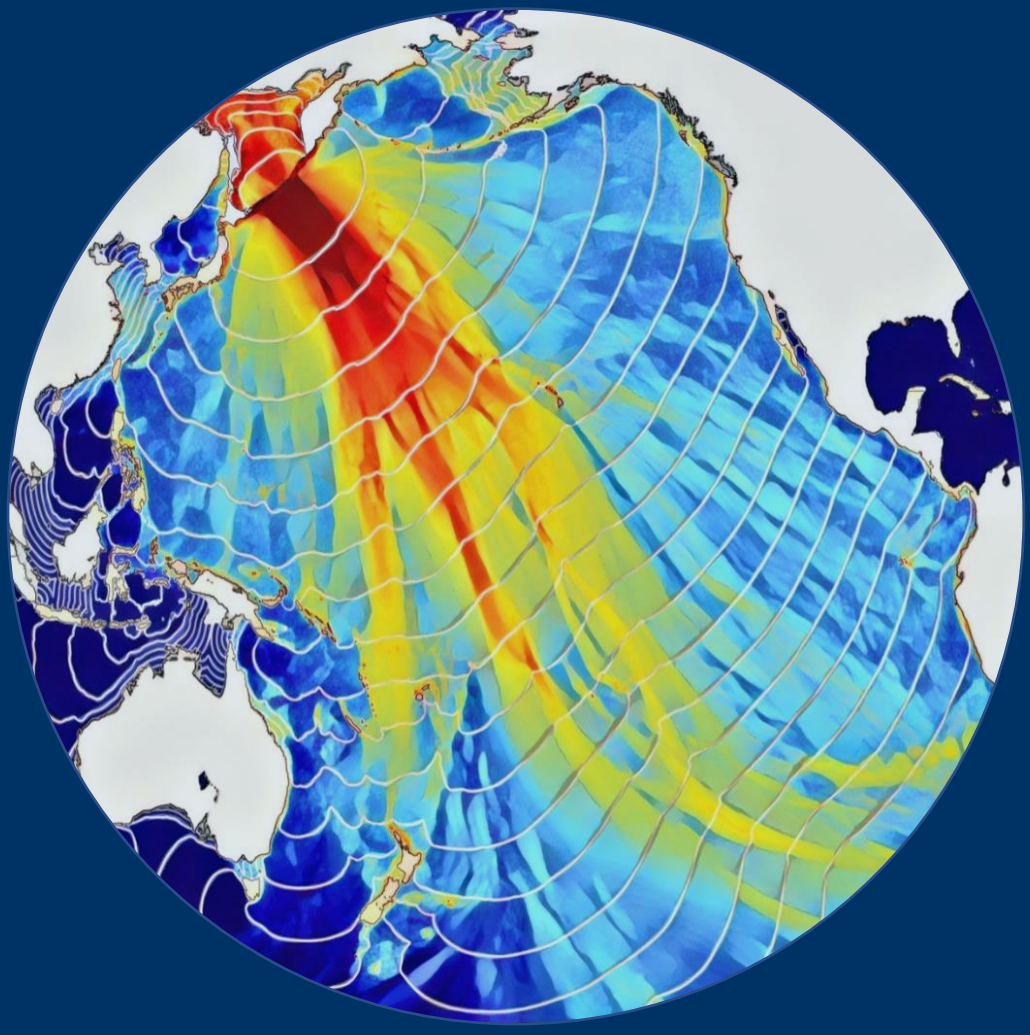
Tsunamis en la Costa Occidental de México y en el Mar de Cortés



LAURA G. ORTIZ H.
MODESTO ORTIZ F.

CICESE

Tsunamis en la Costa Occidental de México y en el Mar de Cortés

Esta obra se presenta en conmemoración del décimo aniversario del Centro de Alerta de Tsunamis de México creado en la Secretaría de Marina Armada de México el 19 de septiembre del año 2011. Los autores de esta obra han participado como instructores y colaboradores del Centro de Alerta de Tsunamis desde su fundación.

José Gómez Valdés
Editor

Ensenada, Baja California, México
2021

Tsunamis en la Costa Occidental de México y en el Mar de Cortés

D.R. © CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA (CICESE)
Carretera Ensenada-Tijuana Num.3918,
Zona Playitas, C.P. 22860
Ensenada, Baja California, México.

© EDITOR
José Gómez Valdés
Coordinador del Programa de Estudios de Posgrado del Departamento de Oceanografía Física, CICESE.

© AUTORES
Laura Gabriela Ortiz Huerta. Estancia Posdoctoral en el Departamento de Oceanografía Física, CICESE.
Modesto Ortiz Figueroa. Investigador del Departamento de Oceanografía Física, CICESE.

1ra edición, septiembre 2021
Versión Electrónica
ISBN: 978-607-8811-21-2
Derechos reservados conforme a la ley
HECHO EN MÉXICO - EDICIÓN EN LÍNEA
Disponible en https://www.cicese.edu.mx/

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio, sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Esta obra de divulgación científica contó con dictámenes de pares externos al Departamento de Oceanografía física del CICESE.

Prólogo

En esta época es posible pronunciar la palabra tsunami sin la necesidad de explicar su significado ¿Quién no guarda en la memoria las imágenes del tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011, con el mar desbordando las murallas, destruyendo todo a su paso y arrebatando miles de vidas, y las imágenes de Sumatra del 26 de diciembre del 2004, o las noticias de Chile del 27 de febrero del 2010? Estos tres tsunamis, ocurriendo en menos de una década, han sensibilizado a la población mundial al grado que hoy en día el fenómeno tsunami se ha convertido en uno más de los miedos de la humanidad ¿Vivo en una zona de peligro? ¿Hasta dónde el mar puede inundar? ¿Cómo me puedo preparar ante un tsunami? Dar respuesta a estas preguntas es la pretensión de este libro, explorando medidas de prevención y autoprotección con base en experiencias de tsunamis históricos y recientes que han afectado a nuestras costas.

Índice

Prólogo 4

Capítulo 1. Introducción 7
Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico 7
Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis 8

Capítulo 2. Conceptos básicos 9
Mecanismos de generación 9
Relación entre la magnitud y área del terremoto 10

Capítulo 3. Experiencias de tsunamis de origen local 12
Jalisco-Colima, 9 de octubre de 1995 13
Secuencia de terremotos de Jalisco-Colima de 1932 28
Viernes 3 de junio de 1932 28
Sábado 18 de junio de 1932 32
Miércoles 22 de junio de 1932 33
Michoacán, 19 y 20 de septiembre de 1985 36
Oaxaca, 28 de marzo de 1787 40
Oaxaca-Chiapas, 7 de septiembre del 2017 51

Capítulo 4. Tsunamis en el Mar de Cortés 52
Loreto, 27 de agosto de 1810 52

Capítulo 5. Tsunamis de origen lejano 54
Dirección de propagación, el círculo de los navegantes 54
Efecto conjunto del relieve del fondo marino y de la esfericidad del planeta en la propagación de los tsunamis 57
Experiencias de tsunamis de origen lejano 58
Chile, 22 de mayo de 1960 59
Chile, 27 de febrero del 2010 y 16 de septiembre del 2015 61
Alaska, 27 de marzo de 1964 64
Japón, 11 de marzo del 2011 68
Sumatra, 26 de diciembre del 2004 72
Islas Kuriles, 15 de noviembre del 2006 74
Kermadek-Tonga, 3 de mayo del 2006 76
Kermadek-Tonga, 29 de septiembre del 2009 76
Kermadek-Tonga, 4 de marzo del 2021 77
Ecuador-Colombia, 1906, 1942, 1958 y 1979 79
Escenarios de peligro por tsunamis de origen lejano 81

Capítulo 6. Medidas de prevención y autoprotección 83
Tsunamis de origen lejano 83
Tsunamis de origen local 84

Reflexiones 86

Agradecimientos 88

Apéndice 89
Efectos costeros del tsunami del 9 de octubre de 1995 en la costa de Colima y Jalisco. Informe Técnico 89

Referencias 107

Capítulo 1
Introducción

Los tsunamis son uno más de los fenómenos naturales que han estado presentes desde mucho antes de que la especie humana diera sus primeros pasos por el planeta. Los tsunamis destructivos son tan poco frecuentes que pueden pasar decenas y hasta centenas de años sin que se repitan en un mismo lugar, dando tiempo suficiente para tomar medidas preventivas o, en el peor de los casos, dando tiempo para que los desastres escapen de nuestra memoria y percepción. Es por ello que su documentación sistemática, y la conmemoración de los desastres, constituyen el ingrediente fundamental que nos permitirá recordar las experiencias para tomar las medidas de prevención y autoprotección para salvaguardar nuestras vidas y las de futuras generaciones.

Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico

La primera medida internacional de prevención ante la amenaza de tsunamis se tomó a consecuencia de las experiencias devastadoras de los tsunamis de Chile del 22 de mayo de 1960 y de Alaska del 27 de marzo de 1964. La Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI/UNESCO), convocó a los países miembros para constituir al Grupo Coordinador para el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacifico. El Grupo quedó formado por los contactos nacionales asignados por el gobierno de cada país, mismos que se reúnen cada año a partir de su fundación en abril de 1965. Simultáneamente, la COI aceptó el ofrecimiento de los Estados Unidos de América de expandir su centro de alerta en Hawaii, conocido ahora como "*Pacific Tsunami Warning Center*" (PTWC), para convertirse en el centro operativo del Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacifico. A la par, la COI también aceptó el ofrecimiento de los países miembros, de integrar sus facilidades existentes en cuanto a personal, instrumentación y telecomunicaciones, al Sistema de Alerta de Tsunamis en el Pacifico. Fue en estas reuniones cuando se acordó nombrar en común a este fenómeno natural debido a que en las diferentes regiones de la cuenca del Pacífico se le conocía con diferentes nombres, a saber: el maremoto, la ola verde, "*tidal wave*", "*seismic sea-wave*", entre otros. Siendo seleccionada la palabra "tsunami" por ser Japón el país en donde mejor se tenía documentado y estudiado a este fenómeno natural. Para más información acerca de la historia del Grupo Coordinador para el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacifico y de su estructura orgánica, favor de consultar el "*Master Plan for the Tsunami Warning System in the Pacific*" (COI/UNESCO/INF-1124, 1999).

A partir de 1965, el centro de operaciones o Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWC) ha venido emitiendo alertas de tsunami a los países miembros basándose en la localización y magnitud del sismo o terremoto y en datos históricos de tsunamis. La confirmación de la alerta o de la cancelación en su caso, se basa en reportes del nivel del mar por parte de los Contactos Nacionales en las localidades cercanas al epicentro del terremoto, y en observaciones automáticas del nivel del mar provenientes de las redes mareográficas nacionales que reportan en tiempo real al PTWC como una cortesía para los países vecinos y

distantes. Sin embargo, el pronóstico de alturas esperadas del tsunami, y la estimación del peligro, es responsabilidad de cada país, por lo que cada país debe tener una organización adecuada para atender, interpretar y diseminar los mensajes de alerta de tsunamis de origen lejano.

Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis

A pesar de que en entre los años 1965 y 2011 no contábamos en México con un Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, las alertas emitidas por el PTWC fueron atendidas adecuadamente en coordinación espontanea entre el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la Secretaría de Marina (SEMAR), y la Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC). En particular, se atendieron las alertas de los tsunamis provenientes de Shikotán-1994, Sumatra-2004, Chile-2010 y Japón-2011, logrando evitar evacuaciones espontáneas que inevitablemente causan pérdida de vidas y cuantiosas pérdidas económicas por el consecuente cese de actividades.

A 47 años de la fundación del Grupo Coordinador Internacional para el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacifico, se formó en México un Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, integrado al Sistema Nacional de Protección Civil y conformado por instituciones gubernamentales y académicas. El centro de operaciones o Centro de Alerta de Tsunamis (CAT) fue diseñado y desarrollado con conocimiento propio acuñado en el CICESE tras años de investigación científica y de coordinación en materia de protección civil. El Centro de Alerta de Tsunamis es operado por la SEMAR las 24 horas de todos los días del año y está en comunicación continúa con la Coordinación Nacional de Protección Civil para dar tranquilidad a la población cuando se confirma que no hay peligro o, en su defecto, para dar la alerta cuando se estima que sí hay peligro. Sin embargo, debemos aclarar que no hay poder humano ni tecnología suficiente para alertar a la población en caso de un tsunami local, de un tsunami que se produzca por un terremoto justo en la costa en donde habitamos. La experiencia en otros países y la experiencia propia de los terremotos y tsunamis en la costa occidental de México nos ha enseñado que hay escasos minutos entre el sismo y el tsunami, por lo que la alerta debe emitirse antes de que ocurra el sismo ¡Con años de antelación! señalando a la población, los lugares vulnerables susceptibles de inundación. En tal caso, el terremoto es por sí mismo la alerta del tsunami y solamente las medidas de prevención y autoprotección nos permitirán salvaguardar nuestras vidas ¡Si siente un terremoto fuerte aléjese inmediatamente de la costa a los lugares seguros! Es mejor alejarse a tiempo y que no haya tsunami, a que por falta de prevención se pierdan vidas cuando sí hay tsunami. Esta es una aseveración muy fuerte que merece ser explorada y discutida a profundidad. Sin embargo, a consideración del lector, permítanos previamente establecer un lenguaje común, ilustrando algunos conceptos básicos acerca de qué es un tsunami, cómo se origina y cómo se propaga a lo largo y ancho de los mares, relatando las principales experiencias de tsunamis en México, que son de utilidad para estimar tanto el peligro como la vulnerabilidad de la región en donde habitamos.

Capítulo 2
Conceptos básicos

Mecanismos de generación

Los tsunamis son producidos por el movimiento súbito del lecho marino o fondo del mar en las regiones de subducción de las placas tectónicas, en donde la corteza oceánica subyace o se mete debajo de la corteza continental. Como se ilustra en la Figura 2.1, un movimiento súbito entre las placas tectónicas hace que el lecho del mar se eleve varios metros y, a su vez, la superficie del mar también se eleva, copiando fielmente la deformación vertical del lecho marino. Instantes después la fuerza de gravedad hace que la superficie del mar tienda a regresar a su posición de equilibrio, dando lugar al origen de un tsunami que se va a propagar predominantemente tanto a la costa adyacente como a mar abierto. A la parte del tsunami que se propaga a la costa adyacente se le conoce como tsunami local, y a la parte del tsunami que se propaga a mar abierto se le conoce como tsunami transoceánico. En mar abierto el tsunami propaga la energía en forma de ondas, sin embargo, al aproximarse a la costa adquiere la forma de olas de gran longitud de onda (decenas de kilómetros) que además transportan agua produciendo inundaciones.

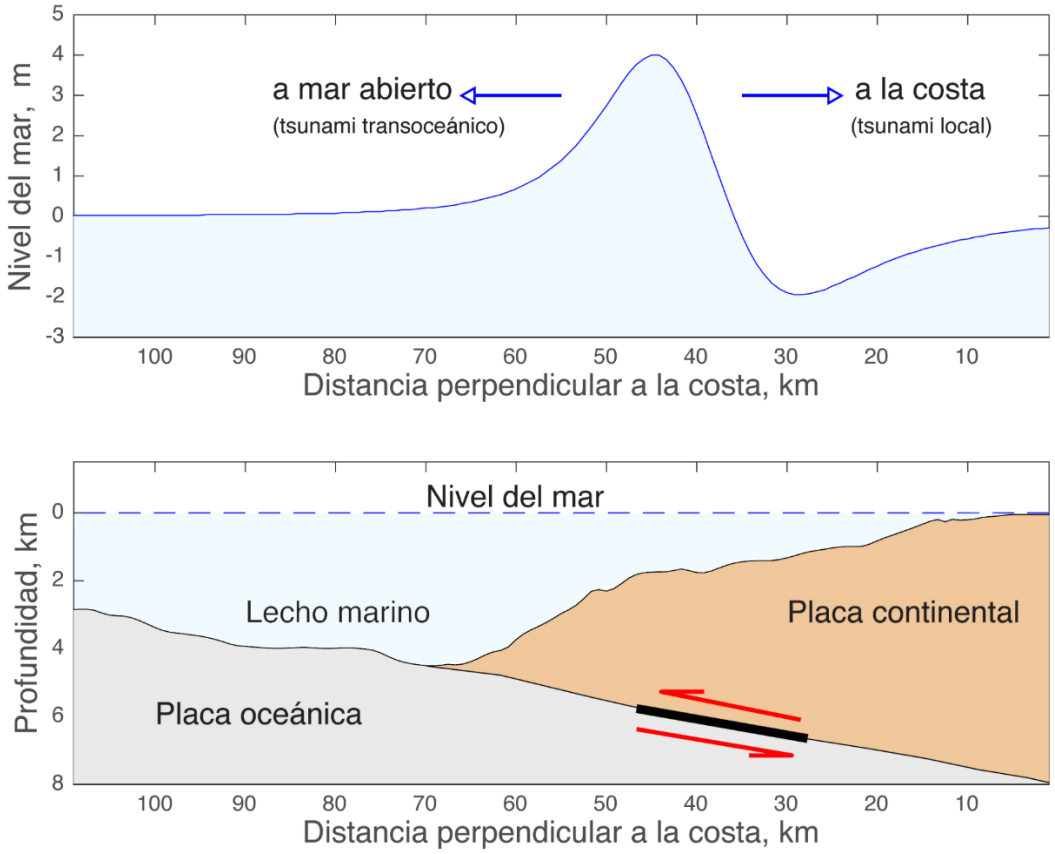


Figura 2.1. Panel inferior: Esquema de subducción de placas tectónicas en la costa occidental de México, en donde se hace notar la falla geológica o zona de ruptura o de movimiento relativo entre las placas. Panel superior: Deformación vertical de la superficie del mar o primera ola del tsunami producto del movimiento súbito entre las placas tectónicas.

El perfil vertical del lecho marino que se ilustra en el panel superior de la Figura 2.1, es el resultado de un modelo matemático desarrollado por los científicos L. Mansinha y D.E. Smylie en el año 1971, para explicar la deformación vertical de una superficie debido a fallas geológicas. Anteriormente se creía que todos los tsunamis en la costa occidental de México se originaban por avalanchas submarinas de rocas que se desprendían y caían en las grandes profundidades (5,600 m) de la fosa o trinchera mesoamericana, y que a su vez el desprendimiento de estas rocas producía los grandes terremotos desde Colima hasta la frontera con Guatemala ("El origen de los recientes temblores en México". El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, martes 21 de junio de 1932, página 1). Se tiene conocimiento de otros mecanismos que también producen tsunamis, como la caída de meteoritos, la explosión de volcanes como el Krakatoa en el año de 1883, o el deslizamiento de grandes bloques de sedimento en el talud continental, generalmente a consecuencia de algún terremoto.

Relación entre la magnitud y área del terremoto

El área en donde ha ocurrido la dislocación o deslizamiento entre las placas tectónicas, también conocida como "área de ruptura o plano de falla" se orienta en general a lo largo de decenas a centenas de kilómetros de costa, y es bien sabido que, a mayor área de ruptura, mayor magnitud del sismo o terremoto y mayor altura del tsunami. Por ejemplo: como se ilustra en la Figura 2.2, el área de ruptura del terremoto de magnitud 9 o M 9 de Japón del 11 de marzo del 2011, es de 600 km a lo largo de la costa × 200 km de ancho (~10^5 km^2). En contraste, el área de ruptura del terremoto de Jalisco-Colima de 1995 (M 8), es de 150 km a lo largo de la costa × 70 km de ancho (~10^4 km^2); y el área de ruptura del terremoto de Acapulco del 11 de mayo de 1962 (M 7), es de 35 km × 35 km (~10^3 km^2).

Note cómo el área de ruptura disminuye abruptamente conforme la magnitud del terremoto disminuye gradualmente (M = 9, 8, 7), así como gradualmente disminuye el exponente o logaritmo con base 10 del área de ruptura (5, 4, 3), respectivamente. Esta relación entre el logaritmo del área de ruptura y la magnitud del sismo no pasó desapercibida y se convirtió en una relación empírica muy ilustrativa entre el área del terremoto y su magnitud (Utsu y Seki, 1954; Wyss, 1979; Singh et al., 1980), a saber:

$$M = log_{10}(\text{área en } km^2) + 4.0 \qquad (1)$$

Los estudios avanzados en la sismología moderna determinan la magnitud de los terremotos mediante el análisis de las ondas sísmicas. Por ejemplo, si la magnitud se determina a partir de las ondas sísmicas superficiales se le conoce como M_S; si se determina con las ondas de cuerpo *"body waves"* es M_b, y si se determina con el momento sísmico (Fuerza x Distancia = Trabajo *"Work"*) es M_w. En teoría, la estimación de la magnitud de un sismo en particular debe ser coincidente independientemente del subíndice o del método empleado, sin embargo, existen diferencias debido tanto a la distancia de la fuente sísmica como a la respuesta del suelo en donde está el sismógrafo.

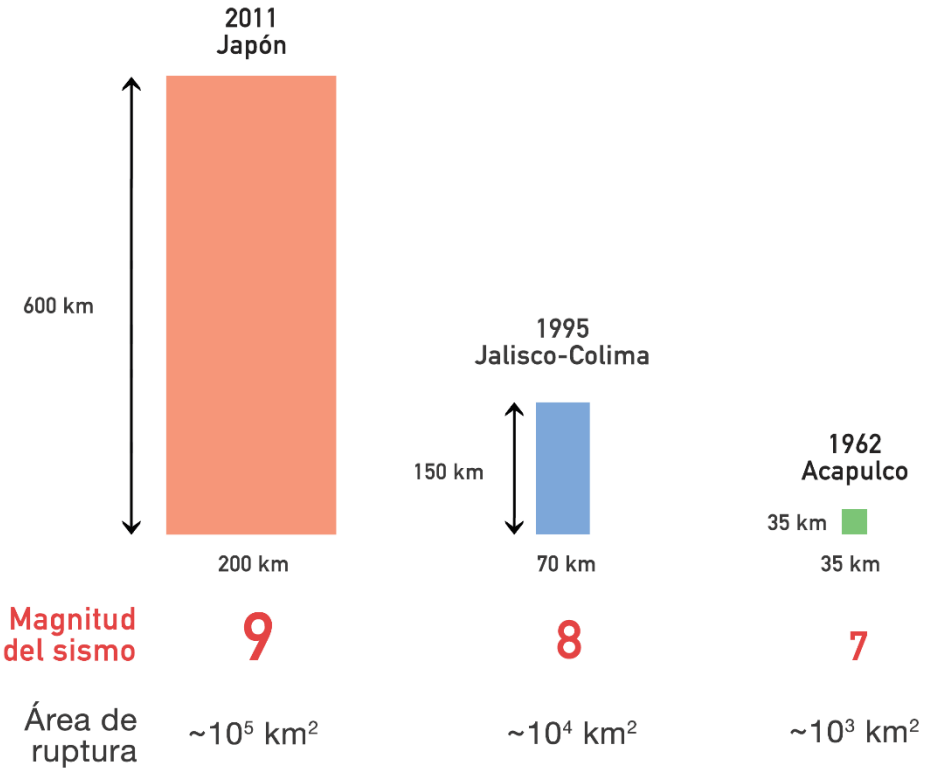


Figura 2.2. Comparación ilustrativa de áreas de ruptura de sismos o terremotos de magnitudes 9, 8 y 7.

Capítulo 3
Experiencias de tsunamis de origen local

La documentación histórica de sismos y tsunamis en la costa occidental de México es muy abundante y data de la época prehispánica (García Acosta y Suárez, 1996; Sánchez y Farreras, 1993), sin embargo, en esta obra nos limitaremos a relatar las experiencias más importantes de los tsunamis de origen local que han sido producidos por los sismos fuertes y moderados cuyas áreas de ruptura o planos de falla se indican en la Figura 3.1.

Los planos de falla se localizan a profundidades de 10-20 km y se inclinan aproximadamente 15 grados hacia el continente, a excepción del plano de falla del sismo de Chiapas del 7 de septiembre del 2017, cuya profundidad media es de 60 km con inclinación de 70 grados. A esta inclinación se debe que su proyección superficial se aprecie como una franja muy angosta. También se indica la localización de los sismos de Acapulco de magnitud 7 del mes de mayo de 1962, con la finalidad de contrastar estas áreas de ruptura, con áreas de ruptura de sismos de magnitud 8.

El catálogo ilustrado de los sismos o temblores ocurridos en México a partir de que se instaló el primer instrumento mecánico en el país en 1904 se puede consultar en línea en la obra de Kostoglodov y Pacheco (1999).

Figura 3.1. Localización de los sismos fuertes y moderados que han producido tsunamis en la costa occidental de México. Los rectángulos indican la proyección superficial de las áreas de ruptura o planos de falla de cada uno de los sismos.

Jalisco-Colima, 9 de octubre de 1995

El tsunami de Jalisco-Colima del 9 de octubre de 1995 causó inundaciones a lo largo de 200 km de costa entre Cuyutlán, Colima y Chalacatepec, Jalisco. Este es el tsunami mejor documentado en la historia de México y es el primero que se "deja retratar". El relato y la descripción fotográfica de cómo este tsunami inundaba las poblaciones costeras se lo debemos a Pepe Martínez, habitante de la Manzanilla, Jalisco: *"...eran las nueve y media de la mañana cuando sentimos un fuerte temblor que no nos permitía permanecer en pie. Cuando dejó de temblar y salimos a la calle nos dimos cuenta de que el mar se estaba saliendo, que el mar estaba inundando la costera. En ese momento regresé a mi casa y lo único que tomé fue mi cámara, y mientras corría al cerro que está a dos cuadras de mi casa logré captar cómo la gente escapaba de la costa ya con el agua hasta los tobillos y cómo el mar inundaba al poblado, y luego cómo se retiraba arrastrando autos y todo tipo de objetos".*

Gracias a la valentía de Pepe y a su afán por documentar lo que estaba ocurriendo contamos hoy con un relato y una secuencia de fotos en la Manzanilla, que por vez primera en la historia de México revelan nítidamente el efecto de un "*tsunami local*" en su costa occidental (Figuras 3.2 a 3.8):

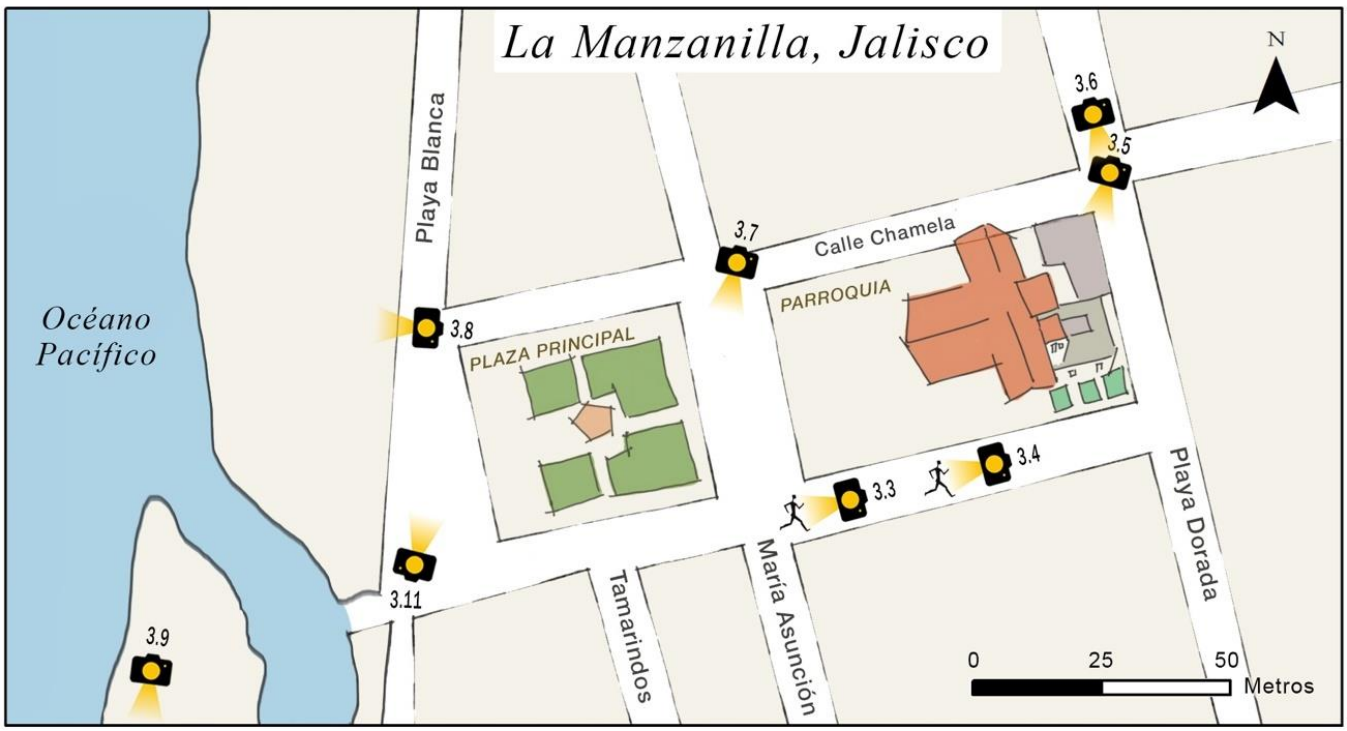


Figura 3.2. Croquis de la Manzanilla, Jalisco, en donde se indica la ubicación de la cámara y la dirección en la que fue tomada la foto. Los números al lado de la cámara se refieren al número de la figura correspondiente.

Figura 3.3. A escasos 10 minutos después del terremoto las personas venían escapando del tsunami con el agua hasta los tobillos. Cortesía de Pepe Martínez.

Figura 3.4. Instantes después corren a la par del tsunami; uno de ellos corre más rápido escapando del agua, a punto de llegar al costado del Templo. Cortesía de Pepe Martínez.

Figura 3.5. Habían transcurrido 20 minutos después del terremoto cuando el tsunami ya había inundado las tierras bajas hasta la altura de 4 metros sobre el nivel del mar. En esta secuencia de tres fotografías tomadas de derecha a izquierda se observa el mar en retirada. Note cómo la mesa de madera está siendo arrastrada por la calle que da a espaldas del Templo. Cortesía de Pepe Martínez.

Figura 3.6. El nivel de las aguas baja un poco más, permitiendo a Pepe correr hacia la plaza para continuar documentando la retirada del tsunami. Al fondo se observa la misma mesa de madera de la fotografía anterior. Cortesía de Pepe Martínez.

Figura 3.7. Fotografías tomadas desde la parte frontal del Templo, en donde se observa la plaza inundada y una camioneta a medio flotar arrastrada hacia el quiosco por el mar en retirada. Las casas al lado izquierdo de la fotografía están alineadas con la calle donde las personas venían escapando del tsunami con el agua a los tobillos. Cortesía de Pepe Martínez.

Figura 3.8. Fotografía tomada con el mar aún en retirada sobre las casas que dan a la playa. Las paredes que dan a la playa, entre otras, fueron derribadas por el paso del tsunami. Al fondo de la calle se observa un carro montado sobre otro y, a la izquierda, la mesa de madera a punto de llegar a la playa. Cortesía de Pepe Martínez.

Una semana después de ocurrido el desastre se organizó un grupo de voluntarios de diferentes instituciones para documentar en el campo los testimonios y los efectos del tsunami a lo largo de las costas de Jalisco y Colima. Los resultados del estudio de campo se describen en extenso en el Informe Técnico inédito que se presenta en el Apéndice de este libro.

En la Manzanilla, en particular, relata Modesto Ortiz: *"entrevistamos al señor Josef K. Lehemen durante el estudio de campo. Estando en su casa, misma que se encuentra en lo alto de la colina con vistas al mar (Figura 3.9), vio todo lo que le pasó al mar antes, durante y después del terremoto. Relató que durante el terremoto vio como si saliera polvo del mar, también había polvo en las colinas por los deslizamientos de tierra, pero ese polvo no había llegado al mar. Después de unos 5 minutos de ocurrido el terremoto el mar empezó a inundar al poblado y las rocas que están en el mar frente a su casa quedaron cubiertas totalmente por el agua. Cuando el mar se retiró, quedó al descubierto el lecho marino hasta el pie de las rocas. Bajó de la casa y caminó por el lecho marino para tomar fotos, pero minutos después el mar empezó a subir muy rápido y tuvo que correr para no ser alcanzado por el agua; en la carrera perdió su cámara. Regresó al balcón de su casa y vio cómo el mar inundó por segunda vez al poblado, pero con menor altura que la primera vez. Después el mar bajó y subió unas 7 veces durante una hora u hora y media, pero sin inundar al poblado".*

Durante la entrevista se tomó una fotografía desde el balcón de su casa en donde se aprecia espléndidamente la Bahía de Tenacatita (Figura 3.10).

Figura 3.9. Casa sobre la colina propiedad en aquel entonces del señor Josef K. Lehemen. La playa corresponde a la barra de arena y canto rodado de la desembocadura del arroyo “La Manzanilla”. Fotografía: Modesto Ortiz.

Figura 3.10. Fotografía tomada desde el balcón de la casa del señor Josef K. Lehemen. Al lado derecho se observa la desembocadura del arroyo “La Manzanilla”. Fotografía: Modesto Ortiz.

Un vecino del Sr. Lehemen comentó que la primera ola, la más alta, no dejó marcas porque el agua venía limpia y fueron 4 las veces que el mar subió y bajó. Durante las labores de limpieza de la plaza (Figura 3.11), una profesora del lugar nos relató que un lanchero venía navegando sobre la plaza ya inundada y gritaba ¡Corran que se está saliendo el mar!

Habiendo investigado exhaustivamente los efectos del tsunami en la Manzanilla procedimos a señalar las marcas que dejó el mar en las paredes de las casas (Figura 3.12 a Figura 3.16). Una vez que cotejamos estas marcas con los relatos de los pobladores procedimos a medir su altura con respecto al nivel del mar empleando instrumentos topográficos.

Figura 3.11. Secuencia de fotografías donde se observa la plaza y el quiosco de la Manzanilla durante las labores de reconstrucción y limpieza. A la izquierda el mar y la desembocadura del arroyo “La Manzanilla”. Fotografía: Modesto Ortiz.

Figura 3.12. Efectos del tsunami en las edificaciones que dan a la playa. Las paredes de las habitaciones fueron derribadas y arrastradas por el tsunami y el piso quedó cubierto de arena. Fotografía: Modesto Ortiz.

Figura 3.13. Señalando con la mano la marca de inundación al interior del hotel a un costado de la plaza (altura del tsunami 3.8 metros sobre el nivel del mar). Fotografía: Modesto Ortiz.

Figura 3.14. Señalando con la mano la marca de inundación a un costado del Templo (altura del tsunami 4.0 metros sobre el nivel del mar). Fotografía: Modesto Ortiz.

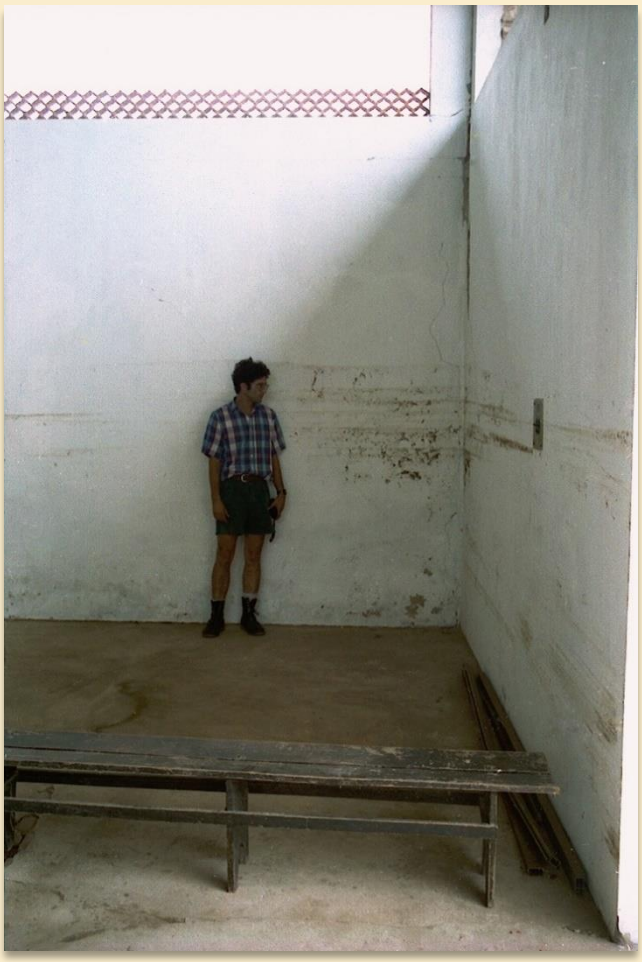


Figura 3.15. Marca de inundación al interior del Templo a la altura de la persona (altura 4.0 metros sobre el nivel del mar). Cabe mencionar que la persona se encuentra en un desnivel del piso con respecto al nivel de la calle y a ello se debe la impresión de una mayor altura de inundación al interior del Templo que en su exterior. Fotografía: Modesto Ortiz.

Figura 3.16. Marca de inundación al interior del Templo en el pedestal del altar (altura del tsunami 4.0 metros sobre el nivel del mar). El terremoto causó severos daños en las paredes del Templo y el tsunami alcanzó el pedestal del altar dejando un puñado de ramas, como si la imagen venerada hubiese contenido al terremoto y al tsunami. Fotografía: Modesto Ortiz.

El resumen del estudio de campo en cuanto a las alturas del tsunami observadas a lo largo de la costa de Jalisco y Colima se muestra en la Figura 3.17; las alturas van de 3 m en los extremos del área de ruptura, aumentando hacia el centro hasta alcanzar los 5 m en el poblado de Boca de Iguanas.

Durante el estudio de campo coincidimos con dos jóvenes de una universidad de Estados Unidos que en calidad de turistas estaban recabando información de los efectos del tsunami. Uno de ellos, sin experiencia en el campo, encontró un puñado de sargazo a 10.9 metros de altura sobre un cantil, argumentando que éste había sido arrojado por la salpicadura del tsunami al estamparse sobre el cantil. Sin embargo, todos los

testimonios recabados en nuestro estudio de campo coincidieron en que el tsunami llegó como un aumento gradual del nivel del mar sin producir salpicaduras. En nuestro recorrido no encontramos evidencias de que el tsunami hubiese sobrepasado los 5 m de altura a lo largo de las costas de Jalisco y Colima. Este hecho es importante de aclarar debido a que, a pesar de que compartimos información con ellos, publicaron sus resultados en una revista de circulación internacional sin consultarnos, mencionando que el tsunami había alcanzado hasta 10.9 m de altura y, en un abuso de confianza, recabaron de nuestra parte las fotos que amablemente Pepe Martínez había tomado del tsunami entrando a La Manzanilla. A la par y de manera independiente, un Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica corroboró que el tsunami no había sobrepasado los 5 m de altura (Juárez García et al., 1996; Juárez García et al., 1997).

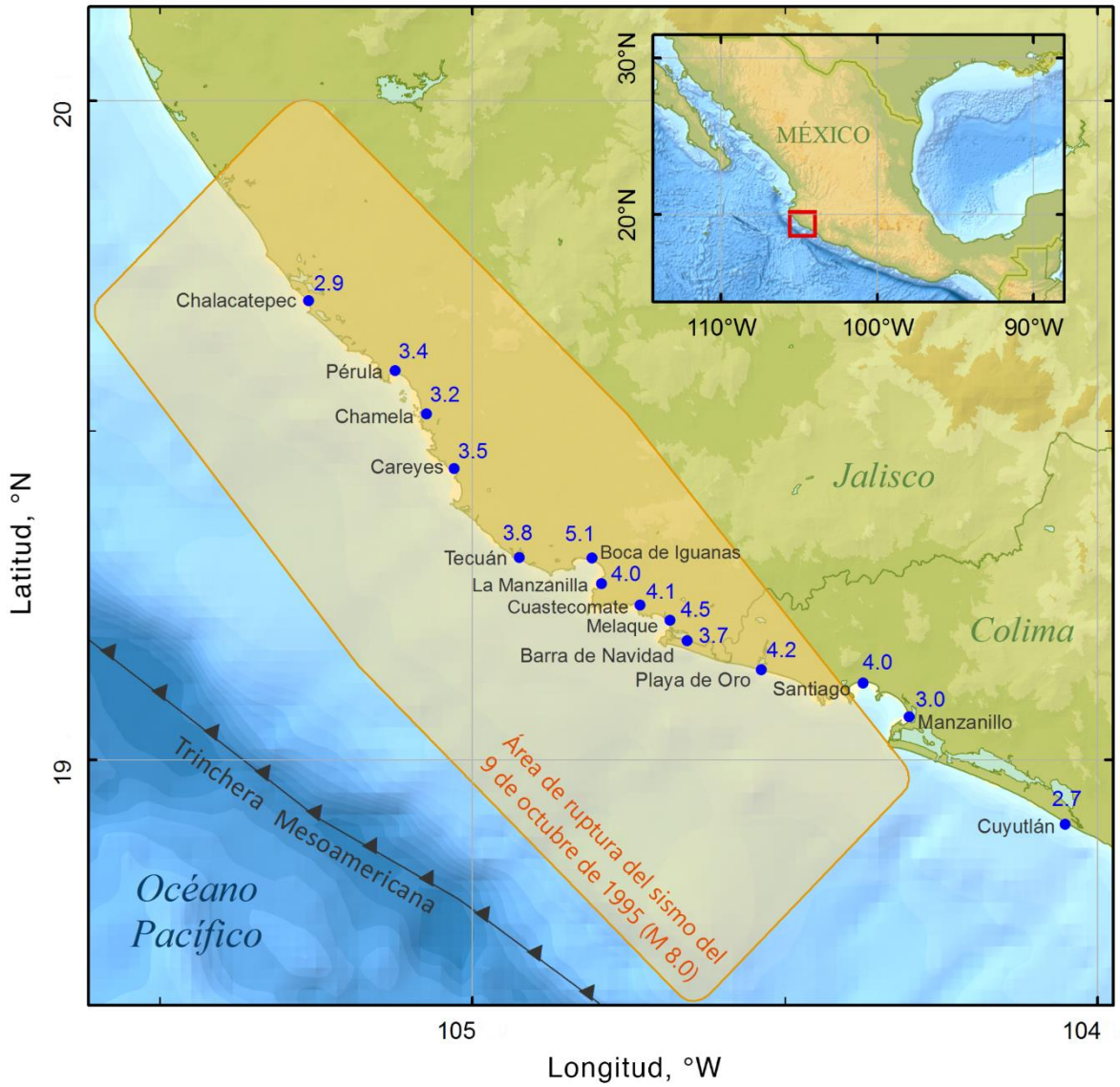


Figura 3.17. Poblaciones a lo largo de la costa de Jalisco y Colima afectadas por el tsunami. Los números indican la altura en metros que el tsunami alcanzó en cada localidad. Área de ruptura tomada de Ortiz et al., 2000a. En el mapa del recuadro superior derecho se indica la localización de la costa afectada por el tsunami.

El tsunami también se logró captar en los mareogramas de Manzanillo y Melaque (Figura 3.18). Ambos mareogramas son sumamente ilustrativos porque revelan cómo el nivel del mar empieza a aumentar prácticamente al tiempo de origen del sismo, y cómo la primera ola llega a escasos 10 minutos después del sismo en Melaque, y a escasos 15 minutos en Manzanillo.

El mareógrafo de Manzanillo se encuentra resguardado en el puerto interior y es por ello que se observa un retraso de algunos minutos en el primer arribo o primera ola del tsunami con respecto a Melaque. También se observa cómo la primera ola sobrepasa con 70 centímetros el nivel de la marea, mientras que justo al exterior del puerto el tsunami alcanzó los 3 metros de altura sobre el nivel de la marea. Este hecho permite constatar que el puerto interior, por tener una entrada estrecha y un cuerpo de agua muy grande, tiene la capacidad de impedir hasta en un 50% la altura de los tsunamis que llegan a la bahía. Sin embargo, el hecho de que las variaciones subsecuentes del nivel del mar se sucedan a intervalos de 30 minutos, hace que el agua al entrar y salir del puerto ocasione fuertes corrientes y remolinos tanto al interior como al exterior del puerto. De hecho, estas corrientes y remolinos socavaron el talud en el barrio de San Pedrito, al interior del puerto, ocasionando que algunas casas cayeran al agua.

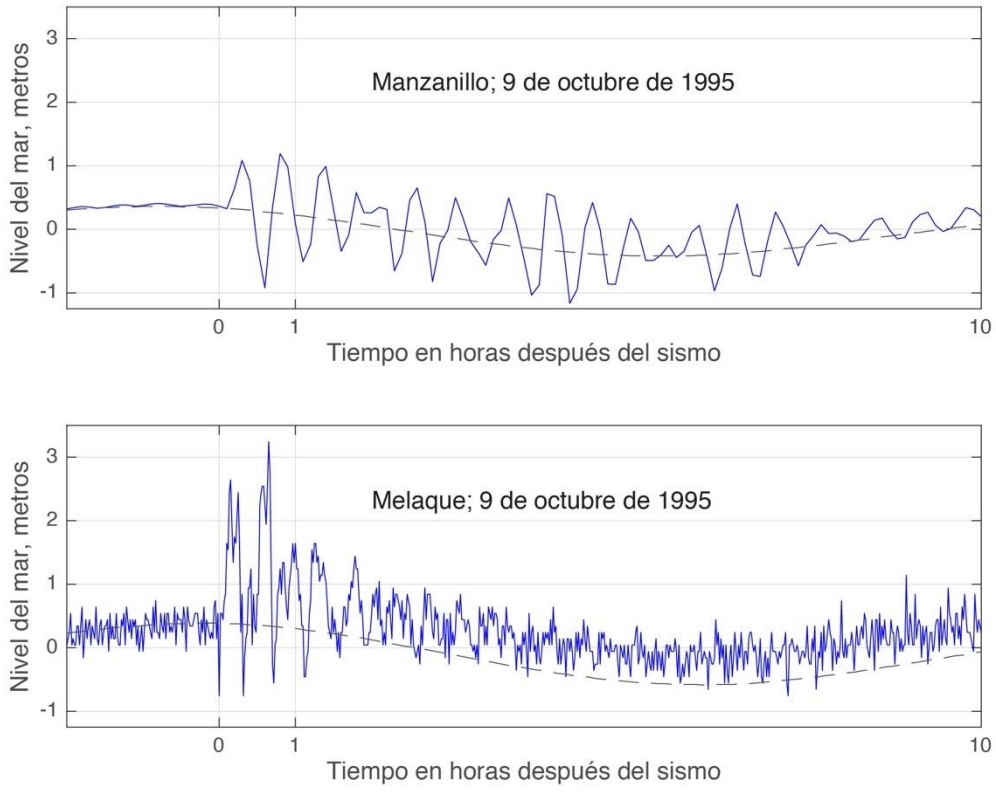


Figura 3.18. Mareogramas de Manzanillo y Melaque, en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami del 9 de octubre de 1995. Las observaciones del tsunami en Melaque son cortesía del Profesor Anatoly Filonov (Filonov, 1997).

En contraste al mareograma de Manzanillo, el de Melaque se obtuvo a partir de un instrumento (sensor de presión) anclado en mar abierto a 2 km de la costa, en donde la profundidad es de 50 metros. Este mareograma revela nítidamente la forma del tsunami en mar abierto sin las modificaciones impuestas por cuerpos de agua semicerrados. Por ejemplo, en el mareograma se observa cómo la segunda ola es más alta que la primera, alcanzando los 3 metros sobre el nivel de la marea. Note que al igual que en Melaque, también en Manzanillo la segunda ola es ligeramente más alta que la primera. Este hecho viene a confirmar lo que se ha venido observando en el estudio de los tsunamis alrededor del mundo "…*en ocasiones la segunda o tercera ola son más altas que la primera*".

El estudio de campo y los registros del tsunami, así como los registros sísmicos y de posicionamiento global (GPS), permitieron confirmar una vez más la validez de los resultados del modelo numérico de propagación de tsunamis (Ortiz *et al*., 1998; Ortiz *et al*., 2000a). En este caso en particular, los resultados del modelo que se ilustran en la Figura 3.19, proporcionan una imagen del tsunami tanto en la costa como en mar abierto.

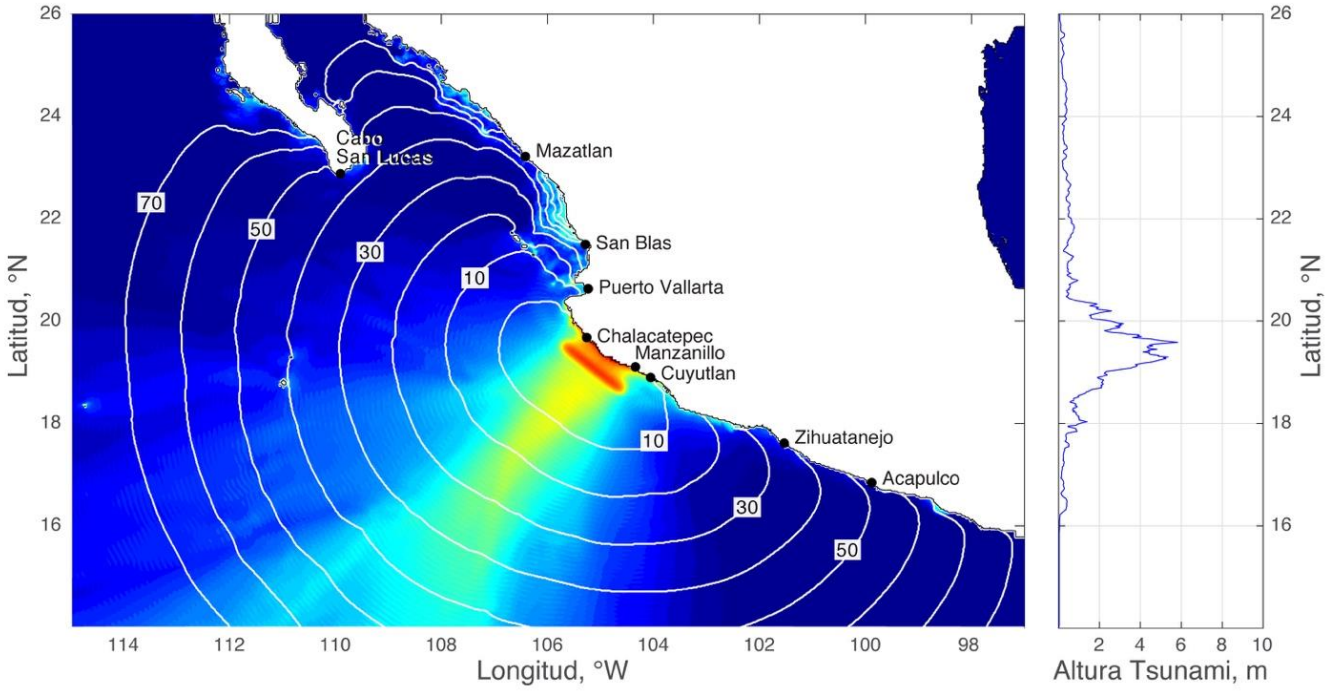


Figura 3.19. Modelo de propagación del tsunami de Jalisco-Colima del 9 de octubre de 1995. Las mayores alturas del tsunami en el mar se indican hacia el color rojo. El área de color rojo más intenso adyacente a la costa delimita aproximadamente el área del terremoto. Las líneas de fase o frentes de onda del tsunami se indican a intervalos de tiempo de 10 minutos. En el panel derecho se indica la altura del tsunami a lo largo de la costa.

En el panel derecho de la Figura 3.19, se aprecia cómo el tsunami alcanza entre 3 y 5 metros de altura a lo largo de la costa, entre Manzanillo y Chalacatepec, y cómo su altura disminuye rápidamente tanto al norte de Chalacatepec como al sur de Manzanillo, mientras que la mayor parte de la energía del tsunami se dirige a mar abierto en dirección perpendicular a la costa. Este hecho se puede confirmar con el registro del tsunami en Cabo San Lucas (Figura 3.20), en donde se observa cómo llega con alturas que no sobrepasan los 25 centímetros sobre el nivel de la marea. En general, podemos aventurarnos a afirmar que los tsunamis grandes que se produzcan por sismos de magnitud 8.0 – 8.2 en la costa occidental de México, entre Jalisco y Chiapas, no representan ningún peligro al interior del Mar de Cortés.

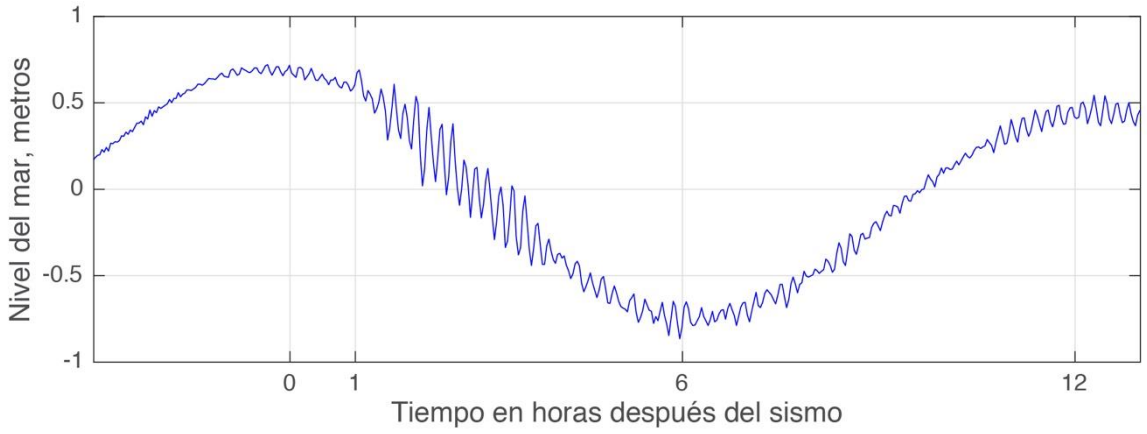


Figura 3.20. Mareograma de Cabo San Lucas, B.C.S., en donde se observa la marea y sobre ésta las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami del 9 de octubre de 1995.

Secuencia de terremotos de Jalisco-Colima de 1932

En el año de 1932 ocurrió una secuencia fatal de terremotos los días 3, 18 y 22 de junio. Los daños ocasionados quedaron documentados principalmente en la prensa de aquella época, en donde abundan los relatos de inundaciones en las costas de Jalisco y Colima. Además de los testimonios recabados por la prensa, se cuenta con el estudio de campo que realizó el Profesor Jorge L. Cummming, comisionado por el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, quien llegó a Colima el 25 de junio de 1932 y recorrió una gran extensión del territorio paralelo a la costa entre los estados de Colima y Jalisco (Cumming, 1933). Recientemente, Valdivia *et al*., (2012), realizaron investigaciones históricas en la región de Jalisco-Colima a partir de notas de hemeroteca, de telegramas de funcionarios y testimonios. Esta información en su conjunto nos revela una imagen vívida de la tragedia.

En aquel tiempo ya se contaba con varias estaciones sismológicas autónomas del Servicio Sismológico Nacional, entre las estaciones más cercanas al epicentro se encontraban las estaciones de Manzanillo, Guadalajara y la central de Tacubaya, lo que ha permitido determinar instrumentalmente la magnitud y localización de esta secuencia de terremotos (Singh *et al*., 1985).

Viernes 3 de junio de 1932

Este terremoto quedó registrado con instrumentos en la costa occidental de México (tiempo de origen del sismo 04:36:50 hora local; M_s 8.2, M_w 8.0; Singh et al., 1985; M_w 8.0, Pacheco et al., 1997). Los daños causados por el tsunami no fueron recabados en su totalidad en los días posteriores al sismo, tuvieron que pasar semanas para poder realizar el estudio de campo debido principalmente al difícil y escaso acceso a la franja costera, ya que en su mayoría los caminos eran de herradura y se contaba con muy pocos caminos carreteros (Secretaría de Agricultura y Fomento, 1926). Al momento de recabar la información de daños se generó mucha confusión al tratar de separar los daños producidos por los terremotos subsecuentes del 18 y 22 de junio que también causaron inundación. A pesar de estas confusiones, los testimonios que se recabaron en los puertos y en los balnearios más frecuentados nos dan una idea de la magnitud de la catástrofe en las costas de Jalisco y Colima, mismos que se han transcrito conservando el texto original aun en presencia de errores en la escritura:

EL SALDO TRAGICO EN COLIMA FUE ABUNDANTE

Colima, Col. 3 de junio. "La población continúa impresionada por los sismos, temiéndose que repitan. La ciudad carece de servicios de Luz y corriente eléctrica por haberse aterrado el canal de El Remate en un tramo de varios metros.

En Villa de Alvarez, Comala, Coquimatlán, Tecomán, Cuyutlán y Manzanillo, registrándose desgracias personales, estando algunos heridos graves. En Cuyutlán se salió el mar hasta la glorieta, derrumbándose algunos hoteles, así como la estación de los Ferrocarriles Nacionales.

EL MAR INVADIO LAS PLAYAS DE MAZATLÁN

Los mensajes telegráficos enviados desde el puerto de Mazatlán acerca del fenómeno sísmico, afirman que las aguas del mar, durante el temblor, invadieron las playas y una parte de la población, causando la consiguiente alarma entre el vecindario. En la ciudad se registraron muchos derrumbes. En el puerto de

Manzanillo se destrozó la tubería del agua y los barcos pequeños a impulsos de las enfurecidas olas se azotaban contra los muelles, poniéndose en peligro de destruirse."
Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, sábado 4 de junio de 1932, página 6.

EMBARCACIONES VARADAS POR DESCENSO DE LAS AGUAS DEL MAR

... "en Manzanillo y en la bahía de Puerto Vallarta, el agua del Océano bajó y al retirarse las aguas el guardacostas Acapulco quedó varado en la bahía, en más de veinte pies y además en Vallarta y Santiago quedaron encalladas por la misma causa once embarcaciones menores que en esos momentos hacían travesía por dichas ensenadas. Se sabe también que en el barrio norte del puerto de Manzanillo grandes olas invadieron la playa, y al volver las aguas a su antiguo cauce, dejaron la playa sembrada de peces de todos tamaños."
Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, domingo 5 de junio de 1932, página 3.

EN TOMATLAN AZOTO CON FURIA EL FENOMENO SISMICO

"El gobernador Allende recibió anoche un mensaje que, con fecha 3 del actual y por la vía de Talpa le envió el presidente municipal de Tomatlán, señor Abel M. Salgado, dándole cuenta de los estragos que causó en esa región el sismo del viernes. Dice que las aguas del Océano arrasaron los balnearios de Mayahuas, Chorros y Mismaloya, ahogándose algunas personas. Trescientas familias en Mismaloya ya están sin hogar. El Océano arrojó aguas sulfurosas, pereciendo gran número de cabezas de ganado mayor y menor; se perdieron las sementeras de maíz y frijol y la situación se hace a cada momento más angustiosa."
Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, miércoles 8 de junio de 1932, página 2.

Nota: Los balnearios de Mayahuas, Chorros y Mismaloya a los que se refieren en los relatos, eran palapas ubicadas al lado de los remansos del río, ubicadas en el estuario del Río de Tomatán (Valdivia *et al.,* 2012). Mismaloya se localiza en la cabeza del estuario (Figura 3.21), mientras que Mayahuas y Chorros se localizan cerca de la desembocadura del Río de Tomatlán (Secretaría de Agricultura y Fomento, 1922 y 1926).

Figura 3.21. Plano de Jalisco, México, sección noroeste del año 1922. Se ha resaltado en amarillo el balneario de Mismaloya para mejor apreciación. Plano modificado cortesía de la Secretaría de Agricultura y Fomento: Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos, México. 2a. Edición, 1922.

Con base en el modelo numérico de generación y propagación de tsunamis es posible tener una imagen de los efectos de este tsunami en las costas de Jalisco y Colima. Por ejemplo, en los resultados del modelo (Figura 3.22), se puede apreciar cómo el mar alcanza entre 4 y 5 metros de altura en la vecindad de Mismaloya, en donde si bien en aquel entonces la costa estaba escasamente habitada, en la acutalidad se encuentran asentadas varias poblaciones ya importantes por su número de pobladores, como Chalacatepec, Pérula, Chamela, Careyes, El Tecuán, Boca de Iguanas, La Manzanilla, Cuastecomate, Melaque y Barra de Navidad. La altura del tsunami disminuye a 3 metros en Manzanillo y Cuyutlán, a 1 metro en Zihuatanejo y a medio metro en Acapulco. En el otro extremo, en Puerto Vallarta y en San Blas, alcanza los 2 metros de altura y, hacia el norte, a partir de Mazatlán, su altura disminuye rápidamente. En aquel entonces, además del difícil acceso y de la escasa población, no se obtuvieron testimonios de la catástrofe en la región norteña de la costa de Jalisco debido a que posiblemente algunos asentamientos y campamentos pesqueros fueron arrasados por el embate del tsunami.

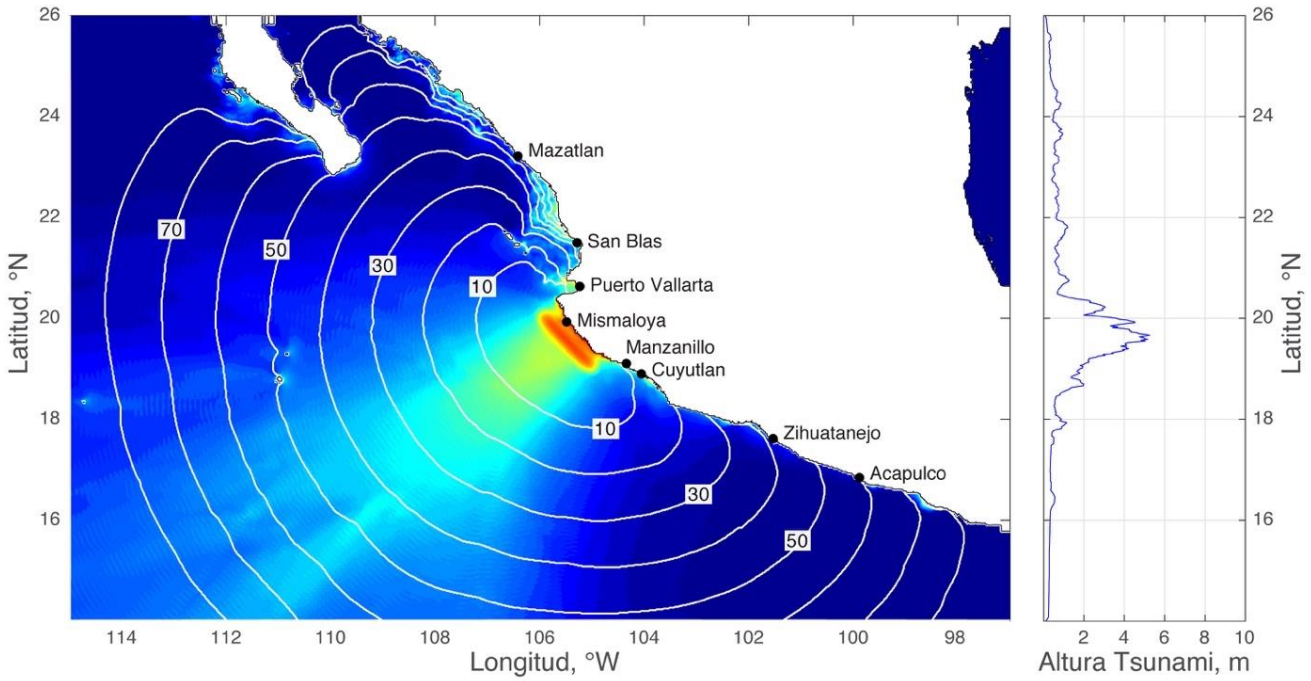


Figura 3.22. Modelo de propagación del tsunami de Jalisco del 3 de junio de 1932. El área de color rojo más intenso adyacente a la costa delimita aproximadamente el área del terremoto. Las mayores alturas del tsunami en el mar se indican hacia el color rojo. Las líneas de fase o frentes de onda del tsunami se indican a intervalos de tiempo de 10 minutos. En el panel derecho se indica la altura estimada de este tsunami a lo largo de la costa.

Sábado 18 de junio de 1932

Días después, a las 4 de la mañana con 12 minutos del 18 de junio (hora local), ocurrió un terremoto (M_s 7.8, M_w 7.9; Singh et al., 1985) al sureste del área del terremoto del 3 de junio, cuya localización aproximada se indica en la Figura 3.1. Este terremoto también produjo un tsunami que fue percibido en Manzanillo como una retirada del mar sin que se reportaran daños por inundación. Al igual que terremotos de magnitudes similares que han producido tsunamis de poca amplitud en la costa occidental de México (e.g., Ortiz *et al.*, 2000b), la mayor parte del área de ruptura del terremoto del 18 de junio se localiza tierra adentro, motivo por el que solamente pudo ocasionar perturbaciones de muy poca amplitud en el nivel del mar.

En los relatos de aquellos días se aprecia cómo la prensa relacionaba el origen de este terremoto con el paso de un ciclón que aún no llegaba a las costas de Colima, sino hasta el mediodía del 19 de junio, ocasionando mayores daños en Manzanillo y Cuyutlán que los de este último terremoto, a saber:

SE CREE QUE EL EPICENTRO DE LOS TEMBLORES ESTA EN EL PACIFICO

México, 18 de junio. — "La Estación Sismológica de Tacubaya, en estos momentos que son las nueve horas, proporciona a la prensa un boletín diciendo que todos sus aparatos registraron un temblor de cuarto grado con epifoco a 343 kilometros de Tacubaya, seguramente en el Océano Pacifico. Se cree que este movimiento se debió al tremendo ciclón que ha venido azotando el litoral del Pacifico."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 19 de junio de 1932, página 2.

DESDE LAS CUATRO DE LA MAÑANA EL PACIFICO ES AZOTADO POR FUERTE CICLON

"En la oficina de Faros dependiente de la Secretaría de Comunicaciones, se han recibido noticias de que un espantoso ciclón está azotando todo el litoral del Pacífico desde las cuatro de esta madrugada, habiendo causado daños tremendos a muchas embarcaciones, las cuales fueron arrojadas a la costa, por el mar embravecido. Se teme que muchos barcos hayan zozobrado en altamar.

Los faros de Manzanillo fueron completamente destruidos, habiendo el agua penetrado impetuosamente hasta la población, lo mismo que en Cuyutlán."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 19 de junio de 1932, página 2.

EL VECINDARIO DE MANZANILLO ESPERABA EL TEMBLOR

MANZANILLO, Col., junio 18. — "A las 4:15 horas de hoy nuevamente se registró seguido de otros de menos importancia, un movimiento telúrico de carácter trepidatorio y oscilatorio de una intensidad análoga a la del habido el día 3 del presente mes, aunque de menos duración, siendo de un minuto treinta segundos.

El temblor causó la consiguiente alarma entre el vecindario, no obstante que éste ya había tomado las precauciones necesarias en estos casos; pues no han cesado los movimientos desde aquel día y, además se había anunciado anticipadamente por medio de la prensa.

Las aguas del mar hicieron idéntico movimiento al del viernes 3 habiéndose retirado de la playa unos diez metros, para luego volver a su estado normal."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 19 de junio de 1932, página 3.

COLIMA SIN AGUA Y SIN LUZ Y CON 200 CASAS Y EDIFICIOS POR EL SUELO

"La ciudad se encuentra a obscuras y el pánico es tremendo entre los habitantes, las tuberías de agua quedaron destrozadas y las calles inundadas.

Por la noche se soltó fortísima tormenta que empeoró la situación de los colimenses a tal grado que inundó la ciudad."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 19 de junio de 1932, página 3.

Miércoles 22 de junio de 1932

A las 7 de la mañana (hora local) del 22 de junio de 1932 ocurrió un tercer terremoto de magnitud 6.9 (Singh *et al.*, 1985), mismo que es considerado como una réplica de los anteriores por haberse localizado cerca del área del terremoto del 18 de junio. Se reportó que a consecuencia de este terremoto hubo una gran marejada de 10 metros de altura que inundó el balneario de Cuyutlán, Colima. Ese día no se reportaron inundaciones ni variaciones del nivel del mar en el puerto de Manzanillo, lo que indica que la inundación reportada ocurrió a lo largo de la franja costera entre Cuyutlán y la desembocadura del Río Armería (Cumming, 1933).

Las notas de prensa de la época nos han permitido palpar la tragedia de Cuyutlán, a saber:

CUYUTLAN A PUNTO DE DESAPARECER BAJO LAS AGUAS DEL OCEANO PACIFICO

COLIMA, Col., junio 22 de 1932. — "Los habitantes de esta ciudad se encuentran altamente consternados con las informaciones que durante el día se recibieron acerca de los enormes estragos que en el pueblo de Cuyutlán causó la invasión repentina de las olas del mar — a consecuencia del movimiento telúrico — arrasando muchas casas y causando la muerte de varias personas conocidas.

En el primer informe que recibió el señor Salvador Saucedo gobernador del Estado, de lo ocurrido en el vecino balneario, indicaban que las aguas del Océano Pacífico habían rebasado sus límites y en formidables oleadas destruyeron el hotel Ceballos, el hotel Palacio y el número 1, este último propiedad de la familia Santa Cruz Ramírez; y lo mismo aconteció con el chalet del señor licenciado y senador don José D. Aguayo.

Después la impetuosidad de las aguas salvó la altura de los médanos en donde se hallaba el hotel numero 1 y se precipitaron sobre el caserío del pueblo, — ahora con más habitantes por encontrarse muchísima gente del Estado dedicada a la zafra."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 23 de junio de 1932, página 1.

LAS AGUAS INVADIERON EL POBLADO

MANZANILLO, Col., 22 de junio. — "El comisionado municipal de Cuyutlán en telegrama girado a la Presidencia de este puerto, manifiesta que hoy a las 7:30 horas se sintió formidable temblor, y simultáneamente el pueblo quedó sorprendido por fuerte marejada que arrasó las casas y causó la muerte de algunas personas, asegurándose que el número de golpeados y heridos es mucho mayor de cincuenta."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 23 de junio de 1932, página 2.

A ULTIMA HORA

MEXICO, 22 de junio. — "Hoy en la noche el gobernador de Colima, don Salvador Saucedo, informó a la Secretaría de Gobernación sobre la terrible destrucción que sufrieron Colima y Manzanillo a causa de un nuevo temblor y el ciclón que ha estado azotando en esa región. Dice que a las siete y media de la mañana de hoy, se registró un fortísimo temblor trepidatorio que

vino a derribar los pocos edificios que se conservaban en pie, aumentando esto la ruina y desolación en Colima, lo mismo que en Manzanillo, donde causo grandes daños. Afirma que a esa hora una enorme ola penetró más de un kilómetro, llegando al balneario de Cuyutlán, el cual fue destruido casi totalmente. Por último dice que se han recogido diez cadáveres y que hay cincuenta heridos."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 23 de junio de 1932, página 2.

LA CATASTROFE OCURRIDA ANTEAYER EN CUYUTLAN NO TIENE PRECEDENTE

COLIMA, Col., 23 de junio. — "...La casa grande de la parte más alta ----- de la ---- del ---- don ---- de la Madrid, pudo salvarse en parte que los efectos de la inmensa marejada de ayer miércoles. Lo mismo puede decirse de la estación de los Ferrocarriles Nacionales, a donde el mar llegó ya con muy poca fuerza, por la circunstancia de que al lado sur existe un médano de bastante altura y extenso.

...A pesar de lo expuesto queda firme la interrogación acerca de la verdadera causa del desbordamiento del mar en la forma dicha; máxime cuando árboles seculares, de hondas raíces, y de troncos enormes, fueron arrancados de cuajo con el vendaval y arrastrados a la vía de ---- siendo necesarios ----- dinamita para poder descombrarla..."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 24 de junio de 1932, página 1.

MAS DETALLES SOBRE LOS SUCESOS EN CUYUTLAN

MEXICO, junio 23. —"...Por su parte el superintendente de la división de Manzanillo, señor García, envió hoy al ingeniero don Javier Sánchez Mejorada, presidente del Ejecutivo de los ferrocarriles, un amplio informe sobre los daños de Cuyutlán. Entre otras cosas dice que ayer, a las siete horas, el nivel del mar en Cuyutlán bajó considerablemente y que inmediatamente después subió con el fuerte oleaje y que una grandísima ola inundó la población originando los siguientes daños materiales: derrumbe de los baños de Enramada, así como los hoteles de Santa Cruz y cincuenta casas de madera. Que un tren que se envió a explorar a Cuyutlán, llevó a Colima a mil doscientas personas entre ellas muchos heridos."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 24 de junio de 1932, página 2.

En el estudio de campo que realizó el Profesor Cumming, indica que los terremotos afectaron poco las construcciones de Cuyutlán, pues casi todas eran de madera, y que la destrucción de Cuyutlán fue debida al tsunami del 22 de junio, que invadió toda la parte del médano frontera al mar, arrasando pequeñas casetas de madera y destruyendo dos hoteles de madera, relativamente grandes. También hace notar que el balneario de Cuyutlán estaba asentado sobre el médano, que no se alzaba a más de unos 8 metros de altura sobre el nivel del mar en sus partes más altas. Esta nota es importante porque el Hotel Madrid estaba ubicado en el montículo más alto del médano y sufrió desperfectos muy ligeros debido a la gran altura en que se encontraba y a la circunstancia de que estaba sentado sobre fuertes pilotes, ofreciendo poco frente al impacto del agua y permitiendo su libre paso (Salazar, 1989), lo que implica que el tsunami, si bien alcanzó a desbordar los 8 metros de altura del montículo, no alcanzó la altura suficiente como para inundar al hotel.

No se espera que un terremoto de magnitud 6.9 pueda producir un tsunami, de hecho, solamente puede producir variaciones de escasos centímetros en el nivel

mar, como las registradas el 18 de abril del 2002 en los mareogramas de Acapulco y Zihuatanejo, producidas por el sismo de magnitud 6.7 en la zona de subducción o trinchera Mesoamericana en la vecindad de Acapulco (Iglesias *et al.*, 2003). Sin embargo, en el estudio de campo realizado por el Profesor Jorge L. Cumming, se vislumbra cómo el tsunami pudo haber sido originado por un derrumbe submarino de los depósitos del río Armería que desemboca en la Boca de Pascuales al sur de Cuyutlán, a saber: *"...El día 22 de junio, a las 7 h., se sintió un ligero temblor por las personas que vivían cerca de la costa del Estado de Colima. A pesar de su poca intensidad, el tsunami (ola sísimca) provocado, fue de muy considerable altura, estrellándose en la costa colimnense con sin igual violencia. Toda la parte en donde la costa es un cordón arenoso de poca altura, sufrió la invasión de las aguas, que con la energía de torrentes desbordados corrieron arrasando cuando encontraron a su paso. La zona más particularmente afectada por este fenómeno secundario del terremoto, fue la comprendida desde Cuyutlán al W. hasta las salinas situadas en la costa al S. de Tecomán. Por la dirección que tomaron los árboles y postes arrasados frente a la playa de Palo Verde y Guazango, parece que el centro de propagación del tsunami está situado a unos 10 kilómetros al S-SW de la Boca de Pascuales, que es la desembocadura del río de Armería. En los lugares poblados la destrucción por el tsunami fue dolorosa y el centro más afectado fue Cuyutlán, lugar de cierta importancia como productor de sal y en la playa del cual existía un pequeño balneario" (Cumming, 1933).*

Otro factor importante que no ha sido considerado en la inundación de Cuyutlán es la presencia de oleaje de mar de fondo durante la primavera y verano, conocido así porque viene de lejos o "del fondo del horizonte". Estas olas se caracterizan principalmente por su gran longitud de onda o distancia entre ola y ola, y cuando revientan tienden a llegar hasta la parte más alta de las playas. Este fenómeno es muy común en Cuyutlán, donde año con año se reportan inundaciones en el bulevar costero entre los meses de mayo y noviembre. La rompiente del oleaje es uno de los espectáculos propios de las playas de Cuyutlán, por lo que cabe la posibilidad de que el tsunami del 22 de junio no hubiese sido de gran altura, siendo la rompiente del oleaje la que causó el desastre al trasladarse la rompiente tierra adentro llevando las olas hasta lo alto del médano a consecuencia de la elevación gradual del nivel del mar. Posiblemente la conjunción del tsunami con el fuerte oleaje dio origen a la leyenda de *"La ola verde de Cuyutlán"*. Este fenómeno se vislumbra en el relato de Salazar (1989): *"...después del estremecimiento de la tierra, vieron aparecer sobre la cima del médano una enorme ola que al transponer ese obstáculo y todavía conservando en ese lugar una altura de 5 a 6 metros, reventó, esparciéndose por la pendiente, a través del caserío, hasta llegar a la vía del ferrocarril que se encuentra a 800 metros en línea recta de la orilla del mar."*

Mucho se ha especulado acerca del origen de este tsunami. La pregunta es si fue producto de un derrumbe submarino producido por el sismo, o si el sismo fue producido por el derrumbe submarino, o si fue producto de un terremoto cuya magnitud quedó enmascarada por tratarse de un movimiento sísmico relativamente lento (e.g., Pacheco *et al.*, 1997; Okal y Borrero, 2011; Corona y Ramírez-Herrera, 2015). Sin embargo, lo importante es que no se puede descartar la posibilidad del efecto conjunto de un tsunami con mar de fondo, pudiendo alcanzar entre 8 y 10 metros de altura.

Michoacán, 19 y 20 de septiembre de 1985

El tsunami de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 pasó prácticamente desapercibido del entorno nacional debido a que la prensa estaba naturalmente enfocada a cubrir la catástrofe sin precedentes que se estaba viviendo en la Ciudad de México por los efectos del terremoto de magnitud 8.1 que ocurrió a las 7 de la mañana (7:17:48 hora local) de aquel 19 de septiembre. Los efectos del terremoto también fueron devastadores en Jalisco y Michoacán, como puede apreciarse en los relatos de los diarios locales:

CUANTIOSOS DAÑOS HUBO EN LÁZARO CÁRDENAS, MICH.

LAZARO CARDENAS, Mich., Sept.19 (EXC-AEE). — "Esta ciudad quedó semidestruida a consecuencia del violento sismo que se dejó sentir a las 7:18 horas.

Los ocho hoteles, el edificio de Telecomunicaciones, los dos cines, el centro comercial y el Hospital Civil de la SSA, así como decenas de casas particulares se desplomaron.

En la vecina Playa Azul también hubo daños muy serios en los hoteles, así como muertos y heridos. Los heridos fueron trasladados al hospital de la zona del IMSS, los soldados de la XII Zona Militar se hicieron cargo de la vigilancia a fin de evitar actos de rapiña. El Plan DN-III entró en vigor de inmediato.

Los daños preliminares fueron cinco muertos, unos 250 heridos, cifras que podían aumentar. Las carreteras quedaron bloqueadas por grandes peñascos. Las dos escuelas primarias cerraron sus puertas debido a que sufrieron graves cuarteaduras.

Cuauhtémoc Cárdenas Solórzano, gobernador de la Entidad, señaló que el movimiento telúrico fue de 7.3 en la escala de Mercalli, sin embargo declinó hacer mayores comentarios hasta tener mayores informes de los daños en otras ciudades. Afirmó que el Estado no será declarado zona de desastre."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 20 de septiembre de 1985, página 1.

CD. GUZMÁN Y GÓMEZ FARÍAS LOS MÁS AFECTADOS EN JALISCO.

"Por lo menos 27 muertos y 269 lesionados, muchos de éstos en forma grave, miles de personas damnificadas y daños materiales incalculables, fue el saldo que dejó en la zona sur de Jalisco el sismo que sacudió ayer en la mañana a gran parte del país.

Las poblaciones más afectadas fueron Ciudad Guzmán y Gómez Farías, en donde hasta la noche eran 24 muertos, veintiuno de la primera y los restantes de la segunda. En Zapotiltic dos personas perdieron la vida y otra más pereció en Tonila."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 20 de septiembre de 1985, página 1.

RECUENTO EN ZIHUATANEJO.

IXTAPA, Zihuatanejo, Gro., (Exc-AEE). – "Más de una treintena de muertos hubo ayer por la mañana en las poblaciones de esta región y Ciudad Guzmán, Michoacán, a consecuencia del terremoto que sacudió vasto sector de los Estados de Guerrero, Michoacán, Morelos y el Distrito Federal.

El delegado de Gobernación de la entidad, Jorge Avila, por conducto de una radioperadora informó que la mayoría de los decesos ocurrieron en el poblado de Ciudad Guzmán, Mich., casi en los límites con esta entidad.

Se sabe que se desplomaron varias casas de adobe y viviendas endebles, las autoridades municipales de dicho lugar pidieron auxilio por radio para que llegue la ayuda. En Zihuatanejo subió el nivel del mar al grado

de que decenas de embarcaciones quedaron encalladas; el techo de la agencia de automóvil Ford, se vino abajo dañando a varios vehículos.

Las actividades laborales y educativas quedaron suspendidas. Una niña de 14 años murió, se desconoce su identidad.

En Ixtapa, el temblor afectó varios hoteles, entre ellos el Sheraton y el Aristos. Fueron en su mayoría evacuados.

En la capital del Estado, se informó que el Palacio Municipal o de Gobierno resintió daños de consideración. Se ignora si hubo víctimas.

El funcionario señaló que en Lázaro Cárdenas, también hubo daños, aunque no se precisaron de qué cuantía. Una persona fue reportada muerta."

Fuente: El Siglo de Torreón, Periódico Regional, Torreón, Coah., viernes 20 de septiembre de 1985, página 7.

EVALÚAN LA SITUACIÓN EN MICHOACÁN Y GUERRERO.

ZIHUATANEJO, Gro., Sept. 21 (EXC-AEE). – "Movimientos telúricos de diversos grados de intensidad se registraron de los primeros 15 minutos de hoy hasta las 11 horas, tanto en esta localidad como en Acapulco; las zonas hoteleras fueron las más afectadas por las aguas marítimas, cuyos oleajes crecieron a causa de los temblores. No hay víctimas y sólo algunos inmuebles con cuarteaduras.

Después del segundo sismo que afectó más a la ciudad de México y que se sintió en esta región, desde los primeros 15 minutos en este puerto comenzaron los temblores, primero fuerte y posteriormente de menor grado e intensidad.

Hasta las 4 horas continuaron los temblores en este puerto. Las aguas litorales entraron a las zonas hoteleras, turistas. Tanto la población como el turismo abandonaron esos lugares y se fueron a otros más altos a ponerse a salvo de las inundaciones.

El Presidente Municipal de aquí, José Luis Mosqueda, informó que cientos de familias ante esta situación y el temor de quedar atrapadas entre muros y escombros de posibles derrumbes de inmuebles, prefieren dormir a la intemperie.

Otras personas pernoctaron en la plaza principal, en la Unidad Deportiva del Seguro Social y en patios de escuelas. Las aguas del oleaje inundaron las calles Juan N. Álvarez y toda la Avenida Benito Juárez. El líquido anegó también las pistas del Aeropuerto, las instalaciones del Balneario Potosí y restaurantes aledaños, agregó.

En Acapulco, Gro., el Presidente Municipal de este puerto, Alfonso Argudín Arcaraz, informó que ocurrieron 2 temblores: uno a las 7:50 y el otro a las 11 horas. Afirmó que los sismos, desde el jueves pasado, no han causado grandes daños a inmuebles ni han cobrado víctimas.

Admitió que en algunas zonas de aquí hay inmuebles afectados por cuarteaduras y la comunicación telefónica con otros municipios de Guerrero y con la capital del país es difícil.

En tanto, los 3,000 turistas nacionales e internacionales que se encontraban hospedados en los hoteles de este puerto, serán reubicados en casas-habitación particulares, ya que de continuar los movimientos telúricos fuertes puede haber derrumbes de edificios."

Fuente: El Informador, Diario Independiente, Guadalajara, Jalisco, 22 de septiembre de 1985, página 2.

Los efectos del tsunami en la costa michoacana no fueron tan devastadores como canónicamente correspondería a un tsunami generado por un terremoto de esa magnitud. Esto se debe a que la mayor parte del área de ruptura o área del terremoto se localizó tierra adentro y solamente una porción se

localizó en el mar (Ortiz y Farreras, 1994). La franja costera experimentó un levantamiento súbito debido al sismo y, consecuentemente, la superficie del mar se elevó a la par de la franja costera durante el terremoto. Instantes después el mar se retiró de la costa para recuperar su nivel original, mientras que la franja costera permaneció así levantada como la dejó el terremoto, motivo por el que los pobladores observaron cómo primero el mar se retiraba para luego regresar alcanzando entre 2 y 3 metros de altura en la vecindad de Lázaro Cárdenas y Zihuatanejo. El mar penetró 200 metros tierra adentro en Zihuatanejo introduciéndose en el primer piso de varios hoteles y restaurantes situados en la playa (Farreras *et al*., 2003). Se pudo constatar que la costa de Michoacán quedó un metro más alta sobre el nivel del mar a consecuencia de la dislocación cosísmica (Bodin y Klinger, 1986; Anderson *et al*., 1986). En la parte central del área de ruptura, en la vecindad de Caleta de Campos, se encuentra una playa a la que solamente se podía acceder durante las bajamares por un paso entre las rocas. A muy temprana hora antes del sismo, un grupo de estudio de la Universidad Michoacana ingresó a la playa para realizar un censo de nidos de tortuga y se vieron sorprendidos por el terremoto *"... la playa se movía para todos lados, no podíamos mantenernos en pie, se abrían grietas de donde salían como volcanes de arena. Después de que cesó el movimiento fuerte, pero todavía temblando, notamos que el mar se estaba retirando de la playa y pensamos que iba a venir un tsunami. No teníamos como salir de la playa pues había un cantil de rocas que no podíamos escalar. El mar regresó varias veces, pero por fortuna no sobrepasó la altura de la playa" (Comunicación personal, Biol. Beatriz Jiménez Alvarado, 1990).* Este relato es con seguridad el más importante porque nos permite confirmar que el extremo del área de ruptura, el que da al mar, se localiza a lo largo de la franja costera en donde ocurrió la mayor deformación vertical del lecho marino (ver Figura 3.1). De no ser así, si el extremo del área de ruptura se hubiese localizado mar adentro, el tsunami hubiese inundado con gran altura las playas en la vecindad de Caleta de campos.

Al día siguiente, el 20 de septiembre a las 7 de la tarde (19:37:20 hora local), se registró un terremoto de magnitud 7.3, mismo que fue clasificado como una réplica del anterior por haberse localizado muy cerca del anterior en la vecindad de Lázaro Cárdenas. Este terremoto produjo a su vez un tsunami que alcanzó a rebosar la altura de la playa en Zihuatanejo.

Ambos tsunamis, el del 19 de septiembre y el del 20 de septiembre, se registraron en el mareógrafo del puerto de Acapulco alcanzando alturas de hasta 50 centímetros sobre el nivel de la marea (Figura 3.23).

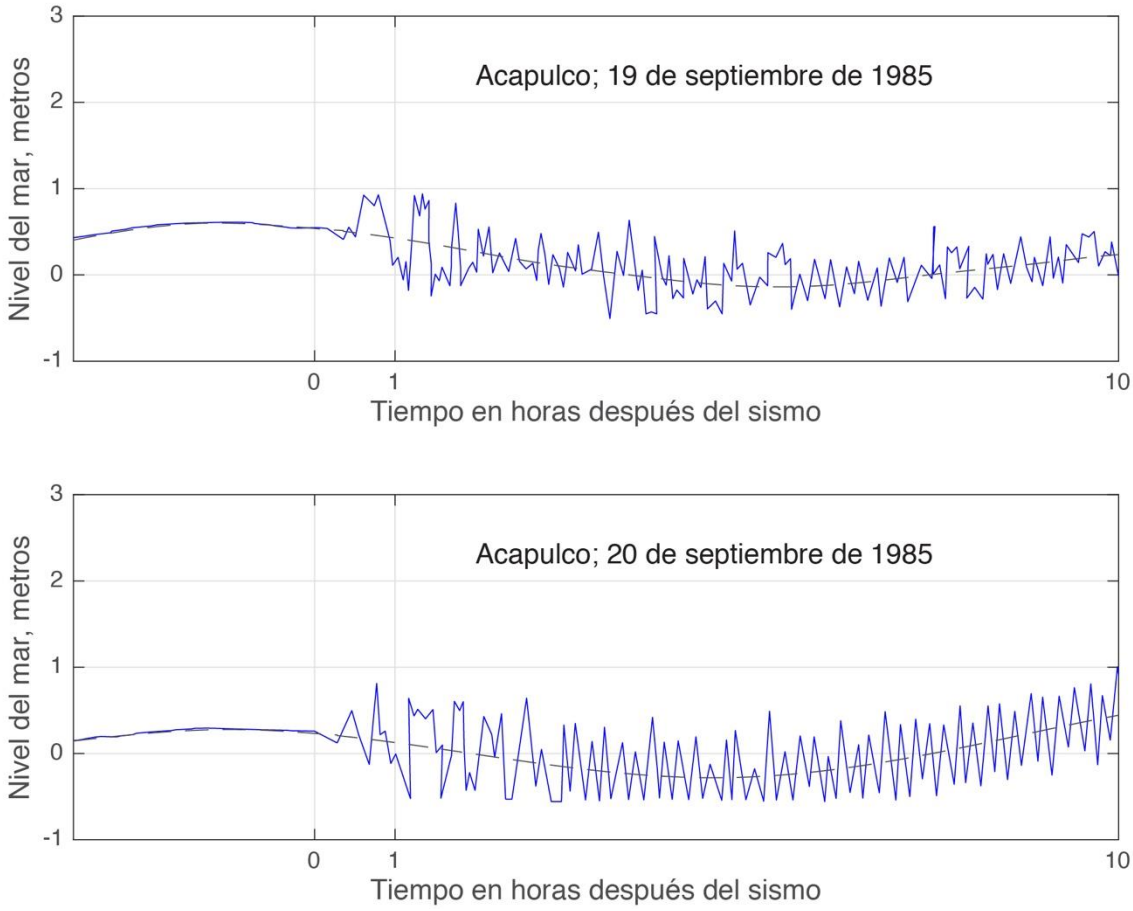


Figura 3.23. Mareogramas de Acapulco, Guerrero, en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por los tsunamis de Michoacán del 19 y 20 de septiembre de 1985.

En los mareogramas se observa que el tsunami llegó a Acapulco a escasos 30 minutos después de haber recorrido una distancia aproximada de 200 km, propagándose a una velocidad de 6 km por minuto a lo largo de la costa, desde Zihuatanejo hasta Acapulco.

Oaxaca, 28 de marzo de 1787

Se tiene conocimiento de que el terremoto de Oaxaca del 28 de marzo de 1787 generó un tsunami local sumamente destructivo. Entre los testimonios se encuentran los relatos del alcalde de Igualapan (actualmente Igualapa, Guerrero); del alcalde mayor de Tehuantepepeque (actualmente Tehuantepec, Oaxaca), y del Castellano del Puerto de Acapulco (el patrón del puerto). Estos testimonios y otros más fueron publicados durante los siguientes días y semanas en el periódico *"Gazeta de México"*, primer periódico impreso de la época, donde se menciona acerca de este gran terremoto experimentado en casi en toda la Nueva España. Los relatos eran de funcionarios que tenían la obligación de informar el estado físico y socioeconómico de cada jurisdicción al Superior Gobierno (INEGI, 2009). En el siguiente párrafo se transcribe un fragmento del relato del alcalde mayor de Igualapan, Don Francisco Gutiérrez de Terán, conservando a la letra lo escrito:

"...Dice que al tiempo del primero [refiriéndose al sismo del 28 de marzo], estando varios infelices de aquellas Pesquerias haciendo barras para coger pescado, y ya algunos montados á caballo despues de haberlo recogido y metido en sus redes, vieron con asombro retirarse el mar mas de una legua, descubriendose tierras de diversos colores, peñascos y árboles, y que con la misma velocidad que se huyó de su vista, volvió otra vez y otras, dexando millares de pescados en el distrito que quedó sin agua, y antecogiendolos hizo muchos pedazos á once de ellos, dexandolos colgados y metidos entre los palos de un monte, que dista como legua y media del mar, y de excesiva altura, escapando solamente algunos, aunque muy maltratados y heridos, que son los que han referido el caso, todos vecinos de aquella Jurisdicción."

Fuente: GAZETA DE MEXICO, martes 1 de mayo de 1787, páginas 341-342.

Nota: La legua era una medida que originalmente llegó a América con los europeos en el siglo XVI y se usaba para designar una distancia de cinco mil varas o el camino que regularmente se recorre en una hora (Vera y García Acosta, 2011). Sin embargo, se ha encontrado que esta medida era establecida en cada pueblo, cultura o sociedad como mejor le convenía (Garza Martínez, 2012), por lo que en la actualidad no hay una conversión exacta de leguas a kilómetros; La vara era la unidad más cercana al metro (1 vara ~ 1.19 m) y una vara se dividía en 3 pies conocidos como pies mexicanos. Fue hasta mediados del siglo XIX que se inició en América la adopción del sistema métrico (Vera y García Acosta, 2011).

El Teniente Coronel Don Tomás de Mollinedo, alcalde mayor de Tehuantepepeque, también menciona haber sentido el terremoto del día 28 de marzo en su Jurisdicción, al igual que la entrada del mar. A continuación, se describe un fragmento del relato del alcalde:

"...Igualmente participa que en los Lugares cercanos al mar distantes quatro leguas de la Villa se han sentido los movimientos con una extrañísima conmocion de las aguas, y espantoso bramido de aquel, resultando arrojar á la playa pezes de extraordinario grandor y conchas nunca vistas, cuya magnitud se ha hecho admirar de todos."

Fuente: GAZETA DE MEXICO, martes 1 de mayo de 1787, página 343.

Y en el puerto de Acapulco, el Castellano del Puerto (funcionario al mando de la defensa y administración de Acapulco) relata lo siguiente:

"El Castellano del Puerto de Acapulco, con fecha de 2 del corriente [refiriéndose a la fecha del 2 de abril] participa al mismo Superior Gobierno la extraña novedad experimentada en el mar el 28 del próximo pasado Marzo, en que como al medio dia comenzó á retirarse y crecer, aunque sin olas ni otra particular alteracion, de un modo nunca visto, haciendose mas sensible desde las dos de la tarde, pues en quatro minutos baxaba diez pies, y subia los mismo en seis, observandose mas de cien varas de Playa en cada valanceo; lo que se fue repitiendo cada vez con tal aumento, que á las cuatro de la tarde subió mas de doce pies, rebosando por encima del Muelle, é introduciendose en algunas casas cercanas, lo que obligó á dicho Castellano á avisar al Oficial Real Tesorero para que sin pérdida de tiempo pusiera a salvo las Caxas, como lo verificó trasladandolas al Hospital, que está en el sitio mas ventajoso; y á providenciar que los Comericantes retirasen á alguna elevacion sus efectos para liberarlos de averia.

Duró este temible espectáculo hasta las veinte y quatro horas, en que absolutamente volvió á recobrar su caxa el Elemento [refiriéndose al mar en la Bahía]; bien que yendo á menos los movimientos desde las cinco de la tarde del expresado día; y habiéndose aquietado la mucha gente que se había recogido en la Iglesia del Hospital y en la Parroquia, se formó á la oracion un devoto Rosario, que se terminó con una Platica Doctrinal."

Fuente: GAZETA DE MEXICO, martes 17 de abril de 1787 página 330.

Este último relato nos permite estimar la altura hasta donde se introdujo el tsunami en el puerto de Acapulco, *"...subió mas de doce pies"*. Lo más sensato al interpretar la apreciación visual del Castellano del puerto es que el nivel del mar subió más de doce pies a partir de su nivel más bajo en este último *"valanceo"* (refiriéndose al de las 4 de la tarde). *"...rebosando por encima del Muelle"* como sinónimo de desbordar o derramar o que el mar alcanzó la altura suficiente para sobrepasar al muelle (una interpretación errónea sería que el mar subió más de doce pies por encima del muelle). *"...introduciendose en algunas casas cercanas"*, lo cual indica que no fueron arrasadas por una pared de agua de más de doce pies, pues el tsunami hubiera arrasado con todo el poblado. Por fortuna, se cuenta con documentos históricos con los que se pueden corroborar las conjeturas o deducciones tanto acerca de la altura del muelle como de la altura a la que se encontraban las casas cercanas al muelle, a saber: en aquella época la población que vivía en el puerto de Acapulco se localizaba en la sección noroeste de la Bahía asentada principalmente a lo largo de la playa, como se indica en el Plano de Acapulco levantado el año 1791 (Figura 3.24).

.

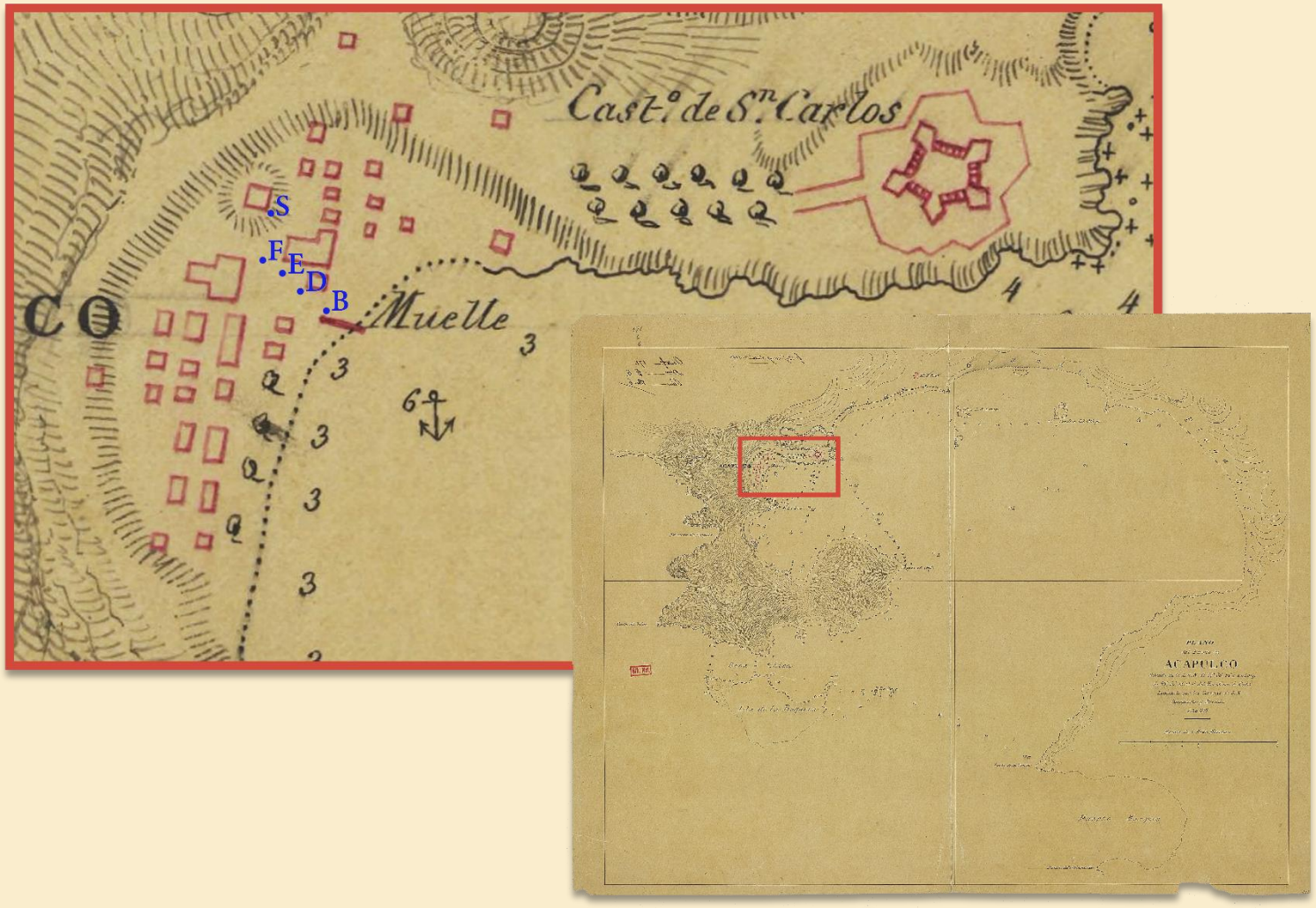


Figura 3.24. Plano del puerto de Acapulco levantado por las Corvetas de S.M. Descubierta y Atrevida en el año 1791 el cual incluye: la línea de costa, características costeras, sondeos, el Fuerte de San Diego o Castillo de San Carlos, una cuadricula de Acapulco, y una representación pictórica del relieve y la vegetación. Cortesía de la Biblioteca Nacional de Francia, Departamento de mapas y planos, IFN-53123336. Las letras resaltadas en azul corresponden a un perfil topográfico levantado en el año 1889.

Las letras B (1.75 m), D (1.44 m), E (1.80 m), F (4.36 m), S (35.30 m), resaltadas en azul en el plano de Acapulco (Figura 3.24), corresponden a un perfil topográfico con respecto al nivel del mar levantado en el año 1889 (Mapoteca Manuel Orozco y Berra, CGF.GRO.M8.V5.0602). El punto B con altura de 1.75 m sobre el nivel del mar se localiza en tierra al final del muelle, lo que indica que el muelle en el año 1889 no sobrepasaba la altura de 1.75 m. De hecho, en la actualidad, los muelles para embarcaciones menores se encuentran entre 1.2 y 1.6 metros sobre el nivel del mar en el puerto de Acapulco.

Antes de la construcción del muelle que existió durante el sismo y tsunami de 1787, la carga y descarga de los barcos era muy complicada debido a que las lanchas no podían atracar en tierra, eran personas metidas en el agua las que transportaban las mercancías y a los pasajeros desde y hasta las lanchas. Para solucionar el problema, Rafael Vasco, Castellano interino de Acapulco, proyectó y dirigió la construcción de un nuevo muelle en 1782. En el plano del muelle construido en 1782 dice exactamente: *"Plano que manifiesta el Muelle que se ha construido sobre Pilotage en el Puerto de Acapulco por hallarse el antiguo enteramente arruinado, y sus escombros obligaban las Naos a haser las descargas y resivir las cargas por hombres metidos en el agua hasta el pecho, a causa de no poder atracar a tierra las lanchas y hasta las personas que iban y venían de Abordo se transportaban en brasos, desde la orilla al Bote." Fuente Cortesía del Archivo General de las Indias, Sevilla, España, MP-MEXICO, 585.* Infortunadamente, en este plano no se indica la altura del muelle. Sin embargo, los retratos de los paisajistas de la Expedición de Alejandro Malaspina en el periodo 1789-1794 tienen calidad fotográfica y resaltan en ellos los detalles importantes tanto del puerto de Acapulco como del muelle y su geometría. Entre ellos se encuentra la composición realizada por el pintor Fernando Brambila (Figura 3.25), especialista en vistas de ciudades y paisajes. En esta composición se aprecia que el muelle que existió durante el sismo y tsunami de 1787 era de poca altura, misma que estimamos en este trabajo de aproximadamente un metro a metro y medio sobre el nivel del mar. En otra perspectiva del puerto (Figura 3.26), Suría, Cardero y Bauzá, en sus trabajos artísticos y bocetos, retratan al puerto visto desde lo alto del Hospital Real también conocido como de los padres Hipólitos, fundado en 1584 y destruido e incendiado en 1814 (Fajardo-Ortiz y Salcedo-Álvarez, 2006). Estas obras nos dan una idea de la cantidad de casas que había en el puerto y de la veracidad de los retratos de la ciudad en aquella época. La localización del Hospital Real se indica con la letra S en la Figura 3.24.

Figura 3.25. Retrato del Puerto de Acapulco por Fernando Brambila, pintor de la Expedición de Alejandro Malaspina en el periodo 1789-1794. Cortesía: Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 74. El muelle en el recuadro superior se iluminó en este trabajo en color rojo para mejor apreciación.

Figura 3.26. Vista de la Bahía y puerto de Acapulco por: (Suría (a), Cardero (b), Bauzá (c), durante la Expedición de Alejandro Malaspina en el periodo 1789-1794. Cortesía del Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 44, 51, 26.

En los tres bocetos o retratos (Figura 3.26), cada uno con estilo propio, se puede apreciar la capacidad descriptiva de los paisajistas. Por ejemplo, en los tres se aprecia un gran árbol cerca de la playa. Este árbol forma parte del conjunto de los 4 árboles a lo largo de la playa cercanos al muelle que se indican en el Plano de Acapulco en la Figura 3.24, mismos que corresponden a árboles de ceiba que fueron plantados exprofesamente para el amarre de navíos (De Novo y Colson, 1885). En el recuadro superior de la Figura 3.25 se alcanza a apreciar el cabo atado al árbol del que se amarraban las Naos o navíos. Se aprecia también la parroquia y una explanada al frente de la parroquia que corresponde a la hoy Plaza de Álvarez o zócalo, ubicada a 1.8 m sobre el nivel del mar, de acuerdo con el perfil levantado en 1889. A la derecha de la plaza se aprecian algunas casas a la orilla de la playa, a 1.75 m sobre el nivel del mar, presumiblemente a estas casas se introdujo el tsunami. Note que en el relato del Castellano del puerto no se menciona que el tsunami haya alcanzado a la parroquia, y nos da a entender que la gente se había refugiado en la parroquia *"...y habiéndose aquietado la mucha gente que se había recogido en la Iglesia del Hospital y en la Parroquia, se formó á la oración un devoto Rosario."*

Los testimonios de 1787 y los documentos históricos nos han permitido estimar tanto el origen del tsunami como la altura de éste a lo largo de la costa empleando el modelo numérico de generación y propagación de tsunamis de Goto et al., 1997. Este modelo es producto de muchos años de investigación científica en donde se ha tenido la oportunidad de observar los efectos de tsunamis en diferentes partes del mundo y de validar al modelo comparando sus resultados con las observaciones (e.g., Takahashi *et al*., 1995; Ortiz *et al.*, 1998; Ortiz *et al.*, 2000a; Ortiz *et al.*, 2000b; Ortiz y Bilham, 2003; Arreaga *et al*., 2005, Ortiz-Huerta *et al*., 2018; Ortiz-Huerta 2019, entre otros). En este caso en particular, los resultados del modelo de tsunamis (Figura 3.27) indican que las mayores afectaciones ocurrieron entre Punta Maldonado y Salina Cruz, en donde se estima que el tsunami alcanzó entre los 5 y 8 metros de altura, disminuyendo a 2 metros entre Acapulco y Zihuatanejo y entre Salina Cruz y Puerto Chiapas.

La franja costera entre Punta Maldonado y Huatulco se caracteriza por abundantes lagunas costeras y tierras llanas que se encuentran casi al nivel del mar, protegidas del oleaje y del viento por largas barras de arena de decenas de kilómetros a lo largo de la playa. Cuando un tsunami alcanza a penetrar por sobre las barras de arena, las erosiona y penetra tierra adentro hasta donde el nivel natural del suelo le impide avanzar. Este tipo de inundación se observó durante el reconocimiento de campo del tsunami de Perú del 23 de junio en el año 2001, donde el mar desbordó las barras de arena de Camaná penetrando 1 km tierra adentro hasta donde se encontró con los cerros en donde dejó su huella a la altura de 5 m (Dengler *et al*., 2003). También se observó en las imágenes del tsunami de Tohoku, Japón del 11 de marzo del 2011, en donde el mar avanzó varios kilómetros tierra adentro. Este fenómeno concuerda con el relato del alcalde mayor de Igualapan, en el sentido de que los pescadores quedaron colgados y metidos entre los palos de un monte que dista como legua y media de la playa.

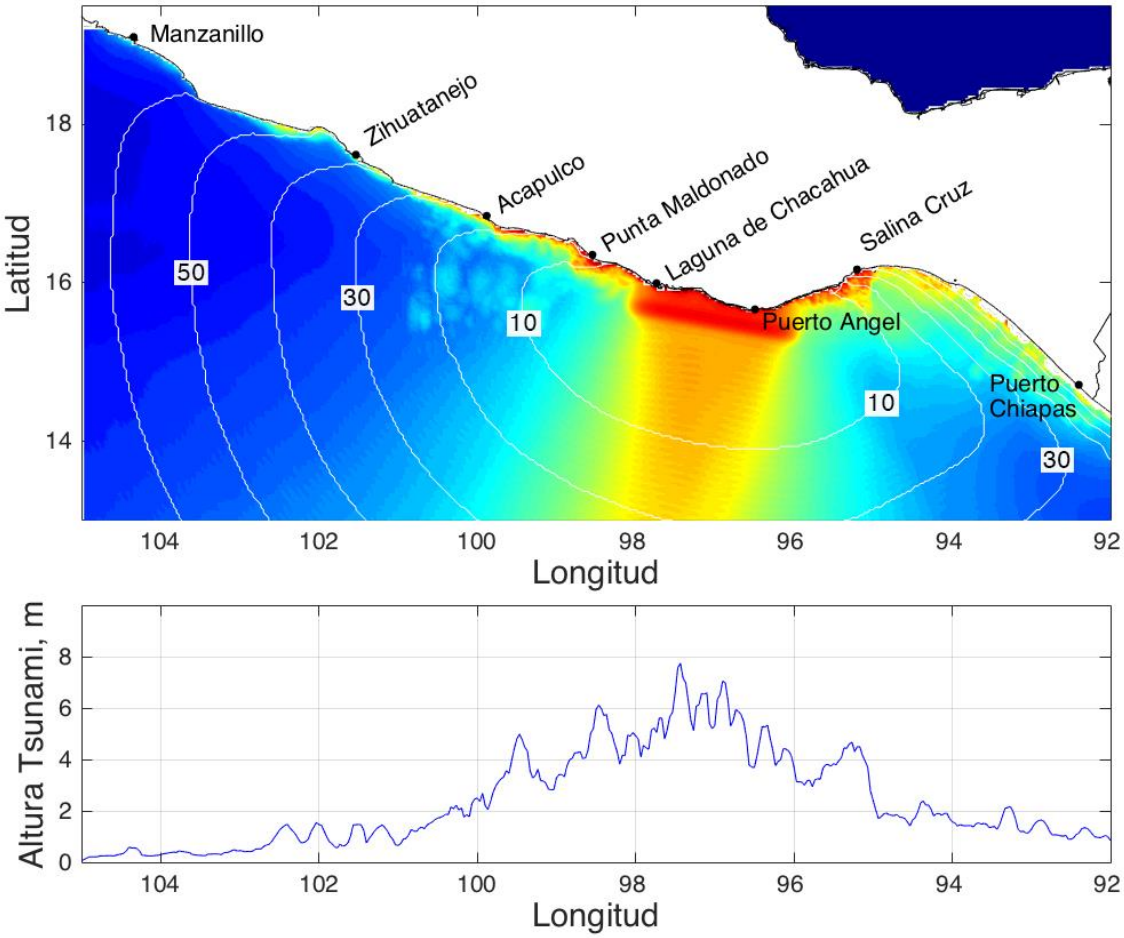


Figura 3.27. Panel superior: Modelo de propagación del tsunami de Oaxaca del 28 de marzo de 1787: el rectángulo indica el área de ruptura; las mayores alturas del tsunami se indican hacia el color rojo; las líneas de fase o frentes de onda del tsunami se indican a intervalos de 10 minutos a partir del tiempo de origen del tsunami. En el panel inferior se indica la altura estimada de este tsunami a lo largo de la costa.

El modelo de propagación de tsunamis nos permite estimar las variaciones resultantes del nivel del mar o mareograma sintético en Acapulco. En este caso, en las subidas y bajadas del nivel del mar (Figura 3.28) se aprecia una primera subida del mar de 50 cm al mediodía, misma que en general casi nadie logra apreciar cuando el primer indicio de un tsunami es una subida del nivel del mar. Esto se debe a que estamos acostumbrados a ver las mareas altas o pleamares, mientras que nos asombramos al ver que se descubre el lecho marino durante las mareas bajas o bajamares. En este sentido, el mareograma de la Figura 3.28 concuerda con el relato del Castellano del puerto en cuanto a la regularidad de las oscilaciones *"observandose mas de cien varas de Playa en cada valanceo"*, y en cuanto a que como a las cuatro de la tarde subió más de doce pies (~4 m), *"...rebosando por encima del Muelle"*.

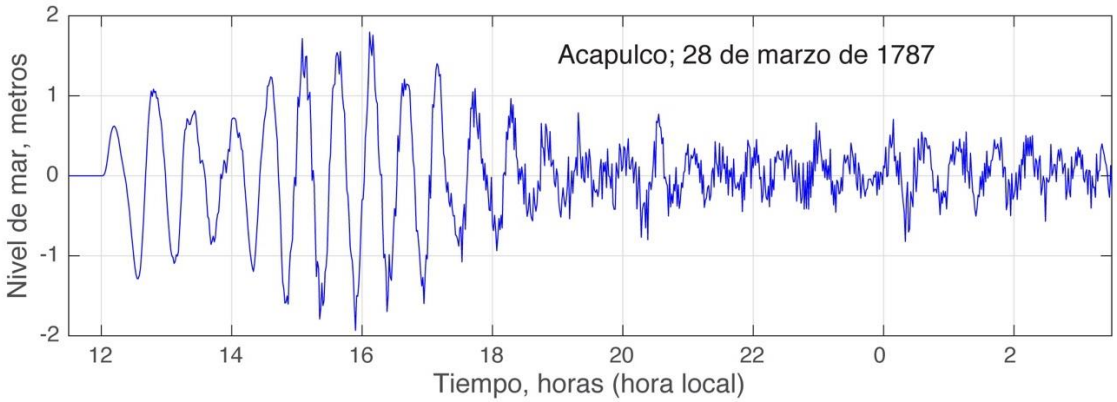


Figura 3.28. Mareograma sintético de Acapulco del 28 de marzo de 1787. El tiempo de origen del sismo se prescribió en este trabajo a las 11:30 horas, hora local del puerto de Acapulco.

Todos los tsunamis de los que se tiene registro en Acapulco presentan la misma regularidad en la frecuencia de las oscilaciones del nivel del mar, como las que se aprecian en los registros de los tsunamis de 1962 y de 1957 en Acapulco (Figura 3.29). En particular, en el mareograma de Acapulco del 28 de julio de 1957, se aprecia el tsunami producido por el sismo de San Marcos de magnitud 7.8 en la Costa Chica de Guerrero, cuya localización se indica en la Figura 3.1. Note que la amplitud de las oscilaciones va en aumento hasta cierta hora y luego tiende a decrecer. Estos dos factores: la regularidad en la frecuencia de las oscilaciones, y el tiempo en que se presenta la mayor amplitud, son muy susceptibles tanto a la magnitud del sismo como a la longitud de ruptura y a la distancia entre Acapulco y el área de ruptura (Ortiz *et al*., 2000b). En este caso, para lograr reproducir cualitativamente el relato de las oscilaciones del nivel del mar en Acapulco el 28 de marzo de 1787, se requiere de un sismo de magnitud, M~8.4, de dimensiones 230 km a lo largo de la costa x 80 km de ancho.

Note que los registros de los tsunamis del mes de mayo de 1962 que se ilustran en la Figura 3.29 fueron producidos por sismos de magnitud 7 localizados justo en la bahía de Acapulco (Ortiz *et al*., 2000b). Estos registros corroboran que aun cuando los sismos de magnitud 7 pueden producir tsunamis locales, las variaciones del nivel del mar son de muy poca amplitud, prácticamente imperceptibles a simple vista.

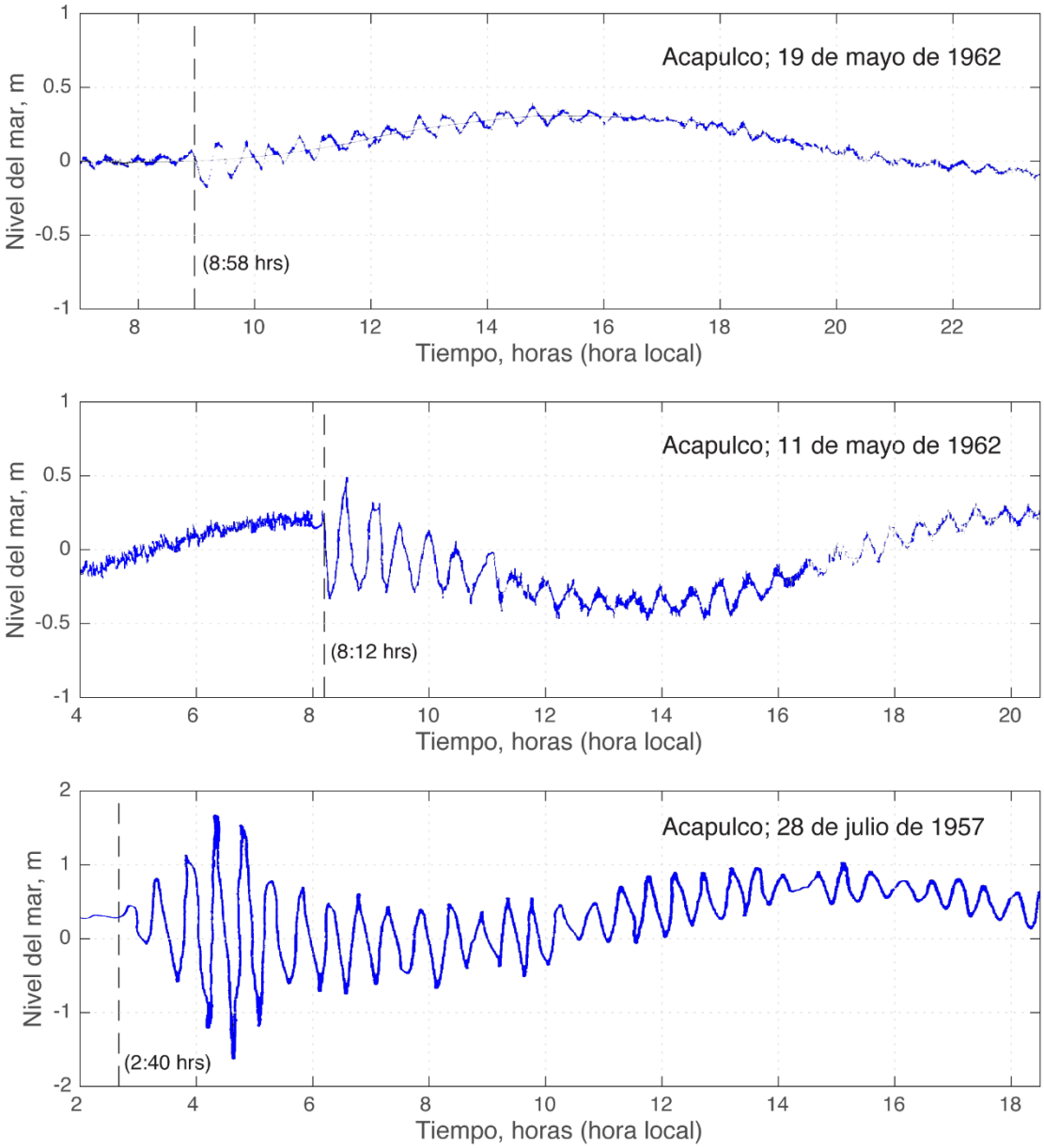


Figura 3.29. Mareogramas de Acapulco, Guerrero, en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por los tsunamis del 28 de julio de 1957 (M 7.8), 11 de mayo de 1962 (M 7.1) y 19 de mayo de 1962 (M 7.0). La línea vertical a trazos en cada panel indica el tiempo de origen de cada uno de los 3 sismos cuya localización se muestra en la Figura 3.1.

Tanto el sismo como el tsunami de Oaxaca de 1787 han sido estudiados por diferentes autores (e.g., Nuñez-Cornú *et al*., 2008; Suárez y Albini, 2009), sin embargo, en estos estudios se ha venido interpretando el relato del Castellano del puerto de Acapulco considerando que el mar subió más de doce pies por arriba de su nivel medio (Nuñez-Cornú *et al*., 2008), lo que ha llevado a localizar al origen del tsunami más cerca de Acapulco, mientras que en este trabajo consideramos que el mar solamente rebosó por encima del muelle y no alcanzó a inundar la plaza frente a la parroquia, misma que se encontraba a 1.8 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, ambos autores concuerdan que el tsunami fue generado por un sismo de magnitud 8.4 – 8.6 en las costas de Guerrero y Oaxaca, extendiéndose hasta el Golfo de Tehuantepec. La magnitud y localización del sismo del 28 de marzo de 1787 que se estima en este trabajo se logró gracias a información histórica que hoy día se encuentra disponible en el Internet, tanto en el Archivo General de Indias en España, como en la Mapoteca Manuel Orozco y Berra en México.

En los relatos de tsunamis en el puerto de Acapulco a partir del año 1732, no se encuentra uno que mencione que el mar se haya introducido a la parroquia que está frente a la plaza. Cuando mucho han llegado hasta la puerta de la parroquia, como se menciona en el relato del tsunami más destructivo ocurrido el 14 de abril de 1907 (Sánchez y Farreras, 1993). Este dato es muy importante porque nos permite estimar que la mayor altura que han alcanzado los tsunamis en Acapulco es aproximadamente la altura a la que se encontraba la plaza (2 metros sobre el nivel del mar).

En un sinnúmero de experimentos con el modelo de tsunamis encontramos que para que un tsunami alcance la altura de 4 metros sobre el nivel del mar en Acapulco, se requeriría de un sismo de magnitud 8 ocurriendo frente a la bahía de Acapulco. Este razonamiento nos permite suponer que al menos desde el año 1732 no ha ocurrido un sismo o terremoto de gran magnitud en la tan temida brecha sísmica de Guerrero, entre Zihuatanejo y Acapulco, en donde naturalmente se ha venido pronosticando que algún día podría ocurrir un fuerte temblor.

Oaxaca-Chiapas, 7 de septiembre del 2017

A las 23:49:10 horas del 7 de septiembre del 2017 (hora local), ocurrió un sismo de magnitud M_w 8.2 en el Golfo de Tehuantepec. El tsunami que se produjo a consecuencia del sismo se registró en los mareogramas de Salina Cruz y Puerto Chiapas. En Salina Cruz, la primera ola alcanzó los 30 cm de altura a los 40 minutos después del sismo, y 42 minutos después, la segunda ola, la más alta, alcanzó 1.2 m de altura. En Puerto Chiapas, la novena ola, la de mayor altura, alcanzó 1.67 metros después de haber transcurrido 5 horas del origen del sismo, mientras que las primeras olas no sobrepasaron el medio metro de altura. En la costa central del Golfo de Tehuantepec se estimaron alturas de tsunami de entre 1.0 m y 2.7 m en el estudio de campo a lo largo de 41 km de costa en la vecindad de Puerto Arista (Ramírez-Herrera *et al.*, 2018).

La costa del Golfo de Tehuantepec, desde Salina Cruz hasta Puerto Chiapas, está conformada por barras de arena de decenas de kilómetros de longitud y de aproximadamente dos kilómetros de ancho que se alzan a escasos 3 metros sobre el nivel del mar y en donde se asientan una treintena de poblaciones. A espaldas de las barras de arena se localizan un sinnúmero de canales y lagunas costeras que dificultan el acceso a tierra firme. En estas barras de arena es común que se requiera el apoyo de las Unidades de Protección Civil para ayudar a los campos pesqueros y a las poblaciones a evacuar la costa en las temporadas de mar de fondo porque la continua reventazón del oleaje que viene del sur logra inundar las calles y casas que están a la orilla del mar y en ocasiones logra penetrar hasta una o dos cuadras. Posiblemente a ello se debe que el gobernador de Oaxaca declaró que no hubo tsunami, que solamente hubo marejada, porque el tsunami no sobrepasó la altura del oleaje de mar de fondo.

La altura de este tsunami es menor a la que se espera sea producida por un sismo de magnitud M_w 8.2. Esto se debe a la atenuación de la deformación cosísmica del lecho marino debido a que el sismo ocurrió a gran profundidad (60-70 km). Además, como todas las olas, la amplitud o altura de los tsunamis se amplifica al llegar a la costa en un factor conocido comúnmente como Ley de Green, mismo que consiste en la raíz cuarta del cociente entre la profundidad del lecho marino en donde se produce el tsunami y la profundidad en donde se recibe. En este caso, la deformación cosísmica tuvo lugar en la extensa plataforma continental que caracteriza al Golfo de Tehuantepec (Figura 3.1), cuyas profundidades van de los 100 a los 300 metros, a diferencia de los sismos que ocurren en el talud o pendiente continental, en donde la deformación cosísmica del lecho marino se ha localizado en profundidades de 1000 a 2000 metros.

En caso de un sismo hipotético de magnitud 8 ocurriendo en el talud continental del Golfo de Tehuantepec, centrado en la frontera entre Oaxaca y Chiapas, se podrían esperar alturas de tsunami de entre 3 y 5 metros a lo largo de toda la costa entre Salina Cruz y Puerto Chiapas, pero, a diferencia de los tsunamis como el de Jalisco-Colima de 1995, este tsunami tardaría más tiempo en llegar a la costa, entre 30 y 45 minutos, debido naturalmente a que el talud continental está más alejado de la costa, y también debido a que la velocidad de propagación del tsunami se ve atenuada por la escasa profundidad de la plataforma continental, considerando que la velocidad de propagación del tsunami o velocidad de fase está prescrita por la raíz cuadrada del producto de la profundidad y de la aceleración de la gravedad.

Capítulo 4
Tsunamis en el Mar de Cortés

A diferencia de la costa occidental de México, el peligro por tsunamis al interior del Mar de Cortés o Golfo de California es mucho menor. Esta buena noticia obedece a que no hay un mecanismo de subducción de la corteza oceánica o lecho marino debajo de la corteza continental a ambos lados del Golfo. Si bien, en el lecho marino del Mar de Cortés hay movimientos tectónicos que han producido terremotos en el fondo del mar, estos movimientos son primordialmente horizontales y a la fecha no se tiene conocimiento de que hayan producido tsunamis que pudieran representar algún peligro de inundación. Un ejemplo muy ilustrativo acerca de que los terremotos ocasionados por movimientos tectónicos horizontales no producen tsunamis, es el terremoto de San Francisco, California, del 18 de abril de 1906 (M 7.9). Terremoto que fue originado por una falla geológica de movimiento horizontal que alcanzó a romper parcialmente el lecho marino frente a la Bahía de San Francisco. Sin embargo, este terremoto produjo tan solo anomalías de escasos centímetros de altura en el nivel del mar, mismas que pasaron desapercibidas para la población y únicamente quedaron registradas en el mareógrafo que ya se encontraba en operación en la Bahía de San Francisco (https://www.usgs.gov/centers/pcmsc/science/tsunami-record-great-1906-san-francisco-earthquake?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects).

Loreto, 27 de agosto de 1810

Existen relatos históricos del año 1810 de anomalías del nivel del mar observadas una hora después de un fuerte temblor que se sintió en la vecindad de Loreto, Baja California Sur (Goycoechea, 1810, en Suter, 2017). Se especula que las anomalías del nivel del mar, observadas una hora después del sismo en Loreto en 1810, fueron producidas por deslizamientos o avalanchas submarinas (Ramírez-Herrera *et al*., 2019). Sin embargo, lo más probable es que hayan sido producto de oscilaciones del nivel del mar (seiches) entre la costa de Loreto y la Isla del Carmen, como los seiches que se producen en los lagos por efecto de las ondas sísmicas superficiales (e.g., Rabinovich, 2008), que poco a poco fueron entrando en resonancia hasta alcanzar una altura perceptible una hora después de haber ocurrido el terremoto. Note que el mar entre Loreto y la Isla del Carmen es prácticamente un lago semicerrado de 15 km de ancho (E-W) por 30 km de largo (N-S), localizándose la bahía de Puerto Escondido en el extremo sur del "lago". Si bien un deslizamiento submarino puede producir una inundación repentina y puntualmente localizada, los seiches son oscilaciones periódicas que pueden durar varias horas y, a pesar de ser de baja amplitud, pueden producir corrientes fuertes y remolinos en la entrada de puertos y bahías estrechas (e.g., Ortiz-Huerta, 2019). Posiblemente a ello se deba el relato de Goycoechea, de que el bergantín fondeado en Puerto Escondido, a pesar de estar firmemente anclado, dio más de cuarenta giros en un lapso de 8 horas debido a los fuertes remolinos. Otra posibilidad es que las ondas sísmicas superficiales hubiesen excitado no solamente los seiches entre la costa de Loreto y la Isla del Carmen, sino los seiches

transversales del Mar de Cortés (Sandoval y Farreras, 1993).

Existen algunos relatos inciertos de un tsunami en la parte norte del Mar de Cortés, al sur de la desembocadura del Río Colorado (Sánchez y Farreras, 1993), sin embargo, los únicos tsunamis que se han registrado en el Mar de Cortés han sido de origen lejano y no han representado ningún peligro de inundación. Estos tsunamis han sido originados por sismos en las márgenes del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico, en particular, en Chile, Alaska, las islas Aleutianas y Japón.

Capítulo 5
Tsunamis de origen lejano

Dirección de propagación, el círculo de los navegantes

Los registros históricos de los grandes tsunamis del Pacifico, y el estudio de estos tsunamis mediante modelos matemáticos, han confirmado que en general la mayor altura del tsunami a grandes distancias de su región de origen ocurre a lo largo de la circunferencia del "Gran Círculo" o círculo de los navegantes, que es perpendicular a la costa donde se produce el tsunami y que a su vez es la distancia más corta entre dos puntos sobre una esfera. Por ejemplo, el tsunami de Chile del 22 de mayo de 1960 causó daños severos en Japón debido a que las mayores alturas del tsunami se propagaron a lo largo del Gran Círculo que se ilustra en la Figura 5.1, que es perpendicular a la costa de Chile y que une a Chile con Japón. En correspondencia, las mayores alturas a grandes distancias del origen del tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011 se registraron en Chile. Las cordilleras submarinas, entre otras características prominentes del relieve del fondo marino, actúan a manera de guías de onda, haciendo que la altura del tsunami se amplifique también en otras direcciones diferentes a las del Gran Círculo.

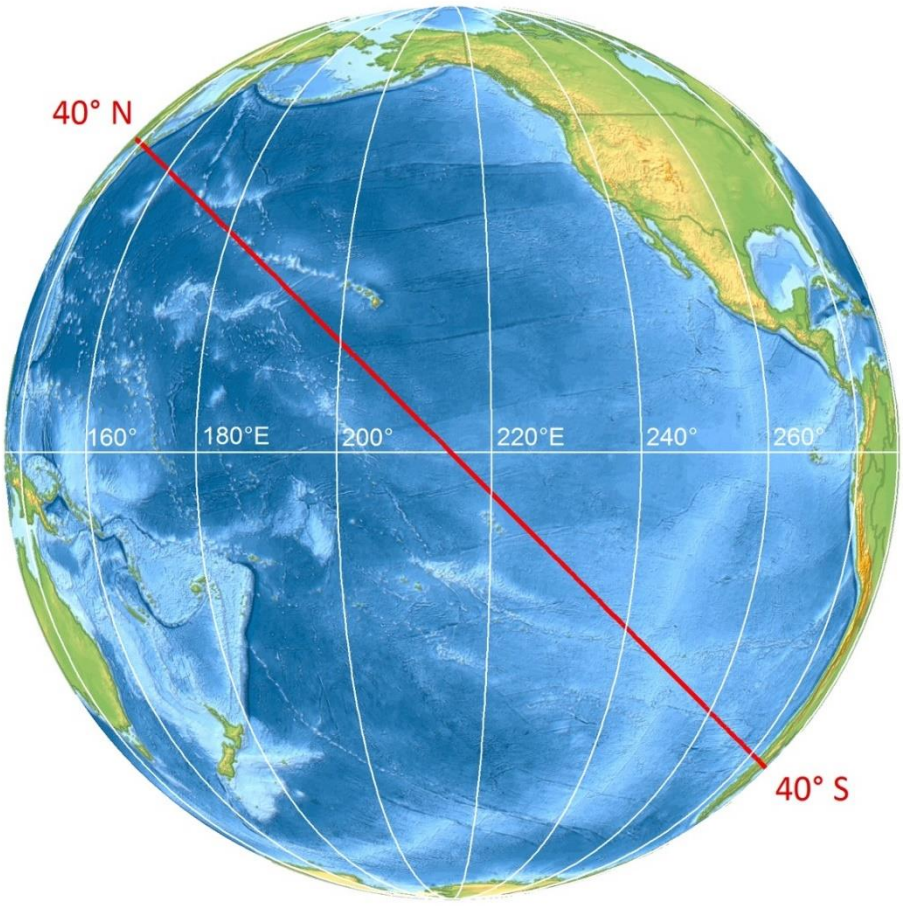


Figura 5.1. Gran Círculo que pasa por el centro de la Tierra y que une al sur de Chile con el norte de Japón.

Con la finalidad de ilustrar la dirección preferencial de propagación de los tsunamis, analicemos la trayectoria de un tsunami hipotético o sintético producido en la computadora y originado en la costa central de Chile. En este primer experimento se prescribe un océano de profundidad constante para poder observar el efecto puro de la esfericidad del planeta en la propagación del tsunami. En los resultados (Figura 5.2a y 5.2b) se observan las mayores alturas del tsunami a lo largo del Gran Círculo que es perpendicular a la costa de Chile y que une a Chile con Japón. Se observa también una disminución de la altura del tsunami conforme éste se propaga a lo largo del Gran Círculo hasta la mitad de la trayectoria, a una distancia Δ=90° desde su origen, y se observa cómo la altura vuelve a aumentar conforme el tsunami se acerca a la distancia Δ=180° o antípoda del origen. La disminución en la altura del tsunami conforme éste se propaga desde su origen hasta una distancia Δ=90°, se debe a que el frente de onda del tsunami abarca o encierra áreas mayores conforme éste se acerca a la mitad de la trayectoria. Lo contrario ocurre cuando el frente de onda se ha propagado más allá de los 90°; el frente de onda encierra áreas menores conforme éste se acerca a la antípoda y consecuentemente el tsunami tiende a recuperar su altura original.

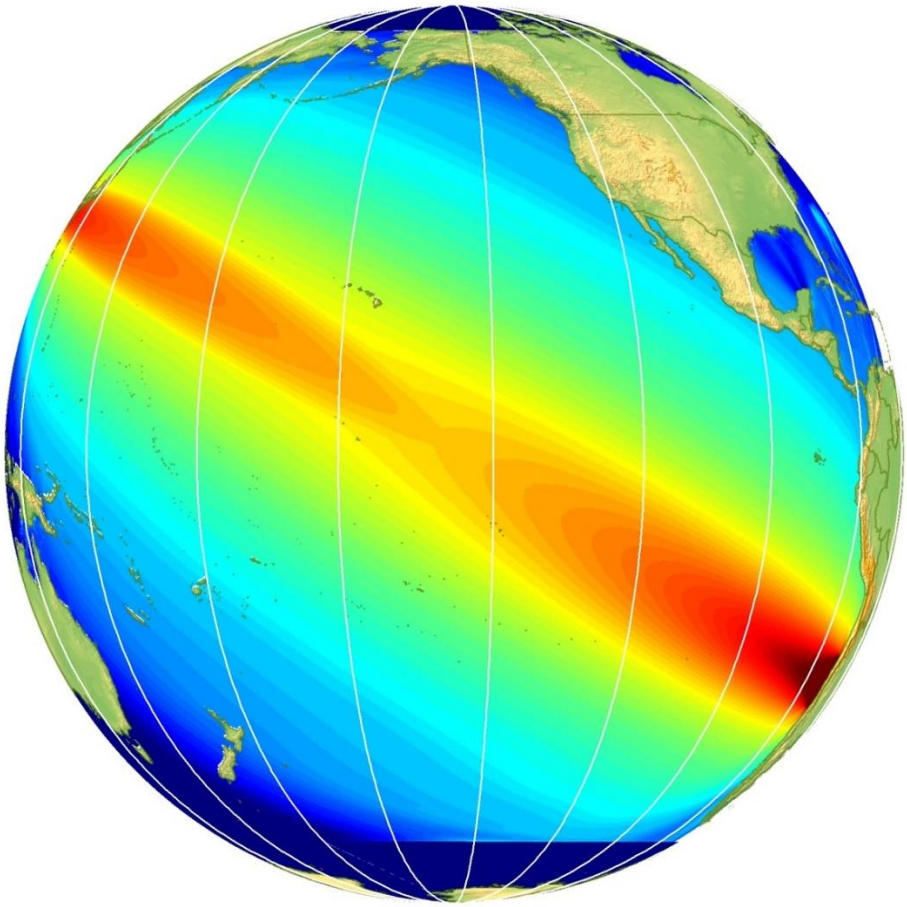


Figura 5.2a. Efecto de la esfericidad del planeta en la dirección de propagación de los tsunamis. Hacia el color rojo se indican las mayores alturas del frente de onda durante su propagación a lo largo y ancho del océano pacífico.

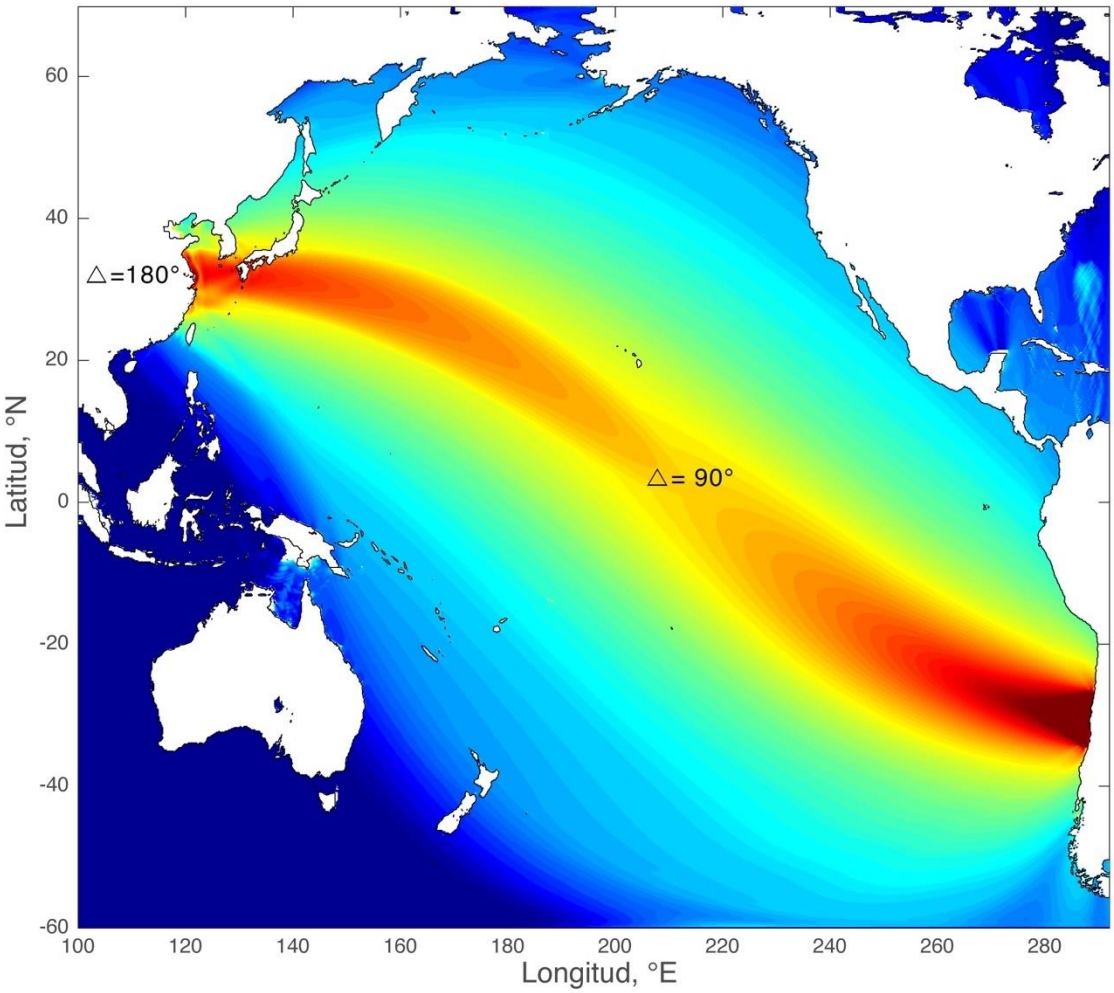


Figura 5.2b. Mismo tsunami que el de la Figura 5.2a en una proyección cilíndrica, para hacer notar cómo se aprecia curvada la trayectoria del tsunami a lo largo del Gran Círculo en una representación plana de la esfera.

Efecto conjunto del relieve del fondo marino y de la esfericidad del planeta en la propagación de los tsunamis

En un segundo experimento se prescribe el relieve del fondo marino para poder observar su efecto en la propagación del mismo tsunami sintético originado en la parte central de Chile e ilustrado en la Figura 5.2b. En los resultados (Figura 5.3) se observa cómo las mayores alturas del tsunami tienden a seguir la trayectoria del Gran Círculo. Sin embargo, a diferencia de la Figura 5.2b, se observa cómo el relieve del fondo marino hace que las alturas del tsunami se amplifiquen también en otras direcciones.

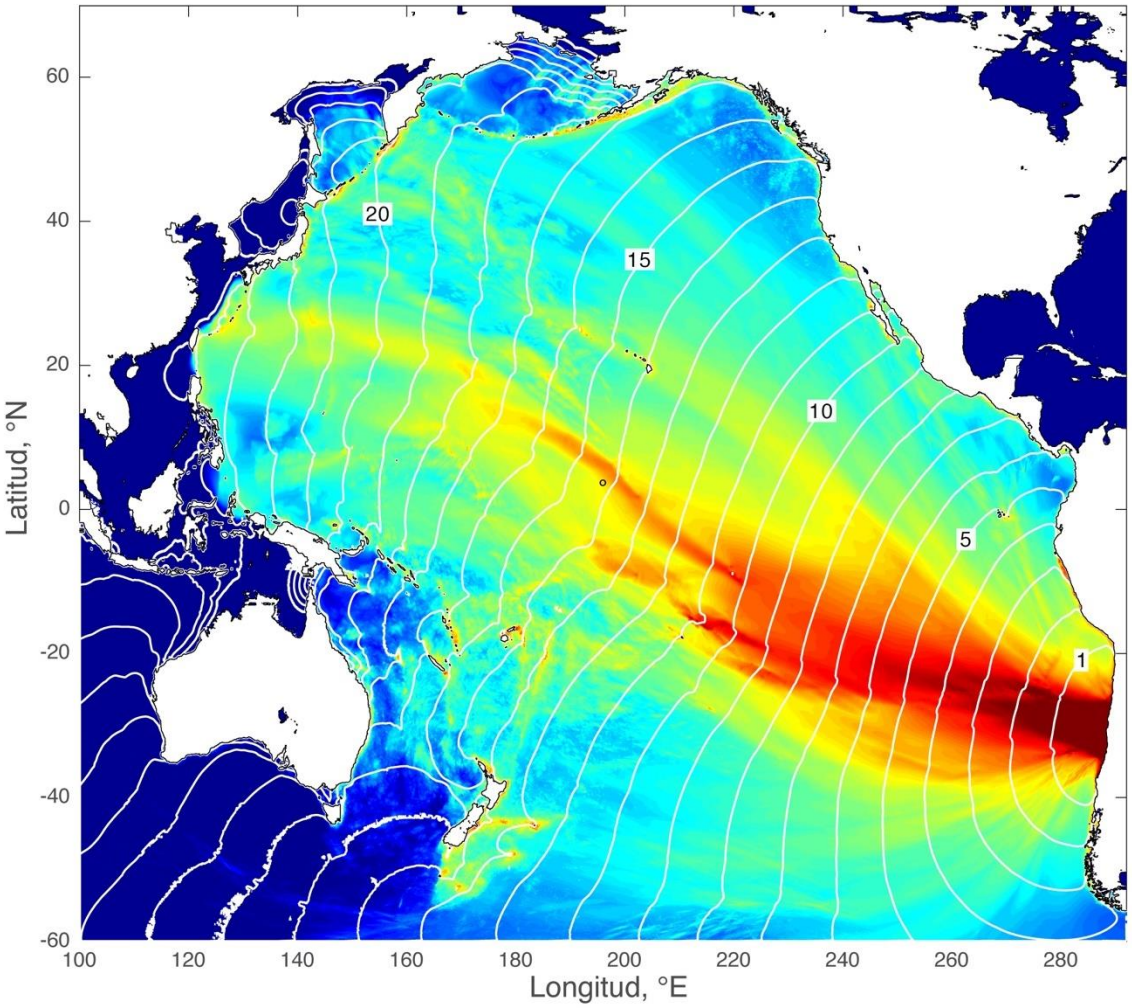


Figura 5.3. Tsunami sintético originado en Chile para ilustrar el efecto conjunto del relieve del fondo marino y de la esfericidad del planeta en la propagación de tsunamis. Hacia el color rojo se indican las mayores alturas del frente de onda del tsunami. La propagación del frente de onda se ilustra con líneas de fase a intervalos de una hora.

Experiencias de tsunamis de origen lejano

Los registros históricos de estos tsunamis revelan nítidamente la altura del tsunami y el tiempo de arribo o el tiempo que le toma a un tsunami propagarse desde su región de origen hasta nuestras costas. Esta información, compaginada con la magnitud del terremoto generador y con el efecto conjunto del relieve del fondo marino y de la esfericidad del planeta en la propagación de los tsunamis, permite acuñar un criterio certero para estimar el peligro por tsunamis de origen lejano. En particular, los registros que se muestran a continuación son muy importantes porque permiten palpar los efectos reales de los tsunamis transoceánicos que han ocurrido en el Océano Pacífico y que se han logrado registrar en México en las localidades que se indican en la Figura 5.4.

Figura 5.4. Localización de las estaciones mareográficas en la costa occidental de México y en el Mar de Cortés.

Chile, 22 de mayo de 1960

Por la tarde del 22 de mayo de 1960, a las 15:11:17 hora local de Chile; 19:11:17 horas GMT, ocurrió el gran terremoto del sur de Chile (M 9.5) ¡El terremoto de mayor magnitud registrado hasta la fecha! ¡De mayor magnitud que el de Sumatra del 2004 y que el de Japón del 2011! Sus efectos fueron devastadores tanto por el terremoto como por el tsunami. El área de ruptura o área del terremoto alcanzó los 800 km a lo largo de la costa del sur de Chile, extendiéndose 200 km por debajo de la corteza continental (Kanamori y Cipar, 1974; Aste Evans, 2003).

De acuerdo con los conocimientos básicos acerca de la propagación de tsunamis de origen lejano, en particular para los que se producen en la costa de Chile, además de producir gran devastación en el sur de Chile, causó daños cuantiosos en Japón, con alturas de ola de 9 metros y, a su paso, causó daños en las islas de Hawaii, con alturas de ola de 7 metros (Barros González, 1961). En aquel entonces, el servicio mareográfico de México tenía mareógrafos en funcionamiento en Salina Cruz, Acapulco, Topolobampo, Guaymas, La Paz y Ensenada, en donde se lograron registrar las variaciones del nivel del mar propias de este tsunami, mismas que se muestran en la Figura 5.5, en donde se aprecia cómo el tsunami llegó al sur de México (Salina Cruz y Acapulco) después de 9 horas de haber ocurrido el terremoto, sin sobrepasar el metro de altura sobre el nivel de la marea; al interior del Mar de Cortés (Topolobampo y Guaymas) llegó 13 horas después del terremoto con alturas de menos de 20 centímetros, por lo que prácticamente pasó desapercibido, mientras que en la Paz se aprecian variaciones del nivel del mar con alturas que no sobrepasan el metro sobre el nivel de la marea. A Ensenada, la región más norteña, llegó 13 horas después del terremoto con alturas que alcanzaron el metro sobre el nivel de la marea.

La lección que dejan estos registros es invaluable. Ahora podemos estar seguros de que en caso de un terremoto en Chile de magnitud menor a 9.5, no tenemos que *hacer por tierras altas*, podemos emitir con certeza un *Boletín de Alerta de Tsunami* indicando que con base en datos históricos de tsunamis originados en Chile, el tsunami en México quedará contenido en las playas y no habrá peligro de inundación, recomendando mantener a la población alejada de las playas hasta la cancelación de la alerta y avisando que se esperan corrientes fuertes en las playas y en la entrada de los puertos; que se espera un tiempo de arribo de 9 horas al sur de México y de 13 horas a Ensenada, tiempo suficiente para tomar las medidas de prevención propias de toda operación portuaria.

.

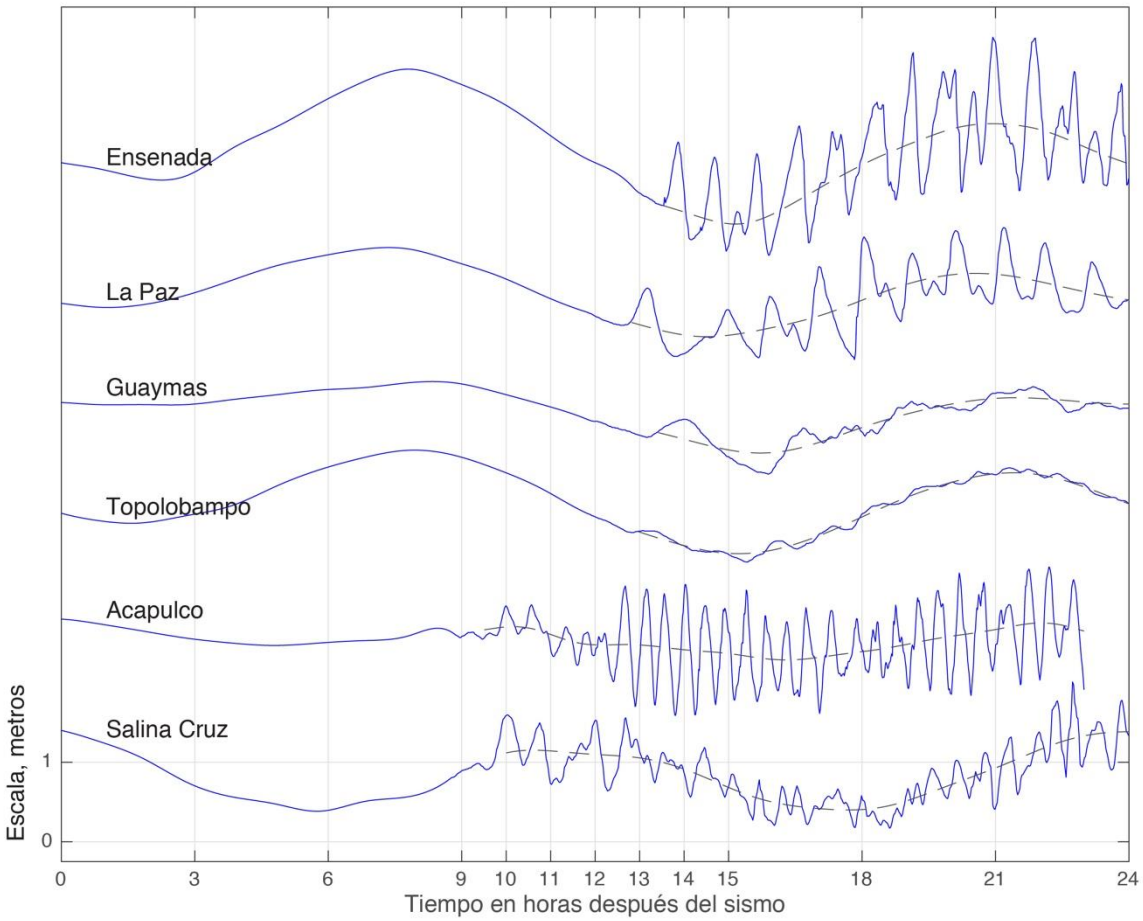


Figura 5.5. Mareogramas en donde se registró el tsunami de Chile del 22 de mayo de 1960. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

Chile, 27 de febrero del 2010 y 16 de septiembre del 2015

En la madrugada del 27 de febrero del 2010, a las 03:34:08 hora local de Chile; 6:34:08 horas GMT, ocurrió un terremoto de magnitud 8.8 en Chile, entre Talcahuano y Valparaíso. Con base en la experiencia del terremoto y tsunami de Chile de 1960, estimamos que en México no había peligro de inundación por este tsunami. Con estos criterios el CICESE emitió un comunicado a la Coordinación Nacional de Protección Civil, indicando los tiempos estimados de arribo del tsunami a las costas de México e indicando que el tsunami produciría variaciones del nivel del mar que no sobrepasarían el metro de altura.

El arribo de este tsunami a nuestras costas se pudo observar en tiempo real en los mareogramas de Acapulco, Manzanillo, Cabo San Lucas y Ensenada (Figura 5.6), confirmando la veracidad del pronóstico y, como era de esperar, pasó desapercibido en el Mar de Cortés. El tsunami llegó a Acapulco y Manzanillo con marea alta, y a Cabo San Lucas y Ensenada con la marea media hacia la bajamar. Aun cuando el tsunami quedó completamente contenido en la playa sin sobrepasar el medio metro de altura, se reportaron corrientes fuertes en las playas y en la entrada de los puertos debido a las variaciones del nivel del mar propias del tsunami durante un lapso de más de 24 horas después su arribo. En estos mareogramas se observa cómo el tsunami llega a Acapulco en un lapso de 9 horas induciendo variaciones del nivel del mar que fueron aumentando de altura hasta alcanzar los 70 cm sobre el nivel de la marea; a Manzanillo llega después de 9:30 horas alcanzando 70 cm de altura sobre el nivel de la marea durante al menos las siguientes 14 horas.

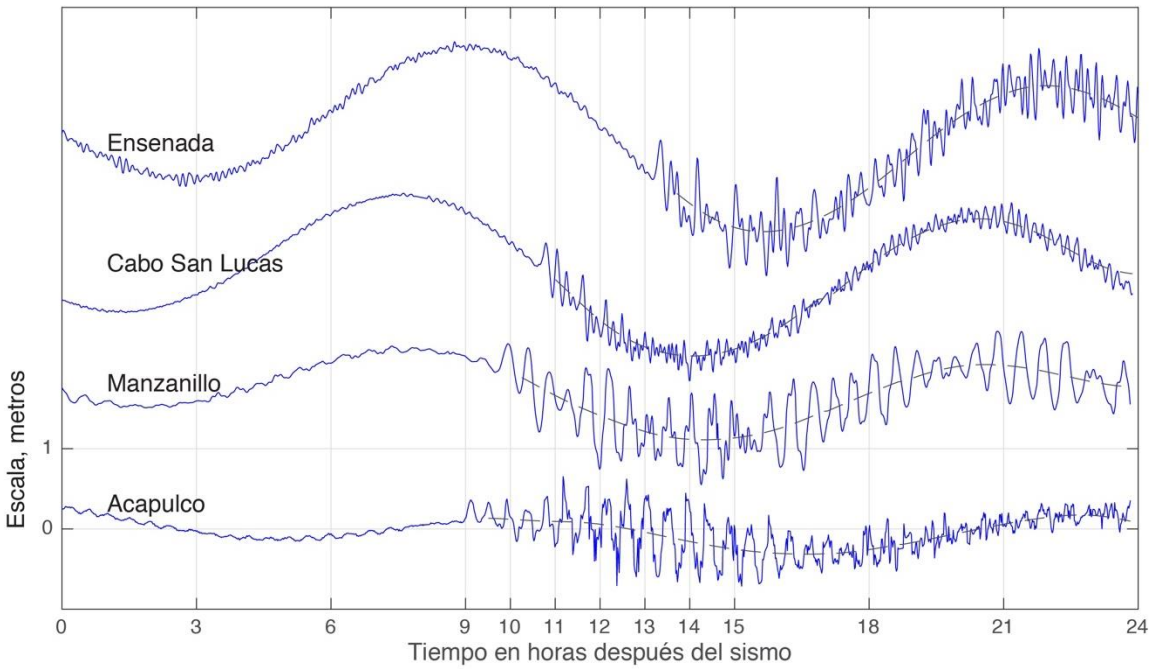


Figura 5.6. Mareogramas en donde se registró el tsunami de Chile del 27 de febrero del 2010. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

Estas variaciones generaron corrientes muy fuertes en el puerto de Manzanillo y consecuentemente interrumpieron las operaciones portuarias durante varias horas causando pérdidas económicas por el cese de actividades. El tsunami llegó a Cabo San Lucas después de 10:30 horas con alturas menores a medio metro, y al puerto de Ensenada llegó en 13 horas con alturas de 70 cm. En el puerto de Ensenada se interrumpieron las operaciones debido a las fuertes corrientes en la entrada del puerto.

Ahora les relatamos la parte triste de esta experiencia: cuando en la madrugada del 27 de febrero quisimos comunicar que no había peligro para México por el tsunami de Chile, nos percatamos una vez más de que no contábamos en aquel tiempo con un Sistema de Alerta de Tsunamis que se encargara de recibir los boletines de los centros internacionales de alerta; de estimar el peligro para nuestras costas y de mantener una comunicación expedita con los medios de comunicación para evitar el pánico debido a que las televisoras internacionales ya habían difundido la noticia del desastre en Chile por un gran tsunami. En este caso particular, la Coordinación Nacional de Protección Civil atendió a nuestro comunicado enviando la información a las Unidades Estatales de Protección Civil. Sin embargo, el ingrediente que faltó fue un protocolo de comunicación expedita con los medios de comunicación para evitar el desconcierto de la población al escuchar las noticias de otros países diciendo que había peligro de tsunami para México, mientras que en México los medios de comunicación se limitaron a transmitir la rutina de siempre.

Cinco años después, por la tarde-noche del 16 de septiembre del 2015, ocurrió en Chile el terremoto de magnitud 8.3 entre Valparaíso y Coquimbo, justo al norte de donde había ocurrido el terremoto del 27 de febrero del 2010. Este último terremoto viene a reconfirmar que los tsunamis producidos por terremotos en el litoral chileno no representan peligro de inundación para México. En este caso, por la magnitud del terremoto pudimos estimar alturas de tsunami en México mucho menores que las registradas en febrero del 2010, y por la localización del terremoto esperamos tiempos de arribo muy similares a los del 2010 (Figura 5.7).

Los registros de este tsunami en Manzanillo, Isla de Cedros, Guerrero Negro y Ensenada confirman una vez más la veracidad del pronóstico y, a la vez, nos dan confianza en los conocimientos básicos en cuanto a generación y propagación de tsunamis de origen lejano.

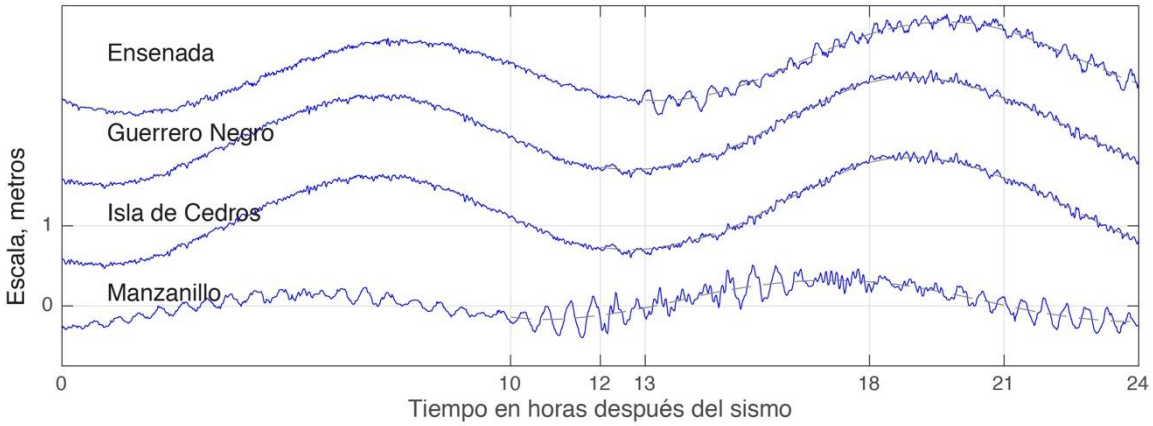


Figura 5.7. Mareogramas en donde se registró el tsunami de Chile del 16 de septiembre del 2015. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

A diferencia de la experiencia del 2010, en esta ocasión ya contábamos en México con un Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis y con su Centro de Operaciones atendiendo los mensajes del Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico y emitiendo a su vez sus propios boletines a todas las Unidades de Protección Civil. Lo que faltó fue el protocolo con los medios de comunicación para evitar el desconcierto de la población al escuchar las noticias de otros países advirtiendo del peligro por tsunami para México.

Alaska, 27 de marzo de 1964

Por la tarde del 27 de marzo de 1964, a las 17:36:00 hora local de Alaska; 03:36:00 horas GMT, ocurrió en Alaska un terremoto de magnitud 9.2 (Plafker, 1965; Spaeth y Berkman, 1965). El tsunami llegó a Ensenada, B.C., con altura de 1.5 metros durante la bajamar después de haber transcurrido 6 horas a partir de su origen y el mar continuó muy agitado subiendo y bajando durante las siguientes 24 horas. En la ciudad de Ensenada se interrumpieron todas las actividades ante la noticia de que un tsunami o maremoto había devastado Alaska, motivo por el que la mayoría de los habitantes acudieron a los cerros en donde pasaron toda la noche. El relato completo de los efectos de este tsunami en Ensenada se lo debemos al Capitán de Puerto de aquel entonces, Capitán Joaquín Prieto Guzmán, relato inédito que transcribimos a continuación:

"...en efecto, hasta el puerto de Ensenada, llegó levemente la influencia de un maremoto que se originó en Alaska el Viernes Santo del año 1964. Como digo anteriormente, por ser testigo presencial de la influencia de este fenómeno, me permito relatarlo tal y como ocurrió, según los hechos siguientes:

1. Como consecuencia del citado maremoto, las Autoridades de E.U.A. y Canadá, difundieron ampliamente la voz de alarma sobre posibles riesgos de marejadas provenientes de dicho fenómeno, las cuales podrían afectar en su caso las costas del Pacífico en el Continente Americano durante la noche de la fecha citada.

2. Durante esa noche, el Sr. Arthur Yeend, Director del Astillero San Diego Marine Construction, me comunicó por teléfono para prevenirme del fenómeno, ya que él sabía que en Astilleros Rodríguez de este puerto, teníamos en operación el Dique Flotante YF-48, atracado en la esquina norte del muelle actualmente denominado "entre muros", y que por su naturaleza, podría ser sumamente peligroso para esta unidad, y en este caso, para el BM "Korrigan IV" que se encontraba en reparaciones sobre el citado Dique.

3. Ante tal aviso y siendo a mi vez Director del Astillero, me levanté y procedí a reunir al personal de Operadores del Dique, encabezados por el Sr. Arnulfo Félix quien era el Jefe de dicha unidad.

4. Ya reunidos todos en el muelle y listos para enfrentar posibles emergencias, nos dimos cuenta y así lo anoté en la Bitácora, que el mar estaba en completa calma, no había viento y en general todo era normal; sin embargo, apreciamos que el Dique estaba ascendiendo en forma visible y rápidamente, por lo que de inmediato procedimos a aflojar sus amarras, tarea que por naturaleza era lenta y pesada; con esto consideramos estar en posibilidad de controlar cualquier eventualidad y disminuir posibles riesgos.

5. El nivel del agua dentro de la Bahía, subió hasta una altura que nunca habíamos visto, la cual, seguramente quedó registrada en el Mareógrafo que aún está situado a unos 10 metros del lugar que ocupaba el Dique; esto es, el agua subió sin ningún oleaje, a aproximadamente 2 metros por arriba del nivel cero de la marea normal y casi rebasó el nivel de la plataforma del muelle, la que está a 2.40 metros sobre el nivel de la marea cero; al llegar a su máximo el fenómeno y en forma un tanto rápida, el nivel descendió hasta aproximadamente 1.50 metros por abajo del multicitado nivel cero; es decir, durante este primer período del fenómeno, hubo una amplitud máxima de 3.50 metros entre ambos niveles; este ocurrir, se repitió tres veces durante la madrugada, cada una, con menor grado de amplitud, la última apenas perceptible.

Al percatarnos que el fenómeno había pasado y ya al amanecer, aseguramos el Dique y procedimos a recuperar el esfuerzo y la desvelada con un sabroso

"Menudo" en compañía de mis Colaboradores. Entonces fue cuando nos dimos cuenta que gran cantidad de gente, que advertida por las autoridades locales sobre la amenaza de un desastre, hicieron por tierras altas... materialmente invadiendo el cerro de Chapultepec; era en efecto un espectáculo ver a esa gran cantidad de gente refugiada, con sus perros, gatos, pericos, cobijas, colchones, provisiones, etc.... y caras de satisfacción al no haber ocurrido absolutamente nada.

Por mi parte, y como expresé anteriormente, mi esposa Elsa me regañó con gran sentimiento por haberla dejado sola con sus dos hijas y a merced de los elementos. Para entonces vivíamos en la Colonia Moderna, nuestra calle está a 39 metros sobre el nivel medio del mar, la existencia de riesgos era nula, sin embargo, su mamá (mi suegra) la Sra. María Rudametkin, mi cuñado Armando y su esposa Arcelia, muy alarmados fueron a "refugiarse a mi casa". Mi Comadre, Laura Arjona de Robles insistió con múltiples llamadas por teléfono, quejándose decía...comadre este hombre no quiere levantarse (refiriéndose a mi compadre) ... muchas otras personas llamaron a casa sabiendo mi re1ación con el puerto, esto ayudó para alterar la tranquilidad de mi esposa y para aumentar la intensidad de sus reclamaciones.

No omito reiterar, que como consecuencia del maremoto de Kodiak que nos ocupó:

Los efectos llegaron a Ensenada durante la noche...

Nadie corrió en el puerto....

No hubo marejadas....

No hubo daños.

No se oyeron rechinar las tracas (tablas de un buque)

Simplemente, subió y bajó el nivel del agua del mar sin agitaciones de ninguna especie....

Únicamente hubo movimiento de gente de la ciudad para refugiarse en tierras altas....

y a la fecha, a mí y a mi compadre nos siguen regañando..."

Comunicación personal del Capitán Joaquín Prieto Guzmán al Oc. Juan Ignacio González Navarro. Octubre de 1995.

Los registros del tsunami de Alaska de 1964 (Figura 5.8) en los puertos del Pacifico de México y del Mar de Cortés permiten estimar el peligro de inundación por tsunamis grandes que se originen en Alaska. Las variaciones del nivel del mar producidas por este tsunami no sobrepasaron el medio metro de altura sobre el nivel de la marea en Manzanillo, Acapulco y Salina Cruz. Los tiempos de arribo a partir de que ocurrió el terremoto son de 6:00, 8:30, 9:30 y 10:30 horas a Ensenada, Manzanillo, Acapulco y Salina Cruz, respectivamente. El tsunami es prácticamente imperceptible en los mareogramas del Mar de Cortés, sin embargo, es importante mostrarlos porque permite constatar que futuros tsunamis originados en aquellas regiones del Pacífico norte no son de peligro para las poblaciones en el Mar de Cortés.

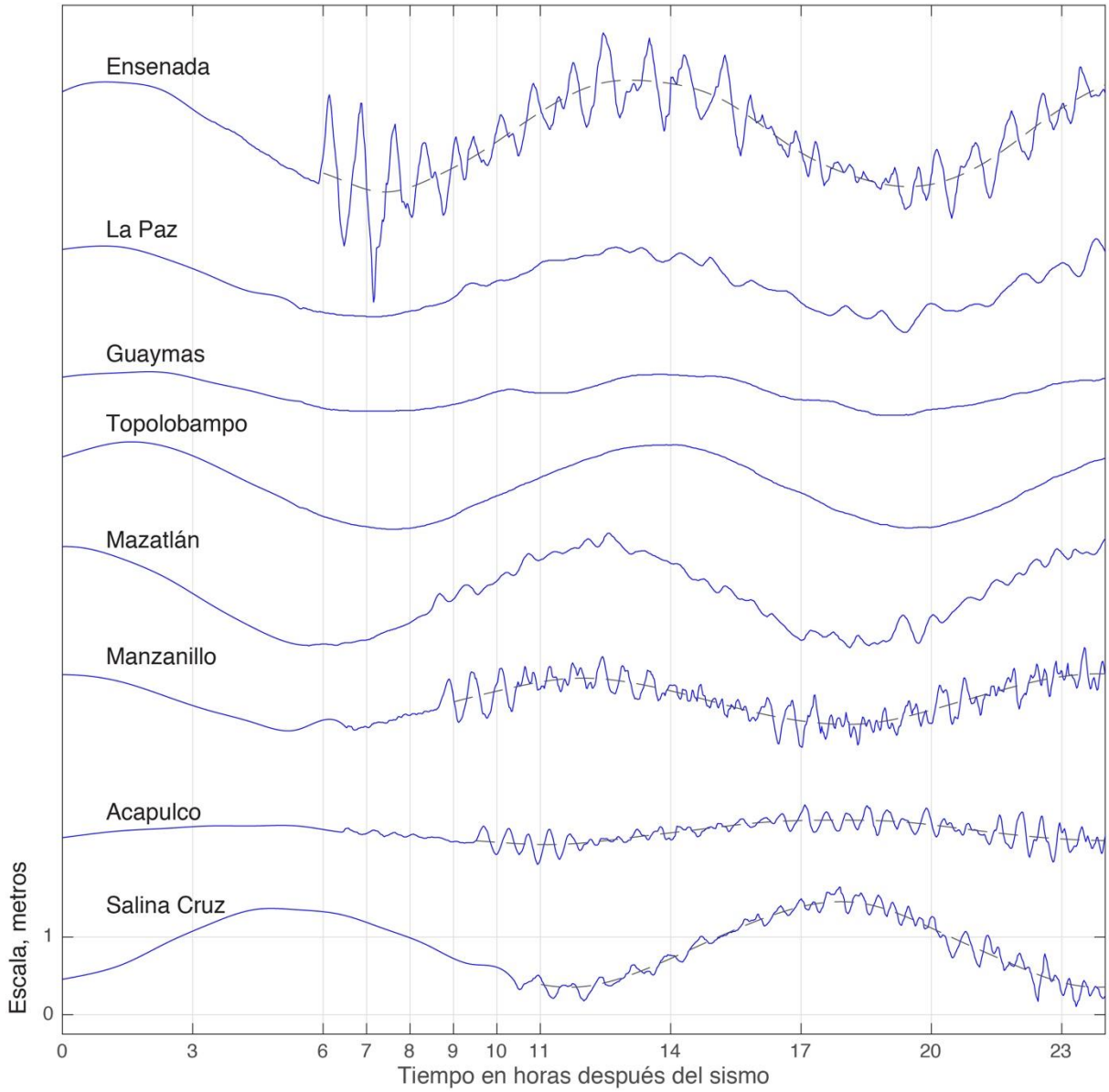


Figura 5.8. Mareogramas de la costa occidental de México y del Mar de Cortés en los puertos en donde se registró el tsunami de Alaska del 27 de marzo de 1964. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

Los resultados del modelo de propagación del Tsunami de Alaska de 1964 (Figura 5.9) revelan la dirección de propagación de este tsunami. Las mayores alturas del tsunami a grandes distancias de su origen debieron registrarse en el sur de Chile y, otra vez, a su paso, en Hawaii. Coloquialmente, se puede decir que a México le llegó de lado, es decir, por difracción y no por embate directo.

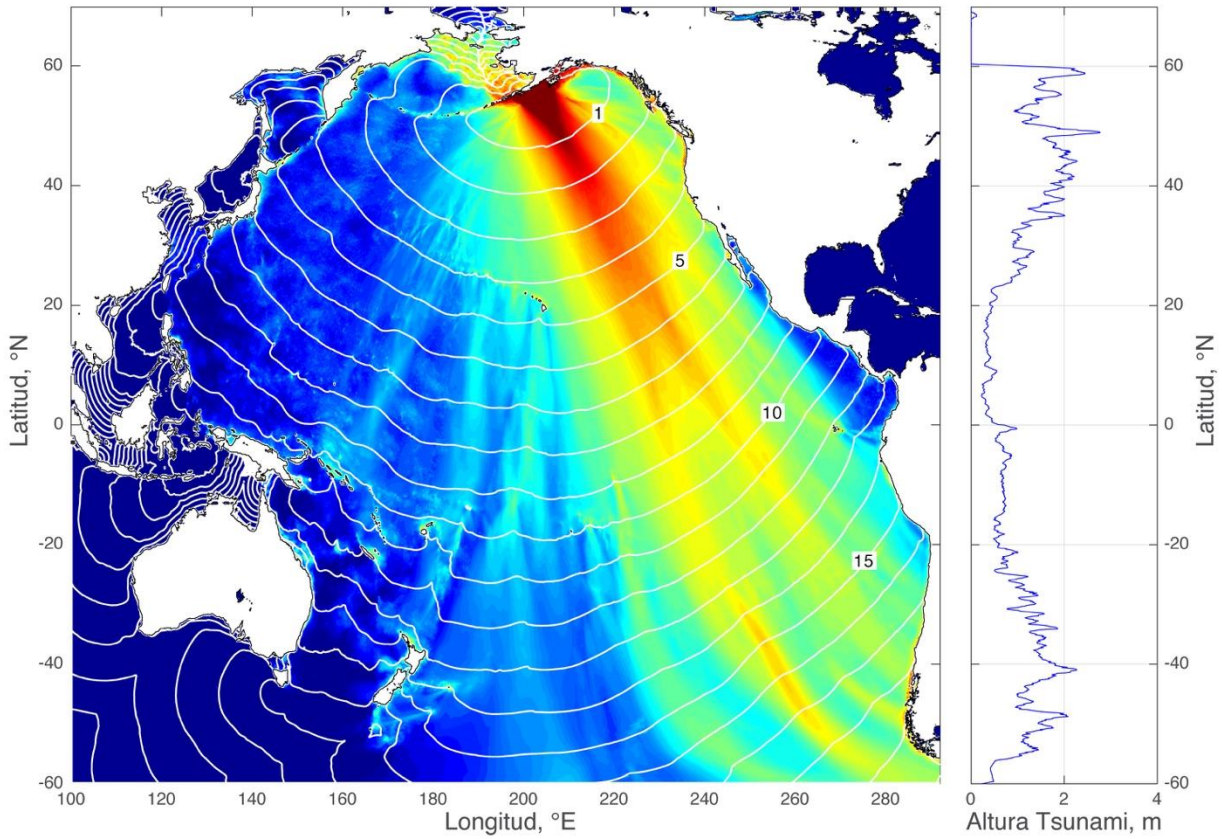


Figura 5.9. Resultados del modelo de propagación del tsunami de Alaska del 27 de marzo de 1964.

Japón, 11 de marzo del 2011

Por la tarde del 11 de marzo del 2011, a las 14:46:23 horas, hora local de Japón; 05:46:23 horas GMT, ocurrió el terremoto de Japón de magnitud 9.0 – 9.1, que produjo un tsunami devastador para la costa noreste de Japón. Pocos minutos después se recibió en el CICESE el boletín que emite el PTWC. El primer informe indicaba una magnitud preliminar de 7.6, sin embargo, a los pocos minutos la magnitud escaló a 8.8. Con fines prácticos, en el CICESE consideramos un terremoto de magnitud 9.0 (Ortiz-Huerta *et al.,* 2018) como umbral de máxima peligrosidad desde el punto de vista del pronóstico de los efectos del tsunami para la costa occidental de México. El pronóstico del CICESE puntualizaba tanto el tiempo de arribo como la altura esperada del tsunami a nuestras costas. En general, se estimaba que el tsunami estaría contenido entre los niveles de pleamar y bajamar, pudiendo sobrepasar en caso extremo hasta con un metro el nivel de la pleamar en algunas localidades. El CICESE procedió a enviar el pronóstico del tsunami a la Coordinación Nacional de Protección Civil, misma que de inmediato lo transmitió a las Unidades Estatales de Protección Civil. Las autoridades montaron un operativo de seguridad en los puertos y en las playas y no se reportaron daños por inundaciones, sin embargo, se observaron corrientes fuertes en las playas y remolinos muy grandes en la entrada de los puertos. Los remolinos se apreciaron a simple vista debido a la coloración turbia del agua y se continuaron observando durante toda la tarde hasta que la puesta del sol impidió la visibilidad.

Los registros de este tsunami en la costa occidental de México y en el Mar de Cortés se muestran en las Figura 5.10 y Figura 5.11, en donde se aprecia cómo el tsunami quedó contenido entre los niveles de pleamar y bajamar, con excepción de Zihuatanejo y Manzanillo donde el tsunami llegó en un lapso de 14 horas y sobrepasó con un metro el nivel de la marea alta. Note cómo el tsunami es imperceptible en Puerto San Carlos, B.C.S. Este hecho obedece a que Puerto San Carlos está ubicado al interior de Bahía Magdalena que naturalmente impide o retarda los flujos de agua debido a que es un cuerpo de agua muy grande con una boca o entrada relativamente estrecha ¡Un refugio natural en caso de tsunami! Note también cómo el tsunami es prácticamente imperceptible al interior del Mar de Cortés (en la Paz y en Topolobampo).

El tsunami llegó a Ensenada en un lapso de 11 horas 20 minutos con alturas de 70 cm sobre el nivel de la marea. Las oscilaciones del nivel del mar propias del tsunami continuaron a intervalos cortos de tiempo, de aproximadamente 60 minutos, repitiéndose por más de 12 horas a partir del arribo del tsunami.

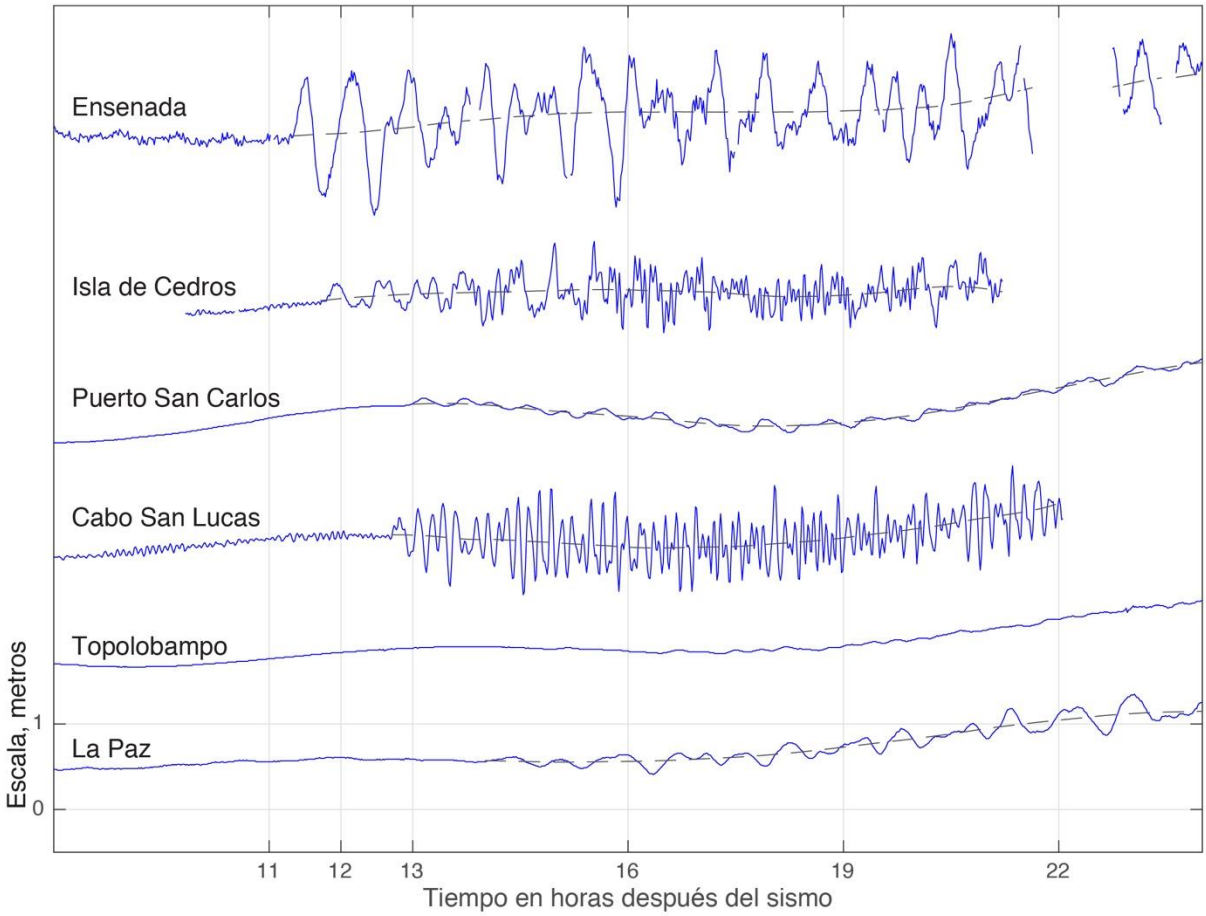


Figura 5.10. Mareogramas de los puertos de la costa occidental de la península de Baja California y del Mar de Cortés en donde se registró el tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

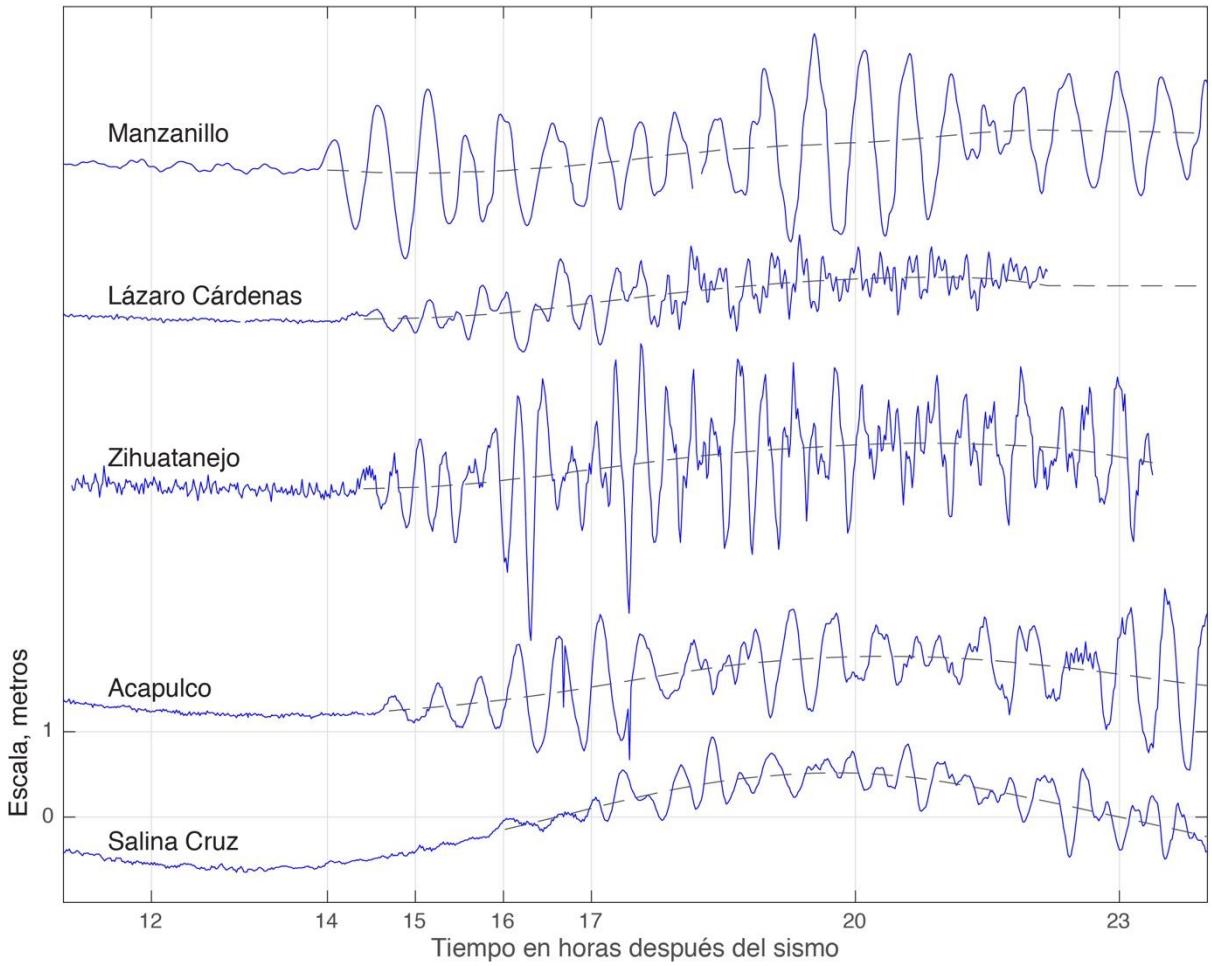


Figura 5.11. Mareogramas de los puertos de la costa occidental de México en donde se registró el tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

La dirección de propagación de este tsunami se ilustra en la Figura 5.12, en donde se aprecia una vez más cómo la mayor altura del tsunami se dirige a Chile y, otra vez, a su paso, a Hawaii.

Tantos son los mitos acerca de los tsunamis que, ante la noticia del tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011, hubo caravanas que escapando del tsunami subieron a los cerros. Los más precavidos, en la vecindad de San Quintín, B.C., salieron rumbo a la Sierra de San Pedro Mártir a más de 2000 metros de altura. En contraste, muchísimas personas acudieron a la playa para ver al tsunami. Sin embargo, el grueso de la población vivió horas de incertidumbre debido a que la prensa, compartiendo los mitos y buscando las noticias internacionales, no mantuvo informada a la población de que no había peligro de inundación, a pesar de haber estado presente en el centro de alerta en donde se estaba recibiendo y analizando la información en tiempo real conforme el tsunami progresaba de Japón hacia nuestras costas.

Se ha avanzado muchísimo en cuanto al conocimiento acerca de los tsunamis, de cómo se originan, de sus efectos en las costas y de cómo se propagan en todo el océano. Sin embargo, se han logrado transmitir los conocimientos básicos a la población en general, para que cada persona sea capaz de tomar las decisiones adecuadas. Por ejemplo, la respuesta de la población en Ensenada ante este último tsunami fue prácticamente la misma que ante el tsunami de Kodiak, Alaska, de 1964, de acuerdo con el relato inédito del Capitán Joaquín Prieto Guzmán.

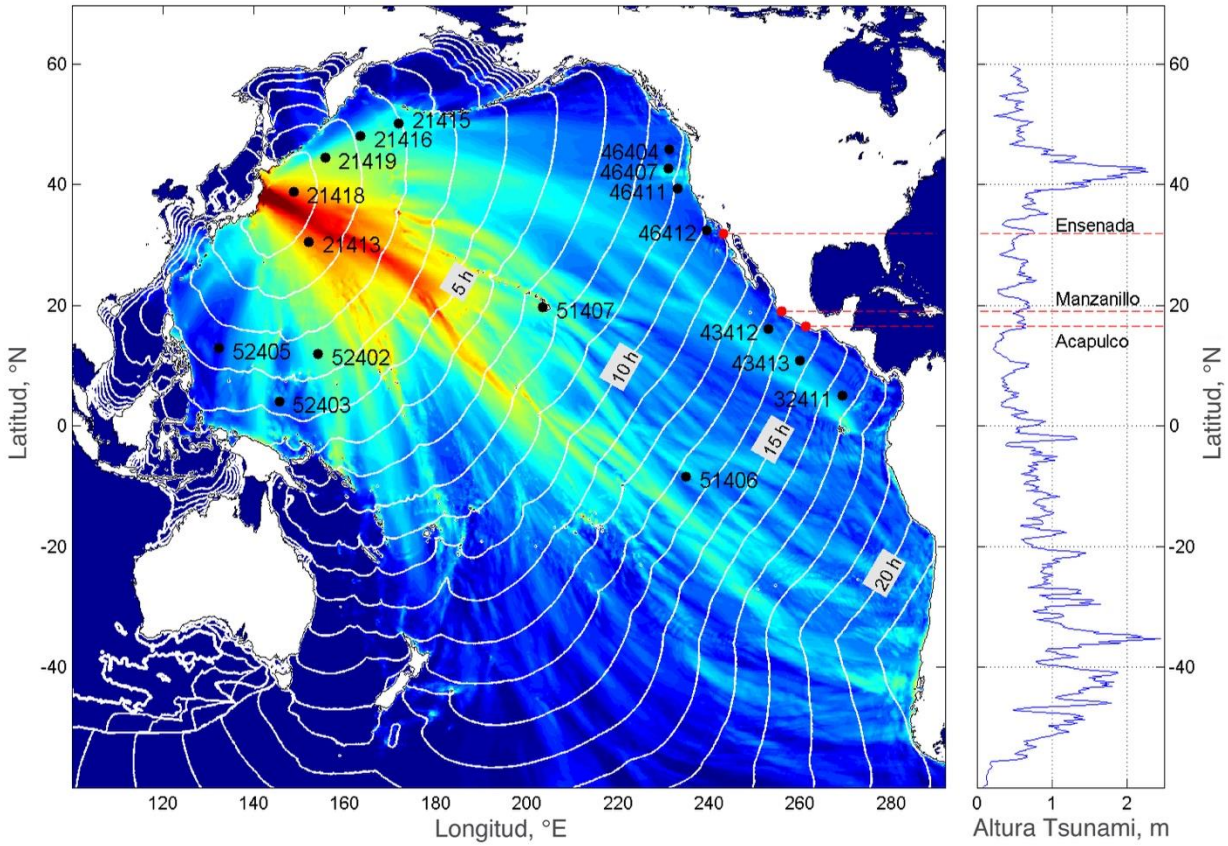


Figura 5.12. Resultados del modelo de propagación del tsunami de Japón del 11 de marzo del 2011 (Ortiz-Huerta et al., 2018). Los puntos negros indican los lugares en donde se obtuvieron los registros de este tsunami en mar abierto.

Sumatra, 26 de diciembre del 2004

El 26 de diciembre del 2004 a las 07:58:50 horas hora local de Sumatra; 0:58:50 horas GMT, ocurrió el terremoto de Sumatra de magnitud 9.3, que produjo un tsunami sumamente devastador para Sumatra, Tailandia y las islas Andamán. La propagación del tsunami, misma que se ilustra en la Figura 5.13, explica el gran daño que también produjo en las costas de la India, Sri Lanka, Madagascar y África. Note cómo el frente de onda del tsunami se dirige hacia el Atlántico sur y cómo después de 12 horas a partir de su origen pasa por el Estrecho de Buena Esperanza al sur de África, para impactarse después de 20 horas en las costas de Brasil y Argentina, y cómo continúa hacia el Atlántico norte pasando prácticamente desapercibido en el Mar Caribe y Golfo de México. También se aprecia cómo el tsunami se propaga hacia el Océano Pacífico tanto por el norte como por el sur de Australia, y cómo ambos frentes de onda van convergiendo conforme se aproximan al sur de México. Tuvieron que transcurrir 28 horas para que el tsunami llegara a Manzanillo, Colima, con alturas de ola de escasos centímetros, sin embargo, en el registro del tsunami en Manzanillo (Figura 5.14), el continuo arribo del tsunami hizo que las oscilaciones del nivel del mar entraran en resonancia y alcanzaran alturas de hasta 40 cm sobre el nivel de la marea, repitiéndose este fenómeno cada 30 minutos durante un lapso de más de 24 horas, induciendo corrientes y remolinos en el puerto de Manzanillo impidiendo a su vez la operación portuaria.

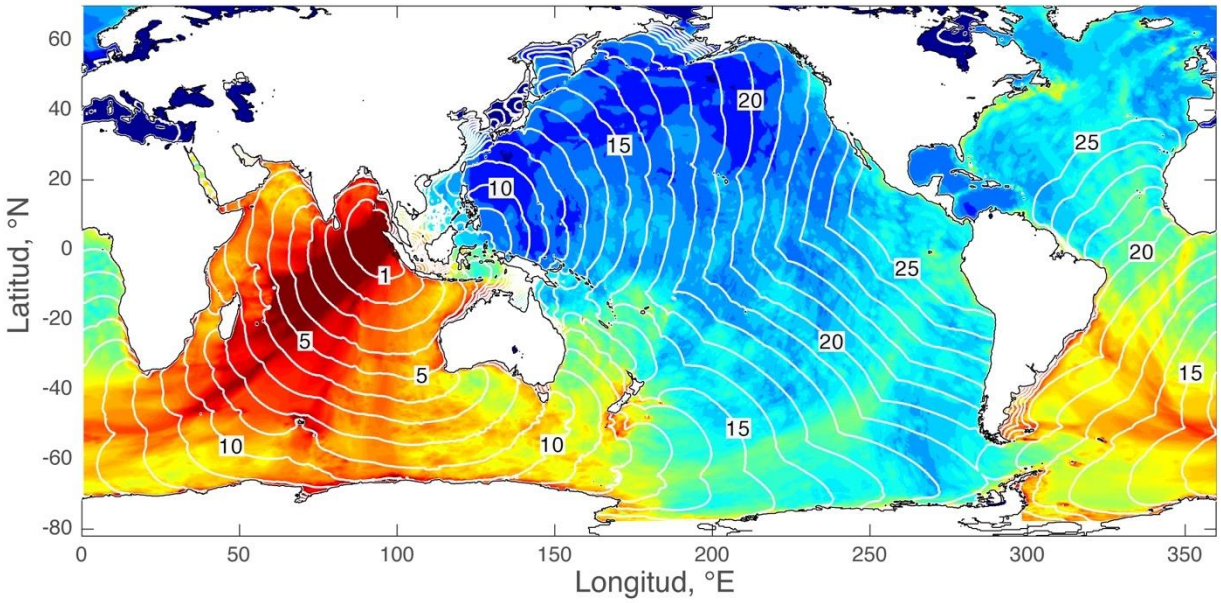


Figura 5.13. Resultados del modelo de propagación del tsunami de Sumatra del 26 de diciembre del 2004.

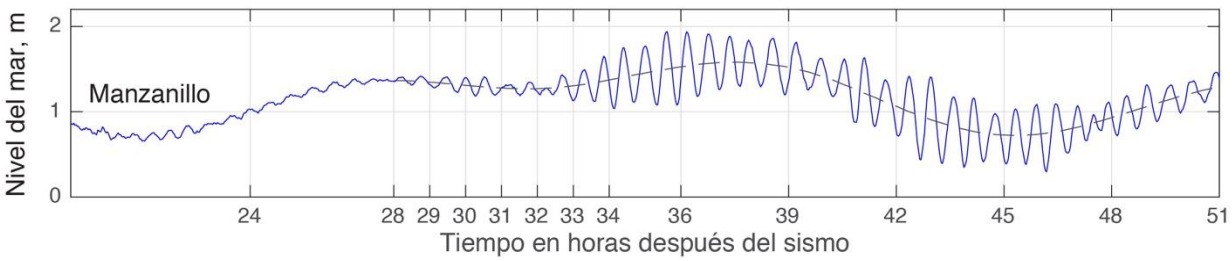


Figura 5.14. Mareograma de Manzanillo, Colima, en donde se registró el tsunami de Sumatra del 26 de diciembre del 2004. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

El tsunami de Sumatra ha dejado una gran lección: los tsunamis que se pudieran originar en las zonas de subducción de Java, Sumatra o las islas Andamán, no representan peligro de inundación para México. El único peligro, en caso de que el terremoto fuese de gran magnitud, es el que representa para la operación portuaria debido a las fuertes corrientes que se generan en la entrada de los puertos por el continuo subir y bajar del nivel del mar a intervalos cortos de tiempo, de 30 a 60 minutos, repitiéndose por más de 24 horas a partir del arribo del tsunami.

Islas Kuriles, 15 de noviembre del 2006

La fosa de las islas Kuriles (Figura 5.15) se localiza al norte de Japón y corre paralela al archipiélago de las islas Kuriles llegando hasta la península de Kamchatka. Esta fosa debe su origen al proceso de subducción de la placa del Pacífico norte por debajo de la corteza continental de la placa Euroasiática. Allí se tienen documentados terremotos fuertes de magnitudes mayores a 8 que han producido tsunamis locales importantes y cuyos efectos han sido registrados en México. Uno de ellos, el que mejor tenemos documentado, se produjo el 15 de noviembre del 2006 por un terremoto de magnitud 8.3. La localización del terremoto y su magnitud eran indicadores absolutamente confiables de que se había producido un tsunami y de que éste se dejaría sentir en México sin que representara peligro de inundación.

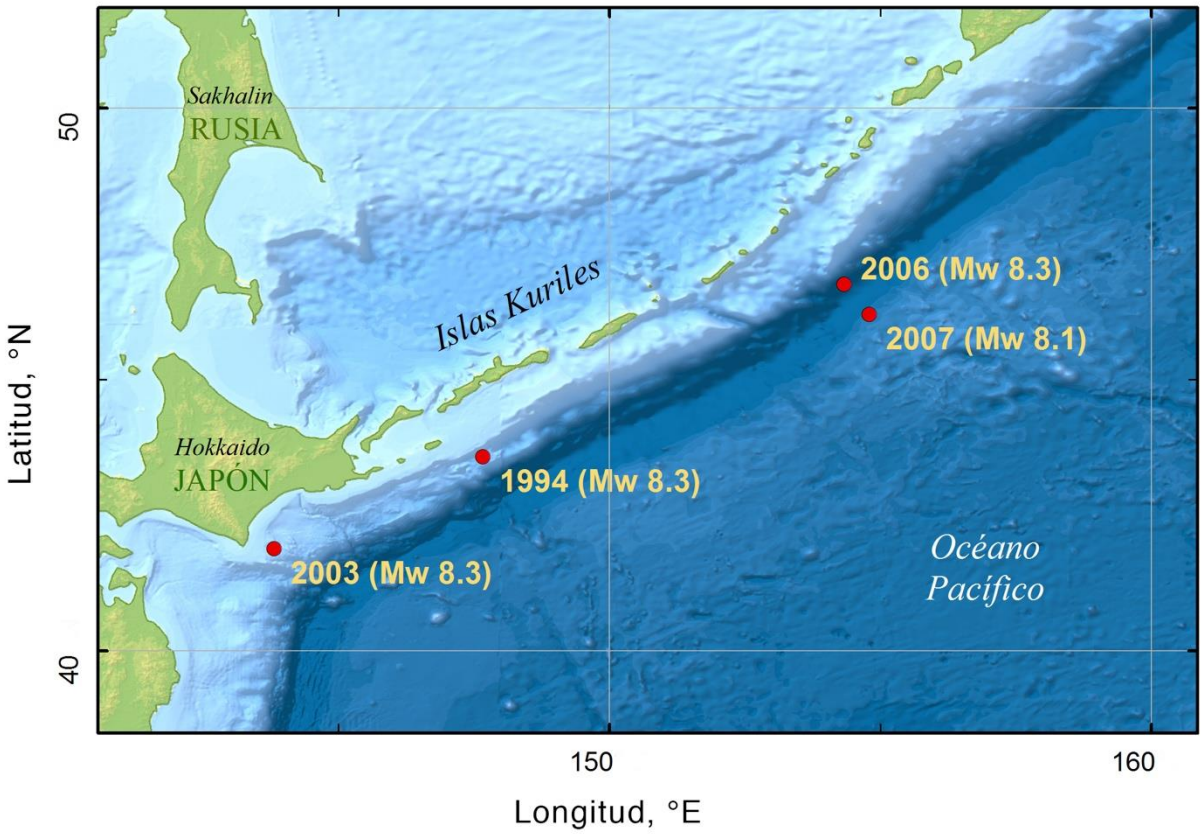


Figura 5.15. Localización y magnitud de los terremotos importantes que han ocurrido en la fosa de las islas Kuriles a partir del año 1994.

En el registro de este tsunami en Ensenada (Figura 5.16), se observa que llega en un lapso de 10 horas, durante la bajamar, con alturas prácticamente imperceptibles a simple vista. Sin embargo, después de 6 horas de su arribo, durante la pleamar, las variaciones del nivel del mar alcanzaron alturas de hasta 60 centímetros, produciendo fuertes corrientes en la entrada de ambos puertos, Ensenada y El Sauzal.

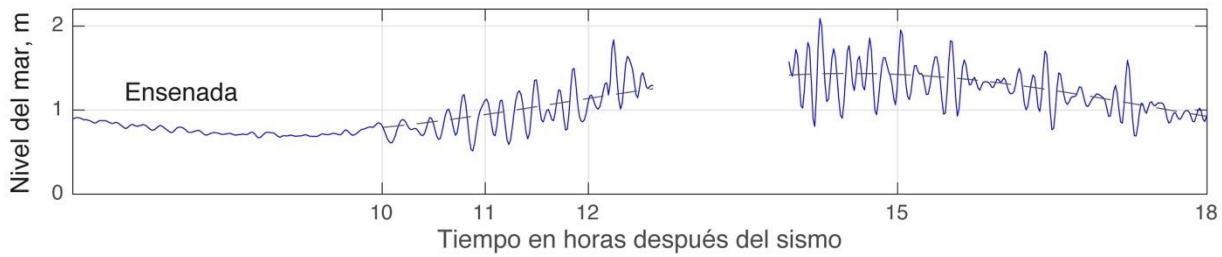


Figura 5.16. Registro del tsunami de las islas Kuriles del 15 de noviembre del 2006 en Ensenada, B.C. La línea a trazos indica la marea esperada y sobre ella se aprecian las variaciones del nivel del mar propias del tsunami.

Kermadek-Tonga, 3 de mayo del 2006

La Fosa Kermadek-Tonga, al norte de Nueva Zelanda, es una zona de subducción muy activa en el Cinturón de Fuego del Pacifico, en donde se han producido recientemente terremotos de magnitud 8. De hecho, el 3 de mayo del 2006 a las 08:26 tiempo de Ensenada, B.C., se registró un terremoto de magnitud 8.0 en la parte central de la fosa de Tonga, motivo por el que se emitió una alerta de tsunami en el Pacífico. En el mareograma de Ensenada (Figura 5.17), se puede apreciar cómo el tsunami llega en un lapso de 11 horas, con alturas menores a 20 centímetros sobre el nivel de la marea, pasando prácticamente desapercibido para la población.

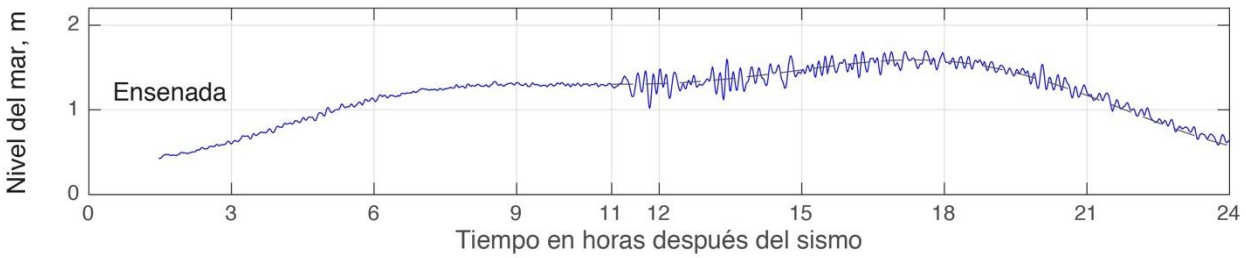


Figura 5.17. Mareograma de Ensenada, B.C., en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami de Tonga del 3 de mayo del 2006.

Kermadek-Tonga, 29 de septiembre del 2009

El 29 de septiembre del 2009 a las 10:48 tiempo de Ensenada, B.C., se registró un terremoto de magnitud 8.1 en la fosa de Tonga, pero esta vez en la región norteña de la fosa, en la vecindad de la isla Pago Pago. Este hecho es importante porque ya se tenía la experiencia del tsunami del 3 de mayo del 2006, lo que permitió emitir con certeza un comunicado a la población advirtiendo que no había ningún peligro por este tsunami.

Al igual que el tsunami del 3 de mayo del 2006, el del 29 de septiembre del 2009 pasó prácticamente desapercibido en la costa occidental de México. En los mareogramas en donde se registró este tsunami (Figura 5.18), se aprecia cómo las variaciones del nivel del mar en Ensenada no sobrepasan los 30 centímetros sobre el nivel de la marea y su tiempo de arribo es de 10 horas con 30 minutos. En Cabo San Lucas y en Acapulco es apenas perceptible y solamente en Manzanillo se observa que una de las oscilaciones del nivel del mar alcanza los 50 cm sobre el nivel de la marea.

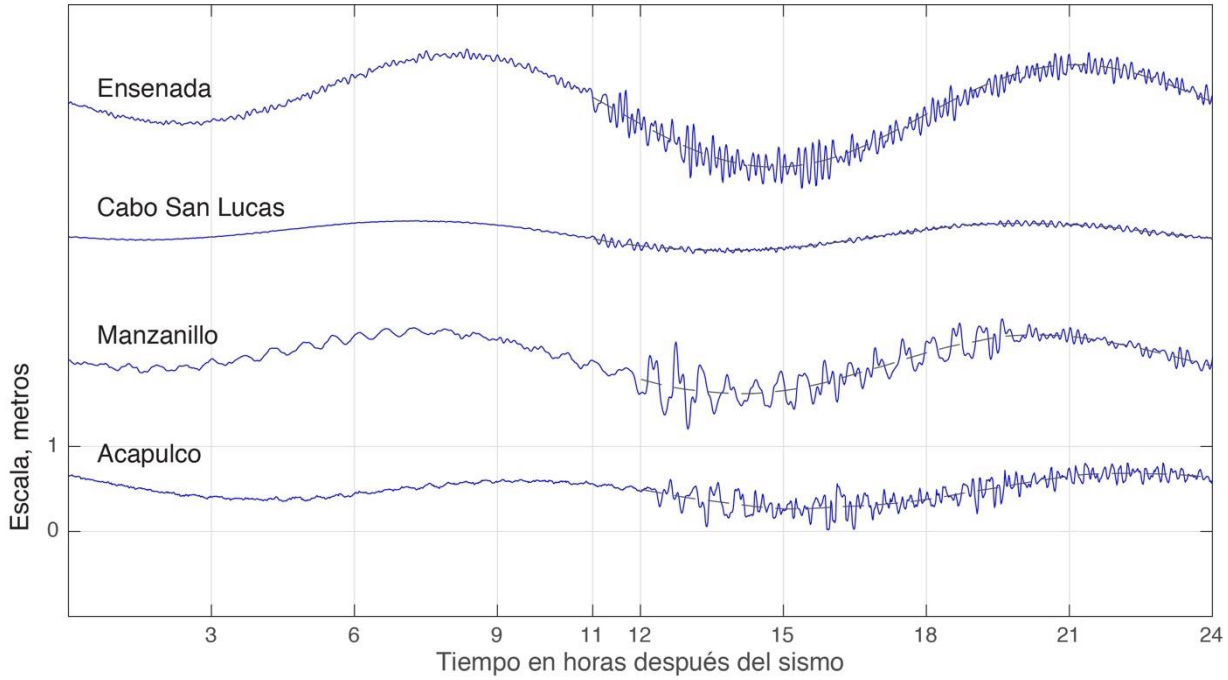


Figura 5.18. Mareogramas en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami de Tonga del 29 de septiembre del 2009.

Kermadek-Tonga, 4 de marzo del 2021

El jueves 4 de marzo del 2021 a las 11:28 hora local de Ensenada, B.C., ocurrió un sismo de magnitud 8.1 en la zona de subducción o trinchera de Kermadec-Tonga en la región sureña de la fosa.

Con los antecedentes anteriores, y en coordinación con el Centro de Alerta de Tsunamis de México, pudimos emitir con certeza el Boletín de Alerta de Tsunami informando que este tsunami llegaría a México en un lapso de 11 y 13 horas después de haber ocurrido el sismo, con posibilidades de altura de tsunami menores a 50 cm (de valle a cresta o pico a pico), con la posibilidad de inducir corrientes importantes de 2 a 3 nudos en la entrada de los puertos, indicando a la vez que no existía riesgo de inundación por tsunami en nuestros litorales. La información de este Boletín se difundió a los medios nacionales a través de la Coordinación Nacional de Protección Civil, evitando evacuaciones innecesarias y pérdidas económicas por el cese de actividades, manteniendo los puertos abiertos a la navegación con las debidas precauciones. En la Figura 5.19 se muestran los registros de este tsunami en los puertos de Acapulco, Manzanillo, Cabo San Lucas y Ensenada, confirmando una vez más la veracidad de los pronósticos.

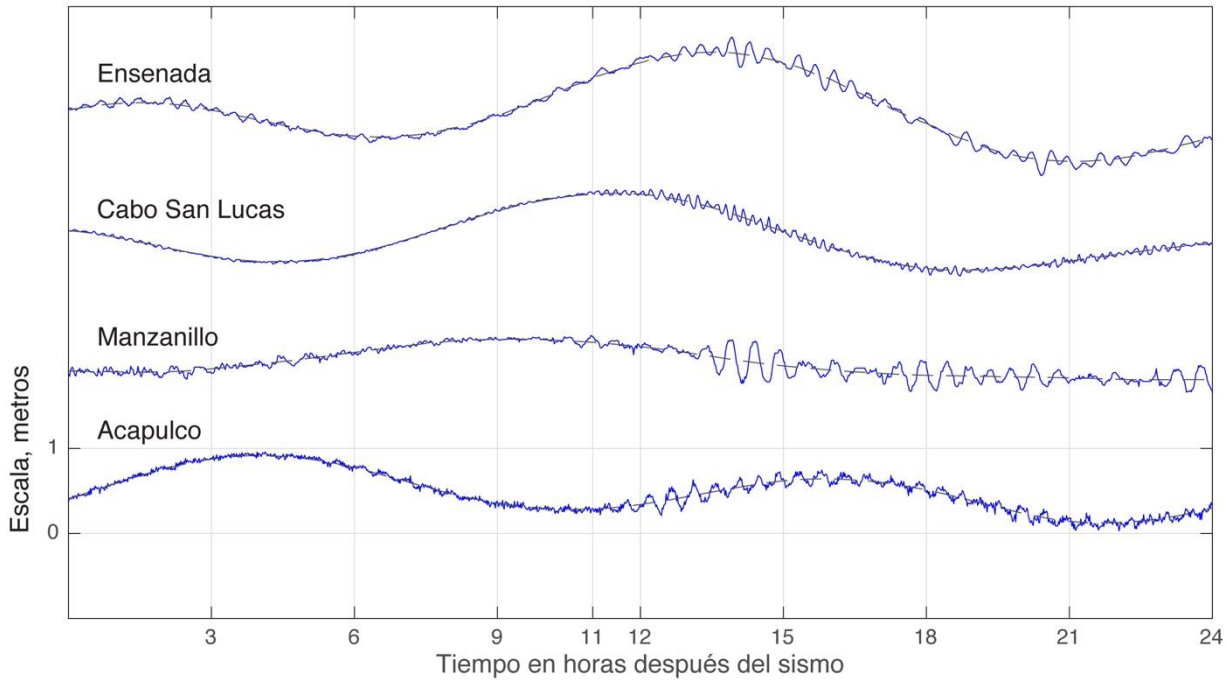


Figura 5.19. Mareogramas en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami de Kermadec del 4 de marzo del 2021.

Ecuador-Colombia, 1906, 1942, 1958 y 1979

Existen testimonios de que por la mañana del 31 de enero de 1906 ocurrió un gran terremoto en la fosa de Nazca (M_w 8.8; Kanamori y McNally, 1982), que a su vez produjo un tsunami devastador en la región, desde Esmeraldas, Ecuador, hasta Buenaventura, Colombia *"…todas las casas en las zonas costeras bajas fueron arrasadas por el tsunami" (Soloviev y Go, 1975).* La longitud de ruptura de este terremoto se estimó de entre 400 y 500 km, desde Manta, Ecuador, hasta Buenaventura, Colombia (Keleher, 1972), localizándose el centro del área de ruptura en la ciudad de Tumaco, Colombia (Figura 5.20). Esta ciudad está asentada sobre una barra de arena que se cubre parcialmente con la marea alta. Su parte más alta se localiza a 3 metros por arriba de la pleamar y a 7 metros sobre la bajamar. En los testimonios recabados por el Profesor Soloviev se menciona que el tsunami llegó a Tumaco con la marea baja alcanzando entre 2 y 5 metros de altura, en donde se reportaron daños tanto por el terremoto como por el tsunami. En el campo lejano, la altura de este tsunami se estimó en medio metro a lo largo de la costa del sur de México, desde Puerto Chiapas hasta Acapulco (Fernández *et al*., 2004; Fernández y Ortiz, 2007).

Posteriormente, en esta misma región ocurrieron los terremotos del 14 de mayo de 1942 (M > 7; Keleher, 1972) y del 19 de enero de 1958 (M 7.7; Kanamori y McNally, 1982). El primero de ellos localizado en la parte sur y el otro en la parte central de lo que se suponía era el área de ruptura del terremoto de 1906. Kelleher (1972), hizo notar que, si esta hipótesis era correcta, existía alto riesgo de que ocurriese un terremoto al noreste del área de ruptura del terremoto de 1958. Su hipótesis probó ser correcta y, el 12 de diciembre de 1979 ocurrió el gran terremoto de Tumaco (M 8.2; Herd *et al*., 1981; Kanamori y McNally, 1982) que aparentemente llenó la brecha sísmica o el área que faltaba por romper del terremoto de 1906. Este último terremoto produjo un tsunami devastador en Tumaco y en su vecindad, sin embargo, no causó daños ni en Esmeraldas ni en Buenaventura (Quiceno y Ortiz, 2001; Arreaga et al., 2005).

El tsunami de Tumaco, Colombia, del 12 de diciembre de 1979 se registró en el mareograma de Acapulco (Figura 5.21), en donde se puede observar cómo las oscilaciones del nivel del mar no sobrepasaron los 15 cm sobre el nivel de la marea. Este hecho es importante porque asegura que los terremotos de magnitudes menores a 8.2 en la región Ecuador-Colombia no generan tsunamis destructivos para México. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, no se puede descartar la posibilidad de que terremotos de mayor magnitud en la región Ecuador-Colombia puedan producir tsunamis peligrosos para Centroamérica y para el sur de México.

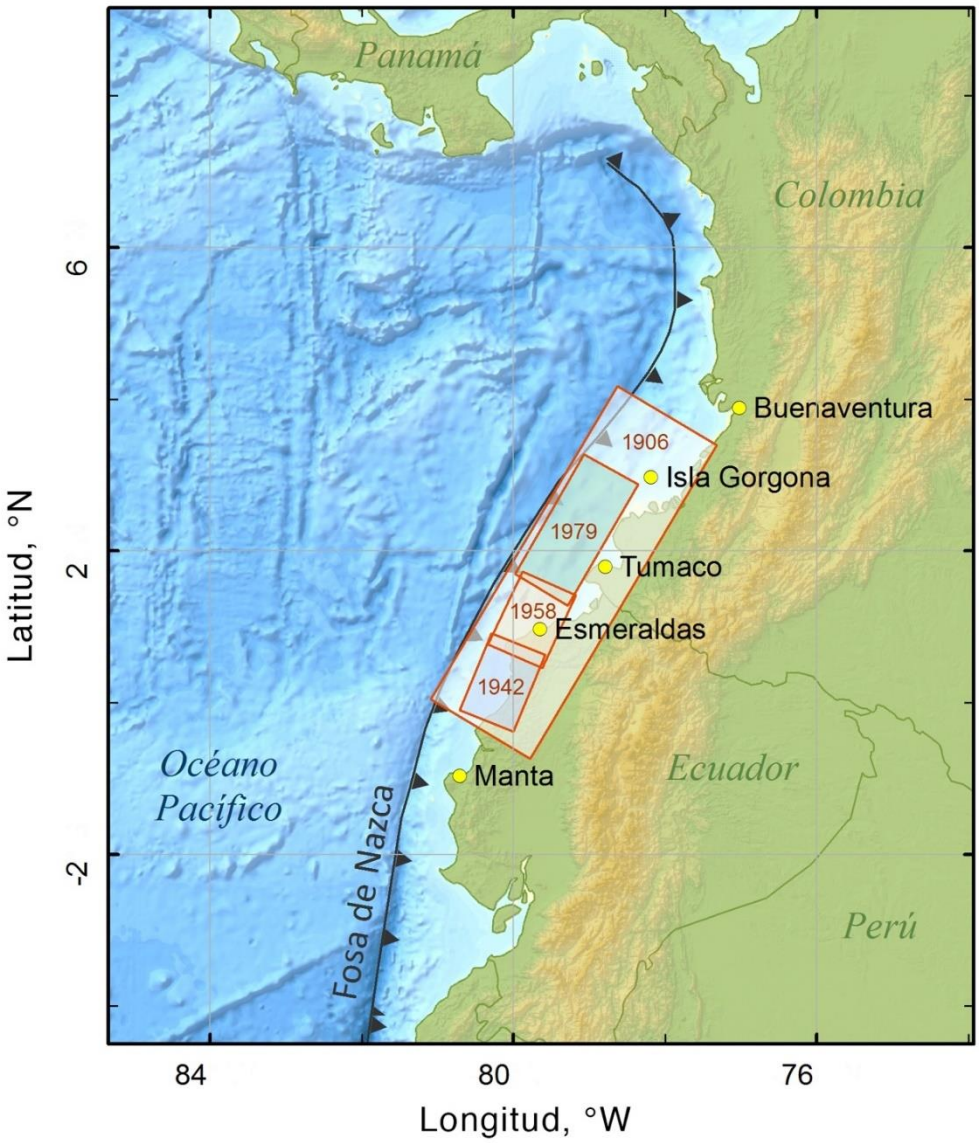


Figura 5.20. Áreas de ruptura de la secuencia de terremotos ocurridos en la fosa de Nazca, desde Manta, Ecuador, hasta Buenaventura, Colombia, en los años 1906 (M 8.6), 1942 (M > 7), 1958 (M 7.7) y 1979 (M 8.2).

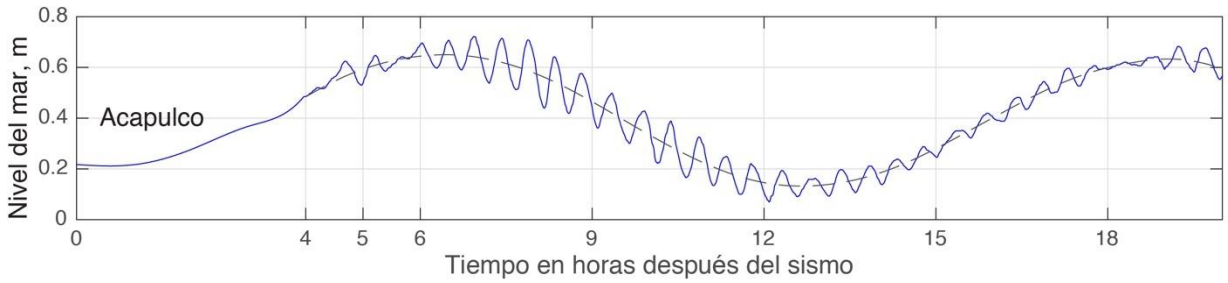


Figura 5.21. Mareograma de Acapulco, Guerrero, en donde se observan las variaciones del nivel del mar producidas por el tsunami de Tumaco del 12 de diciembre de 1979.

Escenarios de peligro por tsunamis de origen lejano

En los registros tanto históricos como recientes de tsunamis de origen lejano hemos podido constatar que estos tsunamis no han representado ningún peligro para las poblaciones en el Mar de Cortés y que en general no han sobrepasado los 2 metros de altura sobre el nivel de la marea en la costa occidental de México. Esta es una buena noticia porque se puede esperar, con base en los registros históricos y en nuestro conocimiento básico acerca de la propagación de los tsunamis, que futuros tsunamis provenientes de Chile, Japón, Alaska y Sumatra, quedarán contenidos en las playas. Sin embargo, el mismo conocimiento que hemos adquirido acerca de la direccionalidad de los tsunamis, aunado a la curiosidad propia de la especie, nos lleva a hacernos la pregunta: *¿Existe algún lugar en el Cinturón de Fuego del Pacífico en donde pudiese originarse un tsunami que represente un peligro para México?* Esta pregunta es relevante y debe responderse con prudencia. En este caso, empleando la metodología que hemos expuesto en los capítulos anteriores, con la certidumbre de que ha venido arrojando resultados consistentes con los registros de tsunamis tanto históricos como recientes, nos dimos a la tarea de investigar los efectos de tsunamis hipotéticos o tsunamis sintéticos que aún no han ocurrido y que no necesariamente van a ocurrir, producidos por terremotos de magnitud 9.3 en 23 regiones del Cinturón de Fuego del Pacifico, en donde es evidente que hay actividad tectónica y en donde aún no se tiene conocimiento de que hayan ocurrido. Los resultados de esta investigación se enriquecieron en congresos internacionales y finalmente se publicaron en Ortiz-Huerta *et al.*, (2018) y Ortiz-Huerta (2019), después de haber sido revisados por expertos internacionales. Los resultados se resumen en un Atlas de Tsunamis (Figura 5.22 y Figura 5.23), en donde se indica la altura máxima esperada y los tiempos de arribo de estos tsunamis a la costa occidental de México, provenientes de 23 regiones del Cinturón de Fuego del Pacífico. Los puertos de Acapulco, Manzanillo y Ensenada se seleccionaron como exponentes o indicadores de estas alturas a lo largo de la costa occidental de México, al observar en los resultados que la altura del tsunami en Ensenada es representativa de las alturas del tsunami en la costa occidental de la península de Baja California, mientras que las alturas en Manzanillo y Acapulco son representativas para la costa occidental de México. A su vez, Zaytsev *et al.*, (2016; 2017), considera que Ensenada, Manzanillo y Acapulco, son "hot spots" o lugares donde se amplifican los tsunamis de campo lejano en la costa occidental de México.

Los escenarios de tsunamis hipotéticos nos han dejado saber en general que las alturas esperadas de tsunamis producidos por sismos de magnitud 9.3 alrededor del Cinturón de Fuego del Pacífico no sobrepasan los tres metros. Un caso excepcional sería un tsunami de campo lejano proveniente de la fuente sísmica Ecuador-Colombia, que alcanzaría desde los 2.5 metros de altura en Manzanillo, 4 metros en Acapulco, y hasta 7 metros en Puerto Chiapas; en escasas 3 horas a Puerto Chiapas, 4 horas a Acapulco y 5 horas a Manzanillo.

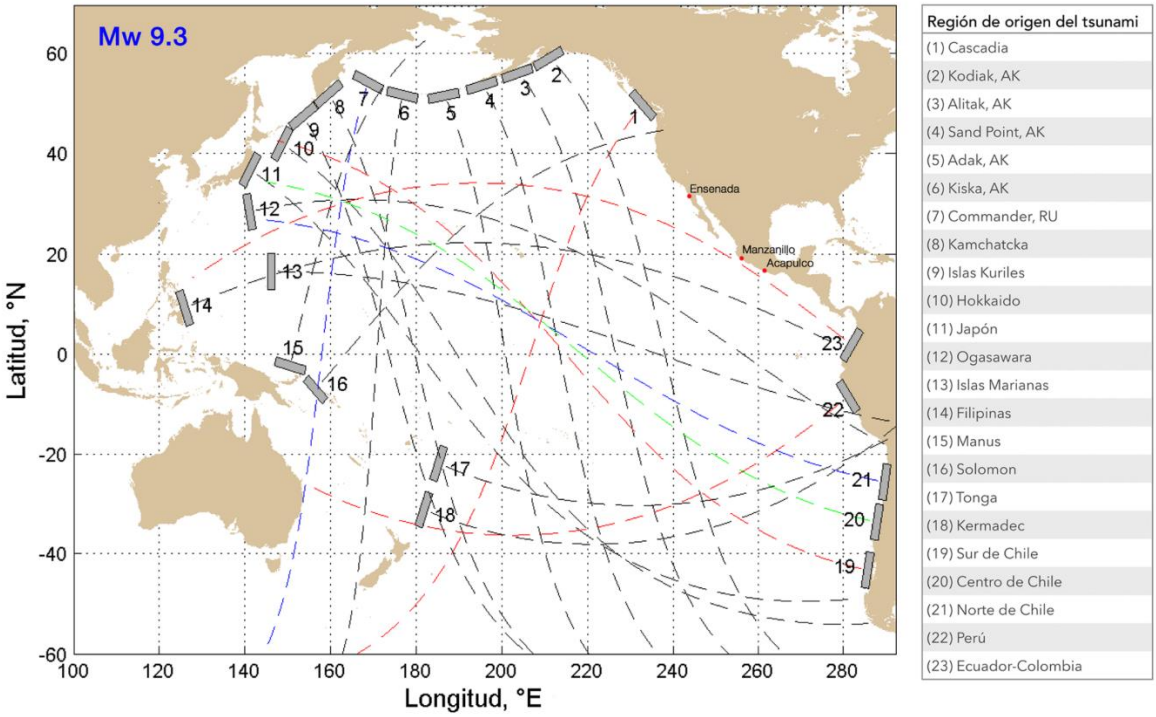


Figura 5.22. Los rectángulos grises indican las áreas de ruptura hipotéticas de terremotos de magnitud M 9.3 en las 23 regiones de subducción del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico. Las líneas a trazos indican de manera aproximada la direccionalidad del tsunami a lo largo del Gran Círculo perpendicular al área de ruptura correspondiente (Ortiz-Huerta *et al.*, 2018).

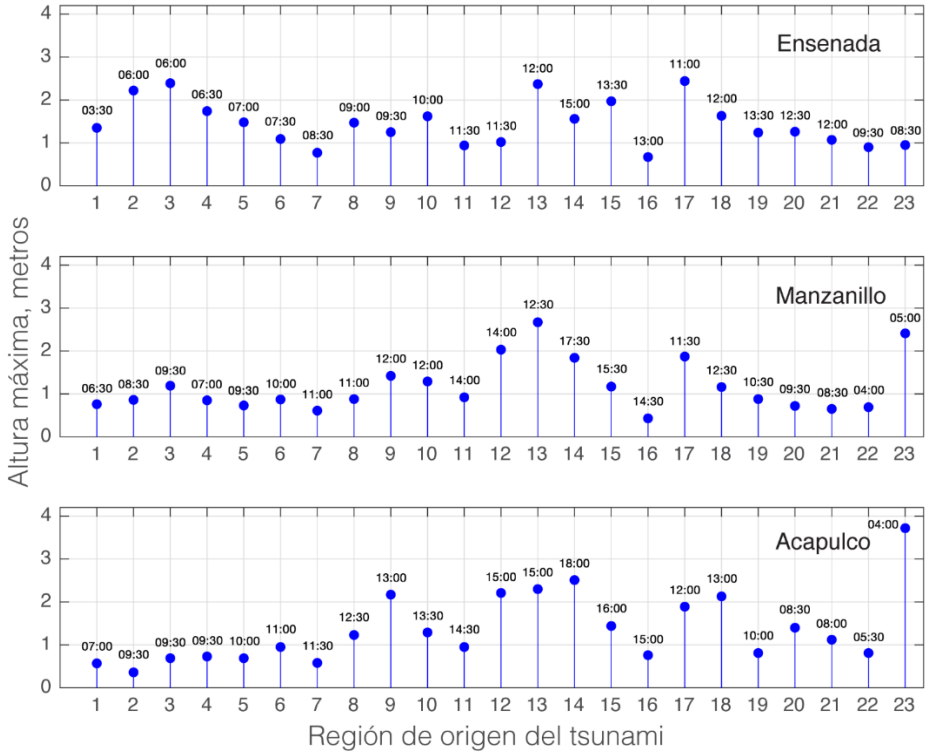


Figura 5.23. Altura máxima estimada, sobre el nivel de la marea, de los tsunamis sintéticos provenientes de cada una de las 23 regiones que se indican en la Figura 5.22. El tiempo de arribo de los tsunamis correspondientes se indica en horas y minutos (hh:mm) a partir del tiempo de origen del tsunami (Ortiz-Huerta *et al.*, 2018).

Capítulo 6
Medidas de prevención y autoprotección

Tsunamis de origen lejano

Ante la evidencia de tsunamis de origen lejano, la primera medida de prevención, la más difícil, consiste en admitir que son una realidad en la costa occidental de México y que el peligro no debe estimarse por su frecuencia, sino por la vulnerabilidad de las áreas susceptibles de inundación ante el inminente embate del próximo tsunami. La medida precautoria ideal sería conocer la altitud o altura donde habitamos. El peligro en este caso sería para las instalaciones en la zona vulnerable, ya sean residenciales, turísticas o comerciales, que se encuentran en terrenos muy bajos o cerca de las playas, a menos de tres metros sobre el nivel del mar.

En caso de una alerta de tsunami de origen lejano tendríamos que enterarnos vía las autoridades correspondientes, ya sea por radio, TV o redes sociales. Para los tsunamis que vienen del norte, de la región de Cascadia (región 1; Figura 5.22–Figura 5.23), el tiempo de arribo a Ensenada es de 3 horas, por fortuna, en su camino a mar abierto, llegaría a Ensenada por difracción con menos de metro y medio de altura, y no sobrepasaría el metro de altura en el resto de la costa occidental de México, en donde su tiempo de arribo supera las 6 horas. Le siguen los tsunamis provenientes de Alaska (regiones 2 y 3), con tiempos de arribo de 6 horas a Ensenada y altura aproximada de 2 metros. Al igual que el tsunami de Alaska de 1964, la altura de estos tsunamis se reduce a un metro aproximadamente al sur de la península de Baja California. En el resto de los casos en los que la altura del tsunami sobrepasa los dos metros en la Figura 5.23, los tiempos de arribo van de entre 11 y 18 horas, dando tiempo para que la alerta se propague por todos los medios. Una vez enterados, y auxiliándonos del Atlas de Tsunamis (Figura 5.22–Figura 5.23), podremos estimar por nosotros mismos el umbral superior de peligro o altura esperada del tsunami. Este conocimiento permitirá a su vez promover la evacuación o evitar evacuaciones innecesarias. Por fortuna los grandes sismos en el Cinturón de Fuego del Pacífico son poco frecuentes. Los sismos más frecuentes, de magnitudes entre 8.0 y 8.8, han producido tsunamis de origen lejano con alturas menores en un 50% que las correspondientes en la Figura 5.23. Para el caso excepcional de tsunamis producidos en la región Ecuador-Colombia, en donde los tiempos de arribo van de escasas 3 horas a Puerto Chiapas y 4 horas a Acapulco, debemos recordar que no ha habido peligro de inundación durante los tsunamis de 1906 y 1979, producidos por sismos de magnitudes 8.8 y 8.2 respectivamente.

Tsunamis de origen local

Los tsunamis de origen local, los que han sido producidos por sismos de magnitudes entre 8 y 8.2, han alcanzado alturas de 5 metros sobre el nivel del mar. Excepcionalmente se han estimado inundaciones que han alcanzado 8 metros de altura por el tsunami de Oaxaca del 28 de marzo de 1787; inundaciones de entre 5 y 8 metros de altura en Cuyutlán el 22 de junio de 1932 por una avalancha submarina, y de entre 6 y 7 metros de altura en Zihuatanejo el 16 de noviembre de 1925 por una inundación de origen incierto (Singh *et al.*, 1998). El factor común en los casos en los que las inundaciones han sido precedidas por terremotos es el lapso entre el sismo y el tsunami; se han documentado escasos 10 minutos entre el sismo y el arribo del tsunami en la costa occidental de México, a excepción de los tsunamis en el Golfo de Tehuantepec, en donde el tsunami llega a la costa en un lapso de 30 minutos después del sismo. Diez minutos parecen pocos minutos para alejarnos de la costa a los lugares seguros, sin embargo, pueden ser suficientes si de antemano identificamos y recorremos las posibles rutas de evacuación que nos lleven a terrenos elevados. Pero vamos por pasos… *¿a qué altura me encuentro sobre el nivel del mar?* Con fines prácticos, el nivel del mar es el nivel hasta donde llegan las mareas más altas, las que ocurren durante los días de Luna llena y Luna nueva, incluyendo el nivel de la playa hasta donde el oleaje puede llegar. A partir de ese nivel se puede desplantar una nivelación diferencial topográfica o *"Topografía Participativa"* en la que los vecinos de una localidad, siempre en coordinación con su Unidad de Protección Civil y acompañados de un perito topógrafo de la localidad, realicen en conjunto esa convivencia o *"Topografía Participativa"* en la que se vaya determinando la altitud a nivel de calle a la que se encuentra cada una de nuestras casas, para que cada uno de nosotros expresemos la altitud de la mejor manera, ya sea al lado del número postal o en la cerca o la barda de la casa, circunscrita en un triángulo, *"El Triángulo de Protección Civil"*, como se indica en la Figura 6.1, pero cada quien con la pintura de reúso que tenga a la mano, no importa que la altitud en el barrio se lea en un conjunto de variados colores, lo que importa es que se vea desde la calle como cortesía para vecinos y visitantes.

Figura 6.1. Ejemplo para indicar la altitud en nuestras casas, dentro del triángulo que simboliza universalmente a la protección civil.

Una copia en papel con la altitud y el visto bueno del personal de Protección Civil y del topógrafo se podría guardar junto a los documentos del inmueble para recordar la altitud cuando la pintura se deteriore. Al paso del tiempo, la persistencia de los señalamientos de altitud indicaría la eficacia de la comunicación social del riesgo, y a su vez, estos señalamientos de altitud podrían

emplearse a manera de indicadores de concientización de la población ante el peligro por tsunamis. El ayuntamiento podría transferir esta responsabilidad a la comunidad mediante programas de *"Topografía Participativa"*, para que cada usuario o participante asuma el costo de pintar y mantener estos señalamientos en sus domicilios.

Imaginemos que en toda la zona costa podemos encontrar los indicadores de altitud. Si habitamos a menos de 10 metros de altitud en la costa occidental de México, entre Jalisco y Chiapas, es conveniente practicar rutas de evacuación que nos lleven a tierras altas. Un temblor puede ocurrir a cualquier hora, es por ello importante recorrer nuestras rutas de evacuación tanto de día como de noche, contando los minutos que hacemos a tierras altas.

La labor más difícil de la prevención es convencernos a nosotros mismos de que la franja costera que se encuentra en altitudes menores a 10 metros es la más vulnerable debido a los pocos minutos que hay entre el sismo y el tsunami. Pueden pasar varias décadas sin que experimentemos un desastre por tsunami, motivo por el que naturalmente se va perdiendo la percepción social del riesgo. Lo que hemos observado es que hay migración a tierras altas después de un desastre por tsunami. Sin embargo, al paso de los años, la misma población o sus descendientes regresan a ocupar sus antiguos lugares debido a que la fuente misma del sustento se encuentra ligada a las actividades costeras. Este fenómeno se ha venido documentando a raíz de los grandes terremotos y tsunamis en diferentes países, y sin ir más lejos, lo estamos viendo en la actualidad en la costa occidental de México, en donde la población ha aumentado considerablemente después de las inundaciones de 1932 y 1995. Lo que podemos procurar es que al menos las escuelas, los hospitales y las facilidades que se consideren esenciales, se ubiquen en tierras altas, o si son tierras llanas o de poca pendiente, se ubiquen a más de 2 km de la costa.

En la península de Baja California no se han documentado tsunamis de origen local, y los producidos en la costa occidental de México no han representado algún peligro. El tsunami más reciente y cercano es el de Jalisco-Colima del 9 de octubre de 1995; mientras que en Jalisco se registraron inundaciones de hasta 5 metros de altura, en Cabo San Lucas las alturas fueron menores a los 25 centímetros. El tsunami no se observó ni en La Paz, B.C.S., ni al interior del Mar de Cortés. Aun cuando la península de Baja California es una región sísmicamente activa, no se tienen documentados tsunamis de origen local en su costa occidental debido a que la sismicidad es primordialmente originada por fallas geológicas transcurrentes o de movimiento horizontal que no producen tsunamis. Sin embargo, por precaución, es mejor alejarse de la playa después de haber sentido un fuerte temblor. El peligro por tsunami en las costas del Pacifico de Baja California se debe principalmente a los tsunamis de origen lejano, mismos que históricamente no han sobrepasado los dos metros de altura.

Reflexiones

Un sinnúmero de esfuerzos se ha hecho en diferentes países para mantener en la memoria la percepción social del riesgo de inundación por tsunamis, a saber: normas oficiales de señalamientos que indican zonas de peligro por tsunami; rutas de evacuación tanto a terrenos elevados como a azoteas de edificios; altavoces en las calles; mapas de inundación, y programas piloto en donde adultos mayores narran historias y experiencias de tsunamis en las escuelas. Aún con programas en donde se ha involucrado a las comunidades a participar en simulacros de evacuación, se ha visto que la percepción del riesgo se va perdiendo al paso de los años, cuando, por el contrario, esta percepción debería normar las decisiones del día a día en las zonas vulnerables, ya sea en la estimación del costo beneficio al invertir en bienes y servicios o en la estimación del riesgo al establecer una zona residencial. Dada la problemática muy particular de la costa occidental de México, donde hay escasos minutos entre el sismo y el tsunami, la percepción del riesgo debe formar parte integral de nuestra cultura para actuar de inmediato en donde el terremoto es por sí mismo la alerta del tsunami. Sin embargo, la única forma de lograr que la percepción del riesgo forme parte de nuestra cultura es la educación sistemática dentro del Sistema de Educación Pública de México, para que la población sepa qué es un tsunami, cómo se produce, cuáles son los lugares vulnerables y cuáles los lugares seguros. Para ello se elaboró el material de divulgación: *"¿Cómo me puedo preparar ante un Tsunami?"*. Este material y su correspondiente *"Guía del Maestro"* (Ortiz-Huerta, Ortiz, 2014), describe con ilustraciones qué son los tsunamis y qué debemos hacer en caso de que se presente uno. El material está orientado a la problemática muy particular de la costa occidental de México, desde Jalisco hasta Chiapas, y forma parte de la RECOMENDACIÓN RG/05/2013, emitida por el Comité Científico Asesor del Sistema Nacional de Protección Civil sobre Fenómenos Perturbadores de Origen Geológico. El folleto es ilustrativo por sí mismo, sin embargo, con la finalidad de que su contenido pueda ser impartido en los niveles de enseñanza primaria y secundaria, nos hemos permitido extender y discutir en la Guía del Maestro el objetivo de cada uno de los temas que se describen en las páginas del folleto, con la esperanza de que estos temas se discutan en clase en vísperas del Día Mundial de Concientización de Tsunamis o en vísperas del día Nacional de la Protección Civil en México. El folleto hace énfasis en la realidad o problemática de la costa occidental de México, misma que comprende a los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Se hace énfasis en esta porción de la franja costera debido a que los terremotos que han ocurrido en esta región, a diferencia de todas las demás franjas costeras de México, han generado tsunamis que a los pocos minutos después del terremoto han inundado la franja costera. El mensaje es uno solo y es repetitivo: si siente un fuerte temblor, no espere a que las autoridades le indiquen que hay peligro, aléjese de la costa a los lugares seguros, el temblor o terremoto es por sí mismo la alerta del tsunami.

La educación sistemática y los señalamientos de altitud son los dos elementos fundamentales en la cultura de la autoprotección. No hay necesidad de asustar ni a la población ni al turismo con señalamientos que indiquen *"zona de amenaza en caso de tsunami"*. Con estos dos elementos la población respondería adecuadamente a las alertas, no solamente por tsunamis, también por marea de tormenta o por oleaje extraordinario.

Cualquier tecnología complementaria puede ser de gran utilidad, siempre que no reemplace a la cultura de la autoprotección. Las bocinas o altoparlantes se han empleado en Japón en poblaciones de relativamente pocos habitantes. Sin embargo, fallaron durante el terremoto y tsunami del 11 de marzo del 2011 debido a los daños por el terremoto y al colapso de las redes de electricidad y telecomunicaciones. Cabe mencionar que en Japón esas bocinas no se emplean exclusivamente para alerta de tsunami, son de uso común y cotidiano para enviar mensajes en las prefecturas (Fraser *et al.*, 2012). Si solamente se emplearan para alertas de tsunami se requeriría de una cultura de mantenimiento debido a que están sujetas a la corrosión por el ambiente marino y, al paso de décadas tal vez nos olvidemos de ellas. La telefonía celular ha probado ser de gran utilidad durante las labores de rescate. Sin embargo, debemos considerar que ésta suele saturarse durante los primeros minutos después de haber ocurrido el terremoto. Esos primeros minutos son esenciales en caso de un tsunami de origen local.

En lugares llanos, como en barras de arena en donde a sus espaldas se localizan lagunas costeras que dificultan el acceso a tierra firme, es conveniente ubicar edificaciones resistentes de más de 4 niveles para poder realizar una evacuación vertical. Aun cuando esta opción no reemplaza la evacuación a terrenos altos, podría brindar una alternativa a comunidades costeras que no tengan acceso rápido a lugares elevados. Sin embargo, construir una estructura vertical para evacuar, sin tener un propósito multifuncional, en donde pueden pasar varias décadas sin que ocurra un tsunami, puede ser ineficiente debido a: la falta de mantenimiento de la estructura; la falta de confianza al saber que es mejor evacuar a terrenos altos; que el edificio se encuentre cerrado para evitar el vandalismo o pasar la noche; que no tenga suficiente espacio para albergar a toda la comunidad; la falta de confianza de la comunidad para evacuar a un edificio que nunca ha sido utilizado en caso de una inundación.

Una recomendación común en diferentes países es evitar evacuaciones utilizando vehículos de motor. La experiencia nos ha enseñado que éstos han quedado atrapados entre escombros y el caos vial, además de que pueden atropellar a las personas que van a pie. Sin embargo, aun cuando esta recomendación es adecuada en general, hay campos pesqueros con escasas familias en donde las tierras altas se encuentran a más de 3 km de la costa y solamente podrían alcanzarlas en un vehículo de motor.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo en Ciencia Básica para la investigación en el tema de tsunamis. A las redes mareográficas del CICESE, SEMAR, IMT y UNAM, por mantener activas las estaciones mareográficas y por facilitarnos los registros del nivel del mar. A los revisores por sus correcciones y fructíferas discusiones que enriquecieron sustancialmente el contenido de esta obra. L.G. Ortiz-Huerta agradece a la División de Oceanología del CICESE por la beca posdoctoral que nos permitió culminar esta obra que iniciamos el año 2011.

Apéndice

Efectos costeros del tsunami del 9 de octubre de 1995 en la costa de Colima y Jalisco. Informe Técnico.

Aun cuando el estudio de campo del tsunami de Jalisco-Colima del 9 de octubre de 1995 no ha sido publicado formalmente, sus resultados han servido de base en diferentes investigaciones y han sido citados en revistas de prestigio. Para futuras citas:

Ortiz Modesto, Juan I. González, Jorge Reyes, Cuauhtémoc Nava, Ernesto Torres, Guillermo A. Sáenz, José Arrieta (1995). *Efectos costeros del tsunami del 9 de octubre de 1995 en la costa de Colima y Jalisco, Informe Técnico*. En Ortiz-Huerta Laura G., Ortiz Modesto (2021). *Tsunamis en la Costa Occidental de México y en el Mar de Cortés* J. Gómez-Valdés (Ed.), Ensenada, B.C., México: Editorial CICESE, ISBN: 978-607-8811-21-2. 114p. Disponible en: http://cicese.edu.mx

EFECTOS COSTEROS DEL TSUNAMI DEL 9 DE OCTUBRE DE 1995 EN LA COSTA DE COLIMA Y JALISCO

INFORME TÉCNICO
Octubre, 1995

Modesto Ortiz, Juan I. González, Jorge Reyes y Cuauhtémoc Nava
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Ernesto Torres
Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima

Guillermo A. Sáenz y José Arrieta
Instituto Oceanográfico del Pacífico, Dirección General de Oceanografía Naval

Resumen

Del 18 al 22 de octubre de 1995 se efectuó un recorrido a las costas de Colima y Jalisco para medir las alturas de inundación y estimar los efectos costeros del tsunami generado por el sismo del 9 de octubre de 1995 de magnitud M_w 8.0. Las alturas de inundación a lo largo de 200 km de costa varían de 2 m a 5 m. Los lugares más afectados fueron La Manzanilla y Boca de Iguanas, ambos situados en la Bahía de Tenacatita, Jal. Sólo una persona fue reportada muerta por efecto del tsunami. En la estación mareográfica de Manzanillo se registró un incremento de 14 cm en el nivel medio del mar después del sismo, por lo que se procedió a realizar una nivelación diferencial de tercer orden de los bancos de nivel ligados a la estación. Los resultados de la nivelación indican que el área en donde se encuentran los bancos de nivel se hundió 14 cm de manera uniforme. Las alturas de inundación se midieron con estadal y nivel de mano con respecto al nivel del mar en el momento de la medición y se corrigieron con la predicción de marea para referirlas al nivel del mar en el momento del tsunami.

A continuación se describen los lugares en donde se midieron las alturas de inundación, indicando los efectos del tsunami que fueron observados por los autores, así como los efectos que fueron relatados por personas de la localidad.

Testimonios sobre los efectos del tsunami en Manzanillo, Col.

Empleados del aeropuerto, agencia de autos Avis y hotel Sierra Radisson (ningún testigo presencial): En la dársena del puerto se formó un remolino. El mar arrojó varias piedras. Por la noche del 9 de octubre volvió a temblar y el mar "se azotó". En el centro de Manzanillo el mar se llevó un monumento. El área afectada abarca de Manzanillo a Careyes. El mar salió hasta la carretera en la playa Miramar (B. Santiago).

Empleados de la empresa Peña Colorada, Manzanillo (testigos): En Playa Pascuales, Tecomán, Col., el mar avanzó sobre la carretera a las 6 de la tarde. En la dársena de Manzanillo se formaron tres remolinos simultáneos. En Manzanillo se llevó una estatua en la colonia Burócratas y una casa cerca de la playa (no lo vieron ocurrir). Las casas en Sn. Pedrito se hundieron. Los ductos de la termoeléctrica se hundieron. El barco de la compañía se soltó y quedó a la deriva en el puerto, no pudo navegar contracorriente (tripulante del barco). En la colonia del seguro social brotó lodo de la calle. Junto al hotel

Costa Real. Empleados y dueña del restaurant Bugati: La hija del camarero observó los remolinos del puerto desde un sexto piso. La carretera a la zona naval quedó deformada de acuerdo a las ondulaciones (sísmicas). El atunero de Pescado de Colima se varó momentáneamente en la cabeza de la laguna de las Garzas. Antes de las 10:00 A.M. el mar alcanzó la carretera en la playa Miramar (B. Santiago).

Las brisas, Bahía de Manzanillo (sur), Col. Señalando con la mano derecha la marca que dejó el tsunami. Altura corregida = 3 m.

En la Bahía de Manzanillo las playas presentan una pendiente pronunciada y la altura de la berma varía de 2 m a 4 m respecto al nivel medio del mar, por lo que los daños reportados no resultaron catastróficos, aun cuando en algunos lugares al norte de la bahía la altura de inundación fue de 5 m. En el puerto interior de Manzanillo los principales daños fueron causados por la intensidad de las corrientes al erosionar las paredes del canal, ocasionando que algunas casas cayeran completamente al agua.

En Cuyutlán, Col. Recepcionista del Hotel San Rafael: Antes del temblor había muchas olas y después del temblor el mar se quedó tétricamente quieto, luego se retiró y finalmente subió hasta alcanzar las patas de las sillas que están sobre la playa. Después el mar bajó y subió varias veces, pero sin llegar tan alto como la primera vez.

Cuyutlán, Col. El tsunami llegó hasta las sillas que están en la parte superior de la playa. altura corregida = 2.7 m

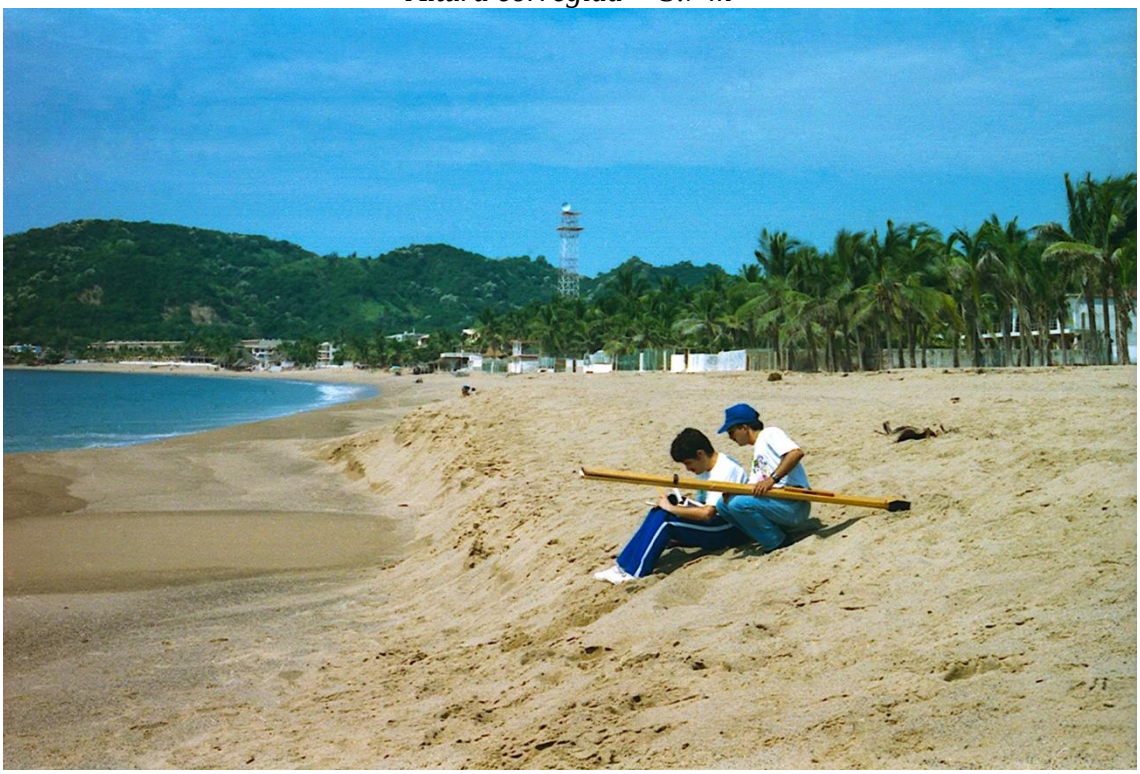
Barra de Navidad

En Barra de Navidad fuimos al malecón y entrevistamos a dos personas. Declararon que a ellos les dijeron que primero el mar se retiró y luego subió sobrepasando el malecón. Procedimos a tomar la primera lectura de inundación en la esquina que hace el malecón con la escollera de la entrada a la laguna costera. Medimos la altura desde el nivel del mar hasta el borde superior del muro de concreto del malecón. Encontramos arena húmeda en la cavidad de un monumento que está sobre el malecón, además de otras evidencias que sugieren que el mar sobrepasó al malecón con un metro de altura.

Entre Barra de Navidad y Melaque

Nos trasladamos a un punto de la Bahía de Navidad entre Barra de Navidad y Melaque para hacer la segunda medición. Entrevistamos a una persona que vive en una casa frente a la playa: Iba caminando por la playa rumbo a Barra de Navidad cuando sintió el terremoto y se regresó corriendo (3 km) a su casa y a la escuela para reunirse con su familia. El ya no estaba en la playa cuando se retiró el mar (como a los 15 minutos). Cuando llegó a su casa ya el mar se había metido como 10 m al patio de su casa. Esta persona nos dijo que durante el tiempo de huracanes las olas alcanzan a salpicar más adentro de lo que llegó el mar después del terremoto. En este lugar notamos que la playa estaba erosionada pero no preguntamos si fue por efecto del tsunami.

Barra de Navidad, Jal. El malecón está adoquinado pero no se observa porque quedó cubierto con arena. Estimamos que el agua pasó a un metro de altura sobre el muro de concreto del malecón. Altura corregida = 3.7 m



Entre Barra de Navidad y Melaque. El agua subió hasta el patio en donde están las palmeras del extremo derecho de la fotografía. Altura corregida = 5.1 m

Melaque

Melaque está situado en el extremo norte de la Bahía de Navidad y ahí desemboca un arroyo entre el extremo de la Bahía y el poblado. Entrevistamos al dueño de una palapa que está frente a la playa. Nos relató que el mar subió como a los 3 minutos del temblor inundando hasta el nivel del piso de la palapa y luego se retiró hasta donde está la boya (anclada a 2 m de profundidad y a 50 m de la orilla) llevándose las mesas y las sillas. Inmediatamente trataron de recuperar los muebles que el mar se llevó y que quedaron tirados en la playa, pero se vieron sorprendidos por una segunda inundación que llegó más alto que la primera, alcanzando la altura de la calle. Nunca había subido tan alto. Afirma que el mar subió y bajó otras dos veces, pero sin alcanzar el piso de la palapa.

Entrevistamos también a una persona que durante el terremoto estaba barriendo el piso de una palapa vecina a la anterior. Esta persona nos relata que al sentir el terremoto se salió a la playa pensando que la palapa podría caerse y se sorprendió al ver que después del sismo el mar se estaba "hinchando" y se salió hasta el nivel de la calle sin subir a la banqueta. Él y sus familiares trataron de rescatar las mesas y sillas que quedaron sobre la playa, pero el mar se volvió a "hinchar" subiendo menos que la primera vez. La persona que entrevistamos nos dijo que un señor estaba pescando con tarraya frente a su palapa, con el agua a la cintura, y pereció debido al embate del tsunami. También nos mostró la planicie que está al lado del arroyo, mencionando que el mar inundó la planicie arrastrando consigo a unos "campers" hasta el paredón que está a 300 m de la playa. Comentó que el Oceanólogo Rafael García de Quevedo estaba en el poblado y alertó a los moradores sobre el tsunami. (Rafael trabaja para la Universidad de Guadalajara).

Melaque, Jal. Las sillas y las mesas fueron arrastradas mar adentro por el tsunami. Altura corregida = 4.5 m

Cuastecomate

Cuastecomate es una pequeña bahía situada al norte de Bahía de Navidad. En este lugar el tsunami derribó las paredes y las bardas de algunas casas situadas frente a la playa y de otras situadas en la calle posterior a la playa. Un instalador de ventanas afirma que acudió a hacer reparaciones en el hotel "Royal Costa Azul", ubicado frente a la playa, midió las marcas que dejó el mar en las paredes del primer piso en donde el agua alcanzó una altura de 2 m. Las personas del lugar (trabajadores del hotel) afirmaron que inmediatamente después del temblor el mar bajó y luego subió, no como una ola, sino que se "hinchó" parejo y se salió una sola vez y a los 15 minutos el mar volvió a bajar. Al preguntarle a las personas lo que habían hecho después del terremoto nos dijeron que corrieron por una calle alejándose del hotel en dirección contraria a la playa y cuando regresaron vieron que el mar se había retirado. Nos hicieron notar un deslizamiento de tierra que ocurrió en la costa en un cerro al otro lado de la bahía. Dijeron que el agua entró a la bahía haciendo un remolino contrarreloj. Medimos la altura de inundación en las marcas que dejó el agua en el interior de una casa que está a 20 m de la playa y en las marcas que se encontraron en la calle de acceso a la playa a 150 m de la misma.

Cuastecomate, Jal. En el lado derecho de la fotografía aparece una persona señalando una de las marcas de inundación dentro de la casa que está a 30 m de la playa. En el lado izquierdo se puede apreciar una pared que fue derrumbada por el tsunami.
Altura corregida = 4.1 m

La Manzanilla

La Manzanilla es un poblado situado en el extremo sur de la Bahía Tenacatita. En este lugar notamos que todas las construcciones de la avenida principal, entre otras, fueron afectadas por el tsunami. Esa tarde entrevistamos al señor Josef K. Lehemen con domicilio conocido en La Manzanilla. Nos dijo

que estando en su casa, que se encuentra en una colina con vista al mar, vio todo lo que le pasó al mar durante el sismo y después del sismo. Relató que durante el sismo se vio como si saliera polvo del mar, también había polvo en las colinas por los deslizamientos de tierra, pero ese polvo no había llegado al mar. Después de unos 5 minutos del sismo el nivel del mar empezó a aumentar e inundó al poblado, las rocas que están en el mar frente a su casa fueron cubiertas totalmente por el agua. Cuando el mar se retiró quedó al descubierto el lecho marino hasta el pie de las rocas. Bajó de la casa y caminó por el lecho marino para tomarle fotografías. El mar empezó a subir muy rápido y tuvo que correr para no ser alcanzado por el agua, en la carrera perdió su cámara. Regresó al balcón de su casa y continuó tomando fotografías con otra cámara ya que el mar inundó por segunda ocasión al poblado, con menor altura que la primera vez. Después el mar bajó y subió unas 7 veces durante una hora u hora y media, pero sin inundar al poblado. Una profesora del lugar nos relató de un lanchero que venía navegando en el agua que entraba a la plaza y gritaba: “Corran que se está saliendo el mar”. Un vecino de la población indicó que la primera ola, la más alta, no dejó marcas porque el agua venía limpia y fueron 4 las veces que el mar subió.

En este poblado medimos la altura de inundación a lo largo de la calle perpendicular a la playa que pasa por el costado norte del quiosco.

La Manzanilla, Jal. El nivel del agua alcanzó hasta la altura del marco superior de la puerta de la casa y con esa altura invadió a todo el poblado.
Altura corregida = 3.8 m

Una playa entre La Manzanilla y Boca de Iguanas

Aproximadamente a medio camino entre La Manzanilla y Boca de Iguanas hay una desviación hacia un hotel que estaba en demolición antes del 9 de octubre. Encontramos arena de playa en todos los lavamanos del primer piso del hotel y los trabajadores nos aseguraron que esa arena no estaba ahí antes del tsunami. Tratamos de encontrar marcas de inundación en las paredes, pero no fue posible determinarlas

con seguridad por lo que decidimos buscar indicios de inundación en la vegetación de un escarpe de arena contiguo al hotel. Encontramos claramente las marcas que dejo el tsunami sobre el escarpe de arena. Estamos seguros de que el agua sobrepaso el escarpe, pero no pudimos determinar la máxima altura. Creemos que el agua sobrepasó el escarpe con algunos 20 cm. Procedimos a tomar la altura del escarpe como altura de inundación indicando que al menos el agua llegó hasta ese nivel. Un señor nos indicó que el agua llegó hasta el camino como a 200 m de la playa.

Entre La Manzanilla y Boca de Iguanas. El agua sobrepasó el escarpe de arena. Altura corregida = 4.2 m

Boca de Iguanas

Boca de Iguanas está situada en el norte de la Bahía de Tenacatita en la desembocadura de un arroyo. El tsunami causó daños severos al hotel de Don Armando Ruiz, un hotel de dos pisos que está situado a 50 m de la playa y que según Don Armando no fue dañado por el sismo sino por el tsunami. El tsunami socavó los cimientos del hotel y lo dejó inclinado. Gracias a que el mar se retiró primero fue que nosotros nos salvamos, afirma Don Armando.

El agua sobrepasó y derribó las paredes de 3 m de altura de una alberca que está detrás del hotel. Medimos la altura de inundación en las marcas que dejó el agua en el techo de palma de una casa frente a la playa. Las puntas de las palmas estaban dobladas hacia el interior de la casa por encima del muro y encontramos arena sobre el muro. Algunos “trailers y motorhomes” de turistas que estaban estacionados como a 50 m de la playa fueron arrastrados por el mar a una distancia de 400 m tierra adentro siguiendo el cauce del arroyo. También era de notarse la erosión ya que las raíces de muchas palmeras estaban al descubierto.

Boca de Iguanas, Jal. El nivel del agua llegó a la base del techo de palma. Altura corregida = 5.1 m

Boca de Iguanas, Jal. La construcción de concreto corresponde a lo que fue el hotel de Don Armando Ruíz. Este hotel fue dañado principalmente por el tsunami al grado que es necesaria su demolición. Se ve inclinado y efectivamente lo está porque el tsunami le socavó los cimientos. Altura corregida = 5.1 m

El Tecuán

El Tecuán es una playa abierta situada al norte de la Bahía de Tenacatita a la que se llega por un camino vecinal pavimentado que entronca con la carretera MEX-200 entre Agua Caliente, Jal. y Puente Arroyo, Jal. En este lugar tomamos como altura de inundación el nivel de las marcas que dejó el tsunami en la vegetación. La parte superior de la playa tiene una altura de 3 m sobre el nivel del mar. El agua alcanzó una distancia horizontal de 70 m tierra adentro. Esta playa es un lugar óptimo para tomar núcleos de sedimento con el fin de analizar la posible estratificación cruzada producto de este tsunami.

El Tecuán, Jal. El tsunami llegó hasta el borde de la vegetación. La playa está en una costa abierta y tiene una pendiente pronunciada. La altura de la berma es ≈3 m.
Altura corregida = 3.8 m

Punta Careyes

Testimonio de empleados del Club-Med Careyes (testigos): El mar avanzó por la cañada dentro del hotel unos 150 m. Afectó el club de playa, donde el agua llegó hasta el nivel de las mesas de cocina (0.95m). El mar primero se quedó quieto, después subió un poco, a continuación, bajó hasta dejar en seco el muelle del hotel y finalmente subió entrando por el canal. El personal del hotel ya había limpiado el lodo y la arena que dejó el tsunami, por lo que tomamos la altura de inundación al nivel de las mesas que nos dijeron habían sido cubiertas por el agua.

Por el camino

De paso por La Manzanilla: Un infante de marina afirmó que en Puerto Vallarta el movimiento del mar fue más leve.

De paso por Punta Careyes: Gerente del Club-Med. El tsunami se llevó toda la arena de la playa de bolsillo. Arrastró tambos de concreto para bolsas de basura. Tiene una buena colección de fotos que puso a nuestra disposición.

Punta Careyes, Jal. Hotel Club Med. Fotografía tomada desde una de las mesas que fueron alcanzadas por el agua. Altura corregida = 3.5 m

Chamela

Junto a la capilla costera (una palapa) el mar alcanzó la cresta de la berma. La esposa de un pescador (testigo) que vive en una choza de madera frente al mar afirma que el agua llegó hasta el corral de las aves en el patio. Ella y su madre estaban en su casa al momento del temblor. Se asustaron, pero permanecieron en calma. De acuerdo con su testimonio, a los 15 minutos se percataron que el nivel del mar estaba subiendo. Tenían una panga varada en la playa más arriba de lo que normalmente sube el agua, pero ya el nivel del agua la había alcanzado. La señora fue a mover la embarcación. Después de 3 o 4 minutos, cuando llegó a la playa, el agua había rebasado la panga y notó que el mar seguía subiendo muy rápidamente. Fue entonces que se asustó y regresó a la casa. Desde ahí observó que el mar había sobrepasado la playa y comenzaba a inundar el cauce del arroyo metiéndose tierra adentro. Con la ayuda de un vecino lograron salir en automóvil hasta la carretera y esperaron ahí cerca del puente del río Chamela que cruza el arroyo a un kilómetro de la costa. Ahí pudieron ver que el agua llegó y se retiró en dos ocasiones.

Chamela (norte), Jal. El tsunami llegó hasta la parte superior de la playa. Altura corregida = 3.2 m

San Mateo

Trabajador del complejo Turístico Villa Polinesia (testigo): el mar desbordó el andador costero. El tsunami comenzó en cuanto acabó la fase trepidatoria del sismo. El mar subió y bajó tres veces. Él no se quedó a ver el mar.

San Mateo, Jal. El tsunami desbordó el andador costero. Altura corregida = 4.9 m

San Mateo, Jal. El andador costero (mismo que en la fotografía anterior) visto desde la playa Note la pendiente pronunciada de la playa

Pérula

Encargado de casa frente al mar (testigo): El mar inundó el jardín de la casa que cuida. Su casa propia está a media cuadra hacia adentro y no se inundó. El agua penetró al estero que ahí desemboca.

Restaurantes en el extremo de la bahía (testigos): Una señora afirma que fue a la casa de sus vecinos a comentar el sismo y cuando se dio cuenta el agua ya había penetrado a la suya (hecha de madera, palma, cartón, etc.). El agua no llegó a la calle, pero subió alrededor de medio metro dentro de su casa. Se llevó el mobiliario de su palapa-restaurante, incluida una hielera llena de pescado. No dañó la estructura de la palapa.

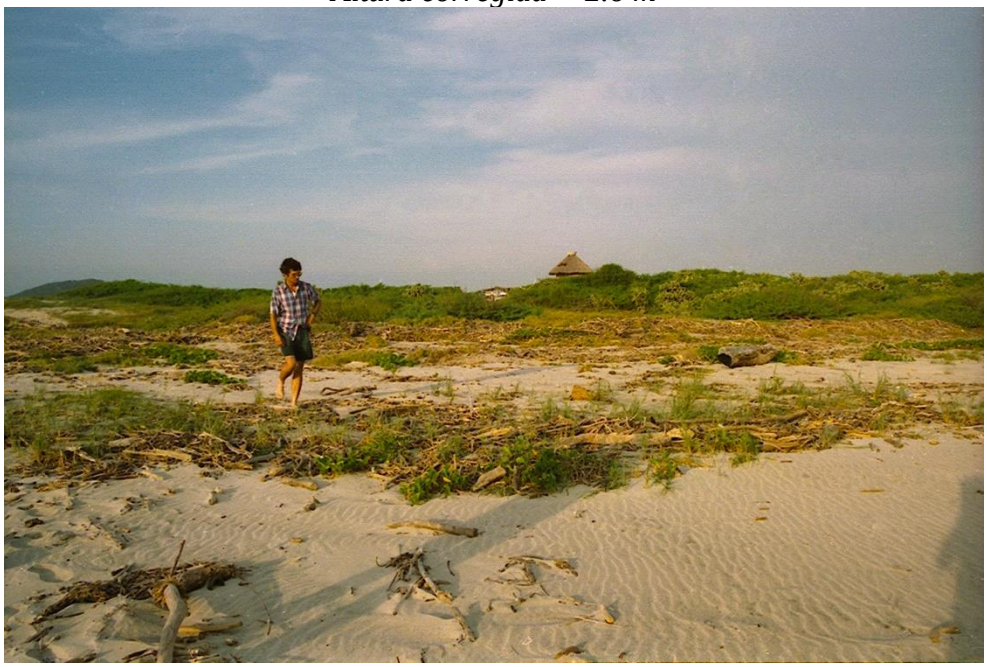
En el último restaurante (construcción de material) junto a la boca de otro estero el agua socavó los cimientos y se llevó la losa del piso, derribando parte del techo de palma. El agua subió 20 cm sobre el piso del local. Esa altura coincide con unas marcas en la vegetación del escarpe próximo, donde está una imagen religiosa que fue cubierta por el agua.

También entrevistamos a un pescador que estaba en el mar, alejado 10 km de la costa, cuando sucedió el temblor: “mi compañero y yo nos dimos cuenta que estaba temblando porque la panga empezó a vibrar de una manera muy diferente a lo normal. Está temblando, le dije, y en seguida volteamos haca la costa. Se escuchaba un ruido no muy fuerte pero profundo, venía de abajo, de todos lados. En la costa no se miraba movimiento fuera de lo normal. A lo lejos, apareció una columna de humo, y entonces decidimos ir a la orilla. Cuando nos dirigimos hacia allá, cómo 8 minutos después del temblor, el mar se quedó a plomo, completamente plano, como espejo, de una forma muy extraña. Seguimos hacia la orilla y unos 20 minutos después del temblor vimos que el mar se estaba hinchando. Nos asustamos y decidimos ir hacia afuera nuevamente, entonces vimos que la hinchazón venia de afuera, o sea el burro de la ola. Quisimos regresar nuevamente a tierra, pero el burro nos rebasó. Así que estar en el mar era lo más seguro y así lo hicimos. Permanecimos alrededor de 2 horas ahí, esperando que se tranquilizara. Después fuimos a la orilla, el mar se encontraba ya en su lugar, pero mi casa y mis pertenencias se las había llevado el mar.

Punta Chalacatepec

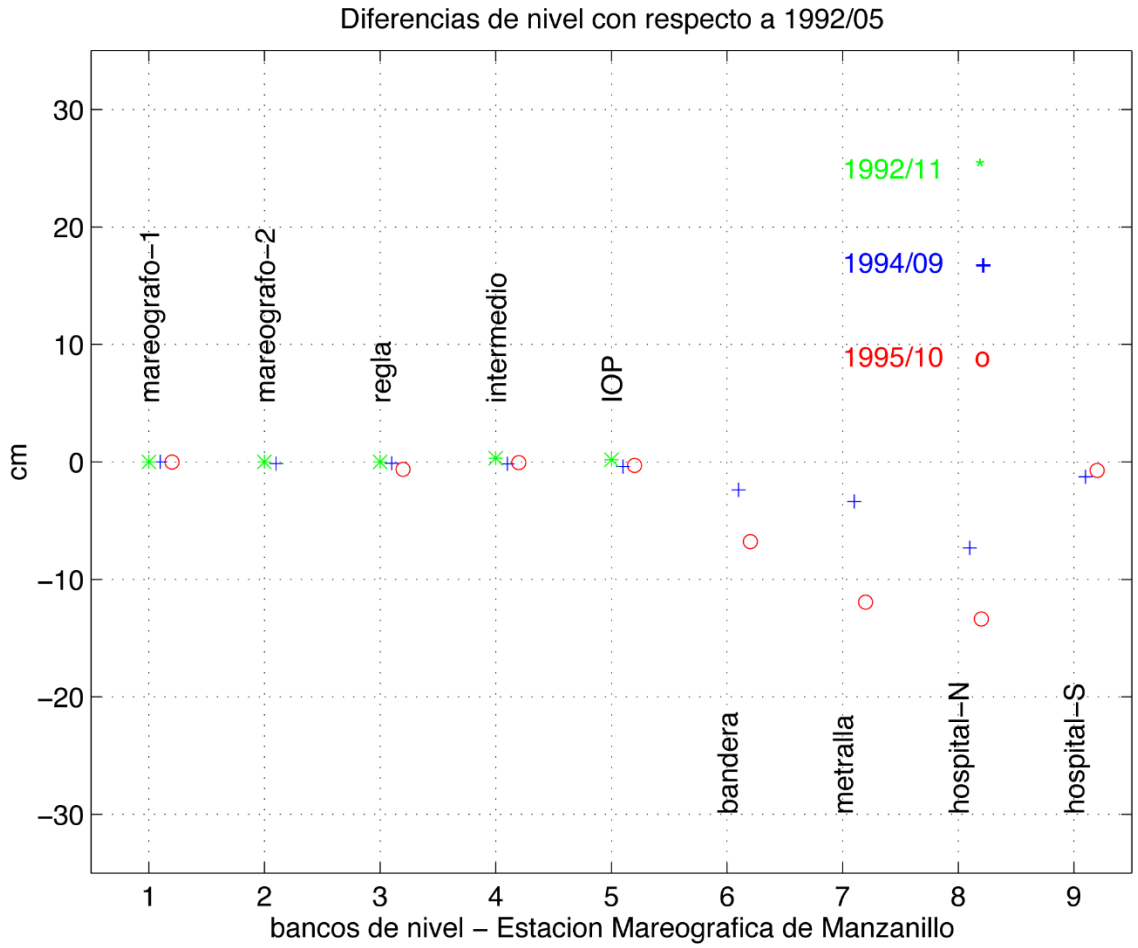
Campo tortuguero del INE. El Oc. Elmer Gotró (testigo) estaba en el campo cuando ocurrió el sismo. El mar se tranquilizó y se retiró, después subió hasta los corrales de las tortugas, cuando el mar volvió a subir Elmer se refugió en el dormitorio de la estación (el punto más alto de los alrededores). Afirma que el tsunami penetró más en las costas que miran al suroeste que en las que dan al noroeste (la del campo tortuguero).

Punta Chalacatepec (norte), Jal. Corral de las tortugas hasta donde llegó el agua. Altura corregida = 2.6 m

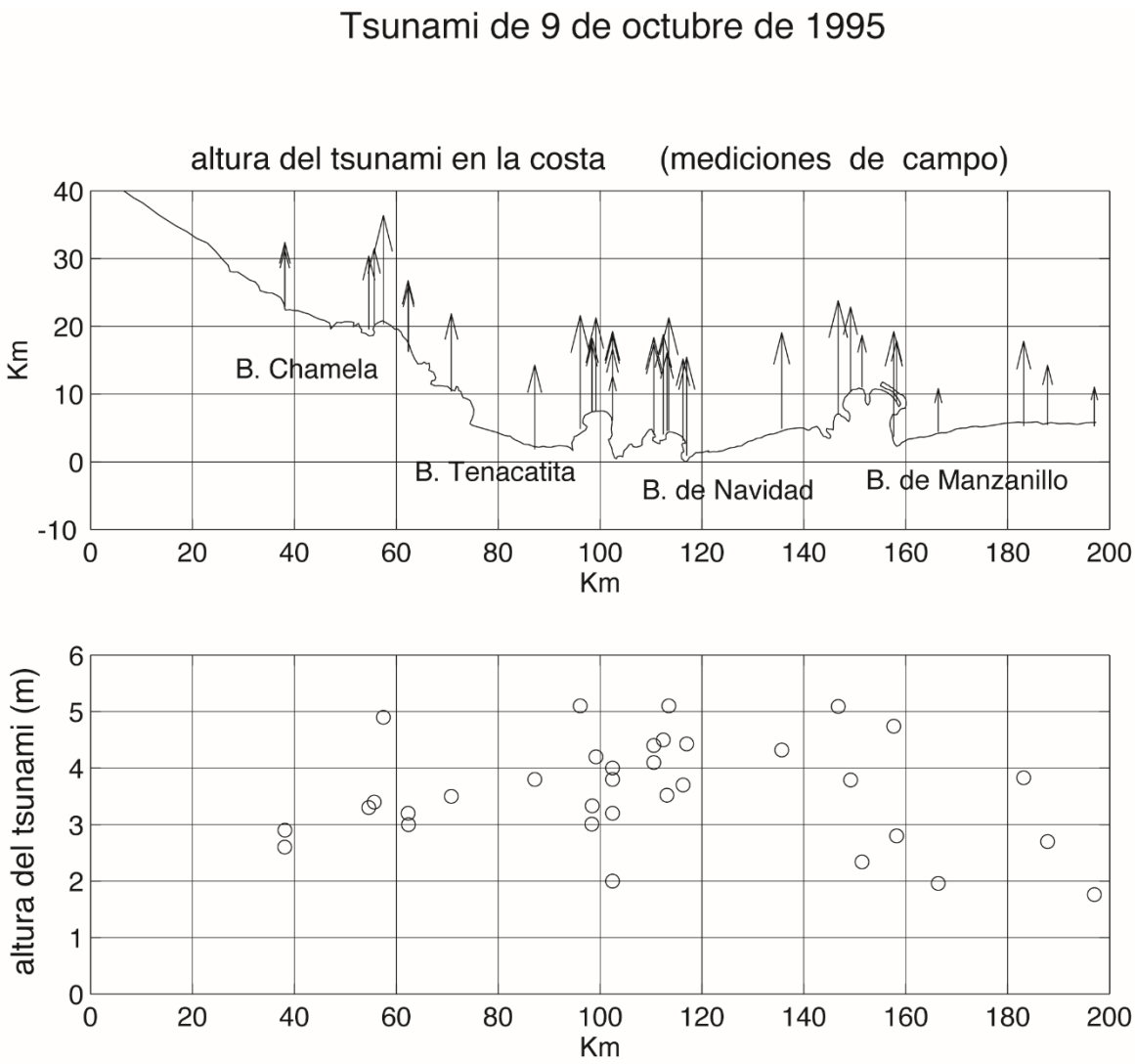


Punta Chalacatepec (sur), Jal. El agua llegó hasta la vegetación de las dunas. Altura corregida = 2.9 m

RESUMEN DE LA NIVELACIÓN DIFERENCIAL DE LOS BANCOS DE NIVEL DE LA ESTACIÓN MAREOGRÁFICA DE MANZANILLO, COL.



Los bancos de nivel correspondientes a la bandera, la metralla, al hospital N. y al hospital S., se han estado hundiendo debido a que están en una zona de relleno. Los demás bancos de nivel han permanecido estables.



Las flechas sobre la línea de costa en el panel superior de la figura indican las alturas de inundación. Los círculos en el panel inferior de la figura indican la altura de inundación correspondiente, respecto al nivel del mar en el momento del tsunami.

RESUMEN DE ALTURAS DE UNUNDACIÓN DEL TSUNAMI DEL 9 DE OCTUBRE DE 1995

HORA (GMT)	Hora de la medición en días Julianos de 1995 (tiempo del meridiano de Greenwich).
ALTURA (MEDIDA)	Altura de inundación en metros con respecto al nivel del mar en el momento de la observación.
NIVEL DEL MAR (NBMI)	Nivel del mar en metros con respecto al Nivel de Bajamar Media Inferior en el momento de la observación.
ALTURA (NBMI)	Altura de inundación con respecto al Nivel de Bajamar Media Inferior.
ALTURA (CORREGIDA)	Altura de inundación con respecto al nivel del mar a la hora del sismo.
DISTANCIA	Distancia horizontal en metros desde la playa hasta el punto en donde se midió la altura de inundación.
LOCALIDAD	Nombre del lugar en donde se hicieron las observaciones.
CLAVE	Abreviación del nombre del lugar en donde se hicieron las observaciones tal como aparece en la libreta de campo.

CLAVE	*LAT (N)*		*LONG (W)*		*HORA (GMT)*	*ALTURA*	*NIVEL DEL MAR*	*ALTURA*	*ALTURA*	*DISTANCIA*	*LOCALIDAD*
	GRAD	*MIN*	*GRAD*	*MIN*	*(DÍA JULIANO)*	*(MEDIDA)*	*(NBMI)*	*(NBMI)*	*(CORREGIDA)*	*HORIZONTAL*	
MNZA	19	11.920	104	41.091	292.7063	04.10	0.55	04.65	03.7	017.0	BARRA DE NAVIDAD (el agua sobrepasó la barra de arena)
MNZB	19	13.330	104	42.110	292.7396	05.50	0.47	05.97	05.1	025.0	Entre BARRA de NAVIDAD y MELAQUE (marcas de agua en la vegetación)
MNZC	19	42.800	104	13.347	292.8063	05.00	0.42	05.42	04.5	041.0	MELAQUE (el agua subió hasta el nivel de la primera calle)
MNZD1	19	13.763	104	43.761	292.8965	04.50	0.53	05.03	04.1	030.0	CUASTECOMATE (marcas de agua dentro de una casa)
MNZD2	19	13.763	104	43.761	292.8882	04.81	0.51	05.32	04.4	156.0	CUASTECOMATE (marca de agua en la calle de acceso a la playa)
MNZE1	19	16.851	104	47.294	293.7326	04.31	0.45	04.76	03.8	048.0	LA MANZANILLA (marca de agua dentro de una casa frente a la playa)
MNZE2	19	16.851	104	47.294	293.7326	03.66	0.45	04.11	03.2	077.0	LA MANZANILLA (marca de agua en el hotel frente a la plaza)
MNZE3	19	16.851	104	47.294	293.7326	04.42	0.45	04.87	04.0	141.0	LA MANZANILLA (marca de agua dentro del templo)
MNZE4	19	16.851	104	47.294	293.7326	04.30	0.45	04.75	03.8	172.0	LA MANZANILLA (marca de agua en la puerta de metal detrás del templo)
MNZP	19	18.293	104	48.583	293.8493	04.78	0.33	05.11	04.2	030.0	Entre la Manzanilla y Boca de Iguanas (marca de agua sobre el escarpe de arena)
MNZF	19	17.820	104	50.840	293.8833	05.65	0.41	06.06	05.1	015.0	BOCA DE IGUANAS (marca de agua en el techo de la casa)
MNZG	19	18.592	104	56.173	293.9625	04.02	0.68	04.70	03.8	070.0	EL TECUAN (marca de agua en la vegetación)
CAREY	19	26.750	104	02.220	294.7604	04.10	0.34	04.44	03.5	115.0	PUNTA CAREYES (marca de agua en las mesas del hotel Club Med)
CHAM2	19	31.650	105	04.950	294.8333	03.70	0.21	03.91	03.0	015.0	CHAMELA SUR (marca de agua en el patio de una casa frente a la playa)
CHAM1	19	31.680	105	04.970	294.8215	03.90	0.21	04.11	03.2	030.0	CHAMELA NORTE (restos de algas sobre la berma)
POLYN	19	34.830	105	06.370	294.8785	05.60	0.26	05.86	04.9	040.0	SAN MATEO (el agua subió al andador costero)
PERU1	19	35.280	105	07.280	294.8993	04.00	0.33	04.33	03.4	040.0	PERULA SUR (marcas de agua en los cercos de las casas)
PERU2	19	35.180	105	08.030	294.9306	03.80	0.45	04.25	03.3	040.0	PERULA NORTE (marcas de agua en los cercos de las casas)
CHALA2	19	40.870	105	15.530	294.9896	03.10	0.70	03.80	02.9	100.0	PUNTA CHALACATEPEC SUR (restos de algas en las dunas)
CHALA1	19	40.880	105	15.530	294.9826	02.80	0.68	03.48	02.6	060.0	PUNTA CHALACATEPEC NORTE (restos de algas en las dunas)

Referencias

A

Anderson J. G., Bodin P., Brune J. N., Prince J., Singh S. K., Quaas R., Onate M. (1986). Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake. *Science*, *233*(4768), 1043-1049. https://doi.org/10.1126/science.233.4768.1043.

Archivo General de las Indias, Sevilla, España, MP-MEXICO, 585. (1782). Plano del nuevo muelle construido sobre pilotes en el puerto de Acapulco, por Rafael Vasco, castellano interino.

Arreaga-Vargas P., Ortiz M., Farreras S. F. (2005). Mapping the possible tsunami hazard as the first step towards a tsunami resistant community in Esmeraldas, Ecuador. In K. Satake (Ed.) *Tsunamis. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 23*, pp. 203-215, Springer, Dordrecht, 2005. ISBN: 10 1-4020-3326-5, 343 p. https://doi.org/10.1007/1-4020-3331-1_12.

Aste Evans A. A. (2003). Optimización del sistema regional de alerta de tsunamis en Perú mediante la detección temprana y simulación numérica. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.77 pp.

B

Barros González, G. (1961). El maremoto del 22 de mayo de 1960 en las costas de Chile. 2da Edición, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaiso, Chile. 72 pp.

Biblioteca Nacional de Francia, Departamento de mapas y planos, IFN-53123336. (1791). Plano del Puerto de Acapulco.

Bodin P., Klinger T. (1986). Coastal uplift and mortality of intertidal organisms caused by the September 1985 Mexico earthquakes. *Science*. 1986 Sep 5; *233*(4768), 1071-1073. https://doi.org/10.1126/science.233.4768.1071.

C

Corona N., Ramírez-Herrera M. T. (2015). Did an underwater landslide trigger the June 22, 1932 tsunami off the Pacific coast of Mexico? *Pure and Applied Geophysics*, *172*(12), 3573-3587. https://doi.org/10.1007/s00024-015-1171-1.

Cumming Jorge L. (1933). Los terremotos de Junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. Universidad de México. Tomo VI, Nos. 31-32, pp. 68-104. https://www.revistadelauniversidad.mx/articles/20996990-012a-4a1c-95cc-caaee592e027/los-terremotos-de-junio-de-1932-en-los-estados-de-colima-y-jalisco.

D

De Novo Colson P. (1885) *Viaje político-científico alrededor del mundo por las corbetas Descubierta y Atrevida al mando de los capitanes de navío D. Alejandro Malaspina y Don José de Bustamante y Guerra, desde 1789 á 1794.* De la Viuda é Hijos de Abienzo, Madrid, 1885. 728 p.

Dengler L., Borrero J., Jaffe B., Okal E. A., Ortiz M., Titov V. (2003). Tsunami. *Journal of the Earthquake Engineering Research*, 19, 115-144. https://doi.org/10.1193/1.1737247.

E

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-21). El Origen De Los Recientes Temblores en México. AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5312, pp. 1. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-04). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5295, pp. 6. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-05). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5296, pp. 3. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-08). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5299, pp. 2. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-19). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5310, pp. 2-3. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-23). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5314, pp. 1-2. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1932-06-24). AÑO XV, TOM. LV, Núm. 5315, pp. 1-2. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1985-09-20). AÑO LXVIII, TOM. CCLXIII, Núm. 24327, pp. 1. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

EL INFORMADOR, Diario Independiente. (1985-09-22). AÑO LXVIII, TOM. CCLXIII, Núm. 24329, pp. 2. Recuperado de: Hemeroteca El Informador.

El Siglo de Torreón*, Periódico Regional*. (1985-09-20). AÑO 64, Núm. 201, pp. 7. Recuperado de: Hemeroteca El Siglo de Torreón.

F

Fajardo-Ortiz G., Salcedo-Álvarez R. A. (2006). Explorando la historia de los hospitales de Acapulco, Guerrero, México. *Cirugía y cirujanos*, *74*(6), 505-508. ISSN: 0009-7411. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66274615.

Farreras S., Ortiz M., Alcalá G. (2003). Riesgo de Maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán. Medidas de Prevención. El Colegio de México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, El Colegio de Michoacán. México. 1ra edición. ISBN: 970-679-111-6.

Fernández M., Ortiz M., Mora R. (2004). Tsunami hazards in El salvador. In William I. R., Julian J. B., Dina L. L., Michael J. C., Jon J. M. (Eds), Natural Hazards in El Salvador (pp. 435-444)., The Geological Society of America, U.S.A. https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.435.

Fernández M., Ortiz M. (2007). Earthquake triggered tsunamis. In Bundschuh, J., Alvarado, G.E. (Eds.),

Central America, Two Volume Set: Geology, Resources and Hazards (pp. 1257-1265). Taylor and Francis, London, UK. ISBN: 978-0-415-41647-4.
Filonov A.E., (1997). Researches Study Tsunami generated by Mexican Earthquake. Eos, Trans. AGU., 78,3,21. https://doi.org/10.1029/97EO00014.

G

García Acosta V., Suárez Reynoso G., (1996). Los sismos en la historia de México. Tomo I. México DF, México: Fondo de Cultura Económica. ISBN: 968-16-4874-9.

Garza Martínez V. (2012). Medidas y caminos en la época colonial: expediciones, visitas y viajes al norte de la Nueva España (siglos XVI-XVIII). *Fronteras de la Historia*, *17*(2), 191-219. ISSN: 2027-4688. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83328417007.

GAZETA DE MEXICO del martes 1 de mayo de 1787. (1787). TOM. II, Núm. 34, pp. 341-348. Recuperado de: Biblioteca Nacional de España.

GAZETA DE MEXICO del martes 17 de abril de 1787. (1787). TOM. II, Núm. 32, pp. 325-332. Recuperado de: Biblioteca Nacional de España.

Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura F. (1997). IUGG/IOC Time Project, in IOC Manuals and Guides No. 35, UNESCO, Paris.

Goycoechea F. (1810). Carta dirigida al virrey de la Nueva España. Archivo General de la Nación. México. Instituciones Coloniales/Indiferente Virreinal/Cajas 4000-4999/Caja 4096. In Suter M. (2018). The Historical Seismicity of the Loreto Region, Baja California Peninsula, Mexico (1684–1878). *Seismological Research Letters*, *89*(1), 202-209. https://doi.org/10.1785/0220170204.

H

Herd D. G., Youd T. L., Meyer H., Person W. J., Mendoza C. (1981). The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 december 1979. *Science*, *211*(4481), 441-445. https://doi.org/10.1126/science.211.4481.441.

I

Iglesias A., Singh S. K., Pacheco J. F., Alcántara L., Ortiz M., Ordaz M. (2003). Near-trench Mexican earthquakes have anomalously low peak accelerations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *93*(2), 953-959. Doi: 10.1785/0120020168. https://doi.org/10.1785/0120020168

INEGI (2009). Cronología de la estadística en México (1521-2008). Aguascalientes, México. Editorial INEGI. ISBN 978-970-13-5161-1.

J

Juárez García H., Guerrero J.J., Gama A., Whitney R.A., Vera R., Hurtado F., De Hidalgo N. (1996). Geological Aspects of the October 9, 1995, Manzanillo, Mexico, Earthquake. *Earthquake Engineering Research Institute (EERI) Special Earthquake Report*.

Juárez García H., Whitney R.A., Guerrero J.J., Gama A., Vera R., Hurtado F. (1997). The October 9, 1995 Manzanillo, Mexico Earthquake. *Seismological*

Research Letters, *68*(3), 413-425. https://doi.org/10.1785/gssrl.68.3.413.

K

Kanamori H., McNally K. C. (1982). Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *72*(4), 1241-1253.

Kanamori H., Cipar J. J. (1974). Focal process of the great Chilean earthquake May 22, 1960. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *9*(2), 128-136. https://doi.org/10.1016/0031-9201(74)90029-6.

Kelleher J. A. (1972). Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions. *Journal of Geophysical Research*, *77*(11), 2087-2103. https://doi.org/10.1029/JB077i011p02087.

Kostoglodov V., Pacheco J. (1999). Un catálogo de sismos moderados y grandes ocurridos en México durante el siglo XX, Poster: 100 años de sismicidad en México, Instituto de Geofísica, UNAM. http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html.

M

Mansinha L., Smylie D. E. (1971). The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, *61*(5), 1433–1440.

Mapoteca Manuel Orozco y Berra, CGF.GRO.M8.V5.0602. (1889). Lallier, E., Leyva, F., Una sección del plano Ciudad y puerto de Acapulco. Guerrero.

Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 26. (1789-1794). Bauzá, F., Vista del Puerto de Acapulco desde el alto del hospital de los Padres Hipólitos.

Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 44. (1789-1794). Suría, T., Vista de la Bahía y puerto de Acapulco, desde el alto de el Ospital de los Padres Ypolitos. Note que se ha conservado a la letra el título original de la obra.

Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 51. (1789-1794). Cardero, J., Vista del Puerto y parte de la Ciudad de Acapulco sacada desde su Hospital.

Museo Naval, Madrid, Ms.1726 – 74. (1789-1794). Brambila, F., Puerto de Acapulco.

N

Núnez-Cornú F. J., Ortiz M., Sánchez J. J. (2008). The great 1787 Mexican tsunami. *Natural hazards*, *47*(3), 569-576. https://doi.org/10.1007/s11069-008-9239-1.

O

Okal E. A., Borrero J. C. (2011). The tsunami earthquake of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations. *Geophysical Journal International*, *187*(3), 1443-1459. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05199.x.

Ortiz M., Bilham R. (2003). Source area and rupture parameters of the 31 December 1881 M_w= 7.9 Car Nicobar earthquake estimated from tsunamis recorded

in the Bay of Bengal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *108*(B4), 2215, https://doi.org/10.1029/2002JB001941.

Ortiz M., Farreras S. (1994). Numerical Simulation of the 19 September 1985 Michoacán, México Tsunami. AGU fall meeting abstracts. (Vol. 1994, pp. O32A-10)

Ortiz M., V. Kostoglodov, S.K. Singh, J. Pacheco (2000a). New constraints on the uplift of October 9, 1995 Jalisco-Colima earthquake (M_w 8) based on the analysis of tsunami records at Manzanillo and Navidad, México. *Geof. Int*., Vol., 39, Num. 4, pp 349-357. https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2000.39.4.245.

Ortiz M., S.K. Singh, V. Kostoglodov, J. Pacheco (2000b). Source areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0), as constrained by tsunami and uplift records. *Geof. Int*., Vol., 39, Num. 4, pp 337-348. https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2000.39.4.244.

Ortiz M., Singh S. K., Pacheco J., Kostoglodov V. (1998). Rupture length of the October 9, 1995 Colima-Jalisco Earthquake (M_w 8) estimated from tsunami data. *Geophysical Research Letters*, *25*(15), 2857-2860. https://doi.org/10.1029/98GL02059.

Ortiz-Huerta L. G. (2019). Far-field tsunami hazard assessment along the Pacific Coast of Mexico by historical records and numerical simulation. PART II: Tsunami-Induced currents in the Port of Ensenada, Baja California. *Pure and Applied Geophysics*, **177,** 1569–1581. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02319-9.

Ortiz-Huerta L. G., Ortiz M., García-Gastélum A. (2018). Far-field tsunami hazard assessment along the Pacific coast of Mexico by historical records and numerical simulation. *Pure and Applied Geophysics*, *175*(4), 1305-1323. https://doi.org/10.1007/s00024-018-1816-y.

P

Pacheco J., S. K. Singh, J. Domínguez, A. Hurtado, L. Quintanar, Z. Jiménez, J. Yamamoto, C. Gutiérrez, M. Santoyo, W. Bandy, M. Guzmán, V. Kostoglodov, G. Reyes, C. Ramírez (1997). The October 9, 1995 Colima-Jalisco, Mexico earthquake (M_w 8): An aftershock study and a comparison of this earthquake with those of 1932. *Geophysical Research Letters*, *24*(17), 2223-2226. https://doi.org/10.1029/97GL02070.

Plafker G. (1965). Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake. Science, 148(3678), 1675–1687. https://doi.org/10.1126/science.148.3678.1675.

Q

Quiceno A., Ortiz M. (2001). Evaluación del impacto de tsunamis en el litoral pacífico colombiano. Parte I (Región de Tumaco). *Boletín Científico CCCP (8)*. pp 5 – 14. https://doi.org/10.26640/01213423.8.5_14.

R

Rabinovich A. B. (2009). Seiches and harbor oscillations, Handbook of Coastal and Ocean

Engineering, ed. Kim, Y. C. (World Scientific, Singapore), pp. 193– 236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009.

Ramírez-Herrera M. T., Corona N., Castillo-Aja R. (2019). Revealing the source of the 27 August 1810 Loreto, Baja California, tsunami from historical evidence and numerical modelling. *Pure and Applied Geophysics*, *176*(7), 2951-2967. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02161-z.

Ramírez-Herrera M. T., Corona N., Ruiz-Angulo A., Melgar D., Zavala-Hidalgo J. (2018). The 8 September 2017 tsunami triggered by the M w 8.2 intraplate earthquake, Chiapas, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, *175*(1), 25-34. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1765-x.

S

Salazar J. (1989). *El maremoto de Cuyutlán, 1932*. Colima, México: Sociedad Colimense de Estudios Históricos, 1989.

Sánchez A. J., Farreras S. F. (1993). *Catálogo de tsunamis (maremotos) en la costa occidental de México*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Geophysical Data Center.

Sandoval F. J., Farreras S. F. (1993). On tsunami resonance of the Gulf of California. In *Tsunamis in the World* (pp. 107-119). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3620-6_9.

Secretaria de Agricultura y Fomento. (1922) Estado de Jalisco. Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos, México. 2a. Edición. Escala 1:100,000.

Secretaria de Agricultura y Fomento. (1926) Estado de Jalisco. Construyó y configuró, Ing. Santiago Seonlan. Dibujó y escribió: Mariano Dueñas. Escala 1:500,000. Proyección policónica de Llemand.

Singh S. K., Bazan E., Esteva L. (1980). Expected earthquake magnitude from a fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *70*(3), 903-914.

Singh S. K., Ponce L., Nishenko S. P. (1985). The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *75*(5), 1301-1313.

Soloviev S. L., Go CH. N. (1975). A Catalogue of Tsunamis on the Eastern Shore of the Pacific Ocean (1513-1968). Nauka Publishing House, Moscow, USSR, 204 pp. Can. Transl. Fish. Aquat. Sci. 5078, 1984.

Spaeth M. G., Berkman S. C. (1965). *The tsunami of March 28, 1964, as recorded at tide stations* (Vol. 33). US Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey.

Suárez G., Albini P. (2009). Evidence for great tsunamigenic earthquakes (M 8.6) along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *99*(2A), 892-896. https://doi.org/10.1785/0120080201.

T

Takahashi T., TakahashiT., Shuto, N., Imamura F., Ortiz M. (1995). Source models for the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, *144*(3), 747-767. https://doi.org/10.1007/BF00874393.

U

Utsu T., Seki A. (1954). A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock (in Japanese). J. Seism. Soc. Jap., 7, 233-240.

V

Valdivia O. L., Castillo A. M.R., Estrada T. M. (2012). Tsunamis en Jalisco, en: Geocalli. Cuadernos De Geografía, Universidad de Guadalajara, México. Año 13, No. 25, 105p. http://www.publicaciones.cucsh.udg.mx/pperiod/geocalli/volumenes/geo25.htm.

Vera H., García Acosta V. (coordinadores). (2011). *Metros, leguas y mecates: historia de los sistemas de medición en México*. México, CIESAS-CIDESI, 282 p. ISBN: 978-607-486-122-8 (CIESAS); ISBN: 978-607-95615-0-5 (CIDESI).

W

Wyss M. (1979). Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions. Geology 7, 336-340.

Z

Zaytsev O., Rabinovich A. B., Thomson, R. E. (2016). A comparative analysis of coastal and open-ocean records of the Great Chilean Tsunamis of 2010, 2014 and 2015 off the Coast of Mexico. Pure and Applied Geophysics, 173(12), 4139–4178. https://doi.org/10.1007/s00024-016-1407-8.

Zaytsev O., Rabinovich A. B., Thomson R. E. (2017). The 2011 Tohoku tsunami on the coast of Mexico: a case study. Pure and Applied Geophysics, 174(8), 2961–2986. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1593-z.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

PORTADA: Tsunami hipotético originado en la fosa de las islas Kuriles. Las mayores alturas del frente de onda del tsunami se indican hacia el color rojo. La propagación del frente del tsunami se indica con líneas de fase a intervalos de una hora.

https://www.cicese.edu.mx/