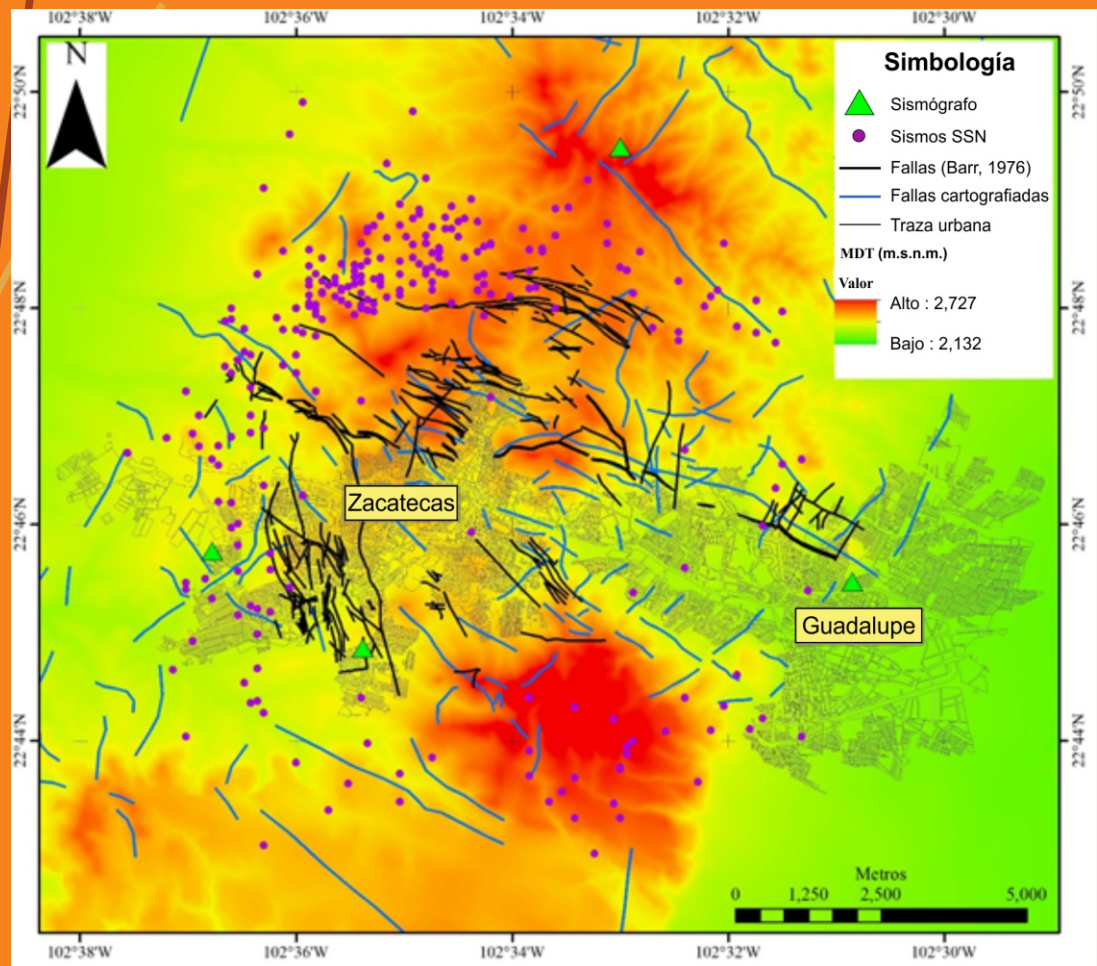


geos



GEOS se publica dos veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. Mesa Directiva 2020-2021

Dra. Vanessa Magar Brunner
División de Oceanología, CICESE
Presidenta

Dr. Arturo Iglesias Mendoza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

Dr. Mario González Escobar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Tesorero

Dr. Héctor González Huizar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario General

Dr. Markus Gross
División de Oceanología, CICESE
Secretario de Investigación

Dra. Ruth Cerezo Mota
Instituto de Ingeniería, Unidad Sisal, UNAM
Secretaría de Difusión

Dra. Ericka Alinne Solano
Universidad del Mar, Puerto Ángel, Oaxaca
Secretaría de Educación

Dr. Luis Alonso Gallardo Delgado
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Ruth Cerezo Mota
rcerezom@ingen.unam.mx
UNAM

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Oscar Campos, UNAM
Gerardo Carrasco, UNAM
Ana Luisa Carreño, UNAM
Carlos Flores Luna, CICESE
Juan García Abdeslem, CICESE
René Garduño, UNAM
Gustavo Tolson, UNAM
Felipe Escalona, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
Sergio Manuel Arregui Ojeda
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

Dirigir toda correspondencia a:
Editorial GEOS
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
ldelgado@cicese.mx
Tel. en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

EDITORIAL

Eficiencia durante Pandemia y Guerra ... 161

COMUNICADO

Exhorto de la Unión Geofísica Mexicana ante el cambio climático ... 163

ARTÍCULOS

Una revisión general acerca de las características y consecuencias de grandes sismos en México ... 165
Lenin Ávila Barrientos

Análisis de contribución de fuentes de contaminación en aguas subterráneas y superficiales utilizando el Modelo de Mezcla Bayesiano ... 183
Jürgen Mahlknecht

Un perfil sísmico de reflexión somera en el complejo de la caldera La Reforma, Baja California Sur, México ... 191
M.C. Gómez Ávila, Efraín Gómez Arias, Mario González Escobar, Antonio González Fernández, Eleyra Berenice Sena Lozoya, Manuel Alejandro Lira Martínez

NOTA

Red sísmica de Zacatecas ... 201
Juan Martín Gómez González, Felipe de Jesús Escalona Alcázar, Juan Carlos Montalvo Arrieta, Miriam Judith Cedillo Candelas, Victor Hugo Ramirez Márquez, David Leonardo Carrillo Sánchez

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL ... 207

Eficiencia durante Pandemia y Guerra

El contexto económico en el que nos encontramos a mediados del año 2022 está marcado por dos eventos de escala mundial. El primero es el desafortunado y costoso fenómeno de la pandemia por COVID-19 que se ha extendido desde el primer trimestre de 2020 hasta estos días, el cual ha expuesto de forma dramática las debilidades de la organización económica y sanitaria de las distintas sociedades, cuyas consecuencias aún son impredecibles, tanto en el ámbito económico como en el social. Económicamente, las cadenas de suministros y producción aún tienen eslabones sueltos y la desigualdad en los puestos de trabajo y la remuneración en muchas áreas de producción y servicios es mayor que antes. El segundo evento cuyas consecuencias alcanzan también la escala planetaria es la guerra que se libra desde febrero de 2022 en el oriente de Europa. Con ésta, la crisis generalizada es económica e impacta principalmente a los mercados de combustibles y de alimentos. Ambos requieren de subvención gubernamental lo que ejerce presión sobre los programas sociales, desde los dirigidos a combatir la pobreza hasta los educativos, incluyendo la investigación científica, pues en su mayor parte, ésta se financia a través del Estado en las universidades y centros de investigación.

La presión de ambos eventos se ha traducido a distintos esquemas de administración, entre los que destacan la austeridad y la vigilancia en el ejercicio fiscal. Con frecuencia los traductores no encuentran el significado más adecuado que ofrezca mayor eficiencia, ya que continuamente se cae en improvisaciones que mucho han dificultado la forma tradicional de acceder a fondos, trabajar y reportar resultados. Quienes definen las políticas públicas para los fondos de investigación y otras actividades académicas, así como los intérpretes y evaluadores parecen ser principiantes y se manejan sospechando permanentemente que se llevan a cabo ejercicios de dudosa validez. Un rasgo característico del sector administrativo es la escasa información acerca de los criterios académicos aplicados en las evaluaciones, a pesar de que dichos criterios son suficientemente claros. Durante la vida de los proyectos, la calendarización de las actividades académicas y del ejercicio presupuestal suelen tener modificaciones importantes debidas a las variaciones del mercado (*sensu lato*), movilidad del personal de apoyo (estudiantes y técnicos), hasta los propios a la naturaleza de muchas de las disciplinas de las ciencias naturales. La administración de la ejecución del trabajo académico suele ser más compleja que el trabajo de administración de sus fondos y, como es de esperarse, ambos grupos de trabajo mantienen relaciones complejas entre sí.

A lo anteriormente expuesto, la diversidad de las actividades académicas (investigación y formación de recursos humanos principalmente) es tan amplia que con frecuencia el entendimiento entre los practicantes de disciplinas distintas de las ciencias naturales, aunque similares, es difícil. Esta obviedad deja de serlo cuando se busca el entendimiento entre quienes ejecutan las actividades académicas y quienes las administran. En este sentido, debe considerarse que hay temas que pueden trabajarse en la oficina con el solo apoyo computacional, los cuales son tan dispares de aquellos otros que requieren de campañas complejas y costosas de adquisición de información, normalmente multidisciplinaria. Los primeros pueden no tener restricciones de tiempo ni requieren movilidad, mientras que los otros suelen ajustarse a periodos particulares como, por ejemplo, aquellos relacionados con la gestión hídrica donde se analiza la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, su forma de explotación así como su recarga, así como otros que tratan sobre migración de especies, o sobre condiciones atmosféricas u oceánicas.

Un componente de la mayor importancia durante el desarrollo de los proyectos de investigación es el que se refiere a la formación de recursos humanos. Este involucra desde la participación de estudiantes cuyo trabajo cumple con los requerimientos del proyecto pero a su vez, es el componente principal de sus tesis. La importancia de esos trabajos impacta tanto en el proyecto como en la eficiencia terminal de los programas institucionales en los que están registrados. Paralelamente, está la participación de doctores jóvenes que reciben una remuneración a través de becas postdoctorales, en una forma abiertamente aceptada de subempleo. Estos participantes del nivel académico más alto resultan ser los más vulnerables pues al detenerse el suministro de recursos al proyecto sus ingresos se interrumpen también, forzándolos a buscar otras formas de sustento. Con ello, los participantes interrumpirán un largo proceso de entrenamiento y el daño al desarrollo del proyecto mismo se reflejará negativamente en los artículos en proceso, en los estudiantes a quienes asesoraba, así como en el ánimo general.

Por el bien del quehacer científico del país, de sus instituciones de educación superior y de un amplio sector de personas que se beneficia de ellos, es muy importante tener confianza en la pertinencia de las investigaciones en curso, así como tener sensibilidad hacia la naturaleza multifacética de los proyectos de investigación y de sus participantes. Seguramente, dicha confianza redundará en una mayor eficiencia en lo general.

COMUNICADO DE PRENSA

Exhorto de la Unión Geofísica Mexicana ante el cambio climático

El último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC por sus siglas en inglés), informa que es inequívoca la influencia antropogénica sobre el calentamiento de la tierra, los océanos y la atmósfera, induciendo a cambios en el clima sobre todo el planeta. El cambio climático inducido por la influencia humana lo vivimos actualmente, siendo particularmente alarmante el incremento en la frecuencia o intensidad de los eventos extremos como son las ondas de calor, la precipitación extrema y las inundaciones, los incendios forestales, las sequías, y el impacto por ciclones tropicales.

El calentamiento global y sus efectos sobre el clima son resultado directo del incremento de gases de invernadero en la atmósfera, los cuales se han incrementado desde el inicio de la era industrial y durante los últimos 50 años han causado un incremento en la temperatura superficial que no tiene precedentes en al menos los últimos 2000 años. Así mismo, en 2019 el nivel de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera alcanzó su mayor valor en los últimos 2 millones de años, y los valores actuales de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) son los mayores de los últimos 800,000 años. Se espera que las temperaturas sigan incrementándose hasta mediados del siglo XXI independientemente de las acciones que se puedan tomar para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, si se toman acciones drásticas para reducir y limitar la emisión de estos gases, todavía es posible acotar el incremento de la temperatura global a 1.5 °C, reduciendo así las consecuencias más dañinas del calentamiento global para la humanidad.

Con el último reporte del IPCC queda claro que los países deben tomar decisiones urgentes para reducir los gases de invernadero y evitar que se pase un umbral de temperatura que conlleve a cambios catastróficos en el clima. Bajo dicho panorama, resulta grave confirmar que son pocos los países que están cumpliendo sus metas comprometidas en los Acuerdos de París para limitar la emisión de gases de invernadero, y que durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2021 en Glasgow, Escocia (referida como la COP26) algunos países incluso buscaron reducir dichos compromisos.

México es altamente vulnerable a efectos del cambio climático, tales como la alternancia entre años de sequías y años de inundaciones extremas y el efecto de ésta sobre la seguridad alimentaria y los recursos hídricos, el impacto de las ondas de calor, el embate de ciclones tropicales y el incremento del nivel del mar en todas sus costas, por nombrar solo algunas de las consecuencias que ya son medibles y atribuibles al calentamiento global antropogénico por encima de la variabilidad natural. La única manera de mitigar estos impactos es colaborando a nivel internacional para reducir los

COMUNICADO DE PRENSA

Exhorto de la Unión Geofísica Mexicana ante el cambio climático

gases de invernadero. Dicha colaboración no solo repercutirá en menores riesgos para el país, sino también en la disminución de los de otros países más vulnerables como las islas naciones, por lo que también hay un sentido de solidaridad internacional en los esfuerzos de reducción de las emisiones de gases de invernadero.

Para limitar la emisión de gases de efecto invernadero y evitar cambios catastróficos en el clima es urgente realizar una transición hacia las energías renovables. Actualmente en México se busca fortalecer la industria petrolera nacional, lo cual es imprescindible para el desarrollo del país. Sin embargo, es necesario utilizar los recursos petroleros para impulsar las energías renovables y así lograr las metas de los Acuerdos de París, al mismo tiempo que se generan empleos para los mexicanos.

Desde la Unión Geofísica Mexicana consideramos que México es un país que puede beneficiarse enormemente de las energías renovables, ya que es un país privilegiado con cantidades abundantes de recursos renovables, como son las energías solar, eólica y marina. La investigación científica y el desarrollo tecnológico que permitan aprovechar esos recursos naturales en las cantidades requeridas deben ser considerados por el Gobierno Federal como temas prioritarios, esenciales para la seguridad nacional de México.

Debido a lo anterior, hacemos un llamado urgente a que todos los actores políticos del país reconozcan la gravedad de la crisis climática y que contribuyan a facilitar la reducción de las emisiones de gases de invernadero en el marco de tiempo comprometido por México en los Acuerdos de París (reducción incondicional del 22% de las emisiones de gases de invernadero y de 51% de carbono negro para el 2030, y reducción condicional para ese mismo año del 36% y 70% respectivamente en función de otros acuerdos globales) y una transición a las energías renovables que garantice la soberanía energética presente y futura de México.

17 de diciembre de 2021

Responsables de la publicación:

Dra. Vanesa Magar Brunner, Presidenta de la Mesa Directiva de la UGM

Dr. Christian M. Appendini, Representante de la sección de Oceanografía y Limnología

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson, Representante de la sección de Atmósfera

Una revisión general acerca de las características y consecuencias de grandes sismos en México

Lenin Ávila Barrientos

CONACyT - CICESE Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología

Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas C.P. 22860 Ensenada, Baja California, México.

lenavila@cicese.mx

Resumen

Un sismo es uno de los fenómenos naturales más destructivos. Los sismos causan daños en las estructuras y colapsos en la infraestructura urbana. También pueden modificar el relieve natural. En México, a causa de la interacción de las placas tectónicas, han ocurrido sismos de magnitud considerable que han provocado daños severos en varias ciudades, no tan solo en aquellas ubicadas cerca de la trinchera Mesoamericana, sino también en ciudades localizadas en la porción noroeste del país. Entre 1568 y 2021 han ocurrido más de 100 eventos de $M \geq 7.0$; cinco de ellos han sido de magnitud mayor o igual a 8.0. El más recordado es el ocurrido en septiembre de 1985, el cual representa una de las mayores catástrofes asociadas con fenómenos naturales en el país. Por lo anterior la elaboración de planes de mitigación es necesaria, con lo que la sociedad estará preparada para enfrentar los efectos de este fenómeno natural.

Palabras Claves: sismos en México, revisión, características.

Introducción

De los fenómenos naturales, los temblores de Tierra o sismos son de los más destructivos. pueden causar daño o colapso de estructuras (puentes, casas, edificios, etc.) y pérdida de vidas humanas en cuestión de minutos (Nava, 1987), e. g. México en 1985, Sumatra en 2004, Haití en 2010, Japón en 2011. México está ubicado en una de las zonas tectónicamente más activas del planeta. Aquí se han registrado cinco grandes sismos (con magnitud ≥ 8.0) que han causado destrucción de estructuras y pérdida de vidas, particularmente en aquellos estados situados cerca de la trinchera Mesoamericana, donde ocurre la convergencia entre las placas de Cocos y Norteamericana (Sánchez y Farreras, 1993; Corona y Ramírez-Herrera, 2012; Beck y Hall, 1986).

Ciudades con ciertas condiciones geológicas o tipo de suelo, como la Cd. de México, han sido severamente afectadas por grandes sismos. El de septiembre de 1985 dejó un saldo de 1,000

edificios destruidos y 300,000 familias perdieron sus hogares (Beck y Hall, 1986; Servicio Sismológico Nacional, 2017b).

En este trabajo se presenta una revisión de los grandes sismos ocurridos en México entre 1568 y 2021.

Tectónica de México

La mayor parte de la actividad sísmica en México se concentra en la margen occidental del continente. Esto se debe a la interacción de la placa Norteamericana con la placa del Pacífico en el noroeste y a la subducción de las placas Rivera y Cocos por debajo de la Norteamericana en el sur (Figura 1).

En la trinchera Mesoamericana, la placa subducida (Cocos) muestra cambios laterales en el ángulo de subducción, variando de una subducción sub-horizontal por debajo de México central a una pendiente inclinada hacia Chiapas (Suárez et al., 1990; Pardo y Suárez, 1995). La placa Rivera, en su parte norte, no muestra

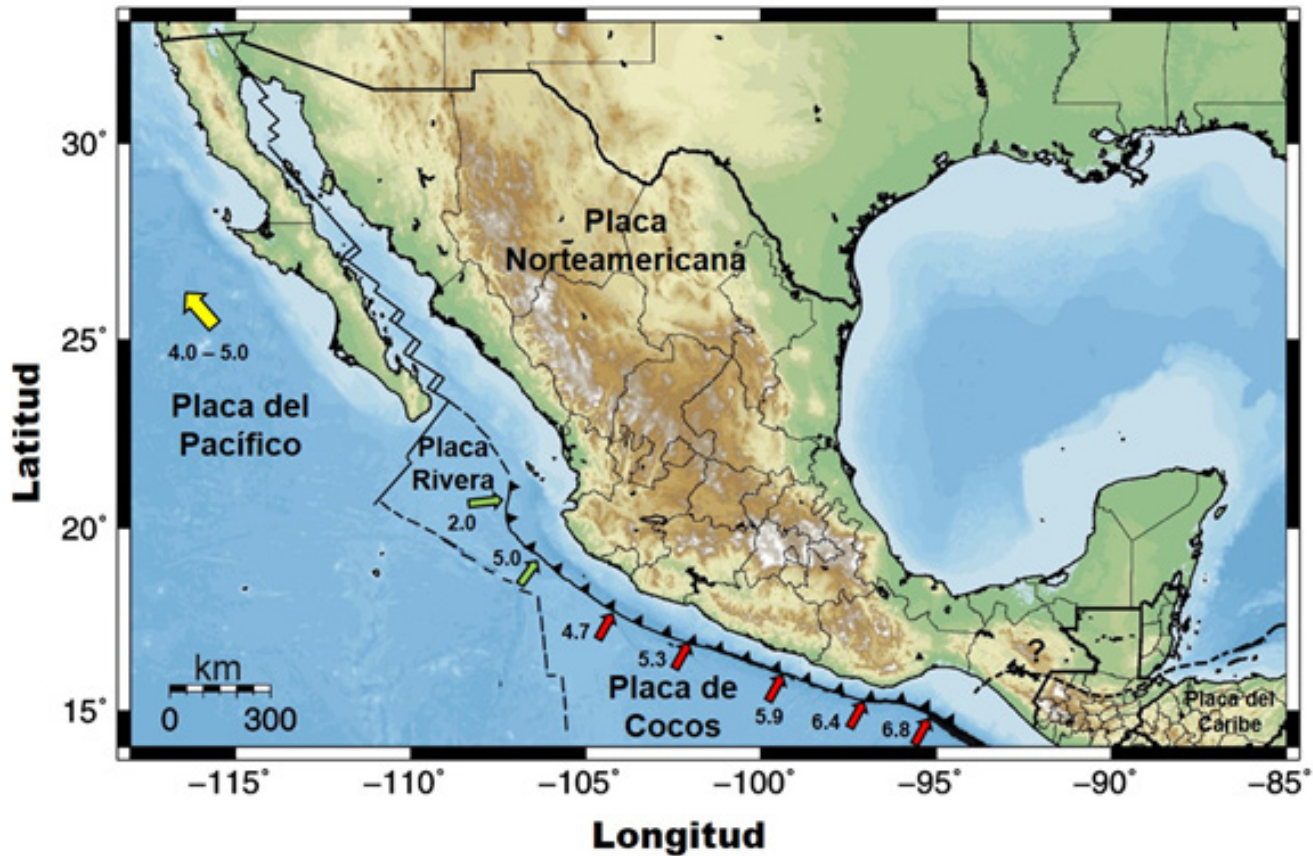


Figura 1. - Placas tectónicas que interactúan en México. Las flechas rojas indican la dirección de movimiento de la placa de Cocos. Las flechas verdes indican el movimiento de la placa Rivera. La flecha amarilla indica el movimiento de la placa del Pacífico. Los números indican la velocidad en cm/año (Modificada de Ávila-Barrientos y Nava, 2020).

evidencia de subducción, a diferencia de su parte sur (límite con la placa de Cocos) donde se observa claramente la subducción de la placa Rivera por debajo de la placa Norteamericana (Dañoibeitia et al., 2016), comienza con inclinación de 8 grados en el norte, alcanzando un ángulo más inclinado en la parte sur de alrededor de 34 grados (Nuñez-Cornú et al., 2016; Gutiérrez et al., 2015). La velocidad de convergencia de las placas también muestra variación. La placa Rivera tiene una velocidad de alrededor de 2 cm/año en su parte norte y alrededor de 5 cm/año en la parte sur (Kostoglodov y Bandy, 1995), mientras que la velocidad de la placa de Cocos en su lado oeste presenta una velocidad de 4 a 5 cm/año y hacia al este una velocidad de alrededor de 6 a 7 cm/año (Pardo y Suárez, 1995).

Por otra parte, en el Noroeste de la República Mexicana, la interacción entre las placas del Pacífico y Norteamericana (Figura 17), se caracteriza por un movimiento lateral-divergente. En esta zona han ocurrido eventos con magnitudes superiores a 7 pero menores a 8. Aún con esto, han sido eventos que han afectado a la población, causando daños severos en la infraestructura urbana.

Sismos de México

México es un país propenso a la ocurrencia de grandes sismos. Muchos esfuerzos por parte de historiadores, arqueólogos y sismólogos se han enfocado en compilar los datos históricos de los grandes sismos. Esta es una tarea complicada,

ya que la magnitud y localización de los eventos se basa en las interpretaciones de los daños causados por sismos de tiempos pasados, cuando había poca población. Es por esto que la magnitud y la localización de los eventos históricos pueden ser inciertas (Singh y Ordaz, 1990). Sin embargo, García y Suárez (1996) lograron realizar una recopilación de eventos sísmicos ocurridos en México desde la época prehispánica hasta principios del siglo XX.

Se cuenta con evidencia de que, desde el año 1500 hasta el 2021, en México han ocurrido más de 100 sismos con magnitud mayor o igual a 7.0 (Singh et al., 1981; García y Suárez, 1996; Kostoglodov y Pacheco, 1999). Algunos de estos eventos han afectado ciudades importantes, en la época prehispánica, colonial y en el México moderno (ciudades de México, Oaxaca, Acapulco, Puebla, entre otras). Derivada de la información de varias fuentes, la Tabla 1 muestra una recopilación de eventos ocurridos en México con magnitudes mayores o igual 7.0, desde el año 1568 hasta el 2021. En la Figura 2 se puede ver la distribución de los mismos en el país, mientras que la Figura 3 muestra la distribución de ocurrencia de los sismos por mes del año; se puede observar que no hay una tendencia preferente de ocurrencia por mes.

Los grandes sismos de México

A continuación, se hace una descripción de los daños más significativos de los cinco grandes terremotos ($M \geq 8.0$) que han afectado a México, desde el de magnitud 8.6 de 1787 hasta el de 8.0 de 1995. Algunos de estos daños se han debido a los efectos de sitio en las poblaciones. Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. Podría decirse que es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas (Gutiérrez, 1999).

Tabla 1. Sismos con $M \geq 7.0$ ocurridos en México (Singh et al., 1981; Kostoglodov y Pacheco, 1999; <http://www.isc.ac.uk/iscgem>; <http://www.ssn.unam.mx>; <http://resnom.cicese.mx>).

No. evento	Longitud	Latitud	Día	Mes	Año	Magnitud
1	-103.5000	20.2000	27	12	1568	7.10
2	-92.5000	16.0000	14	3	1591	7.00
3	-97.6400	17.8200	31	8	1611	7.40
4	-99.0000	16.5000	7	2	1697	7.50
5	-92.7500	16.7500	30	5	1743	7.80
6	-100.0000	16.8000	1	9	1754	7.80
7	-100.0000	16.8000	21	4	1776	7.70
8	-97.0000	16.0000	28	3	1787	8.60
9	-103.8000	18.9000	25	3	1806	7.50
10	-103.6000	19.1000	31	5	1818	7.70
11	-99.6000	17.2000	4	5	1820	7.60
12	-105.0000	20.0000	22	11	1837	7.70
13	-99.2000	16.6000	7	4	1845	7.90
14	-97.0000	16.6000	9	3	1845	7.50
15	-97.6000	16.3000	5	5	1854	7.70
16	-101.6000	19.6000	19	6	1858	7.50
17	-97.4000	18.7000	3	10	1864	7.30
18	-96.7000	15.8000	11	5	1870	7.90
19	-96.6000	15.7000	27	3	1872	7.40
20	-99.1000	17.7000	16	3	1874	7.30
21	-104.6000	19.4000	9	3	1875	7.40
22	-103.8000	21.0000	11	2	1875	7.50
23	-98.0000	18.6000	17	5	1879	7.00
24	-98.2000	17.7000	19	7	1882	7.50
25	-109.2000	31.0000	3	5	1887	7.30
26	-99.8000	17.2000	29	5	1887	7.20
27	-99.7000	17.0000	6	9	1889	7.00
28	-98.6000	16.7000	2	12	1890	7.20
29	-98.0000	16.5000	2	11	1894	7.40
30	-95.4000	16.3000	5	6	1897	7.40
31	-100.5000	17.1000	24	1	1899	7.90
32	-105.0000	20.0000	20	1	1900	7.40
33	-110.0000	26.0000	9	12	1901	7.00

No. evento	Longitud	Latitud	Día	Mes	Año	Magnitud
34	-114.0000	29.0000	12	12	1902	7.10
35	-99.7200	17.6200	16	1	1902	7.00
36	-92.5000	16.5000	23	9	1902	7.70
37	-93.0000	15.0000	14	1	1903	7.60
38	-113.0000	17.0000	17	12	1905	7.10
39	-110.0000	20.0000	10	4	1906	7.10
40	-112.5000	28.0000	16	10	1907	7.10
41	-99.2000	16.7000	15	4	1907	7.60
42	-101.0000	17.0000	27	3	1908	7.00
43	-99.2000	16.7000	26	3	1908	7.50
44	-99.9000	16.8000	30	7	1909	7.20
45	-102.5000	17.5000	7	6	1911	7.60
46	-100.7000	16.9000	16	12	1911	7.50
47	-93.0000	15.5000	9	12	1912	7.00
48	-92.0000	17.0000	30	3	1914	7.20
49	-115.0000	32.0000	21	11	1915	7.00
50	-95.0000	17.5000	2	6	1916	7.00
51	-107.0000	18.0000	16	11	1925	7.00
52	-92.5000	15.5000	10	12	1925	7.00
53	-97.6100	16.8300	4	8	1928	7.40
54	-97.3000	16.3000	9	10	1928	7.50
55	-96.7000	16.3300	17	6	1928	7.60
56	-96.1000	15.6700	22	3	1928	7.50
57	-96.8700	16.3400	15	1	1931	7.80
58	-104.4200	19.5700	3	6	1932	8.20
59	-103.5000	19.5000	18	6	1932	7.80
60	-114.7500	32.0000	31	12	1934	7.10
61	-105.3100	19.0000	30	11	1934	7.00
62	-92.5000	14.7500	14	12	1935	7.30
63	-98.0700	17.1000	23	12	1937	7.40
64	-96.0800	18.4500	26	7	1937	7.30
65	-115.5000	32.7000	19	5	1940	7.10
66	-102.9400	18.8500	15	4	1941	7.60
67	-101.1000	17.6000	22	2	1943	7.40
68	-92.5000	15.0000	28	6	1944	7.10
69	-98.0000	17.0000	6	1	1948	7.00
70	-107.0000	19.0000	29	9	1950	7.00
71	-98.1200	17.2200	14	12	1950	7.20

No. evento	Longitud	Latitud	Día	Mes	Año	Magnitud
72	-94.5000	17.0000	12	12	1951	7.00
73	-113.0000	28.5000	29	4	1954	7.00
74	-99.1000	17.1100	28	7	1957	7.80
75	-99.5800	17.2500	11	5	1962	7.10
76	-99.5700	17.1200	19	5	1962	7.00
77	-100.7700	18.0300	6	7	1964	7.20
78	-95.8770	16.1780	23	8	1965	7.40
79	-97.8000	16.6000	2	8	1968	7.30
80	-92.6830	14.4630	29	4	1970	7.30
81	-103.0190	18.4120	30	1	1973	7.60
82	-96.5510	18.2480	28	8	1973	7.30
83	-96.5860	16.0130	29	11	1978	7.60
84	-101.2630	17.7500	14	3	1979	7.40
85	-98.2220	18.1740	24	10	1980	7.10
86	-102.0610	18.0880	25	10	1981	7.30
87	-98.3390	16.5160	7	6	1982	7.00
88	-102.4680	18.4190	19	9	1985	8.10
89	-101.6810	17.8280	21	9	1985	7.60
90	-103.0450	18.3610	30	4	1986	7.00
91	-92.6870	14.8000	10	9	1993	7.20
92	-104.2450	18.9930	9	10	1995	8.00
93	-98.6670	16.7520	14	9	1995	7.30
94	-93.4740	16.8110	21	10	1995	7.10
95	-97.9800	15.8800	25	2	1996	7.10
96	-102.5800	18.3400	11	1	1997	7.10
97	-97.5390	18.1330	15	6	1999	7.00
98	-97.0040	16.0560	30	9	1999	7.40
99	-102.6600	17.9900	9	8	2000	7.00
100	-104.2200	18.6000	22	1	2003	7.60
101	-115.3390	32.2780	4	4	2010	7.10
102	-98.457	16.264	20	3	2012	7.50
103	-92.3155	14.0272	11	7	2012	7.30
104	-101.4597	17.0110	18	4	2014	7.20
105	-94.1100	14.8500	7	9	2017	8.20
106	-98.7200	18.4000	19	9	2017	7.10
107	-98.0300	16.2500	16	2	2018	7.20
108	-96.1337	15.8033	23	6	2020	7.40
109	-99.93	16.78	7	9	2021	7.10

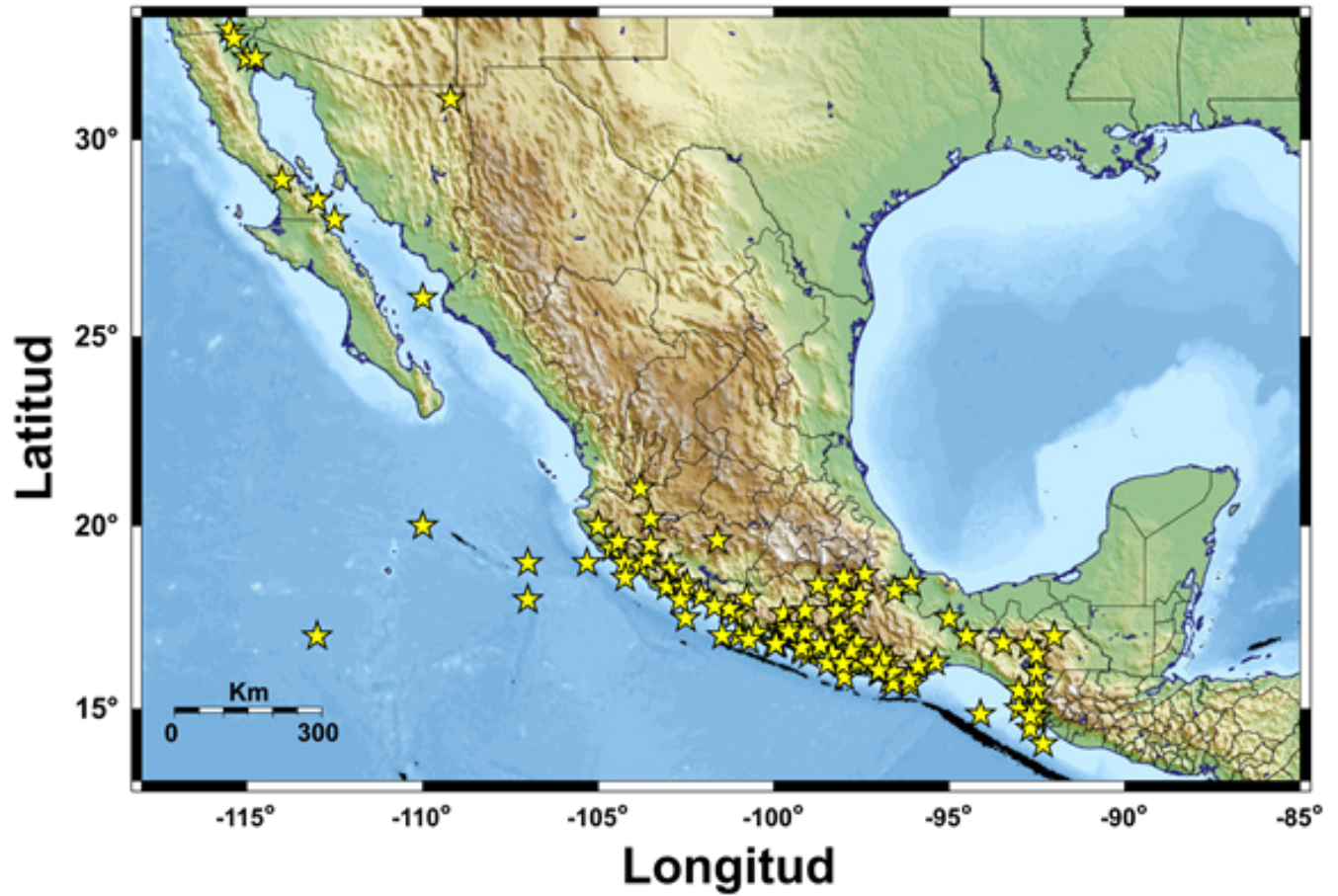


Figura 2. Distribución de los sismos con magnitud mayor o igual a 7.0 ocurridos en México mostrados en la Tabla 1.

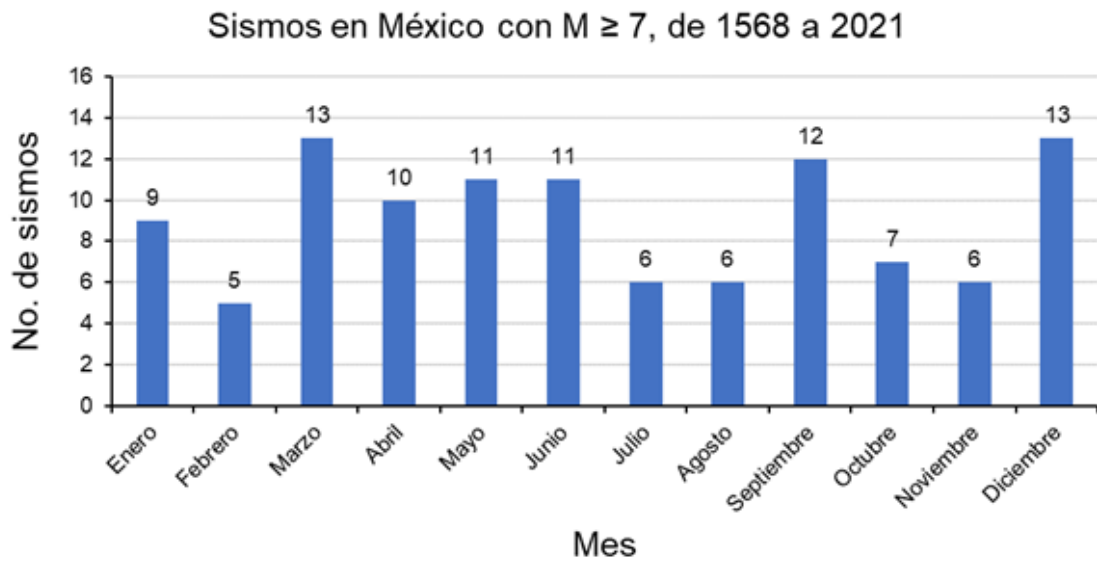


Figura 3. Distribución por mes de sismos con magnitud mayor o igual a 7.0 ocurridos en México, mostrados en la Tabla 1.

El sismo de 1787 (M 8.6)

El evento más grande del cual se tiene conocimiento, en México fue el ocurrido el 28 de marzo de 1787, se le conoce como el temblor de San Sixto. Este evento tuvo su epicentro frente a las costas del estado de Oaxaca y causó un tsunami que afectó las costas de los estados de Guerrero y Oaxaca. Se considera el terremoto más grande que ha ocurrido en México en los últimos 500 años. La máxima intensidad registrada en la ciudad de Oaxaca fue de IX grados en la escala de Intensidad Modificada de Mercalli (IMM) (Suarez y Albini, 2009). Este evento, además de destruir iglesias en ciudades de Oaxaca, colapsó varios edificios. Fue sentido en la Ciudad de México, donde causó daños a algunos edificios, entre ellos el de Palacio Nacional (Sánchez y Farreras, 1993). De acuerdo con Suárez y Albini (2009) se estima una longitud de ruptura de 450 km, por lo que el sismo pudo haber tenido una magnitud de 8.6. Entre sus réplicas más grandes están las ocurridas el 29 y 30 de marzo, y el 3 de abril, con magnitudes que superiores a 7.0. Particularmente, la réplica ocurrida el 3 de abril fue sentida en la ciudad de Oaxaca e incrementó los daños que había ocasionado el evento principal (Suárez y Albini, 2009). El tsunami generado por la ocurrencia de este evento se considera inusual, comparado con los tsunamis generados por otros sismos (históricos e instrumentales). En este caso, la extensión que abarcó el tsunami fue de ~ 380 km, desde Puerto Ángel, Oaxaca, hasta Acapulco, Guerrero (Suárez y Albini, 2009). El tsunami ocasionó daños severos desde el puerto de Acapulco, Guerrero hasta el puerto de Salina Cruz, Oaxaca. Las olas del tsunami alcanzaron alturas de entre 6 y 18 metros cerca de las localidades de Acapulco y Corralero, en Guerrero mientras que en las localidades de Jamiltepec y Tehuantepec, en Oaxaca las alturas alcanzadas fueron de entre 3 y 2 m. (Núñez-Cornú et al., 2008). El agua se internó más de 6 km. en la barra de Alotengo, Oaxaca donde varias personas lograron salvar sus vidas sujetándose a los árboles, mientras

estaban siendo arrastrados por la ola (Sánchez y Farreras, 1993; Núñez-Cornú et al., 2008; Suarez y Albini, 2009).

El sismo de 1932 (M 8.2)

El segundo sismo más grande ocurrido en México, y el primero más grande en registrarse desde la era instrumental (Singh et al., 1985), fue el 3 de junio de 1932. Este evento tuvo una magnitud de 8.2 y se localizó frente a las costas de los estados de Colima y Jalisco (Servicio Sismológico Nacional, 2017a) con una longitud de ruptura estimada de 220 km (Singh et al., 1985). Como consecuencia de este sismo, más de 400 personas perdieron la vida tan sólo en el área epicentral, en Colima murieron otras 20 personas y 70 resultaron heridas. Se registraron daños a más de 200 casas localizadas en las ciudades de Manzanillo, Colima, Zamora, Michoacán, Ayutlán y Acatlán, Jalisco y Zihuatanejo, Guerrero. El evento fue sentido en la Ciudad de México, sin causar daños considerables (Sánchez y Farreras, 1993).

El evento provocó un tsunami que fue observado en las localidades de Manzanillo y Cuyutlán, Colima, Barra de Navidad, Jalisco y San Blas, Nayarit. En este último poblado se inundó todo el puerto. Este fenómeno también causó daños a las vías ferroviarias entre Cuyutlán y Manzanillo, así como en la bahía de San Pedrito (Colima), donde el nivel del mar subió más de tres metros (Sánchez y Farreras, 1993). El tsunami también fue observado en las costas de Hawaii y California, E.U.A. y en las Islas Samoa (Sánchez y Farreras, 1993).

A este evento le siguieron dos más, registrados el 18 de junio con una magnitud de 7.8 y el 22 de junio con una magnitud de 6.9; el primer evento no se considera réplica del evento del 3 de junio, sino un evento distinto. A este tipo de sismos se les denomina dobletes (Servicio Sismológico Nacional, consultado 2017a; Singh et al., 1985). Se estima que este evento tuvo una longitud de ruptura de 60 km (Singh et al., 1985), contigua al área de ruptura del evento del 3 de junio (Figura

4). Este segundo evento también provocó daños en Tecomán, Colima y Guadalajara, Jalisco. En esta última ciudad los edificios de la Catedral y de la Universidad fueron gravemente dañados. Asociado a este sismo se registró también un tsunami con olas hasta de un metro (Sánchez y Farreras, 1993).

El tercer evento (22 de junio de 1932), a pesar de su magnitud (6.9) causó el derrumbe de 400 casas en Colima y provocó un tsunami de grandes proporciones, superior a los producidos por los eventos del 3 y 18 de junio. El tsunami prácticamente destruyó Cuyutlán, Colima mató a 50 personas y 1200 más resultaron heridas (Sánchez y Farreras, 1993; Corona y Ramírez-Herrera, 2012). El tsunami afectó 75 km de la costa de Colima; el mayor daño se presentó en una franja de 6 km de longitud y hasta un kilómetro tierra adentro en Cuyutlán (Sánchez y Farreras, 1993; Corona y Ramírez-Herrera, 2012). Se estima que las olas de este tsunami alcanzaron alturas de entre 10 y 12 metros (Corona y Ramírez-Herrera, 2012). La Figura 5 muestra algunos de los daños causados en el poblado de Cuyutlán, Colima.

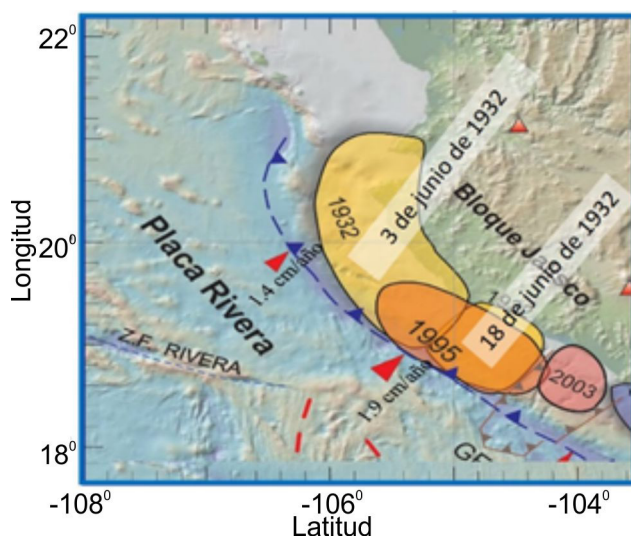


Figura 4. Áreas de ruptura de los eventos del 3 y 18 de junio de 1932. También se observan las áreas de los eventos ocurridos en octubre de 1995 y enero del 2003 (modificado de Kostoglodov y Pacheco, 1999).

El sismo de 2017 (M 8.2)

El sismo ocurrido frente a las costas del estado de Chiapas el día 7 de septiembre de 2017 a las 23:49, hora local del centro de México, con Mw 8.2 (Servicio Sismológico Nacional, consultado 2017c), se considera el segundo sismo más grande registrado en el país (después del evento de 1932); el sismo fue sentido en el centro y sureste del país. Las mayores afectaciones se presentaron en los estados de Chiapas y Oaxaca. En Oaxaca, una de las comunidades más afectadas fue Juchitán (Figura 6). Después de 7 horas de ocurrido el sismo se habían reportado más de 30 muertes y más de un millón de damnificados entre los estados de Tabasco, Oaxaca y Chiapas. El evento dejó 96 personas fallecidas, la mayoría de ellas en Juchitán, Oaxaca y más de 110,000 casas dañadas en los estados de Oaxaca y Chiapas, así como, incontables daños estructurales en Tabasco (Godínez-Domínguez et al., 2021). Después de casi un mes de haber ocurrido el evento se habían registrado 6,286 réplicas; las dos más grandes, tuvieron magnitud de 6.1. La intensidad máxima registrada fue de VIII (IMM) en las costas de los estados de Chiapas y Oaxaca (<https://earthquake.usgs.gov/>). Cabe mencionar que dos semanas después de ocurrir este evento, hubo otro sismo entre los estados de Morelos y Puebla, el día 19 de septiembre de 2017 a las 13:14 horas con Mw 7.1 (Servicio Sismológico Nacional, 2017d), este evento fue sentido en los estados de Morelos, Puebla, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, el Estado de México y la Ciudad de México. Los mayores daños a consecuencia de este sismo se presentaron en los estados de Morelos, Puebla y la Ciudad de México, y hasta el día 28 de septiembre de 2017, se tenían registradas más de 300 muertes. Este sismo tuvo menos réplicas, un poco más de 30, siendo la más grande de M 4.0.

El sismo de 1985 (M 8.1)

Uno de los eventos que marcarían una de las catástrofes más recordadas de nuestro país fue el ocurrido el 19 de septiembre de 1985, a las 07:17

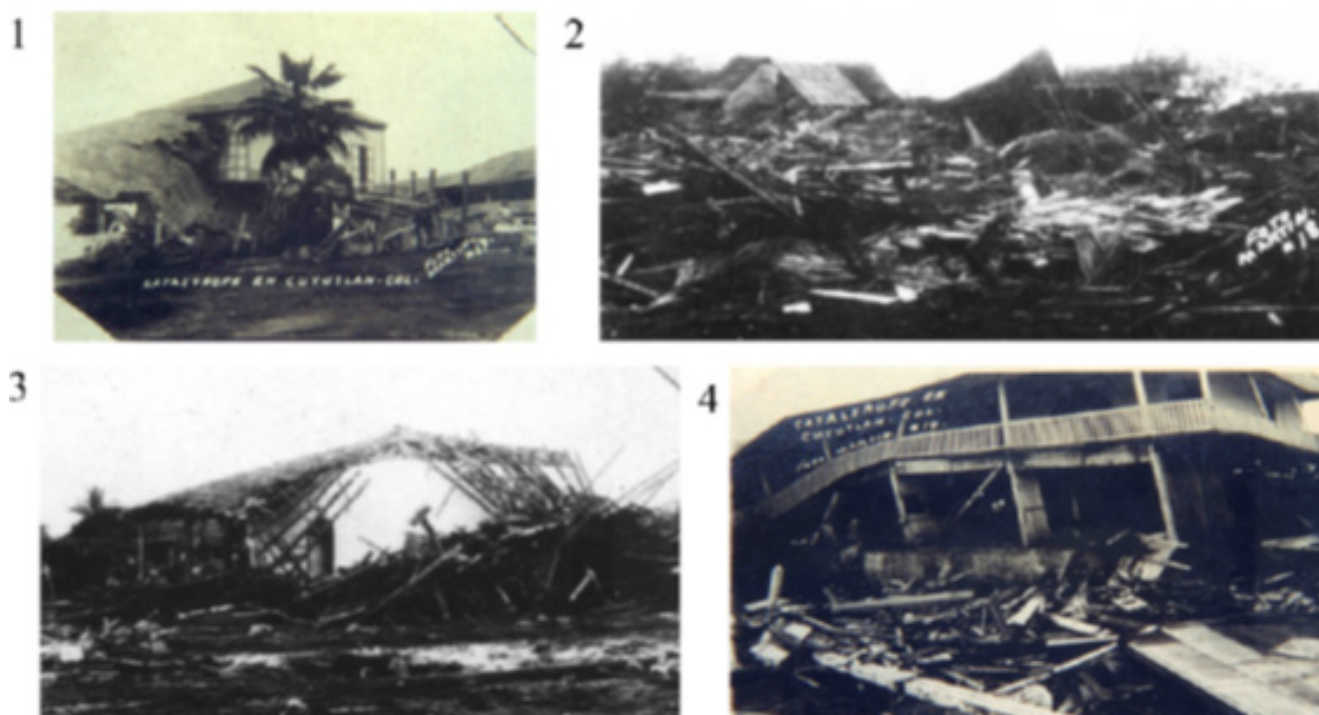


Figura 5. Daños provocados por el Tsunami a causa del sismo del 22 de junio de 1932; 1) El Chalet Aguayo, 2) Casas destruidas, 3) Hotel Santa Cruz y 4) Hotel Ceballos (Tomado de Corona y Ramírez-Herrera, 2012).



Figura 6. Daños provocados por el sismo ocurrido el 7 de septiembre de 2017, en la comunidad de Juchitán, Oaxaca (Tomado de <http://www.eluniversal.com.mx>).

hora del centro del país. Este evento de M 8.1, con epicentro frente a las costas del estado de Michoacán, causó el mayor daño en la Ciudad de México, debido a las características del subsuelo en la zona (Beck y Hall, 1986; Singh et al., 1988). El epicentro del terremoto fue localizado por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) en las coordenadas 17.6° N y 102.5° W, en el Océano Pacífico frente a la desembocadura del Río Balsas (Rosenblueth et al., 1994). Tuvo longitud de ruptura de 180 km (Cruz, 2013).

Como se esperaba, el sismo del 19 de septiembre de 1985 ocurrió en la brecha sísmica de Michoacán. Sin embargo, su intensidad y duración fueron sentidos a una distancia de 400 km en la Ciudad de México (Beck y Hall, 1986) y superó cuanto cabía esperar para un sismo en esta región (Singh et al., 1988). Una característica particular de este sismo es que consistió de dos sub-eventos separados por un periodo de solamente 26 s (Beck y Hall, 1986; Chávez-García y Bard, 1994).

El sismo dejó más de 10,000 muertes y más de 5,000 desaparecidos. Cerca de 300,000 perdieron sus hogares, cerca de 1,000 edificios colapsaron o tuvieron que ser demolidos por los daños, 800,000 km de carreteras fueron dañadas, y más de 4,000 personas fueron rescatadas de los escombros (Beck y Hall, 1986, Servicio Sismológico Nacional, 2017b). El impacto económico se estimó en ese momento en cerca de 5 billones de dólares (Beck y Hall, 1986). Los daños observados en la Ciudad de México se debieron a cuatro razones principales: 1) El evento fue más energético de lo que se esperaba (Singh et al., 1988), 2) Los efectos de sitio de la Ciudad de México, 3) La larga duración del evento (Beck y Hall, 1986) y 4) La desactualización del reglamento de construcciones de la Ciudad de México (Rosenblueth et al., 1994). La Figura 7 muestra los daños registrados en la Ciudad de México.

En la región epicentral, particularmente en el puerto de Lázaro Cárdenas, se presentaron daños significativos a las viviendas, las vías

ferroviarias fueron deformadas (en forma de “S”), como resultado de una intensidad de entre VII y IX (IMM) (Castaños y Lomnitz, 2012). Este sismo generó un tsunami, que es el primero que se ha registrado y observado científicamente en México. La altura máxima de las olas en Lázaro Cárdenas, Michoacán fue de alrededor de dos metros, que aparentemente, no causó daños de consideración, ni víctimas. En términos generales, los daños en el área epicentral fueron menos serios de lo que uno pensaría dada la ocurrencia de un evento de esta magnitud. En la Tabla 2, se muestra un resumen de las intensidades registradas en la escala Modificada de Mercalli (IMM) en diferentes sitios.

Posterior al sismo del 19 de septiembre ocurrió otro evento el 21 de septiembre con magnitud de 7.5. A estos eventos también se les considera como doblete (Servicio Sismológico Nacional, 2017a). Este segundo evento sumó más daños a los ya registrados por el sismo del 19 de septiembre en la Ciudad de México. Algunas de las estructuras que estaban severamente dañadas terminaron por colapsar. El evento causó otro tsunami de menores proporciones al primero.

Tabla 2. Intensidades registradas en diferentes sitios durante el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 (<https://earthquake.usgs.gov/>).

	Ciudad	Intensidad (MM)
Región epicentral	Lázaro Cárdenas, Michoacán	VII
	Playa azul, Michoacán	VII
	Zihuatanejo, Guerrero	VII
	Ixtapa, Guerrero	VII
	Acapulco, Guerrero	IV
	Manzanillo, Colima	IV
En el interior	Ciudad Guzmán, Jalisco	V
Ciudad de México	Periferia del Valle de México	V
	Zonas circunscritas del centro de la ciudad	VII – IX*

* La intensidad en la ciudad de México varió de acuerdo a las condiciones del suelo y al tipo de estructuras.



Figura 7. Daños provocados en la Ciudad de México por el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 (Tomado de Servicio Sismológico Nacional, 2017b).

El sismo de 1995 (M 8.0)

Otro gran sismo ocurrió frente a las costas de los estados de Colima y Jalisco, el 9 de octubre de 1995. Este sismo de magnitud 8.0 generó una ruptura de 170 km, la cual se propagó desde el epicentro hacia el noroeste a una velocidad de 2.2 km/s (Pacheco et al., 1997; Ortiz et al., 1998; Escobedo et al., 1998), la ruptura tuvo una duración de 55 s, ocurrió en un área de 180 x 90 km, en un intervalo de 9 a 33 km de profundidad (Zobin, 1997).

El hipocentro del evento se localizó a una profundidad de 25 km (<http://www.ssn.unam.mx/>) en la parte sureste de la zona de interacción entre la placa Rivera y la placa Norteamericana (Fosa de Manzanillo), registrándose una intensidad de IX (IMM) en la zona epicentral (Zobin, 1997). La actividad de réplicas se presentó principalmente entre el 9 y el 16 de octubre de 1995, siendo la más fuerte la ocurrida el 12 de octubre, con una magnitud de 6.0, localizada al sur del epicentro del evento principal (Zobin, 1997).

De acuerdo con Chávez et al. (2014), el sismo de del 9 de octubre de 1995 puede ser representado por la ruptura de cuatro sub-eventos. El mayor de ellos comenzó 35-40 s después de la ruptura inicial, afectando las regiones superficiales de la zona de subducción, ~100 km hacia el noroeste de la fosa de Manzanillo (Hutton et al., 2001; Courboux et al., 1997).

Este evento causó grandes daños a las poblaciones costeras de los dos estados y fue percibido en las ciudades de Guadalajara y de México, las cuales se encuentran a 250 y 600 km del epicentro, respectivamente. Como consecuencia del este evento, 60 personas perdieron la vida (Zobin, 1997), al menos 48 de éstas fueron en la ciudad de Manzanillo, Colima y al menos otras 10 en las zonas afectadas de Jalisco (García et al., 1997). En el área epicentral y a lo largo de 80 km de la zona costera, cerca de 17,000 estructuras colapsaron o fueron gravemente dañadas, afectando alrededor

de 45,000 habitantes. La comunidad de Cihuatlán fue la más afectada (García et al., 1997). El sismo de 1995 también generó un tsunami con olas de entre 2 y 5 metros, que afectaron pequeñas villas en la costa (Courboux et al., 1997).

Gaps Sísmicos en México

En la zona de subducción del Pacífico mexicano hay zonas donde no ha ocurrido un evento de importancia ($M \geq 7$). A estas zonas, donde no ha ocurrido un sismo en un cierto periodo de tiempo (más de 30 años para México, Singh y Ordaz, 1990), se les denomina brechas sísmicas o gaps sísmicos. En México se han identificado varias brechas sísmicas, según se muestra en la Figura 8. La brecha de Jalisco concluyó su ciclo al ocurrir un evento en 1995; la brecha de Michoacán se liberó por la ocurrencia de un evento en 1981; la brecha sísmica de Ometepec concluye con la ocurrencia de un evento en 1982; la Brecha de Tehuantepec se considera como una zona con tiempos de recurrencia anómalos, dado que en los dos últimos siglos no había ocurrido un evento importante (Singh et al., 1981). El 7 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo con Mw 8.2, cuyo hipocentro se localiza en la placa de Cocos y no en la trinchera (interface Cocos – Norte América), por lo que aún está en duda si la brecha de Tehuantepec se liberó a consecuencia de este evento. La brecha sísmica de Guerrero (Figura 8), se le considera de importancia debido a su localización, la cual representa la distancia más cercana entre la zona de subducción y la Ciudad de México. El último sismo que ocurrió en este segmento fue en el año de 1911 y tuvo una magnitud de 7.5. La Figura 8 muestra que hacia los límites noroeste y sureste de esta brecha sísmica han ocurrido eventos como los de 1962 y 1979, con magnitudes de M 7.0 y M 7.4 respectivamente, y recientemente el ocurrido el 7 de septiembre de 2021 (Acapulco, Guerrero) en el borde sureste con una magnitud de 7.1. La brecha sísmica de Guerrero se considera como una zona con un potencial sísmico alto, dado que por más de 100 años no se ha registrado ningún

Los sismos no solo ocurren en la parte sur del país, las regiones noroeste, centro y este también han sido afectadas (Figura 2) por la ocurrencia de sismos de moderados a fuertes en términos de su magnitud. En la península de Baja California se puede hacer mención del evento de 1892 en Laguna Salada de M 7.2; el de 1902 al Norte de Guerrero Negro de M 7.1; en 1907 al Noroeste de Santa Rosalía de M 7.1; el de 1915 y 1934 al Sureste de Guadalupe Victoria de M 7.0 y 7.1, respectivamente; el sismo de 1956 en San Miguel con M 6.8; y los ocurridos en Mexicali en 1940 y 2010 con M 7.1 y 7.2, respectivamente (Fletcher et al., 2014; <http://www.ssn.unam.mx/>). En el estado de Sonora se pueden mencionar los eventos de 1887 de M 7.4 ocurrido en Bavispe, los de 1932 de M 6.7 en Miguel Alemán y Huatabampo y los de 1945 y 1974 en Guaymas de M 6.8 y 6.3, respectivamente (Singh et al.,

1981; Castro et al., 2009; <http://www.ssn.unam.mx/>).

La parte central del país es importante mencionar los del estado de Puebla, como el ocurrido en Acatlán de Osorio en 1980, de M 7.1 y el ocurrido en 1879 de M 7.0 (Singh et al., 1981), el de 1999 en San Gabriel Chilac con M 7.0; el sismo ocurrido entre los estados de Puebla y Veracruz de M 7.3 en 1864 (Singh et al., 1981); el evento de 2017 de M 7.1 entre los estados de Puebla y Morelos (<http://www.ssn.unam.mx/>); en 1912 el sismo de M 7.0 ocurrido en la falla de Acambay, al noroeste de la Ciudad de México (Singh et al., 2011). En la parte oriental del país, se pueden mencionar los sismos ocurridos en Veracruz, en 2011, de 6.0 y 6.7, en Sayula de Alemán y Las Choapas, respectivamente y el ocurrido en 1920 de M 6.4 ocurrido en Xalapa (Córdoba-Montiel et al., 2018; <http://www.ssn.unam.mx/>).

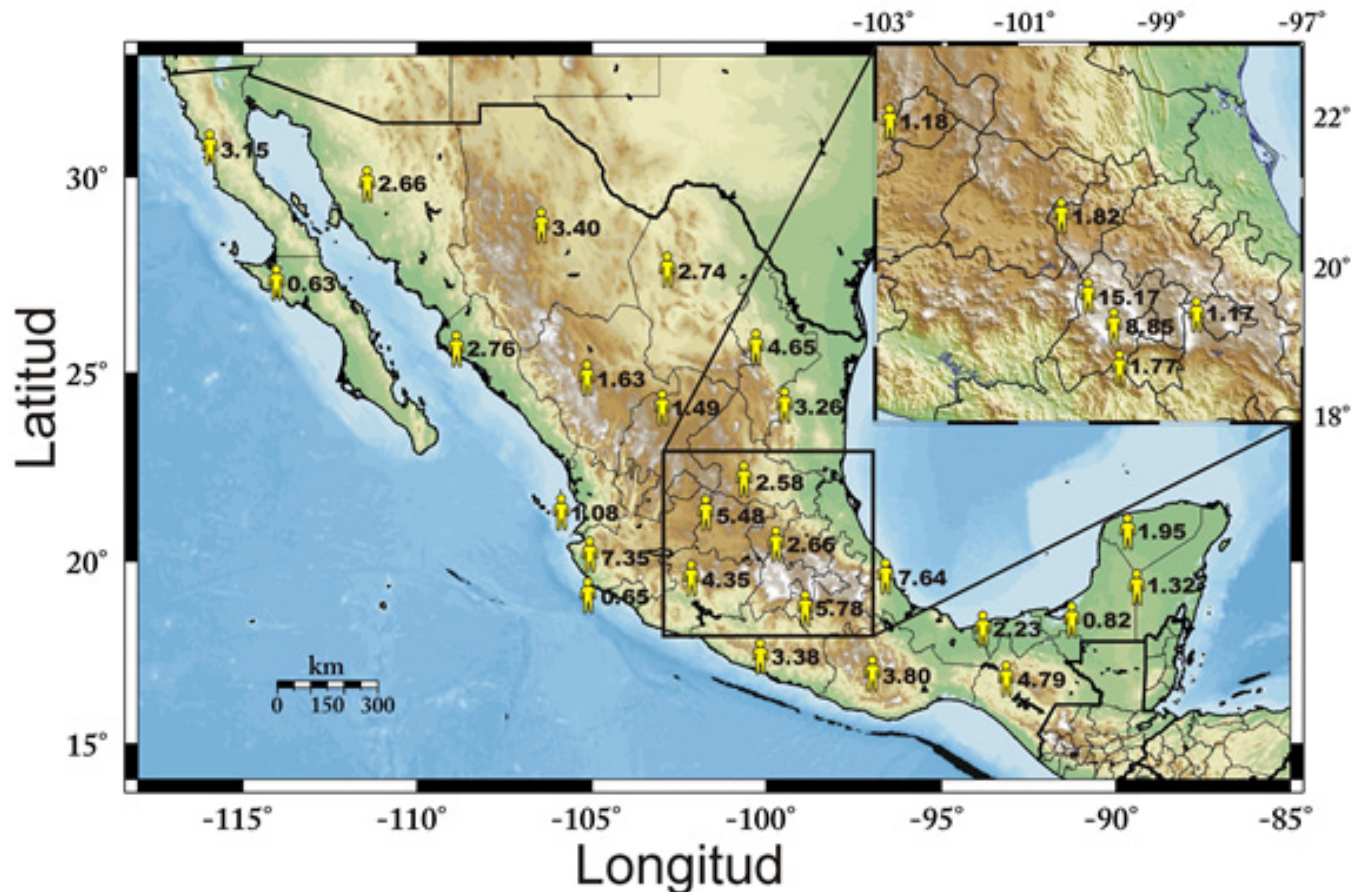


Figura 9. Millones de habitantes por estados en México (elaborada con información del INEGI).

mx/). Estos eventos sísmicos han causado daños a las poblaciones, particularmente en aquellas cercanas al epicentro.

Por lo anterior, el desarrollo de planes de acción para la mitigación del riesgo sísmico es necesario, así como la educación en la prevención ante la ocurrencia de estos eventos, bajo los temas de qué hacer antes, durante y después de un evento sísmico. Todo ello ayudaría a la sociedad a estar preparada ante situaciones de este tipo.

La ocurrencia de eventos grandes ha hecho patente la necesidad de estar preparados ante estos fenómenos naturales. Dado que todavía no es posible predecir los sismos (lugar, magnitud, fecha y hora), es necesario que cada región de alta sismicidad tenga un buen plan de Reducción de Desastre por Sismos.

El programa de Reducción de Desastre por Riesgo sísmico está centrado en tres temas principales: Cálculo del Riesgo, Manejo del Riesgo y Comunicación del Riesgo. Este último desempeña un papel importante, ya que, proveyendo la información oportunamente a las autoridades y a la comunidad, se podrían tomar las medidas necesarias para minimizar las consecuencias que podría provocar la ocurrencia de un sismo. Para que un plan de acción trabaje adecuadamente, la información entre los diversos participantes para la reducción del riesgo debe ser compartida (Academia, Gobierno y Sociedad).

México no está exento de la ocurrencia de otro gran sismo, por lo que es necesario estar preparados como sociedad, para poder afrontar los efectos provocados por este fenómeno natural.

Agradecimientos

Al programa Investigadoras e Investigadores por México - CONACyT (Antes Cátedras CONACyT, proyecto 2602). A Antonio Mendoza Camberos por el apoyo técnico.

Referencias

- Ávila-Barrientos, L., Nava, A., 2020. Gutenberg-Richter b Values Studies Along the Mexican Subduction Zone and Data Constraints. *Geofísica Internacional*, 59-4, 285-298.
- Beck, J. L., Hall, J. F., 1986. Factors Contributing to the Catastrophe in Mexico City During The Earthquake of September 19, 1985. *Geophysical Research Letters*, Vol. 13, No. 6, Pp. 593-596.
- Castaños, H., Lomnitz, C., 2012. Earthquake Disasters in Latin America: A Holistic Approach. *Springer Briefs in Earth Sciences*, Springer, Pp. 69.
- Chávez, M., García, S., Cabrera, E., Ashworth, M., Perea, N., Salazar, A., Chávez, E., Saborio-Ulloa, J., Saborio-Ortega, J., 2014. Site Effects and Peak Ground Accelerations Observed in Guadalajara, Mexico, for the 9 October 1995 Mw 8 Colima-Jalisco, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 5, pp. 2430-2455, doi: 10.1785/0120130144
- Chávez-García, F. J., Bard, P.-Y., 1994. Site Effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, pp. 229-247.
- Córdoba-Montiel, F., Singh, S. K., Iglesias, A., Pérez-Campos, X., Sieron, K., 2018. Estimation of ground motion in Xalapa, Veracruz, Mexico during the 1920 ($M \sim 6.4$) crustal earthquake, and some significant intraslab earthquakes of the last century. *Geofísica Internacional*, 57-2, 89-106.
- Corona, N., Ramírez-Herrera, M. T., 2012. Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June 1932 tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12, 1337-1352.

- Courboux, F., Singh, S. K., Pacheco, J. F., 1997. The 1995 Colima-Jalisco, Mexico, earthquake (MW 8): A study of the rupture process. *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 9, pp. 1019-1022.
- Cruz, V. M. A., 2013. Los Sismos Una Amenaza Cotidiana. *La Caja de Cerillos*. Pp. 108
- Dañobeitia, J., Bartolomé, R., Prada, M., Nuñez-Cornú, F., Córdoba, D., Bandy, W. L., Estrada, F., Cameselle, A. L., Nuñez, D., Castellón, A., Alonso, J. L., Mortera, C., Ortiz, M., 2016. Crustal Architecture at the Collision Zone Between Rivera and North American Plates at the Jalisco Block: Tsujal Project. *Pure and Applied Geophysics*. 173, 3553–3573. DOI 10.1007/s00024-016-1388-7
- Escobedo, D., Pacheco, J. F., Suárez, G., 1998. Teleseismic body-wave analysis of the October, 1995 (MW=8.0), Colima-Jalisco, Mexico earthquake, and its largest foreshock and aftershock. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 4, pp. 547-550.
- Fletcher, J. M., Teran, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hunut, K. W., Mueller, K. J., Spelz, R. M., Akciz, S. O., Masana, E., Faneros, G., Fielding, E. J., LePrince S., Morelan, A. E., Stock, J., Lynch D. K., Elliott, A. J., Gold, P., Liu-Zeng, J., González-Ortega, A., Hinojosa-Corona, A., González-García, J., 2014. Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 April 2010 El Mayor-Cucapah (Mexico) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, V. 10; No. 3; p. 1–31; doi:10.1130/GES00933.1
- García, A. V., Suárez, R. G., 1996. Los sismos en la historia de México, Tomo I. Ediciones Científicas Universitarias; Texto científico universitario; P. 718.
- García, H. J., Whitney, R. A., Guerrero, J. J., Gama, A., Vera, R., Hurtado, F., 1997. The October 9, 1995 Manzanillo, Mexico Earthquake. *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 3, 413-425.
- Godínez-Domínguez, E. A., Tena-Colunga, A., Pérez-Rocha, L. E., Archundia-Aranda, H. I., Gómez-Bernal, A., Ruiz-Torres, R. P., Escamilla-Cruz, J. L., 2021. The September 7, 2017 Tehuantepec, Mexico, earthquake: Damage assessment in masonry structures for housing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102123.
- Gutiérrez, C., 1999. Efecto de sitio. Páginas 15-17, en *Curso sobre diseño y construcción sismorresistente de estructuras*; 1999; Secretaria de Gobernación/ Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 423 páginas.
- Gutiérrez, Q. J., Escudero, C. R., Núñez-Cornú, F. J., 2015. Geometry of the Rivera-Cocos subduction zone inferred from local seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(6), 3104–3113. doi: 10.1785/012010358.
- Hutton, W., DeMets, C., Sánchez, O., Suárez, 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, 637-658.
- Kostoglodov, V., Bandy, W., 1995. Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates. *Journal Geophysical Research*, 100, 17977–17989. doi:10.1029/95JB01484.
- Kostoglodov y Pacheco, 1999. Cien años de sismicidad en México. Instituto de Geofísica, UNAM. (Poster)

- Kostoglodov, V., Singh, S. K., Santiago, J. A., Larson, K. M., Lowry, A. R., Bilham, R., 2003. A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 15.
- Nava, A., 1987. *Terremotos. La ciencia desde México*, Fondo de Cultura Económica. Pp 156.
- Núñez-Cornú, J. F., Córdoba, D., Dañobeitia, J. J., Bandy, W. L., Ortiz, M. F., Bartolome, R., Núñez, D., Zamora-Camacho, A., Espíndola, J. M., Castellón, A., Escudero, C. R., Trejo-Gómez, E., Escalona-Alcázar, F.J., Suárez, C. P., Nava, F. A., Mortera, C., TsuJal Working Group, 2016. *Geophysical Studies across Rivera Plate and Jalisco Block, Mexico: TsuJal Project*. *Seismological Research Letters*, DOI: 10.1785/0220150144
- Núñez-Cornú, F. J., Ortiz, M., Sánchez, J. J., 2008. The great 1787 Mexican Tsunami. *Natural Hazards*, 47, pp. 569-576.
- Ortiz, M., Singh, S. K., Pacheco, J., Kostoglodov, V., 1998. Rupture length of the October 9, 1995 Colima-Jalisco earthquake (MW 8) estimated from tsunami data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 15, pp. 2857-2860.
- Pacheco, J., Singh, S. K., Domínguez, J., Hurtado, A., Quintanar, L., Jiménez, Z., Yamamoto, J., Gutiérrez, C., Santoyo, M., Bandy, W., Guzmán, M., Kostoglodov, V., Reyes, G., Ramírez, C., 1997. The October 9, 1995 Colima-Jalisco, Mexico earthquake (MW 8): An aftershock study and a comparison of this earthquake with those of 1932. *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 17, Pp. 2223-2226.
- Pardo, M., Suárez, G., 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern México: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B7, pp. 12357-12373.
- Rosenblueth, E., García, V. A., Rojas, T. R., Nuñez de la Peña, J., Orozco, J. C., 1994. *Macrosismos: Aspectos físicos, Sociales, Económicos y Políticos*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Mexico D.F. 1a. ed. 55 p.
- Sánchez, D. A. J., Farreras, S. S. F., 1993. *Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México*, Catalog of Tsunamis on the Western Coast of Mexico. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50. United States Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. National Geophysical Data Center. Boulder, Colorado 80303-3328, U. S. A.
- Servicio Sismológico Nacional; 2017a; *Sismos Históricos: Sismos de 1932 (M 8.2, M 7.8 y M 6.9)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, pp. 7.
- Servicio Sismológico Nacional; 2017b; *El Sismo de 1985 en Cifras*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, Cartel.
- Servicio Sismológico Nacional; 2017c; *Reporte Especial: Sismo de Tehuantepec (2017-09-07 M 8.2)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, pp. 9.

- Servicio Sismológico Nacional; 2017d; Reporte Especial: Sismo del día 19 de Septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, pp. 10.
- Singh, S. K., Astiz, L., Havskov, J., 1981. Seismic Gaps and Recurrence Periods of Large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone: A Reexamination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 3, pp. 827-843.
- Singh, S. K., Iglesias, A., Ordaz, M., Pérez-Campos, X., Quintanar, L., 2011. Estimation of Ground Motion in Mexico City from a Repeat of the M_w 7.0 Acambay Earthquake of 1912. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 5, pp. 2015–2028, doi: 10.1785/0120100317
- Singh, S. K., Ordaz, M., 1990. Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una vision actual. *Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres*, pp.34.
- Singh, S. K., Mena, E., Castro, R., 1988. Some aspects of source characteristics of 19 September 1985 earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motions data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 2, pp. 451-477.
- Singh, S. K., Ponce, L., Nishenko, S. P., 1985. The great Jalisco, México, earthquake of 1932: Subduction of the Rivera plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1301-1313.
- Suárez, G., Albin, P., 2009. Evidence for Great Tsunamigenic Earthquakes (8.6) along the Mexican Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 2A, pp. 892-896.
- Suárez, G., Monfret, T., Wittlinger, G., David, C., 1990. Geometry of subduction and depth of the seismogenic zone in the Guerrero gap, México. *Nature*, 345, 336-338.
- Zobin, V., 1997. The rupture history of the MW 8.0 Jalisco, Mexico, earthquake of 1995 October 9. *Geophysical Journal International*, 130, 220-228.

Manuscrito recibido: 10 de septiembre de 2021
 Recepción del manuscrito corregido: 28 de octubre de 2021
 Manuscrito aceptado: 23 de noviembre de 2021

Análisis de contribución de fuentes de contaminación en aguas subterráneas y superficiales utilizando el Modelo de Mezcla Bayesiano

Jürgen Mahlknecht

Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
Ave. Eugenio Garza Sada 2501, C.P. 64849 Monterrey, Nuevo León
jurgem@tec.mx

Resumen

La buena calidad del agua es esencial para sus diferentes usos y para los ecosistemas. Actualmente, al menos la mitad de la población mundial sufre de agua contaminada y con una tendencia creciente. La contaminación de fuente difusa sigue siendo el reto por ser mal reportada y poco regulada. Una de las estrategias para controlar la contaminación difusa es realizar un plan de gestión del agua a nivel cuenca. Para esto se requiere conocer el origen y la contribución de las fuentes contaminantes en los cuerpos receptores de agua. Para este fin se han utilizado trazadores ambientales según la fuente. Inevitablemente, estas técnicas exhiben diversas incertidumbres derivadas de errores de medición, variabilidad espaciotemporal de fuentes, transformación bioquímica y mezcla dinámica. Para reflejar las incertidumbres involucradas en la contribución de fuentes, se ha adoptado un enfoque estadístico, el Modelo de Mezcla Bayesiano. Los estudios actuales de este modelo se han limitado principalmente a comprender la diversidad espaciotemporal de la contaminación del agua. El curso del trabajo futuro debería centrarse en mejorar la precisión de los diseños actuales de análisis de contribución de fuentes y la cooperación y acuerdos entre actores involucrados a nivel cuenca.

Palabras Claves: calidad del agua, contaminación difusa, mezcla de fuentes, contribución de fuentes, trazadores ambientales, modelo Bayesiano.

1. Introducción

La buena calidad del agua es esencial para el bienestar humano, para su uso en agricultura, acuicultura e industria, así como fortalecer los ecosistemas y los servicios que brindan. Mejorar la calidad del agua es un elemento crítico de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030. Cumple un papel fundamental en la reducción de la pobreza y enfermedades, y en la promoción del crecimiento sostenible. Sin embargo, existen grandes rezagos de calidad de agua en todas las regiones del mundo.

Al menos la mitad de la población mundial sufre de agua contaminada; y existe una tendencia a empeorar. El crecimiento de la población y el cambio climático ejercen una presión cada vez mayor sobre la capacidad de los cuerpos de agua (es decir ríos, lagos y acuíferos) para procesar

aguas residuales, nutrientes y contaminantes antes de que pierdan su función de soporte vital. Se proyecta un aumento de la contaminación del agua en todas las regiones del mundo, que tendría un impacto más fuerte en los países de ingresos medios-altos y medios-bajos. A su vez, aumentan los riesgos para la salud humana, el desarrollo económico y los ecosistemas (OCDE, 2017).

En México, en el año 2020, el 64.7% de los 3,493 sitios monitoreados de agua superficial de la Red Nacional de Medición de Calidad de Agua presenta incumplimiento en uno o varios de los parámetros medidos. Con el agua subterránea de la Red se tiene una situación similar: de los 1,068 sitios monitoreados, el 59.4% no cumple en uno o varios de los parámetros medidos (CONAGUA, 2021).

Los contaminantes del agua se caracterizan comúnmente como puntuales o difusos, según su fuente y camino hacia el medio receptor (ríos, lagos, acuíferos). Las fuentes puntuales de contaminación se descargan directamente a los cuerpos receptores de agua en lugares discretos, como tuberías y zanjas de alcantarillado que vienen de una planta de tratamiento de agua residual, municipal o industrial. Las fuentes difusas de contaminación se descargan indirectamente a los cuerpos receptores de agua, a través del flujo superficial y subterráneo y deposición atmosférica a aguas superficiales y la lixiviación a través del suelo a aguas subterráneas. Ejemplos donde se da la contaminación difusa, son la aplicación de fertilizantes, uso de pesticidas y las fugas en el sistema de alcantarillado.

Las fuentes puntuales de contaminación se pueden controlar, porque son más fáciles de identificar y más rentables de cuantificar, gestionar y regular. En comparación, la contaminación de fuente difusa y su impacto en la salud humana y de los ecosistemas sigue siendo en gran parte mal reportada y poco regulada. Esto se debe a que es difícil de monitorear y regular debido a su alta variabilidad, espacial y temporal, lo que hace que la atribución de fuentes de contaminación sea compleja.

Un caso común de contaminación difusa en agua superficial y subterránea en el mundo y en México es la contaminación por nitratos (NO_3), cuyo origen es muy diverso, principalmente fertilizantes, sistemas sépticos y alcantarillado, operaciones o almacenamiento de estiércol, deposición atmosférica de gas de óxido de nitrógeno (NO_x), principalmente del tráfico e industria y amoníaco proveniente de la agricultura (de Vries, 2021).

Los nitratos amenazan los ecosistemas acuáticos y la salud humana. A menudo nos encontramos con la situación de que el nitrato que contamina un cuerpo receptor de agua se deriva de una mezcla de fuentes, pero es imposible identificar su

origen y la contribución de cada fuente mediante un análisis químico convencional. Por otro lado, es importante comprender la contaminación difusa, ya que es clave para desarrollar un plan de gestión apropiado para la protección de los recursos hídricos.

A nivel técnico, se han adoptado trazadores ambientales para resolver los problemas de mezcla de fuentes y comprender el origen de la contaminación del agua. El método clásico es el modelo de mezcla dual de isótopos estables, que puede resolverse de manera sencilla (Aravena et al., 1993; Mayer et al., 2002; Pasten-Zapata et al., 2014). Desafortunadamente, el cálculo determinista convencional no puede reflejar las diversas incertidumbres involucradas en el modelo de mezcla, lo que podría dar lugar a un error en la evaluación cuantitativa (Ji et al., 2017).

La distribución de fuentes de contaminación estudiada mediante la construcción de un modelo de mezcla de este tipo incluye inevitablemente varios errores, considerando a: (i) una superposición significativa en las distribuciones entre varias fuentes de contaminantes; (ii) una variabilidad espacial y temporal en cada fuente del contaminante; (iii) la aparición de procesos complejos de fraccionamiento bioquímico; y (iv) demasiadas fuentes en comparación con el número de trazadores (Meghdadi y Javar, 2018; Torres-Martínez et al., 2020; Ju et al., 2022). Esto puede causar incertidumbre en el modelo de mezcla de fuentes.

El Modelo de Mezcla Bayesiano puede ser útil en resolver esta situación, ya que puede producir la distribución de probabilidad de la contribución proporcional de cada fuente en función de las incertidumbres de los parámetros de entrada. Con eso supera las limitaciones del modelo de mezcla lineal de fuentes (Parnell et al., 2008) (Figura 1). Es más preciso y demuestra ser útil para identificar no solo las contribuciones de la fuente dominante, sino también de otras fuentes potenciales (Xue et al., 2012).

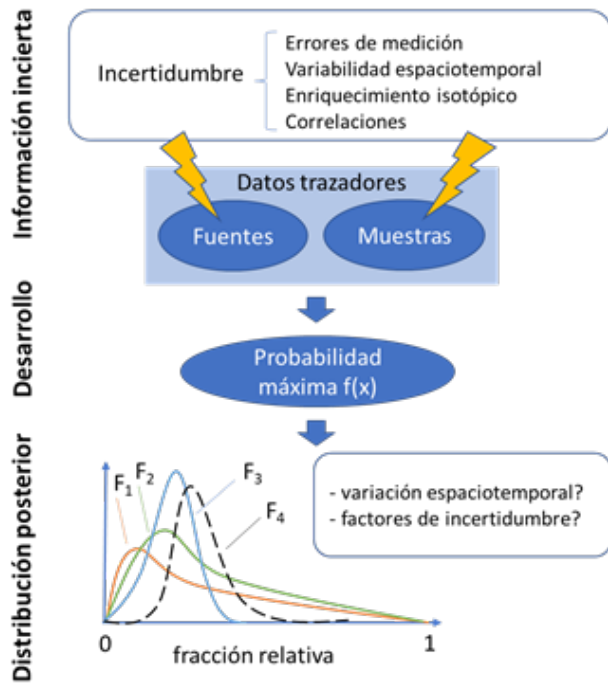


Figura 1. Esquema del Modelo de Mezcla Bayesiano. Tomado y modificado de Parnell et al. (2008) y Ju et al. (2022).

2. Modelo de Mezcla Bayesiano

Los modelos estadísticos Bayesianos estiman los intervalos de confianza para la distribución de fuentes considerando la incertidumbre derivada de la entrada (Moore y Semmens, 2008) (Figura 1). En los problemas computacionales de mezcla de fuentes, el enfoque Bayesiano suele ir acompañado del método de cadenas de Markov de Monte Carlo:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^k P_k (S_{jk} + c_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (2)$$

$$c_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{jk} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (4)$$

En donde X_{ij} es el valor del isótopo j de la muestra i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$ y $j = 1, 2, 3, \dots, N$); P_k es la proporción de la fuente k ($k = 1, 2, 3, \dots, N$) siguiendo la distribución de Dirichlet, que es estimada por el modelo de mezcla; S_{jk} es el valor de fuente k del isótopo j , que se distribuye normal con una media de μ_{jk} y una desviación estándar (σ_{jk}) de ω_{jk}^2 que refleja la incertidumbre espacio-temporal de las fuentes; c_{jk} es el factor de enriquecimiento del isótopo j en la fuente k , que normalmente se distribuye con una media de λ_{jk} y σ_{jk} de τ_{jk}^2 ; y ε_{jk} es el error residual para la variación no cuantificada entre mezclas individuales, que normalmente se distribuye con una media de cero y σ_{jk} de σ_j^2 .

2.1 Programas computacionales

Existen diferentes programas computacionales para ejecutar el Modelo de Mezcla Bayesiano. El llamado Análisis de Isótopos Estables en R (SIAR, por sus siglas en inglés) resuelve las ecuaciones arriba mencionadas de manera simultánea, bajo un código abierto (software R) y proporciona una estimación precisa de la contribución de cada fuente de contaminación (Parnell et al., 2010). MixSIAR (<https://cran.rproject.org/web/packages/siar/index.html>) es una versión más reciente que se desarrolló para permitir condiciones específicas de la situación dentro de un sistema de mezcla de datos y fuentes. Este código tiene una capacidad ampliada en términos de incorporar datos covariables para explicar la variabilidad en las proporciones de la mezcla a través de efectos fijos y aleatorios (Stock et al., 2018).

2.2 Análisis de incertidumbre

Una de las ventajas clave del Modelo de Mezcla Bayesiano frente a los métodos convencionales es que permite a los usuarios evaluar las incertidumbres involucradas en el problema de distribución de fuentes. En muchos casos, la media y la desviación estándar de las fuentes de contaminación se han obtenido de la literatura

basándose en valores estadísticos de muchos sitios. El uso de valores de la literatura genera una desviación estándar alta, lo cual resulta en rangos muy amplios de distribuciones posteriores e implica una mayor incertidumbre en la contribución de cada fuente (Xing et al., 2016). Esta situación podría mejorarse utilizando el material de fuentes del sitio original y adoptando casos específicos que compartan fertilizantes, emisiones de fuentes en condiciones climáticas y topográficas similares (Zhang et al., 2018).

Otro punto para considerar es que los contaminantes pueden ser alterados a través de procesos de transformación bioquímica. Por ejemplo, la volatilización, la nitrificación y la desnitrificación pueden contribuir a los principales procesos de fraccionamiento de los contaminantes de nitratos (Kendall et al., 1998), lo que puede sesgar y agregar incertidumbre a la distribución de la fuente de contaminación. Para una distribución precisa de la fuente, el fraccionamiento isotópico debe reflejarse en el modelo de mezcla de la fuente, con un factor de enriquecimiento (en la Ecuación 1).

3. Retos de investigación y trabajo futuro

La mayoría de los estudios anteriores del Modelo de Mezcla Bayesiano se han centrado en la variación espaciotemporal de las contribuciones proporcionales de las fuentes contaminantes. Sin embargo, el objetivo final de la contribución de fuentes es estimar la fracción de mezcla entre las fuentes designadas con la menor incertidumbre (Figura 1). El marco Bayesiano tiene las fortalezas en términos de distribución de fuentes, ya que puede mejorar el nivel de confianza de la estimación al imponer restricciones adicionales a la estructura de mezcla de fuentes.

Este sofisticado modelo de mezcla refleja la realidad del sistema natural; sin embargo, probablemente aumenta la incertidumbre en la estimación con un sistema de mezcla mal especificado (N de estimaciones $>$ N de restricciones). La observación representativa

de este problema fue descubierta por Xue et al. (2009), quien mostró que una pequeña variación en la observación resultó en un gran cambio en la distribución de fuentes. Este fenómeno se atribuye generalmente a la falta de restricciones sobre las posibles distribuciones de fuentes, que podrían mejorarse mediante el muestreo repetido de muestras de fuentes y mezclas. Ding et al. (2014) también declararon que las muestras de agua adicionales podrían reducir la incertidumbre de la distribución de fuentes. Sin embargo, un muestreo de campo adicional requiere mucho tiempo, trabajo y recursos, lo que limita el estudio de distribución de fuentes mejorado.

La incorporación de parámetros geoquímicos convencionales y rentables en el Modelo de Mezcla Bayesiano puede mejorar el nivel de confianza de la distribución de fuentes. Esto introduce restricciones adicionales en el modelo de mezcla de fuentes, reduciendo así la incertidumbre de la distribución de fuentes. Por ejemplo, los haluros bromo, cloro y yodo son de naturaleza conservadora y se pueden utilizar para identificar posibles fuentes de contaminación en solutos (Pasten-Zapata et al., 2014). Las proporciones de ciertos otros isótopos pueden distinguir claramente la fuente de aguas residuales de nitrato de las fuentes derivadas del estiércol o deposición atmosférica (Torres-Martínez et al., 2021b; Torres-Martínez et al., 2021b). También la combinación del Modelo de Mezcla Bayesiano con indicadores microbiológicos puede potencialmente reducir la incertidumbre en la contribución de las fuentes.

En una mezcla de fuentes es probable que la contribución proporcional de cada fuente contaminante tenga una correlación con las actividades antropogénicas en la superficie. La información de covariables, como por ejemplo el uso y la cobertura del suelo, se pueden incorporar al modelo. Este proceso puede ayudar a reducir la incertidumbre en la contribución de fuentes.

Por último, para que sea exitoso un plan de gestión de la calidad del agua, además de la identificación y cuantificación de la contaminación difusa y sus fuentes, se requiere la evaluación de los riesgos ambientales, económicos y sociales, la definición de un nivel apropiado de control de contaminación y la determinación de las actividades prioritarias, todo ello basado en el conocimiento, la cooperación y los acuerdos entre los actores involucrados a nivel cuenca (OCDE, 2017).

4. Conclusiones

El Modelo de Mezcla Bayesiano representa un avance obvio frente a los modelos de mezcla lineal ya que puede producir la distribución de probabilidad de la contribución proporcional de cada fuente en función de las incertidumbres de los parámetros de entrada. Con esto el modelo obtenido es más preciso y demuestra ser útil para identificar no solo las contribuciones de la fuente dominante, sino también de otras fuentes potenciales. El beneficio clave del marco Bayesiano es que determina las incertidumbres relacionadas con la contribución de las fuentes. Para futuras investigaciones, se sugiere explorar más estrategias para ayudar a mejorar el Modelo de Mezcla Bayesiano en la evaluación de contribución de fuentes: (i) incorporando información externa (parámetros geoquímicos y microbiológicos adicionales) que está relacionada con la distribución natural del parámetro de entrada y; (ii) considerando información covariable, como por ejemplo el uso y la cobertura de suelo.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) por el apoyo recibido en la recolección de información y logística de campo durante los proyectos realizados relativos al tema

de este artículo. La cátedra de Economía Circular del Agua FEMSA del Tecnológico de Monterrey (ITESM) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) brindaron apoyos financieros para el gasto operativo, becas y estímulo del Sistema Nacional de Investigadores. Finalmente se agradece al revisor anónimo por sus valiosos comentarios, que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Aravena, R., Evans, M. L., Cherry, J. A. (1993). Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from septic systems. *Groundwater*, 31(2), 180-186. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb01809.x>
- CONAGUA (2021) Red Nacional de Medición de Calidad del Agua. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- de Vries, W. (2021). Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>
- Ding, J., Xi, B., Gao, R., He, L., Liu, H., Dai, X., Yu, Y. (2014). Identifying diffused nitrate sources in a stream in an agricultural field using a dual isotopic approach. *Science of the total environment*, 484, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.018>
- Ji, X., Xie, R., Hao, Y., Lu, J. (2017). Quantitative identification of nitrate pollution sources and uncertainty analysis based on dual isotope approach in an agricultural watershed. *Environmental Pollution*, 229, 586-594. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.100>

- Ju, Y., Mahlkecht, J., Lee, K. K., Kaown, D. (2022). Bayesian approach for simultaneous recognition of contaminant sources in groundwater and surface water resources. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100321. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100321>
- Kendall, C. (1998). Tracing sources and cycling of nitrate in catchments. *Isotope tracers in catchment hydrology*, 839. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81546-0.50023-9>
- Mayer, B., Boyer, E. W., Goodale, C., Jaworski, N. A., Van Breemen, N., Howarth, R. W., Seitzinger, S., Billen, G., Lajtha, K., Nadelhoffer, K., Van Dam, D., Hetling, L.J., Nosal, M., Paustian, K. (2002). Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the northeastern US: Isotopic constraints. *Biogeochemistry*, 57, 171-197. <https://doi.org/10.1023/A:1015744002496>
- Meghdadi, A., Javar, N. (2018). Quantification of spatial and seasonal variations in the proportional contribution of nitrate sources using a multi-isotope approach and Bayesian isotope mixing model. *Environmental pollution*, 235, 207-222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.078>
- Moore, J. W., Semmens, B. X. (2008). Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models. *Ecology letters*, 11(5), 470-480. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01163.x>
- OCDE, (2017). *Degraded Waters: Emerging Policy Solutions*. Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico. Paris, Francia. <https://www.oecd.org/environment/resources/Diffuse-Pollution-Degraded-Waters-Policy-Highlights.pdf>
- Parnell, A. C., Haslett, J., Allen, J. R., Buck, C. E., Huntley, B. (2008). A flexible approach to assessing synchronicity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history. *Quaternary Science Reviews*, 27(19-20), 1872-1885. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.07.009>
- Parnell, A. C., Inger, R., Bearhop, S., & Jackson, A. L. (2010). Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PloS one*, 5(3), e9672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672>
- Pastén-Zapata, E., Ledesma-Ruiz, R., Harter, T., Ramírez, A. I., Mahlkecht, J. (2014). Assessment of sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area by using a multi-tracer approach. *Science of the Total Environment*, 470, 855-864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.043>
- Stock, B. C., Jackson, A. L., Ward, E. J., Parnell, A. C., Phillips, D. L., Semmens, B. X. (2018). Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *PeerJ*, 6, e5096. <https://doi.org/10.7717/peerj.5096>
- Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Knappett, P. S., Ornelas-Soto, N., Mahlkecht, J. (2020). Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model. *Water Research*, 182, 115962. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115962>

- Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Mahlkecht, J., Daesslé, L. W., Cervantes-Avilés, P. A., Ledesma-Ruiz, R. (2021a). Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution*, 269, 115445. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115445>
- Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Mahlkecht, J., Kaown, D., Barceló, D. (2021b). Determining nitrate and sulfate pollution sources and transformations in a coastal aquifer impacted by seawater intrusion—A multi-isotopic approach combined with self-organizing maps and a Bayesian mixing model. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126103. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126103>
- Xing, M., Liu, W. (2016). Using dual isotopes to identify sources and transformations of nitrogen in water catchments with different land uses, Loess Plateau of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(1), 388-401. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5268-y>
- Xue, D., Botte, J., De Baets, B., Accoe, F., Nestler, A., Taylor, P., Van Cleemput, O., Berglund, M., Boeckx, P. (2009). Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface-and groundwater. *Water Research*, 43(5), 1159-1170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.048>
- Xue, D., De Baets, B., Van Cleemput, O., Hennessy, C., Berglund, M., Boeckx, P. (2012). Use of a Bayesian isotope mixing model to estimate proportional contributions of multiple nitrate sources in surface water. *Environmental Pollution*, 161, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.09.033>
- Zhang, M., Zhi, Y., Shi, J., Wu, L. (2018). Apportionment and uncertainty analysis of nitrate sources based on the dual isotope approach and a Bayesian isotope mixing model at the watershed scale. *Science of the Total Environment*, 639, 1175-1187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.239>
- Torres-Martínez, J. A., Mora, A., Mahlkecht, J., Daesslé, L. W., Cervantes-Avilés, P. A., & Ledesma-Ruiz, R. (2021a). Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution*, 269, 115445. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115445>

Manuscrito recibido: 8 de enero de 2022
 Recepción del manuscrito corregido: 21 de enero de 2022
 Manuscrito aceptado: 31 de enero de 2022

Un perfil sísmico de reflexión somera en el complejo de la caldera La Reforma, Baja California Sur, México

Gómez-Ávila M.C.^{1,2*}, Gómez-Arias E.³, González-Escobar M.², González-Fernández A.² Sena-Lozoya E.B.², Lira-Martínez, M.A¹.

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, 32310, México.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BC, 22860, México.

³CONACYT-Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BC, 22860, México.

*marianggy.gomez@uacj.mx

Resumen

El complejo de la caldera La Reforma, se localiza al este del complejo volcánico Las Tres Vírgenes y al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur. Actualmente, la caldera corresponde a una zona de interés geoenergético, por lo que el objetivo de este trabajo fue realizar la adquisición, procesamiento e interpretación de un perfil sísmico de reflexión somera para identificar posibles alteraciones en las propiedades físicas del subsuelo, como la elasticidad de los materiales (cuya variación se ve reflejada en la velocidad de propagación de las ondas elásticas) ocasionadas por la posible presencia de zonas de fallas y fracturas y también la posible existencia de alteración hidrotermal somera. La adquisición de los datos se realizó utilizando una fuente sísmica GISCO ESS500TM con marro de 222 kg. Se procesaron e interpretaron 2.2 km de datos sísmicos adquiridos en la caldera La Reforma, donde se identificaron estructuras geológicas y sismorelectores de interés. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran numerosas fallas con buzamiento predominante al suroeste, además de dos reflectores sísmicos que podrían delimitar dos capas de basaltos y riolitas e ignimbritas, donde se infiere que las zonas de baja amplitud y velocidad podrían corresponder a zonas con alteración hidrotermal.

Palabras Claves: Complejo de la caldera La Reforma, Sísmica de reflexión, Sismorelectores, Geotermia.

Abstract

The La Reforma caldera complex is located east of the Las Tres Vírgenes volcanic complex and north of the town of Santa Rosalía, Baja California Sur. Currently, the caldera corresponds to an area of geoenergetic interest; hence, the objective of this work was to acquire, process, and interpret a shallow reflection seismic profile to identify possible alterations of the physical properties of the shallow subsoil, such as the elasticity of the materials (whose variation is reflected in the speed of propagation of elastic waves) caused by the possible presence of fault and fracture zones and also the possible existence of shallow hydrothermal alteration. Data acquisition was performed using a GISCO ESS500TM seismic source with a 222 kg hammer. 2.2 km of seismic data acquired in the La Reforma caldera were processed and interpreted, and geological structures and seismorelectors of interest were identified. The results obtained in this work show numerous faults dipping predominantly towards southwest. In addition, we interpret two seismic reflectors that could delimit two layers of basalts, rhyolites, and ignimbrites, where it is inferred that the zones of low amplitude and speed could correspond to zones of hydrothermal alteration.

Palabras Claves: La Reforma caldera complex, Seismic reflection, Seismorelectors, Geothermal prospecting.

Introducción

La Geotermia es una energía renovable y prácticamente inagotable, pues aprovecha el calor interno natural de la Tierra. El uso de esta energía tiene un impacto ambiental mínimo si es comparada con las energías no renovables (convencionales), ya que los fluidos hidrotermales que se extraen de los yacimientos (reservorios) para la producción y generación de energía eléctrica aporta mínimas emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (bajas emisiones de gases de efecto invernadero). La utilización de la geotermia como energía renovable ofrece muchas ventajas en cuanto a las formas de aprovechamiento del calor interno de la Tierra y en diversas aplicaciones que favorecen el desarrollo económico y tecnológico en la sociedad.

Las condiciones favorables para el desarrollo y explotación de la energía geotérmica se dan en regiones del planeta donde la actividad tectónica, sísmica y volcánica se configura para crear un yacimiento o campo geotérmico que pueda ser explorado principalmente para la generación de energía eléctrica. Otra forma de aprovechar el calor geotérmico es lo que se conoce como usos directos ya sea en procesos industriales, deshidratación de alimentos, climatización de viviendas, o balneología, entre otros.

México, es un país que por su localización geográfica, geológica y geotectónica cuenta con numerosas anomalías y manifestaciones geotérmicas tanto en los sitios cercanos a los límites de placas tectónicas y también en otras zonas ubicadas dentro de la placa continental. Por ello es necesario y pertinente explorar nuevas áreas con la finalidad de evaluar zonas con potencial geotérmico. Tal es el caso de las calderas la Reforma (CR), El Aguajito (CEA) y el complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV),

los cuales se localizan al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. En el CVLTV se ubica el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV), uno de los cuatro campos en México operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Actualmente, las calderas CR y CEA corresponden a zonas de interés geoenergético y, en estas áreas se realizaron estudios de exploración geofísica: Sena-Lozoya et al. (2020) realizaron estudios sísmicos en la CR (al noreste del CGLTV), generando modelos 1D y 2D aplicando el método MASW, en donde identifican tres capas de distintas velocidades sísmicas. Casallas et al. (2021) realizaron un análisis de estructuras del subsuelo basado en métodos sísmicos (en el CVLTV y en el CGLTV) y gravimétricos (en el CGLTV y en la CEA), elaborando un modelo 2D que representa las principales unidades litológicas y estructuras ubicadas bajo el subsuelo.

El método sísmico de reflexión se basa en el análisis de las ondas sísmicas reflejadas que viajan a través de diferentes interfaces del subsuelo y dicho método geofísico ha sido utilizado para delimitar la geometría del subsuelo, para identificar posibles fallas o fracturas, así como detectar los contrastes de impedancia acústica, que correspondan a distintas litologías en función de los cambios de las densidades de las rocas y velocidades sísmicas en el medio. La utilidad de los métodos sísmicos en los campos geotérmicos es principalmente definir la morfología del posible yacimiento geotérmico, identificar las principales secuencias litológicas y delimitar las zonas de fallas y fracturas que pudieran servir como conductos para la infiltración de aguas meteóricas y como espacios donde haya lugar para la circulación de fluidos geotérmicos.

En este trabajo se describen los resultados de la adquisición e interpretación de 2.2 km de datos sísmicos (reflexión) adquiridos en la CR en 2017.

Área de estudio

El CVLTV se localiza al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. La vía de acceso al complejo es a través de la carretera federal número 1. En el CVLTV se localizan los volcanes denominados La Virgen, El Azufre y

el Viejo, los cuales se encuentran alineados en dirección SO-NE; hacia el este de los tres volcanes mencionados se encuentran la CR y hacia el norte la CA. El perfil sísmico de reflexión fue adquirido en las adyacencias de la CR y tiene una orientación suroeste-noreste (Figura 1).

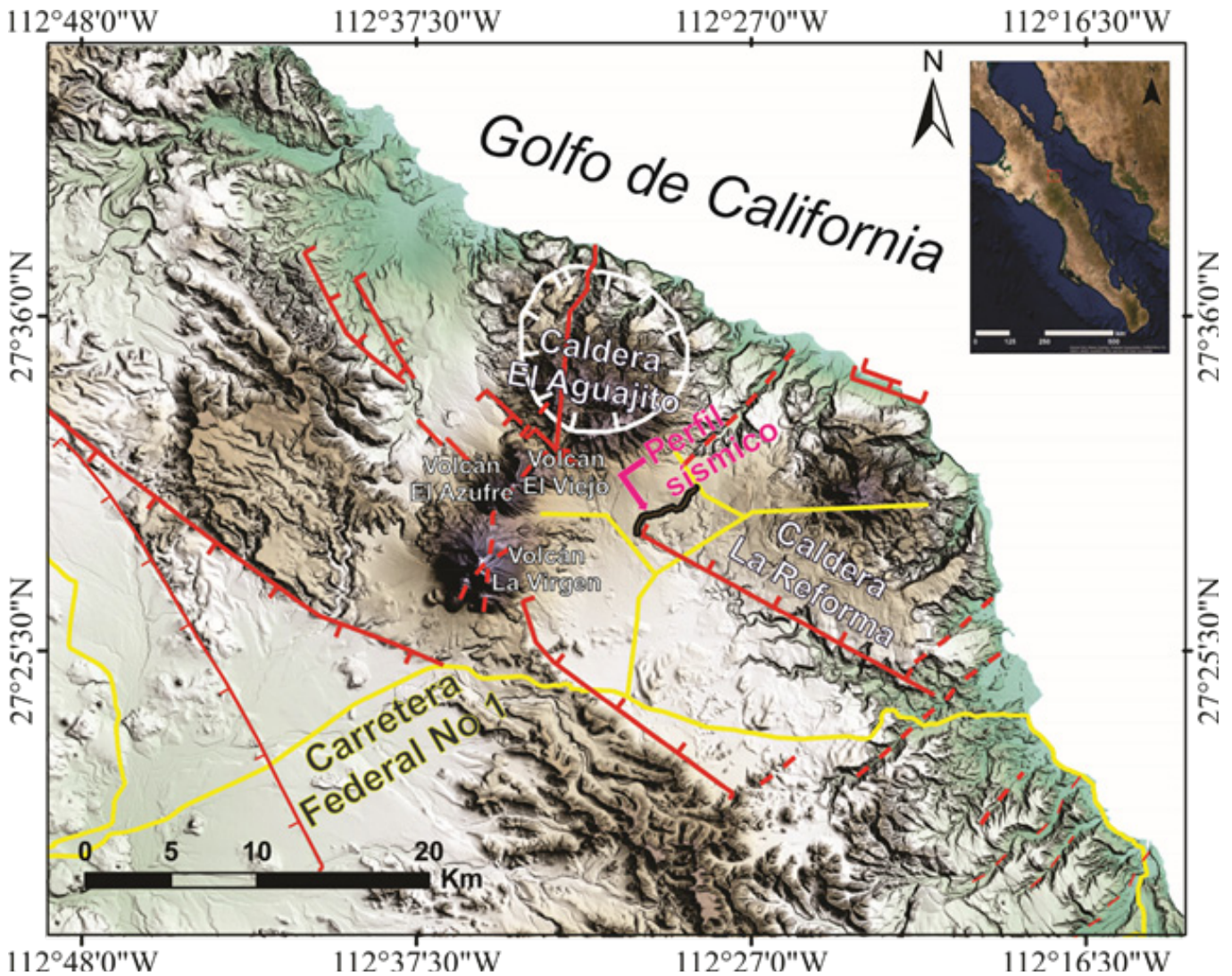


Figura 1. Mapa de ubicación del perfil sísmico en el área de estudio. Se muestra la localización de los tres volcanes alineados, de suroeste a noreste: volcán La Virgen, volcán El Azufre y volcán El Viejo, además de las calderas La Reforma y El Aguajito. La línea negra muestra la ubicación de los datos adquiridos para el perfil sísmico de reflexión con orientación suroeste-noreste. Las líneas continuas de color rojo corresponden a fallas normales y las líneas segmentadas en color rojo son fallas inferidas (tomadas de Antayhua Vera, 2017).

Geología local

El CVLTV los complejos de la CR y la CEA se encuentran dentro del dominio tectónico transtensional que provocaron la separación de Baja California del occidente de México, configurando el actual Golfo de California o Mar de Cortés. Dicho proceso se inició hace 12 Ma, pasando transicionalmente de un ambiente de subducción de las Placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa de Norte América, a un ambiente de “rift” después de los 5 Ma (Macías-Vásquez y Jiménez Salgado, 2013; Fletcher et al., 2007). Actualmente, el CVLTV se sitúa dentro del dominio tectónico de esfuerzos transtensionales asociado a cuencas “pull-apart” del sistema de fallas laterales derechas que controlan la apertura del Golfo de California (Stock y Hodges, 1989; Fletcher et al., 2007). Este tipo de régimen de esfuerzos dentro del área se caracteriza por un magmatismo esporádico pero persistente durante el Plioceno-Cuaternario.

Respecto a la actividad volcánica de la CR, se han identificado tres procesos principales de actividad piroclástica. Los dos más antiguos aparentemente se depositaron en ambiente marino y el más reciente es subaéreo (López et al., 1994). La expulsión de este material pudo generar diferentes colapsos caldéricos, sin embargo, la formación de la caldera solo es visible en el último ciclo eruptivo, que dejó un anillo de colapso que bordea a esta estructura (Figura 2). El núcleo levantado de la caldera es parte de un fenómeno resurgente asociado a un nuevo aporte de magma y los movimientos isostáticos compensatorios (López et al., 1994). Los flujos piroclásticos y de lavas cubrieron 10 km a la redonda de la CR con un espesor aproximado de 10 a 50 m, los cuales encuentran radialmente inclinados desde el centro de la caldera (Garduño-Monroy et al., 1993). El volumen inferido de rocas piroclásticas expulsadas es de alrededor de 5 a 10 km³, mientras que el de los basaltos es de

0.5 km³, aproximadamente (Garduño-Monroy et al., 1993; Dmochowski, 2005). De acuerdo a las edades radiométricas se infiere que la actividad volcánica en La Reforma cesó hace 0.8 Ma (López et al., 1994).

En la Figura 2 se muestran las principales unidades litológicas del área de estudio y las estructuras geológicas. Las estructuras más abundantes interpretadas son fallas normales laterales y otros lineamientos estructurales.

Metodología

Se realizó la adquisición de 2.2 km de datos de sísmica de reflexión somera en la CR en 2017 (Figura 3). Los datos fueron adquiridos utilizando una fuente sísmica impulsiva (GISCO ESS500) montada sobre un remolque y accionada eléctricamente con marro de 222 kg (Figura 4). La distancia entre estaciones fue de 10 m y la distancia entre puntos de tiro fue de 5 m, con un intervalo de muestreo de 0.125 ms y tiempo de grabación de 2s. Los datos sísmicos de reflexión multicanal fueron procesados con el software ProMax[®] siguiendo una secuencia convencional de procesado (Yilmaz, 2001) que incluyó las tres etapas (Figura 5). a) Pre-apilamiento: edición de trazas, geometría, corrección por estáticas, deconvolución, aplicación de filtros (top-mute, pasa bandas y F-K). b) Apilamiento: agrupamiento por CDP, análisis de velocidad y corrección por Normal Move Out (NMO). c) Post-apilamiento: divergencia esférica, migración en tiempo y migración en profundidad. La interpretación geológica se realizó en el software SeisWork[®] e incluyó un estudio de las principales características sismoestratigráficas y estructurales de las secuencias sísmicas observadas en el perfil sísmico de reflexión.

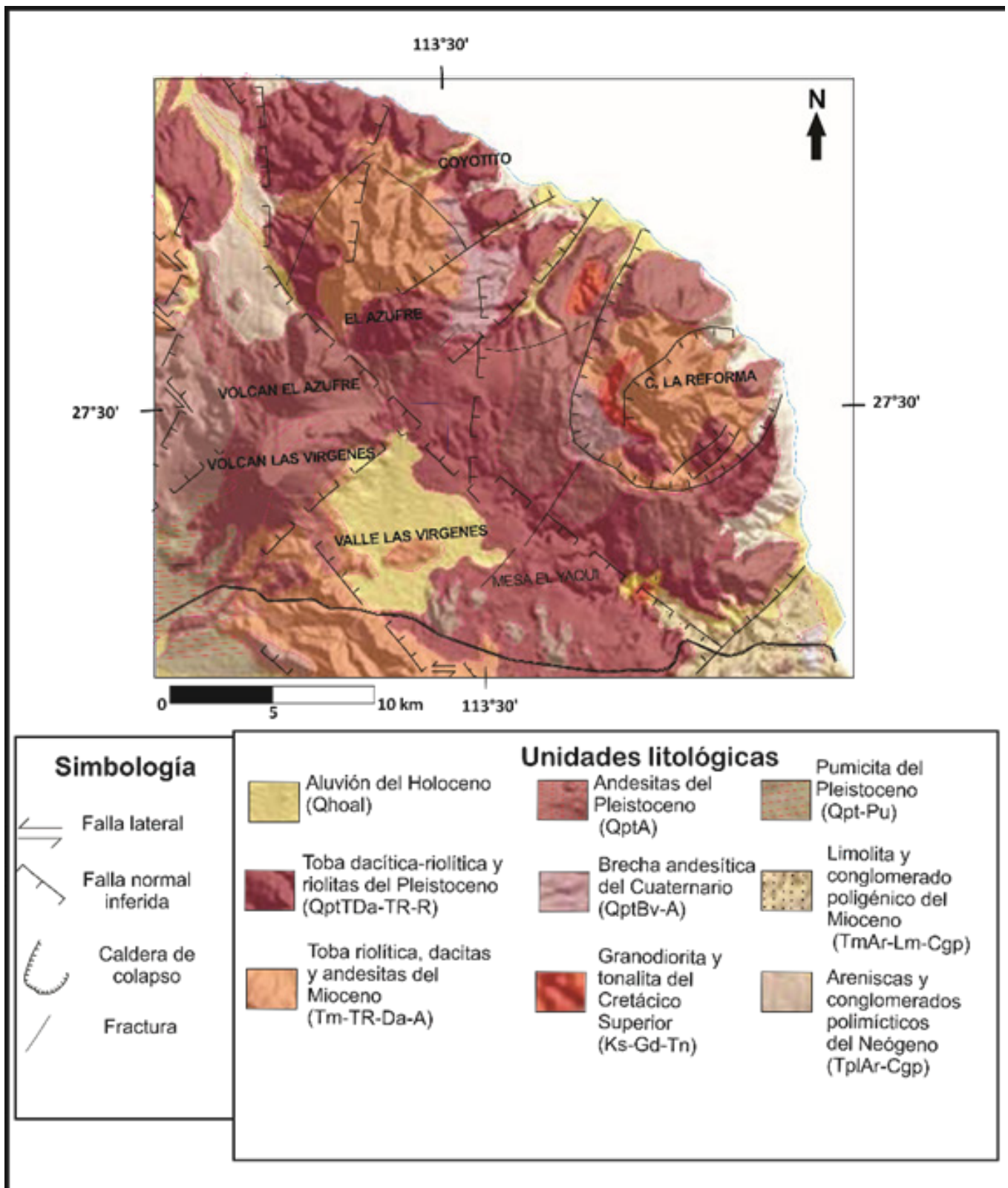


Figura 2. Mapa geológico del complejo volcánico Las Tres Virgenes y las calderas La Reforma y El Aguajito. Tomado y modificado de la carta geológica-minera de Baja California Sur, elaborada por el SGM (2008).



Figura 3. Ubicación del perfil sísmico de reflexión. Los círculos de color azul corresponden a cada uno de los disparos en la adquisición de los datos durante la etapa de campo, utilizando la Fuente sísmica impulsiva (GISCO-ESS500TM). Los círculos color morado corresponden a dos pozos de 55 m de profundidad (Pozo 1 y Pozo 2) los cuales fueron perforados en 2017.

Figura 4. Fuente sísmica impulsiva ESS500-GISCO™ montada sobre un remolque y accionada eléctricamente con marro de 222 kg, misma que fue utilizada en la adquisición de datos sísmicos de reflexión en la caldera La Reforma.

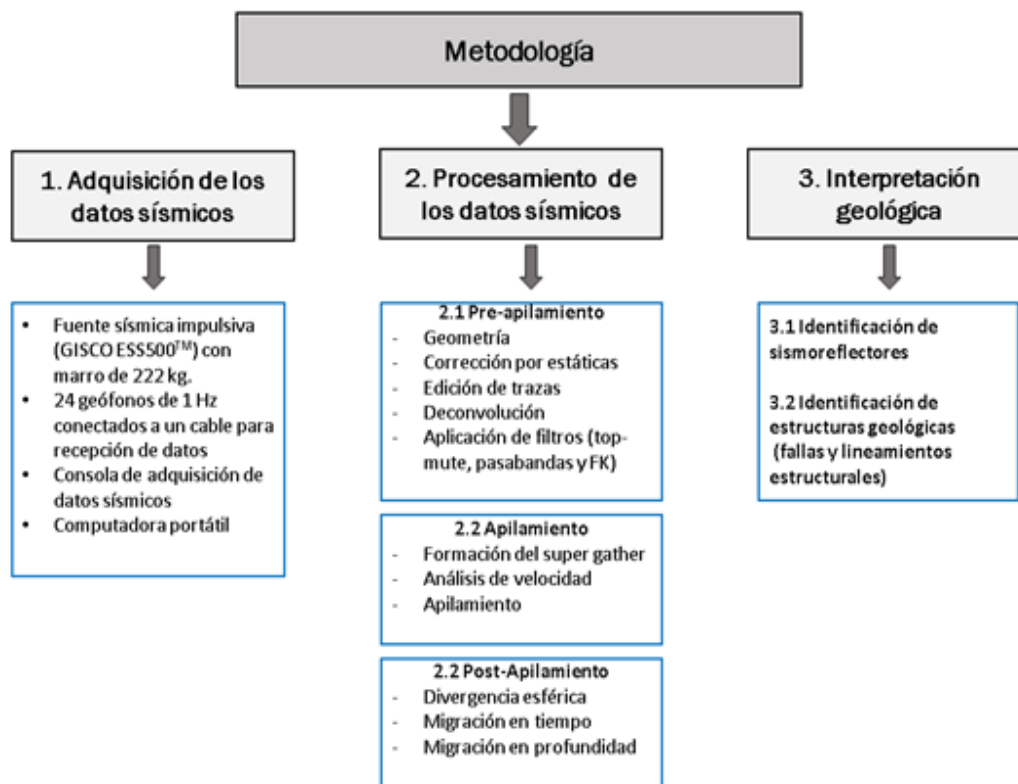


Figura 5. Diagrama de flujo de la adquisición, procesamiento e interpretación de los datos sísmicos de reflexión multicanal siguiendo la secuencia de procesamiento de datos basada en Yilmaz (2001).

Resultados

En el perfil sísmico de reflexión que se muestra en la Figura 6 (imagen superior), se identificaron dos capas, limitadas por los sismorefltores R1 y R2. El Reflector 1 es de alta amplitud y corresponde a la base de la capa de basaltos y riolitas (Garduño-Monroy et al., 1993), cuyas velocidades varían entre 2000-3000 m/s. Esta capa de basalto se puede correlacionar con la unidad litológica Basalto La Reforma, de posible edad Pleistoceno-Holoceno (?) (Macías-Vásquez y Jiménez Salgado, 2013).

El Reflector 2 representa la base de una capa de baja amplitud y baja velocidad, por lo que se podría correlacionar con las Ignimbritas Reforma inferior, reportadas por Macías-Vásquez y Jiménez Salgado (2013). Se identificaron ~30 fallas con diferente orientación y longitud, cuyo

buzamiento predomina hacia el SO y el NE. La presencia de estas fallas (aproximadamente 14 por cada km del perfil sísmico) indica que las rocas del subsuelo están fracturadas y falladas, lo cual se confirmó con las muestras de los núcleos de basaltos recuperados de los pozos P1 y P2 perforados en 2017 (profundidades de 55 m), lo que explica las pérdidas de circulación del lodo de perforación durante las operaciones. Estas zonas de baja amplitud pueden corresponder a cuerpos rocosos de menor densidad y, debido a que presentan rasgos sísmicos particulares como disminución en la amplitud de los sismorefltores, aumento en el espesor de los mismos, baja resolución en los bordes de los cuerpos y, a que se encuentra cerca de regiones con potencial geotérmico, es posible asociar estas zonas con frentes de alteración hidrotermal en el subsuelo (Kell, 2014).

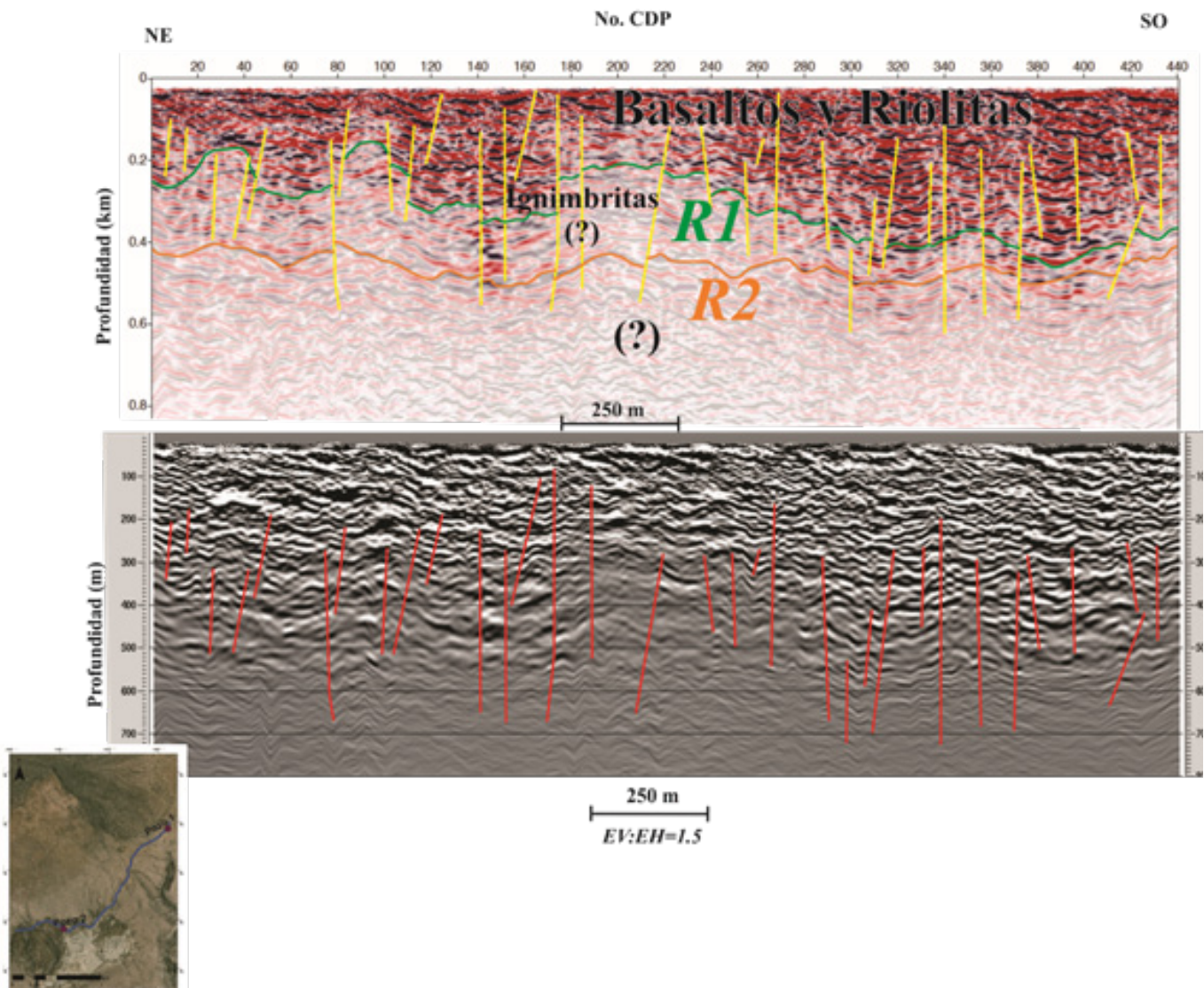


Figura 6. Imagen superior: Perfil sísmico de reflexión interpretado en el software SeisWorks®. Las líneas de color Amarillo corresponden a fallas. Las líneas de color verde y naranja corresponden a los reflectores 1 y 2 (R1 y R2), respectivamente. Imagen inferior: Perfil sísmico de reflexión en escala de grises, visualización en el software ProMax®, líneas color rojo representan las mismas fallas marcadas en color amarillo mostrados en el perfil superior.

Conclusiones

El uso de la fuente sísmica impulsiva ESS500-GISCO™ permitió un mayor alcance en profundidad, comparado con las fuentes utilizadas tradicionalmente (marro) en estudios sísmicos someros. Además, es la primera vez que se prueba este equipo en un área volcánica, obteniendo resultados favorables.

El procesamiento de los datos sísmicos de reflexión permitió mejorar la relación señal/ruido de los datos sísmicos tomados en la CR obteniendo como resultado un perfil sísmico de 2.2 km longitud, cuyo alcance en profundidad fue de ~400 m.

La interpretación del perfil sísmico de reflexión muestra dos sismorefltores: el primero corresponde a la base de los basaltos y riolitas (R1), mientras que el segundo sismorefltor (R2) podría ser la base de una capa de ignimbritas. También se infiere que las zonas de baja amplitud y velocidad (denotadas por el símbolo ?) podrían corresponder a zonas con presencia de alteración hidrotermal. En esta interpretación también se identificaron numerosas fallas que no afloran, cuyo buzamiento predominante es hacia el SO y NE.

Los resultados obtenidos en este estudio, en conjunto con los registros de temperatura de los pozos P1 y P2, serán de utilidad para el desarrollo de modelos térmicos con el fin de estimar y evaluar el potencial geotérmico de baja entalpía en la CR.

Agradecimientos

A los proyectos P03 del CeMIE-Geo (Campaña intensiva de exploración geotérmica de las Cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del Sistema de rifts del Golfo de California”) y PN2016-2188 Proyectos de Desarrollo Científico Para Atender Problemas Nacionales-CONACYT (Estimación y evaluación del potencial geotérmico de sistemas de baja y mediana entalpía para usos directos y

generación de energía eléctrica con tecnología de ciclo binario: El caso de las calderas La Reforma y El Aguajito del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur). Un especial agradecimiento a Jaime Calderón González y Enrique Cruz Castillo Guerrero, quienes formaron parte del personal técnico del Departamento de Geofísica del CICESE, gracias por su apoyo durante la adquisición de los datos sísmicos. A Gilberto Zambrano Romero y al personal de la UMA (Unidad de Manejo y Aprovechamiento Sustentable del Borrego Cimarrón) por su apoyo para realizar este estudio en la caldera La Reforma. Finalmente, agradecemos los comentarios y observaciones del revisor anónimo que permitió mejorar y enriquecer el contenido del presente manuscrito.

Referencias

- Antayhua-Vera, Y., (2017). Caracterización sísmológica, aeromagnética y magnetotelúrica del campo volcánico y geotérmico de las Tres Vírgenes (B.C.S), México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2017/marzo/0757594/0757594.pdf>
- Casallas-Moreno, K.L., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., Mastache-Román, E.A., Gallegos-Castillo, C.A., González-Fernández, A., (2021). Analysis of subsurface structures based on seismic and gravimetric exploration methods in the Las Tres Vírgenes volcanic complex and geothermal field, Baja California Sur, Mexico, *Geothermics*, 92, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102026>.
- Dmochowski, J. E., (2005). Application of MODIS-ASTER (Master) simulator data to geological mapping of young volcanic regions in Baja California, Mexico. Tesis de doctorado, California Institute of Technology, Pasadena, California. <https://thesis.library.caltech.edu/2096/1/JaneEDmochowskiThesis.pdf>

- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G.E., (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 1313–1336. <https://doi.org/10.1130/B26067.1>
- Garduño-Monroy, V.H., Vargas-Ledezma, H., Campos-Enriquez, J.O., (1993). Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent-type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 47–58. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90077-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90077-5)
- Kell, A.M., (2014). The application of active-source seismic imaging techniques to transtensional problems the Walker Lane and Salton Trough. Tesis de doctorado, University of Nevada, Reno. <https://www.proquest.com/pagepdf/1559091891?accountid=63987>
- López, A., García, G., Arellano, G., (1994). Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico, geothermal zone. *Geothermal Resources Council Transactions*, 18, 275-280. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1006992.pdf>
- Macías-Vásquez, J.L., Jiménez-Salgado, E., (2013). Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 26 (1), 14–23. <https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol26-1.pdf>
- Sena-Lozoya, E.B., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., González-Fernández, A., Gómez-Ávila, M., (2020). Seismic exploration survey northeast of the Tres Vírgenes Geothermal Field, Baja California Sur, Mexico: a new geothermal prospect. *Geothermics*, 84, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101743>
- Servicio Geológico Mexicano, (2008). Carta geológica-minera del Estado de Baja California Sur, escala 1:500000. http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp
- Stock, J.M., Hodges, K.V., (1989). Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8 (1), 99–115. <https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>
- Yilmaz, O., (2001). Seismic Data Analysis. Volumen I y II, Investigations in Geophysics No. 10. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.

Manuscrito recibido: 7 de abril de 2022

Recepción del manuscrito corregido: 13 de mayo de 2022

Manuscrito aceptado: 10 de junio 2022

Red sísmica de Zacatecas

Juan Martín Gómez-González¹, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar², Juan Carlos Montalvo-Arrieta³,
Miriam Judith Cedillo-Candelas², Víctor Hugo Ramírez-Márquez¹, David Leonardo Carrillo-Sánchez²

¹Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, México.

²Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

³Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra. Linares, Nuevo León, México.

fescalona@hotmail.com

Antecedentes

Se ha considerado tradicionalmente que la región hacia el norte del Eje Neovolcánico Transmexicano es asísmica pese a la ocurrencia de algunos sismos. Los antecedentes históricos de sismicidad son esporádicos, de magnitud pequeña y de efectos destructivos mínimos o nulos para la población. En la zonificación sísmica de la República Mexicana (CFE, 2008), la Mesa Central y los estados que la limitan al norte y oriente (Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí) han sido consideradas como regiones de baja sismicidad (INEGI, 2017). Ello ha influido para que la cantidad de estaciones sísmicas desplegadas en la región también sea pequeña. Por ejemplo, la estación de banda ancha más próxima a Zacatecas se encuentra en Aguascalientes, a 90 km. El resto de las “estaciones cercanas” se localizan entre 260 km y 400 km. A esas distancias, la magnitud mínima analizable de un sismo regional es de 3. La microsismicidad sólo se registrará en una estación cercana. Por ello, para garantizar la detección y la calidad en la localización de este tipo de actividad es necesario contar con redes locales suficientemente densas.

Pese a la separación tan amplia entre las estaciones de la red sísmica del Servicio Sismológico Nacional (SSN) desplegadas en el norte de México, su distribución ha permitido registrar eventos de magnitudes pequeñas a moderadas que antes pasaban desapercibidos. De hecho, en algunas zonas se han instalado pequeñas redes locales, como en el límite meridional de la Mesa Central (MC), en el Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (SLT) (Nieto-Samaniego et al., 2012), zona media de San Luis Potosí (Gómez-González et al., 2005), sur y norte de Querétaro (Dávalos et al., 2005; Gómez-González et al. 2007).

El límite MC-SLT se extiende desde la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí, hasta Tepehuanes, Durango (Nieto-Samaniego et al., 2005). Las redes temporales desplegadas en los extremos del sistema han evidenciado la existencia de un nivel de sismicidad de fondo (Gómez-González et al., 2005; Montalvo et al., 2008; Nieto-Samaniego et al., 2012; Pérez-González et al., 2014). Otra región también considerada durante mucho tiempo como asísmica es la de Nuevo

León, donde una red permanente de pocas estaciones ha mostrado que la tasa de sismicidad es más alta de lo que se pensaba, cuyos sismos de magnitudes $M > 3.5$ son más frecuentes de lo que se suponía (v.gr., Montalvo-Arrieta et al., 2011; Ramos-Zúñiga et al., 2012; Salinas-Jasso et al., 2019). El hecho de que en éstas zonas las magnitudes han sido inferiores a 4, provocó que hasta finales del siglo XX no se les prestara importancia para la búsqueda de las estructuras sismogénicas asociadas. Esto ha ido cambiando con el tiempo pues el acceso a sismógrafos de bajo costo ha permitido la incorporación de datos sísmicos en el diseño de estructuras y en la búsqueda de una regionalización sísmica más realista (Pérez-González et al., 2014; Salinas-Jasso et al., 2019).

En Zacatecas existen evidencias del impacto de algunos sismos históricos fuertes, como el ocurrido el 21 abril de 1841 (M_w 6.2) en la zona norte del estado (Sosa-Ramírez et al., 2021). De 1990 a 2016 el catálogo del SSN reporta 12 sismos regionales (Figura 1a) (UNAM, 2022). La

primera estación sísmica de banda ancha del SSN se instaló en febrero de 1997. Durante los primeros años la sismicidad fue prácticamente nula, sin embargo, entre 2017 y 2019 empezó a cambiar pues el SSN reportó 13 eventos. A partir de junio de 2020 la sismicidad en los alrededores de la ciudad de Zacatecas se incrementó notablemente y esta tendencia se ha mantenido hasta la fecha. La mayoría de las magnitudes es inferior a 2, aunque hay algunos eventos que se

aproximan a Mw 4.6 (Figura 1b; UNAM, 2022). Llama la atención que su distribución parece describir una circunferencia alrededor de los municipios de Zacatecas y Guadalupe. La mayoría de los epicentros se concentran hacia el norte y oeste de la ciudad de Zacatecas (Figura 2). Dado que algunos eventos están cerca de las fallas cartografiadas por Barr (1976) y Escalona-Alcázar et al. (2009; 2016), es necesario dar seguimiento constante a dicha actividad.

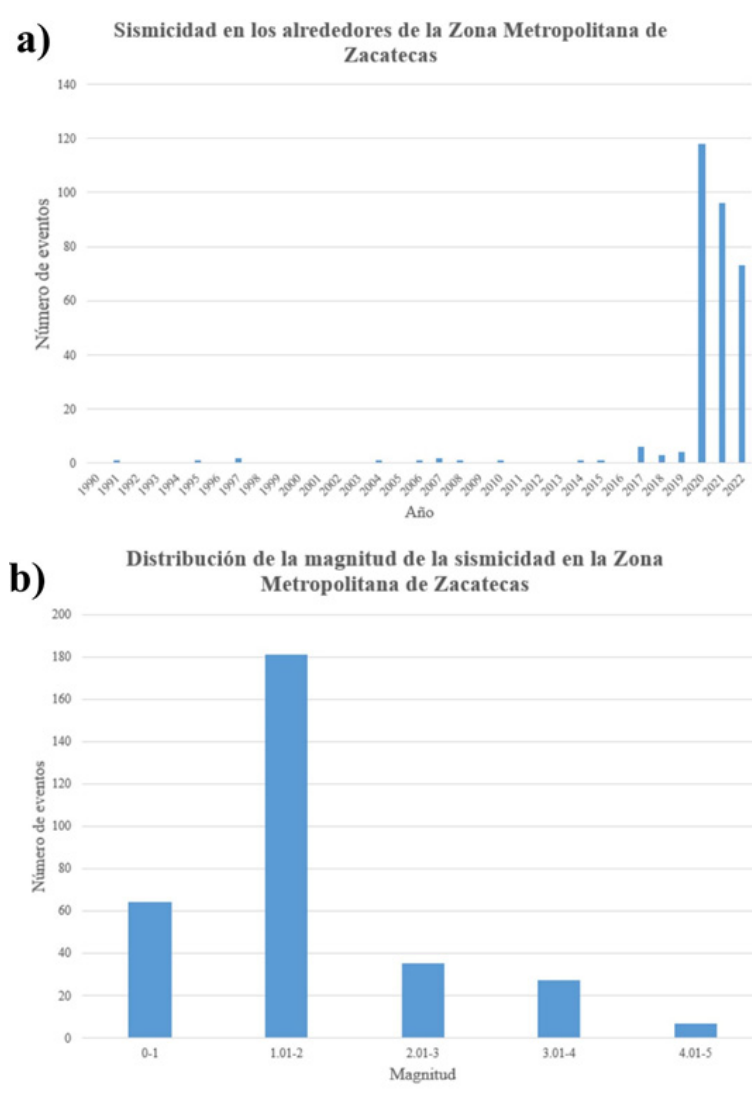


Figura 1. Población de sismos registrados por el SSN, (a) por año y (b) magnitud, en la Ciudad de Zacatecas (tomados de la UNAM, 2022). Nótese el incremento en los años recientes, cuyas magnitudes predominantes son entre 1 y 2.

En mayo de 2022 instalamos alrededor de la ciudad de Zacatecas una red sísmica de cuatro estaciones de bajo costo de una sola componente (Figura 2). La distancia de prueba promedio entre estaciones es de 5 km, con lo que buscamos confirmar la tasa y distribución de la microsismicidad registrada por la única estación de banda ancha en el estado. Para

ello requerimos garantizar el acceso continuo a internet y corriente eléctrica, ya que los equipos “babyshark” utilizados no almacenan datos, por lo que se debe garantizar la transmisión continua de datos en tiempo real. Los equipos de bajo costo tienen entre sus ventajas la facilidad de programación e instalación.

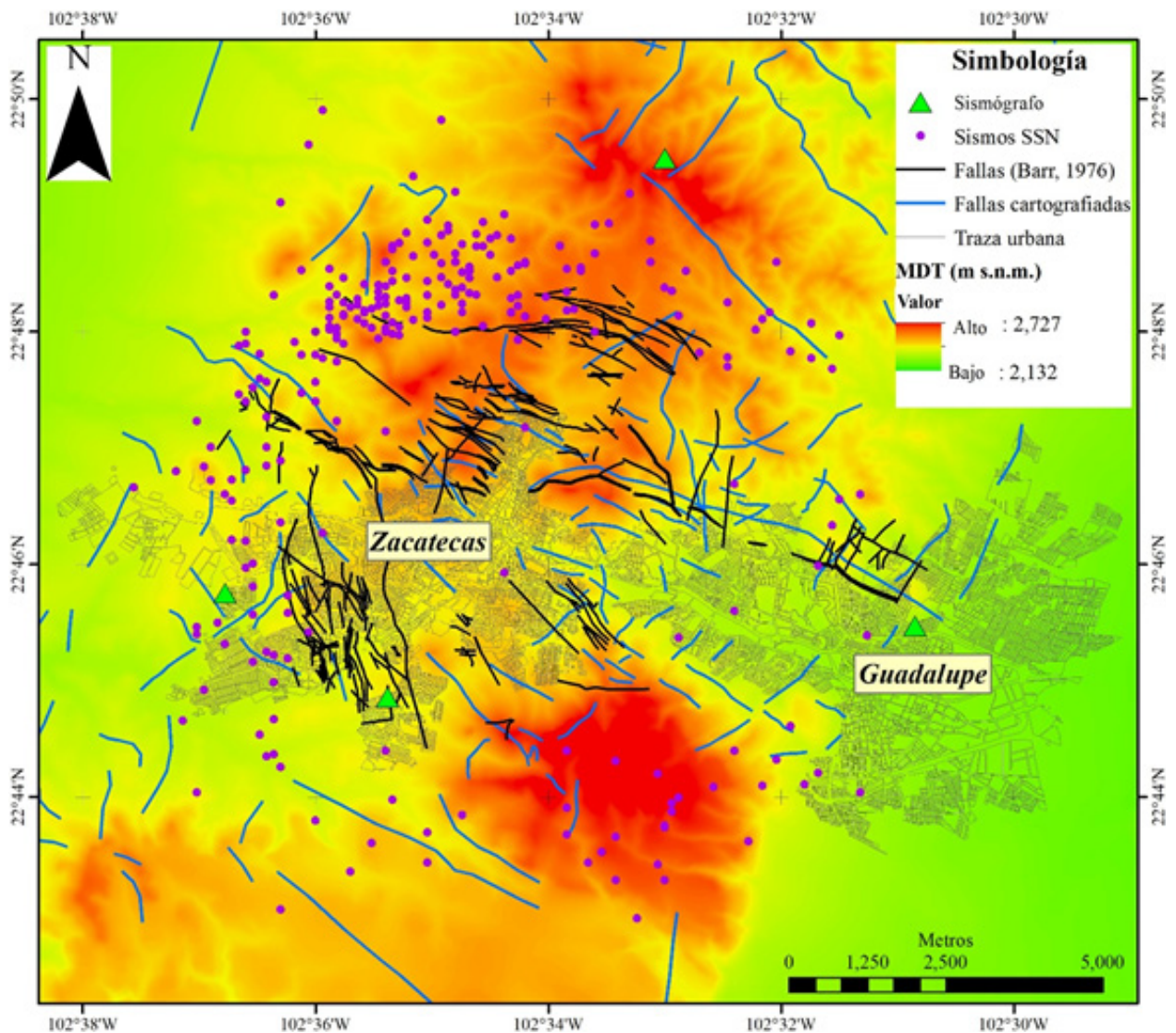


Figura 1. Distribución de epicentros (círculos morados) registrados por el SSN (UNAM, 2022) de enero de 1990 al 31 de mayo de 2022 en la zona urbana de Zacatecas y Guadalupe. Los triángulos verdes corresponden a la ubicación de los sismógrafos instalados en mayo de 2022, y las líneas negras y azules a las fallas cartografiadas por Escalona-Alcázar et al. (2009 y 2016) y las reportadas por Barr (1976), respectivamente.

Esta pequeña red sísmica permitirá monitorear en la ciudad de Zacatecas la sismicidad local sistemáticamente por primera vez. El periodo inicial de registro será de seis meses. Dada la poca cantidad de estaciones y las magnitudes tan pequeñas de los sismos, en el siguiente periodo se modificará su ubicación espacial para mejorar la detección y acotar las zonas sismogénicas. A nivel regional también, el registro de eventos más grandes quedará cubierto por algunas estaciones localizadas en Nuevo León, San Luis Potosí y Querétaro. Los resultados, además de permitir identificar el origen de la sismicidad, serán de gran ayuda para las autoridades de Protección Civil.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de CONACYT a través del proyecto A1-S-35374 de Ciencia Básica. Los autores agradecen a la Dra. Lucia Capra Pedol, Directora del Centro de Geociencias de la UNAM, y al Dr. Santiago Valle Rodríguez, Director de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ por su apoyo para la realización de este proyecto.

Referencias

- Barr, R.K. (1976). Economic geology of the Zacatecas mining district, Zacatecas, Mexico. Universidad de Nueva Orleans, Tesis de Maestría, 100 pp. Inédita.
- CFE (2008) "Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo", Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Dávalos-Álvarez, O.G., Nieto-Samaniego, A.F., Alaníz-Álvarez, S.A. y Gómez-González, J.M. (2005). Las fases de deformación Cenozoica en la región de Huimilpan, Querétaro y su relación con la sismicidad local. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (2), pp. 129-147. (ISSN-printed 1026-8774; ISSN-electronic 2007-2902).

Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P., Nieto-Samaniego, A.F. y Núñez-Peña, E.P. (2016). The Palaeocene-early Oligocene Zacatecas conglomerate, Mexico: sedimentology, detrital zircon U-Pb ages, and sandstone provenance. *International Geology Review*, 58, p. 826-848.

Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., Valencia, V.A. y Ortiz-Acevedo, O. (2009). Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, p. 48-64.

Gómez-González, J.M., Barboza-Gudiño, J.R., Zúñiga Dávila-Madrid, F. R., Torres Hernández, J. R., Guzmán-Speziale, M., Mata Segura, J. L. (2005). Sismicidad en el Estado de San Luis Potosí. *Folletos Técnicos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí*, 129, pp. 1-42. (ISSN: 0581-5207).

Gómez-González, J.M. Descripción preliminar de la actividad sísmica ocurrida en noviembre de 2007 en el Municipio de Landa de Matamoros, Qro. Entregado a Protección Civil del Estado y al Gobierno Municipalidad de Landa de Matamoros, Qro. Noviembre de 2007, 6 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2017). Mapa de los estados Unidos Mexicanos, placas tectónicas, 1 imagen.

Montalvo-Arrieta, J.C., Ramos-Zúñiga, L.G., Navarro-de León, I. y Ramírez-Fernández, J.A. (2011). Una aproximación a la regionalización sísmica del Estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y evidencias geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 63, p. 217-233.

- Montalvo, J.C., Gómez, J.M., Ramírez, J.A., Luque, N. y Barboza, R. (2008). Respuesta sísmica de sitio en la ciudad de San Luis Potosí obtenida a partir de registros de microtemores. *GEOS*, 28, p. 198.
- Nieto-Samaniego, A.F., Barajas-Gea, C.I., Gómez-González, J.M., Rojas, A., Alaniz-Álvarez, S.A. y Xu, S. (2012). Geología, evolución estructural (Eoceno al actual) y eventos sísmicos del Graben Santiaguillo, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, p. 115-130.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Camprubí i Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica Cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII, p. 285-318.
- Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional. (2022). Catálogo de sismos. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/> doi: 10.21766/SSNMX/EC/MX consultado el 30 de mayo de 2022.
- Pérez-González, J.A., Laguna-Zárate, L.F. y Gómez-Rubio, A. (2014). Influencia del coeficiente sísmico en el diseño de estructuras de acero en San Luis Potosí, una propuesta de normatividad. *Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, p. 1-9.
- Ramos-Zúñiga, L.G., Medina-Ferrusquía, H.C. y Montalvo-Arrieta, J.C. (2012). Patrones de sismicidad en la curvatura de Monterrey, noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, p. 572-589.
- Salinas-Jasso, J.A., Montalvo-Arrieta, J.C., Alva-Niño, E., Navarro-de León, I. y Gómez-González, J.M., (2019). Seismic site effects in the central zone of Monterrey (northeast Mexico) from a geotechnical multidisciplinary assessment. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 78, p. 483-495.
- Sosa-Ramírez, R.L., Paz-Martínez, E.G. y Montalvo-Arrieta, J.C. (2021). The MW 6.2 Punta Santa Elena (Coahuila-Zacatecas) earthquake of 28 April 1841, the largest documented pre-instrumental event and its implications on seismic hazard in northeastern Mexico. *The Journal of Seismology*, 25, p. 477-485.

Manuscrito recibido: 16 de junio, 2022.
 Manuscrito aceptado: 17 de junio, 2022

Políticas editoriales

GEOS es el boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM; se publican tres números en el año en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en **GEOS** deben ser **originales** y son **arbitrados** por al menos dos expertos del tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista del tema. Los editores se reservan el derecho de decidir sobre la publicación de notas o reportes.

Son particularmente bienvenidas todas aquellas contribuciones que coadyuven a la difusión y a la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Una vez concluido el proceso de arbitraje, el manuscrito será devuelto al primer autor con los comentarios de los árbitros y del editor. El manuscrito corregido en forma final será editado por el Editor Técnico de **GEOS** para su publicación impresa y electrónica. El autor principal tendrá oportunidad de revisar la versión final de su trabajo antes de publicarlo en WEB de la UGM (www.ugm.org.mx).

Cualquier cambio a la política editorial de GEOS se publicará en el primer número de cada volumen.

Instrucciones para los autores

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica a cualquiera de los editores principales:

Luis Alberto Delgado Argote (CICESE)
ldelgado@cicese.mx

Liga Pérez Cruz (UNAM)
perezcruz@geofisica.unam.mx

Preparación de texto:

Podemos procesar manuscritos en formato WORD, texto ASCII o LaTeX. Se recomienda que los manuscritos no excedan 12 páginas en el formato de la revista (una página contiene aproximadamente 900 palabras).

Las publicación de figuras a color en la versión impresa de GEOS no es posible por ahora, sin embargo la versión electrónica puede contener ilustraciones a todo color, se recomienda a los autores preparar sus figuras pensando en ambas ediciones.

Preparación de figuras e ilustraciones:

Las ilustraciones y figuras se pueden enviar en cualquiera de los siguientes formatos: **TIF, EPS, PS, DXF, DWG, PDF, JPG o WMF; y deben enviarse en archivos individuales y separados del texto.**

Secciones:

Con excepción de las notas, todas las contribuciones deberán incluir: título, resumen (en español y en inglés), introducción, una sección de métodos, una sección de resultados, una sección de discusión y/o conclusiones y una sección de referencias bibliográficas.

Resumen:

El no deberá exceder 350 palabras. Al prepararlo haga énfasis en los objetivos de la investigación, los resultados más importantes y las conclusiones alcanzadas. En el resumen no deben aparecer citas bibliográficas.

Introducción:

La introducción deberá destacar la relevancia del problema e incluir una revisión adecuada de publicaciones antecedentes sobre el tema. El objetivo de la introducción es enmarcar el problema dentro del estado general del conocimiento en el área que le corresponde, destacar la contribución del trabajo y motivar la lectura del artículo completo.

Metodología:

La metodología empleada en el trabajo deberá ser descrita con suficientes detalle para que otros miembros de la comunidad puedan comprenderla, pero al mismo tiempo, debe ser sencilla para que un lector inexperto pueda comprender las ideas fundamentales. Los desarrollos demasiado detallados, pero necesarios, deben diferirse a una sección apéndice.

Resultados:

Usualmente, los resultados de la aplicación de cualquier metodología pueden presentarse en forma de tablas o figuras. Evite redundancias mediante una adecuada selección de sus resultados. Los pies de figura deberán ser lo suficientemente explicativos para resaltar la importancia de lo que se ilustra sin necesidad de acudir al texto.

Discusiones y conclusiones:

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis

derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

Referencias

Se debe incluir la lista de referencia de las fuentes utilizadas en el artículo.

Las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. Sugerimos utilizar el estilo de citación recomendado por Harvard University. Presentamos algunos ejemplos para facilitar la citación.

Si la citas textuales tienen 40 palabras o menos, utilice comillas al principio y al final de la misma y mencione el apellido del autor, el año y la página de donde proviene la cita. Si tiene más palabras, utilice párrafo con diferente sangría. Si un autor es citado más de una vez el mismo año, utilice el sufijo: a, b, etc. para distinguir el trabajo.

Aquellos manuscritos que no estén en publicados (aceptados o en prensa) no deberán incluirse en la referencias. Los artículos de divulgación podrán agregar una sección de referencias recomendadas.

Formato para citas:

Para cada autor o co-autor, escriba con mayúscula únicamente la primera letra del apellido y después las iniciales, agregue el año entre paréntesis. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para nombres propios.

Cuando haga la referencia de un artículo de publicación periódica, incluya el nombre completo de la revista, volumen y páginas. Por ejemplo:

Alvarez-Borrego, S. (1996). Satellite derived photosynthetic pigment surveys: A review of marine phytoplankton biomass and productivity, *Geofísica Internacional*, v. 35(1), 51-61.

Ripa, P., y Velázquez, G., (1993), Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, v. 32(1), 41-56.

www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf

Sánchez-Sesma, F. J., and Luzón, F., (1995), Seismic response of three-dimensional alluvial valeys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85(1), 269-284.

Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (México). <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=inegi>

Cuando haga referencia de un libro completo, incluya los siguientes datos.

Presentaciones gráficas (gráficas, diagramas, mapas, dibujos, figuras, ilustraciones en general, fotografías, etc.)

Winkler, H.G.F. (1967). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 2nd ed. New York, 237 p.

Cuando las presentaciones gráficas son tomadas de otro autor o página web, debe mencionarse la fuente de donde fue tomada.

Cuando haga la referencia de una parte de un documento o capítulo de libro, incluya los siguientes datos.

Ejemplos:
Tomado de Google Hearth (2014).
Modificado de Pérez (2014) p. 234.

Lomnitz, C., (1995), Diez años después: una reinterpretación de la catástrofe de 1985. En: F. Medina-Martínez, L. A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso, editores, *la Sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, (p. 61-67). Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 2.

Unidades

Con algunas excepciones, todas las unidades físicas deberán expresarse en el Sistema Internacional de unidades (SI). Las siguientes excepciones son aceptables:

densidad en g/cm³
presión en bar

Cuando haga la referencia de una tesis, debe hacer mención al grado. Ejemplo:

Gutiérrez Carmona, D.M. (2014). Estudio magnetotelúrico de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.

Expresiones matemáticas

Escriba sus ecuaciones en la forma más simple posible, utilizando signos de puntuación. Utilice itálicas para todos los símbolos, exceptuando las letras griegas. Vectores y matrices se escribirán con negrillas. Numere en forma consecutiva y entre paréntesis todas las ecuaciones que aparezcan en el texto.

Cuando haga la referencia de recursos electrónicos, incluya los datos completos y la dirección electrónica. Ejemplo:

Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, 32 (1), 41-56. Recuperado de: [http://](http://www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf)

$$\mathbf{u}_h(x, z, t) = (U_j^x(t)\phi_j(x, z), U_j^z(t)\phi_j(x, z))^T \quad (1)$$

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Ruth Cerezo Mota
Editores



geos

Información con:

Ivonne Pedrín Morales
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)174-5050
Ext: 26004
Correo electrónico: ipedrin@cicese.edu.mx



geos

