10 metros; en ésta área de análisis se consideran las costas de Montañita y Manglaralto.

A los 60 minutos aún se presentan perturbaciones de considerable altura (2m y casi 4m), las mismas que van decreciendo a los 120 minutos hasta llegar casi a la normalidad (figura 13).

Para finalizar esta evaluación, se analizan las series de tiempo del sector entre La Rinconada y La Curia. La figura 14 muestra altura mayor a 7 metros, previa a este pico de altura, la primera onda de tsunami arriba en menos de 30 minutos a las localidades. La serie presenta perturbaciones de 2m y mayores a 3m en un rango de 120 minutos o 2 horas. No se observa un decrecimiento total de las ondas, por el contrario éstas muestran un ligero incremento después de los 90 minutos. Este comportamiento debe ser ampliamente estudiado para determinar si existe el efecto de resonancia.

Las costas de Salinas y La Libertad presentan comportamientos similares como lo muestran las series de tiempo de las ondas del tsunami (figuras 7 -11). Se aprecian tendencias al incremento de alturas luego del arribo de las ondas. Este comportamiento no está asociado al evento como tal, sino que puede deberse a factores locales como la forma y características de la bahía entre otros, generando oscilaciones y perturbaciones a mayor escala y alturas, fenómeno conocido como resonancia.

Lo identificado específicamente en Salinas y La Libertad no se aprecia en la mayor parte de las costas de los puntos analizados para el cantón Santa Elena, las series de tiempo muestran el decrecimiento de las alturas de las ondas hasta llegar casi a la normalidad, sin embargo existe localidades como La Rinconada y La Curia donde la serie de tiempo muestra ondas de alturas constantes en 2 horas. Otra localidad que puede ser candidata para un estudio de resonancia sería Monteverde.

Conclusión

Los modelos matemáticos permiten una buena aproximación de la física de los fenómenos simulados que para el presente estudio es un tsunami frente a las costas de la provincia de Santa Elena, lo que permitió evaluar mediante esta metodología la amenaza en la que se constituyen los tsunamis para las costas de Santa Elena.

Las series de tiempo o mareogramas de las ondas del tsunami para las 28 localidades analizadas muestran que existen fenómenos locales que incrementan la amenaza identificada y que debe ser estudio de caso de manera independiente.

La amenaza del tsunami es evidente para las costas de la provincia de Santa Elena, sin embargo no todas las localidades han sido evaluadas lo que implica el hecho de ampliar este estudio hacia estas zonas y complementar esta evaluación.

Un estudio de amenaza es uno de los elementos básicos para la determinar el riesgo que un pueblo, localidad o comunidad tiene, por lo que esta evaluación debe ser complementada con estudios de vulnerabilidad y de esta manera cuantificar el riesgo de los tsunamis.

Reconocimiento

A la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa-JICA, estos resultados constituyen el cumplimiento de uno de los objetivos formulados en el proyecto Ciudades Resilientes y Seguras frente a los terremotos y tsunamis en el cual, personal de INOCAR participó de manera activa.

References

- Aguirre D., Benavides A., Jara C., 2012, Evaluación del uso turístico y recreativo del mirador de San Pedro. Tópico de graduación previa a la obtención del título de Licenciatura en Turismo.
- Arreaga P., 2015, Tsunami inundation modeling and hazard mapping of the south coast of Ecuador. A Master's Thesis.
- Arreaga P., & Ortiz M. 2002, Análisis de riesgo por tsunamis en el Golfo de Guayaquil. Acta Oceanográfica del Pacífico, 23 - 29.
- Asqui E., 2013, Investigación de la cocina tradicional ecuatoriana en las comunidades Valdivia y Montañita, del cantón Santa Elena de la provincia de Santa Elena y caracterización del establecimiento gastronómico como medida de salvaguarda. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera en Gestión Hotelera.
- Baque E., 2015. Plan de Desarrollo Económico, ComunaPalmar, parroquia Colonche, provincia de Santa Elena, año 2015. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Administración de Empresas.
- Chiluiza, J., Lara, L., Molina, D., 2012, Evaluación del uso recreativo de Ballenita, Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Chunga et al., 2013, Evidencia Sedimentaria de Tsunamis en la Planicie Alluvial de Villamil Playas, Golfo de Guayaquil.
- De La Cruz J., 2017, Evolución de la trama urbana en la ciudad de La Libertad, Santa Elena. Informe final del trabajo de titulaciónprevio a la obtención del título de Arquitecta.
- GADM Santa Elena 2.014, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial-Cantón Santa Elena 2014-2019.
- GobiernoAutónomoDescentralizadoParroquial Rural de Manglaralto 2015, Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia rural Manglaralto 2014 - 2019.
- González E., 2014. Diseño de un modeloadministrativo de manejo costero integrado para la comuna Jambelí, parroquia Colonche, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, año 2014. Previo a la obtención del título de Licenciada en AdministraciónPública.
- Guale J., Plan de desarrollo económico para la comuna Monteverde, parroquia Colonche, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena. Trabajo de titulación previo la obtención del título de Ingeniero en Administración de Empresas.
- Hebenstreit, G. and Whitaker, R. 1981, Evaluación del Riesgo de Tsunamis que presentan posibles efectos sísmicos. Efectos cerca de la superficie. Agencia para el Desarrollo Internacional. Departamento de Estado de los Estados Unidos de Norte América.
- Imamura, F.2006, Tsunami modelling manual (Tsunami model). Sendai: School of Civil Engineering AsianInst. Tech (1993-1995) and Disaster Control Research Center, Tohoku University.
- INEC - Censo de Población y Vivienda 2010, Ficha de Cifras Generales Cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena.
- Limón A., 2013, Plan de desarrollo agroturístico en la comuna Montañita, cantón Santa Elena provincia de Santa Elena. Tesis de grado previa la obtención del título de Licenciado en Administración de Turismo.
- Matías L., 2013, Plan estratégico para la Comuna San Pablo, parroquia Santa Elena, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena 2013. Trabajo de titulación.

- Noboa S., 2016, Tsunami damage estimation in Manta-Ecuador, using fragility functions. A Master's Thesis.
- Parrales G., 2014, Modelo de gestión administrativa para la comuna Atravezado-Libertador Bolívar, parroquia Manglaralto, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena. Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Licenciada en Administración Pública.
- Reyes J., 2014, "Plan de desarrollo turístico sostenible para la Comuna Atravezado-Libertador Bolívar, parroquia Manglaralto, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Licenciado en Administración de Turismo.
- Rizzo, P. 1977, Catálogo de tsunamis en la costa ecuatoriana y su Región Insular. Instituto Oceanográfico de la Armada.
- Romero J., 2015, Plan de desarrollo económico para la Comuna Cadeate, parroquia Manglaralto, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena. Trabajo de titulaciónprevio a la obtención del título de Ingeniero en Administración de Empresas.
- Serrano M., 2015, Estrategia para mejorar la competitividad del sector artesanal de la comunaMontañita, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena, año 2013. Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Economista.
- Silgado F.E., 1957, El movimiento sísmico del 12 de diciembre de 1953. Boletín de la Sociedad.
- Soloviev S. &Goch., 1975, A catalogue of Tsunami on the eastern shore of the Pacific Ocean, Moscow. Nauca publishing.
- Tapia A., 2015, Plan de desarrollo económico para la comuna Ayangue, parroquia Colonche, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena. Trabajo de titulación.
- Yagual M., 2017. Diseño de un Plan de Promoción Turística de los Atractivos Naturales y Culturales de la Comuna Manglaralto, provincia de Santa Elena, 2016. Trabajo de titulaciónprevio a la obtención del título de Licenciado en Turismo y Hotelería. <https://www.santaelena.gob.ec/index.php/santa-elena>. agosto 2020.