



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

LOS TSUNAMIS EN LAS COSTAS DE JALISCO.
UN ESTUDIO MULTI-PROXY

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MARÍA DEL ROCÍO CASTILLO AJA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. MARÍA TERESA RAMÍREZ HERRERA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, agosto de 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
POSGRADO EN GEOGRAFIA

LOS TSUNAMIS EN LAS COSTAS DE
JALISCO.
UN ESTUDIO MULTI-PROXY

Tesis que para obtener el grado de
DOCTORA EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A

María del Rocío Castillo Aja

Dra. María Teresa Ramírez-Herrera (Tutora principal)
Instituto de Geografía, UNAM

JURADO:

Dr. Avto Goguitchaichvili
Instituto de Geofísica, UNAM

Dra. María Luisa Machain Castillo
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Dr. Arturo Carranza Edwards
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Dr. José Omar Moncada Maya
Instituto de Geografía, UNAM

Dr. Marcelo Lagos
Universidad Pontificia Católica de Chile

Agosto, 2018

Para Luis y Natalia

Gracias por ser la luz que siempre ilumina mi camino

ÍNDICE

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
Capítulo 1.	18
Catálogo actualizado de Tsunamis en la Costa de Jalisco-Colima, México, Utilizando datos de Archivos Históricos	
<i>Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives.</i>	
Capítulo 2.	34
Huellas Sedimentarias y por Microfósiles Producidas por Sismos y Tsunamis Históricas en la Zona de Subducción de la Costa de Jalisco	
<i>Sedimentary and Microfossil imprint from Historical Earthquakes and Tsunamis, Jalisco Coast, Mexican Subduction.</i>	
Capítulo 3. Los Paleodepósitos de Tsunami en el Trópico Húmedo	77
Capítulo 4. Discusión y Conclusiones	113
Anexo 1	121
Anexo 2	136
Anexo 3	139
Anexo 4	145

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis fue realizado gracias al apoyo de recursos provenientes de los siguientes proyectos *Active Tectonic Deformation along the Pacific Coast of Mexico* (CONACYT -SEP Ciencia Básica Proyecto 129456), *Variaciones espaciales y temporales de deformación tectónica de la placa superior en el sector de Guerrero –zona de subducción mexicana* (PAIIT IN109117) y *Del Ciclo Sísmico a la Deformación Tectónica de Largo Plazo en el Antearco de la Zona De Subducción Mexicana* (CONACYT-SEP Ciencia Básica, 284365) cuya Responsable Técnica e Investigadora Principal es la Dra. María Teresa Ramírez-Herrera. Gracias al CONACYT por la beca de doctorado, a la UNAM y particularmente al Instituto de Geografía por abrirme sus puertas. Mi mayor agradecimiento es para con mi Tutora, la Dra. María Teresa Ramírez Herrera, por su generosidad, paciencia y apoyo irrestricto para mi formación, por mostrarme de lo que soy capaz siempre con rigor científico, lealtad y verdad. Al Dr. Omar Moncada, por su calidez y bonhomía; a los miembros de mi comité tutor, el Dr. Avto Goguitchaichvili por su objetividad y sabiduría, por sus comentarios siempre certeros; y a la Dra. María Luisa Machain Castillo, por abrirme las puertas del Laboratorio de Micropaleontología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y mostrarme el maravilloso mundo de los microfósiles. A Alejandro Rodríguez Ramírez por su paciencia y asesoría. A los miembros de mi jurado: Dra. María Luisa Machain Castillo, Dr. Avto Goguitchaichvili, Dr. José Omar Moncada Maya, Dr. Arturo Carranza Edwards y al Dr. Marcelo Lagos López.

A Dios, por el soplo de la vida que me permite iniciar cada día. A Luis y Natalia, por siempre estar a mí lado apoyándome en todo, sin ustedes no lo hubiera podido lograr. A mi familia, nuclear y extendida, por todo el apoyo a lo largo de estos años durante los cuales hemos compartido penas y alegrías, a los que ya no están. A mi papá, quien siempre me inculcó el valor de hacer bien las cosas, a mi mamá por su fé a prueba de todo, y a mis hermanas por compartirme su fortaleza. A Martha y Salvador, gracias por acogerme y compartir tantos momentos juntos. También dedico este trabajo a mi Universidad de Guadalajara, mi casa durante los últimos 25 años.

A todos mis amigos, los antiguos y los nuevos. Selene, gracias por tu amistad.

Guadalajara, Jalisco, julio de 2018

RESUMEN

En México el peligro por tsunami ha sido subestimado, bajo la premisa de que no han ocurrido grandes desastres ocasionados por tsunamis. Sin embargo, a raíz de los grandes sismos y tsunamis del Océano Índico en 2004, de Chile en 2010 y Tohoku (Japón) en 2011, se ha tomado conciencia de la gran capacidad destructiva de estos fenómenos naturales. A nivel mundial el registro de los tsunamis ocurridos, la evaluación de su origen y de los impactos en la costa, se ha realizado a partir de tres fuentes de información, complementarias entre sí: las mediciones instrumentales, los datos históricos, arqueológicos o etnográficos y el registro geológico. A fin de cuentas, y para efectos de mitigación del riesgo por tsunami, es de gran importancia conocer la frecuencia temporal y las magnitudes máximas alcanzadas, con el fin de estimar escenarios de riesgos orientados a la planificación territorial y protección civil.

La costa del Pacífico Mexicano, localizada en una zona de subducción tectónicamente compleja que ha generado grandes sismos ($M \geq 8.0$) y en donde han ocurrido grandes tsunamis: Costa de Guerrero-Oaxaca (1787), Cuyutlán, Colima (1932), Tomatlán, Jalisco (1932) y La Manzanilla, Jalisco (1995). Aunque la mayor parte de los tsunamis son producidos por sismos, los deslizamientos también son responsables de tsunamis inusualmente grandes con daños muy localizados (*p. ej.* Cuyutlán en 1932). La sección de costa Jalisco-Colima, dada su condición tectónica resulta un área con potencial para buscar evidencias, tanto en el registro histórico como en el geológico, de tsunamis ocurridos en el pasado. Sin embargo, también plantea retos como la dificultad para encontrar registros históricos y geológicos completos.

La investigación que aquí se presenta, primero aborda la búsqueda de evidencias de sismos y tsunamis en el registro histórico a partir del análisis crítico de los catálogos de sismos y tsunamis existentes, y recurriendo a la verificación en fuentes primarias. Como resultado se obtiene un catálogo actualizado de sismos tsunamigénicos para la costa Jalisco-Colima para los últimos 500 años. La segunda parte presenta los resultados obtenidos a partir de la búsqueda del registro geológico en una laguna de la Costa de Jalisco. En este caso se aplicaron técnicas de análisis geomorfológico, estratigráfico, granulométrico y de microfósiles y se complementó con información magnética y arqueomagnética, resultando las evidencias de tsunami del 3 de junio de 1932 parecen ser las más significativas. Finalmente, a la luz de las experiencias obtenidas se presenta un análisis de los trabajos realizados para la búsqueda de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales húmedas dando cuenta de los problemas enfrentados y los recursos utilizados para solucionarlos.

Palabras clave: tsunami, paleodepósito, paleosismología, proxy, Jalisco, Colima, sismo tsunamigénico

ABSTRACT

Since great tsunamis are not frequent in the western Pacific Mexican coast, the tsunami threat has been underrated. However, the damage produced by great tsunamis in the Indic Ocean (2004), Chile (2011) and Japan (2011) have raised awareness about their massive destruction power. In the search of information about their occurrence in the past, scientist use 3 kind of sources, that complement to each other: instrumental measurements, historical, archaeological or ethnographic data, and geoarchives. Estimation of temporary frequency and expected maximum magnitude for tsunamis are inputs to model risk scenarios that will feed land use management and safeguard population programs.

The Mexican Pacific coast is located in a complex subduction zone prone to big earthquakes ($M \geq 8.0$) that have already triggered large tsunamis in the past, e. g. Guerrero-Oaxaca (1787), Cuyutlán, Colima (1932), Tomatlán, Jalisco (1932), La Manzanilla, Jalisco (1995). Tsunamis are usually produced by earthquakes, but underwater landslides can also generate unusual large tsunamis with focused damage (*e.g.* Cuyutlán in 1932). Given the Jalisco-Colima coast tectonic context it seems to be a good place to search for historical and sedimentary evidences of tsunamis occurred in the past, although the completeness of such records could be challenging.

We present results from an historical research that was conducted applying critical analysis to earthquake and tsunami catalogs supported by original documents. As a result we built an updated catalog of tsunamigenic earthquakes for the Jalisco-Colima coast covering the last 500 yr. Secondly we found sedimentary evidences for earthquakes and tsunamis preserved in the geologic record in a lagoon located in the Jalisco coast. We applied to multi-proxy approach where geomorphology, stratigraphy, grain size and microfossils were analyzed; which were complemented with paleomagnetic and archaeomagnetic data. Resulting that, until now, the tsunami of the June 3rd of 1932 is the largest recorded for the last 500 yr. Finally, experience gained led us to review the research about tsunami paleodeposits in humid tropical areas, with the aim to identify if there are shared problems and which techniques and approaches were reported to deal with them.

Key words: tsunami, paleodeposit, paleoseismology, proxy, Jalisco, Colima, earthquake, tsunamigenic

INTRODUCCION

El 26 de diciembre de 2004 un sismo $M_w=9.1$ produjo el tsunami más destructivo en la historia de la humanidad que afectó las costas del Océano Indico y, en cuestión de horas, cobró la vida a cerca de 230,000 personas (National Geophysical Data Center, 2015). Este fenómeno representó un hito para la ciencia de los tsunamis, que en décadas anteriores había desarrollado las aproximaciones teóricas y metodológicas para el estudio de los depósitos de tsunami con los estudios pioneros de Atwater (1987), Minoura (1991), Atwater y Moore (1992) y Dawson y Shi (2000). El gran tsunami de 2004 constituyó un inmenso laboratorio que hizo posible para los especialistas identificar los patrones de depósito (e.g. Hori *et al.*, 2007; Hawkes *et al.*, 2007; Jankaweia *et al.*, 2008; Yawsangratt *et al.*, 2009; Kokocinski *et al.*, 2009; Jagodzinsky *et al.*, 2009; Goto *et al.*, 2012), las transformaciones geomorfológicas (e.g. Paris *et al.*, 2007), el comportamiento hidrodinámico de los flujos (e.g. Morton *et al.*, 2008; Fujino *et al.*, 2010; Sawai *et al.*, 2009a), las estructuras sedimentarias resultantes (e.g. Morton *et al.*, 2008) y su tafonomía en años posteriores (e.g. Singarasubramanian, *et al.*, 2009; Nichol y Kench, 2008; Szczucinski, 2012); pero sobre todo permitió atestiguar la destrucción y los impactos en el paisaje y la población. La magnitud del desastre hizo tomar conciencia al mundo sobre el significado de la palabra tsunami, y a la comunidad científica y de tomadores de decisiones sobre la necesidad de contar con cronologías amplias, más allá de los tiempos históricos; para lo cual se tiene que completar el registro histórico e incorporar el registro geológico para aquellas zonas con potencial tsunamigénico. Lamentablemente el siglo XXI fue testigo de otros dos grandes tsunamis producidos por sismos $M \geq 8.8$ que dejaron huellas tanto en el territorio como en la vida de sus habitantes: Chile (2010) y Japón (2011), que también cuestionaron los paradigmas del momento y consolidaron las metodologías utilizadas para su estudio.

La construcción de escenarios de riesgo confiables orientados a la protección de la población en áreas costeras ha impulsado la realización de estudios que abarcan períodos de tiempo cada vez más amplios. Con la incorporación de un número creciente de proxies se intenta incrementar la confianza en la identificación y datación de los eventos, para construir cronologías confiables y mejorar la certidumbre en la estimación de los períodos de recurrencia así como las probables magnitudes para este tipo de fenómenos, caracterizados por su alta energía y capacidad destructiva. La construcción de cronologías sólidas, que incluyan tanto tiempos históricos como prehistóricos, parte de una primera aproximación histórica a través de los catálogos, que se utilizan como punto de partida; en tanto que el registro geológico brinda otro tipo de datos ampliando la ventana temporal (Atwater *et al.*, 2013; Ely *et al.*, 2014; Goto *et al.*, 2015; Dura *et al.*, 2015; Komatsubara *et*

al., 2008; Sawai *et al.*, 2009b). Mediante un proceso de retroalimentación y con ayuda de técnicas de datación se llega a una cronología integrada que brinda información cuantitativa y cualitativa que finalmente pueda alimentar la construcción de modelos de inundación y la estimación de las condiciones de exposición y vulnerabilidad de una población dada ante un escenario concreto.

Existen zonas del planeta que, por sus condiciones sísmicas y tsunamigénicas, han sido ampliamente estudiadas como Japón, Alaska, la costa oeste de Norte América, el Mediterráneo, Chile, Nueva Zelanda y otras que recientemente se han añadido, producto del tsunami de 2004, como Tailandia, Indonesia e India (Bourgeois, 2009). En principio todas las zonas de subducción podrían producir un sismo que cuando menos produzca un tsunami local o regional, de ahí el creciente interés por estudiarlas. Tal es el caso de México (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005, 2007, 2012 y 2014; Černý *et al.*, 2016; Corona *et al.*, 2015), Centro América y El Caribe (Scheffers, 2004; Highman y Bourgeois, 2008; Atwater *et al.*, 2012), Perú (Spiske *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2016) Taiwán y el Mar de China (Lau *et al.*, 2015; Yu *et al.* 2016), o el Golfo Pérsico (Pilarczyk *et al.*, 2011).

1. El área de estudio

La costa del Pacífico Mexicano se localiza enfrente de la Zona de Subducción Mexicana formada por la frontera entre las placas de Rivera y de Cocos que subducen por debajo de la placa Norteamericana (Figura 1). Esta zona es tectónicamente activa e históricamente ha producido al menos 181 sismos ($M \geq 6.5$) de los cuales 53 han sido reportados como tsunamigénicos (Figura 1). El sismo histórico de mayor magnitud ($M=8.6$) ocurrió frente a la costa de Oaxaca (Suárez y Albini, 2009; Nuñez-Cornú *et al.*, 2008) y produjo un tsunami que inundó cuando menos 6 km tierra adentro.

Se considera que la placa Rivera es una microplaca (DeMets y Traylen, 2000), más joven, que subduce por debajo de la de Cocos a una velocidad de convergencia menor y con un ángulo más agudo; sin embargo, su interacción con las placa de Cocos y Norteamericana continúa siendo objeto de estudio (Suárez *et al.*, 2013; Singh y Mortera, 1991; Singh y Suárez, 1988; Ruff y Miller, 1994; Bandy *et al.*, 1995; Kostoglodov y Bandy, 1995). Las tres placas producen un contexto tectónico complejo con potencial tsunamigénico, de lo cual dan cuenta los tsunamis producidos por los sismos ($M \geq 8.0$) de 1932 y 1995.

El estado de Jalisco se localiza entre las coordenadas extremas $22^{\circ} 44' 16''$ y $56' 12''$ de Latitud norte, y $105^{\circ} 21' 11''$ y $101^{\circ} 26' 59''$ Longitud oeste en la placa Norteamericana, enfrente de la placa Rivera, conforma la porción septentrional de la Zona de Subducción Mexicana en donde se produjo el sismo de mayor magnitud ($M=8.2$) registrado instrumentalmente en México (Singh *et al.*, 1985, Pacheco *et al.*, 1997), el cual generó un tsunami que penetró al menos 8 km tierra adentro siguiendo el cauce

del Río Tomatlán (Valdivia *et al.*, 2011 y 2012; Castillo-Aja y Ramírez-Herrera, 2017).

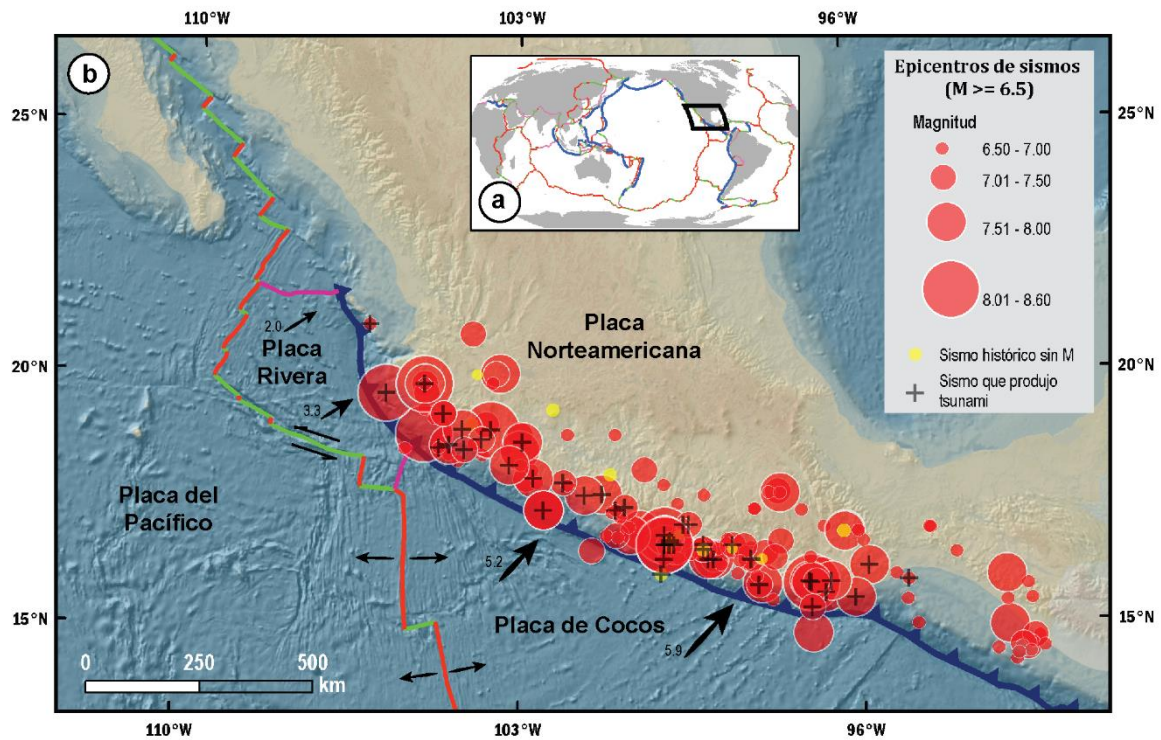


Figura 1. a. Configuración tectónica global, con línea roja se representa el límite de rift continental o el arco de expansión oceánica; con línea verde la falla transformante continental u oceánica; con línea magenta el límite de convergencia continental u oceánica y con línea azul dentada la zona de subducción. b. El mapa muestra la distribución de los sismos ($M \geq 6.5$) y tsunamis ocurridos en la zona de subducción mexicana, ocurridos entre 1540 y 2015, registrados en catálogos a partir de fuentes históricas y/o instrumentales. Claramente se aprecia la concentración espacial en torno a la Zona de Subducción Mexicana. La localización de los epicentros fue compilada a partir de: National Geophysical Data Center (2015), Instituto de Geofísica (2015), Global Earthquake Model (2013), Pacheco y Kostoglodov (1999), International Seismological Centre (2015), European-Mediterranean Seismological Centre (2015) y Castillo-Aja y Ramírez-Herrera (2017). Se muestran los límites de placas utilizando los mismos colores que en a. Las flechas indican la dirección del movimiento y con número está expresada la velocidad de convergencia en cm/año (DeMets y Stein, 1990)

De acuerdo con Núñez-Cornú *et al.*, (2004 y 2011) en la costa de Jalisco-Colima se localizan dos brechas sísmicas. El Gap Vallarta, que abarca desde Bahía de Banderas en el norte hasta Chalacatepec hacia el sur, comprende la parte final estimada de la zona de ruptura para el sismo del 3 de junio de 1932 (Singh *et al.*, 1985) y que no rompió durante el sismo del 9 de octubre de 1995 (Melbourne *et al.*, 1997; Ortiz *et al.*, 1998; Ortiz *et al.*, 2000). Más al sur, en la zona correspondiente al Graben El Gordo Núñez-Cornú *et al.* (2004, 2011) identifican al Gap Colima, sin embargo, otros autores (Singh *et al.*, 2003; Andrews *et al.*, 2011; Yagi *et al.*, 2004) argumentan que tal gap ya fue llenado por el sismo del 22 de enero de 2003. Esta porción de la Zona de Subducción Mexicana,

incluido el segmento de la costa de Michoacán, se caracteriza por presentar una menor frecuencia de sismos pequeños y medianos, en comparación con el segmento Guerrero-Oaxaca (Nishenko y Singh, 1987). A partir del análisis de una serie de parámetros de los sismos ocurridos el 3 y 18 de junio de 1932, se estima un período de recurrencia de 77 años (Singh *et al.*, 1985) para grandes sismos, el cual se amplía hasta 126 cuando se involucran en el cálculo los datos de sismos históricos (Nishenko y Singh, 1987). Por lo que el período de recurrencia para un sismo $M \geq 8.0$ con una ruptura de al menos 200 km para esta sección de la costa del Pacífico Mexicano estaría entre 77 a 126 años, rango que debe ser tomado con reserva dada la amplitud temporal y la calidad de los datos involucrados en su estimación. Las áreas de ruptura producidas por grandes sismos históricos se estiman a partir de mapas de isosistas derivados de la descripción de los daños. En áreas escasamente pobladas, como la de la costa de Jalisco, esta tarea es complicada, de ahí la necesidad de revisar críticamente tanto la información como las fuentes contenidas en los catálogos históricos de sismos y tsunamis.

El hecho de que el catálogo más reciente de tsunamis para México se haya elaborado en 1993 (Sánchez y Farreras) nos permitió cuestionar si la referencia de los eventos y su descripción estaban totalmente agotadas para la zona de estudio, y plantearnos la necesidad de indagar primero en cada fuente citada para, posteriormente, buscar nuevas fuentes que pudieran brindar información aún no referenciada, con el objetivo de reconstruir de la manera más precisa el patrón espacial de los daños y la posibilidad de que los grandes sismos de subducción hubieran producido algún tsunami. Lo anterior, en la conciencia de que la información histórica tiende a disminuir en cantidad y detalle en función de la antigüedad. Sin embargo, no podemos perder de vista que el alcance de la información histórica no va más allá del siglo XVI, que para fenómenos cuyos ciclos son geológicos todavía resulta insuficiente.

Es decir, por más detallados y antiguos que sean los datos históricos no podrían cubrir más de 500 años, por lo que se hacía necesaria la investigación de estos fenómenos desde otro enfoque, es aquí que la búsqueda de evidencias sedimentarias en el registro geológico resulta de gran utilidad. Mediante la aplicación de técnicas de paleo-sismología es posible buscar la firma sedimentaria de sismos y tsunamis ocurridos en un pasado más remoto, en aquellos lugares en donde los registros históricos no están disponibles; o incluso en sitios para los que ya se cuenta con información histórica, la evidencia geológica permite una mejor aproximación a la comprensión del fenómeno. Sin embargo, la preservación de estas evidencias depende de factores externos como la magnitud del fenómeno, la existencia de un espacio de alojamiento, las condiciones ambientales como el clima (precipitación y temperatura), la vegetación y la geomorfología de la zona costera, entre otras.

2. Planteamiento de la investigación

Cabe preguntarse si en la costa de Jalisco ocurrieron eventos sísmicos suficientemente grandes para imprimir su huella en el registro geológico y/o en el registro histórico y si las condiciones ambientales han permitido su preservación.

Por lo tanto, los objetivos de la presente investigación son: 1) Construir una cronología a partir del análisis crítico de fuentes históricas primarias; y, 2) Buscar en el registro geológico las evidencias sedimentarias, para grandes sismos y tsunamis ocurridos en la costa del Jalisco.

Para lograrlo se establecen las siguientes actividades:

- Revisar los catálogos existentes y completar el catálogo de sismos tsunamigénicos para el estado de Jalisco, registrados en documentos históricos recurriendo a las fuentes originales
- Seleccionar los sitios para buscar la evidencia geológica a partir de las evidencias históricas y de sus condiciones morfológicas y geomorfológicas, con el fin de identificar aquellos con mayor potencial para alojar y conservar evidencias geológicas de la ocurrencia de grandes sismos y/o tsunamis
- Realizar el levantamiento y caracterización estratigráfica y geomorfológica de los sitios seleccionados
- Aplicar una aproximación multi-proxy al estudio de las evidencias encontradas con el fin de caracterizarlas de la mejor manera posible.
- Interpretar los resultados obtenidos

El capítulo 1 presenta, partir de revisión documental, un catálogo actualizado, soportado por evidencia documental, de eventos sísmicos históricos producidos en la zona de subducción que han generado tsunamis de diferentes tamaños, el más grande de ellos ocurrido el 3 de junio de 1932.

El capítulo 2 presenta los resultados obtenidos en el sitio Las Salinas (Careyes, Jalisco) en donde fue posible localizar evidencia en el registro geológico. Muestra los resultados del núcleo Jal-04 para el cual se realizó la interpretación estratigráfica, con ayuda de las determinaciones granulométricas y de susceptibilidad magnética, y apoyado con la caracterización de microfósiles (foraminíferos y ostrácodos). A partir de la aplicación de estos proxies fue posible identificar tres eventos probablemente producidos por deformaciones cósmicas en esta sección de la costa del Pacífico, y la evidencia de al menos 2 tsunamis, ocurridos en tiempos históricos.

El trabajo de investigación se desarrolló mediante un ejercicio de ida y vuelta entre el análisis y la reflexión a partir de los referentes teóricos y la experiencia obtenida en el campo y en el laboratorio,

lo que permitió confrontar ambos. Es por esto que, el Capítulo 3 presenta una revisión de la literatura publicada relacionada con los estudios de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales húmedas. La pregunta que guió nuestra reflexión: ¿acaso las condiciones ambientales propias de las zonas tropicales húmedas representan un reto adicional para la identificación de paleodepósitos de tsunami?, y ¿qué tipo de herramientas y soluciones se reportan en este tipo de estudios? Finalmente el capítulo 4 de presenta una discusión del trabajo a la luz de los resultados encontrados que contribuya con una agenda de investigación a futuro. El presente trabajo mejora el conocimiento que se tiene sobre la dinámica sísmica y los tsunamis ocurridos en esta sección de la costa del Pacífico Mexicano.

Referencias

- Andrews, V., Stock, J., Ramírez Vázquez, C. A., & Reyes-Dávila, G. (2011). Double-difference Relocation of the Aftershocks of the Tecomán, Colima, Mexico Earthquake of 22 January 2003. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9), 1331–1338. <https://doi.org/10.1007/s00024->
- Atwater, B. F. (1987). Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, 236(4804), 942–944.
- Atwater, B.F., y Moore, A.L., 1992, A tsunami 1000 years ago in Puget Sound, Washington: *Science*, v. 258, p. 1614-1617.
- Atwater, B. F., ten Brink, U. S., Buckley, M., Halley, R. S., Jaffe, B. E., López-Venegas, A. M., Reinhardt, E.G., Tuttle, M.P., Watt, S. y Wei, Y. (2012). Geomorphic and stratigraphic evidence for an unusual tsunami or storm a few centuries ago at Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 51–84. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9622-6>
- Atwater, B. F., Cisternas, M., Yulianto, E., Prendergast, A. L., Jankaew, K., Eipert, A. A., Warnakulasuriya, I.S.F., Tejakusuma, I., Schiappacasse, I, y Sawai, Y. (2013). The 1960 tsunami on beach-ridge plains near Maullín, Chile: Landward descent, renewed breaches, aggraded fans, multiple predecessors. *Andean Geology*, 40(3), 393–418. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n3-a01>
- Bandy, W. L., F. Michaud, J. Burgois, T. Calmus, J. Dymont, C. A. Mortera-Gutiérrez, J. Ortega-Ramírez, B. Pontoise, J.-Y. Royer, B. Sichler, Sosson, M., Rebolledo-Vieyra, M., Bigor-Cormier, B., Díaz-Molina, O., Hurtado-Artunduaga, A. D., Pardo-Castro, G. y Trouillard-Perrot, C.. (2005). Subsidence and strike-slip tectonism of the upper continental slope off Manzanillo, Mexico, *Tectonophysics* 398, 115–140, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.01.004>
- Bourgeois, J. (2009). Geologic effects and records of tsunamis. *The sea*, 15, 53–91.
- Castillo-Aja, R., y Ramírez-Herrera, M. T. (2017). Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives. *Seismological Research Letters*, 88(1), 144–158. <https://doi.org/10.1785/0220160133>
- Černý, J., Ramírez-Herrera, M.-T., Bógalo, M.-F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A. C. (2016). Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast. *International Geology Review*, 58(3), 342–357. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1075230>

- Corona, N., y 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>
- Dawson, A. G., y Shi, S. (2000). Tsunami deposits. *Pure and applied geophysics*, 157(6–8), 875–897.
- DeMets, C., & Stein, S. (1990). Present-day Kinematics of the Rivera Plate and Implications for Tectonics in Southwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13), 21931–21948.
- DeMets, Charles, y Traylen, Stephen. (2000). Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle. *Tectonophysics*, 318, 119–159.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B. P., Ely, L. L., Nelson, A. R., Wesson, R. L., y Pilarczyk, J. E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 113, 93–111. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.10.015>
- Ely, L. L., Cisternas, M., Wesson, R. L., y Dura, T. (2014). Five centuries of tsunamis and land-level changes in the overlapping rupture area of the 1960 and 2010 Chilean earthquakes. *Geology*, 42(11), 995–998.
- European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) Worldwide earthquakes with M4.0+ Disponible en: <http://www.emsc-csem.org/#2>, consultado: noviembre, 2015
- Fujino, S., Naruse, H., Matsumoto, D., Sakakura, N., Suphawajruksakul, A., y Jarupongsakul, T. (2010). Detailed measurements of thickness and grain size of a widespread onshore tsunami deposit in Phang-nga Province, southwestern Thailand: A widespread onshore tsunami deposit. *Island Arc*, 19(3), 389–398. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2010.00730.x>
- Global Earthquake Model (2013) Global Historical Earthquake Archive- GHEA Global Historical Earthquake v1.0 released on 2013-06-25. Disponible en: <http://www.emidius.eu/GEH/map.php>, consultado: noviembre, 2015
- Goto, K., Takahashi, J., y Fujino, S. (2012). Variations in the 2004 Indian Ocean tsunami deposits thickness and their preservation potential, southwestern Thailand. *Earth, Planets and Space*, 64(10), 923–930. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.08.019>
- Goto, T., Satake, K., Sugai, T., Ishibe, T., Harada, T., y Murotani, S. (2015). Historical tsunami and storm deposits during the last five centuries on the Sanriku coast, Japan. *Marine Geology*, 367, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.05.009>
- Hawkes, A. D., Bird, M., Cowie, S., Grundy-Warr, C., Horton, B. P., Shau Hwai, A. T., Law, L., Macgregor, C., Nott, J., Ong, J.E., Rigg, J., Robinson, R., Tan-Mullins, M., Sa, T. T., Yasin, Z., and Aik, L. W. (2007). Sediments deposited by the 2004 Indian Ocean Tsunami along the Malaysia–Thailand Peninsula. *Marine Geology*, 242(1–3), 169–190. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.02.017>
- Higman, B., y Bourgeois, J. (2008). Deposits of the 1992 Nicaragua Tsunami. En *Tsunamiites* (pp. 81–103). Elsevier.
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawuttikul, N., y Patanakanog, B. (2007). Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: An example of two transects along the western coast of Thailand. *Marine Geology*, 239(3–4), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.01.005>
- Instituto de Geofísica de la UNAM (2015) Sismos de México. Disponible en: <http://www.sismohistoricos.org/index.html>, consultado: noviembre, 2015
- International Seismological Centre ISC-GEM (2013) ISC-GEM Catalogue, versión 1.0, 31 Jan 2013. Disponible en: <http://www.isc.ac.uk/iscgem/>, consultado: noviembre, 2015

- Jagodziński, R., Sternal, B., Szczuciński, W., y Lorenc, S. (2009). Heavy minerals in 2004 tsunami deposits on Kho Khao Island, Thailand. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(1), 103–110.
- Jankaew, K., Atwater, B. F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, M. E., y Prendergast, A. (2008). Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455(7217), 1228–1231. <https://doi.org/10.1038/nature07373>
- Kokocinski, M., Szczucinski, W., Zgrundo, A. y Ibragimow, A. (2009). Diatom Assemblages in 26 December 2004 Tsunami Deposits from Coastal Zone of Thailand as Sediment Provenance Indicators. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(1), 93–101.
- Komatsubara, J., Fujiwara, O., Takada, K., Sawai, Y., Aung, T. T., y Kamataki, T. (2008). Historical tsunamis and storms recorded in a coastal lowland, Shizuoka Prefecture, along the Pacific Coast of Japan. *Sedimentology*, 55(6), 1703–1716. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00964.x>
- Kostoglodov, V., y W. Bandy (1995). Seismotectonic constrains on the convergence rate between the Rivera and North American plates, *J. Geophys. Res.* 100, no. B9, 17,977–17,989.
- Kostoglodov, V. y Pacheco, F.J. (1999) Catálogo de los sismos más fuertes de México (M>6.5) en 100 años de sismicidad en México. Instituto de Geofísica, UNAM. Disponible en: ¹ <http://usuarios.geofisica.unam.mx/Vladimir/sismos/100%F1os.html> , consultado: noviembre, 2015
- Lau, A. Y. A., Terry, J. P., Switzer, A. D., y Pile, J. (2015). Advantages of beachrock slabs for interpreting high-energy wave transport: Evidence from Ludao Island in south-eastern Taiwan. *Geomorphology*, 228, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.010>
- Melbourne, T., Carmichael, I., DeMets, C., Hudnut, K., Sanchez, O., Stock, J., Suarez, G. y Webb, F. (1997). The geodetic signature of the M8.0 Oct. 9, 1995, Jalisco subduction earthquake. *Geophysical Research Letters*, 24(6), 715-718.
- Minoura, K., y Nakaya, S. (1991). Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan. *The Journal of Geology*, 99(2), 265–287.
- Morton, R. A., Goff, J. R., y Nichol, S. L. (2008). Hydrodynamic implications of textural trends in sand deposits of the 2004 tsunami in Sri Lanka. *Sedimentary Geology*, 207(1–4), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.03.008>
- National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Significant Earthquake Database. National Geophysical Data Center, NOAA. [doi:10.7289/V5TD9V7K](https://doi.org/10.7289/V5TD9V7K), disponible en <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1> , consultado: noviembre, 2015
- Nichol, S. L., y Kench, P. S. (2008). Sedimentology and preservation potential of carbonate sand sheets deposited by the December 2004 Indian Ocean tsunami: South Baa Atoll, Maldives: Tsunami sand sheets. *Sedimentology*, 55(5), 1173–1187. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00941.x>
- Nishenko, S. P., & Singh, S. K. (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2095–2114.
- Núñez-Cornú, F. J., Reyes-Dávila, G. A., López, M. R., Gómez, E. T., Camarena-García, M. A., & Ramírez-Vazquez, C. A. (2004). The 2003 Armería, México earthquake (Mw 7.4): mainshock and early aftershocks. *Seismological Research Letters*, 75(6), 734–743.
- Nuñez-Cornu, F., Ortiz, M., y Sánchez, J. J. (2008). The great 1787 Mexican tsunami. *Natural Hazards*, 47, 569–576.
- Núñez-Cornú, F. J., Rutz-López, M., Márquez-Ramírez, V., Suárez-Plascencia, C., & Trejo-Gómez, E. (2011). Using an Enhanced Dataset for Reassessing the Source Region of the 2003 Armería, Mexico

- Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9), 1293–1302.
<https://doi.org/10.1007/s00024-010-0178-x>
- Ortiz, M., Singh, S. K., Pacheco, J., & Kostoglodov, V. (1998). Rupture length of the October 9, 1995 Colima-Jalisco earthquake ($M \sim w$) estimated from tsunami data. *Geophysical research letters*, 25, 2857–2860.
- Ortiz, M., Kostoglodov, V., Singh, S. K., & Pacheco, J. (2000). New constraints on the uplift of October 9, 1995 Jalisco-Colima earthquake (M. *Geofísica Internacional*, 39(4), 349–357.
- Pacheco, J., Singh, S.K., Domínguez, J., Hurtado, A., Quintanar, L., Jiménez, Z., Yamamoto, J., Gutiérrez, C., Santoyo, M., Bandy, W., Guzmán, M., y Kostoglodov, V. (1997) The October 9, 1995 colim-Jalisco, Mexico earthquake (M_w 8): An aftershock study and comparison of this earthquake with those of 1932. In *Geophysical Research Letters*, 24(17), 2223-2226.
- Paris, R., Cachão, M., Fournier, J., y Voldoire, O. (2010). Nannoliths abundance and distribution in tsunami deposits: example from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga (northwest Sumatra, Indonesia). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 16(1), 109–118.
<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7865>
- Pilarczyk, J. E., Reinhardt, E. G., Boyce, J. I., Schwarcz, H. P., y Donato, S. V. (2011). Assessing surficial foraminiferal distributions as an overwash indicator in Sur Lagoon, Sultanate of Oman. *Marine Micropaleontology*, 80(3–4), 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2011.06.001>
- Ramirez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards, A., Morales, E., y Metcalfe, S. (2007). Sedimentary record of late-Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*, 17(8), 1211–1220.
<https://doi.org/10.1177/0959683607085127>
- Ramírez-Herrera, M.-T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernandez, A. C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I. y Quintana, P. (2012). Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology*, 139–140, 360–371.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.002>
- Ramírez-Herrera, M.-T., Corona, N., Lagos, M., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Goff, J., Chagué-Goff, C., Machain, M.L., Zawadzki, G.J., Carranza-Edwards, A., Lozano, S. y Blecher, L. (2014). Unearthing earthquakes and their tsunamis using multiple proxies: the 22 June 1932 event and a probable fourteenth-century predecessor on the Pacific coast of Mexico. *International Geology Review*, 56(13), 1584–1601. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951977>
- Ruff, L., y A. D. Miller (1994). Rupture process of large earthquakes in the northern Mexico subduction zone, *Pure Appl. Geophys.* 142, no. 1, 101–171.
- Sánchez, A. J., & Farreras, S. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México* (Vols. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50). Boulder, CO.: United States Department of Commerce
- Sawai, Y., Jankaew, K., Martin, M. E., Prendergast, A., Choowong, M., y Charoentitirat, T. (2009a). Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean tsunami at Phra Thong Island, Thailand. *Marine Micropaleontology*, 73(1–2), 70–79.
<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.07.003>
- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M., Nasu, H., Okamura, Y., Satake, K., Thomson, K.H., Matsumoto, D., Fuji, Y., Komatsubara, J. y Aung, T. T. (2009b). Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1). <https://doi.org/10.1029/2007JB005503>

- Scheffers, A. (2004). Tsunami imprints on the Leeward Netherlands Antilles (Aruba, Curaçao, Bonaire) and their relation to other coastal problems. *Quaternary International*, 120(1), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.015>
- Singh, K., y F. Mortera (1991). Source time functions of large Mexican subduction earthquakes, morphology of the Benioff zone, age of the plate, and their tectonic implications, *J. Geophys. Res.* 96, no. B13, 21,428–21,501, <https://doi.org/10.1029/91JB02047>
- Singh, S. K., Ponce, L., y 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.
- Singh, S., y G. Suárez (1988). Regional variation in the number of aftershocks ($m_b > 5$) of large, subduction-zone earthquakes ($M_w > 7.0$), *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78, no. 1, 230–242.
- Singh, S. K., Pacheco, J. F., Alcántara, L., Reyes, G., Ordaz, M., Iglesias, A., Alcocer, S.M., Gutierrez, C., Valdés, C., Kostoglodov V., Reyes, C., Mikumo, T., Quaas, R. y Anderson, J.G. (2003). A preliminary report on the Tecomán, Mexico earthquake of 22 January 2003 (M_w 7.4) and its effects. *Seismological Research Letters*, 74(3), 279–289.
- Singarasubramanian, S.R., Mukesh, M.V., Manoharan, K., Seralathan, P., Sujatha, K. y Bakkiaraj, D. (2009). Geomorphological and Sedimentological Changes During and After the December-2004 Indian Ocean Tsunami Near the Vellar River and the M.G.R. Island Area of the Central Tamil Nadu Coast, India. *Science of Tsunami Hazards*, 28(1), 1–8.
- Spiske, M., Piepenbreier, J., Benavente, C., Kunz, A., Bahlburg, H., y Steffahn, J. (2013). Historical tsunami deposits in Peru: Sedimentology, inverse modeling and optically stimulated luminescence dating. *Quaternary International*, 305, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.02.010>
- Suarez, G., y 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>
- Suárez, G., S. H. Jaramillo, y W. Bandy (2013). Relative motion between the Rivera and North American plates determined from the slip direction of earthquakes, *Pure Appl. Geophys.* 170, 2163–2172, <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0667-9>
- Szczuciński, W. (2012). The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand. *Natural Hazards*, 60(1), 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>
- Valdivia, L., Castillo-Aja, M. d., y Estrada-Trejo, M. (2011). Elements for an historical review of the 3 June, 1932 tsunami on the coast of Jalisco, Mexico. *2011 Fall Meeting, AGU Abstracts*. San Francisco: AGU.
- Valdivia, L., Castillo, M. d., y Estrada, M. (2012). La Historia No Contada del Tsunami del 3 de junio de 1932 que golpeó las Costas del Municipio de Tomatlán, Jalisco. *Geocalli. Cuadernos de Geografía* (25), 13-100.
- Yagi, Y., Mikumo, T., Pacheco, J., & Reyes, G. (2004). Source rupture process of the Tecomán, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, determined by joint inversion of teleseismic body-wave and near-source data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(5), 1795–1807.
- Yawsangratt, S., Szczucinski, W., Chaimanee, N., Jagodzinski, R., Lorenc, S., Chatprasert, S., Saisuttichai, D., y Tepsuwan, T. (2009). Depositional effects of 2004 tsunami and hypothetical paleotsunami near Thap Lamu navy base in Phang Nga Province, Thailand. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(1), 17–23.
- Yu, N.-T., Yen, J.-Y., Chen, W.-S., Yen, I.-C., y Liu, J.-H. (2016). Geological records of western Pacific tsunamis in northern Taiwan: AD 1867 and earlier event deposits. *Marine Geology*, 372, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.11.010>

CAPITULO 1

CATÁLOGO ACTUALIZADO DE TSUNAMIS EN LA COSTA JALISCO-COLIMA, MÉXICO, UTILIZANDO DATOS DE ARCHIVOS HISTÓRICOS

UPDATED TSUNAMI CATALOG FOR THE JALISCO- COLIMA COAST, MEXICO, USING DATA FROM HISTORICAL ARCHIVES

Artículo publicado en *Seismological Research Letters*

Castillo-Aja, R. and Ramírez-Herrera, M.T. (2017) Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives. *Seismological Research Letters*. Volume 88, Number 1, January/February 2017. DOI: 10.1785/0220160133

Por motivos de espacio en el artículo no fue posible publicar la información que aquí se incluye en:

Anexo 1 se presentan las imágenes de los documentos originales correspondientes a los tsunamis reportados entre 1563 y 1900 con sus correspondientes textos paliografiados.

Anexo 2 presenta las figuras a color que se muestran en el artículo

Anexo 3 presenta las siguientes tablas:

1. Repositories, libraries and archives according with information availability
2. Tomatlán Tsunami report and localities descriptions
3. Places reported to be flooded by La Manzanilla Tsunami.



Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives

by Rocio Castillo-Aja and María Teresa Ramírez-Herrera

ABSTRACT

Modern earthquakes and tsunamis catalogs available online are compilations of earlier catalogs that included some inaccurate information. Here, we present a thorough revision of tsunamigenic earthquakes that, in historical time, have affected the Mexican Pacific coast between Jalisco and Colima. This area is located in a complex tectonic setting where the Rivera-Cocos and North American plates have produced four $M \geq 8$ earthquakes and two big tsunamis since the nineteenth century. We identified tsunamigenic earthquakes that were not previously documented in modern earthquake and tsunami catalogs available online through a careful reading of original historical archives and documents. Our results indicate the occurrence of 21 events; among those we report 2 earthquakes documented for the first time (1563 and 1816) for the Jalisco-Colima coast, and 8 large or medium intensity tsunamis also first reported (1816, 1818, 1900 [two tsunamis], 1911, 1933 [two tsunamis], and 1941) through documentary evidence. Our results demonstrate the need for a thorough investigation of historical documents and geological evidence of earthquakes and their tsunamis to accurately assess seismic and tsunami hazard.

INTRODUCTION

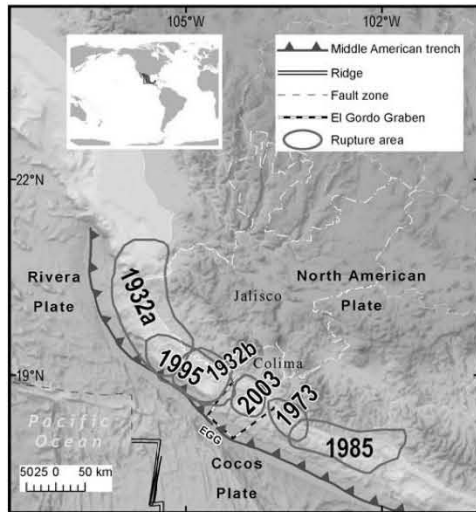
Global historic earthquake and tsunami catalogs provide the basis for understanding the tsunamigenic potential of a given region and are used to perform probabilistic hazard analysis (Ambraseys and Synolakis, 2010; Pasarić *et al.*, 2012). The quality of a seismic-hazard analysis is determined by the quality of the data input into the analysis. Most of the early catalogs (e.g., Milne, 1911) were only lists of places, dates, and adjectives describing the damage (Udías, 2015), whereas newer ones are parametric because they include the magnitude and location of each epicenter (Gutenberg and Richter, 1954; Duda, 1965; Abe, 1981; Abe and Noguchi, 1983). More recent catalogs are supported by databases and can be accessed online, in which it is

possible to display both parametric and descriptive data. Besides the improvement of instrumental monitoring, descriptions of the effects of the earthquakes are very important for seismology research. Historical Seismology, a branch of seismology that combines history and seismic knowledge to assess what Ambraseys (2009) called “long-term seismicity” (Guidoboni and Ebel, 2009), brings the methodology and tools to analyze qualitatively data from historic documents to understand the occurrence and damage produced by earthquakes and tsunamis.

The Mexican Pacific coast runs almost parallel to the Middle American trench, where at least 50 tsunamigenic earthquakes have occurred in historical times (National Centers for Environmental Information [NCEI], 2015).

One of the best-known, and perhaps the first complete, earthquake catalog for Mexico was compiled by Orozco y Berra (1887–1888). This document was the basis of important subsequent catalogs by Figueroa (1963), Soloviev and Go (1975), and Sánchez and Ferreras (1993). Recently, García Acosta and Suárez Reynoso (1996) compiled descriptions taken from original sources about historical earthquakes that occurred before 1912 in Mexico. The most recent list of instrumentally observed earthquakes was produced by Kostoglodov and Pacheco (1999). Currently, an updated and validated catalog of earthquakes ($M > 6.5$), both historical and those measured instrumentally in Mexico, is not yet available.

The tectonic setting where the Jalisco-Colima coast is located is prone to large earthquakes and tsunamis, but only two large tsunamis that occurred in 1932 have been cataloged. This can be explained by the scarcity of historical references given the sparse population, lack of communication from the region, and the occurrence of several wars that have affected the preservation of documents over time. The goal of our study is to revisit data from primary sources cited in previous catalogs and to find new data for earthquakes with tsunamigenic evidence through an exhaustive search throughout archives and libraries.



▲ **Figure 1.** Tectonic setting, rupture areas plotted for tsunamigenic earthquakes from 1932 to 2016 (Kostoglodov and Pacheco, 1999). Letters are used to identify epicenters for earthquakes that occurred in the same year: 1932a (3 June 1932), 1932b (18 June 1932).

Here, we present the results of a revision of 23 potential tsunamigenic thrust shallow earthquakes registered historically and/or instrumentally, supported by original documents found in archives and historic newspapers. The data are organized in catalog form accompanied by descriptions and references for every event. We found descriptions for two earthquakes and for some small-to-big tsunamis not included or reported earlier in modern online catalogs, and we confirmed the occurrence of one great tsunami produced by a large earthquake in the last 500 years in the study area.

TECTONIC AND HISTORIC CONTEXT

The section of the Mexican Pacific coast between Jalisco and Colima runs almost parallel to the Middle American trench where the Rivera and Cocos plates underthrust the North American plate. This area is a complex tectonic environment where a triple point results from the convergence of Cocos, Rivera, and North American plates (Singh and Suárez, 1988; Singh and Mortera, 1991; Ruff and Miller, 1994; Bandy *et al.*, 1995; Kostoglodov and Bandy, 1995; Suárez *et al.*, 2013). The convergence velocity increases from northwest (NW, 1.4 cm/yr) to southeast (SE, 6.8 cm/yr) and the geometry of the subducting plate also varies (DeMets and Stein, 1990; Pardo and Suárez, 1995; Kostoglodov and Pacheco, 1999; Bandy *et al.*, 2005; Fig. 1). The Rivera–North American sub-

duction zone is characterized by lower seismicity ($M \leq 7.5$) and fewer aftershocks than the Cocos–North America subduction zone (Singh *et al.*, 1981; Singh and Suárez, 1988). At least two big earthquakes ($M \geq 8.0$) are known to have produced tsunamis in 1932 and in 1995. However, the historically sparse population and the low density of seismometers have limited the accuracy of earthquake locations in the area. Tsunamigenic earthquakes in the first half of the twentieth century in Mexico have at least 75 km of uncertainty in epicentral location and 20 km uncertainty in depth (Cruz and Wyss, 1983; Singh and Lermo, 1985). The determinations of epicentral location and depth have been improved since the emergence of global digital seismic networks in the 1980s (Singh *et al.*, 1985; Lee and Benson, 2008).

Historical Seismology research is challenging in the study area because of the damage to county and church archives by humidity, fires, and military conflicts. Also, this area remained almost unpopulated until the first half of the twentieth century. It is known that at least one important earthquake occurred every century: 27 May 1563; 25 and 26 August 1611; and 22 October 1749. However, our results indicate damage related only to the sixteenth-century earthquake, leaving an information gap for the following two centuries.

DATA AND METHODS

We accessed online catalogs to obtain date, location, and magnitude for the reported largest historical earthquakes in the Jalisco–Colima coast (Mexican Pacific coast, Table 1). We also searched for reports of tsunamis to identify tsunamigenic events. The potentially tsunamigenic events were established based on two criteria: (1) epicenter location and/or magnitude of the earthquake, and (2) reference of a tsunami occurrence. A combined reading of the map of epicenters with their magnitudes (when available), along with the descriptions of damage, allowed us to differentiate between those large earthquakes located offshore or close to the coast and those with unreliable epicentral locations.

Because current catalogs are compilations of previous ones, we used the primary sources to find new data for earthquakes with tsunamigenic evidence. The first step was to compile all the descriptions and to locate the original historical sources for every selected earthquake. We reviewed all the repositories available online (databases and/or digital documents) and also those available in libraries and archives. We focused our historical research on data from: (1) *salinas* (salt-works for salt extraction), which were located near the coast and which were an important economic activity during the viceroyalty; (2) pirate surveillance reported by guards settled at some sites along the coastline and who reported any intruder ship, and (3) harbor activity in which authorities and sailors might have reported earthquakes and/or tsunamis. To confirm and/or improve the reliability of our data, we use a cross-checking technique which allowed us to validate date and place of the event and, when available, the authoritative credentials of the informant.

Table 1
Catalogs of Earthquakes and Tsunamis in Mexico

Source	Data	Place and Time	Reference
Significant earthquake database	Earthquake and tsunami catalog (parametric and with descriptions)	World (–2150 to 2015)	National Geophysical Data Center/World Data Service (NGDC/WDS), doi: 10.7289/V5TD9V7K
Global historical tsunami database			NGDC/WDS, doi: 10.7289/V5PN93H7
Historical tsunami database for the world ocean	Earthquake and tsunami catalog (parametric)		Tsunami Laboratory (2015)
Historical earthquake database			Tsunami Laboratory (2015)
Catálogo de los sismos más fuertes de México ($M > 6.5$)	Earthquake catalog (parametric)	México (1900–2003)	Kostoglodov and Pacheco (1999)
Los Sismos en la Historia de México	Earthquake and tsunami catalog (with descriptions of earthquakes effects. Verbatim from original documents and publications)	México (1475–1912)	García Acosta and Suárez Reynoso (1996)
Efemérides Sísmicas	Catalog for earthquakes until 1888 with descriptions and references	México (1460–1887)	Orozco y Berra (1887–1888)
Catalog of tsunamis of the eastern shore of the Pacific Ocean	Descriptions for tsunami and runup occurrence	Pacific basin (1513–1968)	Soloviev and Go (1975)
Seismología. Los Terremotos de Jalisco	Earthquake catalog	Jalisco (1746–1875)	Bárcena (1875)
List of seismic sea waves	Tsunami catalog	World (479–1946)	Heck (1947)
Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México	Tsunami catalog with descriptions and references	Pacific coast of México	Sánchez and Ferreras (1993)
Historia Sísmica y Estadística de Temblores de la Costa Occidental de México	Catalog and analysis of earthquakes	México	Figueroa (1963)
Catálogo de Sismos Ocurridos en la República Mexicana	Earthquake catalog (parametric)	México (1900–1970)	Figueroa (1970)
Catalog of shallow earthquakes of Mexico (1900–1981)	Earthquake catalog (parametric)	México (1900–1981)	Singh <i>et al.</i> (1984)

THE UPDATED TSUNAMI CATALOG FOR THE JALISCO-COLIMA COAST

In this section, we present the results for an updated catalog for tsunamis in the Jalisco-Colima coast (Table 2,) accompanied by a short description from primary sources. To standardize the data, some conventions were used: the epicentral coordinates are expressed in decimal degrees (latitude, longitude); the date and time are given in UTC; the magnitude is presented in M_s/M_w ; all the sources are cited for every event; and sometimes a name for the earthquake and/or the tsunami is included.

The epicenters available for the earthquakes described in this section are plotted in Figure 2, and the rupture areas for the earthquakes from 1932 to 2014 are plotted in Figure 1. The tsunami inundation locations are presented in Figure 3a,b. The descriptions below were translated from their original Spanish version and the equivalent of the ancient Spanish (Castilian) measurement unit is written in parentheses.

- 27 May 1563
Probably this is the oldest earthquake reported for the Jalisco-Colima coast and not yet included in online catalogs. Figure 4a shows the report from Puerto de la Navidad, in which “most of the houses fell” (Archivo General de la Nación [AGN], 1563). The destruction of the village is inferred from the description, but unfortunately more detailed information probably no longer exists. The chronicle of Tello (1984) describes the damage in churches at Zapotlán El Grande and Autlán; this earthquake was also felt in Colima (García Acosta and Suárez Reynoso, 1996). No tsunami was reported.
- 25 March 1806: The Encarnación earthquake
The earthquake was felt along the Mexican Pacific coast between Nayarit and Oaxaca (García Acosta and Suárez Reynoso, 1996). It lasted 3 min, and according to La Gaceta de México (1806) 2000 people were killed in Zapotlán El Grande. However, the number of dead people seems to be exaggerated, because a letter dated 20 April 1806

Date				Source				Tsunami				
				Location (°)		Magnitude		Sources: L, Location; M, Magnitude	Type	Quality of Data	Inundation Places	Max Inundation (m)
Year	Month	Day	Latitude	Longitude	M_w	M or M_s						
1	1563	May	27					Earthquake	Eyewitness written description	Not reported		
2	1806	March	25	18.90	-103.80	7.5	L,M: Singh <i>et al.</i> (1984)	Earthquake	Eyewitness written description			
3	1816	November	14					Earthquake/ landslide?	Eyewitness written description	Colima coast, San Pantaleón saltworks	825	25
4	1818	May	31	19.00	-105.00	8.2	L,M: Zúñiga <i>et al.</i> (1997)	Earthquake	Report by government	Cuyutlán to Coahuayana, Col.		13.9
5	1845	April	7	16.80	-100.00	8.3	L,M: Zúñiga <i>et al.</i> (1997)	Earthquake	Report by government	Acapulco, Gro. and Jalisco coast	40	
6	1875	February	24	20.00	-105.00	6.5	L,M: Soloviev and Go (1975)	Earthquake	Scientific report	Manzanillo, Col.		
7	1875	March	9	19.40	-104.60	7.4	L,M: Singh <i>et al.</i> (1981)	Earthquake	Eyewitness written description			
8	1883	March	12	21.55	-106.50		L: HTDB/WDL	Unknown/ landslide?	Newspaper	Bandera's Bay, Jal.		
9	1900	January	20	20.00	-105.00	8.1	L,M: Singh <i>et al.</i> (1984)	Earthquake	Newspaper	Acapulco, Gro. and Manzanillo, Col.	1609	
10	1900	May	16	20.00	-105.00	7.6	L,M: Singh <i>et al.</i> (1984)	Earthquake	Newspaper	Zapotillo, Nay. and Peñitas, Jal.		
11	1911	June	7	17.50	-102.50	7.6	L,M: Engdahl and Villaseñor (2002)	Earthquake	Newspaper	Pacific coast		

ISC-GEM, International Seismological Centre-Global Instrumental Earthquake Catalogue.
(Continued next page.)

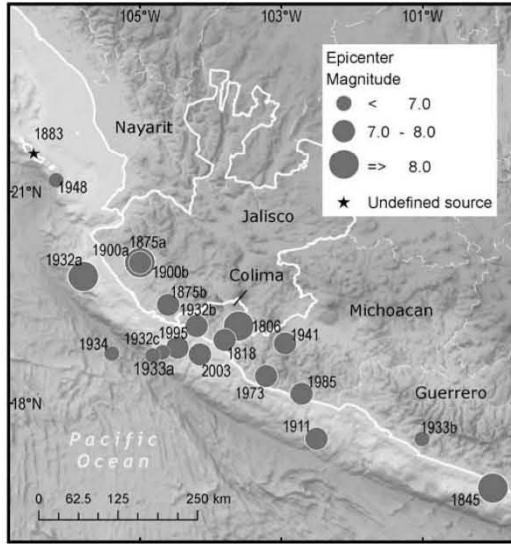
Table 2 (continued)
Catalog of Tsunamigenic Earthquakes and Local Tsunamis in the Jalisco-Colima Coast (México)

Id	Date			Source				Sources: L, Location; M, Magnitude	Type	Quality of Data	Tsunami			
	Year	Month	Day	Location (°)		Magnitude					Inundation Places	Max Inundation (m)	Max Height Wave (m)	Deposit
12	1932	June	3	19.80	-105.80	8.1	8.2	L: Cruz and Wyss (1983); M: McNally and Minster (1981)	Earthquake	Eyewitness, newspaper, scientific report, instrumental	Sinaloa-Guerrero coast; United States of America and Hawaii. Maximum in front of Tomatlán coast	8000	10	Yes
13	1932	June	18	19.10	-104.20		7.8	L: Cruz and Wyss (1983); M: McNally and Minster (1981)	Earthquake	Newspaper, scientific report, instrumental	Manzanillo Bay; Hawaii		1	
14	1932	June	22	18.73	-104.68		6.9	L: Kelleher <i>et al.</i> (1973); M: Gutenberg and Richter (1954)	Earthquake/ landslide	Newspaper, scientific report	Colima coast; maximum in Cuyutlán -El Tecuanillo coast	2000	12	Yes
15	1933	February	20	18.68	-104.82		4.9	L: Figueroa (1970); M: Singh <i>et al.</i> (1985)	Earthquake	Newspaper	Zihuatanejo, Gro., Manzanillo and Armería, Col.		1.13	
16	1933	May	8	17.50	-101.00		6.9	L,M: Kostoglodov and Pacheco (1999)	Earthquake	Newspaper	Boca de Pascuales, Col.			
17	1934	November	30	18.50	-105.50		7	L,M: Wigen (1979)	Earthquake	Scientific report	Not reported			
18	1941	April	15	18.85	-102.94		7.9	L,M: Singh <i>et al.</i> (1984)	Earthquake	Scientific report	Jalisco-Colima coast			
19	1948	December	4	21.60	-106.70	6.4		L,M: Jaramillo and Suárez (2011)	Earthquake	Newspaper, scientific report	Marías Islands			
20	1973	January	30	18.39	-103.21	7.65		L,M: Singh and Mortera (1991)	Earthquake	Scientific report; instrumental	Armería River			

ISC-GEM, International Seismological Centre-Global Instrumental Earthquake Catalogue.
 (Continued next page.)

Table 2 (continued)													
Catalog of Tsunamigenic Earthquakes and Local Tsunamis in the Jalisco-Colima Coast (México)													
		Source							Tsunami				
Date		Location (°)		Magnitude			Sources: L, Location; M, Magnitude	Type	Quality of Data	Inundation Places	Max Inundation (m)	Max Height Wave (m)	Deposit
Id	Year	Month	Day	Latitude	Longitude	M_w							
21	1985	September	19	18.14	-102.71	8		L,M: UNAM Seismology Group (1986)	Earthquake	Scientific report, instrumental	Manzanillo, Col. - Zihuatanejo, Gro.; Manzanillo, Cuyutlán and Coahuayana river mouth; maximum in Lázaro Cárdenas	500	3
22	1995	October	9	18.79	-104.47	8		L,M: Couboulex et al. (1997)	Earthquake	Scientific report, instrumental	Jalisco-Colima coast; maximum in La Manzanilla and Tenacatita Bay, Jal.	250	10.9
23	2003	January	22	18.70	-104.15	7.48		L,M: ISC-GEM	Earthquake	Scientific report, instrumental	Manzanillo		

ISC-GEM, International Seismological Centre-Global Instrumental Earthquake Catalogue.



▲ **Figure 2.** Epicenters of historic tsunamigenic earthquakes. Administrative limits are presented. Letters are used to identify epicenters for earthquakes that occurred in the same year: 1875a (24 February 1875), 1875b (9 March 1875), 1900a (20 January 1900), 1900b (16 May 1932), 1932a (3 June 1932), 1932b (18 June 1932), 1932c (22 June 1932), 1933a (20 February 1933), and 1933b (8 May 1933).

(Archivo Histórico del Arzobispado de Guadalajara [AHAG], 1806a) precisely reported that, at the moment of the earthquake occurrence, 1796 people were in the church, in which 254 of them died, 106 were seriously injured and 334 were slightly injured.

Figure 4b shows a fragment of a letter (AHAG, 1806b) in which an anonymous author describes the first shock as having occurred approximately at 17:00 hr (local time) as a “violent shaking.” He toured throughout the Colima coast where “in 5^{1/2} leagues (30.65 km) ...there were abundant cracks in the San Pedro (Armería) river mouth” as evidence of liquefaction, and the river “changed its path.” He visited all the saltworks settled along that coastal strip and reported no tsunami occurrence.

3. 14 November 1816: The San Pantaleón earthquake and tsunami

On 14 November, the priest Gerónimo Arzac (AHAG, 1816a) was heading to Tecomán and mentioned the occurrence of several earthquakes, the strongest of which occurred on 13 November at 18:00 hr, another one on 14 November at 1:00 hr, and a third one at 10:00 hr (local time). These earthquakes caused significant damage in Colima and Tecomán and also damaged some churches and public buildings in Guadalajara (Biblioteca Pública del Estado de Jalisco [BPEJ], 1816), Tecolotlán, Suchitlán,

Ayotitlán (AHAG, 1816b), Zapotlán El Grande (Vizcaino, 1986), and Colima (Río de la Loza, 1863).

Figure 4c shows a facsimile of the handwritten report by priest José Antonio Enríquez del Castillo (Archivo de la Parroquia de Tecomán [APT], 1817) who was an eyewitness and described a tsunami event on “November 13th of 1816 two o’clock in the morning” when “the sea...” incursion reached 60 *codas* high (25 m); “...the water receded...” causing destruction of the salt beds, that is, harvest infrastructure (an ancient method of salt extraction).

4. 31 May 1818

According to García Acosta and Suárez Reynoso (1996) this is one of the most destructive earthquakes felt along the Pacific coast between Oaxaca and Colima, where the city of Colima was almost destroyed. Juan Linares (AGN, 1818) wrote “At the saltworks in Cuyutlán the sea rose above sea level about 10 pasos” (13.9 m). “The ground opened in many places throwing sand...” that is, likely liquefaction, and “the salt beds were buried.” In Coahuayana only a small tsunami was reported (Fig. 4d).

5. 7 April 1845: The Santa Teresa earthquake

This was one of the most destructive earthquakes in México City and was felt in half of the Mexican Republic and along the Pacific coast from Guerrero to Jalisco; a tsunami was reported in Acapulco. The local governor of Autlán, Jalisco (AGN, 1845), reported that the earthquake “was felt at the coast accompanied by an ocean roar” and the newspaper *El Siglo XIX* (1845) mentioned that many people mentioned that “the water seemed to boil...”

6. 24 February 1875

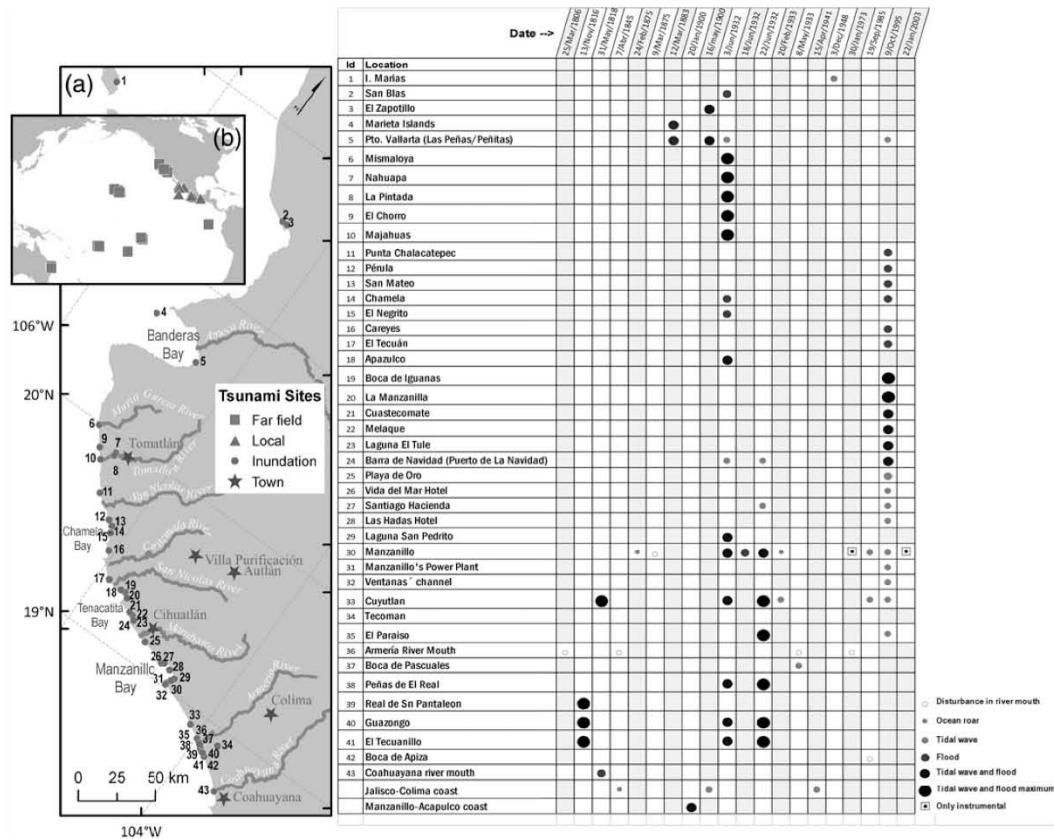
The Historical Tsunami Database (HTDB)/WLC and National Centers for Environmental Information (NCEI, 2015) catalogs classify this event as a very doubtful tsunami. Soloviev and Go (1975) described the earthquake as a “strong earthquake at Manzanillo and Colima with great movement of water” based on Fuchs (1886). It is likely that Fuchs obtained the information from press releases in which telegrams were published in the *Diario de Jalisco*, 25 February, and were cited as the source. However, the final report from Comisión (Comisión Sobre Los Temblores de Febrero de, 1875) stated that “dreadful sea roars” but “no sea wave invasion occurred.”

7. 9 March 1875

A very strong earthquake in Jalisco and Colima was felt from Manzanillo to San Blas “with sea roars and movements of the sea” (La Colonia Española, 1875). At Tecomán, the priest Vicente Pinto (AHAG, 1875) reported that the earthquake occurrence at 9:00 a.m. (local time) damaged the church and houses in the village, and cracks with water pop-ups that could be related to liquefaction at the mouth of the Armería River.

8. 12 March 1883

Orozco y Berra (1887–1888), referenced by Montessus de Ballore (1906), Brand (1958), and Soloviev and Go (1984), described that at “Las Peñas on [March] 12 ... the sea retreated far from the coast, left its usual bed widely



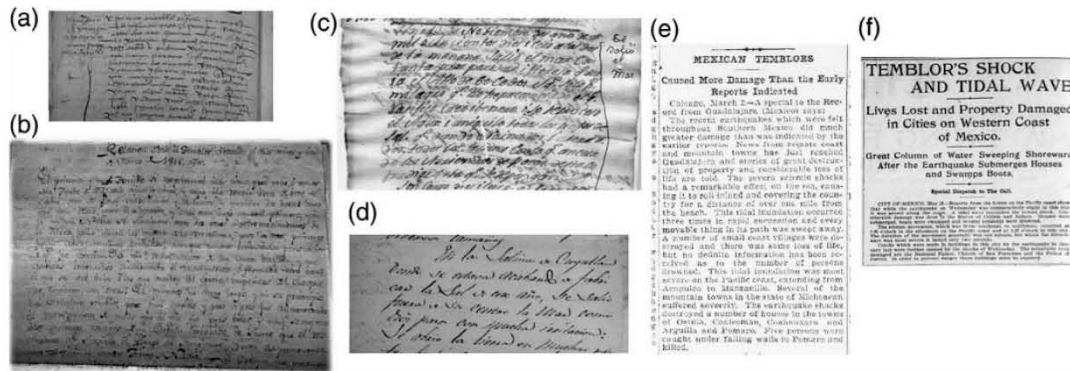
▲ **Figure 3.** (a) Tsunamis triggered by local earthquakes on the Jalisco-Colima coast with summary descriptions. The numbers in the map correspond with the id column in the table. (b) Map of tsunami sites where inundation was reported on the Jalisco-Colima coast (México).

and distantly from the shore, so that the seabed was exposed.” Las Peñas is known now as Puerto Vallarta.

9. 20 January 1900

Important villages in Jalisco and Colima states suffered major damage from this earthquake, which happened at 23:45 hr on 19 January (local time). The Cuyutlán lagoon (Colima state) showed noticeable changes (Morales, 1900), train traffic was interrupted when the railway subsided by about 60 cm (El Estado de Colima, 1900; Morales, 1900), and several landslides occurred along the railroad. The earthquake also caused damage in México City and Michoacán (El Sol Diario de la Tarde, 1900; La Libertad, 1900; Silva, 1900; García Acosta and Suárez Reynoso, 1996), and was felt as strong in San Blas (The New York Times, 1900). An isoseismal map by Ezequiel Ordóñez that was published by El Imparcial newspaper (El Imparcial, 1900) presented the most affected area in Jalisco and Colima where he estimated that “it is very likely

that the source of the earthquake is located in front of the Colima coast... where it reached very soon the Pacific seashore and spread in the West–East direction.” On 2 and 3 March, two North American newspapers published the next news, in which a tsunami was described (Fig. 4c): “A special to the Record from Guadalajara (México) says: The recent earthquakes which were felt throughout Southern México did much greater damage than was indicated by the earlier reports. News from remote coast and mountain towns has just reached Guadalajara and stories of great destruction of property and considerable loss of life are told. The severe seismic shocks had a remarkable effect on the sea, causing it to roll inland and covering the country for a distance of over one mile from the beach. This tidal inundation occurred three times in rapid succession and every movable thing in its path was swept away. A number of small coastal villages were destroyed and there was some loss of life, but no definite information



▲ **Figure 4.** (a) Archivo General de la Nación, Mercedes, 84, ff.129v and 130. Facsimile fragment of Mandamiento, 25 June 1563; (b) Facsimile. Fragment of handwriting report (Anonymous) "Relacion sobre el Temblor acæcido el dia veinte y cinco de marzo 1806 años" Story about the earthquake that occurred 25 March 1806 (AHAG); (c) Facsimile of the report by priest José Antonio Enríquez del Castillo (APT, 1817); (d) Archivo General de la Nación, Indiferente Virreinal, 5765/086. Facsimile fragment of handwriting report by Juan Linares (1818); (e) Mexican temblor news that appeared in the Los Angeles Herald, on 3 March 1932, page 2; (f) Facsimile of "Tidal wave reported in Pacific coast," San Francisco Call 19 May 1900, page 2.

has been received as to the number of persons drowned. This tidal inundation was most severe on the Pacific coast, extending from Acapulco to Manzanillo" (Desert Evening News, 1900; Los Angeles Herald, 1900).

10. 16 May 1900

Gutenberg (1956) considers this earthquake an aftershock of the 20 January event. It was felt strongly in the center and south of Jalisco and Colima states, and it was said that, "...the second shock was followed by a tidal wave many feet in height, enveloping every coast town of Colima and Jalisco. At Peñitas, in Jalisco, and Zapotillo, in Tepic, fishing boats were swamped and several natives were drowned" by the San Francisco Call (1900; Fig. 4f) and Meady County News (1900).

11. 7 June 1911

This earthquake was strongly felt in México City, and the south of the Jalisco state and the whole Colima state were badly damaged. Miranda y Marrón (1912–1914) visited the disaster area in Zapotlán and Colima. In his report, he included an isoseismal map, but without the location of the epicenter, and a letter from Severo Díaz who informed him about the absence of damaged churches in the coastal region. The news appeared in North American press in which the earthquake was described in the following way: "...second earthquake at 5 o'clock yesterday afternoon the severest in the western and southern sections. Meager reports say it was accompanied by tidal wave on the Pacific coast. Communication with several towns has been interrupted, and has caused the report that they have been wiped out" (The Jeffersonian-Gazette, 1911). Major fear was about Port of Manzanillo "Especially is anxiety felt for the seaport..., which is connected by rail with Colima. A large section of this town is near the

water's edge and a tidal wave of any great force would practically wipe it off the map" (The Syracuse Herald, 1911).

12. 3 June 1932: The Tomatlán earthquake and tsunami

This earthquake is considered the largest to have occurred along the Mexican subduction zone in the instrumental era. The evidence from seismograms at teleseismic distances suggests a complex rupture process consisting of four subevents that lasted 90 s. This has led to problems in locating the epicenter (Eissler and McNally, 1984; Singh et al., 1984, 1985). The rupture length of the earthquake was estimated to be 220 km long and 80 km wide (Singh et al., 1985). The earthquake also produced a tsunami large enough to strike the coastline between Mazatlán (Sinaloa) and Zihuatanejo (Guerrero) and reached Hilo, Hawaii, and the coast of California. It flooded 8 km inland in the Tomatlán River valley, killed four people in Majahuas and Mismaloya (Valdivia et al., 2012), and was reported in newspapers and scientific publications of the time (see Data and Resources). Sedimentary evidence has been found and reported by Cerny et al. (2016) and Ramírez-Herrera et al. (2016).

13. 18 June 1932

This was the second main shock of the earthquakes in June 1932 (Singh et al., 1985), which produced a tsunami with a runup reported in Manzanillo, where the sea receded 10 m (El Informador, 1932).

14. 22 June 1932: The Cuyutlán tsunami

This earthquake produced the most destructive tsunami in the history of México, which completely swept away the sector between Cuyutlán and Boca de Apiza, Colima. The seawater flooded 500–3000 m inland with waves of 12 m height (Las Noticias, 1932; Ordoñez, 1933) killing ~50 people (Corona and Ramírez-Herrera, 2012a,b). "The

- water incursion lasted about 2 hours...” (El Universal, 1932a) and injured many people. The tsunami disturbed the Cuyutlán lagoon, affecting salt extraction. Most of the houses and hotels were destroyed at Cuyutlán. “...an immense maritime wave ... flooded more than 1 km [inland] from Manzanillo until Tecomán...,” Colima (El Universal, 1932b). Eyewitness described it as the “water receded... and a sea wall rather than a wave... was formed offshore, about 300 to 400 m from the beach...” (El Universal, 1932c).
- The Tecomán coast was “also hit by the surge damage” (El Universal, 1932d); the tsunami was reported as far south as Guazongo, with damage to Tecuanillo and El Real (El Universal, 1932e). North from Cuyutlán, the tsunami was reported in Barra de Navidad and Santiago Hacienda (El Universal, 1932f). Corona and Ramírez-Herrera (2012a) estimate the tsunami intensity as VIII in Cuyutlán (in the Papadopoulos and Imamura scale) from historical data analysis that was supported by tsunami modeling. “Two new sea waves have invaded the town: one yesterday night [June, 22] and the other this morning [June, 23] after 9 o’clock with less intensity because waters didn’t passed further than the main dune, just reaching the roundabout” (El Universal, 1932g).
15. 20 February 1933
At 11:00 a.m. (local time), an earthquake was felt in the city of Colima, causing panic in Villa de Alvarez, and was felt intensely in Tecomán. A tsunami that invaded the beaches of Zihuatanejo was reported to have swept away fishermen’s houses, and in Manzanillo some underground noises were heard “and unusual movements were noticed over the sea water.” The earthquake was also felt strongly in Cuyutlán where “a tidal wave washed the trash left by last earthquake” (El Informador, 1933a).
 16. 8 May 1933
According to the correspondent reporter for El Informador (1933b) “...another tsunami occurred ... in Boca de Pascuales... producing damage to the seashore hamlet and blocking the Armería river mouth,” and affecting the salt-works. Finally, “... sea movement was observed over the Colima, Jalisco and Michoacán coasts...”
 17. 30 November 1934
A tsunami of 22 cm height was measured in Tofino, Canada, and referenced by Wigen (1979), who related it to the earthquake that occurred along the Colima coast on the same date; however, it was not possible to find information about a local tsunami occurrence in Mexico.
 18. 15 April 1941
This earthquake damaged large areas in Colima state and in the south of the Jalisco state. Brand (1958) affirmed that “this earthquake locally is considered the most destructive of the 20th century; although it was accompanied by one tsunami, the wave was not notable.”
 19. 4 December 1948
On 3 December, a sequence of earthquakes started. Jaramillo and Suárez (2011) stated that the earthquake of 4 December was the largest in the history of the Tres Mariás Islands Escarpment, which is located along the northern segment of the Rivera–North American plate boundary. Besides the destruction of most buildings in the prison, and houses located on Santa María Island, 2 people died and 25 were injured (El Informador, 1948). Moreover, a tsunami struck the islands (Seismological Notes, 1949; Soloviev and Go, 1975).
 20. 30 January 1973
This earthquake largely damaged the states of Colima, Jalisco, and Michoacán, and it produced a tsunami recorded by every tide gauge station along the Mexican Pacific. It was most intense in Acapulco and Manzanillo (1.13 m) (Figueroa, 1974; Sánchez and Ferreras, 1993). When the tsunami occurred “... the tide level was low... tsunami maximum wave amplitude was 4 ft.” In Armería liquefaction was reported. “The sea level rose and loud noises were heard” (Figueroa, 1974). The tsunami was recorded in Hilo (Hawaii) as 240-mm high (Eissler and McNally, 1984).
 21. 19 September 1985
This was the most destructive earthquake in the twentieth century in México City. Ciudad Guzmán and Gómez Farías (Jalisco) suffered significant damage as well. The earthquake produced a tsunami recorded by Acapulco’s tide gauge (the only analogical record available from a near epicenter station). Pararas-Carayannis (1988) reported damage in Manzanillo to the Zihuatanejo area where sedimentary evidence was reported by Ramírez-Herrera *et al.* (2012); the tsunami reached its maximum peak on the Michoacán coast. On the Colima coast, the tsunami effects were reported as follows: in Manzanillo it was 1.0-m high and the wave moved buoys in the port’s entrance to the inner harbor; in Cuyutlán a debris line was observed on the beach as indication of 2.0 m runup; in Boca de Apiza one eyewitness declared that the tsunami reached 1.5 m and flooded the channel of the Coahuayana River inland about 150 m. “There are unconfirmed reports that ships off the coast of México saw waves up to 30 m high and some fishing boats are missing” (Lander *et al.*, 2003).
 22. 9 October 1995. La Manzanilla tsunami
This was a tsunamigenic earthquake (Singh *et al.*, 2008) with an epicenter that was seaward of the coast of Colima, with a rupture length that was estimated at 150 km (Couboulex *et al.*, 1997), most of which was offshore. Subsidence along the coast was produced by a downward vertical displacement (Melbourne *et al.*, 1997; Ortiz *et al.*, 2000), and the earthquake generated a tsunami that was reported in 32 places across the Pacific basin: 21 on the Mexican coast (19 by eyewitness and 2 instrumentally), 1 in Ecuador, 2 in Australia, 3 in French Polynesia, 4 in Hawaii, and 1 in Samoa (NCEI, 2015). Along the Mexican Pacific coast, it was reported that a tsunami occurred ~15 min after the earthquake when the sea first receded and was followed by the arrival of two waves. The tsunami

hit the coast between El Paraíso (Colima) and Puerto Vallarta (Jalisco) along a length of about 300 km, and with maximum inundation in Tenacatita Bay (Jalisco) (Borrero *et al.*, 1997).

23. 22 January 2003

The epicenter was located along the Colima coast in El Gordo Graben, near the triple convergence point of the Rivera, Cocos, and North American plates (Gómez-González *et al.*, 2010; Andrews *et al.*, 2011). The first tsunami arrival was emergent and was recorded by the tide gauge at Manzanillo 12 min after the earthquake. Eyewitnesses interviewed by phone did not observe any tsunami in Barra de Navidad nor in Melaque, Jalisco. A post-tsunami survey along the coast between La Manzanilla, Jalisco, and San Juan, Michoacán, confirmed no flooding and water heights similar to high tide along this section of the coast (Ortiz *et al.*, 2003).

DISCUSSION AND CONCLUSION

We identified 21 tsunamis through an exhaustive search in archives and libraries, and collected evidence for earthquakes and their tsunamis, some of them not yet cataloged. The updated catalog presented in Table 2 contains parametric information in conjunction with the descriptions presented in the previous section and in maps (Fig. 3). These enabled a complete reading of historic tsunamis in the study area. Location and magnitude data sources were selected from available scientific research papers for every single event.

We identified tsunamigenic earthquakes that were not previously documented in modern earthquake and tsunami catalogs available online through a careful reading of original historical archives and documents. We revealed for the first time the precise date of the 27 May 1563 earthquake, which is the most ancient earthquake reported in the studied area until now. We also provided detailed information on the 1816 earthquake sequence not mentioned in modern online catalogs but frequently described by local chronicles (e.g., Oseguera Velázquez, 1967; Urzúa Orozco, no date). Arzac (AHAG, 1816a) described three of the strongest earthquakes of the 1816 earthquake series: one that occurred at 6 p.m. on 13 November, along with a second one at 1 a.m. and a third one at 10 a.m. on 14 November (i.e., the San Pantaleón earthquake). Of them, the 13 November event was the strongest. Enríquez del Castillo (APT, 1817) described the 13 November earthquake and also included a description of a tsunami occurrence around 1–2 a.m. on 14 November, which is likely related to the second earthquake on 14 November at 1 a.m. The San Pantaleón tsunami of 1816 was presumably produced by a medium-sized earthquake. The 1816 earthquake and tsunami description indicates that the saltworks were flooded with a wave 25 m in height (APT, 1817).

Two years later, in 1818, a tsunami was triggered by a magnitude M 8.2 earthquake. From the descriptions given above, we inferred a wave height of about 13 m in Cuyutlán that decreased southward, and the area affected was restricted to

the Colima coast. The 1816 and 1818 events occurred in the middle of the Independence War, and this might explain the relative scarcity of information.

A singular event was on 12 March 1883 in Banderas Bay, Jalisco. It was described as a tsunami but not related to any earthquake report. Thus, we suggest that this tsunami was likely triggered by a submarine landslide because similar submarine landslides have been reported for the Jalisco and Colima areas. Recently in the same Banderas Bay on 8 September 2001, a submarine slump occurred on a steep coastal slope; however, no tsunami was reported (Cupul-Magaña *et al.*, 2004). Also, a submarine landslide has been proposed as the triggering mechanism for the 22 June 1932 tsunami in Cuyutlán, Colima (Corona and Ramírez-Herrera, 2015).

During the remainder of the nineteenth century, other earthquakes produced minor tsunamis in the study area. It was not until the year 1900 when two strong earthquakes generated two tsunamis that only were mentioned in American newspapers (Desert Evening News, 1900; Los Angeles Herald, 1900; Meady County News, 1900; San Francisco Call, 1900).

Undoubtedly, 1932 was a remarkable year: three earthquakes produced tsunamis, and two of them are the largest tsunamis registered over the Jalisco-Colima coast between 1563 and 2015. The 3 June 1932 earthquake is the largest earthquake (M 8.2) instrumentally registered for the Mexican Pacific coast, and it also produced the largest tsunami registered in the Jalisco-Colima coast over the last 500 years. The second 1932 earthquake (M 7.8), on 18 June, only produced a small tsunami, whereas the third earthquake, on 22 June (M_s 6.9), generated a devastating tsunami. However, recent studies suggest that a submarine landslide triggered by the third earthquake (22 June 1932) produced this tsunami (Corona and Ramírez-Herrera, 2012a,b, 2015).

The historical documents for the 7 April 1845, 24 February 1875, 20 February 1933, and 16 May 1933 tsunamis include a common description about “sea movements” and/or “roaring.” Recent observations and studies of far-field tsunamis indicate the occurrence of sea currents near the coast in sea harbors (Alan *et al.*, 2012; Admire *et al.*, 2014) that might explain these old historical descriptions. Therefore we consider these as tsunamis.

The historical evidence summarized in this study confirms that the Rivera–Cocos plate subduction has produced at least 21 tsunamis since 1816 and hence is quite prone to tsunamigenic earthquakes, making the Jalisco-Colima coast highly susceptible to tsunami hazard. Tsunami geology studies could broaden the time window and aid in constraining the recurrence period for big earthquakes and tsunamis in this region.

DATA AND RESOURCES

Maps in Figures 1–3 were made using ESRI ArcGis 10.0, and the base map was downloaded from Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI; www.inegi.org.mx, last accessed May 2015). We also used data from National Centers for Environmental Information (NCEI; formerly National

Geophysical Data Center, NGDC) at <https://www.ncei.noaa.gov/> (last accessed May 2016), the Global Historical Earthquake Archive (GHEA) hosted by Global Earthquake Model (GEM) at <https://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/historical-catalogue/> (last accessed May 2015), International Seismological Centre (2013). ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009). Retrieved from www.isc.ac.uk/iscgem/ (last accessed May 2015), and Historical Tsunami Database (HTDB) hosted by the Tsunami Laboratory. The data for the Tomatlán earthquake and tsunami are available at https://www.researchgate.net/profile/Maria_Ramirez-Herrera (last accessed May 2015). The acronyms and data sources cited in the text are listed in References section. ☒

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to Editor John Ebel and anonymous reviewers for a thorough review and constructive input that help to improve the quality of this article. Castillo-Aja thanks for CONACYT Ph.D. scholarship. Ramírez-Herrera acknowledges research funding by UNAM PASPA-DGAPA-2015 and SEP-CONACYT Grant Number 129456. Thanks to Celina Becerra for helping with paleogeography and Teófilo Cervantes for helping with the Tecomán Parish Archive.

REFERENCES

Abe, K. (1981). Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980, *Phys. Earth Planet. In.* **27**, 72–92, doi: [10.1016/0031-9201\(81\)90088-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90088-1).

Abe, K., and S. Noguchi (1983). Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1897–1917, *Phys. Earth Planet. In.* **32**, 45–59.

Admiral, A. R., L. A. Dengler, G. B. Crawford, B. U. Uslu, J. C. Borrero, S. D. Greer, and R. I. Wilson (2014). Observed and modeled currents from the Tohoku-Oki, Japan and other recent tsunamis in northern California, *Pure Appl. Geophys.* **171**, 3385–3403, doi: [10.1007/s00024-014-0797-8](https://doi.org/10.1007/s00024-014-0797-8).

Archivo General de la Nación (AGN) (1563). *Para que se den los indios para el reparo de las casas del Puerto de la Navidad Mandamiento 25 de Junio de 1563*, Mercedes 84, ff. 129v and 130 (in Spanish).

AGN (1818). Indiferente Virreinal, 5765/086, *Informe de Juan Linares*, Colima, 13 June 1818 (in Spanish).

AGN (1845). Gobernación sin sección/caja 621 (293 sin sección) Expediente 15. Also was published in *Diario del Gobierno de la Republica Mexicana*, 29 April 1845, Hemeroteca Digital Nacional de Mexico, <http://www.hndm.unam.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).

Archivo Histórico del Arzobispado de Guadalajara (AHAG) (1806a). Correspondencia enviada por el Pbro. Javier Zúñiga 6, 9, y 16 de abril de 1806. AHAG/Gobierno/Parroquias/Zapotlán El Grande/Caja 2. Expediente 1801–1810 (in Spanish).

AHAG (1806b). *Gobierno/Secretaría General/Correspondencia 1804-1814*. Caja: 14. 3f. (Anonymous, 1806) (in Spanish).

AHAG (1816a). *Sección Gobierno. Serie Secretaría/Correspondencia recibida. Carta de José María Gerónimo Arzac*, 15 November 1816 (in Spanish).

AHAG (1816b). *Sección Gobierno/Serie Secretarías/Correspondencia Obispos: Cabañas. Capellán Francisco Antonio Montes de Oca, Tecolotlán*, 16 November 1816 (in Spanish).

AHAG (1875). *Sección Gobierno/Serie Parroquias/Tecomán, caja 1. Carta Vicente Pinto a los Señores Gobernadores de la Sagrada Mitra. Santiago de Tecomán*, Marzo 9 de 1875 (in Spanish).

Alan, J. C., P. D. Komar, P. Ruggiero, and R. Witter (2012). The March Tohoku tsunami and its impacts along the U.S. West Coast, *J. Coast. Res.* **28**, no. 5, 1142–1153, doi: [10.2112/JCOASTRES-D-11-00115.1](https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00115.1).

Ambraseys, N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900*, Cambridge University Press, New York, U.S.A..

Ambraseys, N., and K. Synolakis (2010). Tsunami catalogues for the eastern Mediterranean, *J. Earthq. Eng.* **14**, 309–330.

Andrews, V., J. Stock, C. A. Ramírez Vázquez, and G. Reyes-Dávila (2011). Double-difference relocation of the aftershocks of the Tecomán, Colima, Mexico earthquake of 22 January 2003, *Pure Appl. Geophys.* **168**, 1331–1338, doi: [10.1007/s00024-010-0203-0](https://doi.org/10.1007/s00024-010-0203-0).

Archivo de la Parroquia de Tecomán (APT) (1817). *Libro de la Cofradía de Nuestra Señora de La Candelaria*, Testimonio firmado por el Pbro. José Antonio Enriquez del Castillo, January 1817 (in Spanish).

Bandy, W. L., F. Michaud, J. Burgois, T. Calmuc, J. Dymont, C. A. Mortera-Gutiérrez, J. Ortega-Ramírez, B. Pontoise, J.-Y. Royer, B. Sichter, et al. (2005). Subsidence and strike-slip tectonism of the upper continental slope off Manzanillo, Mexico, *Tectonophysics* **398**, 115–140, doi: [10.1016/j.tecto.2005.01.004](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.01.004).

Bandy, W., C. Mortera-Gutiérrez, J. Urrutia-Fucugauchi, and T. Hilde (1995). The subducted Rivera–Cocos plate boundary: Where is it, what is it, and what is its relationship to the Colima rift? *Geophys. Res. Lett.* **22**, no. 22, 3075–3078.

Bárcena, M. (1875). Seismología. Los Terremotos de Jalisco, in *Informe y Colección de Artículos relativos a los fenómenos geológicos verificados en Jalisco en el presente año y en épocas anteriores*, Vol. Tomo II, Tipografía de S. Banda, Guadalajara, Jalisco, Mexico, 221–238 (in Spanish).

Biblioteca Pública del Estado de Jalisco (BPEJ) (1816). *Archivo de la Real Audiencia*, Ramo civil, Caja 419 Exp 3 Progresivo 6783 (in Spanish).

Borrero, J., M. Ortiz, V. Titov, and C. Synolakis (1997). Field survey of Mexican tsunami produces new data, unusual photos, *Eos Trans. AGU* **78**, no. 8, 85–88.

Brand, D. (1958). *Study of Southwest Mexico. Part II*, University of Texas, Department of Geography, Austin, Texas, 279 pp.

Cerny, J., M.-T. Ramírez-Herrera, M.-F. Bógallo, A. Goguitaichvili, R. Castillo-Aja, J. Morales, and A. C. Ruiz-Fernández (2016). Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast, *Int. Geol. Rev.* **58**, no. 3, 342–357, doi: [10.1080/00206814.2015.1075230](https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1075230).

Comisión Sobre Los Temblores de Febrero de 1875 (1875). Informe, in *Informe y Colección de Artículos Relativos a los Fenómenos Geológicos Verificados en Jalisco en el Presente Año y en Epocas Anteriores*, Edición Oficial ed., Vol. Tomo I, Tip. de S. Banda, Guadalajara, Jalisco, Mexico, Calle de Mestranza No. 4 (in Spanish).

Corona, N., and M. T. Ramírez-Herrera (2012a). Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June 1932 tsunami, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **12**, 1337–1352, doi: [10.5194/nhess-12-1337-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-1337-2012).

Corona, N., and M. T. Ramírez-Herrera (2012b). Historic-etnographic techniques in the reconstruction and characterization of tsunamis: The example of the great tsunami of 22 June 1932, the Pacific coast of Mexico, *Rev. Geogr. Norte Gd.* **53**, 107–122 (in Spanish).

Corona, N., and M. T. Ramírez-Herrera (2015). Did an underwater landslide trigger the June 22, 1932 tsunami off the Pacific coast of Mexico? *Pure Appl. Geophys.* **127**, no. 12, doi: [10.1007/s00024-015-1171-1](https://doi.org/10.1007/s00024-015-1171-1).

Courboux, F., S. Singh, and F. Pacheco (1997). The 1995 Colima-Jalisco, Mexico, earthquake (M_w 8): A study of the rupture process, *Geophys. Res. Lett.* **24**, no. 9, 1019–1022, doi: [10.1029/97GL00945](https://doi.org/10.1029/97GL00945).

Cruz, G., and M. Wyss (1983). Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific coast of Mexico and Central America, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **73**, no. 2, 553–570.

- Cupul-Magaña, L. A., A. L. Cupul-Magaña, F. J. Nuñez-Cornu, and E. Gil Silva (2004). Erosion event at Mismaloya Beach, Jalisco, Mexico, *Cienc. Mar.* **30**, no. 3, 417–425.
- DeMets, C., and S. Stein (1990). Present-day kinematics of the Rivera plate and implications for tectonics in southwestern Mexico, *J. Geophys. Res.* **95**, no. B13, 21931–21948, doi: [10.1029/JB095iB13p21931](https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21931).
- Desert Evening News (1900). Friday, March 2, 1900, Salt Lake City, Utah, Number 88, in *Utah Digital Newspapers*, 3 pp., udn.lib.utah.edu/cdm/compoundobject/collection/den1/id/19419/rec/53 (last accessed May 2015).
- Duda, S. (1965). Secular seismic energy release in circum-Pacific belt, *Tectonophysics* **2**, 409–452, doi: [10.1016/0040-1951\(65\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(65)90035-1).
- Eissler, H. K., and K. C. McNally (1984). Seismicity and tectonics of the Rivera plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico, earthquake, *J. Geophys. Res.* **89**, no. B6, 4520–4530, doi: [10.1029/JB089iB06p04520](https://doi.org/10.1029/JB089iB06p04520).
- El Estado de Colima (1900). 20 January 1900. *Biblioteca Pública del Estado de Jalisco* (in Spanish).
- El Imparcial (1900). 21 January 1900. *Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP* (in Spanish).
- El Informador (1932). *El Informador*, 19 June 1932, <http://hemeroteca.informador.com.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- El Informador (1933a). *El Informador*, 22 February 1933, p. 1, <http://hemeroteca.informador.com.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- El Informador (1933b). *El Informador*, 9 May 1933, p. 2, <http://hemeroteca.informador.com.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- El Informador (1948). *El Informador*, 5 December 1948, <http://hemeroteca.informador.com.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- El Siglo XIX (1845). Informe del Escmo. Sr. Prefecto del Distrito del Sud-Oeste del Departamento desde Colima, Dated 21 April 1845, appeared in *El Siglo XIX*. Saturday 10 May 1845. Año VI. Trim I. Primera Plana, in World Newspaper Archive, available at <http://www.readex.com/content/world-newspaper-archive> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- El Sol Diario de la Tarde (1900). *Días 21, 23 and 24 January 1900*, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932a). *El Universal*, 24 June 1932, p. 2, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932b). *El Universal*, 24 June 1932, p. 1, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932c). *El Universal*, 25 June 1932, p. 5, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932d). *El Universal*, 25 June 1932, p. 5, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932e). *El Universal*, 24 June 1932, p. 1, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932f). *El Universal*, 27 June 1932, p. 8, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- El Universal (1932g). *El Universal*, 24 June 1932, p. 1, Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco (in Spanish).
- Engdahl, E., and A. Villaseñor (2002). Global seismicity: 1900–1999, in *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Vol. 81A, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, Committee on Education, Academic Press, London, United Kingdom, 665–690.
- Figuroa, J. (1963). Historia Sísmica y Estadística de Temblores de la Costa Occidental de México, *Bol. Bibl. Geof. Ocean. Am.* 107–134 (in Spanish).
- Figuroa, J. (1970). *Catálogo de Sismos Ocurridos en la República Mexicana*, UNAM, Mexico (in Spanish).
- Figuroa, J. (1974). Sísmicidad en Colima. Macrosismo del 30 de enero de 1973, *Instituto de Ingeniería*, No. 332 (in Spanish).
- Fuchs, C. W. (1886). *Statistik der erdbeben von 1865-1885*, Aus der Kaiserlich-königlichen hof und staatsdruckerei, Vienna, Austria (in German).
- García Acosta, V., and G. Suárez Reynoso (1996). *Los Sismos en la Historia de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social y el Fondo de Cultura Económica, México (in Spanish).
- Gómez-González, J. M., C. Mendoza, A. Sladen, and M. Guzmán-Speziale (2010). Kinematic source analysis of the 2003 Tecoman, México, earthquake (M_w 7.6) using teleseismic body wave, *Bol. Soc. Geol. Mex.* **62**, no. 2, 249–262.
- Guidoboni, E., and J. E. Ebel (2009). *Earthquakes and Tsunamis in the Past: A Guide to Techniques in Historical Seismology*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Gutenberg, B. (1956). Great earthquakes 1896–1903, *Eos Trans. AGU* **37**, no. 4.
- Gutenberg, B., and C. Richter (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Heck, N. (1947). List of seismic sea waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **37**, no. 4, 269–286.
- International Seismological Centre (2013). *ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009)*, available at www.isc.ac.uk/iscgem/ (last accessed May 2015).
- Jaramillo, S. H., and G. Suárez (2011). The 4 December 1948 earthquake (M_w 6.4): Evidence of reverse faulting beneath the Tres Marias escarpment and its implications for the Rivera–North American relative plate motion, *Geofis. Int.* **50**, no. 3, 313–317.
- Kelleher, J., L. Sykes, and J. Oliver (1973). Possible criteria for predicting earthquake location and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *J. Geophys. Res.* **78**, 2547–2585.
- Kostoglodov, V., and W. Bandy (1995). Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates, *J. Geophys. Res.* **100**, no. B9, 17,977–17,989.
- Kostoglodov, V., and F. J. Pacheco (1999). *Catálogo de los sismos más fuertes en México ($M > 6.5$)*, Retrieved 2013, from Cien Años de Sísmicidad en México usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html (last accessed May 2015) (in Spanish).
- La Colonia Española (1875). *Telegram published in La Colonia Española newspaper*, 12 March 1875, p. 2, Hemeroteca Nacional Digital, available at <http://www.hndm.unam.mx/> (last accessed May 2015) (in Spanish).
- La Gazeta de Mexico (1806). Tomo XIII, Num. 33 p. 63–64, *Biblioteca Nacional de España, Hemeroteca Nacional Digital*, available at www.bne.es/es/Catalogos/HemerotecaDigital/ (last accessed May 2015) (in Spanish).
- La Libertad (1900). 21 January 1900, *Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco* (in Spanish).
- Lander, J. F., L. S. Whiteside, and P. A. Lockridge (2003). Two decades of global tsunamis 1982–2002, *Sci. Tsunami Hazards* **21**, no. 1, 1–88.
- Las Noticias (1932). 24 June 1932, *de la Biblioteca Pública de Jalisco* (in Spanish).
- Lee, W., and R. Benson (2008). Making non-digitally-recorded seismograms accessible online for studying earthquakes, in *Interdisciplinary Studies of Past and Recent Earthquakes*, J. Fréchet, M. Meghraoui, and M. Stucchi (Editors), Springer, New York, U.S.A., 403–427.
- Los Angeles Herald (1900). 3 March 1900, p. 2, Accessed from the California Digital Newspaper Collection, <http://cdnc.ucr.edu/cgi-bin/cdnc> (last accessed May 2015) .
- McNally, K., and B. Minster (1981). Nonuniform seismic slip rates along the middle American trench, *J. Geophys. Res.* **86**, no. B6, 4949–4959.
- Meady County News, Kansas (1900). 31 May 1900, p. 2, Library of the Congress, <http://chroniclingamerica.loc.gov/> (last accessed May 2015).
- Melbourne, T., I. Carmichael, C. DeMets, K. Hudnut, O. Sanchez, J. Stock, G. Suárez, and F. Webb (1997). The geodetic signature of the M 8.0 Oct. 9, 1995, Jalisco subduction earthquake, *Geophys. Res. Lett.* **24**, no. 6, 715–718.
- Milne, J. (1911). *A Catalogue of Destructive Earthquakes A.D. 7 to A.D. 1899*, British Association for the Advancement of Science, London, United Kingdom.
- Miranda y Marrón, M. (1912–1914). El Temblor del 7 de Junio de 1911, *Memorias de la Sociedad Científica “Antonio Alzate”*, XXXII, 27–66 (in Spanish).

- Montessus de Ballore, F. (1906). *Les Tremblements de Terre: Geographie Seismologique*, Librairie Armand Colin, Paris, France (in French).
- Morales, B. (1900) *Carta a Don Jose Ives Limantour en donde se explican los daños ocasionados por el temblor del 19 de enero de 1900 a las vías del tren y las instalaciones en el puerto de Manzanillo*, Centro de Estudios Históricos CARSO, www.cehm.com.mx/ (last accessed May 2015) (in Spanish).
- National Centers for Environmental Information (NCEI), National Geophysical Data Center/World Data Service (NGDC/WDS) (2015). *Global Historical Tsunami Database*, National Geophysical Data Center, NOAA, doi: [10.7289/V5PN93H7](https://doi.org/10.7289/V5PN93H7), available at http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (last accessed May 2015).
- Ordoñez, E. (1933). Seismic activity in Mexico during June 1932, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **23**, no. 2, 80–82.
- Orozco y Berra, J. (1887–1888). Efemerides Sísmicas Mexicanas, *Memoorias de la Sociedad Científica “Antonio Alzate”* (in Spanish).
- Ortiz, M., J. I. Gonzalez, N. A. Ramírez-Mondragon, and S. F. Farreras (2003). Quick field survey of the 22 January 2003 (M 7.8) Colima-Mexico earthquake-tsunami, *Tsunami Newsletter XXXV*, no. 1, 3–5.
- Ortiz, M., V. Kostoglodov, S. Singh, and J. Pacheco (2000). 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, Mexico, *Geofis. Int.* **39**, no. 4, 349–357.
- Oseguera Velázquez, J. (1967). *Colima en Panorama. monografía histórica, geográfica, política y sociológica*, Al Libro Mayor, Colima, Mexico (in Spanish).
- Pararas-Carayannis, G. (1988). Source mechanism of the tsunamis of 19 and 21 September 1985, in Mexico, *Nat. Hazards* **1**, 285–294, doi: [10.1007/BF00137233](https://doi.org/10.1007/BF00137233).
- Pardo, M., and G. Suárez (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications, *J. Geophys. Res.* **100**, no. B7, 12,357–12,373, doi: [10.1029/95JB00919](https://doi.org/10.1029/95JB00919).
- Pasarić, M., B. Brizuela, L. Graziani, A. Maramai, and M. Orlic (2012). Historical tsunamis in the Adriatic Sea, *Nat. Hazards* **61**, 281–316, doi: [10.1007/s11069-011-9916-3](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9916-3).
- Ramírez-Herrera, M. T., M. F. Bógallo, J. Cerny, A. Goguitchaichvili, N. Corona, M. L. Machain, and S. Sosa (2016). Historic and ancient tsunamis uncovered on the Jalisco-Colima Pacific coast, the Mexican subduction zone, *Geomorphology* **256**, 90–104, doi: [10.1016/j.geomorph.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.011).
- Ramírez-Herrera, M.-T., M. Lagos, I. Hutchinson, V. Kostoglov, M.-L. Machain, M. Caballero, and P. Quintana (2012). Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms?—A multi-proxy approach, *Geomorphology*, **139–140**, 360–371, doi: [10.1016/j.geomorph.2011.11.002](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.002).
- Río de la Loza, L. (1863). Extracto del expediente instruido por el subdelegado de Colima sobre el terremoto que destruyó parte de aquella ciudad en el año de 1818, *Bol. Soc. Mex.* **X**, no. 3, 39–41 (in Spanish).
- Ruff, L., and A. D. Miller (1994). Rupture process of large earthquakes in the northern Mexico subduction zone, *Pure Appl. Geophys.* **142**, no. 1, 101–171.
- Sánchez, A. J., and S. Farreras (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México (Vols. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50)*, United States Department of Commerce, Boulder, Colorado.
- San Francisco Call (1900). *19 May 1900. Special dispatch for The Call*, front page, Library of the Congress, <http://chroniclingamerica.loc.gov/> (last accessed May 2015).
- Seismological Notes (1949). *Bull. Seismol. Soc. Am.* **39**, no. 1, 64.
- Silva, A. (1900). *Carta de Atenógenes Silva Obispo de Colima a su feligresía*, Colima, Mexico (in Spanish).
- Singh, K., and F. Mortera (1991). Source time functions of large Mexican subduction earthquakes, morphology of the Benioff zone, age of the plate, and their tectonic implications, *J. Geophys. Res.* **96**, no. B13, 21,428–21,501, doi: [10.1029/91JB02047](https://doi.org/10.1029/91JB02047).
- Singh, S., and J. Lermo (1985). Mislocation of Mexican earthquakes as reported in international bulletins, *Geofis. Int.* **24**, no. 2, 333–351.
- Singh, S., and G. Suárez (1988). Regional variation in the number of aftershocks ($m_b \Rightarrow 5$) of large, subduction-zone earthquakes ($M_w \Rightarrow 7.0$), *Bull. Seismol. Soc. Am.* **78**, no. 1, 230–242.
- Singh, S., L. Astiz, and J. Havskov (1981). Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **71**, no. 3, 827–843.
- Singh, S., L. Ponce, and S. Nishenko (1985). The Great Jalisco, Mexican earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1301–1313.
- Singh, S., M. Rodríguez, and J. Espíndola (1984). A catalog of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **74**, no. 1, 267–279.
- Singh, S., X. Perez-Campos, A. Iglesias, and J. Pacheco (2008). An exploratory study for rapid estimation of critical source parameters of great subduction-zone earthquakes in Mexico, *Geofis. Int.* **47**, no. 4, 355–369.
- Soloviev, S., and C. N. Go (1984). *Catalog of Tsunamis of the Eastern Shore of the Pacific Ocean*, Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Ontario.
- Soloviev, S. L., and Ch. N. Go (1975). *A Catalogue of Tsunamis on the Eastern Shore of the Pacific Ocean [Dates Include 1513-1968]*, Academy of Sciences of the USSR, Nauka Publishing House, Moscow, 204 pp., Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences no. 5078, 1984, translation available from Canada Institute for Scientific and Technical Information, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada KIA OS2, 293 pp.
- Suárez, G., S. H. Jaramillo, and W. Bandy (2013). Relative motion between the Rivera and North American plates determined from the slip direction of earthquakes, *Pure Appl. Geophys.* **170**, 2163–2172, doi: [10.1007/s00024-013-0667-9](https://doi.org/10.1007/s00024-013-0667-9).
- Tello, F. A. (1984). *Cronica Miscelanea de la Sancta Provincia de Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco*, Universidad de Guadalajara, Instituto Jalisciense de Antropología e Historia, Guadalajara (in Spanish).
- The Jeffersonian-Gazette (1911). *Lawrence, Kansas. 7 June 1911*, p. 3, www.newspaperarchive.com (last accessed May 2015).
- The New York Times (1900). *22 January 1900, New York Times Article Archive*, www.cehm.com.mx (last accessed May 2015).
- The Syracuse Herald (1911). *10 Junr 1911*, front page, <http://fultonhistory.com> (last accessed May 2015).
- Tsunami Laboratory (2015). *Web Encyclopedia on Natural Hazards*, Novosibirsk, Russia, <http://tsun.sccc.ru/nh/list.html> (last accessed May 2015).
- Udías, A. (2015). Historical earthquakes (before 1755) of the Iberian peninsula in early catalogues, *Seismol. Res. Lett.* **86**, no. 3, 999–1005, doi: [10.1785/0220140200](https://doi.org/10.1785/0220140200).
- UNAM Seismology Group (1986). The September 1985 Michoacan earthquakes: Aftershock distribution and history of rupture, *Geophys. Res. Lett.* **13**, no. 6, 573–576.
- Urzúa Orozco, R. (no date). *Trilogía Histórica de Tecmán*, Sociedad Colimense de Estudios Históricos, A.C., Colima, Mexico (in Spanish).
- Valdivia, L., R. Castillo, and M. Estrada (2012). La Historia No Contada del Tsunami del 3 de junio de 1932 que golpeó las Costas del Municipio de Tomatlán, Jalisco, *Geocalli. Cuadernos de Geografía* **25**, 13–100 (in Spanish).
- Vizcaino, J. (1986). *Cronicas de Zapotlan. Historia de los temblores. 1543-1985*, Archivo Municipal, Zapotlan, Mexico (in Spanish).
- Wigen, S. (1979). *Tsunami Frequency at Tofino and Port Alberni*, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, British Columbia.
- Zúñiga, R., G. Suárez, and Y. García-Acosta (1997). *Peligro Sísmico en América Latina y El Caribe*, Instituto Panamericano de Geografía, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Canada (in Spanish).

Rocio Castillo-Aja
 Posgrado en Geografía
 Universidad Nacional Autónoma de México
 Av. Universidad 3000, Coyoacán

Mexico City, Mexico
rocasaja@yahoo.com
rocasaja@gmail.com

04510 Mexico, D.F., Mexico
maria_teresa_ramirez@yahoo.com
tramirez@igg.unam.mx

María Teresa Ramírez-Herrera¹
Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental & IGG
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
Coyoacán

Published Online 7 December 2016

¹ Also at the Berkeley Seismological Laboratory, Department of Earth and Planetary Science, University of California Berkeley, California, U.S.A.;
ramirez@seismo.berkeley.edu.

CAPÍTULO 2

HUELLAS SEDIMENTARIAS Y POR MICROFÓSILES PRODUCIDAS POR SISMOS Y TSUNAMIS HISTÓRICOS EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DE LA COSTA DE JALISCO

SEDIMENTARY AND MICROFOSSIL IMRINT FROM HISTORICAL EARTHQUAKES AND TSUNAMIS, JALISCO COAST, MEXICAN SUBDUCTION

Artículo sometido y en revisión en la revista *Marine Geology*

Anexo 4. Tabla con resultados de análisis del tamaño de grano para las muestras del sitio JAL-04

SEDIMENTARY AND MICROFOSSIL IMRINT FROM HISTORICAL EARTHQUAKES AND TSUNAMIS, JALISCO COAST, MEXICAN SUBDUCTION¹

Rocio Castillo-Aja^a (rocasaja@academicos.udg.mx , corresponding autor)

María-Teresa Ramírez-Herrera^b (tramirez@igg.unam.mx)

María Luisa Machain-Castillo^c (macahin@cmarl.unam.mx)

Avto Goguitchaichvili^d (avto@geofisica.unam.mx)

^a Posgrado en Geografía, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria. Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

^b Laboratorio de Geofísica Ambiental, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N. Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

^c Unidad Académica Procesos Oceánicos y Costeros. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N. Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

^d Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, México.

¹ Sometido a la revista *Marine Geology*

ABSTRACT

Tsunamis are high energy events capable of leaving their imprint in the geological record. The western Mexican Pacific coast, located in the Mexican Subduction Zone, is prone to large earthquakes ($M \geq 8.0$) where tsunami hazard has been underrated. The geologic archive obtained in a sheltered coastal lagoon was analyzed applying a multi-proxy approach to reveal the occurrence of historical earthquakes in the Jalisco coast. Foraminifera and Ostracoda aid identifying earthquake and tsunami geologic evidence in this section of the Mexican Pacific coast, where tropical conditions prevail. We present the evidence of changes in stratigraphy, grain size, biostratigraphy supported by archaeomagnetic dating. They were complemented with published ^{210}Pb dating, magnetic properties, and historical data. We identified three events: the tsunami deposit left by the June 3rd, 1932 tsunami, produced by the largest earthquake ($M=8.2$) recorded in instrumental history in México and the coseismic deformation resulting from the 1932 event, also a probable tsunami deposit likely produced by an historical earthquake in 1900, and the coseismic deformation associated to this event, and the coseismic deformation resulting produced by the 1563 earthquake. The site geomorphology precludes tropical storms as responsible for marine incursions. This work contributes to strengthening the earthquakes and associated tsunamis chronology, aiming to improve the coastal hazard assessment for the area.

Key words: Tsunamis, Tsunami deposit, Microfossils, Grain Size, Western Mexican Pacific coast.

1. INTRODUCTION

The great earthquakes that have produced transoceanic tsunamis during the 21th century (Indian Ocean, 2004; Chile, 2010 and Tohoku Japan, 2011) not only had boosted a significant scientific progress in the study of tsunami geology, but a world concern about the threat of tsunamis for coastal human settlements (Satake, 2014). The recurrence time for these great earthquakes is insufficiently covered by instrumental measurements and even by historical data. This fact explains the development of multi-proxy techniques to assess the geologic record to widen the chronology of these catastrophic phenomena (e.g. Cisternas et al., 2005; Dawson and Stewart, 2007; Jankaew et al., 2008; Fujino et al., 2009; Goto et al., 2011; Weiss and Bourgeois, 2012). It is known that earthquakes $M \geq 6.5$ could generate tsunamis but it is more likely that those $M \geq 7$ leave a depositional signature; however, earthquakes $M \geq 8.0$ and especially those $M \geq 9.0$ are the best candidates to produce the clearest deposits (Fujiwara, 2007; Bourgeois, 2009). There is a direct relationship between earthquake magnitude and environmental imprints in the geologic record (Nanayama et al., 2003; Fujiwara, 2007).

The Mexican subduction zone is prone to large earthquakes ($M \geq 8.0$) that have generated at least two well-documented tsunamis on the Jalisco coast in 1932 and 1995. Historical data are not traceable beyond 500 years (García Acosta and Suárez, 1996; Castillo-Aja and Ramírez-Herrera, 2017), thus the study of the geologic record could be a useful tool to understand the seismic cycle at the interface between Rivera-Cocos-North American tectonic plates. Previous studies in the region have demonstrated the usefulness of multi-proxy approach to identify evidence of ancient earthquakes and tsunamis (Černý et al., 2016; Ramirez-Herrera et al., 2007; Ramírez-Herrera et al., 2012, 2015 and 2016).

The aim of our study is to use microfossils (Foraminifera and Ostracoda) preserved in this section of the west Mexican Pacific coast, in combination with stratigraphy, grain size and archaeometry, and published magnetic properties and ^{210}Pb data reported by Černý et al. (2016), to reveal marine incursions and coseismic deformation and to contribute to build a reliable chronology of large earthquakes and tsunamis in this region. Here we present evidence of a tsunami deposit related to the 3 June 1932 earthquake and tsunami, and an older event likely produced by a large earthquake in 1900. We also report on evidence of associated coseismic subsidence in 1932 and 1900, and coseismic uplift presumably produced by the 1563 earthquake.

2. SETTING

The study site is located on the Jalisco coast near the subduction of the Rivera plate under the North American plate. The estimated convergence rate between these plates ranges 2.0 – 3.3 cm/yr (DeMets and Stein, 1990). This section of the coast is characterized by a relatively narrow continental shelf and shows evidence of uplift, by marine terraces and notches, which has been estimated in 3 ± 0.5 mm/yr along the past 1,300 yr BP (Ramírez-Herrera et al., 2004). At least two earthquakes ($M\geq 8.0$) have produced tsunamis that had flooded the site on June 3, 1932, and October 19, 1995, documented by recent studies (Černý et al., 2016 and Castillo-Aja and Ramírez-Herrera, 2017), see Figure 1.

Las Salinas is a small and narrow coastal lagoon located in the middle of the Jalisco state, Pacific coast, México ($19^{\circ}25'47''$ N, $105^{\circ}01'17''$ W), approximately 60 km from the Middle American trench formed at the Rivera-Cocos subduction under the North American plate

(Figure 2a). It is characterized by an alluvial Holocene plain with access to the ocean through the Careyitos Bay to the north, and the Teopa Bay to the south. It is sheltered from the sea by a rhyolitic (Tertiary) low headland with cliffs that face the ocean; and surrounded by low hills of volcanic-sedimentary rocks (Cretaceous) and polymictic conglomerates with sand (SGM, 2016). It is fed by seasonal streams arranged in a small watershed, its maximum depth is 2 m, and the estuary on its southern extreme rarely breaks the bar formed in the Teopa beach (Figure 2d). During the dry season, the lagoon retains a reduced sheet of water and could be completely flooded by the end of the rainy season (NASA, 2017) (Figure 2c). The landscape shows a beach, with parallel dunes, narrower (<50 m wide) in Careyitos than in Teopa (~500m) with two beach ridges; a lagoon with perennial water body, a flooded beach during the rainy season, and a small estuary with a bar; an alluvial plain, mainly produced by the San Nicolas River, and the Cajones stream forms a small estuary in the center of the Teopa Beach; remains of an ancient beach in the south of Teopa inlet; low hills formed by Pleistocene conglomerates; headland formed by Tertiary rhyolites; and low hills of Cretacic volcanic-sedimentary rocks (Figure 2 b).

The lagoon is surrounded by mangrove and low deciduous tropical forest, with halophytic grasses growing on the lagoon beach (Figure 2c). Climate is dry and warm, with average annual temperatures of 25°C and average annual precipitation of 769 mm (CNA, SMN, 2015). Rainfall concentrates during the summer, but 5-10.2% of the total precipitation may occur in winter (Vidal Zepeda, 2007). The cyclonic activity in the Pacific Ocean controls the rainfall regime and produces rains from June through October. The coast has a microtidal environment (Murray, 2006) where the tidal regime is considered as mixed prevailing semi-diurnal (Fernández-Eguiarte et al., 1990-1992), with two high and two low tides by day, when

the moon is near waxing crescent or waning crescent the tide becomes diurnal few days before and after (Ducoing Chahó, 2006). Tides at the site have 1.9 m amplitude average (Ducoing Chahó, 2006). These data though differ from the average tide amplitude in Manzanillo Port of 0.74 m, and the highest tide values instrumentally measured of 0.4 m (in maximum) and -0.1 m (in minimum) at Puerto Vallarta during the Hurricane Patricia (Servicio Nacional Mareográfico (UNAM, 2015)). Patricia, a 5 category hurricane on Saffir-Simpson wind speed scale, made landfall in Emiliano Zapata (Kimberlain et al., 2016), only 8 km southwestward from the study site.

3. METHODS

A multi-proxy approach was applied to study Las Salinas. Historical evidence and geomorphology were used to select the site. Samples were collected at the site to be processed in the laboratory.

3.1 Field survey

The field campaign was performed on April 2013 during the dry season. Site selection followed criteria described by Peters and Jaffe (2010), Hutchinson et al. (1997) and Shiki (2008) and local geomorphology interpreted using Google Earth multi-temporal images, aerial photographs (CETENAL, 1970), orthophotos, and topographic maps (INEGI, several dates). An open pit (Jal04) was dug ~382 m from and perpendicular to the coastline, on the lagoon beach. A monolith (90 x 9 x 5 cm) was collected for further analysis in the laboratory. Pit Jal05 was dug 20 m southwestern from Jal04, where a 50 cm long core was extracted for ^{210}Pb dating described at Černý et al. (2016). Pit Jal07 was dug near Careyitos inlet where

three pottery samples were taken at 33-35 cm depth and the stratigraphy and grain size were described; additionally, two sand beach samples were obtained from Careyitos beach. A stratigraphic description of the pits was made in the field and studied pits were photographed (Figure 3).

3.2 Grain size analysis

The collected monolith was logged and subsampled discretely for grain size (12 samples) and microfossil (18 samples) analysis in the laboratory (Figure 4). Grain size analysis is often used as a proxy to identify allochthonous sediment in the stratigraphic column, inferred from physical characteristics of the sediment (e. g. Dawson et al., 1996). For grain size analysis, organic matter was removed before using a Laser diffraction Bechman Coulter LS 230; after that, GRADISTAT software (Blott and Pye, 2001) was used to obtain grain size (ϕ), sorting (standard deviation (σ), skewness and kurtosis using the logarithmic Folk and Ward (1957) graphical measures. Samples were processed at the Laboratory of Sedimentology at the Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM).

3.3 Microfossil analysis

Microfossils have been used as a proxy to record environmental changes in coastal areas produced by changes in sea level and to identify marine incursions (Mamo et al., 2009; Pilarczyk et al., 2014) generated by tsunamis or storms. Subsamples (5 g) for foraminifers and ostracods analysis were taken at 1cm intervals; they were washed through a 63 μ m sieve to remove mud and dried out at room temperature, the complete sample sediment was sieved through 40, 60 and 80 meshes to isolate and pick the tests and valves. An average of 239 foraminiferal tests and 79 ostracod valves were picked per sample, later were identified,

following WoRMS (2016), Ellis and Messina Foraminifera and Ostracoda Catalogs (2016), Phleger (1951), Phleger and Parker (1951) and Sen Gupta et al. (2009), and counted under a binocular microscope; some marine diatoms big enough to remain as part of the sieved sediment were picked as well, mounted using Naphrax and reviewed under a Nikon NIU transmitted light optical microscope AT 100x using immersion oil. All the samples were processed in the Laboratory of Micropaleontology and Paleoceanography at Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM).

3.4 Chronology

The chronology of the column was built from results using ^{210}Pb and ^{137}Cs dating previously reported by Černý et al. (2016), magnetic properties and absolute age determination of pottery samples, in conjunction with historical data from Castillo-Aja and Ramírez-Herrera (2017).

We also used archaeomagnetic dating on ceramics found in pit Jal07. Archaeomagnetic dating is based on the fact that burned artifacts may acquire a so-called thermoremanent magnetization generally proportional to its absolute intensity. Magnetic dating of displaced material (such as ceramic samples) consists in comparing the magnitude of the magnetization against the reference, regional curve of geomagnetic strength variation in order to associate a date to the archeological piece under study. Prior to the absolute archaeointensity determination we estimated the thermal stability of the pottery samples through susceptibility vs. temperature curves (Figure 8) recorded using AGICO MFK-1B susceptibility bridge. Continuous thermomagnetic curves were recorded heating samples around 640°C and cooling them down to room temperature.

Remanence measurements were carried out using an AGICO JR6A spinner magnetometer. The pottery fragments under study were previously fragmented into 5 or more specimens and pressed into salt pellets to measure them as standard paleomagnetic samples (e.g. Morales et al., 2009). Archaeointensity experiments were carried out using the Thellier and Thellier, 1959 method as modified by Coe et al., (1978) using an ASC TD-48 paleointensity oven (Figure 8 b and c). Control heatings (also known pTRM-checks) were performed throughout whole experiments until 570 °C. The cooling rate dependence of TRM (Thermoremanent Magnetization) was investigated following a modified procedure (e.g. Morales et al., 2009) to that described by Chauvin et al. (2000), while remanence anisotropy effect was investigated following the procedure reported by Morales et al. (2015).

4. RESULTS

4.1 Stratigraphy and grain size

The Jal04 monolith has eight units predominantly composed of siliceous sands with silt and shells debris. The four deepest units are thicker (~20 cm); gradual contacts occur in the basal contacts of units E4 and E6. The water table was found at ~65 cm depth. The three uppermost units (E1, E2 and E3) are slightly tilted with sharp and irregular basal contacts between them.

The following description is made from data obtained in the field and in the laboratory (Figure 4). E7 is the lowest stratigraphic unit (78 to 90 cm), composed of moderately sorted fine sand with some angular quartz grains and with no visible basal contact. E6 (60-78 cm) consists of fine sand mixed with fragmented shells at 78 - 70 cm, and then very fine sand prevailing from 70 - 60 cm, it shows a gradual basal contact. E5 (40-60 cm) is massive,

composed of very fine sand ($Mz=3.5\phi$) and clay mottles, a pebble was found inserted in a clay mottle at ~60 cm depth where the sharp basal contact was identified. E4 unit (19-40 cm) consists of very fine-fine sand ($Mz=2.9\phi$), and bivalves shells with a slight increase in clay content near the base (3.6% in the top to 5.8% in the bottom), it exhibits a ~2 cm gradational basal contact.

Unit E3 (8-19 cm) has three layers, the lowest one ~4 cm thick, consisting of fine sand ($Mz=2.9\phi$) with some rounded gravels and shell debris, overlaid by a ~2 cm thick layer made of silt-clay intercalations and, on the top, 5 cm of very fine sand with silt and clay, some gravels and shells; it shows a sharp irregular basal contact. Unit E2 (3-8 cm) shows the finest grain size values ($Mz=4.8 \phi$) at its base, ranging from silty fine sand very poorly sorted in the base to moderately sorted fine sand in the top (inverse gradation), some plant debris was found at 7cm deep and has a sharp, irregular and tilted basal contact. E1 unit (1-3 cm) consists of fine sand with gravel and shell fragments, a black sheet of silt was identified in the field and it is clearer in Jal07 (Figure 3e). E0 unit (0-1 cm) was lost on the monolith but was described in the field; it is composed by light gray fine to medium sand with shell fragments, the top is covered by a thin salt layer.

Comparative grain size statistic values plotted in Figure 5 show E2 values as the lowest and most anomalous, with extreme sorting values, where E2(8) is the poorest sorted and E2(4) is the best sorted of the column; they are similarly fine skewed and both have the highest kurtosis values. The rest of the samples, form two clusters where sorting, grain size and skewness values are similar: the first group encompassed by dashed green line consists of very fine sand with silt, mesokurtic and fine skewed; the second group, encompassed by the

magenta dashed line, have slightly coarser grain sizes, fine skewed and less homogeneous kurtosis values ranging between mesokurtic and leptokurtic. E1, E4, E5, and E7 belong to one cluster, while E3 and E6 have samples in both clusters.

The stratigraphic units identified in pit Jal07 (E0-E5) correspond with those presented above but thinner and with the water table at 35 cm (Figure 3). In the image the uppermost units are easier to distinguish, where (E0) is a thin white layer overlaying a black organic silt unit (E1).

4.2 Microfossils

The presence of foraminifers, ostracods and diatoms have been used as a proxy to infer environmental changes and to identify marine incursions (Sawai et al., 2004; Dawson, 2007; Ruiz et al., 2010; Suresh Gandhi et al., 2010; Uchida et al., 2010; Tanaka et al., 2012; Dura et al., 2015). Because Foraminifera and Ostracoda are made of carbonates, their preservation has been reported as difficult in tropical areas where high temperatures prevail, so do diatoms even they are made of silica (Sawai et al., 2009; Yawsangratt et al., 2012). At Las Salinas site the number of specimens tends to diminish with depth (Figure 4). Table 1 shows the absolute abundance of Foraminifera, Ostracoda and marine Diatomea by species or genera and grouped by environmental affinity while images of some specimens are shown in Figure 7.

Although changes in grain size statistical values are subtle downcore microfossils are helpful to better characterize the biostratigraphy. Figure 6 shows values in proportions by every species or group. The dominant species, *Palmerinella gardenislandensis* and *Perissocytheridea sp.* which prevail along the core are typical of coastal lagoons. The rest

of foraminifers and ostracods species are detailed in Table 1. All diatoms found were identified as marine and belong to the genus *Coscinodiscus* or *Thalassiosira*.

We found some individuals (<18) of marine foraminifers and ostracods (*Lagena sp.*, *Cassidulina sp.*, *Rosalina sp.*, *Quadracythere sp.*, *Xestoleberis sp.* and *Neocadites sp.*), as well as marine diatoms in the lowest units (E7 and E6) accompanied by intertidal foraminifers and brackish ostracods. The contact between E6 and E5 shows a shift towards a less saline environment, suggested by the disappearance of marine species and fewer intertidal species; brackish Ostracoda and Foraminifera remain almost stable,. The E4 basal contact also shows a slight decrease of freshwater Ostracoda and intertidal Foraminifera almost vanish with a later recovery; at the same time, there are few marine Foraminifera and Diatomea specimens; in this unit, specimens of possible modern bivalve mollusks (*Tagelus langisinuatus* Pilsbry & Lowe, 1932) were found at 19-40 cm depth (Fig. 3).

At the base of unit E3 (8-19 cm), a clear increment in marine diatoms is in agreement with a general decrease in both less tolerant to salt foraminifer (*P. gardenislandensis*) and ostracod (*Limnocythere sp.* and *Cyprideis sp.*). Upwards, from 17 -11 cm, a decline in marine diatoms, *Limnocythere sp.*, *Cyprideis sp.* and *P. gardenislandensis* is observed, while intertidal foraminifers, *Ammonia* and *Cyprideis sp.* increase. E2 (3-8 cm) shows again the presence of some marine Ostracoda, Foraminifera and Diatomea. Freshwater *Limnocythere sp.* vanishes; *Ammonia spp.* and *Perossitheridea sp.* reach their maximum and the intertidal foraminifers decline. At the top, the unit E1 *P. gardenislandensis* shows a small increment while *A. tepida*, *A. parkinsoniana* and intertidal foraminifers declined, accompanied by an increase of marine diatoms.

4.3 Archaeomagnetic dating of pottery samples

All studied samples displayed reversible susceptibility vs. temperature curves with a single ferromagnetic phase, characterized by Curie temperatures approximately around 570°C, indicative of Ti-poor titanomagnetite (almost magnetite). Some titanohematites may also co-exist but their contribution to the remanent magnetization seems to be negligible. Four specimen yielded reliable absolute intensity determinations meeting generally used acceptance criteria: On the NRM decay/TRM acquisition curve the number of (Figure 8b) aligned points exceeds 7. An NRM fraction f (Coe et al., 1978) more than a 50 % of the initial remanence. No evidence of the remanent magnetization deviations towards the direction of laboratory field (Figure 8c) and positive pTRM checks. The mean archaeointensity based on 4 individual determinations is $44.2 \pm 0.4 \mu\text{T}$. The archaeomagnetic dating (Figure 9) using the last SHADIF14K model of Pavón-Carrasco et al. (2011, 2014) gives a time intervals between 804 and 940 AD and between 1597 and 1665 AD (Figure 9) respectively.

5. DISCUSSION

The sedimentary and stratigraphic record presented above includes eight stratigraphic units, four of them showing abrupt basal contacts that might be related to the occurrence of sudden events. We applied a line of proxies, i.e. site geomorphology, stratigraphy and grain size, microfossils, archaeomagnetic dating, historical data, and correlation with published ^{210}Pb and ^{137}Cs dates and magnetic properties (Černý et al., 2016). Our results suggest the occurrence of sudden and high energy events that left their imprint in the sedimentary record. Although the study area is challenging because of the tectonic complexity, tropical climate, recurrent hurricanes, and the scarcity of historical reports, this place has remain almost

undisturbed. A sheltered lagoon influenced with minor temporal streams and minimal flux of terrigenous sediments helps to protect it from other external disturbances (e.g. storms). Since the tidal regime is mixed prevailing semidiurnal 0.74 m annual average tidal amplitude, it restricts sea waves to surpass the sand bar at the entrance of the estuary.

The homogeneity in grain size in E7 and E6 with slight marine influence marked by marine microfossils, intertidal Foraminifera, and brackish Ostracoda, with a shell debris layer (~ 8 cm thick) suggests a high-energy deposition (e.g. storm or tsunami), the contact between units is gradual and the basal contact of E7 is not visible, additional evidence would confirm this hypothesis. E5 unit exhibits a sharp basal contact where sediments turn slightly finer with clayed mottles (with more content of clays, silt, and very fine sand), showing extremely leptokurtic and very fine skewed curves, and a clear change in mode value. The microfossil signal contributes to mark the sharp basal contact because the disappearance of marine microfossils and freshwater ostracods is accompanied by an increase of brackish Foraminifera and Ostracoda. This suggests a shift in into a less saline environment. Both, the grain size changes and decrease in salinity, together with a sharp basal contact indicate a sudden and rapid event, suggesting a land level change, i.e. possible a rapid coastal uplift. According to historical data, it is probable that an earthquake is responsible for this coastal uplift during the 16th century, May 27, 1563. To elucidate the time of this event, we use a ceramic found at 33 cm depth, i.e. at the top of unit E5. Although archaeomagnetic ceramic dates seem erratic because of their wide range, there are two possible explanations: 1) the ceramic date of 1595-1665 AD, given its stratigraphic position at 33 cm, is accordant with a seismic event registered in 1563, i.e. the ceramic was made after the earthquake and deposited on top of the unit; or 2) the date 804-940 AD might be explained by transportation of this old

ceramic to the site. This kind of dual dates often occurs when the archaeomagnetic dating is performed on non-oriented samples and thus no paleodirections may be retrieved. Hence, we favor the first hypothesis without discarding the oldest dates documented.

E4 (40-19 cm) is divided by a gradual basal contact with E5, and marked by a change in sediment consolidation at ~40 cm depth. Modern bivalves mollusks *Tagelus langisinuatus*, Pilsbry & Lowe, 1932 (Coan and Valentich-Scott, 2012) are abundant along the whole E4 unit, they tolerate a wide range of salinity and live buried in the sediment (infaunal), preferably in silt-clay sediments (Landa, 2003), and were found in dead in vertical position and filled with sand. E4 characterized by homogeneity in grain size and in magnetic susceptibility values (Černý et al., 2016) is accordant with a typical slow deposition environment that would give continuity to E5 unit. The presence of few marine foraminifera and diatoms and a slight decrease of freshwater ostracoda in the basal contact correspond with a brackish lagoon condition similar to the one at E5 unit.

E3 is 11 cm thick and shows an abrupt basal contact marked by an increase in sand content, and the presence of shell debris and some rounded gravels at the bottom of the unit. The grain size of the unit is coarser on its base ($Mz=2.9\phi$) and turns finer near the top ($Mz=3.7\phi$) that implies a normal gradation. The unit is poorly sorted, with values ranging from $\sigma=1.0$ at the base to $\sigma=1.9$ near the top. It shows a marked increase in marine diatoms, *Ammonia spp*, and intertidal foraminifers, with decreases in *Limnocythere sp.* and *P. gardenislandensis*, possibly related to a sudden marine incursion, i.e. a more saline environmental conditions. Černý et al. (2016) based on magnetic susceptibility suggested high energy conditions in this unit. We also observe in this unit characteristics related to tsunami deposits (Figure 10) such

as sharp irregular basal contact, the presence of shell debris and rounded gravels at its base, normal gradation, marine microfossils (Morton et al., 2007), magnetic susceptibility and anisotropy of magnetic susceptibility indicative of a high energy environment (Černý et al., 2016). All these characteristics support a possible sudden land subsidence and a subsequent marine incursion, i.e. a tsunami. Historical records report two large earthquakes in this region on January 20, 1900 ($M=8.1$ by Zuñiga et al., 1997) and another on May 16th, 1900 ($M=7.6$ by Singh et al., 1984), both reported with associated tsunamis (Castillo-Aja and Ramírez-Herrera, 2017), and the first one, the $M=8.1$ event, reported with coseismic subsidence (El Estado de Colima, 1900; Castillo-Aja and Ramírez-Herrera, 2017). Unfortunately, historical data are meager and the epicenter location for both earthquakes is highly uncertain (Duda, 1965). At that time, Ordóñez (El Imparcial, 1900) published a macro seismic map showing the damage pattern distribution and proposed the possible epicenter location for the January 20th earthquake in front of the Jalisco-Colima coast. Recently, Suarez (2006) however proposed the epicenter location inland, near Union de Tula (Jalisco) and interpreted the January 20th earthquake epicenter location in the Jalisco-Colima coast, and the May 16th event is considered an aftershock (IG-UNAM, 2017). This is not the first time that a strong thrust earthquake and its aftershock produce coseismic effects and tsunamis; recently the September 19th, 1985 earthquake ($M_s=8.1$) produced coseismic uplift and a small tsunami, while the September 21st ($M_s=7.6$) earthquake was followed by a bigger tsunami; the comparison of modeled physical earthquakes parameters with the geologic evidence and the accounts of local eyewitness helped to elucidate the most likely source of the tsunami deposit found in Zihuatanejo (Ramírez-Herrera et al., 2012). Based in our results, we infer that the most likely event capable of producing coseismic subsidence and a tsunami was the January

20th, 1900 earthquake. Further earthquake and tsunami modeling might help to elucidate the answer to this question.

E2 is the most anomalous unit in the study site section and is likely to be a tsunami deposit (Figure 10). The sharp and irregular basal contact, inverse grading -from silt and clay very poorly sorted to fine sand- and marine microfossils, support a marine origin. The inverse gradation could reflect the hydrodynamic process of sedimentation produced by variation in flow speed (Spiske and Jaffe, 2009; Jaffe et al., 2012). This interpretation is reinforced by AMS results (Černý et al., 2016) indicating two different magnetic fabrics produced by two different sources of sediments: the ones above 18 cm depth were deposited in a high energy environment. We do not observe ripup clasts in unit E2, although they are not a requirement to prove tsunamigenic origin, we explain their absence by the presence of an underlying sandy layer (Bahlburg and Weiss, 2007). The underlying sandy sediment could explain the absence of muddy ripup clasts (Bahlburg and Weiss, 2007).

Černý et al. (2016) estimated the age of this deposit (unit E2) based on ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dates that agreed with the June 3rd, 1932 tsunami. The June 3rd, 1932 earthquake (M=8.2) that produced this tsunami is the biggest instrumentally measured in México; and postsunami survey by Cumming (1933) documented coseismic subsidence and a big tsunami on the Jalisco-Colima coast (Cumming, 1933; Valdivia et al., 2011 and 2012; Castillo-Aja and Ramírez-Herrera, 2017). These evidence support that the tsunami deposit we observe is very likely related to this event. Tsunami deposits also related to the June 3rd, 1932 event have been reported at La Manzanilla and El Tecuán in the Jalisco coast (Ramírez-Herrera et al., 2016). Although this coast is prone to hurricane occurrence, we discard that a storm was responsible for the deposit: firstly, this site is far enough (1,380 m from the Teopa inlet) from

the coastline and located in a sheltered place; and secondly, because recently the strongest hurricane ever measured on this coast, Hurricane Patricia (October, 2015), was not able to enter nor to break the sand bar that separates the estuary from the sea (Digital Globe, 2017; and NASA, 2017).

Unit E1 shows a minor presence of marine diatoms that contrasts with less brackish conditions, marked for the rest of microfossils. Unfortunately, the uppermost unit (E0) that could have provided helpful data to identify the 1995 (La Manzanilla) tsunami was lost. GPS measurements of the October 9th, 1995 earthquake reported a coseismic subsidence with a fast postseismic uplift in the coast and near-coastal sites (Hutton et al., 2001).

6. CONCLUSIONS

Previous regional studies have shown evidence of changes in relative sea level not explained by eustatic change, but related to tectonics (Ramírez-Herrera and Urrutia-Fugugauchi, 1999; Ramírez-Herrera et al., 2004; Ramírez-Herrera et al., 2011). Our contribution brings additional information about seismic events that could help to understand the tectonic behavior in pre and historical times.

The study area is a useful geoarchive, given its geomorphologic and environmental conditions that contributed to the preservation of microfossils made of carbonates like Foraminifera and Ostracoda, and siliceous Diatomea. The data analyzed helped to confirm the tsunami deposit of the June 3rd, 1932 tsunami. Although the sedimentary evidence could not undoubtedly confirm the subsidence and tsunami of 1900, nor the uplift likely produced by the 1563 earthquake, they contribute to a better understanding of these events. The lack

of enough datable material poses challenges to build an accurate chronology, but historical data help to constrain probable events and dates. Historical data certainly reports subsidence and associated tsunamis generated by the 1932 and 1995 earthquakes and in some extent by those on 1900. The possible uplift generated by the 1563 earthquake could be better explained by better locating the epicenter to evaluate its position in relation with the trench, through modeling.

The June 3rd, 1932 earthquake is apparently the biggest event recorded in historical times. Further studies on paleoseismic and historical earthquakes, like those of 1900, are needed to understand the recurrence in time and magnitude for large earthquakes ($M \geq 8$).

Acknowledgements

Ramírez-Herrera acknowledges research funding by SEP-CONACYT grant 129456 and UNAM-PASPA2015-2016.

Castillo-Aja acknowledges CONACYT Ph.D. scholarship.

To Jan Černý for help in the field.

To Alejandro Rodriguez for help with microfossil sample preparation, diatom mounting and identification.

To Víctor Landa Jaime for help with mollusk identification.

Castillo-Aja worked in the field, performed microfossil laboratory analysis and co-wrote the manuscript. Ramírez-Herrera worked in the field, performed data interpretation and co-wrote the manuscript. Gogichaishvili worked on archeomagnetic data and co-wrote the manuscript. Machain-Castillo supervised the microfossil analysis and revised the manuscript.

References

Bahlburg, H., and Weiss, R., 2007. Sedimentology of the December 26, 2004, Sumatra tsunami deposits in eastern India (Tamil Nadu) and Kenya. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6), 1195–1209. <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0148-9>

Blott, S. J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>

Bourgeois, J., 2009. Geologic effects and records of tsunamis. *The Sea*, 15, 53–91.

Castillo-Aja, R., Ramírez-Herrera, M. T., 2017. Updated Tsunami Catalog for the Jalisco-Colima Coast, Mexico, Using Data from Historical Archives. *Seismological Research Letters*, 88(1), 144–158. <https://doi.org/10.1785/0220160133>

Černý, J., Ramírez-Herrera, M.-T., Bógalo, M.-F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J., Sanchez-Cabeza, J.M., Ruiz-Fernández, A. C., 2016. Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast. *International Geology Review*, 58(3), 342–357. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1075230>

CETENAL, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, 1971. Fotografía aérea 1:50,000

Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, Ph., Laubenheimer, F., 2000. Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 120, 111-136.

Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejon, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C.P., Malik, J. K., Rizal, Y., and Husni, M., 2005. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature* (437).
<https://doi:10.1038/nature03943>

CNA, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales Climatológicas 1951-2010, Estación Cuizimala. Available in:
<http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=jal> visited on march 22, 2017.

Coan, V. E., Valentich Scott, P., 2012. Bivalve Seashells of Tropical West America Marine Bivalve Mollusks from Baja California to Northern Peru (First, Vol. 1). China.

Coe, R. S., Grommé, S., Mankinen, E. A., 1978. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *Journal of Geophysical Research*, 83 (B4), 1740-1756.

Cumming, J.L., 1933. Los Terremotos de junio de 1932 en los estados de Colima y Jalisco. *Universidad de México*, VI (31-32), 68-104. (in Spanish)

Dawson, A.G., Shi, S., Takahashi, T., Shuto, N., 1996. Coastal Sedimentation Associated with the June 2nd and 3rd, 1994 tsunami in Rajegwesi, Java. *Quaternary Science Reviews*, 15, 901–912.

Dawson, A., and Stewart, I., 2007. Tsunami geoscience. *Progress in Physical Geography*, 31(6), 575–590. <https://doi.org/10.1177/0309133307087083>

Dawson, S., 2007. Diatom biostratigraphy of tsunami deposits: Examples from the 1998 Papua New Guinea tsunami. *Sedimentary Geology*, 200, 328-335.

DeMets, C., and Stein, S., 1990. Present-day Kinematics of the Rivera Plate and Implications for Tectonics in Southwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13), 21931-21948.

Digital Globe, 2017. Google Earth. Digital Globe Image date: October 24, 2015

Ducoing Chahó, E.L., 2006. Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional del proyecto IEL La Huerta en el Municipio La Huerta, Jalisco. Available in: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/jal/estudios/2006/14JA2006T0018.pdf> visited on 22/June/2017

Duda, S., 1965. Secular seismic energy release in circum-Pacific belt. *Tectonophysics*, 2, 409-452.

Dura, T., Hemphill-Haley, E., Sawai, Y., Horton, B. P., 2016. The application of diatoms to reconstruct the history of subduction zone earthquakes and tsunamis. *Earth-Science Reviews*, 152, 181–197. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.017>

El Estado de Colima, 1900. 20 January 1900. Biblioteca Pública del Estado de Jalisco. (in Spanish).

El Imparcial, 1900. 21 January 1900. Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP. (in Spanish).

Ellis and Messina Catalogues, 2016. Foraminifera. Ostracoda. Available from: www.mircropress.org. Visited on October/30/2016.

Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A., Zavala-Hidalgo, J. IV.9.1 Oceanografía Física 1 (Masas de agua y mareas de los mares mexicanos). In UNAM, 1990-1992, Atlas Nacional de México. Tomo II. Naturaleza. Instituto de Geografía. UNAM.

Folk RL, Ward WC. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27, 3–26

Fujino, S., Naruse, H., Matsumoto, D., Jarupongsakul, T., Sphawajruksakul, A., Sakakura, N., 2009. Stratigraphic evidence for pre-2004 tsunamis in southwestern Thailand. *Marine Geology*, 262(1–4), 25–28. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.011>

Fujiwara, O., 2007. Major Contribution of Tsunami Deposit Studies to Quaternary Research. *The Quaternary Research*, 43(3), 293–302.

García-Acosta, V., and Suárez Reynoso, G., 1996. *Los Sismos en la Historia de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social y el Fondo de Cultura Económica. (in Spanish).

Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczucinski, W., Tappin, D. R., Witter, R., Yulianto, E., 2011. New insights

of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event. *Marine Geology*, 290(1–4), 46–50.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.10.004>

Hutchinson, I., Clague, J. J., Mathewes, R. W., 1997. Reconstructing the tsunami record on an emerging coast: a case study of Kanim Lake, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Journal of Coastal Research*, 545–553.

Hutton, W., DeMets, C., Sanchez, O., Suarez, G., Stock, J., 2001. Slip kinematics and dynamics during and after the 1995 October 9 Mw= 8.0 Colima–Jalisco earthquake, Mexico, from GPS geodetic constraints. *Geophysical Journal International*, 146(3), 637–658.

IG-UNAM, 2017. Sismos Históricos de México. Instituto de Geofísica de la UNAM. Available in: www.sismostoricos.org Visited on 20/June/2017.

INEGI, 1975. Carta Topográfica E13B31 Apazulco-Miguel Hidalgo. Escala 1:50,000

INEGI, 2015. Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica E13A39 Miguel Hidalgo

INEGI, 2017. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) versión 3.1. Web Service available in http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/ visited on April/25/2017

Jaffe, B. E., Goto, K., Sugawara, D., Richmond, B. M., Fujino, S., Nishimura, Y., 2012. Flow speed estimated by inverse modeling of sandy tsunami deposits: results from the 11 March 2011 tsunami on the coastal plain near the Sendai Airport, Honshu, Japan. *Sedimentary Geology*, 282, 90–109. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.09.002>

Jankaew, K., Atwater, B. F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, M. E., Prendergast, A., 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455. <https://doi.org/10.1038/nature07373>

Kimberlain, Todd B., Blake, Eric S., Cangialosi, John P., 2016. Hurricane Patricia. NOAA. http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP202015_Patricia.pdf Last access: 28/April/2017

Landa-Jaime, V., 2003. Asociación de moluscos bentónicos del sistema lagunar estuarino Agua Dulce/El Ermitaño, Jalisco, México. *Ciencias Marinas*, 29(2), 169–184.

Mamo, B., Strotz, L., Dominey-Howes, D., 2009. Tsunami sediments and their foraminiferal assemblages. *Earth-Science Reviews*, 96(4), 263–278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.06.007>

Morales J., Goguitchaichvili A., Acosta G., González T., Alva-Valdivia L., Robles-Camacho J., Hernández-Bernal S., 2009. Magnetic properties and archeointensity determination on pre-Columbian pottery from Chiapas, Mesoamerica. *Earth Planets Space*, 61, 83-91. <https://doi.org/10.1186/BF03352887>

Morales, J., Fernández Martínez, G., Gogichaisvilli, A., Cárdenas, E., Hernández-Bernal, M.S., 2015. Archeomagnetic Dating of Some Pre-Columbian Pottery Fragments from Northern Mesoamerica: Implications for the chronology of Central Mexico during the Epiclassic Period. *Journal of Archaeological Science*, 4, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.08.027>

Morton, R. A., Gelfenbaum, G., Jaffe, B. E., 2007. Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200(3–4), 184–207. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.003>

Murray, J., 2006. *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press. 422 p.

Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Atwater, B. F., Shigeno, K., Yamaki, S., 2003. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, 424(6949), 660–663.

NASA (2017) Landsat Imagery (1-5 MSS, 4-5 TM, 7 ETM, 8 OLI) available on <https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html> visited on June 9, 2017.

Pavón-Carrasco, F.J., Rodríguez-González, J., Osete, M.L., Torta, J.M., 2011. A Matlab tool for archaeomagnetic dating. *Journal of Archaeological Science*, 38, 408–419. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.021>

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., De Santis, A., 2014. A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data. *Earth and Planetary Science Letters* (388), 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>

Peters, R., Jaffe, B., 2010. Identification of tsunami deposits in the geologic record; developing criteria using recent tsunami deposits. US Geological Survey. Recuperado a partir de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20101239>

Phleger, F. B., 1951. Part I. Foraminifera Distribution. *Geological Society of America Memoirs*, 46, 1–84.

Phleger, F. B., Parker, F. L., 1951. Parto II. Foraminifera Species. Geological Society of America Memoirs, 46, 1–80.

Pilarczyk, J. E., Dura, T., Horton, B. P., Engelhart, S. E., Kemp, A. C., Sawai, Y., 2014. Microfossils from coastal environments as indicators of paleo-earthquakes, tsunamis and storms. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 413, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.06.033>

Ramírez-Herrera, M.-T., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999. Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico. *Geomorphology*, 28(3), 237–250.

Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 2004. Holocene-emerged notches and tectonic uplift along the Jalisco coast, Southwest Mexico. *Geomorphology*, 58(1–4), 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.07.004>

Ramirez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards, A., Morales, E., Metcalfe, S., 2007. Sedimentary record of late-Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*, 17(8), 1211–1220. <https://doi.org/10.1177/0959683607085127>

Ramírez-Herrera, M. T., Kostoglodov, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 2011. Overview of Recent Coastal Tectonic Deformation in the Mexican Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9), 1415–1433. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0205-y>

Ramírez-Herrera, M.-T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernández, A.C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I., Quintana, P., 2012. Extreme wave

deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology*, 139–140, 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.002>

Ramírez-Herrera, M.-T., Corona, N., Suárez, G., 2015. A Review of Great Magnitude Earthquakes and Associated Tsunamis along the Guerrero, Mexico Pacific Coast: A Multiproxy Approach. *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*, 214, 165.

Ramírez-Herrera, M. T., Bógalo, M. F., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Corona, N., Machain, M. L., Carranza Edwards, A. Sosa, S., 2016. Historic and ancient tsunamis uncovered on the Jalisco-Colima Pacific coast, the Mexican subduction zone. *Geomorphology*, 259, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.011>

Ruiz, F., Abad, M., Cáceres, L. M., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M. I., Pozo, M., González-Regalado, M. L., 2010. Ostracods as tsunami tracers in Holocene sequences. *Quaternary Research*, 73(1), 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.08.005>

Satake, K., 2014. Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Geoscience Letters*, 1(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40562-014-0015-7>

Sawai, Y., Satake, K., Kamataki, T., Nasu, H., Shishikura, M., Atwater, B. F., Horton, B. P., Kelsey, H. M., Nagumo, T. and Yamaguchi, M., 2004. Transient uplift after a 17th-century earthquake along the Kuril subduction zone. *Science*, 306(5703), 1918–1920. <https://doi.org/10.1126/science.1104895>

Sawai, Y., Jankaew, K., Martin, M. E., Prendergast, A., Choowong, M., Charoentitirat, T., 2009. Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean

tsunami at Phra Thong Island, Thailand. *Marine Micropaleontology*, 73(1–2), 70–79.

<https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.07.003>

Sen Gupta, B. K., Smith L. E., Machain-Castillo, M. L., 2009. Foraminifera of the Gulf of Mexico, Pp. 87–129 in Felder, D.L. and D.K. Camp (eds.), *Gulf of Mexico—Origins, Waters, and Biota. Biodiversity*. Texas A and M Press, College Station, Texas

Servicio Geológico Mexicano (SMG) 2016. Carta Geológico-Minera E13B31 Miguel Hidalgo

Shiki, T. (Ed.), 2008. *Tsunamiites: features and implications* (1st Ed). Amsterdam; Boston: Elsevier.

Singh, S., Rodriguez, M., Espindola, J., 1984. A Catalog of Shallow Earthquakes of Mexico from 1900 to 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(1), 267-279.

Spiske, M., Jaffe, B. E., 2009. Sedimentology and hydrodynamic implications of a coarse-grained hurricane sequence in a carbonate reef setting. *Geology*, 37(9), 839–842.
<http://doi.org/10.1130/G30173A.1>

Suarez G., 2006. A macroseismic study of Mexican earthquakes. Internal report, INGV, Milano, 150 pp. ca.

Suresh Gandhi, M., Solai, A., Hussain, S. M., 2010. Foraminifera as an Aid in Identifying Paleotsunami Events: Case Study between Cuddalore and Nagapattinam, East Coast of India. *Gondwana Geological Magazine*, 25(1), 13–22.

Tanaka, G., Naruse, H., Yamashita, S., Arai, K., 2012. Ostracodes reveal the sea-bed origin of tsunami deposits. *Geophysical Research Letters*: 39(5), L05406, 1-4.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051320>

Uchida, J.-I., Fujiwara, O., Hasegawa, S., Kamataki, T., 2010. Sources and depositional processes of tsunami deposits: Analysis using foraminiferal tests and hydrodynamic verification: Sources of tsunami deposits. *Island Arc*, 19(3), 427–442.
<https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2010.00733.x>

UNAM. 2015. Perturbaciones del nivel del mar asociadas al huracán Patricia, México. Servicio Mareográfico Nacional, Instituto de Geofísica. Grupo Interacción Océano-Atmósfera, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
http://www.mareografico.unam.mx/portal/docu/Pdfs/reporte_huracan_patricia_SMN.pdf
visited on June 19, 2017.

Valdivia, L., Castillo-Aja, M. R., Estrada-Trejo, M., 2011. Elements for an historical review of the 3 June, 1932 tsunami on the coast of Jalisco, Mexico. In *AGU Abstracts*. San Francisco, CA.

Valdivia, L., Castillo, M. R., Estrada, M., 2012. La Historia No Contada del Tsunami del 3 de junio de 1932 que golpeó las Costas del Municipio de Tomatlán, Jalisco. *Geocalli. Cuadernos de Geografía*, (25), 13–100. (in Spanish).

Vidal Zepeda, R., 2007. Climas: según sistema de Clasificación Climática de Köppen modificado por Enriqueta García. NA IV 13. En *Nuevo Atlas Nacional de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Weiss, R., Bourgeois, J., 2012. Understanding sediments—reducing tsunami risk. *Science*, 336(6085), 1117–1118. <http://doi.org/10.1126/science.1221452>

WoRMS Editorial Board, 2016. World Register of Marine Species. Available from <http://www.marinespecies.org> at VLIZ visited 2016-06-21. <http://doi.org/10.14284/170>

Yawsangratt, S., Szczuciński, W., Chaimanee, N., Chatprasert, S., Majewski, W., Lorenc, S., 2012. Evidence of probable paleotsunami deposits on Kho Khao Island, Phang Nga Province, Thailand. *Natural Hazards*, 63(1), 151–163. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9729-4>

Zuñiga, R., Suarez, G., Garcia-Acosta, V., 1997. Peligro Sismico en America Latina y El Caribe. Instituto Panamericano de Geografia. Ottawa: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. (in Spanish).

FIGURES

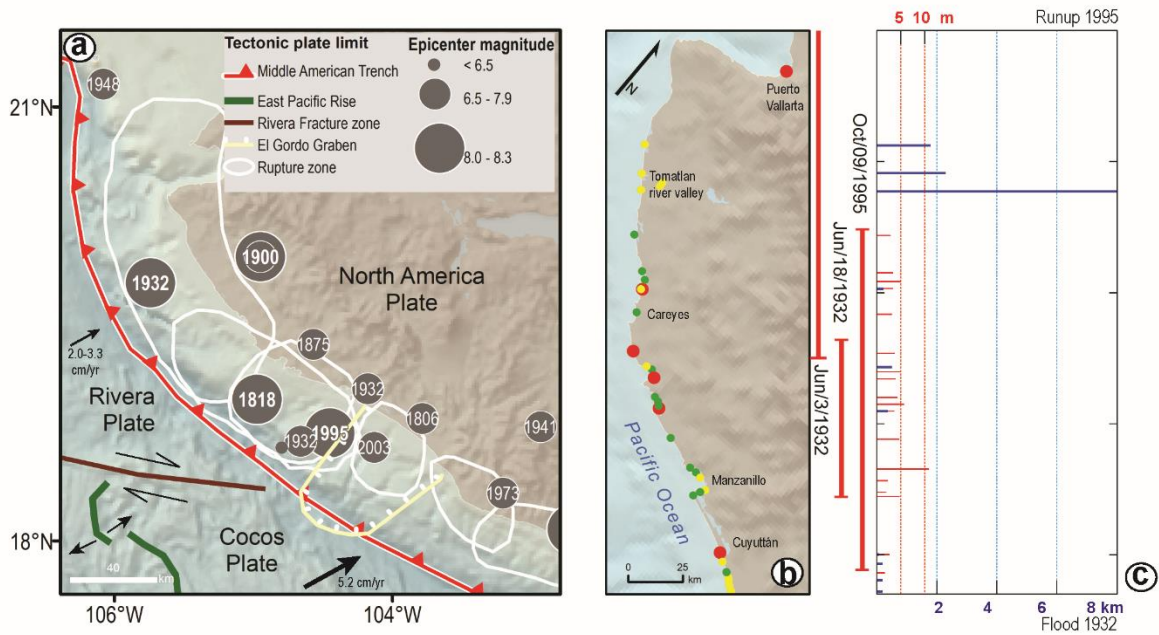


Figure 1. a. Tectonic setting, historical earthquake epicenter locations and rupture zones for instrumentally recorded earthquakes. **b.** Reported runup/flooding tsunami sites: yellow dots for 3/June/1932, green dots for 09/Oct/1995, and red dots for both. **c.** Estimated rupture lengths for 1932 and 1995 earthquakes, blue bars for 1932 estimated flood distances (m), and red bars for 1995 runup reported values (m). The color version of this figure is available only in the electronic edition.

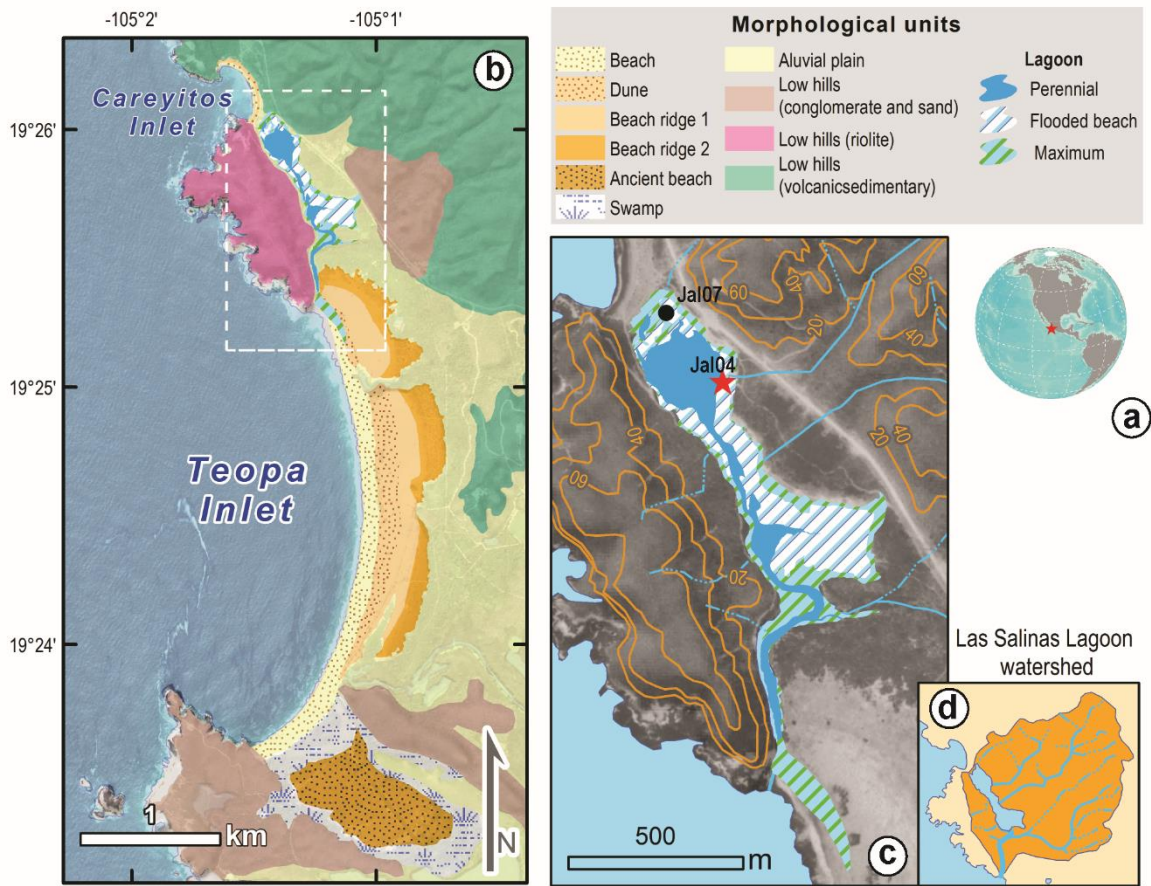


Figure 2. **a.** Site location. **b.** Map of morphological units. **c.** Las Salinas Lagoon: black dots show sampling sites and red star - Jal04 site. **d.** Watershed that feeds the lagoon. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

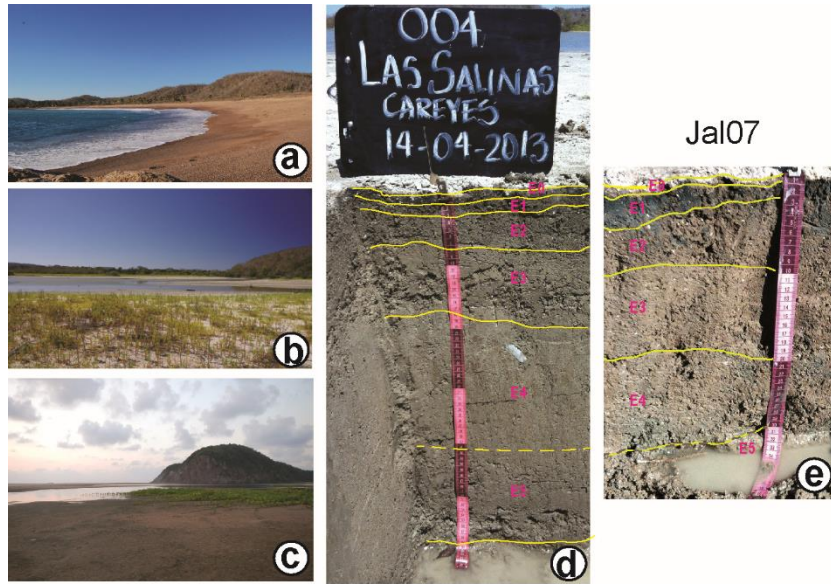


Figure 3. Landscape around site Jal04: **a**, Careyitos beach, **b**, lagoon beach, and **c**, Teopa beach near the lagoon estuary seaside; **d**, partial view of Jal04 pit wall, 60 cm depth; **e**, partial view of pit Jal07 where pottery samples were sampled at 33 cm depth partially covered by water. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

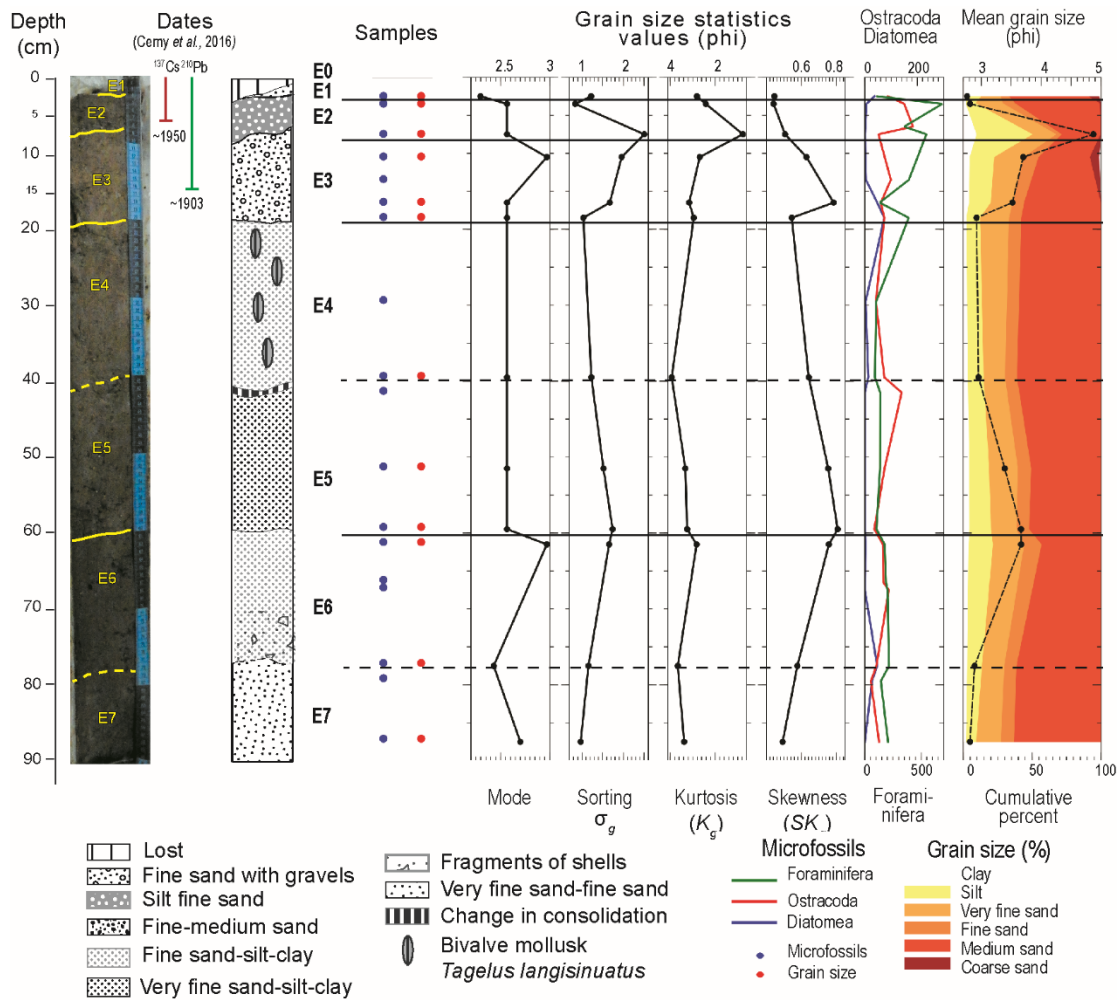


Figure 4. Jal04 Grain size statistics values in phi. Microfossils total specimens, lower X axis for foraminifers and upper X axis for ostracods and diatoms, scales have different ranges to improve visualization. ⁽¹⁾ Černý et al., (2016). The color version of this figure is available only in the electronic edition.

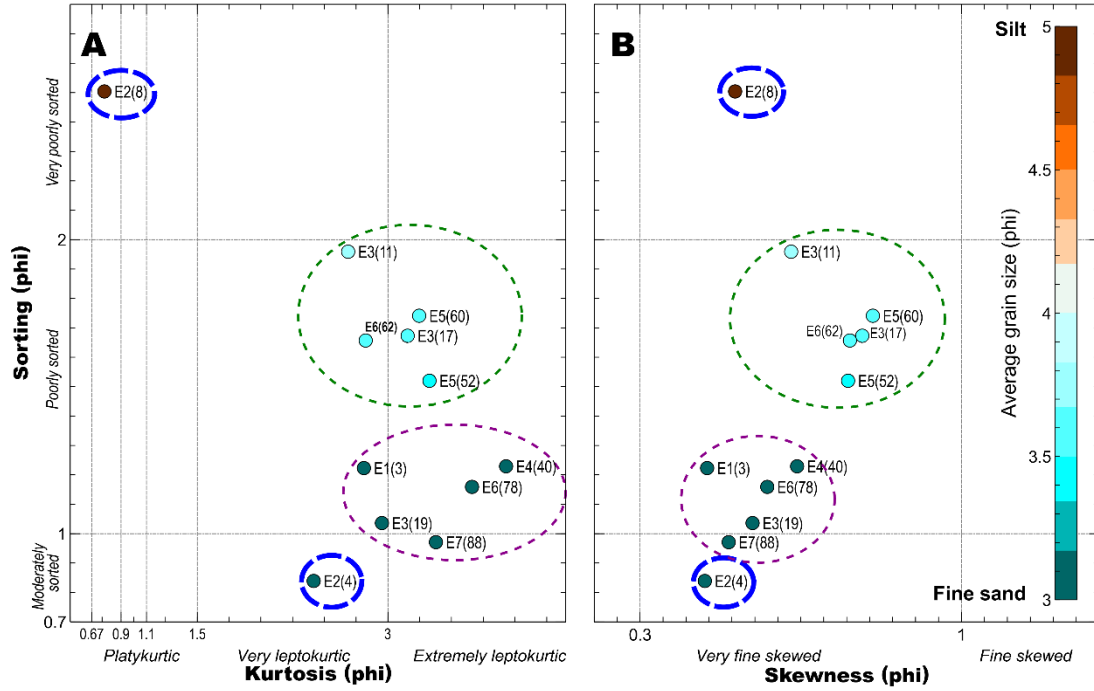


Figure 5. Comparative statistical values of grain size results. Labels indicate number stratigraphic unit, (E2 at 7.5cm) shows the most anomalous values. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

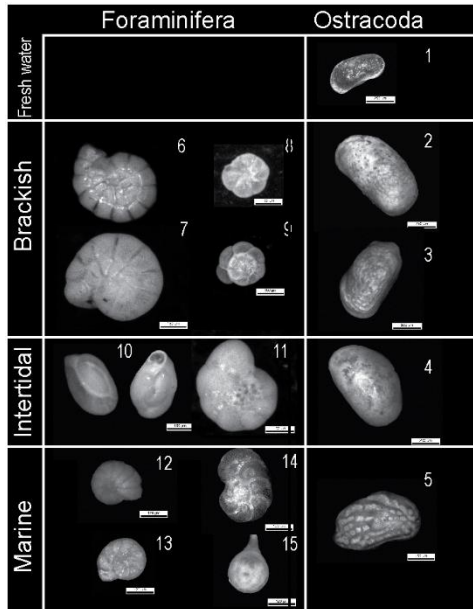


Figure 7. Electronic Microscope images of Foraminifera and Ostracoda. **1.** *Limnocythere sp.*, **2.** *Cyprideis sp.*, **3.** *Perissocytheridea sp.*, **4.** *Xestoleberis sp.*, **5.** *Neucadites sp.*, **6 y 7.** *Palmerinella gardenislandensis.*, **8 y 9** *Ammonia parkinsoniana*, **10.** *Quinqueloculina sp.*, **11.** *Elphidium sp.*, **12 y 13.** *Cibicides sp.*, **14.** *Hanzawaia sp.* **15** *Langena sp.*

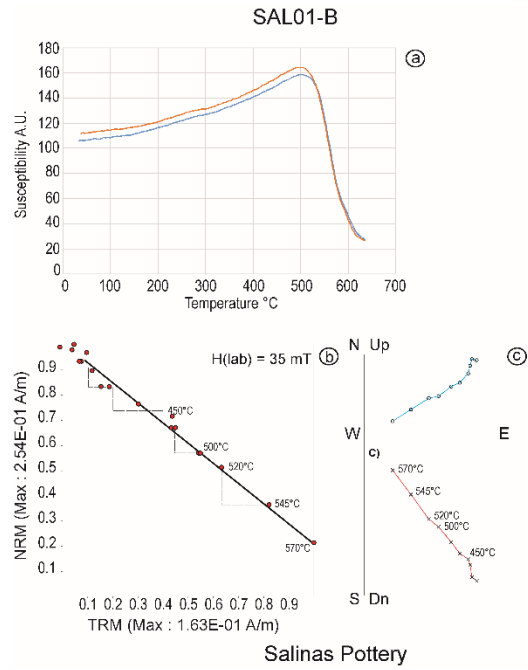


Figure 8. A summary of rock-magnetic experiments carried out on pottery samples. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

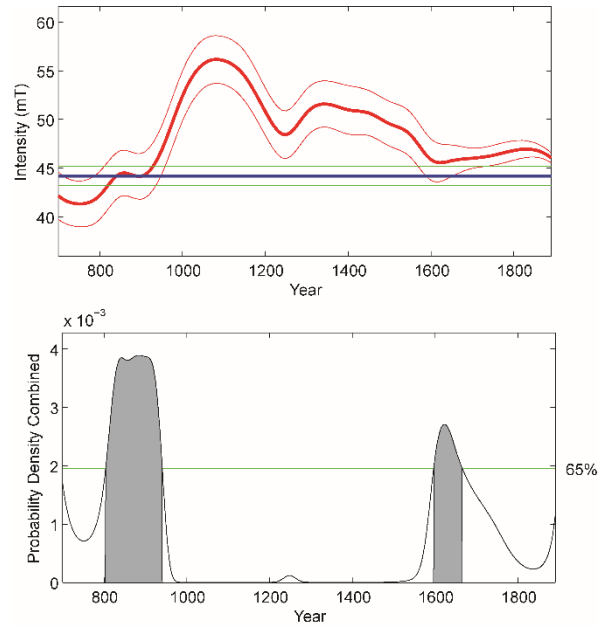


Figure 9. Archaeomagnetic dating of pottery samples using a MATLAB tools provided by Pavón-Carrasco *et al.* (2011, 2014). See text for more details. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

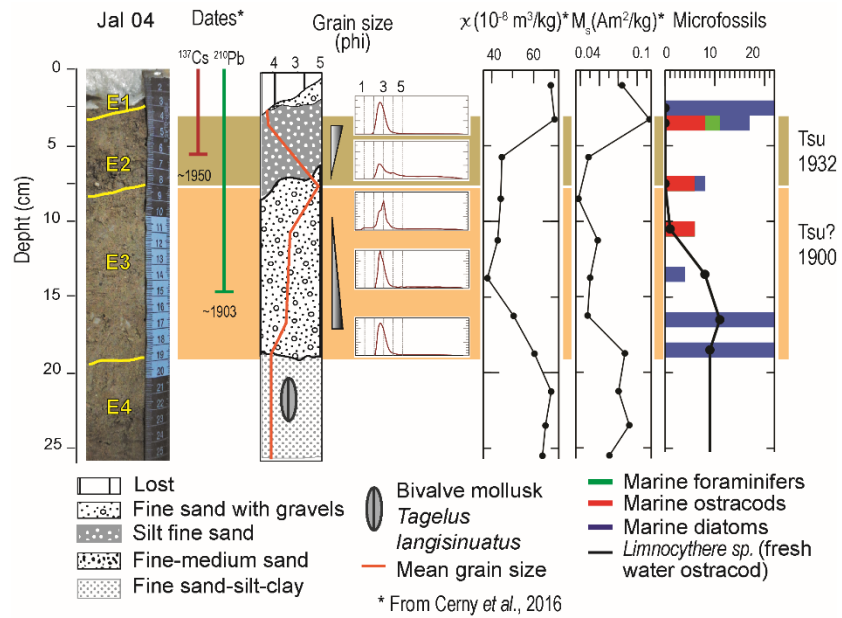


Figure 10. Jal04 top 25 cm with dates, grain size, magnetic susceptibility values, marine microfossils and fresh water ostracods (in absolute values). ^{137}Cs and ^{210}Pb dates, and magnetic properties by Cerny et al., 2016. The color version of this figure is available only in the electronic edition.

Table 1. Absolute abundance of Foraminifera, Ostracoda and Diatomea.

FORAMINIFERA	Brackish	<i>Palmerinela gardenislandensis</i> , Akers, 1952	2353	
		<i>Ammonia tepida</i> (Cushman, 1926) <i>Ammonia parquinsoniana</i> (d'Orbigny, 1839)	1386	
	Intertidal	<i>Elphidium sp.</i> Montfort, 1808	61	
		<i>Quinqueloculina sp.</i> d'Orbigny, 1826	326	
	Benthic	<i>Triloculina sp.</i> d'Orbigny, 1826	51	
		<i>Hanzawaia sp.</i> Ansano, 1944	14	
		<i>Hanzawaia sp. 1</i> Ansano, 1944	14	
		<i>Hanzawaia sp. 2</i> Ansano, 1944	4	
		<i>Hanzawaia sp. 3</i> Ansano, 1944	5	
		Marine	<i>Cibicides sp.</i> Montfort, 1808	74
			<i>Cibicides sp.2</i> Montfort, 1808	5
			<i>Langena sp.</i> Walker & Boys, 1798	1
			<i>Archaias sp.</i> Montfront, 1808	1
			<i>Cassidulina sp.</i> d'Orbigny, 1826	4
		<i>Rosalina sp.</i> d'Orbigny, 1826	2	
		<i>Laevipeneroplis proteus</i> d'Orbigny, 1839	1	
		TOTAL	4302	
	Planktonic	Not identified	1	
		TOTAL	1	
		GRAND TOTAL	4303	
OSTRACODA	Fresh water	<i>Limnocythere sp.</i> Bardy, 1968	92	
	Brackish	<i>Cyprideis sp.</i> Jones, 1857	130	
		<i>Perissocytheridea sp.</i> Stephenson, 1938	1194	
	Marine	<i>Loxocorniculum sp.</i> Benson & Coleman, 1963	1	
		<i>Xestoleberis sp.</i> Sars, 1866	2	
		<i>Quadracythere sp.</i> Hornibrook, 1952	2	
		<i>Neucadites sp</i> Puri, 1960	1	
		Not identified	3	
	TOTAL	1425		
DIATOMEA		<i>Coscinodiscus</i> C.G. Ehrenberg, 1839		
		<i>Thalassiosira</i> P.T. Cleve, 1873		
		TOTAL	262	

CAPÍTULO 3

LOS PALEODEPÓSITOS DE TSUNAMI EN EL TRÓPICO HÚMEDO

Resumen

Los paleodepósitos de tsunami, preservados en el registro geológico, constituyen una herramienta clave para la construcción de una cronología amplia que contribuya a mejorar estimación del riesgo por tsunami en las costas de márgenes activas tsunamigénicas. El estudio de este tipo de depósitos en el trópico húmedo, sobre todo a partir de 2004, ha planteado una serie de problemas derivados tanto de la localización geográfica como de las condiciones ambientales de estos lugares. La presente revisión bibliográfica analiza el estado del conocimiento a la fecha a partir del recuento de lugares con reporte de paleodepósitos de tsunami en el trópico húmedo, mostrando las técnicas empleadas y los problemas reportados para identificar y datar paleodepósitos producidos por tsunamis en tiempos históricos y geológicos. Las tormentas tropicales constituyen un problema adicional, todavía no resuelto, que ha complicado la identificación de paleodepósitos de tsunami. Hasta el momento, la mayor parte de los estudios se han concentrado en lugares que ya cuentan con un evento análogo moderno que sirve de referencia, y ha contribuido de manera importante en la búsqueda e identificación de paleodepósitos. La aplicación de múltiples proxies y la integración de equipos multidisciplinarios para acometer la búsqueda e identificación de dichos depósitos, han mostrado resultados alentadores y constituye un aliciente para enfrentar el trabajo que queda por realizar.

3.1 Introducción

Los depósitos de tsunami son las evidencias sedimentarias producidas por un tsunami (Sugawara *et al.*, 2008) y preservadas en el registro geológico. Estos depósitos ocurren en la franja costera, tanto en la plataforma marina como en la tierra emergida (Sugawara *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2015) y pueden estar compuestos por capas de sedimentos finos, como arcillas y limos; arenas, gravas, moluscos, y hasta por bloques (Scheffers and Kelletat, 2004; Cisternas *et al.*, 2005; Jankaew *et al.*, 2008). Los depósitos de tsunami modernos, son aquellos que ocurrieron recientemente, en su mayoría fueron producidos por sismos medidos instrumentalmente y han sido estudiados

mediante levantamientos post-tsunami. De acuerdo con la Intergovernmental Oceanographic Commission (2016) los paleotsunamis son aquellos “que ocurrieron antes del registro histórico o para los que no se cuenta con observaciones escritas”. En nuestra revisión consideramos como paleotsunamis a todos aquellos eventos que sucedieron en tiempos históricos o prehistóricos y que se preservan en el registro geológico (paleodepósitos); en cada región del mundo esta ventana temporal es variable.

La identificación y fechamiento de los paleodepósitos es de gran importancia ya que contribuye con la construcción de una cronología confiable; para su estudio se han desarrollado una serie de técnicas encaminadas a reconocerlos en el registro sedimentario y estimar su antigüedad. También resulta de gran utilidad contar con la referencia documental contenida en periódicos, crónicas y correspondencia generalmente resguardada en archivos y bibliotecas; y/o con la evidencia arqueológica y de la tradición oral; sin embargo, los eventos más antiguos sólo es posible identificarlos a partir de sus características en el registro geológico. En las zonas tropicales esta tarea puede complicarse debido a las condiciones climáticas (altas temperaturas y abundantes precipitaciones), la presencia de huracanes y a procesos de degradación.

A partir del siglo XX se incrementó la medición instrumental de sismos y tsunamis y se sistematizó la compilación de catálogos de ambos a escala global. También durante ese siglo ocurrieron importantes tsunamis (1946 en Hawaii, 1958 en Lituya Bay Alaska, 1960 en Chile y 1964 en Alaska) cuyas evidencias sedimentarias fueron reportadas por diversos autores enlistados en National Centers for Environmental Information/World Data Service (NCEI/WDS) Global Tsunami Deposits Database (2017) *e.g.* Shepard *et al.*, 1950; Miller, 1960; Cox and Mink, 1963; Eaton *et al.*, 1961; Kato *et al.*, 1961; Konno *et al.*, 1961; Sievers *et al.*, 1963; Weischet, 1963; Wright and Mella, 1963; Lemke, 1966; Plafker y Kachadoorian, 1966; Reimnitz y Marshall, 1965; y Waller y Stanley, 1966. Desde fines de la década de los ochenta y durante los noventa Atwater (1987, 1992), Dawson *et al.*, (1988, 1996) y Minoura y Nakaya (1991) entre otros sientan las bases para el estudio de los paleodepósitos de tsunami. Hasta ese momento la mayor parte de los eventos estudiados, a excepción de Hawaii, Flores, Java, Nicaragua y Papúa Nueva Guinea, habían ocurrido en zonas templadas (costa oeste de Estados Unidos, Kamchatka, Japón, Chile, Mar del Norte y Mar Mediterráneo).

El 26 de diciembre de 2004 ocurrió el sismo ($M_w=9.1$) responsable del tsunami más destructivo en la historia que impactó las costas del Océano Índico cobrando la vida a 227,899 personas (National Geophysical Data Center, 2015). Este fenómeno representó un hito para la ciencia de los tsunamis e hizo posible verificar *in situ* las características sedimentológicas (Moore *et al.*, 2006; Hawkes *et al.*, 2007; Hori *et al.*, 2007; Paris *et al.*, 2007; Srinivasalu *et al.*, 2007), los procesos hidrodinámicos (Fritz *et al.*, 2006; Morton *et al.*, 2008; Choowong *et al.*, 2008) y el impacto geomorfológico (Paris *et al.*,

2009; Szczucinski *et al.*, 2006) de un fenómeno de gran magnitud. Con esto se disparó la publicación de estudios relacionados con la identificación y caracterización de los depósitos de tsunami (así lo reportan Bourgois, 2009; Engel y Brückner, 2011). En años posteriores ocurrirían otros dos grandes tsunamis, en Chile (2010) y en Tohoku, Japón (2011), que contribuyeron con la diversificación de las herramientas proxy empleadas para estudiar este tipo de depósitos apoyándose en análogos modernos (Goff *et al.*, 2012; Switzer *et al.*, 2014). El estudio de paleodepósitos es de gran importancia para la estimación del riesgo, ya que al adentrarse en el tiempo geológico extiende la ventana temporal y permite estimar tanto los periodos de recurrencia como las probables magnitudes máximas esperadas (Ramírez-Herrera *et al.*, 2016a; Inoue *et al.*, 2017).

El IOT (Indian Ocean Tsunami) de 2004 concentró la atención de los expertos en un área tropical densamente poblada, que planteó nuevos retos para la recolección e identificación de paleodepósitos de tsunami. El presente escrito se enfoca en la revisión de los estudios de paleodepósitos (históricos y prehistóricos) de tsunami realizados en áreas tropicales húmedas con el fin resumir las técnicas empleadas y los problemas encontrados.

3.2 Los estudios de paleodepósitos de tsunami

La búsqueda de paleodepósitos de tsunami en las zonas tropicales húmedas ha demostrado ser una tarea difícil en la que han participado equipos multinacionales de científicos quienes, echando mano del bagaje de conocimientos y técnicas acumuladas durante las décadas previas, se han apoyado en una serie de técnicas multiproxy con el fin de localizar y caracterizar las evidencias sedimentarias preservadas en el registro geológico, y contribuir con la construcción de cronologías más amplias que permitan diseñar una mejor política de protección civil y mitigación del riesgo. Se puede afirmar que esta búsqueda surge como respuesta al IOT (2004), a pesar de existir trabajos previos (e.g. van den Berg *et al.*, 2003; Burney *et al.*, 2001; Weiss, 1979) es después de 2011 cuando se incorporan las experiencias obtenidas por los tsunamis ocurridos en Chile, 2010 y Japón, 2011 (Figura 1, Tabla 1). Esos grandes tsunamis sucedieron en un lapso corto de tiempo y alentaron de manera importante la producción científica.

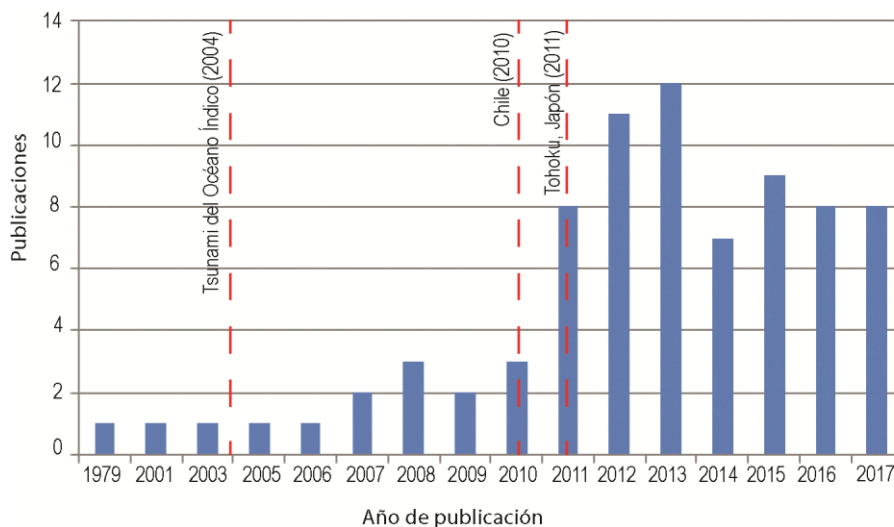


Figura 1. Publicaciones referentes al estudio de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales analizadas en este estudio

La revisión bibliográfica nos permitió identificar 78 publicaciones que reportaban el estudio de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales húmedas, a partir de los cuales fue posible ubicar 150 sitios explorados (51% en Asia, 35% en América y 14% en Oceanía) en la Tabla 1 se muestra la distribución por país y continente.

La Figura 2 muestra la distribución global de los estudios de depósitos de tsunami (Web of Science [v.5.25.1], 2016). De un total de 824 referencias obtenidas, sólo fue posible localizar 659 sitios, los cuales se agruparon por zona (Alaska y Costa Oeste de Norteamérica, México y Centroamérica, Sudamérica, El Caribe, Mar del Norte, Mediterráneo Oeste, Mediterráneo Este, Mar de Arabia, Océano Índico, Mar de Japón, Península de Kamchotka, Costa Oeste de Australia, Micronesia y Hawaii) y se representaron cartográficamente mediante círculos violeta. Posteriormente, se localizaron los 150 sitios referidos en las 78 publicaciones analizadas (ver Tabla 2) con reporte de algún paleodepósito de tsunami en zonas tropicales húmedas, y se representaron en el mapa mediante puntos negros.

Tabla 1. Distribución de sitios en áreas tropicales húmedas con paleodepósito de tsunami reportados, por país y continente.

País	Sitios	Continente
Islas Vírgenes Británicas	27	América
México	14	América
Antillas Holandesas	5	América
Venezuela	4	América
República Dominicana	1	América
Ecuador	2	América
Isla Martinica	1	América
India	24	Asia
Sri Lanka	19	Asia
Tailandia	20	Asia
Indonesia	12	Asia
China	1	Asia
I. Maldivias	1	Asia
Taiwán	1	Asia
Archipiélago Wallis Futuna	7	Oceanía
Otras Islas del Pacífico	6	Oceanía
Samoa	3	Oceanía
Australia	2	Oceanía
Hawaii, U.S.A.	3	Oceanía
Islas Cook	1	Oceanía
Gran Total	154	

Fuente: Elaboración propia a partir de listado en la Tabla 2

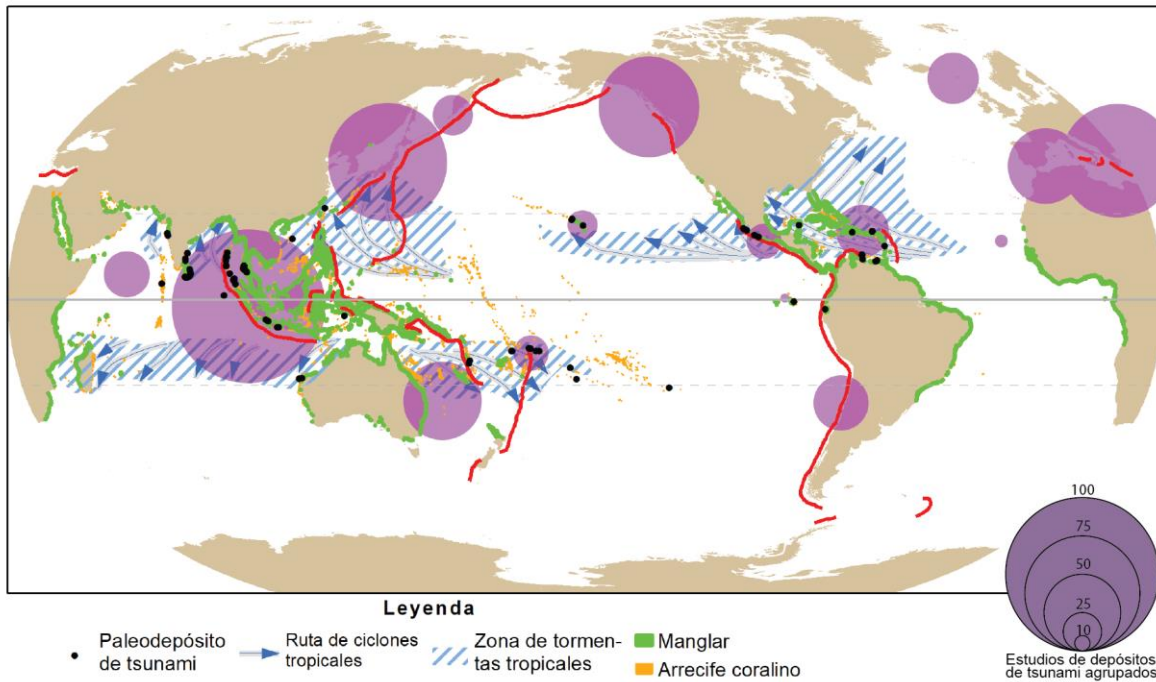


Figura 2. Mapa que presenta las zonas de subducción (tsunamigénicas) con línea roja, los estudios de depósitos de tsunami reportados (Web of Science, 2016) agrupados por región del mundo en violeta, y la localización de los sitios con paleodepósitos de tsunami reportados para zonas tropicales húmedas hasta 2017 con puntos negros. En verde se muestran las zonas de manglar y con amarillo los arrecifes de coral. La zona en achurado azul muestra las áreas de formación de las tormentas tropicales y las flechas la dirección de éstas.

Como puede apreciarse en la Figura 2, existen dos zonas que concentran la mayor parte de los sitios reportados en el trópico húmedo: el Océano Índico y el Mar Caribe. En ambas regiones históricamente ocurrieron grandes tsunamis (el producido por el Terremoto de Lisboa, 1755; y el IOT, 2004), su configuración tectónica les confiere potencial tsunamigénico, sus costas están ocupadas por manglares y/o arrecifes coralinos, y están sujetas al embate de las tormentas tropicales. Sin embargo, existe una franja, cercana al ecuador, en donde se presenta una calma ciclónica que favorece a las costas de Tailandia, en donde se han desarrollado una buena parte de las investigaciones sobre paleotsunamis (Jankaew *et al.*, 2008; Monecke *et al.*, 2008; Fujino *et al.*, 2009; Rubin *et al.*, 2017).

Tabla 2. Sitios de muestreo para paleodepósitos de tsunami reportados en la literatura.

Autor(es)	País	Lugar	Latitud	Longitud	Tipo	Ambiente	Proxies utilizados	Bioturbación/ Disolución
Arcos et al., 2013	Ecuador	Galapagos, Isla Santa Cruz	-0.6930	-90.2221	Moderno?	Canal en barra de dunas	Gd, ¹⁴ C	B
Chunga y Tulkeridis, 2014	Ecuador	Playas General Villamil	-2.698702	-80.330887	Histórico	Planicie costera	Gd, Fo, Mo, GQ, ¹⁴ C	B
Bogalo et al., 2017	México	Palo Verde	18.8987	-104.0338	Histórico y Paleo	Estero	Gl, Min, SM, AMS, OPM, GQ	
Cerny et al., 2016a	México	Las Salinas, Careyes	19.4321	-105.0222	Histórico	Laguna	Gl, SM, AMS, OPM, MSt, His, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs	
Cerny et al., 2016b	México	Careyes, Las Salinas	19.4326	-105.0225	Histórico	Laguna	Gl, SM, AMS, OPM, MSt, His	
Goguitchaivhili et al., 2013	México	Ixtapa estero	17.6983	-101.6448	Histórico	Estero	SM, AMS, OPM	
Ramirez-Herrera, 2011	México	Mitla Lagoon	17.0674	-100.3484	Paleo	laguna	Gl, Di, GQ, ¹⁴ C, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs	
Ramirez-Herrera et al., 2007	México	Mitla Lagoon	17.1018	-100.3880	Paleo	Marisma	Gl, Min, Fo, Os, Di, GQ, ¹⁴ C, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs	B,D
Ramirez-Herrera et al., 2009	México	Mitla Lagoon	17.0674	-100.3484	Paleo	Laguna	Gl, Di, GQ, Po, ¹⁴ C	D
Ramirez-Herrera et al., 2012	México	Ixtapa estero	17.6990	-101.6451	Histórico	Estero	Gl, LOI, SM, Fo, Di, GQ, His, ¹⁴ C, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs, OSL	B,D
Ramirez-Herrera et al., 2013	México	Palo Verde	18.8987	-104.0338	Histórico y Paleo	Estero	SM, AMS, OPM	
Ramirez-Herrera et al., 2014	México	Palo Verde	18.8987	-104.0338	Histórico y Paleo	Estero	Gl, LOI, Min, SM, AMS, Fo, Os, Di, GQ	B
Ramirez-Herrera et al., 2016a	México	La Manzanilla	19.2995	-104.7980	Histórico y Paleo	Planicie costera	Gl, SM, AMS, Fo, Os, GQ, Po, ¹⁴ C, ²¹⁰ Pb	B
	México	El Tecuan	19.3170	-104.9382	Histórico y Paleo	Estero		
Ramirez-Herrera et al., 2016b	México	El Tecuan	19.3170	-104.9382	Histórico y Paleo	Estero	SM, AMS, OPM	B
Shaw and Benson, 2015	México	Quintana Roo, Akumal	20.3985	-87.3097	Paleo	Cordón litoral	Gd, ¹⁴ C	
Sunet al., 2013	China	Dungdao I	16.6631	112.7301	Histórico	Laguna	Gl, Fo, Mo, GQ	

Andrade et al, 2014	India	Nicobar Isands	1.0804	92.5614	Paleo	Estero	Gd, Geom	
	India	Nicobar Isands	11.4085	92.6457	Paleo	Afloramiento		
	India	Nicobar Isands	12.8148	92.6640	Paleo	Estero		
	India	Tamil Nadu	11.1453	79.8503	Paleo	Planicie costera		
Elakkiya et al, 2013	India	Kameshwaram	10.6230	79.8504	Histórico	Planicie costera	Gl, Ca, Fo, Os	
Johnson and Malik, 2015	India	Andaman Is, Badabalu	11.5108	92.6751	Paleo	Swale	Gd, Fo, ¹⁴ C	
Johnson et al., 2013	India	Andaman Is, Collinpur	11.6933	92.5983	Paleo	Swale	Gd, Fo	
Malik et al., 2011	India	Andaman Is, Mithakhari	11.6623	92.6848	Paleo	Depresión topográfica	Gl, Di, ¹⁴ C	
Malik et al., 2015	India	Andaman Is, Collinpur	11.6935	92.5984	Histórico y Paleo	Swale	Gd, ¹⁴ C, OSL	
	India	Andaman Is, Collinpur	11.7067	92.5950	Histórico y Paleo	Swale		
Rajendran et al., 2006	India	Mahabalipuram	12.6174	80.1957	Histórico	Planicie costera	Gd, Fo, Di, Arq, ¹⁴ C, OSL	
Rajendran et al., 2011	India	Kaveripattinam, Vanagiri	11.1235	79.8491	Histórico	Swale	Gl, Fo, Di, OSL	B
Rajendran et al., 2013	India	Campbell Bay, Peakody Beach	7.0000	93.9360	Histórico y Paleo	Playa	Gd, His	
	India	Car Nicobar, Sawai	9.1990	92.7242	Histórico y Paleo	Berma	Gd, Gas, His, ¹⁴ C	
	India	Car Nicobar, Mus	9.2410	92.7910	Histórico y Paleo	Acantilado bajo	Gd, Fo, Gas, His, ¹⁴ C	
	India	Car Nicobar, Arong	9.1720	92.7220	Histórico y Paleo	Depresión topográfica	Gd, Gas, Arq, His, ¹⁴ C	
	India	Car Nicobar, Kakkana	9.1263	92.7721	Histórico y Paleo	Swale	Gd, Gas, His, ¹⁴ C	
	India	Little Andaman, Hut Bay	10.5960	92.5380	Histórico y Paleo	Banco de arroyo	Gd, Gas, His, ¹⁴ C	
	India	Andaman I., Rangachanga	11.5810	92.7360	Histórico y Paleo	Banco de arroyo	Gd, His, ¹⁴ C	
	India	Dive Agar	18.1846	72.9810	Historical	Playa	Gl, Mp	
Sangode and Meshram, 2013	India	Guhagar	17.4890	73.1847	Historical	Playa		
	India	Andaman I, Collinpur	11.6936	92.5983	Histórico	Playa/ Pantano	Gl, Fo, ¹⁴ C	
Sarkar et al., 2013	India	Andaman I, Wandoor	11.5959	92.6080	Histórico	Playa/pantano		
Vijaya et al., 2010	India	Mahabalipuram	12.6464	80.2033	Histórico	Planicie costera	Gl, MpT	

van den Berg et al, 2003	Indonesia	Teluk Baten	-5.9822	106.1482	Histórico	Plataforma contiental	Gl, SM, GQ, ¹⁴ C, Te	
Fisher and Harris, 2016	Indonesia	Banda Neira	-4.5281	129.8966	Histórico	No especificado	Estratigrafia	
Grand Pre et al., 2012	Indonesia	Aceh, Pulot	5.3631	95.2509	Paleo	Planicie costera	Gd, Fo, Po, Gas, ¹⁴ C	
	Indonesia	Aceh, Seudu	5.3394	95.2434	Paleo	Marisma		
Kelsey et al, 2015	Indonesia	Pulot (Banda Aceh)	5.3630	95.2520	Paleo	Planicie costera	Gl, Fo, FoT, Po, ¹⁴ C	B
	Indonesia	Seungko Meulat (Banda Aceh)	5.2915	95.2334	Paleo	Planicie costera		B
Monecke et al., 2008	Indonesia	Aceh, Meulaboh	4.2441	96.0101	Paleo	Swale	Gl, Di, ¹⁴ C	
Putra et al., 2017	Indonesia	Teluk Lampung	-5.5670	105.3754	Histórico	Afloramiento	Gl, Fo, Mo, Mp, Te	
Rizal et al., 2017	Indonesia	Java, Cilacap	-7.6884	109.2157	Histórico	Swale	Gl, Fo, ²¹⁰ Pb	
Wassmer et al., 2015	Indonesia	Banda Aceh, Lampuuk	5.4924	95.2464	Paleo	Planicie costera	Gl, AMS, ¹⁴ C	B/D
Yudhicara et al., 2013	Indonesia	Java, Cilacap	-7.6832	109.1455	Histórico	Afloramiento	Gl, Fo, ¹⁴ C	
	Indonesia	Java, Pangandaran	-7.6954	108.7617	Histórico	Canal		
Klosterman et al., 2014	Maldives	Rasdhoo Atol	4.2638	72.9922	Paleo	Laguna/Atolón	Gl, Fo, Mo, Co, ¹⁴ C	D
Dahanayake and Kulasena, 2008	Sri Lanka	Peraliya	6.1637	80.0937	Paleo	Depresión topográfica	Gl, Ca, Fo, Mo	
Dahanayake and Kulasena, 2008	Sri Lanka	Deruwala	5.9649	80.3858	Paleo	Depresión topográfica		
Dahanayake et al, 2012	Sri Lanka	Peraliya	6.1637	80.0937	Paleo	Depresión topográfica	Gl, Fo, Mp, GQ, His, ¹⁴ C	
	Sri Lanka	Galle	6.0417	80.1992	Histórico	Depresión topográfica		
	Sri Lanka	Habaraduwa	5.9904	80.3317	Histórico	Depresión topográfica		
	Sri Lanka	Deruwala	5.9649	80.3858	Histórico	Depresión topográfica		
Jackson et al., 2014	Sri Lanka	Karagan lagoon	6.1334	81.1213	Paleo	Laguna	Gl, Fo, ¹⁴ C	
Premasiri et al., 2015	Sri Lanka	Hambantota	6.1352	81.1345	Histórico y Paleo	y Cordón litoral	Gl, Fo, His, GPR, OSL	
	Sri Lanka	Yala	6.2500	81.3900	Histórico y Paleo	y Cordón litoral		
Ranasinghe, 2010	Sri Lanka	Tangalle	6.0394	80.8115	Histórico y Paleo	y Pantano	Gl, SM, Fo, Os, Di, Mo, GQ, Ref, PCA, His	
	Sri Lanka	Kirinda	6.2051	81.3236	Histórico y Paleo	y Pantano		

	Sri Lanka	Panama		6.7703	81.8058	Histórico y Paleo	Estero	GI, SM, Fo, Os, Di, Mo, Ref, PCA, His	
	Sri Lanka	Komari I		6.9590	81.8583	Histórico y Paleo	Laguna		
	Sri Lanka	Komari II		6.9835	81.8613	Histórico y Paleo	Laguna		
	Sri Lanka	Vakarai		8.1950	81.4003	Histórico y Paleo	Swale/Cordón litoral		
	Sri Lanka	Akkaraipattu		7.1809	81.8590	Histórico y Paleo	Laguna		
	Sri Lanka	Sittandi		7.8277	81.5833	Histórico y Paleo	Swale/Cordón litoral		
	Sri Lanka	Yala		6.4280	81.5988	Histórico y Paleo	Pantano/Estero	GI, SM, Fo, Os, Di, Mo, GQ, Ref, PCA, His	
	Sri Lanka	Okanda		6.6765	81.7709	Histórico y Paleo	Laguna	GI, SM, Fo, Os, Di, Mo, Ref, PCA, His	
Brill et al, 2011	Tailandia	Ban Bang Sak		7.4238	99.3475	Paleo	Swale/Planicie costera	GI, LOI, Ca, Mo, GQ, ¹⁴ C	
Brill et al, 2012	Tailandia	Kho Phra Thong		9.1378	98.2634	Paleo	Swale	GI, Ca, ¹⁴ C, OSL	
Brill et al, 2014a	Tailandia	Pakarang Cape		8.7328	98.2266	Paleo	Planicie costera	GI, LOI, Ca, Mo, GQ, Geom,	
Brill et al, 2014b	Tailandia	Ban Bang Sak		7.4212	99.3463	Paleo	Planicie costera	GI, LOI, Ca, Fo, GQ	
Fujino et al., 2009	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1471	98.2714	Paleo	Swale	Gd, His, ¹⁴ C	B
Gouramanis et al., 2015	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1319	98.2624	Paleo	Swale	Gd, GPR	
Gouramanis et al., 2017	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1319	98.2625	Paleo	Swale	GI, LOI, 14C, OSL	D
Harper, 2005	Tailandia	Krabi, Ao Nang		8.0086	98.8381	Paleo	Cueva	Capa de conchas, ¹⁴ C	
Jankaew et al., 2008	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1319	98.2624	Paleo	Swale	Gd, Fo, Di, ¹⁴ C	B
	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1342	98.2646	Paleo	Swale		
Löwhagen et al., 2014	Tailandia	Phra Island	Thong			Paleo	Swale	GQ, ¹⁴ C	
Löwhagen et al., 2015	Tailandia	Phra Island	Thong	9.108248	98.257387	Paleo	Swale	GQ, ¹⁴ C	
				9.150425	98.266365				

Pham et al., 2017	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1318	98.2620	Paleo	Plataforma continental/Playa/Cordón litoral	Gl, Min, GQ, PCA, PAM, DFA	
Prendergast, 2012	Tailandia	Phra Island	Thong	9.1316	98.2622	Histórico y Paleo	Swale/Cordón litoral	Gd, OSL	
Rhodes et al., 2011	Tailandia	Klong Lamu	Thap	8.5544	98.2177	Paleo	Capa de arena	Gl, LOI, Ca, SM, ¹⁴ C	B
Rubin et al., 2017	Tailandia	Sumatra		5.2226	95.2430	Paleo	Cueva	Gl, Fo, FoT, Tafonomia de Ca, ¹⁴ C	
Sieh et al., 2015	Tailandia	Lubhok Beach	Bay	5.6109	95.5343	Histórico	Afloramiento	Gl, Fo, GQ, Co, Arq, His, ¹⁴ C	B
	Tailandia	Lhok Cut		5.6110	95.5296	Histórico	Afloramiento		
Tuttle et al., 2007	Tailandia	Phanganga Porvince		8.2805	98.2756	Paleo	Swale/Estero/Cortes expuestos	Gl	B
Yawsangratt et al., 2012	Tailandia	Kho Khao I.		8.8898	98.2654	Paleo	Laguna	Gl, Fo, ¹⁴ C	B
Yu et al., 2016	Taiwan	Jinshan		25.2341	121.6318	Histórico	Planicie costera	Gl, Mp, SM, GQ	B
Engel et al., 2010	Antillas Holandesas	Bonaire		12.1808	-68.2193	Paleo	Laguna	Gl, LOI, Ca, SM, Mo, MinT, GQ, ¹⁴ C	
	Antillas Holandesas	Bonaire		12.2688	-68.3375	Paleo	Laguna		
Engel et al., 2012	Antillas Holandesas	Bonaire		12.2237	-68.4011	Paleo	Laguna	Gl, LOI, Fo, Os, GQ, ¹⁴ C	
	Antillas Holandesas	Bonaire		12.1517	-68.3181	Paleo	Laguna		
Engel et al., 2013	Antillas Holandesas	Bonaire		12.2969	-68.3929	Paleo	Laguna	Gl, LOI, Ca, SM, Fo, Os, Mo, ¹⁴ C	
Clouard et al., 2017	I. Martinica	Port de France		14.6051	-61.0679	Histórico	Planicie de inundación	Gd, Arq, His	
Atwater et al., 2012	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7395	-64.3591	Histórico	Estanque salino	Gl, Fo, Mo, Gas, Co, His, ¹⁴ C	
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7356	-64.3542	Histórico	Estanque salino		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7272	-64.3617	Histórico	Estanque salino		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7264	-64.3499	Histórico	Estanque salino		
Atwater et al., 2017	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7465	-64.3898	Histórico y Paleo	Estanque	Gl, Fo, Mo, Gas, Co, His, ¹⁴ C	
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada		18.7412	-64.3537	Histórico y Paleo	Estanque		

	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7398	-64.3445	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7362	-64.3486	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7405	-64.3600	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7345	-64.3625	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7336	-64.3429	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7253	-64.3529	Histórico y Paleo	Estanque		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7480	-64.3305	Histórico y Paleo	Capa de arena	Gl, Fo, Mo, Gas, Co, His, 14C	B
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7441	-64.3215	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7404	-64.3151	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7365	-64.3056	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7303	-64.3019	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7240	-64.2940	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7128	-64.2824	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7071	-64.2838	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.6999	-64.2775	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.6959	-64.2741	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.6960	-64.2827	Histórico y Paleo	Capa de arena		
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7133	-64.3073	Histórico y Paleo	Capa de arena		
Pilarczyk and Reinhardt, 2012	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7368	-64.3520	Histórico	Laguna/Playa	Gl, Fo, FoT	
Reinhardt et al., 2012	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7396	-64.3551	Histórico	Estanque	Gl, F, Mo, MoT, ¹⁴ C	
	Islas Vírgenes Británicas	Anegada	18.7248	-64.3544	Histórico	Estanque		
Fuentes, 2013	República Dominicana	Bahia Ocoa	18.4327	-70.6716	Sin fechar	Laguna	Gl	

Leal et al., 2014	Venezuela	Cumana, Los Patos	10.4274	-64.2056	Paleo	Laguna	Gd, Mp, SM, GQ, ¹⁴ C	B/D
Oropeza et al., 2015	Venezuela	Sucre, Chacopata	10.6842	-63.7983	Paleo?	Swale	Gl	
	Venezuela	Sucre, Bocaripo	10.6491	-63.8268	Paleo	Swale		
Weiss, 1979	Venezuela	Cayo Sal	10.9439	-68.2588	Paleo	Laguna	Gl, Mo, His, ¹⁴ C	
May et al., 2015	Australia	Onslow	-21.7078	114.9070	Histórico	Planicie de abanicos de sobrepaso	Gl, LOI, Fo, Os, SM, GQ, His, ¹⁴ C, OSL	B
May et al., 2016	Australia	CapeRange	-21.8411	114.0484	Paleo	Laguna/Pantano	Gl, Fo, FoT, PCA, CTS, ¹⁴ C, OSL	
Chagué-Goff et al, 2016	Cook Islands	Mangaia	-21.9515	-157.9304	Paleo	Laguna	Gl, LOI, Ca, Di, Mo, SM, GQ, PCA	
Burney et al, 2001	E.U.A.	Hawaii, Kaua'i	21.8883	-159.4188	Paleo	Cueva	Gl, Di, Mo, Arq, ¹⁴ C	
Chagué-Goff et al, 2012	E.U.A.	Hawaii, Pololu Valley	20.2034	-155.7325	Histórico	Pantano	Gl, LOI, Fo, FoT, Di, Po, GQ, His, ²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs	
Griswold et al., 2016	E.U.A.	Hawaii, Kaua'i	22.148075	-159.308623	Histórico	Marisma	Gl, CTS, GQ, ¹³⁷ Cs	
Goff et al., 2011a	Pacific Islands	Aitutaki, Island	-18.8636	-159.7986	Paleo	No especificado	Gd, Arq, ¹⁴ C	B
	Pacific Islands	Futuna Islands	-14.2492	-178.1794	Paleo	Varios		
	Pacific Islands		-24.3742	-128.3269	Paleo	No especificado		
	Pacific Islands	Aganoa, US Samoa	-14.2683	-170.5650	Paleo	No especificado		
	Pacific Islands	Tongoa, Vanuatu	-16.9186	168.5731	Paleo	No especificado		
	Pacific Islands	Efate, Vanuatu	-17.6839	168.2492	Paleo	No especificado		
Williams et al., 2011	Samoa	Savai'i, Falealupo	-13.4991	-172.7844	Paleo	Swale/Pantano	Gl, GQ, ¹⁴ C	
	Samoa	Savai'i, Lano	-13.6196	-172.1990	Paleo	Marisma		
	Samoa	Ta'u	-14.2257	-169.5154	Paleo	Marisma		
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Tavai	-14.2462	-178.1670	Paleo	No especificado	Gl, LOI, Fo, Di, Arq, ¹⁴ C	
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Levesi	-14.2492	-178.1798	Paleo	No especificado		
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Leava	-14.2981	-178.1581	Paleo	No especificado		

Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Taoa	-14.3092	-178.1289	Paleo	No especificado
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Vele	-14.3111	-178.0688	Paleo	No especificado
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Vatuke	-14.3066	-178.0581	Paleo	No especificado
Goff et al., 2011b	Wallis Futuna Archipelago	Tamana	-14.2861	-178.1028	Paleo	No especificado

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica. Claves para Proxies utilizados: Gd=Granulometría descripción; Gl=Granulometría laboratorio; LOI=Lost Of Ignition; Ca=Carbonatos de Ca; Geom=Geomorfología; Min=Petrografía de minerales; MinT= Tafonomía de minerales; Mp= Minerales pesados; Fo=Foraminíferos; FoT=Tafonomía en foraminíferos; Os=Ostrácodos; Di=Diatomeas; Mo=Moluscos; Gas=Gastrópodos; Co=Coral; Pol=Pólem; SM=Susceptibilidad Magnética; AMS= Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética; OPM=Otras propiedades magnéticas; MSt=Estadísticas de propiedades magnéticas; GQ=Geoquímica de elementos; PCA=Análisis de Componentes Principales; PAM=Partitions Around Mediods; DFA=Discriminant Function Analysis; Imagenología: RX= Rayos X; CTS= Tomografía computarizada; His=Fuentes históricas; Arq=Datos arqueológicos; Métodos de Datación= ^{14}C , ^{137}C ; ^{210}Pb , OSL.

3.3 El Trópico húmedo: retos para la preservación e identificación de paleodepósitos de tsunami

La zona intertropical se localiza a $\pm 23.43^\circ$ del Ecuador, se caracteriza por un régimen térmico con temperaturas promedio anuales superiores a los 18°C que, de acuerdo con su régimen pluvial, se clasifica en húmedo o árido (Gupta, 2011). Buena parte de las costas tropicales húmedas están ocupadas por manglares y muchas de ellas cambian periódicamente por la acción de las tormentas tropicales (Figura 2). Los humedales de los trópicos albergan una gran variedad de seres vivos y también actúan como barreras a la erosión costera; las comunidades vegetales que forman los manglares son tolerantes a la salinidad e intervienen en los procesos de sedimentación fluvial y de erosión costera (Gupta, 2011).

Además de los tsunamis, existen otros eventos altamente energéticos, como las tormentas y marejadas, que pueden producir depósitos similares a los generados por los tsunamis, hecho que complica su identificación, y que han sido motivo de trabajos encaminados a reconocer y documentar características distintivas (e.g. Goff et al., 2004; Tuttle et al., 2004; Morton et al., 2007; Switzer y Jones, 2008; Richmond et al., 2011; Phantuwongraj y Choowong, 2012). Las zonas tropicales son el escenario de huracanes producidos por las corrientes de viento que, al circular sobre aguas cálidas succionan el vapor de agua de la superficie oceánica, alcanzando velocidades de 250 km/h. Estos meteoros, al llegar a la costa, producen vientos, marejadas y lluvias, estas últimas además precipitan una gran cantidad de agua en las zonas continentales aledañas (e. g. Huracán Manuel (Guerrero, México) en septiembre de 2013).

Los primeros esfuerzos sistemáticos en la búsqueda de paleodepósitos de tsunami en ambientes tropicales fueron desarrollados por Atwater y su equipo después del tsunami de 2004 en la zona del Océano Índico. Atwater (2007) reportó las siguientes dificultades: el papel de los manglares como barreras que inhiben “la formación y preservación de las capas arenosas de tsunami”, la acción perturbadora de los cangrejos, al “mezclar incansablemente” los sedimentos arenosos con los arcillosos en los pantanos, o incluso la acción perturbadora del hombre; las dificultades también se derivaron del intento por buscar en lugares que resultaron exitosos en las zonas templadas de Japón, la Costa Oeste de Estados Unidos o Chile, cuyas planicies costeras con cordones litorales, esteros y marismas brindan un amplio abanico de posibilidades para alojar y preservar los sedimentos acarreados por los tsunamis; además la vegetación en estas planicies es pequeña y ofrece poca resistencia al flujo del tsunami; y la subsidencia cosísmica y el hundimiento neto ocurrido durante el Holoceno han favorecido la formación de tapones de lodo que preservan la capa de arena del tsunami (Atwater, 2007).

En cambio, en los ambientes tropicales del Océano Índico, ninguna de las características arriba mencionadas era fácil de encontrar, por lo que Atwater (2007) sugirió buscar en otros ambientes y utilizar otros indicadores. De esta manera, Harper (2005) reporta un posible paleotsunami en la entrada de una cueva; Tuttle *et al.* (2007), Jankaew *et al.*, (2008), Monecke *et al.*, (2008) y Fujino *et al.*, (2009) identificaron paleodepósitos en *swales* (depresiones entre los cordones litorales) de Tailandia; Dahanayake y Kulasena, (2008) lo hicieron en las planicies costeras de Sri Lanka, y Rajendran *et al.* (2006) en la planicie costera oriental de la India. A diferencia de Tailandia e Indonesia, cuyos registros históricos escasos dificultan la correlación de los fechamientos con sismos históricos reportados y complican su interpretación; la India y Sri Lanka cuentan con una larga historia de ocupación humana, por lo que las evidencias sedimentarias fechadas pueden correlacionarse con datos históricos y/o arqueológicos.

De esta manera, la búsqueda de paleodepósitos en el trópico húmedo identificó las depresiones (*swales*) de los cordones litorales, como sitios con gran potencial de preservación (Jankaew *et al.*, 2008; Monecke *et al.*, 2008; Fujino *et al.*, 2009; Brill *et al.*, 2011, 2012; Rajendran *et al.*, 2011,2013; Johnson *et al.*, 2013, 2015); esteros y afloramientos en las paredes de los ríos (Tuttle *et al.*, 2007; Ranasinghe, 2010; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012, 2013, 2014; Andrade *et al.*, 2014) e, incluso en cuevas (Burney *et al.*, 2001; Harper, 2005; Rubin *et al.*, 2017). El hecho de contar con depósitos de tsunami modernos, que funcionan como análogos, ha guiado la localización de paleodepósitos de tsunami en sitios como Phra Thong Island o las Islas Andaman, localizadas fuera del alcance de los huracanes, factor que ha contribuido para que sea menos compleja su identificación. Por el contrario, en América, en estudios realizados en el Caribe (Atwater *et al.*, 2012 y 2017; Engel *et al.*, 2010, 2012 y 2013; Fuentes, 2013) la presencia de huracanes recurrentes ha complicado la preservación e identificación de los paleodepósitos de tsunami.

3.4 Condiciones que impactan la preservación de los paleodepósitos de tsunami en el trópico húmedo

De manera general, la *preservación de paleodepósitos* de tsunami requiere la concurrencia de una serie de condiciones favorables, entre ellas: que el fenómeno generador sea altamente energético (*e. g.* sismos $M \geq 6.5$ (Bourgeois, 2009)), que exista material a ser removido y que se produzca un depósito lo suficientemente grande, con un espesor de al menos 10 cm (Szcucinski, 2012), capaz de dejar una huella sedimentaria; además, que exista un sitio en donde pueda ser alojado y preservado en el tiempo; que agentes externos no lo perturben y que posea características que permitan diferenciarlo de otros depósitos altamente energéticos (*e. g.* tormentas y marejadas). En el trópico existen condiciones particulares derivadas de la localización geográfica y condiciones

físicas propias de zonas tropicales húmedas que inciden sobre el proceso de sedimentación y preservación de los paleodepósitos de tsunamis que pueden hacer más compleja su localización e identificación en el terreno que a continuación se describen (Tabla 3).

Tabla 3. Condicionantes que impactan en la preservación del paleodepósito de tsunamis

Escala	Efecto	Elemento	Afecta en:
Contexto general	Por localización	Dimensión de la zona de subducción e historia sísmica (potencial sísmico y tsunamigénico)	La magnitud del sismo y la capacidad para producir un tsunami
		Evolución del nivel relativo del mar (RSL)	El espacio de alojamiento
		Régimen tectónico	El espacio de alojamiento
		Batimetría	Deslizamientos que pueden producir tsunamis/ Potencia del tsunami
		Morfología de la línea de costa	Potencia del tsunami
Contexto particular	En el sitio	Geomorfología	El depósito/ post depósito
		Microtopografía	El depósito
		Vegetación	El depósito
		Temperatura y precipitación	Post depósito
		Bioturbación	Post depósito

Fuente: Elaboración propia

La *magnitud del evento que produce el tsunami* está relacionada directamente con la dimensión de la zona de subducción y su historia sísmica, cuando el evento disparador es un sismo; y/o con la morfología submarina, cuando el tsunami es producido por un deslizamiento submarino, la posición de la zona desplazada en el fondo marino respecto de la costa también controla la directividad de la onda. Además, el ciclo sísmico del sitio modela la *deformación cosísmica y postsísmica* (levantamiento/hundimiento). Cuando ocurre un hundimiento, súbito o lento, puede favorecer la preservación del depósito, ya que es más fácil que sea cubierto por otros sedimentos y así se preserve; por el contrario, al ocurrir levantamiento es más probable que el depósito quede expuesto y pueda erosionarse por la acción del viento o de la lluvia. Cada evento sísmico tiene particularidades en cuanto a magnitud y localización del epicentro que puede producir respuestas cosísmicas diferenciadas en la costa.

El *espacio de alojamiento* (Coe y Church, 2003; Kelsey *et al.*, 2015) definido como la capacidad del ambiente costero para resguardar el registro sedimentario del cambio ambiental, está relacionado con la evolución tectónica del sitio y la velocidad de levantamiento ocurrida durante el Holoceno (Dura *et al.*, 2016). Se supone que las mejores condiciones para la construcción de espacio de alojamiento están presentes en aquellas regiones del planeta adyacentes a las antiguas masas de

hielo (Khan *et al.*, 2015) dado que sufrieron un incremento lento en el nivel relativo del mar durante el Holoceno tardío, producto de la constante subsidencia glacio-isostática. Las condiciones tectónicas particulares de cada lugar también pueden incidir en la construcción del espacio de alojamiento. De esta forma, incluso cada evento sísmico puede producir condiciones particulares que contribuyan o no con la preservación del depósito. En zonas con condiciones menos favorables es más probable encontrar un registro sedimentario en forma de parches y con secuencias estratigráficas discontinuas, lo que dificulta la correlación de estratos entre núcleos tomados en la misma zona (Dura *et al.*, 2016).

La *geomorfología de la costa* incluye la *morfología de la línea de costa* (lineal/ondulada), en el plano horizontal, que junto con el perfil batimétrico (pendiente) contribuye a potenciar/mitigar la energía de las olas producidas por el tsunami (Bryant, 2008). Las *formas del paisaje costero* que controlan tanto la disponibilidad de sedimento que puede ser erosionado y transportado, como sitios en donde puede ocurrir el depósito. La literatura ha reportado la localización de paleodepósitos en lagunas, estanques, pantanos y marismas cercanos a la costa (Minoura y Nakaya, 1991; Atwater y Moore, 1992; Pinegina y Bourgois, 2001; Kelsey *et al.*, 2005; Nanayama *et al.*, 2007), que también han resultado exitosas en el trópico (Weiss, 1979; Ramírez-Herrera *et al.*, 2007, 2009, Engel *et al.*, 2010, 2013; Pilarczyk y Reinhardt, 2012; Jackson *et al.*, 2014; Klosterman *et al.*, 2014; Černý *et al.*, 2016; Chagué-Goff *et al.*, 2016); sin embargo, las condiciones ambientales adversas alentaron la búsqueda en otros ambientes, por lo que se han agregado otras formas como las depresiones entre cordones litorales (*swales*), las paredes de ríos y arroyos y las cuevas como geoarchivos tal como se presentó en el apartado anterior.

Las condicionantes al momento del depósito se relacionan con la fuerza hidrodinámica, responsable del acarreo y sedimentación del material transportado al momento de la inundación, proceso controlado por la *microtopografía* presente en el momento del depósito (Paris *et al.*, 2009; Yawsangratt *et al.*, 2009). La *vegetación*, que cuando es pequeña ofrece poca resistencia al flujo (Atwater, 2007), cuando es mayor actúa como una barrera que disminuye la velocidad del flujo y precipita el depósito (Harada y Imamura, 2005; Rhodes *et al.*, 2011). En las zonas tropicales húmedas buena parte de las costas están ocupadas por manglares, hecho que potencialmente limita la extensión de los depósitos.

El trópico húmedo se caracteriza por *altas temperaturas y precipitaciones abundantes* que aceleran los procesos de disolución y formación de suelo (Yawsangratt *et al.*, 2012; Szczucinski, 2012; Yu *et al.*, 2016) y han sido reportados como posibles responsables de la disolución de microfósiles y lavado de sedimentos finos (Szczucinski *et al.*, 2007; Jankaew *et al.*, 2008; Ramírez-Herrera, 2011). También pudieran complicar los fechamientos por ^{14}C y OSL (Ramírez-Herrera *et*

al., 2012; Ramírez-Herrera *et al.*, 2016) y producir alteraciones geoquímicas o incluso perturbar la orientación de los granos necesaria para las mediciones de anisotropía magnética (Szicuzinski *et al.*, 2012; Wassmer *et al.*, 2015).

Finalmente, la *bioturbación* es producida por agentes externos que deterioran el depósito en términos de espesor, contactos estratigráficos y posición de los sedimentos. Estos agentes externos pueden ser animales, como cangrejos (Tuttle *et al.*, 2007; Atwater, 2007; Fujino *et al.*, 2009; Atwater *et al.*, 2012; Ramírez-Herrera *et al.*, 2014), raíces de plantas y la actividad humana (Tuttle *et al.*, 2007; Rhodes *et al.*, 2012).

3.5 Aproximación multiproxy para identificar los paleodepósitos de tsunami

Otro aspecto de suma importancia es el levantamiento en campo que estará orientado por la habilidad para seleccionar los sitios así como por los proxies que se utilizarán para caracterizar las evidencias sedimentológicas. En la literatura revisada el método de exploración y muestreo utilizado consistió en la excavación de pozos o trincheras (64%) y/o la obtención de núcleos o secciones a través de nucleadores, tubos, monolitos o geoslicer (74%), sólo en 10 sitios se muestreó con cubos de plástico para anisotropía magnética (2 cm x 2cm) y en 3 casos se utilizó un XRF portátil. Premasiri *et al.*, (2015) y Gouramanis *et al.*, (2014, 2015 y 2017) muestran cómo el uso de GPR (Ground Penetrating Radar) permite realizar una exploración no invasiva para evaluar el patrón superficial de los rasgos estratigráficos identificados verticalmente en trincheras y pozos. En todos los casos se parte de una interpretación aplicando criterios geomorfológicos para la ubicación de los sitios de muestreo y se realiza una descripción tanto estratigráfica como granulométrica *in situ*.

La complejidad en la interpretación de evidencias sedimentarias ha orientado la investigación hacia la aplicación de *herramientas multiproxy* para con ello discretizar las capas alóctonas en la estructura estratigráfica y caracterizarlas a partir de componentes que permitan identificar su procedencia, los procesos hidrodinámicos que intervinieron en su sedimentación, discriminarlas de otros eventos altamente energéticos, y estimar la fecha en que ocurrieron. El 70% de los artículos presentan resultados a partir de determinaciones granulométricas en laboratorio; en algunos casos la granulometría y la estratigrafía demuestran ser suficientes para identificar las capas anómalas (Tuttle *et al.*, 2007; Prendergast *et al.*, 2012; Fuentes 2013; Sangode y Meshram, 2013; Oropeza *et al.*, 2015; Shaw y Benson, 2015); sin embargo, en otros casos es necesario incluir otros proxies. El uso de los microfósiles ha demostrado ser de utilidad en la identificación de depósitos de tsunamis (Mamo *et al.*, 2009; Sawai *et al.*, 2009; Ruiz *et al.*, 2010); en el material revisado predominan los

foraminíferos (56%), diatomeas (20%) y ostrácodos (12%). En otros casos el análisis ha sido llevado al campo de la tafonomía, correlacionando el estado de preservación (en foraminíferos y ostrácodos) con el proceso de acarreo y sedimentación (Pilarczyk y Reindhart, 2012; Elakkiya *et al.*, 2013; Kelsey *et al.*, 2015; Sieh *et al.*, 2015). La presencia de macrofósiles, como moluscos y gastrópodos, también ha servido para identificar la procedencia de la capa anómala, además de haber sido utilizados para fechamiento (Dahanayake and Kulasena, 2008; Brill *et al.*, 2011; Reinhardt *et al.*, 2012). En el trópico los corales son otro proxy útil para identificar las capas alóctonas, los procesos de sedimentación y que además puede ser fechado (Sun *et al.*, 2013; Klosterman *et al.*, 2014; Sieh *et al.*, 2015; Atwater *et al.*, 2017).

Además del GPR, técnicas de imagenología como los RX (van den Berg *et al.*, 2003), el XRF (Williams *et al.*, 2011) y la Tomografía Computarizada (May *et al.*, 2016) han ayudado a lograr una mejor discriminación de los elementos y estructuras sedimentarias al complementarlas, *e. g.*, con la lectura milimétrica de las variaciones geoquímicas. La identificación de minerales pesados ha servido para diferenciar las capas relacionadas con tsunamis y/o tormentas. El uso de la geoquímica como proxy para identificar paleodepósitos de tsunami, en combinación con otros proxis, ha ayudado a confirmar la procedencia marina de los sedimentos estudiados (Brill *et al.*, 2011; Dahanayake *et al.*, 2012; Ramírez-Herrera *et al.*, 2007, 2012; Chagué-Goff *et al.*, 2016) así como las condiciones de alta energía (Ramírez-Herrera *et al.*, 2014). Recientemente también se han aplicado técnicas estadísticas como el análisis de componentes principales (PCA) para clasificar los sedimentos a partir de sus valores de reflectancia (Ranasinghe, 2010), involucrando las variables granulométricas (May *et al.*, 2016) y combinando, además otras variables como mineralogía y geoquímica (Pham *et al.*, 2017) en un intento por diferenciar los depósitos de tormenta de los de tsunami. Incluso Pham *et al.*, (2017) también prueban con una técnica basada en clusters (PAM-Partition Around Medoids) y una técnica de clasificación de datos (DFA-Discriminant Function Analysis) en un intento por identificar, a partir de similitudes con análogos modernos (OIT, 2004), la procedencia de los sedimentos al comparar las características granulométricas, mineralógicas y geoquímicas para discriminar los depósitos producidos por tormentas de aquellos producidos por tsunamis. Sieh *et al.*, 2015 utilizaron los isótopos estables $\delta^{13}\text{C}$ para identificar la procedencia marina del sedimento.

Durante la última década se ha reportado un uso creciente del análisis de las propiedades magnéticas que, en el caso de los depósitos en ambientes tropicales, puede resultar de gran utilidad dadas las condiciones que afectan su preservación, *e. g.* cuando se han borrado las estructuras sedimentarias (Wassmer *et al.*, 2015; Ramírez-Herrera *et al.*, 2016b). La susceptibilidad magnética es un proxy útil para identificar procedencia de los sedimentos (van den Berg *et al.*, 2003; Engel *et*

al., 2010, 2013; Ranasinghe, 2010; Rhodes *et al.*, 2011; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012; Leal *et al.*, 2014; May *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2016). Son menos los trabajos que además de la susceptibilidad magnética utilizan la anisotropía de la susceptibilidad magnética, y otro tipo de experimentos magnéticos útiles para identificar la fábrica de los sedimentos y los ambientes hidrodinámicos en los que ocurrió la sedimentación (Wassmer *et al.*, 2015; Černý *et al.*, 2016a, 2016b; Gogutchachvili *et al.*, 2013; Ramírez-Herrera, *et al.*, 2013, 2014, 2016a, 2016b; Bógalo *et al.*, 2017).

Finalmente, el fechamiento de los paleodepósitos es de gran importancia para la construcción de la cronología, los métodos más populares son el ^{14}C (74%) y el OSL (Optical Stimulation Luminiscence). Rajendran *et al.*, (2006 y 2011) aplicaron por primera vez OSL en un ambiente tropical húmedo y durante la presente década se ha incrementado su uso (Brill *et al.*, 2012; Prendergast *et al.*, 2012; Malik *et al.*, 2015; May *et al.*, 2015 y 2016; Gouramanis *et al.*, 2017. El fechamiento a partir de ^{210}Pb y ^{137}Cs es menos común y se ha utilizado para identificar eventos históricos recientes (Ramírez-Herrera *et al.*, 2007; Ramírez-Herrera, 2011; Chagué-Goff *et al.*, 2012; Černý *et al.*, 2016a). Otro proxy de gran utilidad para completar la cronología son los datos históricos y/o arqueológicos, que en muchos de los casos han contribuido con la estimación de la edad o el período en que ocurrió el depósito (Weiss, 1979; Burney *et al.*, 2001; Rajendran, 2006; Dahanayake y Kulasena, 2008; Goff *et al.*, 2012 ; Dahanayake *et al.*, 2012; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012; Rajendran *et al.*, 2013; Sieh *et al.*, 2015; Černý *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2016; Clouard *et al.*, 2017).

2.6 Discusión y conclusiones

A partir de la presente revisión, se puede afirmar que la identificación de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales húmedas es una tarea desarrollada, sobre todo a partir de 2004, que no ha sido fácil. Las premisas para la localización y caracterización de los paleodepósitos de tsunami que guiaron la investigación precedente demostraron su utilidad en ambientes templados, pero fueron insuficientes en las zonas tropicales dadas las condiciones contextuales por localización geográfica, morfología costera y geomorfología del sitio, por un lado; y las condiciones intrínsecas del depósito, por el otro.

La Unión Internacional de Ciencias Geológicas, IUGS por sus siglas en Inglés, en el marco del Acuerdo de Sendai (Lambert y Oberhaensli, 2014), reconoce que “una de las principales necesidades incluye la integración de aportaciones geológicas sistemáticas a partir del estudio de paleo-depósitos de tsunami para todas las zonas de subducción...”. Buena parte de las zonas tropicales húmedas se localizan en zonas de subducción con potencial tsunamigénico (Figura 2), para las cuales es urgente

iniciar o continuar con los trabajos de identificación de paleodépósitos de tsunami ya que además, muchas de ellas están siendo sometidas a una creciente presión para ser ocupadas, lo que traerá como resultado una mayor cantidad de población expuesta a este tipo de amenazas.

Se podría suponer que en el trópico húmedo existen factores que complican la identificación de los paleodépósitos de tsunami. De entrada, es posible que exista una disponibilidad de espacio de alojamiento limitada, como resultado del comportamiento global del nivel relativo del mar a lo largo del Holoceno; sin embargo, en cada sitio se pueden presentar condiciones derivadas del contexto tectónico local y los efectos cosísmicos particulares producidos por cada evento sísmico, que permiten resguardar un archivo geológico de gran amplitud temporal (*e.g.* el encontrado por Rubin *et al.* (2017) en una cueva). Las condiciones ambientales, con temperaturas y precipitaciones elevadas, favorecen procesos de disolución y pedogénesis que impactan negativamente en la estructura estratigráfica y complican la identificación de las unidades. En zonas con manglares es de esperarse una menor extensión de los depósitos tierra adentro lo que, combinado con la presencia de otros eventos altamente energéticos, como las tormentas, en la misma sección de la franja costera, hace más compleja la diferenciación de los depósitos. En estas zonas también son abundantes los organismos vivos, plantas y animales, que intervienen en los procesos de bioturbación, y alteran los depósitos.

Sin embargo, la revisión aquí presentada da cuenta de una serie de estrategias para paliar con los obstáculos encontrados en el trópico húmedo, entre los que podemos mencionar: buscar ambientes alternativos (*e.g.* swales y cuevas), explorar sitios que, ya fuera por su localización geográfica o por la distancia hacia la línea de costa, se encuentran fuera del alcance de las tormentas tropicales (*e.g.* las islas Phra Thong Island y Andaman); y la aplicación de múltiples proxies (geoquímica, propiedades magnéticas, microfósiles, presencia de minerales pesados, etc.) para restringir las características propias de paleodépósitos de tsunami (*e.g.* Ramírez-Herrera *et al.*, 2007 y 2012;). Finalmente, un proxy de gran utilidad son los datos históricos y arqueológicos para apoyar la datación y la construcción de la cronología de los eventos identificados en el registro sedimentario.

En la mayoría de los casos reportados por la literatura revisada, los paleodépósitos de tsunami se localizan en sitios para los cuales ya se tiene documentado algún gran tsunami previo, *e.g.* Tailandia, Indonesia, India, Sri Lanka. Sin embargo, la búsqueda se ha ampliado hacia lugares con potencial tsunamigénico como México, el Mar de China o las Islas del Pacífico que, al carecer de análogos modernos, demandarán mayor creatividad para combinar proxies e idear técnicas innovadoras para consolidar la construcción de cronologías útiles para estimar el riesgo y contribuir con el diseño de estrategias territoriales encaminadas a mitigar el riesgo por tsunami en las costas tropicales con potencial tsunamigénico.

Finalmente, resultado de la revisión presentada, queda de manifiesto el despliegue de múltiples técnicas enmarcadas en una teoría general, como *la Tectónica de Placas*, que permite explicar la dinámica terrestre y la generación de sismos y tsunamis. El conocimiento de las características estratigráficas y granulométricas que permiten inferir la presencia de una capa anómala y su ubicación, tanto relativa como absoluta, en la columna estratigráfica es el punto de partida para la caracterización de los paleodepósitos de tsunami en el registro sedimentario. Es sabido que la dinámica terrestre funciona con ciclos temporales amplios (en el ámbito del tiempo geológico), por lo que la construcción de cronologías útiles para la evaluación del riesgo por tsunami necesariamente debe estimar la magnitud y la recurrencia de estos fenómenos para cada sitio en particular a partir de evidencias en el registro geológico. La complejidad que representa la identificación y datación de paleodepósitos, en general, y en ambientes tropicales en particular, ha impulsado la incorporación de múltiples proxies para lo cual es necesario conjuntar equipos de investigación multi y trans-disciplinarios, que paulatinamente integran nuevos campos del conocimiento, *e. g.* la genómica, que intenta reconstruir un ambiente a partir de la información genética de los microfósiles que lo habitaron (Szczeniński *et al.*, 2016). Otra opción, hasta ahora poco estudiada, es la exploración offshore, que para otros lugares del mundo (*e.g.* Cascadia, Japón) ha resultado exitosa.

De esta manera, el proceso de investigación involucra aproximaciones a diferentes escalas espaciales y conceptuales que han transitado desde lo macro y tangible, como las condiciones geomorfológicas del sitio y la estratigrafía; a lo micro y tangible, como la granulometría, los microfósiles o la presencia de minerales pesados, hasta lo *cuasi* intangible como las propiedades magnéticas, la geoquímica o la composición genética. Cada determinación implica una medición aplicando conocimientos, técnicas y tecnologías altamente especializados, encaminadas tanto a la identificación del evento que produjo el depósito, como a la estimación de su magnitud y recurrencia.

Referencias

- Andrade, V., Rajendran, K., y Rajendran, C. P. (2014). Sheltered coastal environments as archives of paleo-tsunami deposits: Observations from the 2004 Indian Ocean tsunami. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95, 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.08.029>
- Arcos, M. E. M., MacInnes, B. T., Arreaga, P., Rivera-Hernandez, F., Weiss, R., y Lynett, P. (2013). An amalgamated meter-thick sedimentary package enabled by the 2011 Tohoku tsunami in El Garrapatero, Galapagos Islands. *Quaternary Research*, 80(1), 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.04.005>

- Atwater, B. F. (2007). Hunting for Ancient Tsunamis in the Tropics. En *Eos Transaction* 83(23). Jt. Assem. Suppl., Abstract T24A-01
- Atwater, Brian F. (1987). Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State. *Science*, 236(4804), 942-944.
- Atwater, Brian F. (1992). Geologic Evidence for Earthquakes During the Past 2000 Years Along the Copalis River, Southern Coastal Washington. *Journal of Geophysical Research*, 97(B2), 1901-1919.
- Atwater, Brian F., y Moore, A. L. (1992). A Tsunami about 100 Years Ago in Puget Sound, Washington. *Science*, 258(5088), 1614-1617.
- Atwater, Brian F., ten Brink, U. S., Buckley, M., Halley, R. S., Jaffe, B. E., López-Venegas, A. M., Reinhardt, R.S., Tuttle, M. P., Watt, S., Wei, Y. (2012). Geomorphic and stratigraphic evidence for an unusual tsunami or storm a few centuries ago at Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 51-84. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9622-6>
- Atwater, Brian F., ten Brink, U. S., Cescon, A. L., Feuillet, N., Fuentes, Z., Halley, R. B., Nuñez, C., Reinhardt, E.G., Roger, J.H., Sawai, Y., Spiske, M., Tuttle, M.P., Wei, Y., Weil-Accardo, J. (2017). Extreme waves in the British Virgin Islands during the last centuries before 1500 CE. *Geosphere*, 13(2), 301-368. <https://doi.org/10.1130/GES01356.1>
- Bógalo, M. F., Ramírez-Herrera, M.-T., Gogutchachvili, A., Rey, D., Mohamed, K. J., Calvo-Rathert, M., Corona, N. (2017). Magnetic signature of the 22 June 1932 tsunami deposits (Jalisco, Mexican Pacific coast): Magnetic Signature of Tsunami Deposits. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(6), 2370-2387. <https://doi.org/10.1002/2016GC006752>
- Bourgeois, J. (2009). Geologic effects and records of tsunamis. *The sea*, 15, 53-91.
- Brill, D., Klasen, N., Jankaew, K., Brückner, H., Kelletat, D., Scheffers, A., Scheffers, S. (2012). Local inundation distances and regional tsunami recurrence in the Indian Ocean inferred from luminescence dating of sandy deposits in Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(7), 2177-2192. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2177-2012>
- Brill, Dominik, Brückner, H., Jankaew, K., Kelletat, D., Scheffers, A., Scheffers, S. (2011). Potential predecessors of the 2004 Indian Ocean Tsunami — Sedimentary evidence of extreme wave events at Ban Bang Sak, SW Thailand. *Sedimentary Geology*, 239(3-4), 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.06.008>
- Brill, Dominik, Jankaew, K., Neubauer, N.-P., Kelletat, D., Scheffers, A., Vött, A., Brückner, H. (2014). Holocene coastal evolution of southwest Thailand – implications for the site-specific preservation of palaeotsunami deposits. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 58(3), 273-303. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2014/0132>
- Brill, Dominik, May, S. M., Engel, M., Reyes, M., Pint, A., Opitz, S., Dierick, M., Gonzalo, L. A., Esser, S., Brückner, H. (2016). Typhoon Haiyan's sedimentary record in coastal environments of the Philippines and its palaeotempestological implications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2799-2822. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2799-2016>

- Brill, Dominik, Pint, A., Jankaew, K., Frenzel, P., Schwarzer, K., Vött, A., Brückner, H. (2014). Sediment Transport and Hydrodynamic Parameters of Tsunami Waves Recorded in Onshore Geoarchives. *Journal of Coastal Research*, 297, 922–941. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00206.1>
- Bryant, E. (2008). *Tsunami: the underrated hazard* (2nd Ed). Berlin ; New York : Chichester, UK: Springer ; Published in association with Praxis.
- Burney, D. A., James, H. F., Burney, L. P., Olson, S. L., Kikuchi, W., Wagner, W. L., Burney, M., McCloskey, D., Kikuchi, D., Grady, F.V., Gage, R., Nishek, R. (2001). Fossil evidence for a diverse biota from Kaua ‘i and its transformation since human arrival. *Ecological Monographs*, 71(4), 615–641.
- Černý, J., Ramírez-Herrera, M.-T., Bógalo, M. F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J. (2016). Origen, Hidrodinámica y Variación Lateral en Sedimentos de Tsunami por AMS, Costa Mexicana del Pacífico. *Latinmag Letters*, 6(Special Issue), 1–7.
- Černý, J., Ramírez-Herrera, M.-T., Bógalo, M.-F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A. C. (2016). Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast. *International Geology Review*, 58(3), 342–357. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1075230>
- Chagué-Goff, C., Goff, J., Nichol, S. L., Dudley, W., Zawadzki, A., Bennett, J. W., Mooney, S.D., Fierro, D., Heijnis, H., Dominey-Howes, D., Courtney, C. (2012). Multi-proxy evidence for trans-Pacific tsunamis in the Hawai’ian Islands. *Marine Geology*, 299–302, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.12.010>
- Chagué-Goff, Catherine, Chan, J. C. H., Goff, J., Gadd, P. (2016). Late Holocene record of environmental changes, cyclones and tsunamis in a coastal lake, Mangaia, Cook Islands: Cyclones and tsunamis on Mangaia. *Island Arc*, 25(5), 333–349. <https://doi.org/10.1111/iar.12153>
- Choowong, M., Murakoshi, N., Hisada, K., Charusiri, P., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V., Jankaew, K., Kanjanapayont, P., Phantuwongraj, S. (2008). 2004 Indian Ocean tsunami inflow and outflow at Phuket, Thailand. *Marine Geology*, 248(3–4), 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.10.011>
- Chunga, K., y Tulkeridis, T. (2014). First Evidence of Paleo-tsunami Deposits of a Major Historic Event in Ecuador. *Journal of Tsunami Society International*, 33(1), 55–69.
- Cisternas, M., Atwater, B. F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C. P., Malik, J. K., Rizal, Y., Husni, M. (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake. *Nature*, 437(7057), 404–407. <https://doi.org/10.1038/nature03943>
- Clouard, V., Roger, J., y Moizan, E. (2017). Tsunami deposits in Martinique related to the 1755 Lisbon earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–13. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-238>

- Coe, L. A., y Church, K. D. (2003). Sequence Stratigraphy and Sea-Level Change. En *The Sedimentary Record of Sea-Level Change* (pp. 57–98). Glasgow, U.K.: Cambridge University Press, The Open University.
- Costa, P. J., Andrade, C., Cascalho, J., Dawson, A. G., Freitas, M. C., Paris, R., Dawson, S. (2015). Onshore tsunami sediment transport mechanisms inferred from heavy mineral assemblages. *The Holocene*, 0959683615569322.
- Cox, D. C., y Mink, J. F. (1963). The tsunami of 23 May 1960, in the Hawaiian Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(6), 1191–1209.
- Dahanayake, K., y Kulasena, N. (2008). Geological Evidence for Paleo-Tsunamis in Sri Lanka. *Science of Tsunami Hazards*, 27(2), 54–61.
- Dahanayake, K., Kulasena, N., Ravi Prasad, G. V., Dutta, K., Ray, D. K. (2012). Sedimentological and ¹⁴C dating studies of past tsunami events in Southern Sri Lanka. *Natural Hazards*, 63(1), 197–209. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9824-6>
- Dawson, A. G., Long, D., Smith, D. E. (1988). The Storegga Slides: Evidence from Eastern Scotland for a Possible Tsunami. *Marine Geology*, 82(3–4), 271–276.
- Dawson, A. G., Shi, S., Takahashi, H., Shuto, N. (1996). Coastal Sedimentation Associated with the June 2nd and 3rd, 1994 tsunami in Rajegwesi, Java. *Quaternary Science Reviews*, 15, 901–912.
- Dura, T., Engelhart, S. E., Vacchi, M., Horton, B. P., Kopp, R. E., Peltier, W. R., Bradley, S. (2016). The Role of Holocene Relative Sea-Level Change in Preserving Records of Subduction Zone Earthquakes. *Current Climate Change Reports*, 2(3), 86–100. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0041-y>
- Eaton, J. P., Richter, D. H., Ault, W. U. (1963). The tsunami of May 23, 1960, on the Island of Hawaii. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(2), 135–157.
- Elakkiya, P., Hussain, S. M., Elumalai, K. (2013). Distribution of Foraminifera and Ostracoda in the Kameshwaram Coast, Nagapattinam, South India: Implications for Recognition of Overwash/Extreme Wave Event Deposits. En M. Ramkumar (Ed.), *On a Sustainable Future of the Earth's Natural Resources* (pp. 139–148). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32917-3_7
- Engel, M., y Brückner, H. (2011). The identification of palaeo-tsunami deposits—a major challenge in coastal sedimentary research. *Coastline Reports*, 17, 65–80.
- Engel, M., Brückner, H., Fürstenberg, S., Frenzel, P., Konopczak, A. M., Scheffers, A., Kelletat, D., May, S. M., Schäbitz, F., Daut, G. (2013). A prehistoric tsunami induced long-lasting ecosystem changes on a semi-arid tropical island—the case of Boka Bartol (Bonaire, Leeward Antilles). *Naturwissenschaften*, 100(1), 51–67. <https://doi.org/10.1007/s00114-012-0993-2>
- Engel, M., Brückner, H., Messenzehl, K., Frenzel, P., May, S. M., Scheffers, A., Scheffers, S., Wennrich, V., Kelletat, D. (2012). Shoreline changes and high-energy wave impacts at the leeward coast of

- Bonaire (Netherlands Antilles). *Earth, Planets and Space*, 64(10), 905–921. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.08.011>
- Engel, M., Brückner, H., Wennrich, V., Scheffers, A., Kelletat, D., Vött, A., Schäbitz, F., Daut, G., Willershäuser, T., May, S. M. (2010). Coastal stratigraphies of eastern Bonaire (Netherlands Antilles): New insights into the palaeo-tsunami history of the southern Caribbean. *Sedimentary Geology*, 231(1–2), 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.08.002>
- Fisher, T. L., y Harris, R. A. (2016). Reconstruction of 1852 Banda Arc megathrust earthquake and tsunami. *Natural Hazards*, 83(1), 667–689. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2345-6>
- Fritz, H. M., Borrero, J. C., Synolakis, C. E., Yoo, J. (2006). 2004 Indian Ocean tsunami flow velocity measurements from survivor videos. *Geophysical Research Letters*, 33(24). <https://doi.org/10.1029/2006GL026784>
- Fuentes, Z. (2013). Earthquake Potential of The Muertos Trough: Onshore Sleuthing for Tsunami Deposits. En *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 45, p. 68).
- Fujino, S., Naruse, H., Matsumoto, D., Jarupongsakul, T., Sphawajruksakul, A., Sakakura, N. (2009). Stratigraphic evidence for pre-2004 tsunamis in southwestern Thailand. *Marine Geology*, 262(1–4), 25–28. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.011>
- Goff, J., McFadgen, B. G., Chagué-Goff, C. (2004). Sedimentary differences between the 2002 Easter storm and the 15th-century Okoropunga tsunami, southeastern North Island, New Zealand. *Marine Geology*, 204(1–2), 235–250. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00352-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00352-9)
- Goff, James, Chagué-Goff, C., Dominey-Howes, D., McAdoo, B., Cronin, S., Bonté-Grapetin, M., Nichol, S., Horrocks, M., Cisternas, M., Lamarche, G., Pelletier, B., Jaffe, B., Dudley, W. (2011). Palaeotsunamis in the Pacific Islands. *Earth-Science Reviews*, 107(1–2), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.10.005>
- Goff, James, Chagué-Goff, C., Nichol, S., Jaffe, B., Dominey-Howes, D. (2012). Progress in palaeotsunami research. *Sedimentary Geology*, 243–244(0), 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.11.002>
- Goff, James, Lamarche, G., Pelletier, B., Chagué-Goff, C., Strotz, L. (2011). Predecessors to the 2009 South Pacific tsunami in the Wallis and Futuna archipelago. *Earth-Science Reviews*, 107(1–2), 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.11.003>
- Goguitchaichvili, A., Ramírez-Herrera, M. T., Calvo-Rathert, M., Aguilar Reyes, B., Carrancho, Á., Caballero, C., Bautista, F., Contreras, J. M. (2013). Magnetic fingerprint of tsunami-induced deposits in the Ixtapa–Zihuatanejo Area, Western Mexico. *International Geology Review*, 55(12), 1462–1470. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.779781>
- Gouramanis, C., Switzer, A. D., Jankaew, K., Bristow, C. S., Pham, D. T., Ildefonso, S. R. (2017). High-frequency Coastal Overwash Deposits from Phra Thong Island, Thailand. *Scientific Reports*, 7, 43742. <https://doi.org/10.1038/srep43742>

- Gouramanis, C., Switzer, A. D., Polivka, P. M., Bristow, C. S., Jankaew, K., Dat, P. T., Pile, J., Rubin, C.M., Yingsin, L., Ildefonso, S. R., Jol, H. M. (2015). Ground penetrating radar examination of thin tsunami beds — A case study from Phra Thong Island, Thailand. *Sedimentary Geology*, 329, 149–165. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.09.011>
- Gouramanis, C., Switzer, A.D., Pham, D.T., Rubin, C., Lee, Y.S., Bristow, C., Jankaew, K. (2014). Thin-bed Ground-Penetrating Radar analysis of preserved modern and palaeotsunami deposits from Phra Thong Island, Thailand. En *GPR Proceedings*.
- Grand Pre, C. A., Horton, B. P., Kelsey, H. M., Rubin, C. M., Hawkes, A. D., Daryono, M. R., Rosenberg, G., and Culver, S. J. (2012). Stratigraphic evidence for an early Holocene earthquake in Aceh, Indonesia. *Quaternary Science Reviews*, 54, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.03.011>
- Griswold, F. R., La Selle, S., Richmond, B. M., Jaffe, B. E., Gelfenbaum, G. R., Chague-Goff, C., LeVeque, R.J., Bellanova, P., Sugawara, D., Nelson, A. R. (2016). Summary of Paleotsunami Investigations in Aliomanu, Anahola, Kauai. *AGU Fall Meeting Abstracts*, NH43A-1815.
- Gupta, A. (2011). *Tropical geomorphology*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Harada, K., y Imamura, F. (2005). Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation—a preliminary investigation. En *Tsunamis* (pp. 279–292). Springer. Recuperado a partir de http://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3331-1_17
- Harper, S. B. (2005). Bedded shell deposit at Ao Nang, Krabi Province, southern Thailand: a record of a prehistoric tsunami event or extreme storm event or neither. *Abstract Volume of the Geological Society of America*, 37(7). Recuperado a partir de https://gsa.confex.com/gsa/2005AM/finalprogram/abstract_96784.htm
- Hawkes, A. D., Bird, M., Cowie, S., Grundy-Warr, C., Horton, B. P., Shau Hwai, A. T., Law, L., Macgregor, C., Nott, J., Eong Ong, J., Rigg, J., Robinson, R., Tan-Mullins, M., Tiong Sa, T., Yasin, Z., Aik, L. W. (2007). Sediments deposited by the 2004 Indian Ocean Tsunami along the Malaysia–Thailand Peninsula. *Marine Geology*, 242(1–3), 169–190. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.02.017>
- Hong, I., Pilarczyk, J. E., Horton, B. P., Fritz, H. M., Kosciuch, T. J., Wallace, D. J., Dike, C., Rarai, A., Harrison, M. J., Jockley, F. R. (2017). Sedimentological characteristics of the 2015 Tropical Cyclone Pam overwash sediments from Vanuatu, South Pacific. *Marine Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.05.011>
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawuttikul, N., Patanakanog, B. (2007). Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: An example of two transects along the western coast of Thailand. *Marine Geology*, 239(3–4), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.01.005>
- Inoue, T., Goto, K., Nishimura, Y., Watanabe, M., Iijima, Y., Sugawara, D. (2017). Paleo-tsunami history along the northern Japan Trench: evidence from Noda Village, northern Sanriku coast, Japan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0158-1>
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2016). *Tsunami Glossary*. UNESCO.

- Jackson, K. L., Eberli, G. P., Amelung, F., McFadden, M. A., Moore, A. L., Rankey, E. C., Jayasena, H. A. H. (2014). Holocene Indian Ocean tsunami history in Sri Lanka. *Geology*, 42(10), 859–862. <https://doi.org/10.1130/G35796.1>
- Jankaew, K., Atwater, B. F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, M. E., Prendergast, A. (2008). Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455(7217), 1228–1231. <https://doi.org/10.1038/nature07373>
- Johnson, F.C., Malik, J. N., Khan, A., Hussain, S. M. (2013). Archives of Microfossil assemblages preserved within the tsunami deposit of coastal sediment stratigraphy of Collinpur beach, Andaman Islands, India. En *AOGS*. Birsbane, Australia.
- Johnson, Frango C., y Malik, J. N. (2015). Foraminiferal evidence of a paleotsunami preserved in the Holocene sediment stratigraphy of South Andaman Island, India. En *INQUA*. Nagoya, Japan.
- Kato, Y., Suzuki, Z., Nakamura, K., Takagi, A., Emura, K., Ito, M., Ishida, H. (1961). The Chile tsunami of 1960 observed along the Sanriku coast of Japan. *Science reports of the Tohoku University*, 13(2), 107–125, 26 maps.
- Kelsey, H. M., Engelhart, S. E., Pilarczyk, J. E., Horton, B. P., Rubin, C. M., Daryono, M. R., Ismail, N., Hawkes, A. D., Bernhardt, C. E., Cahill, N. (2015). Accommodation space, relative sea level, and the archiving of paleo-earthquakes along subduction zones. *Geology*, 43(8), 675–678. <https://doi.org/10.1130/G36706.1>
- Kelsey, H. M., Nelson, A. R., Hemphill-Haley, E., Witter, R. C. (2005). Tsunami history of an Oregon coastal lake reveals a 4600 yr record of great earthquakes on the Cascadia subduction zone. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7–8), 1009–1032.
- Khan, N. S., Ashe, E., Shaw, T. A., Vacchi, M., Walker, J., Peltier, W. R., Kopp, R. E., Horton, B. P. (2015). Holocene Relative Sea-Level Changes from Near-, Intermediate-, and Far-Field Locations. *Current Climate Change Reports*, 1(4), 247–262. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0029-z>
- Klostermann, L., Gischler, E., Storz, D., Hudson, J. H. (2014). Sedimentary record of late Holocene event beds in a mid-ocean atoll lagoon, Maldives, Indian Ocean: Potential for deposition by tsunamis. *Marine Geology*, 348, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.014>
- Kon'no, E. (Ed.). (1961). *Geological observations of the Sanriku coastal region damaged by tsunami due to the Chile earthquake in 1960* (Vol. 52).
- Lambert, I., y Oberhaensli, R. (2014). Towards more effective risk reduction: Catastrophic tsunami. *Episodes*, 37(4), 229–233.
- Leal, K., Scremin, L., Audemard, F., Carrillo, E. (2014). Paleotsunamis en el Registro Geológico de Cumaná, Estado de Sucre, Venezuela. *Boletín de Geología*, 36(2), 45–70.
- Lemke, R. W. (1966). *Effects of the Earthquake of March 27, 1964 at Seward, Alaska*. U.S. Geological Survey.

- Löwhagen, L., Jankaew, K., Kylander, M. E., Skelton, A., Wohlfarth, B. (2015). Geochemical and Mineralogical Proxies for characterizing Tsunami and Paleotsunami Deposits. *AGU Fall Meeting Abstracts*, NH33A-1895.
- Löwhagen, L., Jankaew, K., Kylander, M., Wohlfarth, B. (2014). Identifying paleotsunami deposits in Thailand using geochemical analyses. En *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 16, p. 1197).
- Malik, J. N., Shishikura, M., Echigo, T., Ikeda, Y., Satake, K., Kayanne, H., Sawai, Y., Murty, C.V.R., Dikshit, O. (2011). Geologic evidence for two pre-2004 earthquakes during recent centuries near Port Blair, South Andaman Island, India. *Geology*, 39(6), 559–562. <https://doi.org/10.1130/G31707.1>
- Mamo, B., Strotz, L., y Dominey-Howes, D. (2009). Tsunami sediments and their foraminiferal assemblages. *Earth-Science Reviews*, 96(4), 263–278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.06.007>
- May, S. M., Brill, D., Engel, M., Scheffers, A., Pint, A., Opitz, S., Wennrich, V., Squire, P., Kelletat, D., Brückner, H. (2015). Traces of historical tropical cyclones and tsunamis in the Ashburton Delta (north-west Australia). *Sedimentology*, 62(6), 1546–1572. <https://doi.org/10.1111/sed.12192>
- May, S. M., Falvard, S., Norpoth, M., Pint, A., Brill, D., Engel, M., Scheffers, A., Dierick, M., Paris, R., Squire, P., Brückner, H. (2016). A mid-Holocene candidate tsunami deposit from the NW Cape (Western Australia). *Sedimentary Geology*, 332, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.11.010>
- Miller, D. J. (1950). *Giant waves in Lituya Bay, Alaska*. U.S. (Geological Survey Professional Paper No. 354–C) (p. 83).
- Minoura, K., y Nakaya, S. (1991). Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: some examples from northeast Japan. *The Journal of Geology*, 99(2), 265–287.
- Monecke, K., Finger, W., Klarer, D., Kongko, W., McAdoo, B. G., Moore, A. L., Sudrajat, S. U. (2008). A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature*, 455(7217), 1232–1234. <https://doi.org/10.1038/nature07374>
- Moore, A., Nishimura, Y., Gelfenbaum, G., Kamataki, T., Triyono, R. (2006). Sedimentary deposits of the 26 December 2004 tsunami on the northwest coast of Aceh, Indonesia. *Earth, Planets and Space*, 58(2), 253–258.
- Morton, R. A., Gelfenbaum, G., Jaffe, B. E. (2007). Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. *Sedimentary Geology*, 200(3–4), 184–207. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.003>
- Morton, R. A., Goff, J. R., Nichol, S. L. (2008). Hydrodynamic implications of textural trends in sand deposits of the 2004 tsunami in Sri Lanka. *Sedimentary Geology*, 207(1–4), 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.03.008>

- Nanayama, F., Furukawa, R., Shigeno, K., Makino, A., Soeda, Y., Igarashi, Y. (2007). Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200(3-4), 275-294. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.008>
- National Centers of Environmental Information/World Data Service (NCEI/WDS). (2017). Global Tsunami Deposits Database. National Centers of Environmental Information, NOAA. Recuperado a partir de <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=102978&s=20&d=20>
- Oropeza, J., Audemard, F. A., Beck, C., Vallée, M. (2015). New potential sedimentary evidences of paleostunamis on coastal lagoons of Chacopata, State of Sucre, Venezuela. En *INQUA Focus Group on Paleoseismology and Active Tectonics* (pp. 329-331). Pescina, Fucino Basin, Italy. Recuperado a partir de paleosesmicity.org
- Paris, R., Lavigne, F., Wassmer, P., Sartohadi, J. (2007). Coastal sedimentation associated with the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, west Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Marine Geology*, 238(1-4), 93-106. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.12.009>
- Paris, Raphaël, Wassmer, P., Sartohadi, J., Lavigne, F., Barhomeuf, B., Desgages, E., Grancher, D., Baumert, P., Vautier, F., Brunstein, D., Gomez, C. (2009). Tsunamis as geomorphic crises: Lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia). *Geomorphology*, 104(1-2), 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.040>
- Pham, D. T., Gouramanis, C., Switzer, A. D., Rubin, C. M., Jones, B. G., Jankaew, K., Carr, P. F. (2017). Elemental and mineralogical analysis of marine and coastal sediments from Phra Thong Island, Thailand: Insights into the provenance of coastal hazard deposits. *Marine Geology*, 385, 274-292. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.01.004>
- Phantuwongraj, S., y Choowong, M. (2012). Tsunamis versus storm deposits from Thailand. *Natural Hazards*, 63(1), 31-50. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9717-8>
- Pilarczyk, J. E., y Reinhardt, E. G. (2012). *Homotrema rubrum* (Lamarck) taphonomy as an overwash indicator in Marine Ponds on Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 85-100. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9706-3>
- Pinegina, T. K., y Bourgeois, J. (2001). Historical and paleo-tsunami deposits on Kamchatka, Russia: long-term chronologies and long-distance correlations. *Natural Hazards and Earth System Science*, 1(4), 177-185.
- Plafker, G., y Kachadoorian, R. (1966). *The Alaska Earthquake, March 27, 1964: Regional Effects - Kodiak and Nearby Islands*. U.S. Geological Survey.
- Premasiri, R., Styles, P., Shrira, V., Cassidy, N., Schwenninger, J.-L. (2015). OSL Dating and GPR Mapping of Palaeotsunami Inundation: A 4000-Year History of Indian Ocean Tsunamis as recorded in Sri Lanka. *Pure and Applied Geophysics*, 172(12), 3357-3384. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1128-4>

- Prendergast, A. L., Cupper, M. L., Jankaew, K., Sawai, Y. (2012). Indian Ocean tsunami recurrence from optical dating of tsunami sand sheets in Thailand. *Marine Geology*, 295–298, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.11.012>
- Putra, P. S., y Yulianto, E. (2017). Karkteristik Endapan Tsunami Krakatau 1883 Di Daerah Tarahan, Lampung. *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 27(1), 83. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2017.v27.301>
- Rajendran, C. P., Rajendran, K., Andrade, V., Srinivasalu, S. (2013). Ages and relative sizes of pre-2004 tsunamis in the Bay of Bengal inferred from geologic evidence in the Andaman and Nicobar Islands: Ages and Sizes of Pre-2004 Tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1345–1362. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50122>
- Rajendran, C. P., Rajendran, K., Srinivasalu, S., Andrade, V., Aravazhi, P., Sanwal, J. (2011). Geoarchaeological evidence of a Chola-period tsunami from an ancient port at Kaveripattinam on the southeastern coast of India. *Geoarchaeology*, 26(6), 867–887. <https://doi.org/10.1002/gea.20376>
- Rajendran, C.P., Rajendran, K., Machado, T., Satyamurthy, T., Aravazhi, P., Jaiswal, M. (2006). Evidence of ancient sea surges at the Mamallapuram coast of India and implication for previos Indian Ocean tsunami events. *Current Science*, 91(9), 1242–1247.
- Ramírez-Herrera, M. T., Bógalo, M. F., Goguitchaichvili, A., Černý, J., Corona, N. (2016). Propiedades Magnéticas: un Proxy en la Identificación de Depósitos de Tsunami - Costa de Jalisco, Pacífico Mexicano. *Latinmag letters*, 6(Special Issue), 1–8.
- Ramírez-Herrera, M. T., Cundy, A. B., Kostoglodov, V., Ortiz, M. (2009). Late Holocene tectonic land-level changes and tsunamis at Mitla lagoon, Guerrero, Mexico. *Geofísica internacional*, 48(2), 195–209.
- Ramirez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards, A., Morales, E., Metcalfe, S. (2007). Sedimentary record of late-Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*, 17(8), 1211–1220. <https://doi.org/10.1177/0959683607085127>
- Ramírez-Herrera, María Teresa. (2011). Evidencias ambientales de cambios de nivel de la costa del Pacífico de México: terremotos y tsunamis. *Revista de Geografía Norte Grande*, (49), 99–124.
- Ramírez-Herrera, María Teresa, Bógalo, M. F., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Corona, N., Machain, M. L., Carranza Edwards, A., Sosa, S. (2016). Historic and ancient tsunamis uncovered on the Jalisco-Colima Pacific coast, the Mexican subduction zone. *Geomorphology*, 259, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.011>
- Ramírez-Herrera, María Teresa, Černý, J., Gogichaishvili, A., Aguilar, B., Corona, N., Caballero-Miranda, C. (2013). Rock-Magnetic Properties and Anisotropy of Magnetic Susceptibility-Supplementary Proxies in Tsunami Deposits Identification: The 22 June 1932 Event, Pacific Coast of Mexico. *Latinmag Letters*, 3(Special Issue), 1–6.
- Ramírez-Herrera, M.-T., Corona, N., Lagos, M., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Goff, J., Chagué-Goff, C., Machain, M. L., Zawadzki, A., Jacobsen, G., Carranza-Edwards, A., Lozano, S., Blecher, L. (2014).

Unearthing earthquakes and their tsunamis using multiple proxies: the 22 June 1932 event and a probable fourteenth-century predecessor on the Pacific coast of Mexico. *International Geology Review*, 56(13), 1584–1601. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951977>

- Ramírez-Herrera, M.-T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Quintana, P. (2012). Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology*, 139–140(0), 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.002>
- Ranasinghe, P. (2010, diciembre). *Holocene Coastal Development in the Southeastern-Eastern Sri Lanka: Paleo-depositional Environments and Paleo-Coastal Hazards* (PhD). Ken State University.
- Reimnitz, E., y Marshall, N. F. (1965). Effects of the Alaska earthquake and tsunami on recent deltaic sediments. *Journal of Geophysical Research*, 70(10), 2363–2376.
- Reinhardt, E. G., Pilarczyk, J., Brown, A. (2012). Probable tsunami origin for a Shell and Sand Sheet from marine ponds on Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 101–117. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9730-y>
- Rhodes, B. P., Kirby, M. E., Jankaew, K., Choowong, M. (2011). Evidence for a mid-Holocene tsunami deposit along the Andaman coast of Thailand preserved in a mangrove environment. *Marine Geology*, 282(3–4), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.03.003>
- Richmond, B. M., Watt, S., Buckley, M., Jaffe, B. E., Gelfenbaum, G., Morton, R. A. (2011). Recent storm and tsunami coarse-clast deposit characteristics, southeast Hawai'i. *Marine Geology*, 283(1–4), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.08.001>
- Rizal, Y., Aswan, Zaim, Y., Santoso, W. D., Rochim, N., Daryono, Anugrath, S. D., Wijayanto, Yatimantoro, T., Hidayanti, Rahayu, R.H., Priyobudi. (2017). Tsunami Evidence in South Coast Java, Case Study: Tsunami Deposit along South Coast of Cilacap. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 71, 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/71/1/012001>
- Rubin, C. M., Horton, B. P., Sieh, K., Pilarczyk, J. E., Daly, P., Ismail, N., Parnell, A. C. (2017). Highly variable recurrence of tsunamis in the 7,400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nature Communications*, 8, 16019. <https://doi.org/10.1038/ncomms16019>
- Ruiz, F., Abad, M., Cáceres, L. M., Rodríguez Vidal, J., Carretero, M. I., Pozo, M., y González-Regalado, M. L. (2010). Ostracods as tsunami tracers in Holocene sequences. *Quaternary Research*, 73(1), 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.08.005>
- Sangode, S. J., y Meshram, D. C. (2013). A comparative study on the style of paleotsunami deposits at two sites on the west coast of India. *Natural Hazards*, 66(2), 463–483. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0542-5>
- Sarkar, D., Mukhopadhyay, A., Hazra, S. (2013). Characteristics of Tsunami and paleo Tsunami deposits in South Andaman Island, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 42(7), 839–848.

- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M., Nasu, H., Okamura, Y., Satake, K., Thomson, K. H., Matsumoto, D., Fuji, Y., Komatsubara, J., Aung, T. T. (2009). Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 114(B1). <https://doi.org/10.1029/2007JB005503>
- Scheffers, A., y Kelletat, D. (2004). Bimodal tsunami deposits—a neglected feature in paleo-tsunami research. *Geographie der Meere und Küsten, Coastline Reports*, 1, 67–75.
- Shaw, C. E., y Benson, L. (2015). Possible Tsunami Deposits on the Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 316, 1306–1316. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00084.1>
- Shepard, F. P., MacDonald, G. A., Cox, D. C. (1950). The tsunami of April 1, 1946 [Hawaii]. *California University Scripts Inst. Oceanography Bulletin*, 5, 391–528.
- Sieh, K., Daly, P., Edwards McKinnon, E., Pilarczyk, J. E., Chiang, H.-W., Horton, B., Rubin, C. M., Shen, C., Ismail, N., Vane, C.H., Feener, R. M. (2015). Penultimate predecessors of the 2004 Indian Ocean tsunami in Aceh, Sumatra: Stratigraphic, archeological, and historical evidence: Penultimate Aceh Tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 308–325. <https://doi.org/10.1002/2014JB011538>
- Sievers, C., Villegas, H. A., Barros, G. (1963). The seismic sea wave of 22 May 1960 along Chilean coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 1125–1190.
- Srinivasalu, S., Thangadurai, N., Switzer, A. D., Ram Mohan, V., Ayyamperumal, T. (2007). Erosion and sedimentation in Kalpakkam (N Tamil Nadu, India) from the 26th December 2004 tsunami. *Marine Geology*, 240(1–4), 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.02.003>
- Sugawara, D., Minoura, K., Imamura, F. (2008). Tsunamis and Tsunami Sedimentology. En *Tsunamiites* (pp. 9–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51552-0.00003-5>
- Sun, L., Zhou, X., Huang, W., Liu, X., Yan, H., Xie, Z., Wu, Z., Zhao, S., Shao, D., Yang, W. (2013). Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea. *Scientific Reports*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/srep01655>
- Switzer, A. D., y Jones, B. G. (2008). Large-scale washover sedimentation in a freshwater lagoon from the southeast Australian coast: sea-level change, tsunami or exceptionally large storm? *The Holocene*, 18(5), 787–803. <https://doi.org/10.1177/0959683608089214>
- Switzer, A. D., Yu, F., Gouramanis, C., Soria, J. L. A., Pham, D. T. (2014). Integrating different records to assess coastal hazards at multi-century timescales. *Journal of Coastal Research*, 70, 723–729. <https://doi.org/10.2112/SI70-122.1>
- Szczuciński, W., Chaimanee, N., Niedzielski, P., Rachlewicz, G., Saisuttichai, D., Tepsuwan, T., Lorenc, S., Siepak, J. (2006). Environmental and Geological Impacts of the 26 December 2004 Tsunami in Coastal Zone of Thailand—Overview of Short and Long-Term Effects. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(5).

- Szczuciński, Witold. (2012). The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand. *Natural Hazards*, 60(1), 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>
- Szczuciński, Witold, Niedzielski, P., Kozak, L., Frankowski, M., Zioła, A., Lorenc, S. (2007). Effects of rainy season on mobilization of contaminants from tsunami deposits left in a coastal zone of Thailand by the 26 December 2004 tsunami. *Environmental Geology*, 53(2), 253–264. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0639-4>
- Szczuciński, Witold, Pawłowska, J., Lejzerowicz, F., Nishimura, Y., Kokociński, M., Majewski, W., Nakamura, Y., Pawłowski, J. (2016). Ancient sedimentary DNA reveals past tsunami deposits. *Marine Geology*, 381, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.08.006>
- Tuttle, Maritia P., Alam, E., Atwater, B. F., Fernando, S., Jittanoon, V., Kongko, W., ...Yulianto, E. (2007). Searching for Pre-2004 Tsunami Deposits in Thailand. En *Eos Transaction* (Vol. 88, p. Abstract T43B-04). AGU.
- Tuttle, Martitia P., Ruffman, A., Anderson, J. G., Jeter, H. (2004). Distinguishing Tsunami from Storm Deposits in Eastern North America: The 1929 Grand Banks Tsunami versus the 1991 Halloween Storm. *Seismological Research Letters*, 75(1), 117–131.
- Van Bergen, T. J., Mulder, T., Kellogg, R. M. (1976). Letter: Hydride mobility in pyridinium salt-dihydropyridine mixtures. A biomimetic pyridine nucleotide transhydrogenation. *Journal of the American Chemical Society*, 98(7), 1960–1962.
- van den Bergh, G. D., Boer, W., de Haas, H., van Weering, T. C. E., van Wijhe, R. (2003). Shallow marine tsunami deposits in Teluk Banten (NW Java, Indonesia), generated by the 1883 Krakatau eruption. *Marine Geology*, 197(1–4), 13–34. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00088-4)
- Vijaya Lakshmi, C. S., Srinivasan, P., Murthy, S. G., Trivedi, D., Nair, R. R. (2010). Granularity and textural analysis as a proxy for extreme wave events in southeast coast of India. *Journal of earth system science*, 119(3), 297–305.
- Waller, R. M., y Stanley, W. K. (1966). *The Alaska Earthquake, March 27, 1964: Effects on Communities - Homer*. U.S. Geological Survey.
- Wassmer, P. C., Gomez, C. A., Iskandarsyah, T. Y. W. M., Lavigne, F., Sartohadi, J. (2015). Contribution of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) to reconstruct flooding characteristics of a 4220 BP tsunami from a thick unconsolidated structureless deposit (Banda Aceh, Sumatra). *Frontiers in Earth Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00040>
- Weischet, W. (1963). Further observations of geologic and geomorphic changes resulting from the catastrophic earthquake of May 1960, in Chile. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 1237–1258.
- Weiss, M. P. (1979). A Saline Lagoon on Cayo Sal, Western Venezuela. *Atoll Research Bulletin*, 232, 34.

- Williams, S., Prasetya, G., Chagué-Goff, C., Goff, J., Cheung, K. F., Davies, T., Wilson, T. (2011). Characterising diagnostic proxies for identifying palaeotsunamis in a tropical climatic regime, Samoan Islands. En *OCEANS 2011* (pp. 1-10). IEEE. Recuperado a partir de <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6107137/>
- Wright, C., y Mella, A. (1963). Modifications to the soil pattern of south-central Chile resulting from seismic and associated phenomena during the period May to August 1960. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 1367-1402.
- Yawsangratt, S., Szczucinski, W., Chaimanee, N., Jagodzinski, R., Lorenc, S., Chatprasert, S., Saisuttichai, D., Tepsuwan, T. (2009). Depositional effects of 2004 tsunami and hypothetical paleotsunami near Thap Lamu navy base in Phang Nga Province, Thailand. *Polish Journal of Environmental Studies*, 18(1), 17-23.
- Yawsangratt, Supawit, Szczuciński, W., Chaimanee, N., Chatprasert, S., Majewski, W., Lorenc, S. (2012). Evidence of probable paleotsunami deposits on Kho Khao Island, Phang Nga Province, Thailand. *Natural Hazards*, 63(1), 151-163. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9729-4>
- Yu, N.-T., Yen, J.-Y., Chen, W.-S., Yen, I.-C., Liu, J.-H. (2016). Geological records of western Pacific tsunamis in northern Taiwan: AD 1867 and earlier event deposits. *Marine Geology*, 372, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.11.010>
- Yudhicara, Y.Z., Rizal, Y., Triyono, R., Setiyono, U., Hartanto, D. (2013). Characteristics of Paleotsunami Sediments, A Case Study in Cilacap and Pangandaran Coastal Areas, Jawa, Indonesia Ciri-ciri Sedimen Paleotsunami, Studi Kasus di Wilayah Pantai Cilacap dan Pangandaran, Jawa, Indonesia. *Indonesian Journal of Geology*, 8(4), 163-175.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los grandes tsunamis que arrasaron las costas de Asia y Japón, nos han obligado a voltear hacia nuestro territorio y preguntarnos ¿qué tan seguido y de qué magnitud han sido los tsunamis en las costas del occidente mexicano? Para lo cual se recurrió tanto a la búsqueda en el registro histórico como en el registro geológico. A pesar de que México cuenta con catálogos que enlistan los sismos y tsunamis ocurridos en su historia, los resultados que aquí se presentan demuestran que: **1.** Es posible localizar nuevas fuentes documentales originales que permiten completar la lista, precisar las fechas así como aportar descripciones de los tsunamis, y sus efectos, ocurridos en el pasado. Este tipo de información constituye un proxy más en el estudio de aquellos tsunamis producidos por sismos locales y que han llegado a las costas de Jalisco-Colima que, por sus complejas características tectónicas, conforma una zona tsunamigénica que constituye una amenaza para la creciente población asentada en sus costas. **2.** Otra forma de contestar la pregunta planteada fue la búsqueda de evidencia sedimentaria, en forma de depósitos; los resultados aquí presentados se refieren a un geoarchivo localizado en un ambiente lagunar con características adecuadas para la preservación de evidencia sedimentaria. La identificación de los depósitos de tsunami fue posible a partir de la aplicación de una serie de proxies que permitieron reconocer anomalías sedimentarias y bioestratigráficas y relacionarlas con eventos sísmicos y/o tsunamigénicos del pasado. **3.** Finalmente, la propuesta de una agenda de investigación para el estudio de paleodepósitos de tsunami en zonas tropicales húmedas, fue resultado de la revisión de la literatura producida a nivel global acompañada por un ejercicio de reflexión, a la luz de la experiencia adquirida.

La sismología histórica se ha desarrollado durante los últimos 30 años y se basa en las observaciones realizadas por los seres humanos y preservadas en documentos históricos. Es a través de la lectura de estos documentos que se descifran los efectos ocasionados por sismos pasados aplicando un método basado en evidencias. Desde el punto de vista epistemológico incluso se le define como semiología de los sismos, ya que se reconstruyen los eventos a partir de las evidencias –signos-dejadas (y reportadas por testigos directos o secundarios), en torno a las cuales se plantean las preguntas y se descifran con ayuda de la hermenéutica y el análisis filológico de los textos considerando el contexto económico y social de los sismos (Guidoboni y Ebel, 2009).

El análisis crítico de los catálogos históricos de sismos y tsunamis en México, apoyado en la verificación y búsqueda en fuentes originales localizadas en archivos y repositorios digitales

históricos, nos permite afirmar que el segmento de la zona de subducción conformada por las placas Rivera– Norteamérica, localizada frente a las costas de Jalisco y Colima, ha producido por lo menos 21 tsunamis desde 1816, lo que le confiere un alto potencial tsunamigénico y por tanto el peligro de tsunami también es alto en esta región . El catálogo histórico inicia con la descripción del sismo del 27 de mayo de 1563 que destruyó el caserío y almacenes del Puerto de La Navidad, a continuación se hace el recuento de los eventos ocurridos a lo largo del siglo XIX, durante todo el siglo XX y la primera década del siglo XXI en donde se incluyen los tsunamis de 1816, 1818, 1900, 1932 y 1995. A partir de las evidencias documentales se reconoce al tsunami de Tomatlán, ocurrido el 3 de junio de 1932, como el más grande; y al tsunami de Cuyutlán del 22 de junio de 1932 como el más letal.

El trabajo realizado permitió localizar documentos que aportaron detalles valiosos para la identificación de los fenómenos y su inclusión en el catálogo, sin embargo, la estimación de intensidades macrosísmicas y la construcción de mapas de isosistas requiere descripciones detalladas y completas todavía no disponibles. A partir de nuestros hallazgos es posible afirmar que la búsqueda en los catálogos tiene que ser un trabajo cotidiano que poco a poco consolidará el conocimiento de los efectos de los sismos y tsunamis históricos y contribuirá con una mejor caracterización y estimación del riesgo. En el área de estudio motivo de esta investigación, en donde históricamente la población ha sido escasa, dispersa y alejada de la línea de costa las descripciones encontradas son limitadas y dispersas en el tiempo. Sin embargo, la certeza de que algunos de los sismos históricos catalogados produjeron un tsunami coadyuva a mejorar el conocimiento de la actividad sísmica en esta sección de la Zona de Subducción Mexicana, caracterizada por su complejidad tectónica.

El análisis de la información histórica e instrumental de los sismos ocurridos en la costa Jalisco-Colima por Nishenko y Singh (1987), proponen un período de recurrencia de 77 a 126 años; sin embargo, este análisis sólo incluyó sismos ocurridos a partir de 1806, por lo que resulta limitado. Nuestro estudio proporciona datos que se extienden hasta el año de 1567. En este sentido, el conocimiento aportado por la paleosismología resulta clave para decodificar las evidencias sedimentarias producidas por sismos y tsunamis en el pasado. Los resultados presentados para el sitio Las Salinas (Careyes, Jalisco) muestran por primera vez evidencias sedimentarias producidas por sismos y tsunamis en esta sección de la costa, de las cuales las producidas por el sismo $M=8.2$ del 3 de junio de 1932, parecen ser las más significativas. También se reconocieron las señales dejadas por los efectos cosísmicos producidos por los sismos de 1932, 1900 y 1563. El sitio trabajado se localiza en un cuerpo de agua costero con un ambiente tropical. Su localización, como otros sitios en ambiente tropical, le confiere condiciones de temperatura, precipitación y exposición a huracanes que complican el proceso de depósito, preservación e identificación de capas anómalas

en el registro sedimentario (Atwater *et al.*, 2017; Brill *et al.*, 2011; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012; Rhodes *et al.*, 2011). Sin embargo, la geomorfología del sitio forma una protección natural que evita la entrada de marejadas producidas por huracanes y otros fenómenos meteorológicos. El estudio se hizo mediante una aproximación multi-proxy que incluyó una detallada descripción estratigráfica, el análisis granulométrico y bioestratigráfico, a partir de la identificación de foraminíferos, ostrácodos y diatomeas, complementado con el análisis de susceptibilidad magnética y anisotropía de la susceptibilidad magnética previamente estudiadas (Černý *et al.*, 2016) que permitieron identificar los cambios estratigráficos y adjudicar las capas anómalas como producidas por tsunamis. Con ayuda de la información histórica previamente trabajada y apoyándonos en métodos arqueomagnéticos y de datación fue posible identificar los posibles eventos sísmicos generadores. A pesar de que la preservación de microfósiles carbonatados es difícil en ambientes tropicales (Ramírez-Herrera *et al.*, 2007; Ramírez-Herrera *et al.*, 2014), el estudio presentado ofreció una oportunidad para incluir este tipo de proxy que contribuyó con el esclarecimiento de los datos. Aunque las evidencias documentales y sedimentarias recabadas hasta el momento apuntan a que el sismo y tsunami del 3 de junio de 1932 es el más grande ocurrido en tiempos históricos, esta afirmación

Un problema, en esta y en otras zonas, se relaciona con la discriminación de los depósitos de tormenta y otros eventos altamente energéticos, de aquellos producidos por los tsunamis. Las estrategias empleadas aquí para lograrlo se han avocado a 1) buscar los depósitos de tsunami a distancias de la línea de costa fuera del alcance de las tormentas; y/o a 2) identificar características estratigráficas, granulométricas o geoquímicas que permitan identificar la turbulencia, y el proceso de sedimentación. Hasta el momento la aproximación multi-proxy, en la mayoría de los casos ha dado resultados satisfactorios y también ha sido aplicada al estudio de depósitos dejados por grandes tormentas y huracanes.

Fue a partir de la experiencia adquirida en campo y a la luz de la metodología enunciada y aplicada para los estudios de tsunami en el mundo, que sugirieron que los ambientes tropicales presentan condiciones ambientales que dificultan el proceso de formación y preservación de las evidencias sedimentarias resguardadas en el archivo geológico. La revisión de los trabajos publicados referentes a paleodepósitos de tsunami en el trópico húmedo demuestra que el ambiente sí representa un factor que complica tanto el proceso de sedimentación como la preservación del depósito. A manera de hipótesis se menciona al espacio de alojamiento como un elemento que puede limitar la capacidad de un sitio para albergar una registro sedimentario grande (Dura *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2015); la dimensión temporal del registro sedimentario también puede relacionarse con la historia sísmica y la magnitud de los sismos ocurridos en cada lugar; así como

con la disponibilidad de sedimento a ser transportado. Un hecho innegable es que la presencia de manglares merma la capacidad de penetración del tsunami tierra adentro (Rhodes *et al.*, 2011); las condiciones ambientales con temperaturas y precipitaciones extremas perturban la estructura y composición de los depósitos (Jankaew *et al.*, 2008; Ramírez-Herrera *et al.*, 2016; Ramírez-Herrera *et al.*, 2012; Szczuciński, 2012; Szczuciński *et al.*, 2007; Wassmer *et al.*, 2015; Yawsangratt *et al.*, 2012) y los procesos de bioturbación también deterioran las capas de sedimentos (Atwater, 2007; Atwater *et al.*, 2012; Fujino *et al.*, 2009; Ramírez-Herrera *et al.*, 2014; Rhodes *et al.*, 2011; Tuttle *et al.*, 2007). Afortunadamente, los investigadores han superado estos retos con base en trabajo multi y transdisciplinar, diseñando y aplicando aproximaciones multi-proxy que involucran otros campos del conocimiento.

El caso particular de la costa occidental del Pacífico Mexicano plantea retos en los siguientes términos:

- Mejorar el conocimiento del contexto sismo-tectónico que hasta ahora se tiene, para lo cual la información paleosismológica, histórica e incluso arqueológica resultará de gran utilidad.
- Identificar las fuentes de datos que puedan contribuir a rellenar el vacío de los siglos XVII y XVIII
- Revisar los estudios hasta ahora realizados referentes a los sismos tsunamigénicos catalogados en el presente trabajo en un intento por mejorar el nivel de conocimiento particular de eventos complejos (e.g. los sismos de junio de 1932, los ocurridos en 1900, el sismo de 1816 y 1818).
- Construir mapas de intensidad macrosísmica para los sismos del siglo XIX y principios del XX.
- Continuar con el trabajo de identificación de evidencias sedimentarias en la costa de Jalisco-Colima, con el objetivo de ampliar la ventana temporal más allá de los registros históricos.
- Iniciar los trabajos de identificación de evidencias arqueológicas que, en combinación con otros proxies, contribuyan con la construcción de una cronología sólida y permita estimar magnitudes, frecuencia y tiempo de recurrencia de grandes sismos.

A manera de conclusión

Los resultados de esta investigación representan una contribución original en los siguientes campos:

1. *Sismología histórica*

- El análisis crítico de los catálogos históricos soportado en fuentes originales condujo a la identificación de eventos no catalogados y a la confirmación de otros hasta el momento no incluidos.
- Desde el siglo XIX al menos han ocurrido 21 tsunamis diferentes magnitudes en las costas de Jalisco-Colima
- Los datos históricos permiten identificar tsunamis producidos por eventos sísmicos pequeños y medianos, posiblemente relacionados con deslizamientos submarinos
- El tsunami de Tomatlán, ocurrido el 3 de junio de 1932, es el de mayor magnitud registrado instrumental e históricamente en esta sección de la costa

2. *Geología de tsunamis*

- Las evidencias sedimentarias resguardadas en el registro geológico son herramientas útiles para la decodificación del comportamiento sísmico de la región
- Aunque el ambiente tropical húmedo puede complicar el depósito y preservación de las evidencias sedimentarias producidas por grandes sismos y tsunamis, la selección cuidadosa de los sitios y una aproximación multi-proxy ha demostrado ser útil para sortear estas condiciones.
- Es probable que las condiciones salinas y una geomorfología que produce espacios protegidos hayan contribuido con la preservación de microfósiles, útiles para la caracterización de eventos sísmicos y tsunamis ocurridos en el pasado.

3. *Estudios de paleodepósitos de tsunami en ambientes tropicales húmedos*

- Aunque la mayor parte de los estudios de paleodepósitos de tsunami hasta ahora realizados se concentran en áreas con uno o más grandes eventos previos, el trabajo en áreas tsunamigénicas vastas y sin grandes antecedentes, como México y Centro América, podría implicar un mayor esfuerzo por localizar tales depósitos.
- La literatura revisada da cuenta de las estrategias empleadas por equipos de investigadores multidisciplinarios que identificaron ambientes de depósito diferentes a los tradicionales (como swales y cuevas) y que gracias a la combinación creativa de múltiples proxies han podido identificar y datar eventos a partir de sus huellas sedimentarias en el registro geológico.

El panorama que se presenta a futuro se muestra alentador, ya que la preocupación tanto de la comunidad científica como de los organismos mundiales y nacionales, y la población en general, en torno a la peligrosidad de los tsunamis ha extendido la realización de estudios

a otras partes del mundo logrando que el tema permanezca en las agendas políticas y de investigación.

Referencias

- Atwater, B. F. (2007). Hunting for Ancient Tsunamis in the Tropics. En *Eos Transaction* (Vol. 83, pp. T24A-01). San Francisco, CA: AGU.
- Atwater, Brian F., ten Brink, U. S., Buckley, M., Halley, R. S., Jaffe, B. E., López-Venegas, A. M., Reinhardt, E.G., Tuttle, M.P., Watt, S., Wei, Y. (2012). Geomorphic and stratigraphic evidence for an unusual tsunami or storm a few centuries ago at Anegada, British Virgin Islands. *Natural Hazards*, 63(1), 51–84. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9622-6>
- Atwater, Brian F., ten Brink, U. S., Cescon, A. L., Feuillet, N., Fuentes, Z., Halley, R. B., Nuñez, C., Reinhardt, E.G., Roger, J.H., Sawai, Y., Spiske, M., Tuttle, M.P., Wei, Y., Weil-Accardo, J. (2017). Extreme waves in the British Virgin Islands during the last centuries before 1500 CE. *Geosphere*, 13(2), 301–368. <https://doi.org/10.1130/GES01356.1>
- Brill, D., Brückner, H., Jankaew, K., Kelletat, D., Scheffers, A., Scheffers, S. (2011). Potential predecessors of the 2004 Indian Ocean Tsunami — Sedimentary evidence of extreme wave events at Ban Bang Sak, SW Thailand. *Sedimentary Geology*, 239(3–4), 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.06.008>
- Černý, J., Ramírez-Herrera, M.-T., Bógalo, M.-F., Goguitchaichvili, A., Castillo-Aja, R., Morales, J., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A. C. (2016). Magnetic record of extreme marine inundation events at Las Salinas site, Jalisco, Mexican Pacific coast. *International Geology Review*, 58(3), 342–357. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1075230>
- Dura, T., Engelhart, S. E., Vacchi, M., Horton, B. P., Kopp, R. E., Peltier, W. R., Bradley, S. (2016). The Role of Holocene Relative Sea-Level Change in Preserving Records of Subduction Zone Earthquakes. *Current Climate Change Reports*, 2(3), 86–100. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0041-y>
- Fujino, S., Naruse, H., Matsumoto, D., Jarupongsakul, T., Sphawajruksakul, A., Sakakura, N. (2009). Stratigraphic evidence for pre-2004 tsunamis in southwestern Thailand. *Marine Geology*, 262(1–4), 25–28. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.02.011>
- Guidoboni, E., y Ebel, J. E. (2009). *Earthquakes and tsunamis in the past: a guide to techniques in historical seismology*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press.
- Jankaew, K., Atwater, B. F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, M. E., Prendergast, A. (2008). Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455(7217), 1228–1231. <https://doi.org/10.1038/nature07373>
- Khan, N. S., Ashe, E., Shaw, T. A., Vacchi, M., Walker, J., Peltier, W. R., Kopp, R.E., Horton, B. P. (2015). Holocene Relative Sea-Level Changes from Near-, Intermediate-, and Far-Field Locations. *Current Climate Change Reports*, 1(4), 247–262. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0029-z>

- Nishenko, S. P., y Singh, S. K. (1987). Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), 2095–2114.
- Ramírez-Herrera, M. T., Bógalo, M. F., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Corona, N., Machain, M. L., Carranza Edwards, A., Sosa, S. (2016). Historic and ancient tsunamis uncovered on the Jalisco-Colima Pacific coast, the Mexican subduction zone. *Geomorphology*, 259, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.011>
- Ramirez-Herrera, M. T., Cundy, A., Kostoglodov, V., Carranza-Edwards, A., Morales, E., Metcalfe, S. (2007). Sedimentary record of late-Holocene relative sea-level change and tectonic deformation from the Guerrero Seismic Gap, Mexican Pacific Coast. *The Holocene*, 17(8), 1211–1220. <https://doi.org/10.1177/0959683607085127>
- Ramírez-Herrera, M.-T., Corona, N., Lagos, M., Černý, J., Goguitchaichvili, A., Goff, J., Chagué-Goff, C., Machain, M.L., Zawadzki, G. J., Carranza-Eduards, A., Lozano, S., Blecher, L. (2014). Unearthing earthquakes and their tsunamis using multiple proxies: the 22 June 1932 event and a probable fourteenth-century predecessor on the Pacific coast of Mexico. *International Geology Review*, 56(13), 1584–1601. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951977>
- Ramírez-Herrera, M.-T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M. L., Caballero, M., Goguitchichvili, Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernández, A. C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I., Quintana, P. (2012). Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology*, 139–140(0), 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.002>
- Rhodes, B. P., Kirby, M. E., Jankaew, K., Choowong, M. (2011). Evidence for a mid-Holocene tsunami deposit along the Andaman coast of Thailand preserved in a mangrove environment. *Marine Geology*, 282(3–4), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.03.003>
- Szczuciński, W. (2012). The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand. *Natural Hazards*, 60(1), 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9956-8>
- Szczuciński, W., Niedzielski, P., Kozak, L., Frankowski, M., Ziola, A., Lorenc, S. (2007). Effects of rainy season on mobilization of contaminants from tsunami deposits left in a coastal zone of Thailand by the 26 December 2004 tsunami. *Environmental Geology*, 53(2), 253–264. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0639-4>
- Tuttle, M. P., Alam, E., Atwater, B. F., Fernando, S., Jittanoon, V., Kongko, W., ... Yulianto, E. (2007). Searching for Pre-2004 Tsunami Deposits in Thailand. En *Eos Transaction* (Vol. 88, p. Abstract T43B-04). AGU.
- Wassmer, P. C., Gomez, C. A., Iskandarsyah, T. Y. W. M., Lavigne, F., Sartohadi, J. (2015). Contribution of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) to reconstruct flooding characteristics of a 4220 BP tsunami from a thick unconsolidated structureless deposit (Banda Aceh, Sumatra). *Frontiers in Earth Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00040>

Yawsangratt, S., Szczuciński, W., Chaimanee, N., Chatprasert, S., Majewski, W., Lorenc, S. (2012). Evidence of probable paleotsunami deposits on Kho Khao Island, Phang Nga Province, Thailand. *Natural Hazards*, 63(1), 151–163. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9729-4>

Anexo 1

27 de mayo, 1563 (M=?)

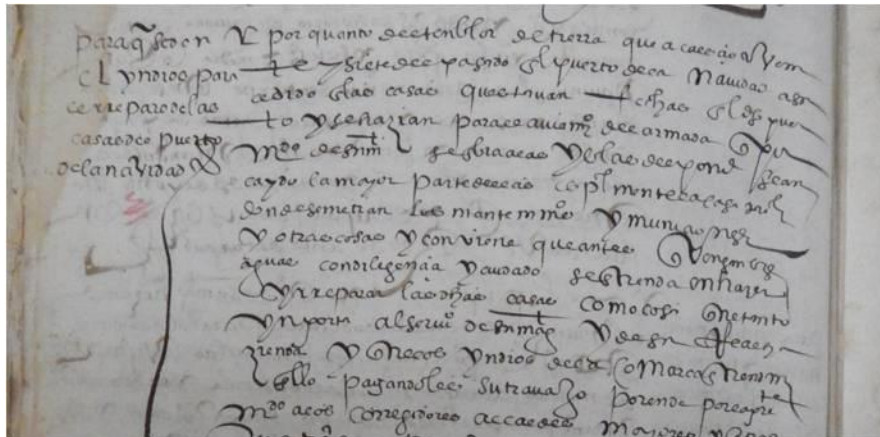


Figura A1.1. Fragmento AGN, “Para que se den los indios para el reparo de las casas del Puerto de la Navidad”. Mandamiento 25 de junio de 1563, Mercedes 84, ff. 129v y 130.)

Paleografía

“Por cuanto el temblor de tierra que acaeció a 27 del pasado en el puerto de la navidad ha sucedido que las casas que estaban hechas en dicho puerto y se hacían para el aviamiento de la armada que [por]mandato de Su Majestad servía a las Islas del Poniente se han caído la mayor parte de ellas especialmente la casa donde se metían los mantenimientos y municiones y todas las cosas y conviene que antes de que vengan [las]aguas con diligencia y cuidado se entiendan en hacer y reparar dichas casas. Como cosa que tanto importa al servicio de Su Majestad y de su Real Hacienda.... Fechado en México XXV de junio del [15]63 años...”

AGN, “Para que se den los indios para el reparo de las casas del Puerto de la Navidad”. Mandamiento 25 de junio de 1563, Mercedes 84, ff. 129v y 130.)

Paleografía:

“El primero y más terrible se experimentó a las cinco poco más o menos de la tarde de este día veinticinco y como a la media hora de este se siguió otro de menor movimiento y duración, y pasadas dos horas hubo otro tan recio como el segundo y casi tan largo como el primero y en la misma noche se sintieron otros dos o tres estremecimientos de la tierra como hasta las cuatro de la mañana, pero los tres primeros fueron absolutamente sensibles aunque mucho era en la persuasión de que fue continuado con movimiento de un lento vaivén y que a ciertos intervalos aumentaba el movimiento o formaba otro como el que se hace en las olas. El primero fue más largo y en su principio fue verdadero temblor muy sensible y poco apoco fue aumentando el movimiento de modo que al fin fue más veloz y muy semejante a los violentos [] de un caballo desbocado de suerte que el movimiento que sentiría el jinete en semejante bruto experimentamos todos en la madre tierra. Nadie por el estupor que preocupaba nuestras atenciones podrá son realidad asegurar el tiempo de su duración pero se cree que a lo menos llegaría a 3 minutos en la fuerza y rigor de sus movimiento, los otros no fueron tan largos ni tan recios y casi todos muy encendido desde las cinco de la tarde hasta las seis o siete de la mañana y desde dicho día hasta el de hoy 16 de mayo a las cuatro de la tarde en que se estaba haciendo esta relación con el que acació a esta misma hora se cuentan veinte y cinco, entre ellos han sido los más sensibles además de los primeros [dichos] el día veinticinco de abril y el día tres de mayo y aun otras personas cuentan mucho mayor número de temblores pero parece que estos solo se han fraguado en sus mentes desvanecidas cabezas...

En el tiempo del temblor se sintió mucho ruido subterráneo y en los terrenos arenosos y de tierra falsa salía el aire comprimido y violento haciendo ruido, como el que hace un [taco] empujado de otro, en los cañoncitos de sanco con que suelen jugar los muchachos, levantando de este modo las polvaredas de la Tierra, también en varias partes como Cuaguayana y La Joya, lugar muy inmediato al volcán, se hicieron algunas aberturas en la tierra y exprimieron agua y se volvieron a cerrar...

En Colima dicen que cayeron por los suelos doscientas, muchas bardas y más o menos todas las casas quedaron averiadas, y las que más padecieron fueron las que hay de la Plaza para el norte. En el pueblo de Coquimatlán se derribó enteramente la Capilla Hospital que era nueva de adobe, teja y buenas maderas y lastimó ocho personas que estaban dentro y no acertaron a salir. En Zinacantepec, barrio de Coquimatlán, jurisdicción de Almoloyan, una pared de una casa a cuya sombra estaban respaldados cuatro muchachitos indios con su madre que tejía una manta cayó y mató las criaturas y solamente lastimó a la madre pero así está como los lastimados de la Capilla y...

Al pasar para colima vi los paredones que detuvieron el arroyo de Atenquique y algo el río de Tuxpan; pero todo esto no era bastante para que en Coaguayana se cortase el río, porque son muchos los arroyos que enseguida entran en dicho río, y estoy informado de un clérigo que al tiempo mismo del temblor estaba bañándose cerca de dicha población, que no hubo más novedad que el escapársele la arena de los pies, cubrirse y descubrirse de agua, y derramarse ésta por los lados con el balance que hacía la tierra, y además hacerse aberturas, algunas como zanjas saliendo de ellas al cerrarse con el balance la porción de agua que en ellas se introducía al abrirse. Estas fueron algo más grandes en Coaguayana, que en Tamazula y la parte de Tuxpan, porque como el río es ya muy grande y contenido por la mar en su boca hace más húmeda aquella tierra, es más fácil cortarse por su peso, lo mismo que sucedió en cinco leguas y media que anduve a orillas de la mar, donde en la arena hay como zanjas porque al tiempo del temblor se inclinaba para el agua que era la parte débil, hallándose éstas en más abundancia y más conocidas en la otra boca del río que llaman de San Pedro, cuya entrada en la mar se mudó como a mil varas de distancia, cosa que sucede a cada paso aún sin terremotos por ser todo un puro arenal, y lo mismo que ví el día de la Ascensión que comí al otro lado dicho río...

Couaguayana es una población donde apenas había cuatro casas de teja y su mala iglesia y éstas se destrozaron, pues lo demás eran jacales. En las salinas cayeron varios pozos o sus horcones y en el Real de San Pantaleón se cayó la capilla que era de teja. Esta se hizo pedazos y se dice la misa en una enramada. Estas salinas desde Pascuales hasta lo de Vega más de cuatro mil almas precisamente en esta temporada en que sacan sal, y en lo de Vega tienen también misa el día que hay quien la diga en un mal jacal. En Tecomán, su Iglesia de jacal padeció en las paredes de los lados, que son de adobe y con un mal cimiento de piedra y lodo; pero como está sostenida de horcones quedó tan servible como antes, y no hubo avería ni aún en las campanas que colgadas en unos palos con cualmecate, cayeron al suelo sin que se haya caído otra cosa más que un viejísimo jacal desamparado, y cuyos palos horcones estaban podridos.

En Ixtlahuacán, la iglesia vieja y su hospital padeció algo en las paredes por que en lo demás es jacal. La nueva que es de adobe, paredes gruesas pero cimiento de piedritas y tierra, y que estaba enmaderada y de madera de muy buena calidad, padeció en sus cuatro esquinas, y además están las paredes muy inclinadas de sur a norte de modo que quedó perdida. La casa cural quedó también destrozada aun siendo jacal cercado de adobe, pero está hecho otro que sule.

En Colima y Almoloyan son poco más o menos doscientas y cincuenta casas casillas las caídas, como hasta seiscientas las muy destrozadas, y casi las más algo lastimadas. La iglesia como es de madera sólo padeció en las paredes que cubren los horcones de los costados, pues no se conoce que estén desplomados los pilares de la nave del medio. Se están haciendo los oficios en la iglesia de Jesús que es también de madera, y que apenas padeció alguna ligera abertura en sus paredes. La iglesia de Almoloyan padeció lo mismo, y está servible. Las torres separadas de las iglesias, la de esta se maltrató muy mucho, la de la Merced está tirada, la de la Parroquia está maltratada, y la de Jesús apenas tiene lesión.

En Tonila padeció algo la iglesia de adobe y teja, y la casa cural; pero la una y la otra sirven. En las haciendas parece que no hay cosa especial y en la de San Marcos, la más cercana al volcán, padeció bastante la capilla de la hacienda vieja y algo la casa; pero la nueva, cuyas calderas o fábrica para ellas es de bóveda apenas tuvo lesión, y lo mismo sucedió a las demás fábricas, y al Mesón, que ví por mí mismo.

En Tuxpan, la iglesia y la casa cural está inservible, el hospital se maltrató bastante, y casi todas las fábricas de adobe y teja padecieron bastante, lo ví también por mí mismo.

En Zapotiltic, estaban diciendo misa cuando pasé, ví a la iglesia por de fuera con algunas aberturitas, y derecha, me ha asegurado el Ministro Ochoa que está muy maltratada y demolida. Las casas tienen sus cuarteaduras.

En Tamazula, sólo se lo que dijo el cura, que la iglesia estaba muy mala, que se habían caído algunos corredores y tapias, y que varias casas tenían algunas aberturas”.

Fuente: AHAG (1806). Anónimo (1806) Relación sobre el temblor acaecido el día veinticinco de marzo de 1806. Gobierno/Secretaría General/Correspondencia 1804-1814. Caja: 14. 3f.

14 de noviembre, 1816. Sismo y Tsunami de San Pantaleón (M=?)

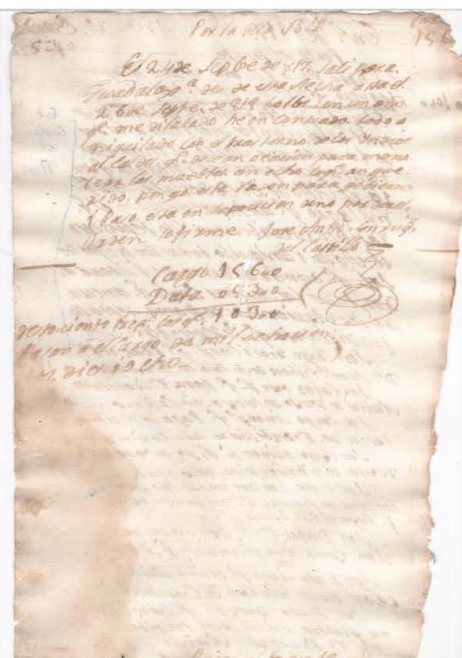
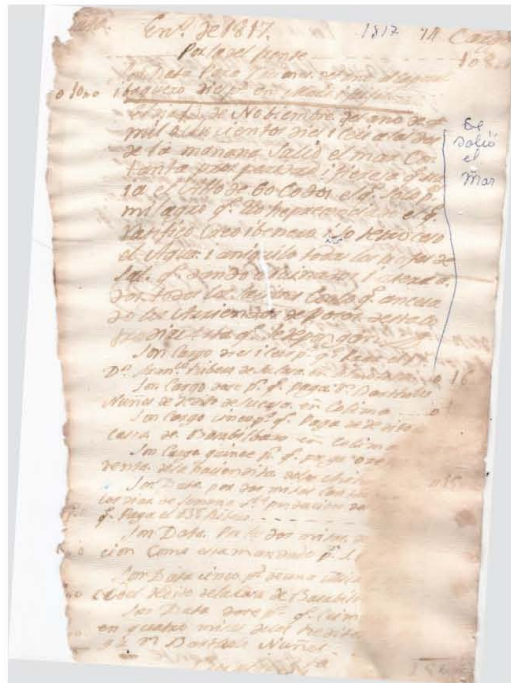
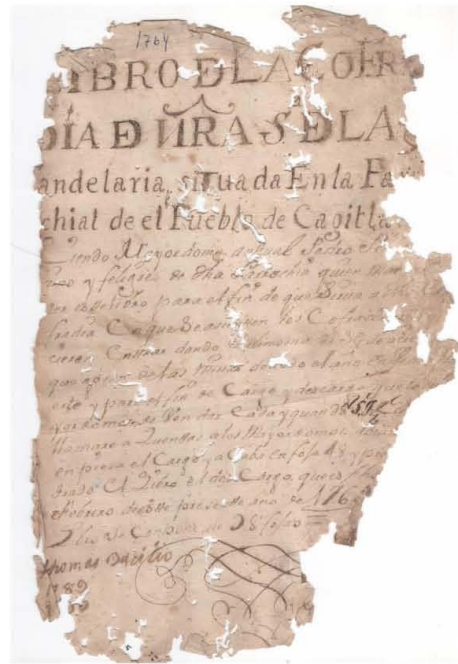


Figura A.1.3. Carátula, portada y facsímiles. Archivo de la Parroquia de Tecomán (1817) Libro de la Cofradía de Nuestra Señora de La Candelaria, Testimonio firmado por el Pbro. José Antonio Enríquez del Castillo, enero 1817.

Paleografía:

"El día 13 de noviembre de 1816, a las dos de la mañana, salió el mar con tanta prosperidad y fiereza que traía el alto de 60 codos; el que solo por milagro que yo he presenciado, que ratifico, creo y venero, hizo retroceso el agua... [La cual] aniquiló todas las trojes de sal, quedando arruinados y arenados todos los salitres; con lo que han cesado los arriendos de los pozos de esta Cofradía, hasta que se reponga"

Archivo de la Parroquia de Tecomán (1817) Libro de la Cofradía de Nuestra Señora de La Candelaria, Testimonio firmado por el Pbro. José Antonio Enríquez del Castillo, enero 1817.

31 de mayo de 1818 (M-8.2)

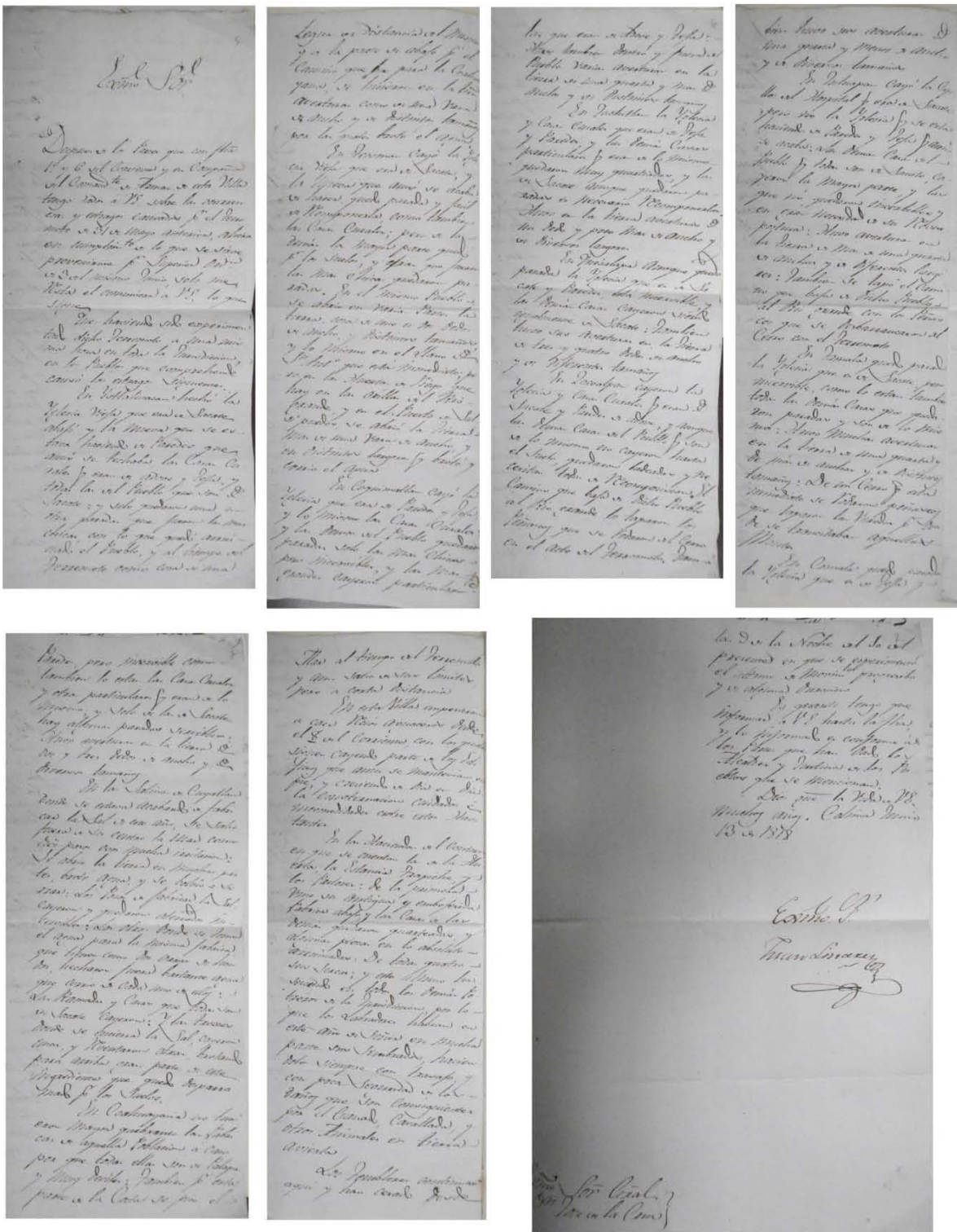


Figura A.1.4. Facsimil. Carta de Juan Lineras a José de la Cruz. AGN (1818). Indiferente Virreinal, 5765/086, Informe de Juan Linares, Colima, 13 June 1818

Paleografía:

"Excelentísimo Sr. Gral José de la Cruz

EXELENÍSIMO SEÑOR:

Después de los partes que con fecha 1º y 6 del corriente y en compañía del Comandante de Armas de esta Villa tengo dados a Vuestra Excelencia sobre la ocurrencia y estragos causados por el terremoto del 31 de junio anterior, ahora en cumplimiento de lo que se sirve prevenirme por Superior Orden del 3 del mismo junio, sólo me resta el comunicar a Vuestra Excelencia lo que sigue.

Me habiendo sido experimentado dicho terremoto a una misma hora en toda la Jurisdicción en los Pueblos que comprende causó los estragos siguientes.

En Ixtlahuacán echó la Iglesia vieja que era de zacate abajo y la nueva que se estaba haciendo de paredes que aun no se techaban las casas Curales que eran de adobe y teja, y todas las del pueblo que son de zacate; y sólo una que otra paradas que fueron las más chiva, con lo que quedó arruinado el pueblo; y al tiempo del terremoto como cosa de una legua en distancia del mismo y a la parte de abajo por el camino que va para la Coahuayana, se hicieron en la tierra aberturas como de una vara de ancho y de distintos tamaños por las cuales brotó el agua.

En Tecomán cayó la Iglesia vieja que era de zacate y la nueva que aún no se acaba de hacer quedó parada y fácil de recomponerla, como también las Casas Curales; pero de lo demás la mayor parte [qual] por los suelos, y otras que fueron las más chicas quedaron paradas. En el mismo pueblo se abrió en varias partes la tierra, cosa de uno o dos dedos de ancho, y distintos tamaños y lo mismo en el Llano de San Antonio que esta inmediato; pero en las Huertas de [D]iego que hay en las orillas del Río Grande, y en el Puerto de Sal si puedes, se abrió la tierra más de una vara de ancho y en distintos lugares que brotó y corrió el agua.

En Coquimatlán cayó la Iglesia que era de paredes y teja, y lo mismo las Casas Curales: y las demás del pueblo quedaron paradas sólo las más chicas pero miserables, y las más grandes cayeron particularmente las que eran de adobe y teja. Hizo también dentro y fuera del pueblo varias aberturas en la tierra de una cuarta y más de ancho y ví distintos tamaños.

En Juchitlán la Iglesia y Casas Curales que eran de teja y paredes y las demás casas particulares que eran de lo mismo quedaron muy cuarteadas, y las de sacate aunque quedaron paradas es necesario recomponerlas. Hubo en la tierra aberturas de un dedo y poco más de ancho y de diversos largos.

En [Q]uisalapa aunque quedó parada la Iglesia que es de zacate y paredes, está inservible y las demás casas cayeron siendo igualmente de zacate: también hubo sus aberturas en la tierra de tres y cuatro dedos de ancho y de diferentes tamaños.

En Zacoalpan cayeron la Iglesia y casas curales que eran de zacate y paredes de adobe; y aunque de lo mismo no cayeron hasta el suelo, quedaron ladeadas y necesitan todas de recomposición. El camino que baja de dicho pueblo al Río Grande lo taparon los peñascos que se rodaron del cerro en el acto del terremoto. También hubo sus aberturas de una cuarta y menos de ancho y de diversos tamaños.

En Juluapan cayó la Capilla del Hospital que era de zacate, pero no la Iglesia que se está haciendo de paredes y teja que aun no se acaba. Las demás casas del pueblo que [están] son de zacate, cayeron la mayor parte, y las que no, quedaron inservibles y en gran necesidad de su recompostura. Hubo aberturas en la tierra de más de una cuarta de anchas

y de diferentes largores. También se tapó el camino que baja de dicho pueblo al Río Grande con los peñascos que se desbarrancaron del cerro con el terremoto.

En Tamala quedó parada la Iglesia que es de zacate pero inservible, como lo están también todas las demás casa que quedaron paradas y son de lo mismo. Hubo muchas aberturas en la tierra de una cuarta y de más de anchas y de distintos tamaños. De un cerro que está inmediato se rodaron peñascos que taparon la vereda por donde se transitaban aquellos montes.

En Comala quedó parada la Iglesia que es de teja y paredes, pero inservible como también lo están las Casas Curales y otros particulares que eran de lo mismo; y sólo de las de zacate hay algunas paradas servibles. Hubo aberturas en la tierra de dos o tres dedos de ancho y de diversos tamaños.

En las Salinas de Cuyutlán donde se estaba acabando de fabricar la sal de este año, se salió fuera de su centro la mar como tres pasos con mucha irritación. Se abrió la tierra en muchas partes, brotó arena y se volvió a cerrar. Los pozos de fabricar la sal cayeron y quedaron aterrados inservibles. Los otros donde se toma el agua para la misma fábrica que tienen como dos varas de hondos echaron fuera bastante agua que corrió de cada uno de ellos. Las ramadas y casas que todas son de zacate cayeron. Las trojes donde se encierra la sal cayeron unas y reventaron otras brotando para arriba, gran parte de este ingrediente que quedó desparramado por los suelos.

En Coahuayana no tuvieron mayor quebrando las fábricas de aquella población a caso porque todas ellas son de palapa y muy débiles. También de esta parte de la costa se pico el mar al tiempo del terremoto y [así /aún] salió de sus límites pero a corta distancia.

En esta Villa empezaron a caer recios aguaceros desde el 8 del corriente, con los cuales siguen cayendo parte de los edificios que antes se mantenían en pie, y creciendo de día en día la consternación causada e incomodidades entre estos habitantes.

En las haciendas del contorno en que se cuentan la de La Huerta, La Estancia, Trapiche y Los Pastores: de la primera vino su antigua y envejecida fábrica abajo y las casas de las demás quedaron cuarteadas y algunas piezas en lo absoluto arruinadas. De todas cuatro sus cercas; y esto último ha sucedido en todos los demás potreros de la Jurisdicción, por lo que los labradores habrán de ceñir en muchas partes sus sembrados, haciéndolo siempre con trabajo y con poca seguridad en los daños que son consiguientes por el ganado, caballada y otros animales en tierra abierta.

Los temblores continuaron aquí y han cesado desde las 9 de la noche del 1° del presente en que se experimentó el último movimiento progresivo y de alguna duración.

Es cuanto tengo que informar a Vuestra Excelencia hasta la fecha y lo informado es conforme a los partes que han dado los Alcaldes y Justicia de los Pueblos que se mencionan.

Dios que la vida de Vuestra Excelencia muchos años. Colima Junio 13 de 1818

Juan Linares"

Paleografía:

A.

“Ministerio de Relaciones Exteriores, Gobernación y Policía. Exmo. Sr. El señor prefecto de Autlán en oficio del 7 del corriente dice a la oficialía de este Gobierno lo que sigue:

“A las cuatro y tres minutos de la tarde de hoy se ha sentido en esta cabecera un temblor de tierra de movimiento ondulatorio, que aunque fue mucho más duradero que los otros que han pasado en esta época, no causó deterioro alguno a causa seguramente de la uniformidad y lentitud de las oscilaciones, cuyas circunstancias han faltado a aquéllos y las mismas que daban a éste un movimiento apacible. Tengo el honor de comunicarlo a V.S. para que se sirva participarlo al Exmo. Sr. gobernador, informando a S.E. que los otros temblores de que he dado aviso a ese superior gobierno, se han sentido también en los demás puntos de este distrito, especialmente en la costa, donde han causado mayor impresión a sus habitantes, porque a ellos ha acompañado un ruido extraordinario del mar como en alteración “

Y tengo la honra de informarle a V.E. para el debido superior reconocimiento del Exmo. Señor Presidente Interino, reiterándole a la vez las seguridades de mi consideración y distinguido aprecio.

Dios y libertad. Guadalajara, abril 15 de 1845.

Antonio Escobedo. J. Agapito Gutiérrez, secretario”.

AGN (1845). Gobernación sin sección/caja 621 (293 sin sección) Expediente 15.

24 de febrero, 1875 (M=6.5)



Figura A.1.6. Facsimil Telegrama de Colima, en El Diario de Jalisco, Tomo IV, Número 72, Jueves 15 de febrero de 1875.

9 de marzo de 1875 (M=7.4)

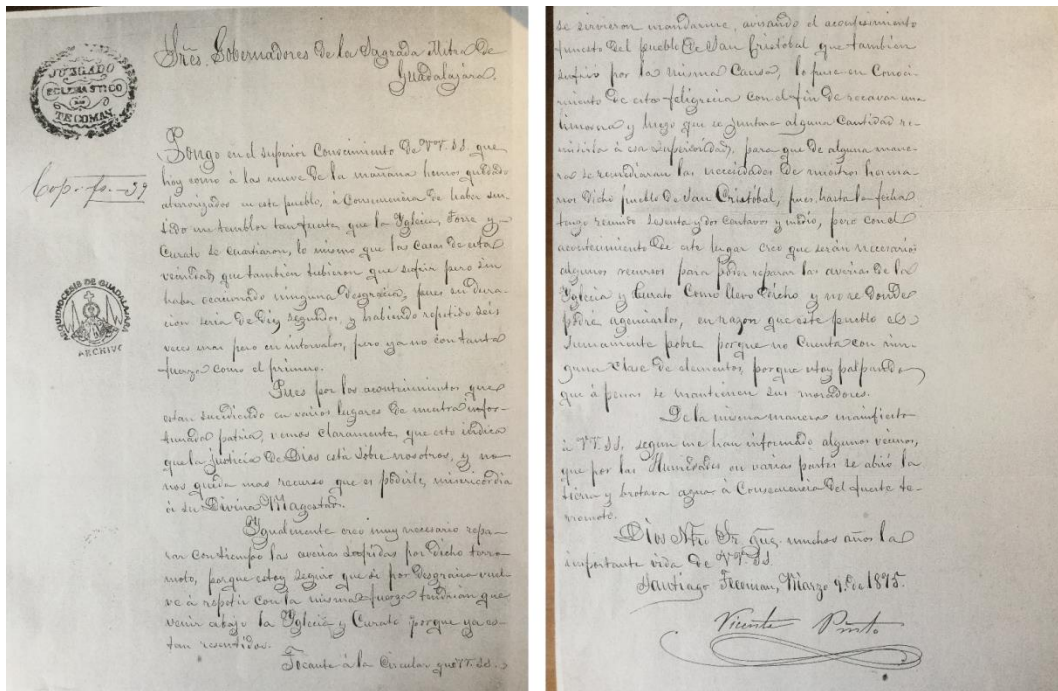


Figura A.1.7. Facsimil Carta de Vicente Pinto referente a los daños ocasionados por el temblor. 9 de marzo, 1875.

Paleografía:

“Sres. Gobernadores de la Sagrada Mitra de Guadalajara.

Pongo en el superior conocimiento de VV. SS. Que hoy como a las nueve de la mañana hemos quedado aterrizados en este pueblo, a consecuencia de haber sentido un temblor tan fuerte que la Iglesia, Torre y Curato se cuartearon, lo mismo que las casas de esta vecindad que también tuvieron que sufrir pero sin haber ocasionado ninguna desgracia; pues su duración sería de diez segundos, y habiendo repetido seis veces más pero en intervalos, pero ya no con tanta fuerza como el primero.

Pues por los acontecimientos que están sucediendo en varios lugares de nuestra infortunada patria, vemos claramente que esto indica que la justicia de Dios está sobre nosotros, y no nos queda más recurso que es pedirle, misericordia a su Divina Majestad.

Igualmente creo muy necesario reparar con tiempo las averías sufridas por dicho terremoto, porque estoy seguro que si por desgracia vuelve a repetir con la misma fuerza tendrían que venir abajo la Iglesia y Curato y porque ya están resentidos.

Tocante a la circular que VV. SS. Se sirvieron mandarme, avisando el acontecimiento funesto del pueblo de San Cristóbal que también sufrió por las ruinas causadas, lo puse en conocimiento de esta feligresía con el fin de recabar una limosna y luego que se juntara alguna cantidad remitirla a esa Superioridad, para que de alguna manera se remediara las necesidades de nuestros hermanos dicho pueblo de San Cristóbal, pues hasta la fecha tengo

reunido sesenta y dos centavos y medio, pero con el acontecimiento de este lugar creo que serán necesarios algunos recursos para poder reparar las averías de la Iglesia y Curato. Como llevo dicho y no sé dónde podré agenciarlos, en razón que este pueblo SS. Sumamente pobre porque no cuenta con ninguna clase de elementos, porque estoy palpando que apenas se mantienen sus moradores.

De la misma manera manifiesto a VV.SS. según me han informado algunos vecinos, que por Las Humedades en varias partes se abrió la tierra y brotaba agua, a consecuencia del fuerte terremoto.

Dios nuestro Señor conserve muchos años conserve la importante vida de VV.SS.

Santiago Tecomán, Marzo 9 de 1875.

Vicente Pinto"

AHAG (1875). Sección Gobierno/Serie Parroquias/Tecomán, caja 1. Carta Vicente Pinto a los Señores Gobernadores de la Sagrada Mitra. Santiago de Tecomán, Marzo 9 de 1875.

20 de enero, 1900 (M=8.1)

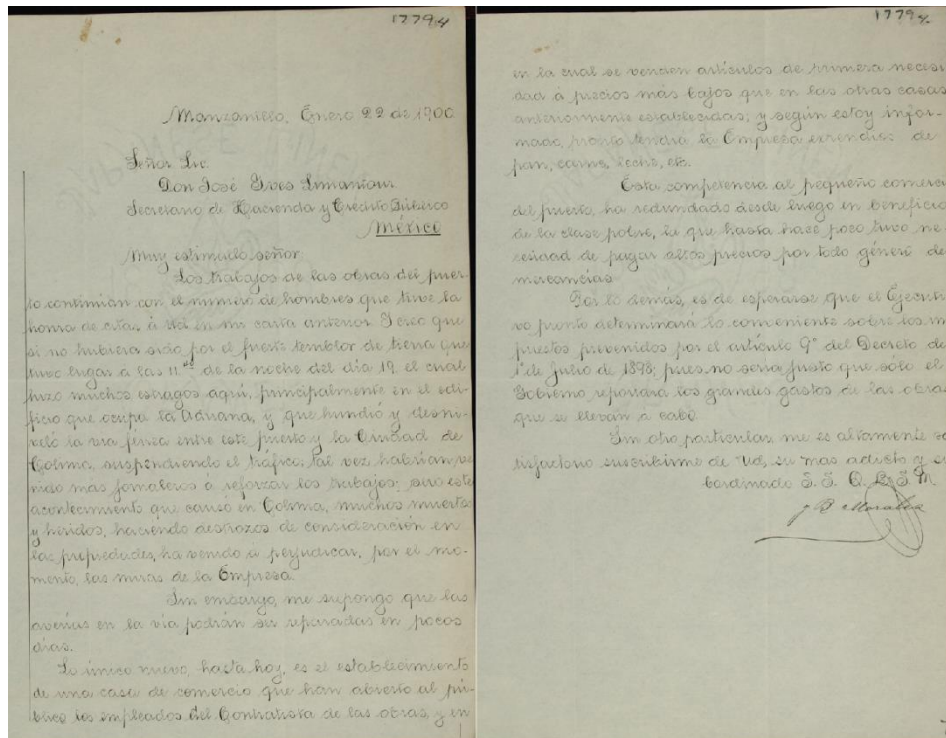


Figura A.1.8. Facsímil Carta de Morales

Paleografía:

“Manzanillo. Enero 22 de 1900.

Señor Lic.

Don José Ives Limantour

Secretario de Hacienda y Crédito Público. México

Muy estimado señor:

Los trabajos de las obras del puerto, continúan con el número de hombres que tuve la honra de citar a Ud. en mi carta anterior. Y creo que si no fuera sido por el fuerte temblor de tierra que tuvo lugar a las 11:40 de la noche del día 19, el cual hizo muchos estragos aquí, principalmente en el edificio que ocupa la aduana, y que hundió y desniveló la vía férrea entre este puerto y la ciudad de Colima, suspendiendo el tráfico; tal vez harían venido más jornaleros a reforzar los trabajos; pero este acontecimiento que causó en Colima, muchos muertos y heridos, haciendo destrozos de consideración en las propiedades, ha venido a perjudicar, por el momento, las miras de la Empresa.

Sin embargo, me supongo que las averías en la vía podrán ser reparadas en pocos días.

Lo único nuevo, hasta hoy, es el establecimiento de una casa de comercio que han abierto al público los empleados del Contratista de las obras, y en la cual se venden artículos de primera necesidad, a precios más bajos que en las otras casas anteriormente establecidas; y según estoy informado, pronto tendrá la Empresa expendios de pan, carne, leche, etc.

Esta competencia al pequeño comercio del puerto, ha redundado desde luego en beneficio de la clase pobre, la que hasta hace poco tuvo necesidad de pagar altos precios por todo género de mercancías.

Por lo demás, es de esperarse que el Ejecutivo pronto determinará lo conveniente sobre impuestos prevenidos por el artículo 9º del Decreto de 1º de Julio de 1898; pues no sería justo que sólo el Gobierno reportara los grandes gastos de las obras que se llevan a cabo.

Sin otro particular, me es altamente satisfactorio suscribirme de Ud., su más adicto y subordinado S.S.Q.B.S.M.

J.B. Morales”

MEXICAN TEMBLORS

Caused More Damage Than the Early Reports Indicated

Chicago, March 2.—A special to the Record from Guadalajara (Mexico) says: The recent earthquakes which were felt throughout Southern Mexico did much greater damage than was indicated by the earlier reports. News from remote coast and mountain towns has just reached Guadalajara and stories of great destruction of property and considerable loss of life are told. The severe seismic shocks had a remarkable effect on the sea, causing it to roll inland and covering the country for a distance of over one mile from the beach. This tidal inundation occurred three times in rapid succession and every movable thing in its path was swept away. A number of small coast villages were destroyed and there was some loss of life, but no definite information has been received as to the number of persons drowned. This tidal inundation was most severe on the Pacific coast, extending from Acapulco to Manzanillo. Several of the mountain towns in the state of Michoacan suffered severely. The earthquake shocks destroyed a number of houses in the towns of Ostula, Coacoleman, Cahauxara and Arguilla and Pomaro. Five persons were caught under falling walls in Pomaro and killed.

EL IMPARCIAL

TIRO DE AYER GLIES DOMINGO

alegre

El temblor del 19 de Enero

Discusion de los datos del Instituto Geologico de Mexico

Un sismo y fuerte ondulacion del mar... Los datos que el Instituto Geologico de Mexico...

Figura A.1.9. Facsímil. Mexican Temblors. Caused More Damage Than the Early Reports Indicated. Los Angeles Herald (1900). 3 March 1900, p. 2, consultado en The California Digital Newspaper Collection. Facsímil. El Imparcial, mostrando el mapa elaborado por Ordoñez.

16 de mayo de 1900 (M=7.6)

THE SAN FRANCISCO CALL, SATURDAY, MAY 19, 1900.

ATTEMPTS TO RUN CARS CAUSE SOME FATAL RIOTS

Street Railway Magnates of St. Louis Discouraged by the Failure of the Police to Protect Them and Think Militia Is Needed.

TEMBLOR'S SHOCK AND TIDAL WAVE

Lives Lost and Property Damaged in Cities on Western Coast of Mexico.

Great Column of Water Sweeping Shoreward After the Earthquake Submerges Houses and Swamps Boats.

Special Dispatch to The Call.

CITY OF MEXICO, May 12.—Reports from the towns on the Pacific coast show that while the earthquake on Wednesday was comparatively slight in this city it was severe along the coast. A tidal wave succeeded the second shock. Considerable damage was done in the States of Colima and Jalisco. Houses were submerged, boats were swamped and several residents were drowned.

The seismic movement, which was from southeast to northwest, occurred at 1:35 o'clock in the afternoon on the Pacific coast and at 1:37 o'clock in this city. The duration of the movement generally was one minute, but where the disturbance was most severe it lasted only two seconds.

Cracks which were made in buildings in this city by the earthquake in January last were further opened by the shocks of Wednesday. The structures most damaged are the National Palace, Church of San Francisco and the Palace of Justice. In order to prevent danger these buildings must be repaired.

URGE AGAINST and service of their employees on Sunday. Whether or not the great St. Louis Exposition was borne in the minds of the commissioners a resolution was submitted

Figura A.1.10. Facsímil, Temblor's shock and tidal wave. Publicado en The San Francisco Call. Sábado, 19 de mayo de 1900.

Anexo 2

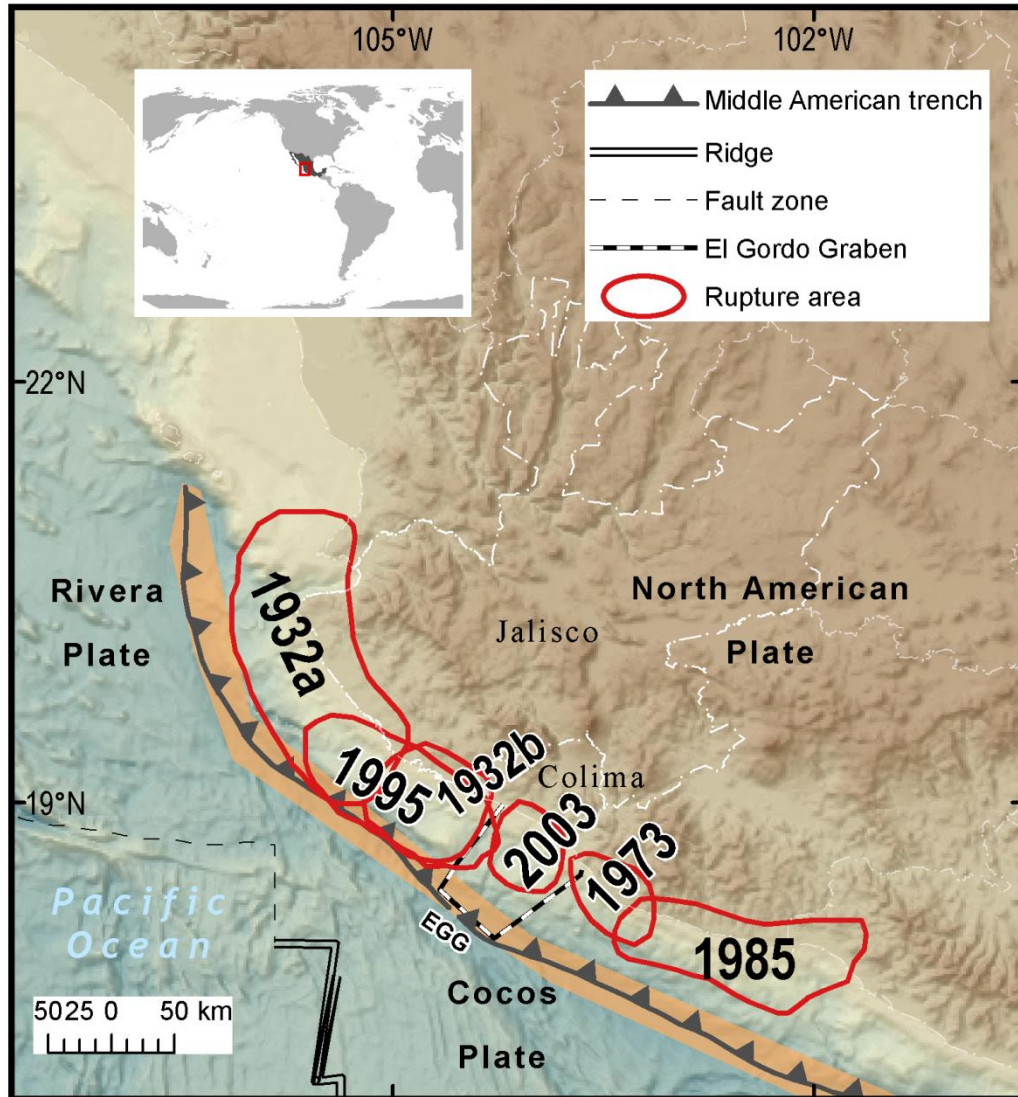


Figura A.2.1. Contexto tectónico, se presentan las áreas de ruptura para los sismos tsunamigénicos 1932-2016 (Kostoglodov y Pacheco, 1999). Las literales identifican los sismos que ocurrieron en el mismo año: 1932a (3 de junio 1932), 1932b (18 de junio de 1932).

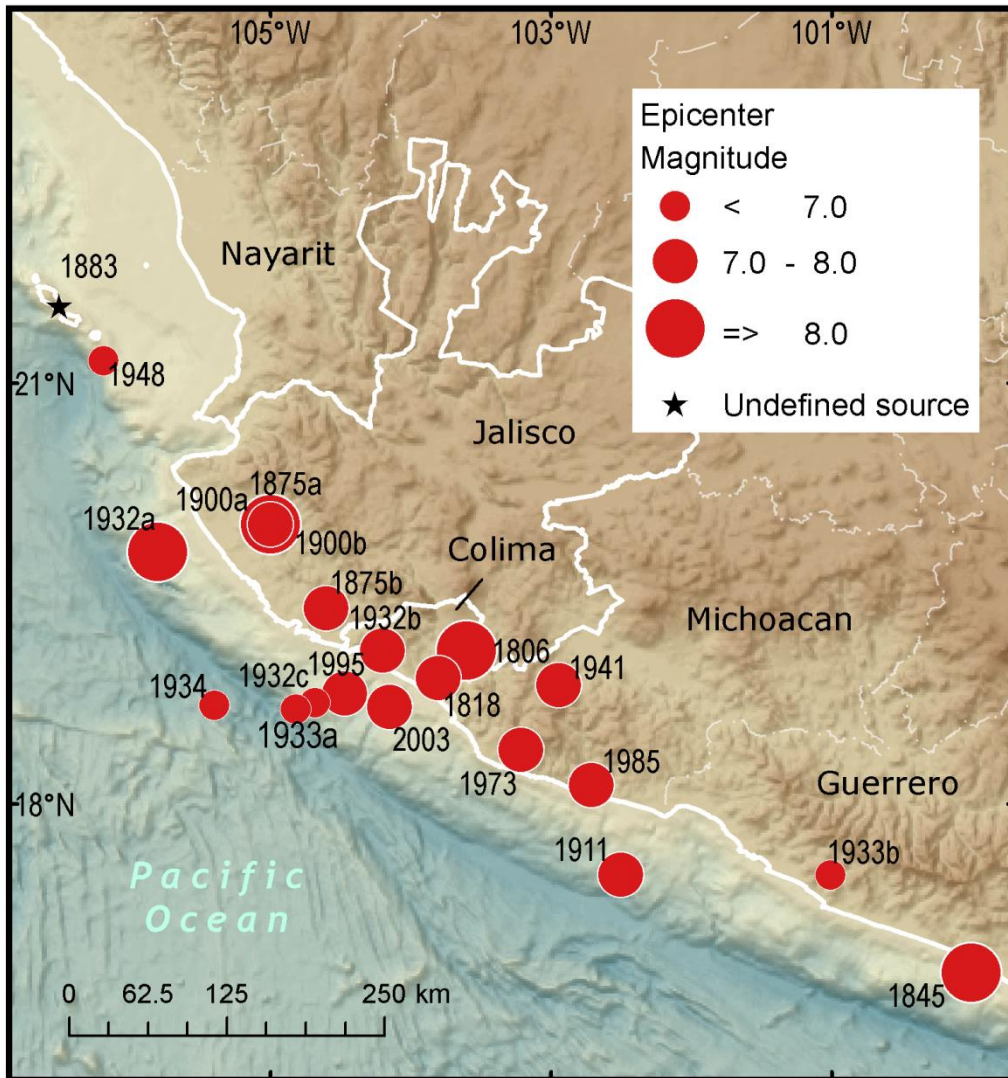


Figura A.2.2. Epicentros de los sismos históricos tsunamigénicos. Se muestran los límites administrativos. Las letras se utilizan para identificar los epicentros de sismos que ocurrieron en el mismo año 1875a (24 febrero 1875), 1875b (9 marzo 1875), 1900a (20 enero 1900), 1900b (16 mayo 1932), 1932a (3 Junio 1932), 1932b (18 Junio 1932), 1932c (22 Junio 1932), 1933a (20 febrero 1933), and 1933b (8 mayo 1933).

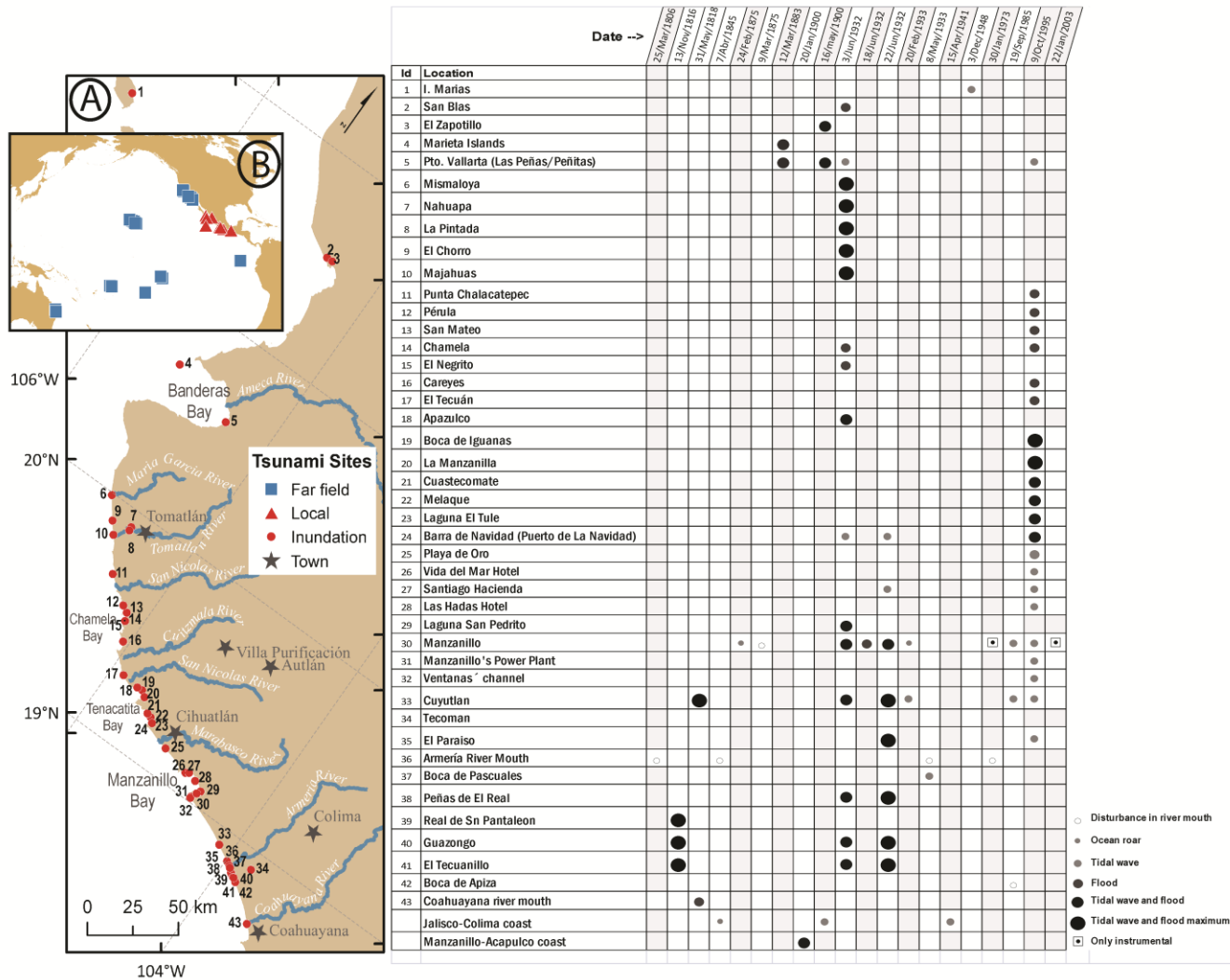


Figura A.2.3. (a) Tsunamis producidos por sismos locales en la costa Jalisco-Colima, acompañados por una descripción resumida. Los números en el mapa corresponden con el id de la columna en la tabla. (b) Mapa de los sitios con tsunami con reporte de inundación para la costa Jalisco-Colima (México).

Anexo 3

Table 1. Repositories, libraries and archives according with information availability

Name	Access online		Type of information	Acronym
	Catalog	Documents		
archive.org	Full	Full	Archived books	
Hathi Trust Digital Library	Full	Limited	Books and journals	
Hemeroteca Digital Nacional de México	Full	Almost full	Historical newspapers	HDNM
Hemeroteca Digital de la Biblioteca Nacional de España	Full	Full	Historical newspapers	HDBNE
Archivo General de la Nación	Partially online	Some	Documents, Books & Newspapers	AGN
Archivo General de Indias	Full	Some	Documents	AGI
Centro de Estudios de Historia de México CARSO	Full	Full	Archival Documents	CEHMCARSO
Biblioteca Digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León	Full	Almost full	Ancient books	BDUANL
New York Times Article Archive	Full	Limited	Newspapers	
Library of the Congress Digital Collections Historic Newspapers	Full	Full	Historical newspapers	LCDCHN
California Digital Newspaper Collection	Full	Full	Historical newspapers	
Old Fulton NY Postcards	Full	Full	Historical newspapers	
Hemeroteca de El Informador	Full	Full	Newspapers	
Archivo Histórico del Estado de Colima (AHEC)	Full	Limited	Documents	AHEC
Biblioteca Pública del Estado de Jalisco	Full	Not available	Documents & books	BPEJ
Biblioteca Nacional de Antropología e Historia	Full	Not available	Documents, Books & Newspapers	BINAH
Biblioteca Lerdo de Tejada de la SHCP	Partially online	Not available	Documents, Books & Newspapers	BLTSHP
World Newspaper Archive		By suscription	Newspapers	
Newspaper Archive	By suscription	By suscription	Newspapers	
Archivo Histórico del Arzobispado de Guadalajara	Not available	Not available	Documents & books	AHAG
Archivo Histórico del Estado de Jalisco	Not available	Not available	Documents & books	AHEJ

Table 2. Tomatlán Tsunami report and localities descriptions

Place	Latitude	Longitude	Height (m)	Max Inundation dist (m)	Observations	Source
Mazatlán	23.1997	-106.4265		340	Flood on the beach and part of the town	El Informador, 1932a; El Universal, 1932a
San Blas	21.5379	-105.2881		337	Continuous and excessive water movement in the port's estuary produced by the first shock. The water invaded the town's houses	Excelsior, 1932a; La Prensa, 1932a
Puerto Vallarta	20.6083	-105.2353			The sea water dropped significantly for a while... some boats were strand momentary. The village was in danger of being swallowed by the sea.	El Informador, 1932b; Hoy Diario Tapatio, 1932
Mismaloya (Tomatlan)	19.9980	-105.4947	10	1800	This little village was entirely swept away; people had enough time to run towards a nearby hill, crossing María García river to save their lives, nly one little child died. After that the ocean waves break closer.	Valdivia et al. (2012); testimonio de testigo presencial
Tomatlan River Valley	19.8495	-105.3515		8000	The run up penetrated at least 8km, reaching Nahuapa ⁽⁷⁾ and La Pintada ⁽⁸⁾ villages, through river's channel wiping out Majahuas ⁽¹⁹⁾ and Chorros ⁽⁹⁾ located in the mouth of Tomatlan river. Three people dead	Valdivia et al,2012; Archivo histórico del Estado de Jalisco; El Informador, 1932c; Excelsior, 1932b; Las Noticias, 1932b; La Prensa, 1932b
Chorros	19.8866	-105.4131		230	Flood	Archivo Historico del Estado de Jalisco; El Informador, 1932d
Majahuas	19.8413	-105.3753			3 deaths, flood	Valdivia et al, 2012; El Informador 1932d;
Nahuapa	19.9211	-105.3186		10,800	Flood	According with eyewitness testimonies recolected by Tomatlán's Chronicler
La Pintada	19.9006	-105.3181		8,900	Flood	Tomatlán major's son, who owned a ranch near La Pintada
Chamela	19.5303	-105.0816			Inundation	El Informador, 1932e
El Negrito (Negro)	19.5273	-105.0827		234	A tsunami of some years ago is reported to have filled this depression with sea water	Brand, 1958
Apazolco (Tenacatita)	19.3030	-104.8438		514	Inundation, in Tenacatita bay flooded the northern side killing some cattle in the property of Hacienda de Apazolco	Martínez, 2013 (entrevista)
Barra de Navidad	19.2044	-104.6845		370	The wave only surpassed the highest dune on the beach	Cumming, 1933

Manzanillo	19.0532	-104.3142	2		An "awful surge" was observed, small boats collided with big ones, while sea receded, and "Acapulco" vessel was stranded. Big waves overran the beach in North neighborhood leaving fish of several sizes on its path; tide was 2m high over normal level; the breakwater was seriously damaged. Manzanillo's beach invaded by ocean waters during the quake	El Informador, 1932e; Excelsior, 1932d
San Pedrito	19.0703	-104.3012	3		The tide rose 3m	Sánchez y Ferreras,1993
Cuyutlan	18.9181	-104.0706	2	80	The sea came out until the roundabout; the earthquake damaged hotels and train station; water invaded 80m inland of the resort and waves reached Ceballos Hotel, leaving fishes stranded; sand ground cracked uncovering railways by embankment wash off. The tide rise 2m	El Informador, 1932f; La Prensa, 1932c; Excelsior, 1932a
El Real	18.8413	-103.9447		200	... we saw the sea coming over the coast like somebody tackle it hardly. Waters lost their usual transparency: the sea looked like boiling chocolate..... it gobbled more than 2km of beach	El Universal,1932b
Guazongo	18.8331	-103.9306		200	destroyed big palms, all the saltworks and flooding a huge area	El Universal,1932b
Tecuanillo	18.8286	-103.9238		200	destroyed big palms, all the saltworks and flooding a huge area	El Universal,1932b
Zihuatanejo	17.6397	-101.5579		75	several fisher villages swept by the sea	Las Noticias, 1932a
Apia, Upolu Island	-13.827	-171.7613	0.03		Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
Long Beach, CA	33.75	-118.22	0.1		Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
Los Gatos, CA	37.27	-121.97			Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
San Diego, CA	32.715	-117.174	0.03		Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
San Francisco, CA	37.807	-122.465			Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
Santa Barbara, CA	34.4803	-119.69	0.1		Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database
Hilo, Hawaii, HI	19.7303	-155.0553	0.4		Instrumental; nine wave snatched a sandbar at the entrance of Wailoa river	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database; El Informador, 1932g; El Universal, 1932c
Honolulu, Oahu, HI	21.3067	-157.867	0.08		Instrumental	NCEI (NOAA) Significant Earthquake Database

References

- Brand, D. (1958). *Study of Southwest Mexico. Part II*. University of Texas, Department of Geography
- Cumming, J. L. (1933). Los Terremotos de junio de 1932 en los estados de Coahuila y Jalisco. *Universidad de México*, VI(31-32), 68-104.
- Sánchez, A. J., and Ferreras, S. (1993). *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México* (Vols. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50). Boulder, CO.: United States Department of Commerce
- Valdivia, L., Castillo, M. R., and Estrada, M. (2012). La Historia No Contada del Tsunami del 3 de junio de 1932 que golpeó las Costas del Municipio de Tomatlán, Jalisco. *Geocalli. Cuadernos de Geografía*(25), 13-100.
- Newspapers
- El Informador (1932a) El Informador. 4/Jun/1932, p. 6. <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932b) El Informador 5/Jun/1932 <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932c) El Informador 05/Jun/1932, <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932d) El Informador 07/Jun/1932 y 23/Jun/1932 <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932e) El Informador 9/Jun/1932. <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932f) El Informador 4, 5 and 6 /Jun/1932 <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Informador (1932g) El Informador, 7/June/1932 p.1 <http://hemeroteca.informador.com.mx/>
- El Universal (1932a) El Universal, 5/Jun/1932, p. 1 Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco.
- El Universal (1932b) El Universal 26/Jun/1932, p. 5 Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco
- Excelsior (1932a) 5/Jun/1932, p. 3. Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- Excelsior (1932b) Excelsior 09/Jun/1932, Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- Excelsior (1932d) Excelsior 2da Sección (7/Jun/1932) published a picture showing “*Manzanillo’s beach invaded by ocean waters during the quake last week on Friday*” Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- Hoy Diario Tapatío Edición de La Tarde (1932) 4/Jun/1932, p.1. Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco
- La Prensa (1932a) 5/Jun/1932, p.3. Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- La Prensa (1932b) 18/Jun/1932, p.2. Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- La Prensa (1932c) 8/Jun/1932, p.7. Hemeroteca de la Biblioteca Lerdo de Tejada, SHCP
- Las Noticias (1932a) 05/Jun/1932. Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco
- Las Noticias (1932b). 11/Jun/1932. Hemeroteca de la Biblioteca Pública de Jalisco

Table 3. Places reported to be flooded by La Manzanilla Tsunami

Place	Height (m)	Runup (m)	Observations	Source
Puerto Vallarta ⁽⁵⁾			Several yachts damaged by knocked together by the waves	Borrero et al, 1997
Punta Chalacatepec ⁽¹¹⁾		2.90		Borrero et al, 1997
Pérula ⁽¹²⁾		3.40	North of Chamela Bay	Lander et al, 2003
San Mateo ⁽¹³⁾		5.00	Middle of Chamela Bay,	Borrero et al, 1997
Punta Chamela ⁽¹⁴⁾		3.40	South of Chamela Bay	Lander et al, 2003
Careyes ⁽¹⁶⁾		3.20		Borrero et al, 1997
El Tecuán ⁽¹⁷⁾		3.80		Borrero et al, 1997
Boca de Iguanas ⁽¹⁹⁾		5.00	North of Tenacatita bay. After withdrawal, the water came with much force blowing away the beach-facing walls of several houses. The wave penetrated river up into the marsh.	Borrero et al, 1997
La Manzanilla ⁽²⁰⁾		4.00	South of Tenacatita Bay. 15 min after the earthquake the bay began to empty (5-6m amplitude of leading depression)	Borrero et al, 1997
Cuastecomate ⁽²¹⁾		4.40		Lander et al., 2003
Melaque ⁽²²⁾		4.50	North of Navidad Bay	Borrero et al, 1997
Tule Lagoon ⁽²³⁾		5.70	In the middle of Navidad Bay	Borrero et al, 1997
Barra de Navidad ⁽²⁴⁾	5.10	3.70	South of Navidad Bay, 1 dead people	Borrero et al, 1997; Lander et al, 2003
Playa de Oro ⁽²⁵⁾		4.08		Borrero et al, 1997
Vida del Mar Hotel ⁽²⁶⁾		10.90	Water withdrew several hundred meters offshore 15 min after the earthquake. Place located on the cliff in Jaluapan Peninsula. 4-5 waves	Borrero et al, 1997
Santiago Bay (south)		2.30	Waves came over the berm and flowed 15-20 min after the earthquake	Borrero et al, 1997
Manzanillo ⁽³⁰⁾		2.00		Lander et al, 2003
Entrance of Mazanillo harbor			Extensive damage by tsunami currents (12 knots)	Borrero et al, 1997
Manzanillo power plant ⁽³¹⁾		4.75	The wave had crested over the top of the breakwater; the tsunami propagated from the channel to the lagoon	Borrero et al, 1997
Tecomán coast	7.00		In the neighboring coast area	Carrillo-Martínez, 1997
Cuyutlán ⁽³³⁾		2.70	Erosion marks and a 1.5m escarp; Initial drawdown	Borrero et al, 1997

References

- Borrero, J., Ortiz, M., Titov, V., and Synolakis, C. (1997, February 25). Field Survey of Mexican Tsunami Produces New Data, Unusual Photos. *EOS Transactions*, 78(8), 85-88.
- Carrillo-Martinez, M. (1997). Isosistas Locales del Sismo de Manzanillo del 9 de Octubre de 1995, 9:36 a.m., Estados de Colima y Jalisco, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 14(1), 110-113.
- Lander, J., Lockridge, P., and Kozuk, M. (1993). *Tsunamis affecting the West Coast of the United States, 1806-1992*. Boulder, Colorado, U.S.A.: National Geophysical Data Center

Tabla 1. Resultados del Análisis del Tamaño de Grano, JAL-04

Profundidad (cm)	Arenas %	Limos %	Arcillas %	Mz	σ	Sk ₁	K _G	Moda		Mediana (σ 50)	
				ϕ	ϕ			μ m	ϕ	μ m	ϕ
2.5-3	87.013	9.367	3.62	2.76	1.22	0.47	2.81	203.5	2.297	163.5	2.613
3-4	91.1	6.24	2.66	2.81	0.84	0.44	2.42	168.9	2.566	149.2	2.745
7-8	49.62	34.22	16.16	4.87	2.50	0.51	0.77	168.9	2.566	62.46	4.001
10-11	77.519	14.48	8.001	3.70	1.96	0.63	2.69	127.6	2.970	128.6	2.959
16-17	80.118	12.93	6.952	3.52	1.67	0.78	3.15	168.9	2.566	141.3	2.823
18-19	87.827	8.498	3.675	2.92	1.04	0.54	2.95	168.9	2.566	143.4	2.802
39-40	85.257	8.918	5.825	2.95	1.23	0.64	3.93	168.9	2.566	146.9	2.767
51-52	81.272	11.43	7.298	3.39	1.52	0.75	3.33	168.9	2.566	134.5	2.894
59-60	79.915	12.29	7.795	3.66	1.74	0.81	3.25	168.9	2.566	136.4	2.874
61-62	78.423	15.04	6.537	3.67	1.66	0.76	2.82	127.6	2.970	127.2	2.975
77-78	86.512	8.394	5.094	2.89	1.16	0.58	3.66	185.4	2.431	147.2	2.764
87-89	90.595	5.962	3.443	2.81	0.97	0.49	3.38	153.8	2.701	148.5	2.751