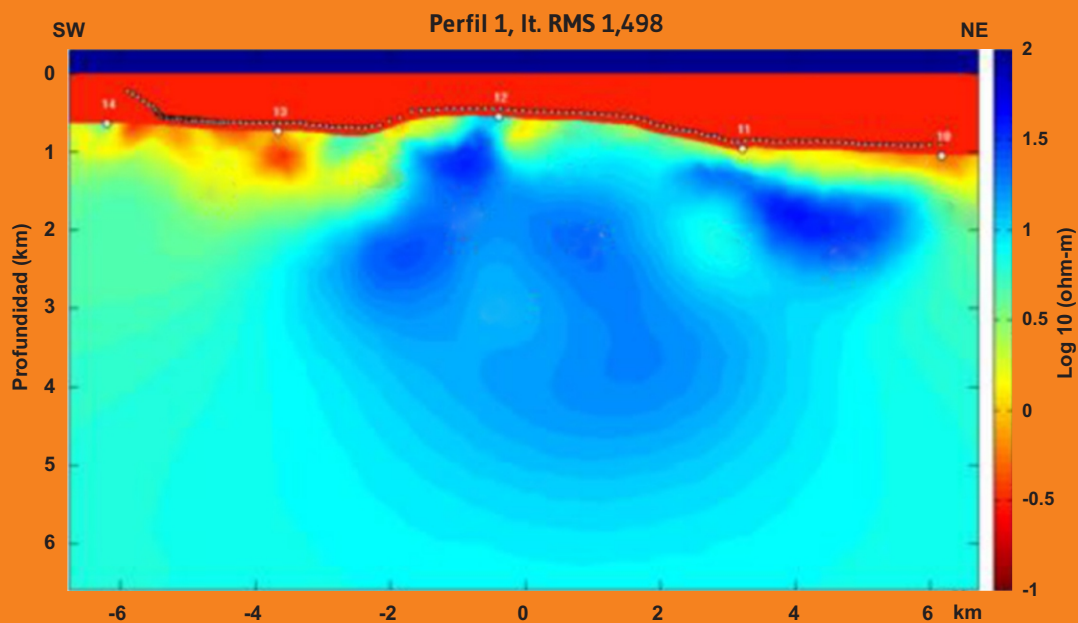


geos



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 2018-2019**

Dra. Ligia Pérez Cruz
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidenta

Dra. Vanesa Magar Brunner
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidenta

Dra. Aída Martínez López
CICIMAR, IPN
Secretaria General

Dr. David Adams
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Secretario de Investigación

Dr. Víctor H. de la Luz
Instituto de Geofísica, Morelia, UNAM
Secretaria de Difusión

Dra. Susana Alaniz Álvarez
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Educación

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretario Internacional

Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
Unión Geofísica Mexicana
Tesorero

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Víctor de la Luz
vdelaluz@geofisica.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 <https://geos.cicese.mx>

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

En busca de cierta estabilidad ambiental	... 1
---	-------

ARTÍCULOS

Análisis geoestadístico de la distribución de metales pesados a partir de muestras de sedimento en las cartas Zacatecas y Guadalupe, escala 1:50,000, México	... 3
---	-------

Edgar Omar Almeida Miranda, Felipe de Jesús Escalona Alcázar, Jorge Bluhm Gutiérrez, Santiago Valle Rodríguez, Josefina Huerta García, Sayde María Teresa Reveles Flores Granillo

Evaluación sismotectónica del sureste de Cuba en el contexto geodinámico del norte del Caribe	... 25
--	--------

Lenin Ávila Barrientos, Marco Antonio Pérez Flores, Enrique D. Arango Arias, José A. Batista Rodríguez

DIVULGACIÓN

Conociendo el interior de nuestro planeta: energía electromagnética y geotermia	... 41
--	--------

Aideliz M. Montiel Álvarez, José Manuel Romo Jones

La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra: Los Grandes Terremotos en México	... 51
---	--------

Héctor González Huizar

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL	... 73
---------------------------	--------

En busca de cierta estabilidad ambiental

En menos de un año el planeta ha sufrido incendios de gran magnitud cuyos efectos no se pueden evaluar. En particular, los de la Amazonia y Australia son un reflejo del mal manejo del único planeta habitable que tenemos disponible. Desde antes que nos hicieran conscientes de estar en una “aldea global”, se mencionaba que el tan buscado crecimiento económico es un proceso hacia el exceso. El asunto del medio ambiente parece entenderse bien entre algunas comunidades, principalmente académicas, y parece no importar a otras, principalmente las empeñadas en buscar esos logros económicos que garantizan un crecimiento continuo. El conocimiento popular sobre los efectos de la deforestación, la fracturación hidráulica, la sobreexplotación y contaminación del recurso hídrico, entre otros, impactan menos en los medios de comunicación, aunque no son menos peligrosos para la vida en general. Sobre los fenómenos naturales como los geológicos, oceánicos, climáticos o biológicos tenemos poco control, pero conocer detalles sobre su funcionamiento nos puede hacer menos vulnerables. Por razones económicas y políticas, dicho conocimiento también está desbalanceado pues, como cabe esperar, mientras mayor es el conocimiento, mayores son las precauciones y menor es la afectación al medio natural. Por el contrario, las comunidades más pobres sufren de mayor afectación contaminante o degradante, ya sea por desconocimiento o por abuso por parte, comúnmente de agentes foráneos.

El conocimiento es caro y, si no genera ganancias a temprano plazo, orilla a continuar con el uso de procedimientos de producción de bienes más dañinos al medio ambiente y al final de cuentas el resultado es más costoso por la necesidad de aplicar medidas de remediación cuando se pudo investigar para la prevención. Por ello, es conveniente pensar acerca de la inconveniencia de buscar una tasa de crecimiento económico alta a costa de un impacto al medio ambiente difícilmente reversible, visualizando el aprovechamiento saludable del planeta a largo plazo. Existen ejemplos exitosos de recuperación de acuíferos, en Brasil por ejemplo, a través de la reforestación en regiones condenadas al abandono. Sin embargo, para que un programa a gran escala sea exitoso, es necesario que el Estado recupere una visión estratégica de desarrollo que contemple el medio ambiente. El uso de materiales baratos, como algunos plásticos, o productos de mala calidad cuya vida útil es muy corta y que se convierten rápidamente en basura, aceleran la contaminación del suelo, el agua y el aire. También es bien conocido el efecto del uso ineficiente de fertilizantes y plaguicidas, o los efectos de las concentraciones de aceites, detergentes, etcétera. Es hora de invertir, aunque las tasas de ganancia económica disminuyan un poco, en alternativas para la prevención y control de los daños producidos por el mal uso de los recursos naturales, así como de tecnologías poco amigables con el ambiente.

Es urgente que el Estado logre conciliar una visión en conjunto con el sector privado y el sistema educativo, desde el básico hasta el científico, para balancear el desequilibrio ambiental actual que tan seriamente amenaza a grupos poblacionales cada vez más grandes.

Análisis geoestadístico de la distribución de metales pesados a partir de muestras de sedimento en las cartas Zacatecas y Guadalupe, escala 1:50,000, México

Edgar Omar Almeida-Miranda¹, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar^{1*}, Jorge Bluhm-Gutiérrez¹,
Santiago Valle-Rodríguez¹, Josefina Huerta-García², Sayde María Teresa Reveles-Flores¹

¹Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas",
Calzada de la Universidad 108, Fracc. Progreso, C.P. 98058, Zacatecas, Zacatecas, México

²Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas",
Avenida Preparatoria S/N, Col Agronómica, C.P. 98066, Zacatecas, Zacatecas, México.

*fescalona@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo de distribución espacial de metales pesados de las cartas Zacatecas (F13B58) y Guadalupe (F13B68), escala 1:50,000, realizado con la base de datos de geoquímica de sedimentos activos que elaboró el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en 1999. La base de datos es de 334 muestras georreferenciadas en las que se analizaron 28 elementos. El contenido de cada elemento se comparó con las Concentraciones de Referencia Totales definidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que define los límites permisibles para que el suelo sea utilizado en actividades agrícola/residencial/comercial o industrial. Las concentraciones superiores a las establecidas en la NOM se consideran tóxicas para la salud de la población y el ambiente, por ello se definió cuáles elementos las exceden y cómo se distribuyen para así establecer su posible proveniencia.

Los elementos cuyas concentraciones exceden los valores establecidos en la NOM para uso agrícola/residencial/comercial son el As, Cd, Cr y Pb. De cada uno de ellos se determinó el área de influencia utilizando el método de Kriging ordinario combinado con un semivariograma estable, cuyos parámetros variaron en el modelo de cada elemento. En la definición del área de influencia de cada muestra se tomaron en cuenta los valores reales y los estimados, así como el Error Medido (EM). De esta manera fue posible predecir los valores y realizar la interpolación.

Menos del 10% del total de muestras analizadas tienen valores que están sobre la NOM; de ellas el arsénico tiene 64 ppm y el plomo 10 ppm; el cadmio y el cromo solo tienen dos muestras que sobrepasan los valores establecidos en la NOM. A partir del coeficiente de correlación de Pearson se obtuvo una correlación positiva y mayor que 0.5 para el As y Pb. Ambos elementos tienen un área de influencia que es de forma irregular alrededor de las estructuras mineralizadas en la Sierra de Zacatecas y en las obras mineras (activas y antiguas). Esto es, el origen es natural pero la actividad minera pudo haberlos concentrado dando una componente antropogénica.

Palabras clave: Metales pesados, Zacatecas, geoestadística, distribución, As y Pb.

1. Introducción

La movilización y dispersión de contaminantes desde su ubicación original hacia la atmósfera, el suelo, la vegetación y el agua son unos de los impactos negativos más significativos de las actividades humanas en ecosistemas marinos y terrestres (Salemaa et al., 2001; Lin et al., 2002; Koptsik et al., 2003; Rodríguez et al., 2008). La minería, la industria del hierro y el acero, el transporte por carretera, la incineración de residuos, y el uso de fertilizantes y agroquímicos han sido identificados como las principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo, el agua y los ecosistemas superficiales por metales pesados (Hutton y de Meeûs, 2001; Hansen et al., 2002; Rodríguez et al., 2008).

Además, las emisiones volcánicas, el proceso de desgasificación en la corteza terrestre, los incendios forestales y la composición química del material primigenio son también importantes fuentes que incrementan la concentración de metales pesados en los suelos (Løkke et al., 1996; Palumbo et al., 2000; Rodríguez et al., 2008).

La tradición minera en Zacatecas inició a partir del descubrimiento de yacimientos de plata en 1546. Para 1548, los españoles comenzaron la producción de plata en tres minas. Albarrada en el sistema de vetas de Veta Grande, y san Bernabé y Los Tajos en el sistema de vetas Mala Noche. De acuerdo con Ponce y Clark (1988), el Servicio Geológico Mexicano (SGM) estimó que aproximadamente 23'236,499 kg de plata

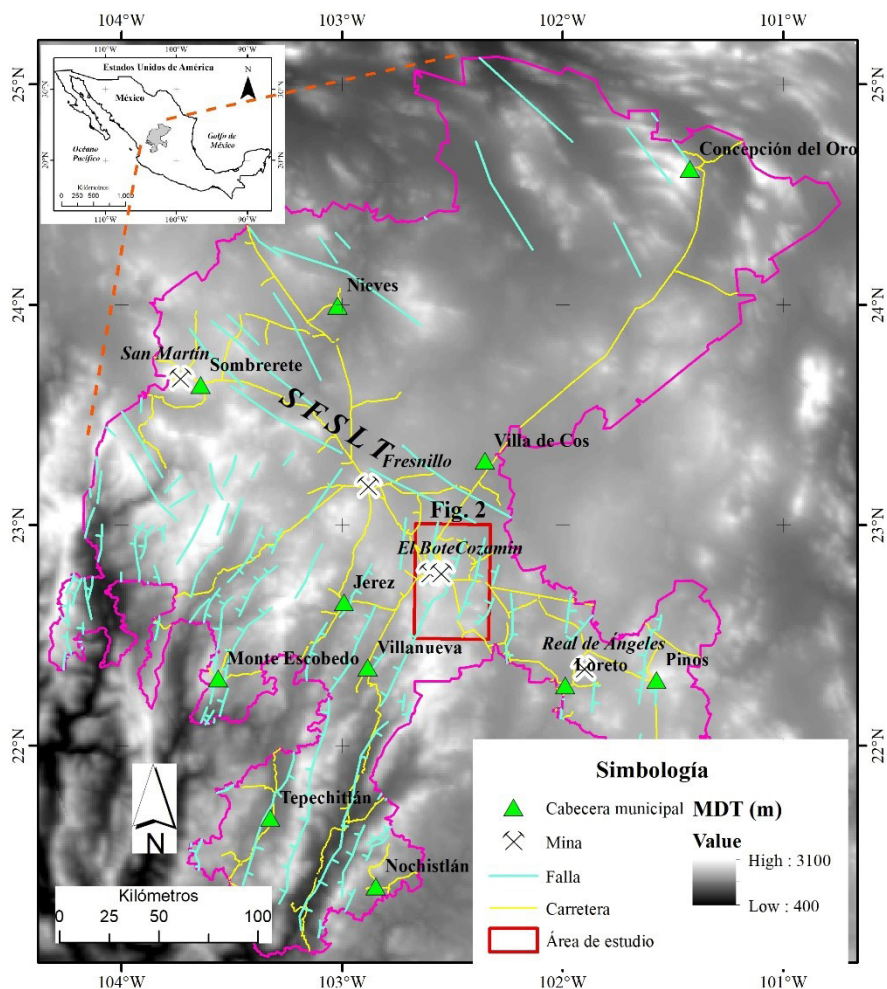


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y de los estudios similares que se han realizado en sitios mineros el estado de Zacatecas ubicados a lo largo del Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT).

fueron extraídos del distrito minero Zacatecas entre 1548 y 1987. El distrito minero Zacatecas, ubicado en la porción norte de la Sierra de Zacatecas, contiene un número significativo de vetas mineralizadas, sobresaliendo las vetas La Cantera, Mala Noche, Veta Grande y Pánuco-Casa de Cedros.

El descubrimiento de este sistema de vetas mineralizadas se debió a su afloramiento; sin embargo, durante la formación de un yacimiento mineral hay percolación de fluidos en las rocas con elementos que no son de interés económico pero que pueden servir como guías de exploración (p. ejem. arsénico, antimonio). La abundancia de estos elementos en las rocas, el suelo y la

vegetación es normalmente menor al 1%, pero su concentración puede aumentar por procesos naturales y por actividades antropogénicas. En este trabajo se presenta el análisis geoestadístico del arsénico y plomo de las cartas geoquímicas Zacatecas (F13B58) y Guadalupe (F13B68), escala 1:50,000 (SGM, 1999) para realizar un modelo que permita visualizar la distribución geográfica de metales pesados en dichas cartas (Figuras. 1 y 2), y así, comparar los valores de dicha distribución con las concentraciones de referencia total (CRT) estipuladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) y poder asociar su origen y distribución con factores naturales y/o antropogénicos.

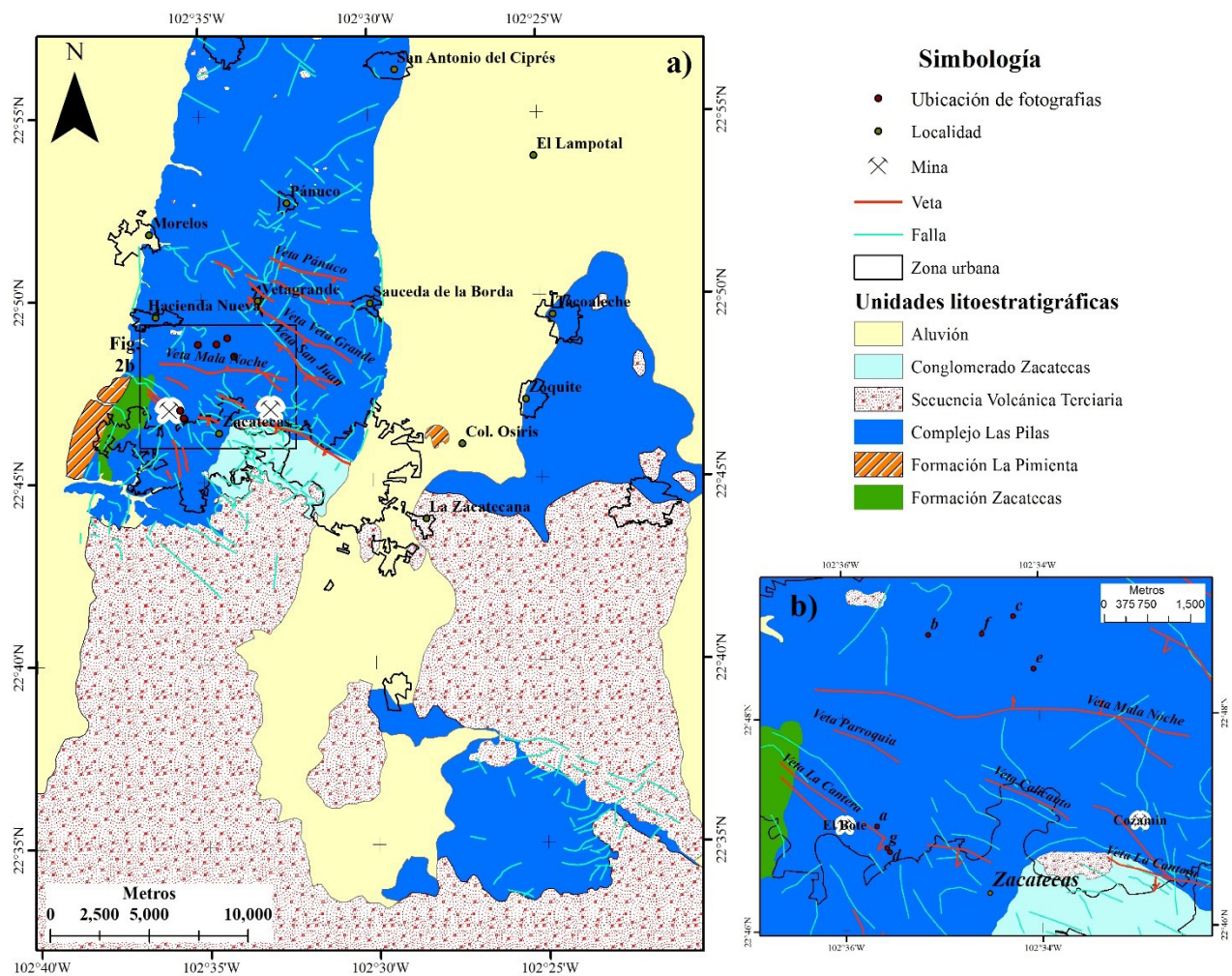


Figura 2. Figura 2. a) Mapa geológico simplificado de la zona de estudio (Modificado del SGM, 1997; Escalona-Alcázar et al., 2003, 2009, 2016; Ortega-Flores et al., 2016). b) El recuadro muestra el área en la que se realizó verificación de campo; las letras indican los incisos de la Fig. 8.

2. Trabajos previos

En materia ambiental, específicamente en concentraciones de metales pesados en suelos, no se encontraron trabajos que utilicen la información geoquímica disponible del Servicio Geológico Mexicano en el Estado de Zacatecas; sin embargo, sí se han publicado estudios que incluyen el muestreo de suelo y su análisis por metales pesados. Los trabajos fueron hechos en algunos sitios donde hay o hubo actividad minera y que están a lo largo del Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (Figura 1). La ubicación de los trabajos que están fuera del área de estudio se presenta en la Figura 1; los que están en ella se presentan en la Figura 2. En la Tabla I se muestra una síntesis en la que se indican los elementos analizados, el enfoque del muestreo y si hay un modelo de distribución. Los resultados muestran que la concentración de los elementos como el arsénico, cadmio y plomo, entre otros, en la mayor parte de los casos, es superior a lo establecido en las Concentraciones de Referencia Total (CRT) establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) para el suelo.

De estos estudios, solamente tres incluyen un modelo de distribución (Manzanares-Acuña et al., 2005; Santos-Santos et al., 2006; Mayorga, 2012) y, son importantes porque son los únicos en los que las muestras están georeferenciadas, lo que permite la comparación espacial. En el resto de los trabajos solamente se presentan los resultados de los análisis, o bien, se incluyen muestras que no solo son de suelo, sino también de vegetación, montículos de almacenamiento, presas de jales, polvo en la calle o viviendas y en terrenos agrícolas o de agostadero.

3. Marco Geológico

La secuencia estratigráfica del área de estudio y su historia geológica han sido descritas con diferentes niveles de detalles a partir de

la cartografía y el uso de diversas técnicas analíticas. Con base en ello se han definido seis unidades litoestratigráficas que de la base a la cima son: Formación Zacatecas, Formación La Pimienta, Complejo Las Pilas, Filita La Escondida, Conglomerado Zacatecas y Secuencia Volcánica Terciaria. A continuación se describe de forma sucinta cada unidad.

La base de la secuencia estratigráfica es el Grupo Zacatecas, cuya unidad litológica más antigua son las cuarcitas y las filita de la Formación Zacatecas del Triásico Superior, que están cubiertas en discordancia por areniscas volcaniclasticas, limolitas y conglomerados de la Formación La Pimienta del Jurásico Inferior a Medio. El contacto de la Formación La Pimienta con el Complejo Las Pilas, del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, es transicional. El Complejo Las Pilas está formado por derrames de lava de composición andesítica a basáltica, wackas y escasa caliza, toba y conglomerado; el conjunto está intrudido por lacolitos dioríticos. La parte superior de la secuencia mesozoica está formada por la Filita la Escondida del Cretácico Inferior.

El Grupo Zacatecas está cubierto de manera discordante por el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno al Oligoceno Inferior (Escalona-Alcázar et al., 2016). El Conglomerado Zacatecas es polimíctico y está formado por clastos de basalto, granito, lutita, cuarcita y riolita. Hacia la parte superior el Conglomerado Zacatecas está interestratificado con la Secuencia Volcánica Terciaria (Escalona-Alcázar et al., 2003, 2016). Toda la secuencia se encuentra cortada por diques, domos y derrames riolíticos (Escalona-Alcázar et al., 2003; Ortega-Martínez, 2016).

La deformación de las secuencias Mesozoica y Cenozoica está pobremente documentada. La secuencia Mesozoica tiene fallas inversas y pliegues cuyo origen es la acreción del arco de islas del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano y la Orogenia Laramide (Ortega-Flores et al., 2016).

Tabla I. Síntesis de los trabajos realizados de geoquímica de suelos en el Estado de Zacatecas y su relación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La abreviatura NR significa No reportado. Por “Periferia” se entiende que es en los alrededores de los sitios de estudio. El asterisco a la derecha de la cita indica que el estudio presenta un modelo de distribución de los metales pesados.

Elementos	Intervalo de concentraciones (ppm)	Promedio de concentraciones (ppm)	Enfoque del muestreo	No. de muestras	Lugar	Autores
Cd	11 a 47	NR	Minas	70	Minas El Bote, San Martín y Noria de Ángeles	Carrillo-González y González-Chávez (2006)
Ni	19 a 26	NR				
Pb	232 a 695	NR				
Mn	1132 a 2400	NR				
Cu	134 a 189	NR				
Zn	116 a 827	NR				
Pb	73 a 84,238	NR	Planta recicladora de plomo	34	Fresnillo	Manzanares et al. (2006)
As	203.72 ± 37.30	NR	Localidad	NR	El Lampotal, Vetagrande	Ramírez - Ortiz y Núñez (2009)
Cd	33.63 ± 131	NR				
Pb	3480.99 ± 20.40	NR				
As	NR	109	Urbano-presas de jales	10	Zacatecas-Guadalupe, presas del Pedernalillo	Mireles et al. (2012)
Ba	NR	487				
Cr	NR	135				
Mn	NR	878				
Sb	NR	13.10				
V	NR	144				
Zn	NR	776				
Ag - Cd	20 a 50	NR	Montículo de planta de procesamiento	19	Tacoaleche	González-Manrique (2012)
As - Cr - Ni	150 a 250	NR				
Cu	600 a 700	NR				
Pb - Zn	2000 a 4000	NR				
Pb	8 a 7730	NR	Periferia	89	Vetagrande	Manzanares et al. (2005)*
As	NR	NR	Periferia	26	Zacatecana y colonia Osiris	Santos-Santos et al. (2006)*
Hg - Pb	NR	NR				
As, Pb, Hg, Cd, Cu, Zn y Mg	NR	NR	Periferia	222	Fresnillo	Mayorga (2012)*

Al finalizar la Orogenia Laramide, en el Eoceno, la relajación de los esfuerzos formó un sistema de fallas normales con orientación NW-SE, que se conoce como Sistema de Fallas San Luis-Tepahuas (SFSLT) (Nieto-Samaniego et al., 2005; Loza-Aguirre et al., 2008). En la Sierra de Zacatecas, las fallas normales del SFSLT tienen mineralización económica; algunos ejemplos son las vetas La Cantera, Mala Noche, Veta Grande y Pánuco-Casa de Cedros (Figura 2) (Ponce y Clark, 1988; Nieto-Samaniego et al., 2005; Tristán-González et al., 2012). La deformación del Oligoceno al Reciente está asociada con el desarrollo de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras que son fallas normales con orientación preferente que varía de NNW a NNE (Aranda-Gómez et al., 2000).

4. Metodología

En este trabajo se utilizaron los resultados de 334 muestras de sedimento activo de arroyo, 181 de la base de datos de la carta geoquímica F13B68 y 153 de la base de datos de la carta geoquímica F13B58 (SGM, 1999). El muestreo y medición de los elementos traza fueron hechos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1999). Las muestras fueron analizadas por 28 elementos (Fe, Ga, Mg, Mn, Mo, Ni, Au, Ag, P, Pb, K, Se, Na, Sb, Sc, Sn, Sr, Ti, Te, Be, Bi, Ba, Ca, Co, Cu, Cr, W y Zn). El procedimiento de toma de las muestras, preparación y análisis por ICP fueron descritos por Caballero-Martínez (1999a, 1999b). En este trabajo solamente se utilizaron los resultados publicados por el Servicio Geológico Mexicano (<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/> Fecha de consulta, octubre de 2017).

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis geoestadístico de los elementos tóxicos en los suelos (As, Cd, Cr y Pb), así como su distribución espacial y las implicaciones de su origen.

5.1 Análisis geoestadístico

Se analizó la información del (SGM, 1999) y se cotejó con las Concentraciones de Referencia Totales (CRT) por tipo de uso de suelo establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Tabla II). Se verificó el número de muestras que sobrepasan las CRT, así como el porcentaje comparado con el total, la moda y el número de veces que se repite la moda para cada elemento, para analizar el comportamiento, distribución y posibles irregularidades en los datos. Dada las características de los datos (distribución no normal) se utilizó la mediana como medida de tendencia central para hacer el cálculo de la desviación estándar, al ser un estimador tolerante a la presencia de valores extremos. En la Tabla II, se observó que cuatro elementos (As, Cd, Cr y Pb) presentan muestras con concentraciones mayores a las CRT establecidas por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006).

A través de las concentraciones de las muestras objeto de este estudio y su ubicación, se realizaron modelos de iso-concentración a partir de un análisis geoestadístico. El objetivo fue realizar un modelo de distribución espacial de la posible área de influencia de los elementos utilizados en este trabajo y ver cómo están distribuidos en el área de estudio a partir de los valores definidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Tabla II). De esta manera se pueden asociar con factores naturales y/o antropogénicos.

Para la realización de estos modelos, se requiere estimar concentraciones en puntos para los que no se tiene información (punto de estimación) (Figura 3), a partir de las concentraciones de los puntos para las que se tiene información (puntos muestreados). De esta manera, durante el proceso de interpolación, los puntos muestreados más cercanos a los puntos de estimación tienen mayor influencia sobre estos.

Tabla I. Síntesis de los trabajos realizados de geoquímica de suelos en el Estado de Zacatecas y su relación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La abreviatura NR significa No reportado. Por "Periferia" se entiende que es en los alrededores de los sitios de estudio. El asterisco a la derecha de la cita indica que el estudio presenta un modelo de distribución de los metales pesados.

Elemento	N	Min (ppm)	Max (ppm)	Media (ppm)	Me-diana (ppm)	Desviación Estándar (DE)	1CRT (ppm)	2CRT (ppm)	No. de muestras > 1CRT	% de muestras > 1CRT	Moda (ppm)	Repetición de la moda
As	334	1.90	893	26.60	9.96	91.03	22	260	64	19.20	1.90	43
Ba	334	24.94	786	201.60	182.54	98.78	5,400	67,000	0	0	100.30	2
Be	334	0.75	3	1.60	1.63	0.49	150	1,900	0	0	0.90	39
Cd	334	0.48	68	2.20	0.60	5.63	37	450	2	0.60	0.49	137
Cr	334	7.86	563	91.20	67.11	69.51	280	510	2	0.60	68.12	2
Ni	334	1	284	37.80	26.59	35.59	1,600	20,000	0	0	0.90	8
Ag	334	0.04	87	2.40	0.79	6.39	390	5,100	0	0	0.79	182
Pb	334	11.48	1,107	81.40	35.99	157.65	400	800	17	5.10	32.44	2
Se	334	59	39,000	1,155.80	69	4,415.39	390	5,100	62	18.60	69	232

La manera en que se determina la influencia de cada punto muestreado (factor de ponderación) para el cálculo de un punto de estimación, es lo que diferencia a los métodos de interpolación (Mayorga, 2012; Webster y Oliver, 2007).

El análisis geoestadístico se realizó con la herramienta Geostatistical Analyst de ArcGIS (ESRI 2003, 2010). Todos los modelos se elaboraron con el método Kriging ordinario, combinado con el modelo de semivariograma estable, diferenciándose cada modelo únicamente por la variación de algunos parámetros de acuerdo a las necesidades de cada uno.

En la elaboración de los modelos de distribución se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla III que son los valores obtenidos con la interpolación de cada elemento analizado. De manera general, la interpolación de los valores de concentración de metales pesados para los puntos de estimación obedece a la ecuación [1]:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{donde} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad [1]$$

Donde $Z(s_0)$ es el valor de la concentración para el punto de estimación s_0 ; $Z(s_i)$ es el valor de la concentración para el i -ésimo punto muestreado s_i . A su vez λ_i es el factor de ponderación i -ésimo.

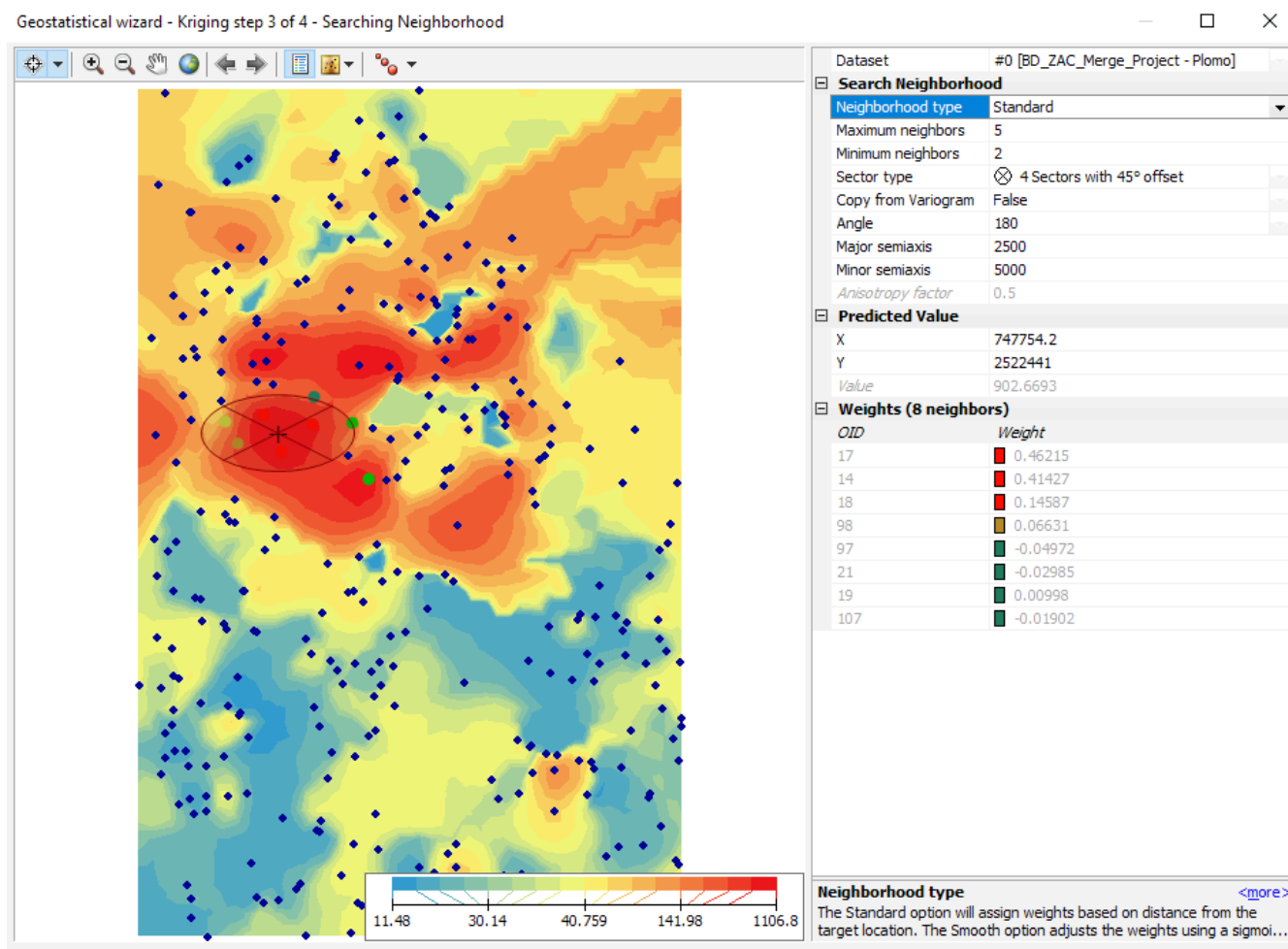


Figura 3. Parámetros para el cálculo de los puntos de estimación para modelar la distribución del plomo. Los puntos azules en el mapa son los sitios muestreados (SGM, 1999), la cruz es un punto de estimación, la elipse es el sector de búsqueda para ese punto, los puntos verdes, rojos y azul claro son los puntos utilizados para el cálculo del punto de estimación.

Tabla III. Parámetros de interpolación utilizados para cada elemento. El método de interpolación fue el de Kriging ordinario y semivariograma estable. El número mínimo de vecinos fue de dos y el máximo de cinco en cuatro sectores.

	Arsénico	Plomo
Eliminación de tendencia	Segundo orden	Ninguna
Tipo de sector	4 sectores	4 sectores con 45°
Eje vertical	11,450.060	2,500
Eje horizontal	11,450.060	50,000
Error medio (EM)	-0.736	-1.680
Error estándar medio (EEM)	-0.008	-0.005
Raíz cuadrada del error medio (RCM)	56.994	2.020

dado a cada punto muestreado s_i y N es el número de puntos muestreados que serán usados para calcular el punto de estimación. El cálculo del factor de ponderación λ obedece a la ecuación [2] que se deriva de la ecuación [3]:

$$\Gamma \begin{matrix} * \\ \lambda \end{matrix} = g \quad \text{ó} \quad \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad [2]$$

Despejando λ de la ecuación [2] se tiene:

$$\lambda = \Gamma^{-1} * g \quad [3]$$

La matriz gama Γ contiene los valores del semivariograma modelado para cada par de puntos muestreados usados para calcular el punto de estimación, donde γ_{ij} es el valor del semivariograma modelado basado en el tipo modelo. El vector g contiene los valores del semivariograma modelado para cada punto muestreado y el punto de estimación.

Así pues, los valores γ_{ij} de la matriz Γ y los valores γ_{i0} del vector g se obtienen mediante la ecuación [4] para el método de semivariograma estable, ecuación [4].

$$\gamma(h, \theta) = \theta_s \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{\|h\|}{\theta_r} \right)^{\theta_e} \right) \right] \quad \text{para todo } h \quad [4]$$

donde h es el vector formado por las coordenadas de cada pareja de puntos s_i y s_j , θ corresponde a los parámetros θ_s que corresponden al valor del sill o meseta y θ_r al valor del rango con $\theta_s \geq 0$ y $0 \leq \theta_e \leq 2$.

El método Kriging permite estimar la incertidumbre de interpolación, mostrando los errores generados por la variación del valor estimado con respecto al real. Los errores obtenidos son Error Medio (EM), Error Estándar Medio (EEM) y Raíz del Cuadrado del Error Medio (RCM). Lo que se busca en el caso del EM es un valor igual o lo más cercano a cero, ya que éste representa el promedio de las diferencias entre los valores estimados y los reales, por lo que, si se obtiene un valor mayor a cero, se estarían sobreestimando los valores que predijo, y, al obtener un resultado menor a cero, se subestimarían los valores de predicción. En cuanto al EEM, debe ser el valor más pequeño posible; el RCM, igual o lo más cercano a la unidad (Webster y Oliver, 2007) (Tabla III).

5.2 Comparación con la norma oficial mexicana

De los 28 elementos analizados en las cartas geoquímicas Zacatecas y Guadalupe (SGM, 1999) solamente ocho tienen completos sus análisis y, de ellos, solamente el arsénico, cadmio, cromo y plomo tienen valores superiores a las CR_T definidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Fig. 4). El cromo y el cadmio sobrepasan las CR_T, aunque solamente en dos muestras (Figs. 4b y 4c).

La distribución espacial de las concentraciones de arsénico obtenida con el método de Kriging ordinario comparada con las CR_T recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

(SEMARNAT, 2006) se muestra en la Fig. 5. Hay 60 muestras que tienen concentraciones mayores a las recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para uso agrícola/residencial/comercial y 4 tienen concentraciones mayores a las recomendadas para uso industrial (Figura 4a). La concentración máxima de As es de 893 ppm (40 veces mayor a los 22 ppm establecidos en la norma para uso agrícola/residencial/comercial) (Tabla II). En el modelo (Figura 5) se observa que las concentraciones altas (> 22 ppm) están en la mitad norte de la zona de estudio. La distribución dada por este modelo muestra que las concentraciones por encima de los límites establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006)

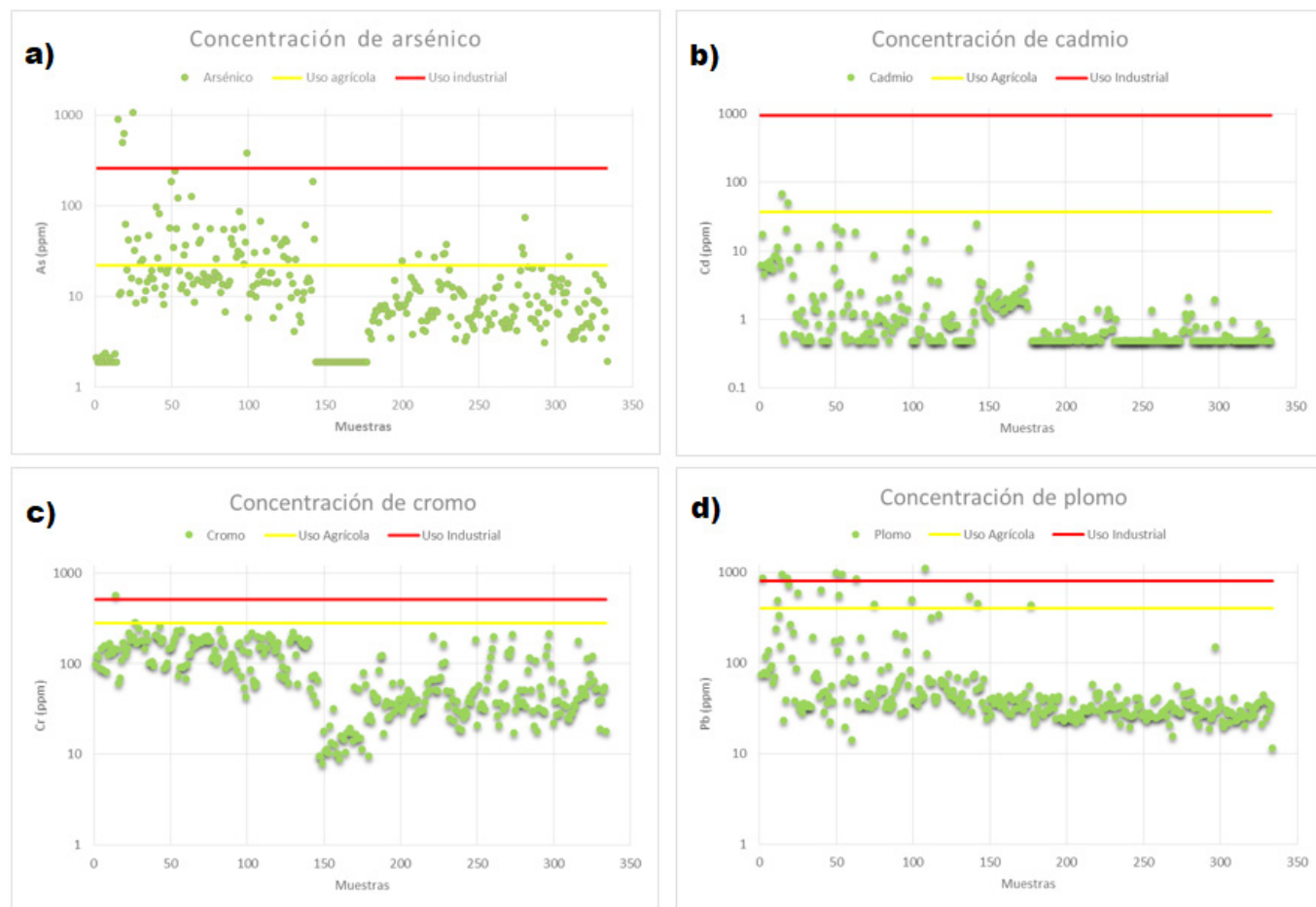


Figura 4. Dispersión de la concentración de los elementos que tienen muestras con valores superiores a los valores de CR_T definidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La línea amarilla es el límite del uso agrícola/residencial/comercial y la roja es el límite para uso industrial.

para uso agrícola/residencial/comercial se encuentran en casi la totalidad de la ciudad de Zacatecas, parte de Guadalupe, Tacoaleche, San Antonio del Ciprés, Morelos, Zóquite, Hacienda Nueva, Saucedá de la Borda, Vetagrande y Pánuco. Las concentraciones más altas (> 260 ppm) se localizan desde la parte norte de la ciudad de Zacatecas hasta el sur de Hacienda Nueva, y coinciden con la localización de la mina Cozamin propiedad de Capstone Gold (Figura 5).

De las concentraciones de plomo analizadas en este trabajo, resultó que 10 muestras sobrepasaron las CRT recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Fig. 4d) para uso agrícola/residencial/comercial y 7 sobrepasaron los límites para uso industrial (Figura 4d). En el modelo de distribución del plomo (Figura 6) se observa que las concentraciones que exceden los límites de las CRT de acuerdo a lo establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006)

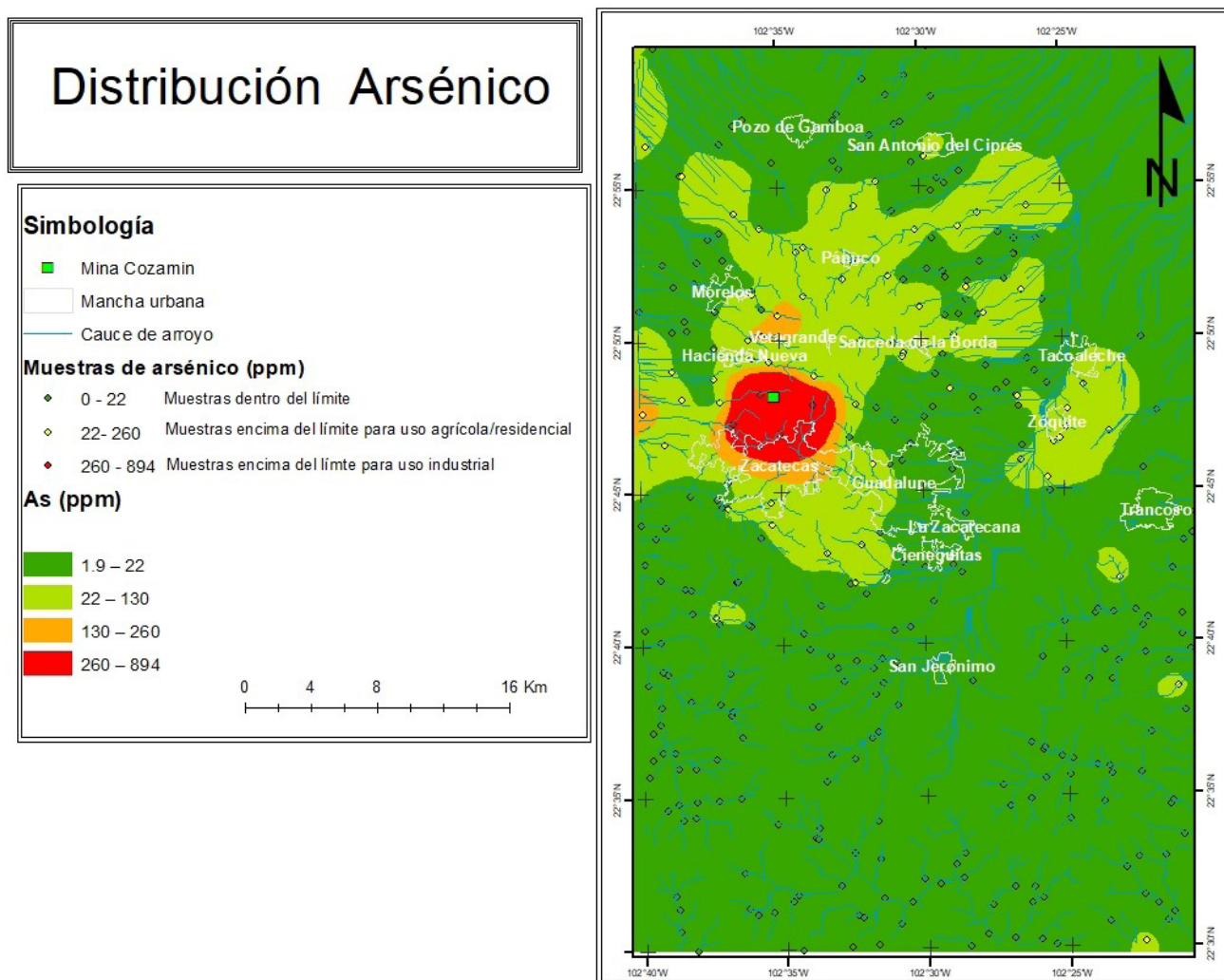


Figura 5. Modelo de distribución de Arsénico en la Sierra de Zacatecas, los puntos representan las muestras. Los parámetros de interpolación se muestran en la Tabla III. Las zonas en verde oscuro representan las zonas dentro de los límites, en verde claro y anaranjado las zonas que exceden los límites para uso agrícola/residencial/comercial y en rojo las zonas que exceden los límites para uso industrial establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006).

están en la mitad norte de la zona de estudio. El modelo de distribución del plomo (Figura 6) muestra tres zonas que contienen las mayores concentraciones: una está al norte de la ciudad de Zacatecas, otra en la ciudad de Guadalupe y la última entre Vetagrande y Saucedo de la Borda.

Se realizó un análisis para determinar el coeficiente de correlación de Pearson entre cada par de elementos, para determinar la relación que existe entre ellos. El coeficiente de correlación de Pearson es un valor entre -1 y 1 que indica la relación que existe entre dos

variables; si el valor es positivo se dice que existe una correlación positiva y si es negativo se dice que hay una correlación negativa; conforme el valor es más cercano a ± 1 la correlación de los valores es mejor y conforme es más cercano a 0 no hay correlación entre los datos (Cohen et al., 2003). En la Tabla IV se presentan los resultados del análisis de correlación entre los elementos objeto de este estudio, donde se encontró que existe una correlación positiva entre As-Cd-Pb y Cd-Pb. Esta correlación se debe a que el plomo está asociado con el As y Cd en la formación de yacimientos minerales.

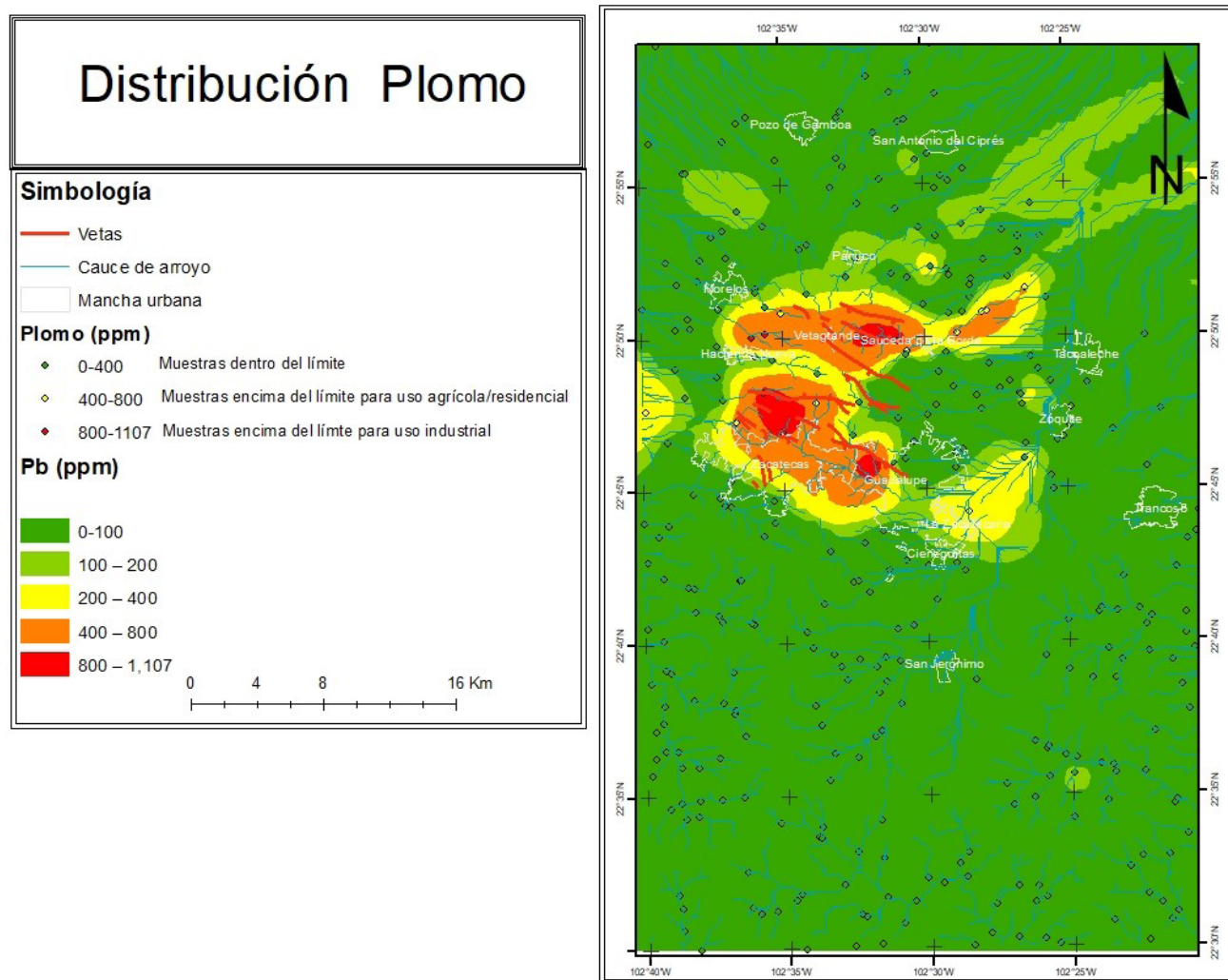


Figura 6. Modelo de distribución espacial del Plomo. La zona roja es la que rebasa el límite para uso de suelo industrial, y la zona de color naranja es la que rebasa el límite para el uso de suelo agrícola/residencial/comercial.

Tabla IV.- Tabla de correlación de concentración de elementos de 334 muestras de sedimento activo, en fondo amarillo se muestran las correlaciones más relevantes (> 0.5).

Elemento	As	Cd	Cr	Pb
As	1	0.889	0.152	0.648
Cd		1	0.174	0.805
Cr			1	0.264
Pb				1

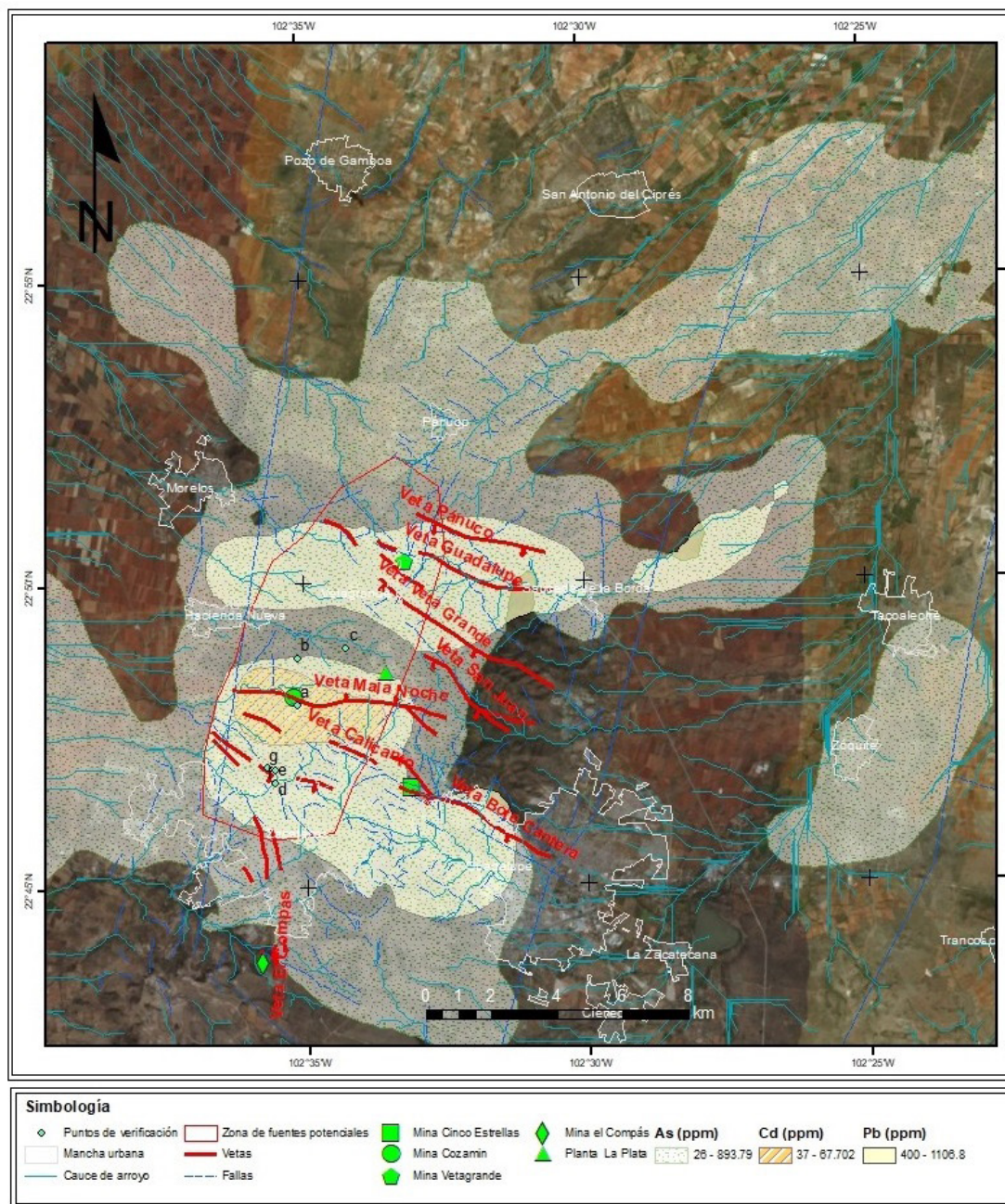


Figura 7. Plano de la zona de estudio con los principales objetos de interés para determinar las fuentes de contaminación (modificado de Bush et al., 2018).

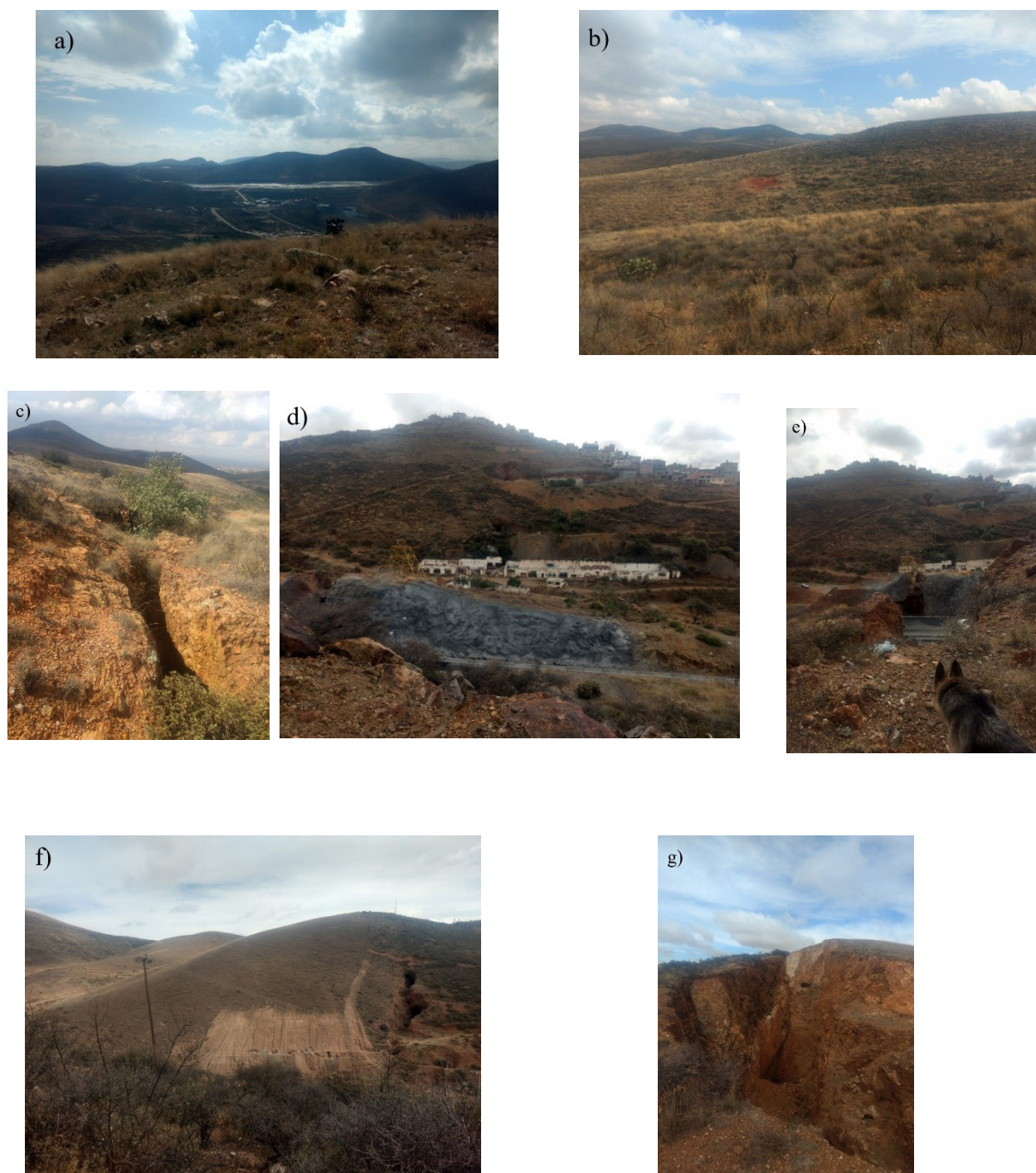


Figura 8. Sitios verificados en campo en donde hay altas concentraciones de metales pesados, los puntos “a” a “g” se muestran en la Figura 8 y el número entre paréntesis indica el sitio de verificación indicado en la Figura 2a: a) presa de jales de Cozamin (3); b) suelos oxidados y antiguas represas (7); c) veta minada (11); d) bancos de material y antiguas obras mineras (16), e) estructura minada y antiguas obras mineras; f) estructura minada y denudación; y g) estructura minada.

5.3 Distribución de los metales pesados

En la Figura 7 se muestran los resultados de los dos modelos (Figuras 5 y 6) correspondientes a los elementos con CR_T mayores a las establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) y que tienen una correlación positiva (Tabla IV). La superficie que abarcan las concentraciones que superan las CR_T tiene un área de 395 km² para el As y para el Pb es de 84 km². En la Figura 7 se aprecia que la zona donde se observan concentraciones altas para los tres elementos (Cd, As y Pb) es la zona norte de la ciudad de Zacatecas, en los alrededores de la mina Cozamin (Figura 8a). En los alrededores de Vetagrande (Figuras 8b a 8g) también se observa un área con altas concentraciones para el As y Pb, en cuya parte central está la mina Veta Grande, propiedad de minera Santa Cruz. La Sierra de Zacatecas y valles adyacentes están en el distrito minero Zacatecas, cuyos yacimientos se caracterizan por vetas y cuerpos estratiformes y la mineralización se caracteriza por minerales de Ag, Pb, Zn y Cd (SGM, 2017). Basados en su orientación, edad y emplazamiento, las estructuras mineralizadas pueden ser divididas en tres tipos de sistemas de vetas: el sistema Ag-(Pb, Zn, Cu, Au), el sistema Au-Ag-(Se) y el sistema de vetas con contenidos de fluorita (Ponce y Clark, 1988). El sistema más largo y económicamente más importante es el sistema Ag-(Pb, Zn, Cu, Au) que tiene una orientación NW-SE. Este sistema ha sido explotado históricamente en los sistemas de vetas de Pánuco, Veta Grande, Mala Noche, Bote, La Cantera y San Rafael. Este sistema está formado por largas vetas con longitudes que varían de los 4 a los 16 km y un ancho que varía de 1 a 30 m (Bui y Giroux, 2017). En la actualidad existen cuatro minas que se encuentran activas y continúan con la explotación de yacimientos minerales con contenidos de oro, plata, cobre, plomo y zinc.

Se realizó una visita de campo para identificar posibles fuentes de contaminación e inferir

el origen de las altas concentraciones de metales pesados; así mismo, se visitó la zona comprendida entre la parte norte de la ciudad de Zacatecas y el sur de Hacienda Nueva, así como los alrededores de la cabecera municipal de Vetagrande, que fueron las zonas que mostraron mayor concentración de metales pesados en los modelos realizados (Figura 7). Se observó que esta zona está compuesta por tierras silvestres, sin indicios de actividad agrícola. En Vetagrande se encuentran la mina Veta Grande y su planta de procesamiento de mineral y presa de jales (Figura 8). Al sur de Vetagrande y sureste de Hacienda Nueva hay una planta procesadora de minerales denominada La Plata (Figura 7), propiedad de gobierno Estatal. En esta zona hay tiros de mina, bancos de materiales, construcciones en ruinas, afloramientos de rocas oxidadas, afloramiento de vetas previamente minadas; además de que en esta zona se localiza la mina Cozamin, propiedad actual de Capstone Gold con su respectiva planta de procesamiento de mineral y presa de jales (Figura 8a).

Discusión

La distribución de concentraciones de metales pesados se clasificó en tres tipos, tomando en cuenta su origen: natural, natural-antropogénico y antropogénico. Se considera una distribución de concentraciones de origen natural cuando los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son característicos de la región, es decir, los EPT se encuentran presentes en la litología, suelo y estructuras geológicas de la zona y su distribución espacial depende únicamente de los procesos geológicos asociados con el intemperismo y la erosión, así como agentes como la flora y la fauna de la región. La distribución de depósitos de oro de placer es un ejemplo de esa distribución, ya que obedece a un depósito mineral cuya distribución fue controlada principalmente por la erosión hídrica. La distribución de concentraciones de origen natural-antropogénico es aquella en que la distribución espacial de los EPT no

sólo depende de la dispersión ocasionada por procesos geológicos y naturales, sino que también es afectada por la intervención del hombre. Un ejemplo de esto es la explotación de recursos mineros, donde la extracción y procesamiento de minerales de interés acelera los procesos erosivos de manera selectiva, puesto que expone a la superficie elementos que, si bien son propios de la región, se encontraban en profundidades tales que los procesos erosivos tardarían millones de años en llegar a ellos. En cuanto al origen antropogénico se define como la distribución de concentraciones cuyos elementos no son originarios de la región, sino que son insertados al sistema por el hombre. Un ejemplo de esto es la distribución de mercurio en la Sierra de Zacatecas, elemento químico que en términos geológicos no es originario de la región y que fue traído de otras regiones para la recuperación de minerales económicos mediante el método de amalgamación (Olmos-Trujillo et al., 2013).

Los elementos As y Cd son usados en la fabricación de pesticidas y fertilizantes minerales (Martin y Griswold, 2009), por lo que la actividad agrícola podría ser una potencial fuente de altas concentraciones para estos elementos; sin embargo, en la visita realizada no se encontraron indicios de esta actividad en la zona con altas concentraciones, pero sí en el valle al oeste de Hacienda Nueva. Debido a que los modelos realizados en este trabajo no muestran altas concentraciones asociadas a la zona agrícola de la Sierra de Zacatecas, se descarta esta actividad como su posible fuente.

En la zona de estudio existen yacimientos minerales epitermales de baja sulfuración de cuyos minerales se extraen elementos como Au, Ag, Pb, Zn y Cu. En las Figuras 2 y 7, se aprecian las estructuras geológicas en las que están los minerales de interés económico, llamados mena (Au, Ag, Pb, Zn y Cu), que a su vez tienen minerales asociados que no son de interés económico y que se conocen como ganga. Los

minerales de ganga son parte del material que es extraído durante la explotación de las menas y que tienen pobre interés económico (As, Sb, Cd y Mg). La existencia de estructuras geológicas asociadas a concentraciones atípicas de metales pesados, específicamente a concentraciones de Pb, As y Cd en la Sierra de Zacatecas, indica que estos elementos son característicos de la región. Sin embargo, la distribución no corresponde a una distribución natural de los elementos por dos razones:

- 1) Existen estructuras con contenidos minerales en la Sierra de Zacatecas correspondientes a las vetas Pánuco (Figura 7) y las vetas San Juan y Veta Grande (Figuras 2 y 7) en zonas donde los modelos no muestran altas concentraciones de estos elementos.
- 2) Las zonas donde están establecidas plantas de procesamiento de minerales coinciden con las zonas que presentan mayores concentraciones de estos elementos según los modelos realizados, esto indica que los factores de dispersión son influenciados por la remoción y acumulación de residuos de minerales en presas de jales, después de ser procesados.

Los modelos realizados en este trabajo muestran una idea general de la distribución de metales pesados en la Sierra de Zacatecas y sus valles adyacentes. El análisis realizado determina que la actividad minera es una de las probables fuentes de altas concentraciones de los mismos; sin embargo, hay que tomar en cuenta que la densidad de muestreo es, en promedio, de una muestra por cada 5.7 km² y que las muestras no están equiespaciadas o formando una retícula. Resultaría idóneo un muestreo más detallado, para que los resultados obtenidos sean más precisos y se pueda conocer la distribución con mayor detalle. Otro aspecto a tomar en cuenta es que las muestras fueron tomadas en 1999, año en el cual la planta procesadora La Plata aun no existía y las compañías mineras Endeavour

Silver, Capstone Gold y Minera Santacruz que actualmente están presentes en la zona de estudio, aún no iniciaban actividades, siendo sólo la última la que mantiene un contrato con la minera local Contracuña. Debido a la fecha de toma de las muestras, este estudio no representa la condición actual del territorio, por lo que un remuestreo dará una idea del comportamiento de la distribución de las concentraciones y su movilidad ambiental.

Conclusiones

Con base en el análisis de los modelos realizados, la revisión bibliográfica, las visitas de campo y la identificación de zonas de interés, se mostró que la presencia de metales pesados está distribuida de forma irregular alrededor de las estructuras de rumbo NW-SE, que las concentraciones más altas se localizan en la mitad norte de la zona de estudio adyacentes a las principales estructuras geológicas mineralizadas que tienen también una tendencia preferente NW-SE. Los elementos cuyas concentraciones son superiores a lo establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) son el arsénico, plomo y cadmio. Su concentración puede representar un riesgo para la salud de la población y de los ecosistemas ya que su distribución es de origen natural-antropogénico, relacionada con la explotación, transporte, proceso y acumulación de minerales producto del minado de estructuras geológicas mineralizadas en la Sierra de Zacatecas. En este trabajo se descartaron las actividades agrícolas como posibles fuentes de contaminación de As y Cd, al no haber evidencia de este tipo de prácticas en las zonas visitadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la corrección de estilo hecha por Azaret Zamudio que permitió mejorar la retórica y sintaxis del documento. Los

autores también agradecen el apoyo de la Dra. Patricia de Lira Gómez, Directora de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ, para la realización de este proyecto. Este trabajo forma parte del proyecto UAZ-2018-37580 bajo la responsabilidad de Felipe Escalona. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por el Servicio Geológico Mexicano para utilizar los datos de las cartas geoquímicas Zacatecas y Guadalupe escala 1:50,000. Finalmente, el contenido de este documento fue mejorado con los comentarios y sugerencias hechos por Zayre Ivonne González Acevedo, Loic Peiffer, José García Elías y Luis Delgado.

Bibliografía

- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D. y Luhr, J.F., 2000, Evolución tectonomagmática postpaleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincial tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 59-71.
- Barboza-Gudino, J.R., Tristán-González, M. y Torres-Hernández, J.R., 1999, Tectonic setting of pre-Oxfordian units from central and northeastern Mexico: A review. In Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 340, 197-210.
- Bartolini, C., Lang, H., Cantú-Chapa, A. y Barboza-Gudiño, R., 2001, The Triassic Zacatecas Formation in central Mexico: Paleotectonic, paleogeographic, and paleobiogeographic implications. In Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir, 75, 295-315.

- Bui, V.P. y Giroux, G.H., 2017, Technical Report Veta Grande Project Zacatecas State, Mexico. Vancouver, Canada, Santacruz Silver Mining Ltd., reporte técnico, 121 pp.
- Burckhardt, C., 1906, Sobre el descubrimiento del Triásico marino en Zacatecas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 2, 43-45.
- Bush, G., Hardy, J., Kirkham, G., Martin, C., McLennan, V., Mohseni, P., Preciado, H., 2018, NI 43-101 Technical Report on the Cozamin Mine, Zacatecas, Mexico: Vancouver, Capstone Mining Corp., reporte técnico, 170 pp.
- Caballero-Martínez, J.A., 1999a, Informe final complementario a la cartografía geológico minera y geoquímica escala 1:50 000 carta Zacatecas, clave F13-B58 Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Consejo de Recursos Minerales (CRM), Subdirección de Infraestructura Geológico-Minera, Informe final, 121 pp.
- Caballero-Martínez, J.A., 1999b, Informe final complementario a la cartografía geológico minera y geoquímica escala 1: 50 000 carta Guadalupe, clave F13-B68 Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Consejo de Recursos Minerales (CRM), Subdirección de Infraestructura Geológico-Minera, Informe final, 71 pp.
- Carrillo-González, R. y González-Chávez, M., 2006, Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. Environmental Pollution, 144, 84-92.
- Centeno-García, E. y Silva-Romo, G., 1997, Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 14, 244-260.
- Cohen, J., Cohen, P., West. S.G. y Aiken, L.S., 2003, Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. Mahwah, N.J. y Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, third edition, 736 pp.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1991, Monografía geológico-minera del Estado de Zacatecas. Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, informe, 154 pp.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1993, Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. USA, Environmental Protection Agency, Federal Register II 40 CFR Part 257, reglas y regulaciones, 176 pp.
- Environmental System Research Institute (ESRI), 2003, ArcGIS 9 Using ArcGIS Geostatistical Analyst. USA, Environmental System Research, tutorial, 300 pp.
- Environmental System Research Institute (ESRI), 2010, Geostatistical Analyst Tutorial. Environmental System Research Institute, tutorial, 57 pp.
- Escalona-Alcázar, F.J., Suárez-Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003, La secuencia volcánica Terciaria del Cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. GEOS, 23(1), 2-16.
- 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, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 48-64.

- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Nebel, O., Velasco-Tapia, F., Weber, B. y Núñez-Peña, E.P., 2014, Maturing Arc Signatures Monitored by Trace Element and Hf Isotope Systematics in the Early Cretaceous Zacatecas Volcanic Field, Mexico. *The Journal of Geology*, 122, 549-566.
- Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P., Nieto-Samaniego, Á.F. y Núñez-Peña, E.P., 2016, The Palaeocene-early Oligocene Zacatecas conglomerate, México: sedimentology, detrital zircon U-Pb ages, and sandstone provenance. *International Geology Review*, 58, 826-848.
- González-Manrique, S., 2012, Determinación y movilidad de metales tóxicos en residuos del proceso de recuperación de restos mineros (jales) de Zacatecas (México). Valladolid, España, Universidad de Valladolid, trabajo fin de máster, 93 pp.
- Gutiérrez-Amador, A., 1908, Las capas Cárnicas de Zacatecas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, IV, 28-35.
- Hansen, E., Lassen, C., Stuer-Lauridsen, F. y Kjølholt, J., 2002, Heavy Metals in Waste. Denmark, European Commission Environment Directorate General, Final Report, 83 pp.
- Hutton, M. y de Meeûs, C., 2001, Analysis and conclusions from Member States assessment of the risk to health and the environment from cadmium in fertilizers. London, UK, European Commission Enterprise and Industry Directorate General, Final Report, 66 pp.
- Koptsik, S., Koptsik, G., Livantsova, S., Eruslankina, L., Zhmelkova, T. y Vologdina, Z., 2003, Heavy metals in soils near the nickel smelter: chemistry, spatial variation, and impacts on plant diversity. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(3), 441-450.
- Lin, Y., Teng, T. y Chang, T., 2002, Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan. *Landscape Urban Plan*, 62(1), 19-35.
- Løkke, H., Bak, J., Falkengren-Grerup, U., Finlay, R.D., Ilvesniemi, H., Nygaard, P.H. y Starr, M., 1996, Critical loads of acidic deposition for forest soils: is the current approach adequate? *Ambio*, 25(8), 510-516.
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. e Iriondo, A., 2008, Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del Sistema de Fallas San Luis-Teprehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 533-548.
- Manzanares-Acuña, E., Vega-Carrillo, H.R., Escobar-León, M.C., Letechipia-de León, C., Guzmán-Enríquez, L.J., Hernández-Dávila, V.M. y Salas-Luévano, M.A., 2005, Evaluación de Riesgos ambientales por plomo en la población de Vetagrande, Zacatecas. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad de Estudios Nucleares, Reporte final, 50 pp.
- Manzanares-Acuña, E., Vega-Carrillo, H.R., Salas-Luévano, M.Á., Hernández-Dávila, V.M., Letechipia-de León, C. y Bañuelos-Valenzuela, R., 2006, Niveles de plomo en la población de alto riesgo y su entorno en San Ignacio, Fresnillo, Zacatecas, México. *Salud Pública de México*, 48(3), 212-219.

- Martin, S. y Griswold, W., 2009, Human Health Effects of Heavy Metals. Environmental Science and Technology Briefs for Citizens, 1(15), 1-6.
- Mayorga, R., 2012, Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados en el Distrito Minero de Fresnillo (Zacatecas, México): Fresnillo, Zacatecas, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, tesis de maestría, 161 pp.
- McGehee, R.V., 1976, Las rocas metamórficas del Arroyo de la Pimienta, Zacatecas., Zac.. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 37, 1-10.
- Mireles, F., Dávila, J., Pinedo, J., Reyes, E., Speakman, R. y Glascock, M., 2012, Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis. Microchemical Journal, 103, 158-164.
- Monod, O. y Calvet, P., 1992, Structural and stratigraphic re-interpretation of the Triassic units near Zacatecas (Zac.), Central Mexico: Evidence of a Laramide nappe pile. Zentralblatt für Geologie und Palaöntologie Teil, 6, 1533-1544.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Camprubí Í Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica Cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, 285-318.
- Olmos-Trujillo, S., Bluhm-Gutiérrez, J., Escalona-Alcázar, F.J. y Núñez-Peña, E.P., 2013. Reseña histórica y situación actual de la minería en Zacatecas; aspectos sociales, económicos y ambientales. Segundo Congreso Latinoamericano de Ciencias Sociales "Las crisis en América Latina, diferentes perspectivas y posibles soluciones", p. 1-14.
- Ortega-Flores, B., Solari, L.A. y Escalona-Alcázar, F.J., 2016, The Mesozoic successions of western Sierra de Zacatecas, Central Mexico provenance and tectonic implications. Geological Magazine, 153(4), 696-717.
- Ortega-Martínez, E., 2016, Análisis petrográfico y geoquímico de la secuencia Mesozoica del arco de islas del Cretácico Temprano en Pánuco y la parte NW de la Sierra Fría: Zacatecas. Universidad Autónoma de Zacatecas, Tesis de Licenciatura, 63 pp.
- Palumbo, B., Angelone, M., Bellanca, A., Dazzi, C., Hauser, S., Neri, R. y Wilson, J., 2000, Influence of inheritance and pedogenesis on heavy metal distribution in soils of Sicily, Italy. Geoderma, 95, 247-266.
- Ponce, B.F. y Clark, K.F., 1988, The Zacatecas Mining District: a Tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization. Economic Geology, 83, 1668-1682.
- Ramírez-Ortiz, J. y Núñez, J., 2009, Study of Soil Contaminated with Arsenic, Cadmium and Lead in Ancient Tailings in Zacatecas, México. International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 3(3), 95-99.
- Ransom, W., Fernández, L.A., Simmons, J.W. y Enciso-de la Vega, S., 1982, Petrology of the metamorphic rocks of Zacatecas, Zac., México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 42, 37-59.
- Rodríguez, L.L., Hengl, T. y Reuter, H.I., 2008, Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. Geoderma, 148, 189-199.

- Salemaa, M., Vanha-Majamaa, I. y Derome, J., 2001, Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. *Environmental Pollution*, 112(3), 339–350.
- Santos-Santos, E., Yarto-Ramírez, M., Gavilán-García, I., Castro-Díaz, J., Gavilán-García, A., Rosiles, R., Suárez, S. y López-Villegas, T., 2006, Analysis of Arsenic, Lead and Mercury in Farming Areas with Mining. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 50(2), 51-63.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2006, Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Ciudad de México, Distrito Federal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana, 69 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1997, Carta Geológico-Minera Zacatecas clave F13-6, Escala 1:250,000. Pachuca, Hgo., México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1999, Cartas Geoquímicas Zacatecas y Guadalupe claves F13-B58 y F13-B68 Escala. 1:50,000. Pachuca, Hgo., México, Servicio Geológico Mexicano, 2 mapas.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017, Panorama Minero del Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Secretaría de Economía, informe, 56 pp.
- Silva-Romo, G., Arellano-Gil, C., Mendoza-Rosales, C. y Nieto-Obregón, J., 2000, A submarine fan in the Mesa Central, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 429-442.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, G., Aguilón-Flores, A. e Yza-Guzmán, R., 2012, Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 353-367.
- Webster, R. y Oliver, M. A., 2007, *Geostatistics for Environmental Scientists*. London, UK, John Wiley and Sons, Ltd., 315 pp.

Recibido: 23 de enero de 2019

Corregido por el autor: 22 de noviembre de 2019

Aceptación: 2 de diciembre de 2019

Evaluación sismotectónica del sureste de Cuba en el contexto geodinámico del norte del Caribe

Lenin Ávila Barrientos^{1*}, Marco A. Pérez Flores², Enrique D. Arango Arias³, José A. Batista Rodríguez⁴

¹CONACYT-CICESE, División Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología.

²Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE),
División Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica Aplicada.

³Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas.
Santiago de Cuba, Cuba

⁴Universidad Autónoma de Coahuila. Escuela Superior de Ingeniería

*lenavila@cicese.mx

Resumen

El actual conocimiento geológico, geofísico y geodinámico de la región sur del archipiélago cubano, requiere actualizar el marco sismotectónico del este de Cuba. En esta investigación, se llevó a cabo un análisis de las características sismotectónicas de la región sureste de Cuba, en donde se presenta el mayor peligro sísmico en el país. La sismicidad intraplaca fue comparada con aquella que ocurre en el límite de placas del sureste de la isla de Cuba. Con imágenes de satélite ASTER y un modelo digital de terreno, se desarrolló un mapa con lineamientos estructurales, los cuales se correlacionan con la sismicidad intraplaca observada. Finalmente, de la evaluación sismotectónica realizada, se considera que la sismicidad intraplaca es debido a la deformación del movimiento absoluto, por la interacción de las placas Norteamericana y la microplaca Gonave. Este análisis sismotectónico da la pauta para actualizar el modelo neotectónico y realizar nuevos estudios de peligro sísmico en el sureste de Cuba.

Palabras clave: Cuba, Imágenes ASTER, Microplaca Gonave, Sismicidad, Sismotectónica.

1. Introducción

El área que involucra este estudio incluye la región sureste del archipiélago cubano (Figura 1). Esta zona es considerada como la de mayor peligro sísmico en el país debido a su cercanía con el límite entre la placa Norteamericana y la microplaca Gonave, donde en los últimos 500 años han sido reportados varios sismos con intensidades que varían de VIII a IX grados (Chuy, 1999) en la escala de Medvedev-Sponhuer-Karnik (MSK; Medvedev y Sponheuer, 1969).

Del actual conocimiento geológico, geofísico y geodinámico de la región sur del archipiélago cubano, se sugiere actualizar las características de las estructuras principales y las posibles

zonas sismogénicas de la región. Con el objetivo de evaluar la sismicidad del sureste de Cuba, se han propuesto varios modelos de las zonas sismogénicas, basados en esquemas de fallas activas y empleando metodologías diferentes (Cotilla et al., 2007; Cotilla y Alvarez, 2001; Cotilla, 1998; Cotilla et al., 1991; Babaev y Orbera, 1989; Orbera et al., 1987). La Tabla 1 muestra un resumen de las fallas activas y zonas sismogénicas consideradas en estudios anteriores, así como la magnitud máxima de los sismos que pueden ocurrir en ellas, de acuerdo con la Comisión Ad Hoc (1991). La Figura 2 muestra la distribución espacial de las fallas.

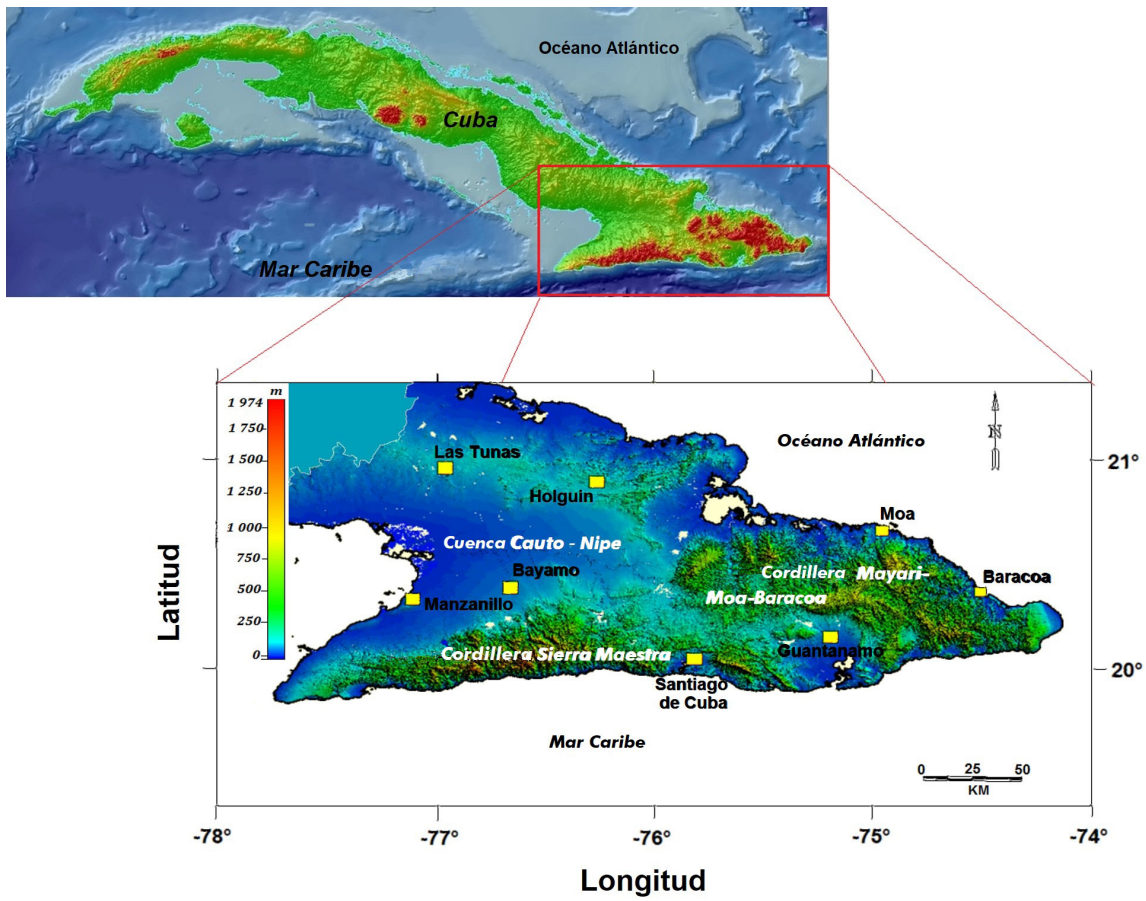


Figura 1. Área de estudio localizada en el sureste de Cuba

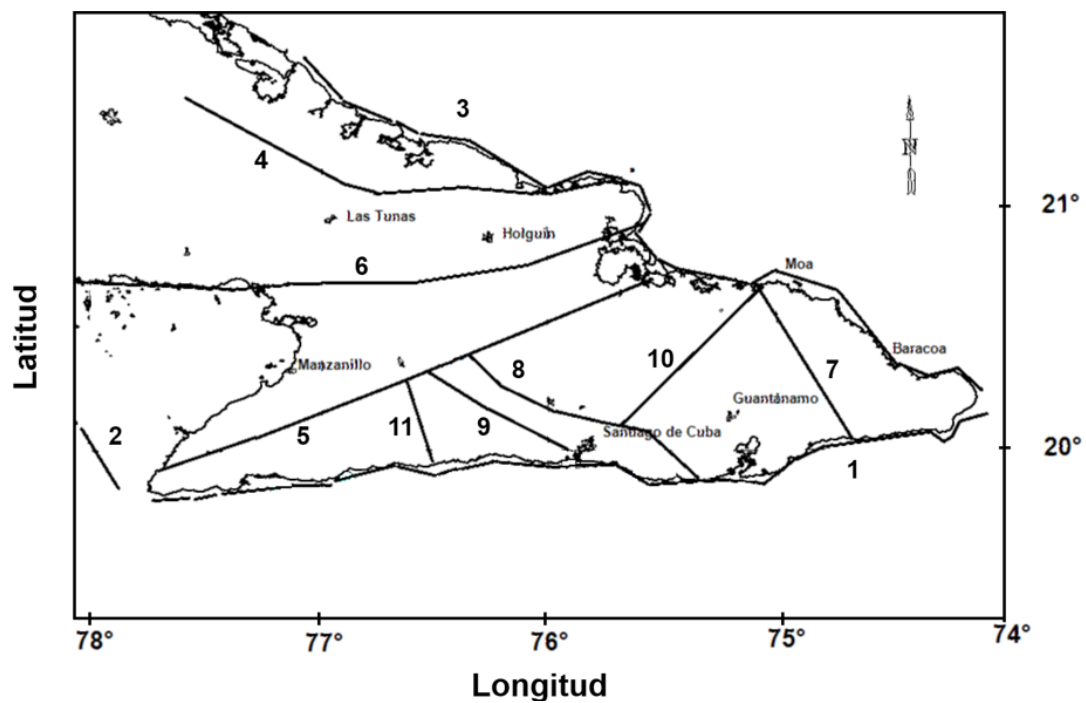


Figura 2. Ubicación de las fallas enlistadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Falla propuestas en estudios anteriores y la magnitud máxima de los sismos que podrían generarse

No.	Nombres empleados para las fallas propuestas	Autor			Magnitud máxima de los sismos (Comisión Ad Hoc, 1991)
		Orbera et al. (1989)	Babaev y Orbera (1989)	Cotilla et al. (2007)	
1	Oriente/Bartlett - Cayman/ Sierra Maestra	Lateral, vertical	Lateral, vertical	Falla de deslizamiento por el rumbo	7.6–8.0
2	Sur de Cuba			Normal	7.0
3	Norte de Cuba/Sabana	Vertical	Normal	Normal, inversa, vertical	6.0–7.0
4	Cubitas	Vertical		Normal, inversa	5.5
5	Cauto - Nipe/Oriente	Lateral, vertical	Normal	Falla de deslizamiento por el rumbo	7.0
6	Cauto - Norte/Holguín/ Banes -Guayabal	Lateral, vertical	Flexo-disyuntiva		6.5
7	Purial				6.5
8	Baconao/Palma		Normal	Normal, inversa, Falla de deslizamiento por el rumbo	7.0
9	Santiago- Bayamo				5.5
10	Moa - Santiago	Lateral, vertical			5.0
11	Bayamita/Bayamo				6.5

Contexto geodinámico de la región

Los estudios geodinámicos llevados a cabo en los últimos años en la parte norte del Caribe (Granja-Bruña et al., 2014; Saint Fleur et al., 2015; Rodríguez et al., 2017; Styron et al., 2019), han establecido un esquema tectónico complejo debido a diversos procesos geológicos desde el Eoceno Temprano (Leroy et al., 2000), relacionados a la formación del centro de dispersión Caimán en la corteza oceánica y a la falla transformante sureste que, en un inicio

fue considerada como límite entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe (Mann et al., 1995; Figura 3).

Modelos de deformación de la corteza en el límite entre las placas Norteamericana y del Caribe propuestos por Deng y Sykes (1995) y Calais y Lépinay (1993), así como mediciones de velocidad a través de GPS realizadas por Pollitz y Dixon (1998), Lundgren y Russo (1996), Benford et al. (2012a, 2012b, 2014), Symithe et al. (2015) mostraron la existencia de los límites y

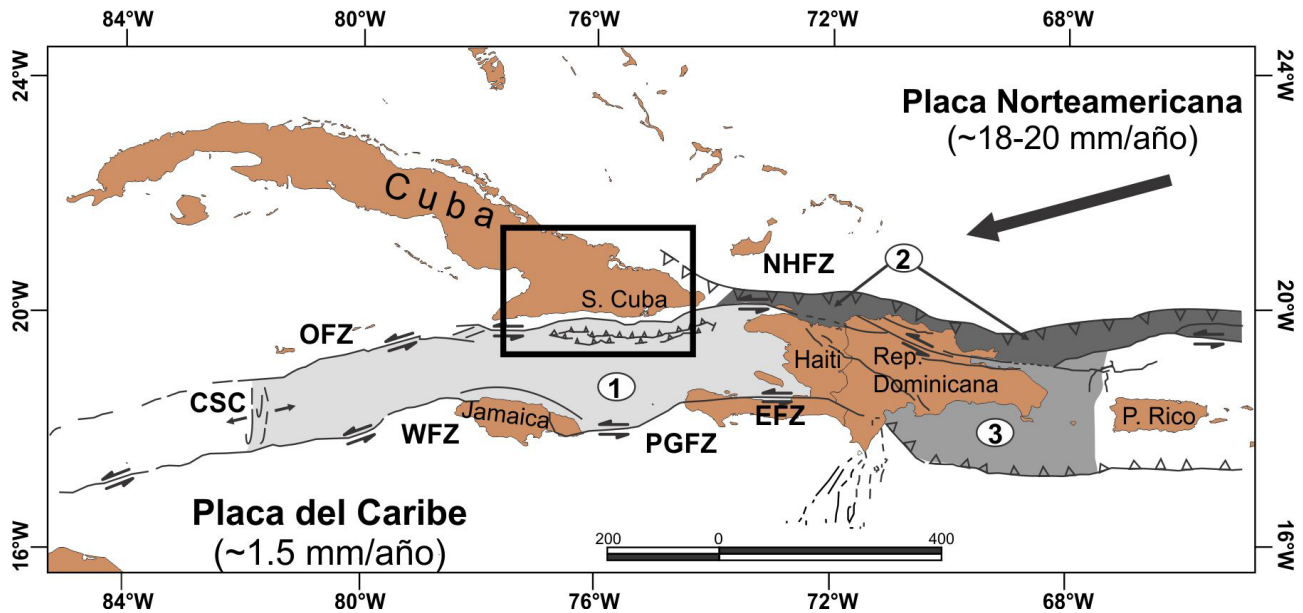


Figura 3. Marco tectónico del norte del Caribe. El rectángulo delimita el área de estudio (Benford et al., 2012a, 2012b; Calais et al., 2010; DeMets et al., 2010, 2000). 1. Microplaca Gonave, 2. Micro placa Norte, 3. Microplaca Puerto Rico-La Española, NHFZ- Zona de falla Norte La Española, OFZ- Zona de falla Oriente, PGFZ- Zona de falla Plantain-Garden, EFZ- Zona de falla Enriquillo, CSC- Centro de dispersión Caimán, WFZ- Zona de falla Walton. S. Cuba- Santiago de Cuba. P. Rico-Puerto Rico. Rep. Dominicana-República Dominicana

movimiento de la microplaca Gonave, la cual fue propuesta en un inicio por Rosencrantz y Mann (1991). Heubeck et al. (1990) y Mann et al. (1995) han sugerido que la microplaca tiene un área de 190,000 km² de forma rectangular y un área de, y se localizada a lo largo de la parte noreste de la placa del Caribe.

Mann et al. (1995) sugieren que la microplaca Gonave está sujeta a movimientos de tipo lateral izquierdo en su parte sur (cerca del límite de la placa del Caribe), con convergencia que produce un choque contra la placa Norteamericana en su margen sur. En el mismo contexto, sugieren que la formación de la zona de falla de 1,200 km de largo desde el rift activo de Caimán hasta los 71° W, llamada Enriquillo-Plantain-Garden-Walton (PGFZ, Figura 3), se presenta como una falla transcurrente, la cual aísla el límite sur de la microplaca Gonave del movimiento hacia el este de la placa del Caribe.

Mann et al. (2004) sugieren la existencia de una falla al norte de La Española, la cual es continuación de la zona de subducción de Las Antillas, conocida como falla Norte La Española (NHFZ, Figura 3). Por otra parte, Calais y Lépinay (1989) consideran que no hay continuación de la falla de Oriente hacia el este (OFZ, Figura 3). En su lugar, proponen una zona doble de falla hacia el norte de La Española, la falla inversa Norte La Española (NHFZ, Figura 3) y la falla norte transcurrente. Ésta última es la continuación hacia el este de la falla de Oriente (OFZ, Figura 3) dentro de territorio dominicano.

De acuerdo a las características geodinámicas de la región norte del Caribe, las fallas Oriente (OFZ, Figura 3) y Norte La Española (NHFZ, Figura 3) constituyen las principales fallas activas de primer orden, donde pueden ocurrir sismos con $M \geq 6.0$ y eventualmente pueden afectar localidades de la parte este de Cuba (Arango et al., 2009).

Metodología y base de datos

Se emplearon datos sismológicos, medidas geodésicas de alta resolución, imágenes de satélite ASTER y un modelo digital de terreno (MDT o DTM por sus siglas en inglés) del área de estudio. Los datos sismológicos fueron obtenidos de dos catálogos. El primero de ellos consta de registros analógicos para el periodo de 1967 a 1995 (Figura 4-A), publicado por el International Centre of Theoretical Physics (Álvarez et al., 1999). El segundo consta de registros digitales,

para eventos registrados en tres o más estaciones, para el periodo de 1998 a 2017 (Figura 4-B), obtenido del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas de Cuba (<http://www.cenais.cu>). No se aplicó un análisis adicional a los datos (por ejemplo, relocalización de eventos).

El análisis de la sismicidad llevado a cabo, empleó una comparación entre las zonas del límite de placas y de intraplaca, la cual corresponde a la mayor parte del territorio insular de la región de estudio.

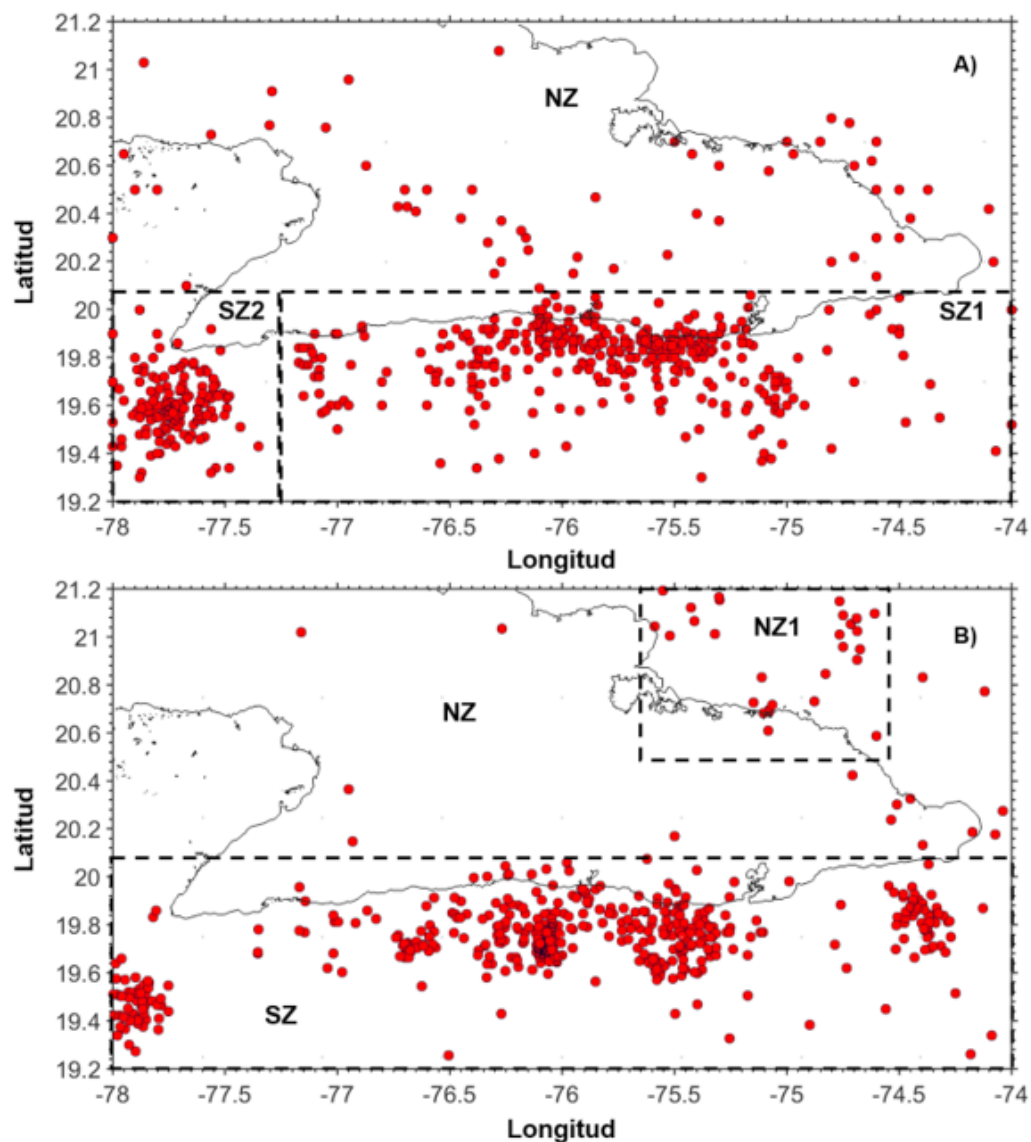


Figura 4. Epicentros con $M \geq 3.0$, A) para el periodo 1967–1995. NZ- Zona Norte (Tierra adentro), SZ1- Zona Sur 1 (parte este del límite de placas) y SZ2- Zona Sur 2 (Cabo Cruz). B) para el periodo 1998–2017. NZ- Zona Norte, SZ- Zona Sur (límite de placas), NZ1- Zona Norte 1(región de Moa).

Un conjunto de datos de 1645 puntos geodésicos en el área de estudio fue analizado, con el fin de investigar movimientos verticales, tomando 16 líneas de primer orden y 17 de segundo orden, las cuales cubren el área de estudio (Figura 5). Las medidas realizadas se tomaron usando el método de coincidencia o método soviético, el cual consiste en las diferencias de los órdenes de nivelación, tomando en cuenta el número de secciones y la longitud de la línea; de acuerdo con las regulaciones establecidas por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC) en 1984 (Marqués, 1999). El catálogo fue provisto por el ICGC.

Imágenes de satélite ASTER y un modelo digital de terreno (escala 1: 25,000) fueron empleados para localizar posibles fallas, a partir del rumbo de los escarpes y alineamientos observados en el modelo digital.

Análisis sísmico

La zona de estudio fue dividida en Zona Norte (NZ), la cual abarca la zona interior de la placa (tierra adentro) donde la sismicidad no parece tener un patrón particular, y Zona Sur (SZ), la cual abarca el límite de placas, donde los epicentros están alineados con la falla Oriente (OFZ, Figuras 3 y 4). Para el catálogo de 1967 a 1995 esta zona fue subdividida en Zona Sur 1 (SZ1), la cual abarca el límite de placas y Zona Sur 2 (SZ2), que cubre la región de Cabo Cruz (zona oeste del límite de placas, Figura 4-A). La comparación entre las zonas norte y sur fue realizada empleando el número de eventos (Figura 6). Se encontró que la SZ (Figura 6-B) muestra un número mayor de eventos en relación a la NZ (Figura 6-A). El número de eventos en la SZ está influenciado por el sismo ocurrido el 25 de mayo de 1992 (MS 6.9) en la zona de Cabo Cruz (SZ2, Figura 6-D). Si solo

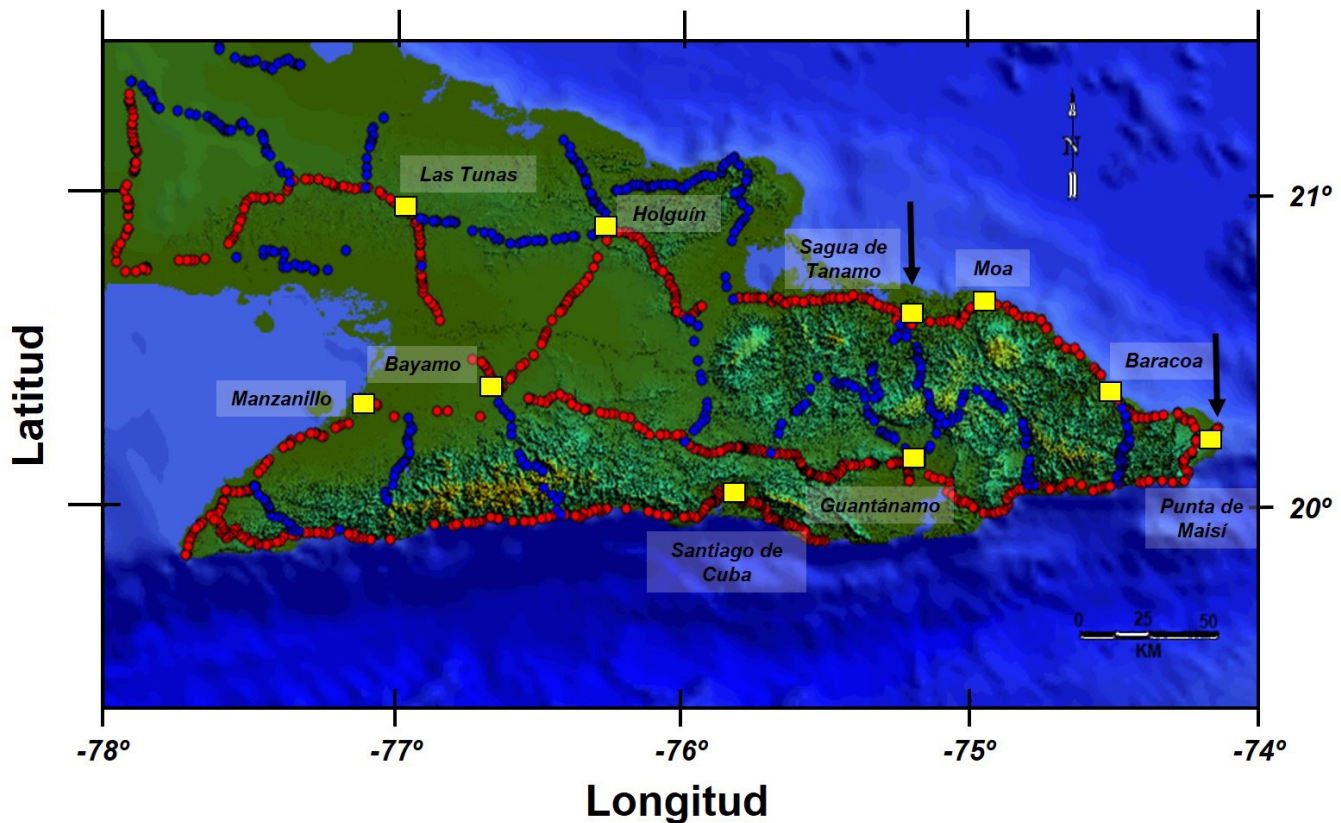


Figura 5. Puntos geodésicos usados para el análisis vertical. Los puntos en rojo indican las líneas de primer orden y los azules indican las de segundo orden. Los cuadrados amarillos representan las localidades. Las flechas negras representan la línea de primer orden Sagua de Tánamo - Maisí mostrada en la Figura 10.

observamos la sismicidad de la SZ1 (Figura 6-C) con respecto a la NZ, se puede corroborar que el número de eventos en la zona sur es mayor que los ocurridos en la parte norte. La sismicidad registrada en la NZ presenta magnitudes bajas ($M \leq 4.3$) y la profundidad de los hipocentros es superficial (< 25 km) comparado con la SZ, donde las magnitudes de los eventos son mayores y los hipocentros más profundos (100 km, Figura 7). También se puede observar que la distribución de la sismicidad en el territorio emergido no sigue el patrón de las fallas propuestas anteriormente (Figura 2), por lo que puede estar relacionada al esfuerzo generado por el movimiento de la placa Norteamericana (falla Norte La Española, NHFZ, Figura 3) y la microplaca Gonave (falla Oriente, OFZ, Figura 3).

Para el catálogo de 1998 a 2017, se encontró que la sismicidad en la zona de Moa (Figura 4-B)

parece estar relacionada a la zona de falla Norte La Española (NHFZ), más que a la sismicidad del territorio insular. Para corroborar esta interpretación, el área de estudio fue dividida en la Zona Sur (SZ), que cubre la zona del límite de placas, y en la Zona Norte (NZ), que abarca la zona al norte del mismo límite. En la Figura 4 se incluye la Zona Norte 1 (NZ1), la cual corresponde la región de Moa, caracterizada por una alta tasa de sismicidad desde 1998 (Figura 4-B).

En el periodo de 1998 a 2017 ocurrieron varios eventos importantes, los cuales incrementaron la sismicidad en la región de Moa, por ejemplo el evento del 28 de diciembre de 1998 (MW 5.6), con una intensidad máxima de VI en la escala MSK (Arango et al., 2009). El 5 de enero de 1999, ocurrieron dos eventos más en la región, con magnitudes de 4.9 y 4.7.

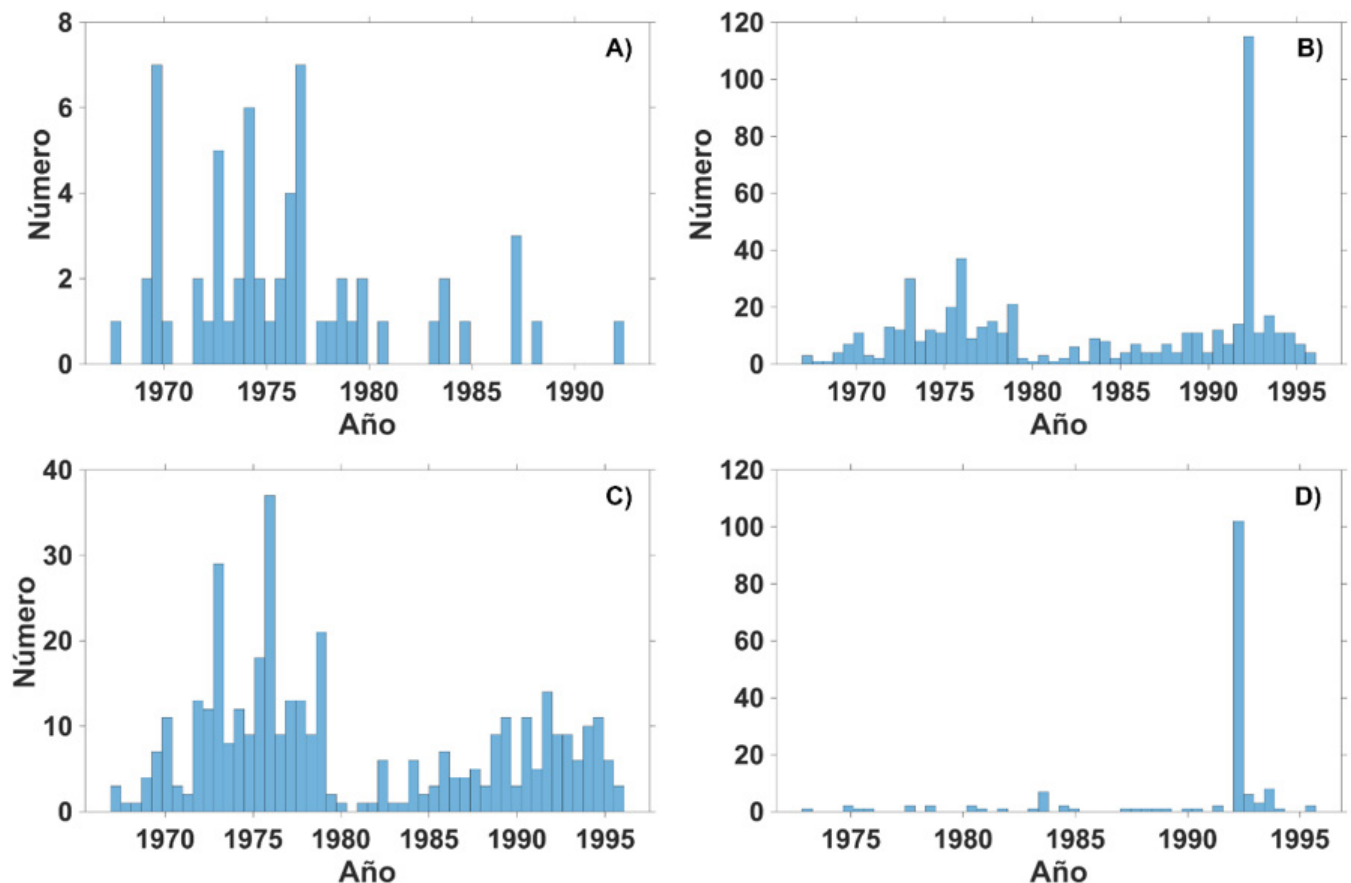


Figura 6. Comparación del número de eventos A) Zona Norte (NZ), B) Zona Sur (SZ), C) Zona Sur 1 (SZ1), D) Zona Sur 2 (SZ2).

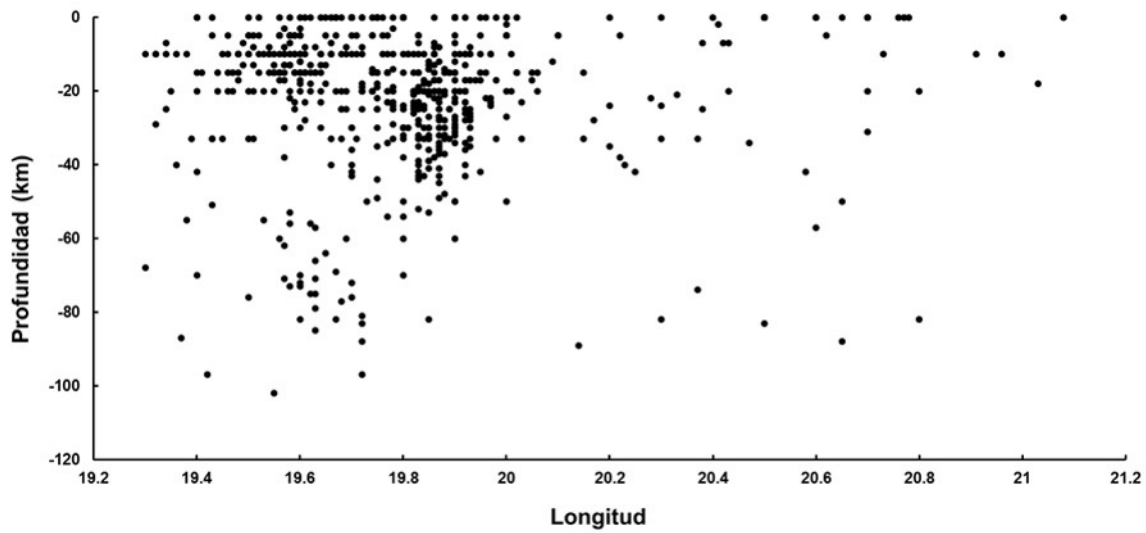


Figura 7. Distribución de hipocentros con relación a la longitud.

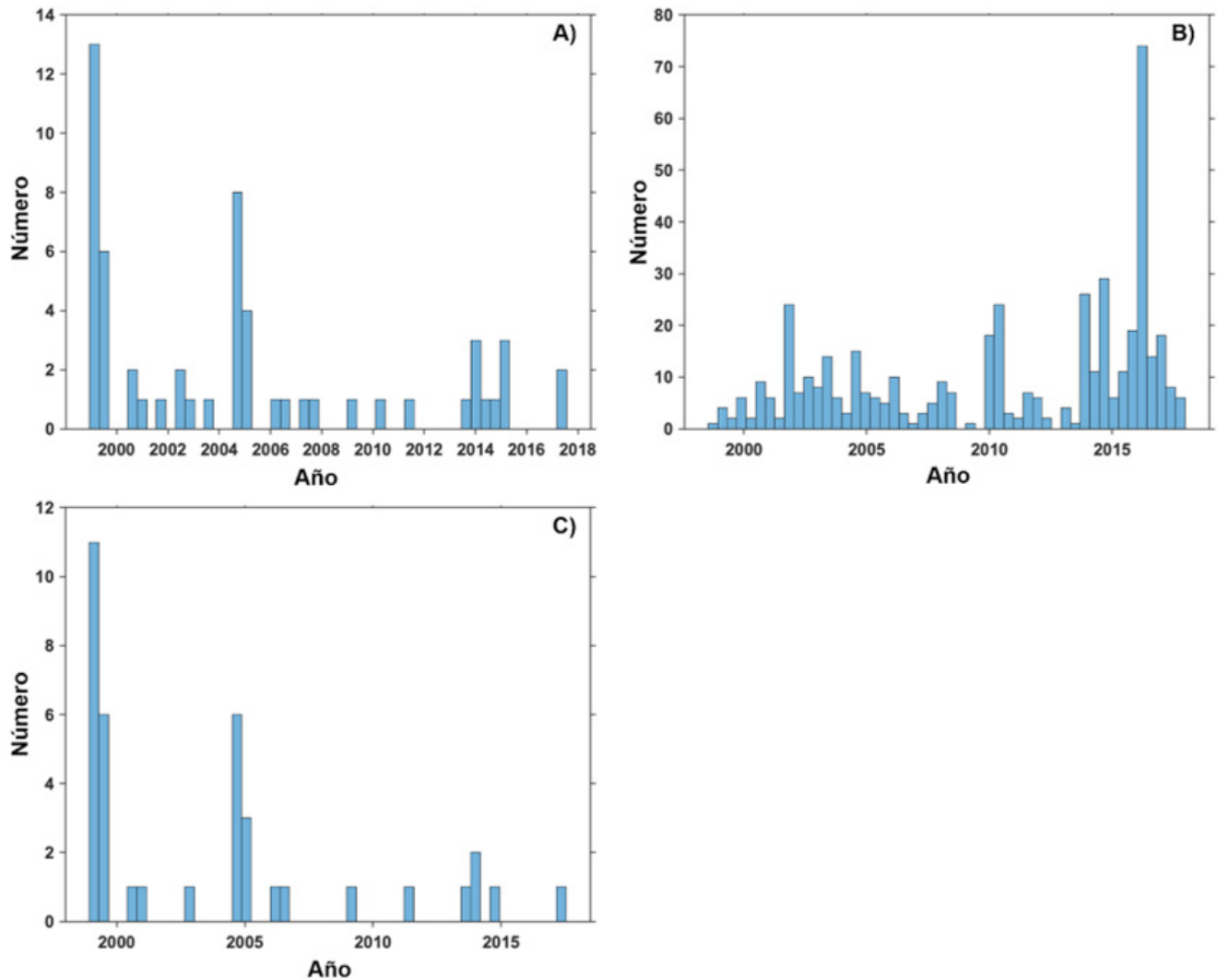


Figura 8. Histograma de los eventos registrados para A) Zona Norte (NZ), B) Zona Sur (SZ), y C) Zona Norte 1 (NZ1).

La Figura 8 muestra el histograma para cada zona. Se puede observar que la sismicidad en SZ (Figura 8-B) es mayor en comparación con la NZ (Figura 8-A) para el periodo de estudio. El número de eventos en la NZ, la cual incluye la Región de Moa (NZ1), puede estar asociado a la ocurrencia de los sismos de 1998 y 1999. Analizando la NZ1 (Figura 8-C), se observa que la sismicidad de la NZ se concentra en esta zona y está relacionada a los eventos mencionados. Para SZ, la sismicidad se incrementa durante el periodo 1999–2002, alcanzando un máximo en 2002, para después decrecer e incrementar nuevamente en el 2010. Este incremento puede estar relacionado al evento ocurrido el 20 de marzo del 2010 (MW 5.7). En general la sismicidad en SZ es mayor que

en NZ (incluyendo la región de Moa).

Se determinó el momento sísmico acumulativo para cada zona (Figura 9). Mediante el uso de Momento Acumulativo Liberado (Cumulative Moment Release) incluido en el software ZMAP (Wiemer, 2001) mediante la ecuación:

$$C = \sum \exp(1.5M + 16.1) \quad (1)$$

donde M es la magnitud. Para la SZ (Figura 9-A) se puede observar que la mayor liberación de energía se asocia a los eventos ocurridos el 20 de marzo de 2010 y el 17 de enero de 2017. Para las zonas NZ y NZ1 (Figuras 9-B y 9-C) la mayor liberación de energía ocurrió en 1999. Después

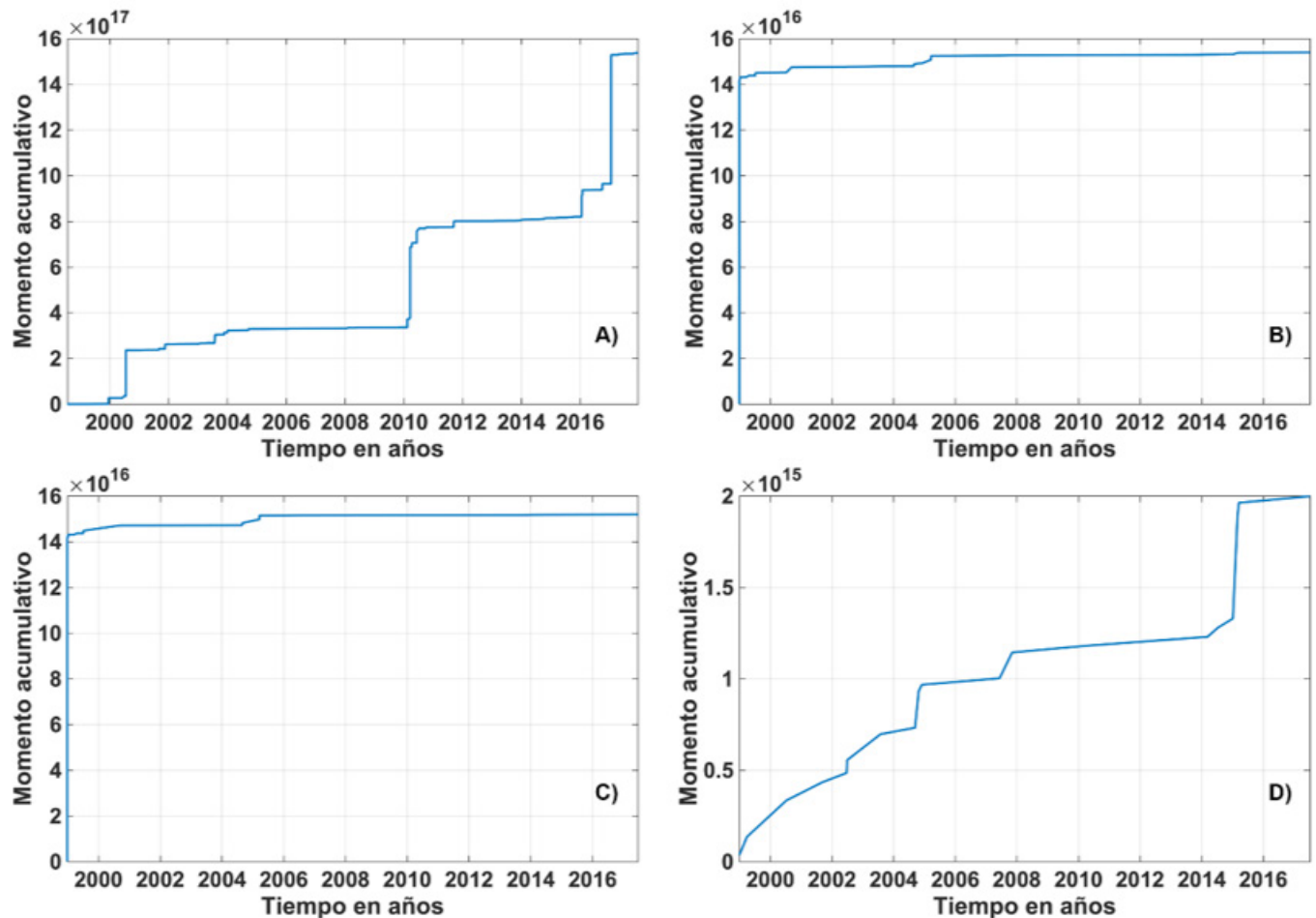


Figura 9. Comparación del momento sísmico acumulativo para cada zona. A) Zona Sur (SZ), B) Zona Norte (NZ), C) Zona Norte 1 (región de Moa, NZ1), D) Zona Norte sin la región de Moa (NZ- NZ1).

de 2000, el momento sísmico no parece tener variación; el comportamiento es asociado a los eventos de 1998 y 1999, los cuales ocurrieron en la zona de falla Norte La Española (NHFZ, Figura 3). Si se considera sólo el territorio emergido sin la región de Moa (NZ1), se puede ver que la energía es menor que en NZ1 (Figura 9-D), lo que sugiere que la sismicidad ocurrida en la zona de falla Norte La Española (NHFZ) no tiene influencia en el territorio emergido. También se observa que los eventos ocurridos el 20 de marzo de 2010 y el 17 de enero de 2017 en la SZ, no tienen influencia en las regiones NZ y NZ1.

La sismicidad en el territorio emergido está distribuida aleatoriamente (Figuras 4-A y 4-B), sin coincidir con la distribución de las fallas propuestas. Por otro lado, el análisis de las magnitudes máximas en el territorio emergido ($M = 4.5$), sugiere que las posibles fallas, si existieran, tendrían sólo unos pocos kilómetros de largo. Estos resultados muestran que la sismicidad registrada en el territorio insular no corresponde con la longitud de las fallas anteriormente propuestas, sino a fracturas debidas al régimen geodinámico de la zona (campo de esfuerzos regional).

Análisis de las líneas geodésicas.

Un conjunto de 1645 puntos geodésicos fue analizado, con el fin de observar el movimiento vertical, mediante 16 líneas de primer orden y 17 de segundo orden, las cuales cubren el área de estudio (Figura 5). Cada línea muestra los desplazamientos verticales que pueden asociarse con posibles zonas de falla, como se observa en la Figura 10. En ella se muestra el desplazamiento vertical de la línea de primer orden Sagua de Tánamo – Maisí (Figura 5), el cuál puede superar los 65 mm. Las flechas indican los puntos de inflexión de la posible zona de falla que provoca dicho desplazamiento. Las franjas en color azul representan los levantamientos y con rojo los hundimientos (Figura 10).

En este estudio se consideró el desplazamiento vertical relativo para cada línea. El punto inicial es también el punto de referencia (relativo a cero). Las fallas propuestas, en estudios anteriores, intersectan en algunos puntos (círculos, Figura 11) a las líneas geodésicas, pero no es posible observar una clara correlación entre las fallas y los desplazamientos verticales de los puntos de nivelación. En la Figura 11 se muestran las fallas

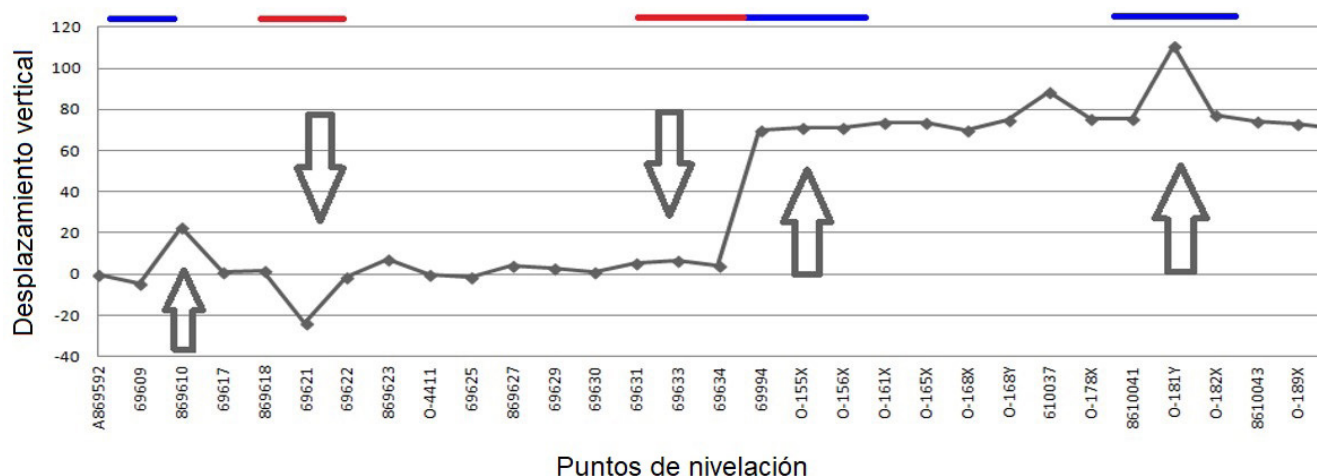


Figura 10. Desplazamientos verticales de la línea de primer orden Sagua de Tánamo – Maisí (Figura 5). Las flechas indican los puntos de inflexión, líneas azules indican levantamiento y las rojas hundimiento.

propuestas y los cambios verticales de las líneas geodésicas, en algunos casos la traza de las fallas coincide con los cambios verticales (por ejemplo en falla Cauto - Nipe/Oriente, No. 5, Tabla 1).

Imágenes de satélite, modelo digital de terreno y su relación con los epicentros.

Como resultado del trazado de alineaciones de epicentros coincidentes con los taludes sombreados de las imágenes de satélite y el modelo digital de terreno (escala 1: 25,000), se interpretan posibles fallas y segmentos de ruptura, a partir del trayecto de los escarpes observados en ambos conjuntos de datos (Figura 12), las cuales pueden correlacionarse con la sismicidad registrada en la región de estudio.

En la Figura 12 se puede observar que las direcciones de las fallas en la región de la Sierra Maestra, pueden relacionarse con cada etapa de la evolución geológica descrita por Rojas-Agramonte et al. (2006), quienes mencionan que en la Sierra Maestra se reconocieron varias etapas de evolución geológica, que definen la transición de la colisión del arco de la isla de Paleógeno a la formación de la falla transformante Oriente al sur de Cuba y el movimiento posterior de la placa del Caribe contra la placa Norteamericana. Varias fallas pueden observarse en la cercanía de la fosa de Oriente, la cual coincide con la OFZ (Figura 3), que pueden relacionarse al proceso de apertura de la fosa. Otras direcciones encontradas son SSW-NE y NW-SSE, las cuales están en concordancia con el modelo de Riedel (Riedel, 1929) para fallas laterales izquierdas de deslizamiento de rumbo.

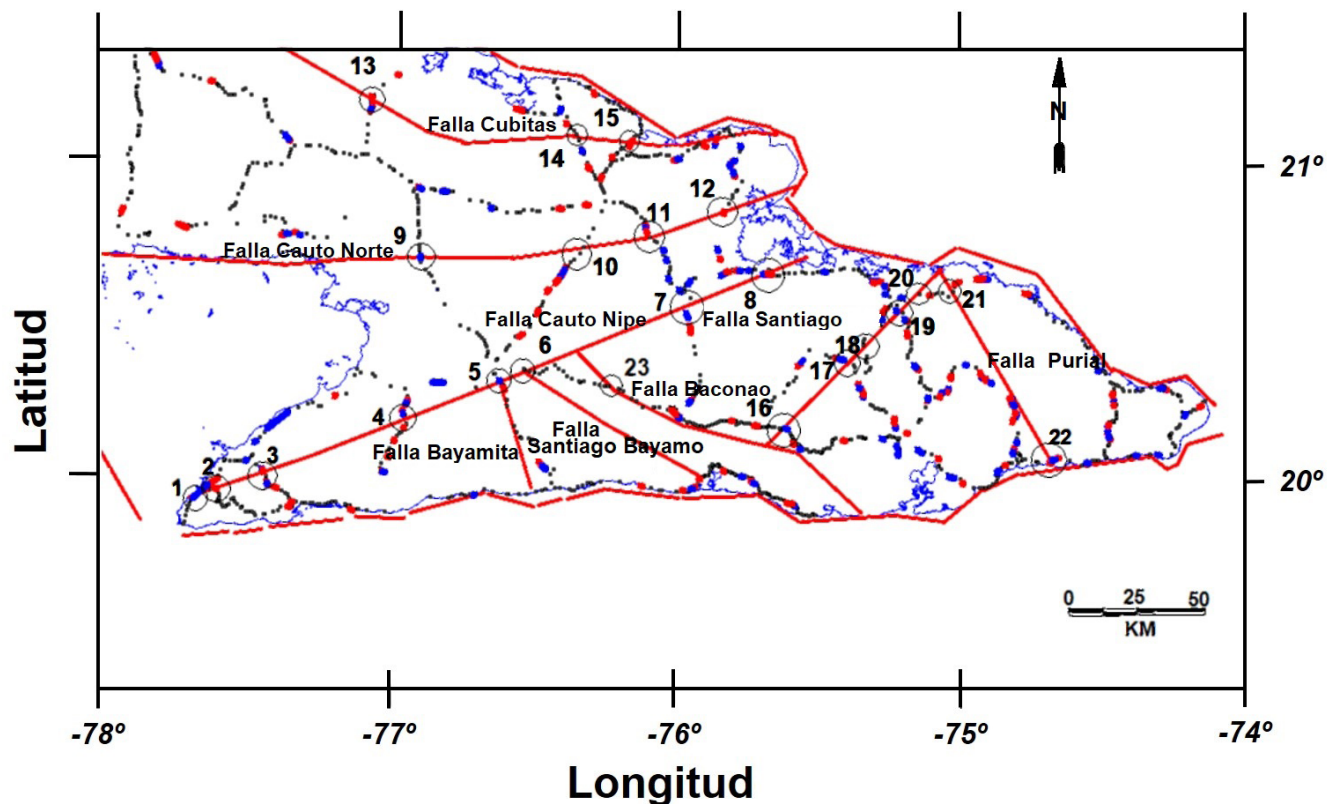


Figura 11. Anomalías geodésicas observadas en cada línea de nivelación, los puntos azules indican levantamiento y los rojos hundimientos. Las líneas rojas corresponden a las fallas propuestas (Tabla 1). Los números indican la intersección entre las líneas geodésicas y las fallas propuestas.

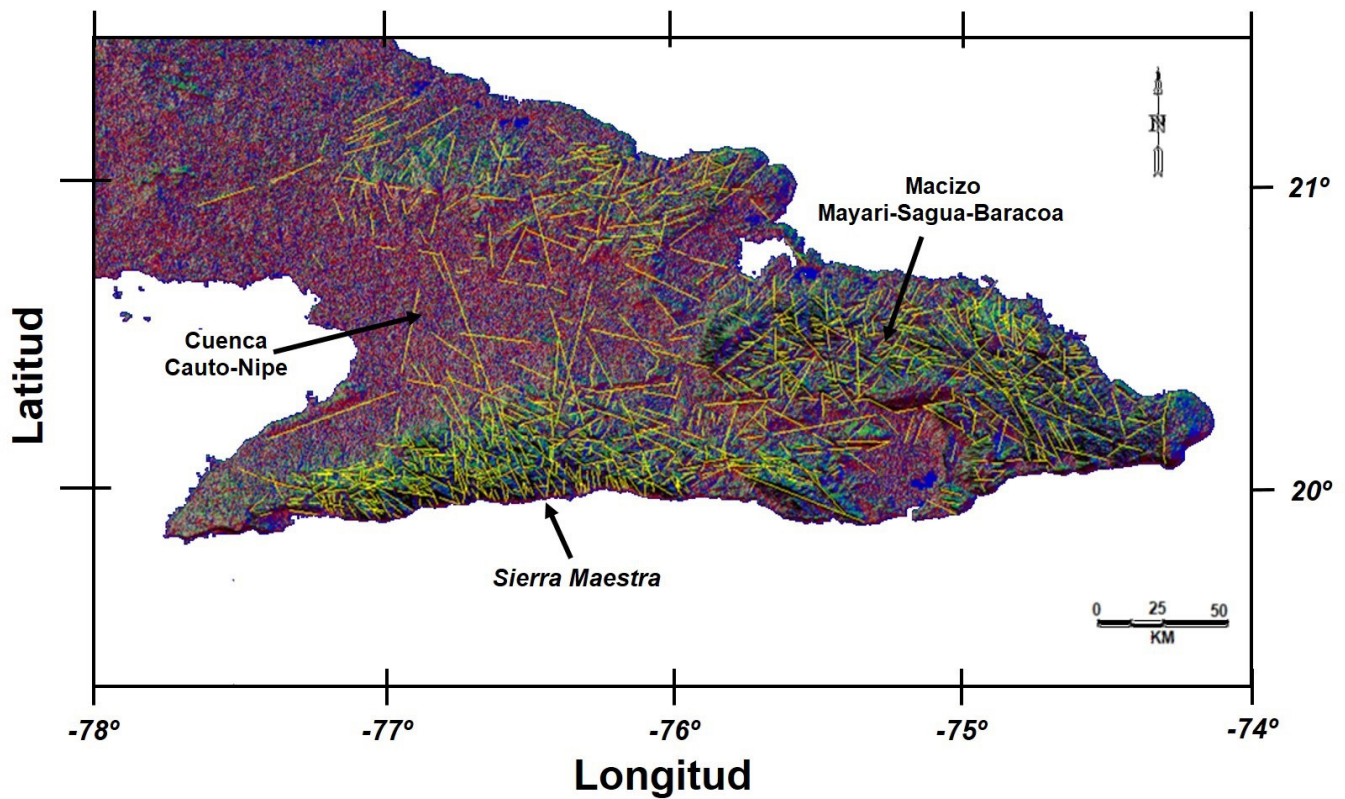


Figura 12. Segmentos de posibles fallas o fracturas obtenidas mediante imágenes ASTER y el modelo digital de terreno.

En el macizo Mayarí–Sagua-Baracoa, localizado en la parte noreste de la región de estudio, existen direcciones conjugadas NE-SW y NW-SE, debido a la compresión oblicua por la convergencia de las placas Norteamericana y Caribe (Figura 3). La sismicidad observada en la parte central del territorio insular del sur de Cuba se correlaciona mejor con los segmentos de fallas obtenidas por las imágenes ASTER y el modelo digital de terreno que con las fallas propuestas en los estudios anteriores.

Conclusiones

Como resultado del análisis sísmico, imágenes ASTER, modelo digital de terreno y líneas geodésicas, se propone que la sismicidad en el territorio emergido del sur de Cuba está relacionada a pequeñas fallas producto del esfuerzo compresivo oblicuo generado por la placa Norteamericana (zona de falla Norte La Española) y la microplaca Gonave (zona de falla

Oriente). Se observa que la mayoría de los sismos ocurren en la zona de falla Oriente, en donde se han registrado los sismos con las magnitudes más grandes. En el territorio emergido los sismos registrados tienen magnitudes menores ($M \leq 4.5$), que difieren de las magnitudes máximas estimadas en las fallas propuestas en los estudios anteriores (Tabla 1). Los levantamientos y hundimientos que pueden observarse a lo largo de las líneas geodésicas, pueden deberse al movimiento de la placa Norteamericana y la microplaca Gonave.

La evaluación sismotectónica realizada da la pauta para realizar nuevos estudios de peligro sísmico en la región este de Cuba, debido a que las zonas de falla Norte La Española y Oriente se consideran como zonas con alto potencial sismogénico.

Agradecimientos

Agradecemos a los editores y a los dos árbitros anónimos por su cuidadosa revisión, sugerencias y comentarios que ayudaron a la mejora de la versión original de este manuscrito. El trabajo del primer autor es apoyado por el programa de Cátedras (2602) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT); El apoyo del tercer autor fue a través del Programa de Becas para Estudios de Posgrado del CONACYT.

Bibliografía

- Álvarez, L., Chuy, T., García, J., Moreno, B., Álvarez, H., Blanco, M., Expósito, O., González, O. y Fernández, A.I., 1999. An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare—Trieste. Internal Report IC/IR/99/1, 60 p.
- Arango, E., Vega, N., Ríos, Y., Escobar, E. y Rivera, Z., 2009. Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo oriental de Cuba. *Acta GGM Debrecina*, 4, pp. 43–52.
- Babaev, A.M. y Orbera, L., 1989. Estudios e investigaciones ingenieriles integrales para la selección del punto y el área de la Central Electronuclear. Tomo I Trabajos sismológicos. Informe sobre las investigaciones geológico-tectónicas del territorio de Cuba oriental y de la región de ubicación de los puntos 2 y 10 de la CEN-Holguín. Libro 3, parte 1/2. Informe Técnicos. Archivos Ministerio de la Industria Básica. Cuba. 214 p.
- Benford, B., DeMets, C. y Calais, E., 2012a. GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: evidence for a Hispaniola microplate and implications for earthquake hazard. *Geophysical Journal International*, 191, pp. 481–490.
- Benford B., DeMets C., Tikoff B., Williams P., Brown L. y Wiggins-Grandison M. 2012b. Seismic hazard along the southern boundary of the Gonave microplate: Block modelling of GPS velocities from Jamaica and nearby islands, northern Caribbean. *Geophys. J. Int.*, 190, pp. 481–490.
- Benford, B., Tikoff, B. y DeMets, C. 2014. Interaction of reactivated faults within a restraining bend: Neotectonic deformation of southwest Jamaica. *Lithosphere*, 7, pp. 21–39.
- Calais, E. y Lépinay, M., 1989. Géométrie et régime tectonique le long d'une limite de plaques en coulissage: la frontière nord-Caraïbe de Cuba á Hispaniola, Grandes Antilles. *Géodynamique. C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 308, serie II, pp. 131–135.
- Calais, E. y Lépinay, M., 1993. Semiquantitative modeling of strain and kinematics along the Caribbean/North America strike-slip plate boundary zone. *J. Geophys. Res.*, 98(5), pp. 8293–8308.
- Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jónsson, S., Jansma, P., Hong, S., Dixon, T., Prépetit, C. y Momplaisir, R., 2010. Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake. *Nature Geosciences*, 3, pp. 794–799, doi:10.1038/NCEO992.
- Chuy, T., 1999. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación Sísmica. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y CENAI. 150 p.
- Cotilla, M.O., 1998. An overview on the seismicity of Cuba. *J. Seism.*, 2, pp. 323–335.

- Cotilla, M. y Alvarez, L., 2001. Seismogenic regularities of the Cuban western seismotectonic unit. *Geol. J. Chile*, 28, pp. 3–24.
- Cotilla, M.O., Franzke, H.J. y Cordoba Barba, D., 2007. Seismicity and seismoactive faults of Cuba. *Russian Geology and Geophysics*, 48, pp. 505–522.
- Cotilla, M., Franzke, H.J., Pilarski, J., Portuaondo, O. y Álvarez, L., 1991. Mapa de alineamientos y nudos principales de Cuba, escala 1:1 000 000. *Revista Geofísica*, No. 35, jul- dic. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, pp. 53–112.
- Comision Ad hoc., 1991. Dictamen de la comisión Ad hoc para la determinación de las zonas sismogeneradoras de la región oriental de Cuba y sus zonas adyacentes. *Archivo del Dpto. de Sismología, Inst. de Geof. y Astr., ACC*.
- DeMets, C., Gordon, R.G. y Argus, D.F., 2010. Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 181, pp. 1–80, doi:10.1111/j.1365256X.2009.04491.x.
- DeMets, C., Jansma, P., Mattioli, G., Dixon, T., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. y Mann, P., 2000. GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion. *Geophys. Res. Lett.*, 27, pp. 437–440.
- Deng, J. y Sykes, L., 1995. Determination of Euler polo for contemporary relative motion of Caribbean and North American plates using slip vectors of interplate earthquakes. *Tectonics*, 14(1), pp. 39–53.
- Granja Bruña, J., Carbó-Gorosabel, A., Llanes-Estrada, P., Muñoz-Martín, A., ten Brink, U., Gómez Ballesteros, M., Druet, M. y Pazos, A., 2014. Morphostructure at the junction between the Beata ridge and the Greater Antilles island arc (offshore Hispaniola southern slope). *Tectonophysics*, 618, pp. 138–163.
- Heubeck, C., Mann, P., Dolan, J. y Monechi, S., 1990. Diachronous uplift and recycling of sedimentary basins during Cenozoic tectonic transpression, northeastern Caribbean plate margin. *Sediment. Geol.*, 70, pp. 1–32.
- Leroy, S., Mauffret, A., Patriat, P. y Mercier de Lepinay, B., 2000. An alternative interpretation of the Cayman trough evolution from a reidentification of magnetic anomalies. *Geophysical Journal International*, 141, pp. 539–557.
- Lundgren, P.R. y Russo, R.M., 1996. Finite element modelling of crustal deformation in the North America-Caribbean plate boundary zone. *Journal of Geophysical Research*, 101(B5), pp. 11317–11327.
- Mann, P., Taylor, F., Edwards, R. y Ku, T-L., 1995. Actively evolving microplate formation by oblique collision and side-ways motion along strike-slip faults: An example from the northeastern Caribbean plate margin. *Tectonophysics*, 246, pp. 1–69.
- Mann, P., Calais, E. y Huerfano, V., 2004. Earthquake shakes big bend region of North America Caribbean boundary zone. *EOS, Transactions. American Geophysical Union*, 85(8), pp. 77–83.

- Marqués, M.E., 1999. Caracterización de la geodinámica reciente de Cuba oriental según los datos de la nivelación reiterada. Tesis de Doctorado. Archivos Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC). La Habana, Cuba, 170 p.
- Medvedev, S.V. y Sponheuer, W., 1969. Scale of seismic intensity. Proc. World Conf. Earthquake Engr. A-2, 4th, Santiago, Chile, pp. 143–153.
- Orbera, L., Marquetti, M. Arias, A. López, M. y Crespo, R., 1987. Las investigaciones sismotectónicas y la estabilidad de las construcciones energéticas en Cuba. 1er Congreso Internacional sobre Desastres Naturales. La Habana. 45 p.
- Orbera, L., Rodríguez, J., Pena, B., Arias, A., Marquetti, M. y Lombardero, T., 1989. Estudio sismotectónico para el emplazamiento del Complejo Hidroenergético Toa-Duaba, Reporte de Investigación, Fondos del E.I.P.I.B., MINBAS, 1–180.
- Pollitz, F. y Dixon, T.H., 1998. GPS measurements across the northern Caribbean plate boundary zone: Impact of postseismic relaxation following historic earthquakes. Geophys. Res. Lett., 25, pp. 2233–2236.
- Riedel, W., 1929. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. Zentrabl. Mineral. Geol. Paläontol., Abh B: 354–368.
- Rodríguez, M.O.C., Barba, D.C. y Escribano, D.N., 2017. Morphotectonic study of the Greater Antilles. Geotectonics, 51, pp. 89–104.
- Rojas-Agramonte, Y., Neubauer, F., Bojar, A.V., Hejl, E., Handler, R. y García-Delgado, D.E., 2006. Geology, age and tectonic evolution of the Sierra Maestra Mountains, southeastern Cuba. Geologica Acta, 4(1–2), pp. 123–150.
- Rosencrantz, E. y Mann, P., 1991. SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman Trough. Caribbean Sea Geology, 19(7), pp. 690–693.
- Saint Fleur, N., Feuillet, N., Grandin, R., Jacques, E., Weil-Accardo, J. y Klinger, Y., 2015. Seismotectonics of southern Haiti: A new faulting model for the 12 January 2010M7.0 earthquake. Geophys. Res. Lett., 42, 10, pp. 273–10,281.
- Styron, R., García-Pelaez, J. y Pagani, M., 2019. CCAF-DB: The Caribbean and Central American Active Fault Database, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-46>, en revisión.
- Symithe, S., Calais, E., de Chabaliér, J.-B., Robertson, R. y Higgins, M., 2015. Current block motions and strain accumulation on active faults in the Caribbean. J. Geophys. Res., 120, pp. 1–27.
- Wiemer, S.A., 2001. Software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters. 72(3), pp. 373–382.

Recibido: 23 de mayo de 2019

Corregido por el autor: 29 de octubre de 2019

Aceptación: 2 de diciembre de 2019

Conociendo el interior de nuestro planeta: energía electromagnética y geotermia

Aideliz M. Montiel Álvarez * y José Manuel Romo Jones

División de Ciencias de la Tierra, CICESE.

*montiel.aideliz@gmail.com

Resumen

Ante la inminente necesidad de mitigar los efectos del cambio climático, México se sumó a la transición a energías más limpias y renovables con la creación de centros especializados, dentro de los que se incluyó el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo). Entre los objetivos de este proyecto se buscó el desarrollo de técnicas para la exploración de recursos geotérmicos en el país. Así, se realizaron estudios geofísicos y geoquímicos en ciertas zonas del Golfo de California, dentro de los cuales se utilizaron por primera vez los métodos electromagnéticos marinos para exploración geotérmica. Estos métodos permiten conocer la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo y, aunado a información geológica, estimar qué materiales se encuentran en la zona de estudio. En este trabajo abordamos con más detalle la metodología de éstas técnicas y presentamos, como ejemplo, algunos de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Geotermia; energía electromagnética; Golfo de California.

1. Geotermia en México

La búsqueda de energías alternas a los hidrocarburos inició hace ya algunas décadas, pero ha tomado mayor importancia en nuestros días ante las claras consecuencias del cambio climático. Actualmente, muchos países le están apostando a la investigación, exploración y tecnología que permita el desarrollo de nuevas fuentes de energía, más limpias y renovables. Una de éstas es la Geotermia, que es el aprovechamiento del calor interno de la Tierra. Las primeras civilizaciones utilizaban sitios con aguas termales para bañarse o cocinar; hoy en día la energía térmica que proviene del interior del planeta se puede transformar en electricidad o se puede usar directamente en climatización de casas y edificios, climatización en invernaderos o estanques de piscicultura, deshidratación de alimentos, secado de alimentos, o en sitios recreativos y terapéuticos con aguas termales, entre otros.

Para aprovechar la geotermia se requieren algunos factores principales: una fuente de calor a profundidad, fluidos subterráneos que

sean calentados por esa fuente, y una capa rocosa impermeable que impida que los fluidos escapen hacia la superficie y que propicie su acumulación. Si estas condiciones generales se tienen, se puede hablar entonces de un yacimiento geotérmico (Figura 1). En 1911, por primera vez en la historia, fue explotado un yacimiento con fines de generación eléctrica, en la planta geotérmica de Larderello, Italia. Desde entonces, alrededor de 25 países en el mundo tienen generación eléctrica a partir de energía geotérmica. El proceso básico inicia con la perforación, se hace un pozo hasta llegar al

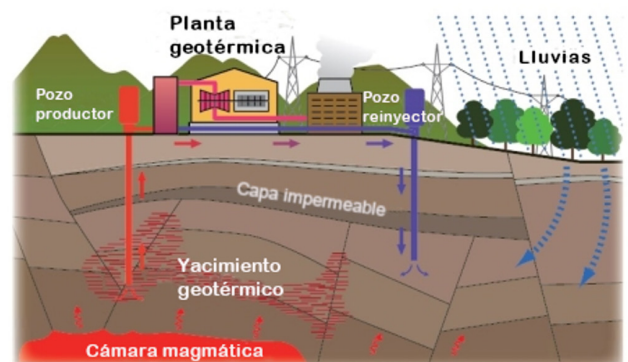


Figura 1. Esquema de los componentes de un yacimiento geotérmico y el proceso para su aprovechamiento (Modificada de "Technology for exploration", s.f.).

yacimiento y mediante una red de tuberías se dirigen los fluidos con alta temperatura y presión hacia la planta. Ahí se separa el agua del vapor, éste se limpia y se hace pasar por una turbina que está conectada a un generador eléctrico, de forma tal que, al girar la turbina, y gracias a las leyes del electromagnetismo, se genera electricidad. El vapor se condensa y, al igual que el agua separada inicialmente, se reinyectan al subsuelo para mantener en equilibrio el yacimiento (Figura 1).

En México hay 5 plantas geotérmicas, la más grande es Cerro Prieto en Baja California que, además, es la tercera planta más grande a nivel mundial (Sen Nag, 2017); le siguen los Azufres en Michoacán, Los Hornos en Puebla, Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y Domo San Pedro en Nayarit. Con una producción total de 981 MW (IEA Geothermal, 2019), México se encuentra en el sexto puesto a nivel mundial. Sin embargo, la energía generada en esas plantas representa únicamente el 1.84% de la energía eléctrica total del país (Cacho Carranza, 2018). Para finales del año 2010, la generación eléctrica mediante energías limpias, que incluye hidroeléctrica y nuclear, aportaba el 26.4% del total (Hiriart Le Bert, 2011), entonces la Estrategia Nacional de Energía estableció como objetivo incrementar la participación de las energías limpias al 35% para el año 2024 (Valle Pereña y Ortega Navarro, 2012).

Dentro de las propuestas para alcanzar tal objetivo, la Secretaría de Energía (SENER) aunado al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), crearon los Centros Mexicanos de Innovación en Energía, dentro de los cuales se estableció el de geotermia (CeMIEGeo). La operación de este Centro inició a finales del año 2014 con sede en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Las actividades y proyectos del CeMIEGeo se engloban en cuatro ramas principales que son:

1. La evaluación de los recursos geotérmicos nacionales
2. El desarrollo e innovación de técnicas de exploración
3. Desarrollos tecnológicos de explotación
4. Los usos directos del calor geotérmico.

En lo que compete a la exploración de recursos geotérmicos convergen múltiples disciplinas, principalmente geoquímica, geología y geofísica, cuyas herramientas son utilizadas para determinar la presencia de recursos potenciales y determinar sus características, tales como dimensiones, temperatura y propiedades físico-químicas. Hasta el momento, todos los recursos geotérmicos explotados se encuentran en tierra; sin embargo, en años recientes se ha encontrado que hay un potencial muy grande en ambientes marinos asociados a márgenes de placas tectónicas. Algunos países han empezado a explorar zonas favorables para recursos geotérmicos marinos, pero aún no se ha desarrollado la tecnología suficiente para su explotación. El

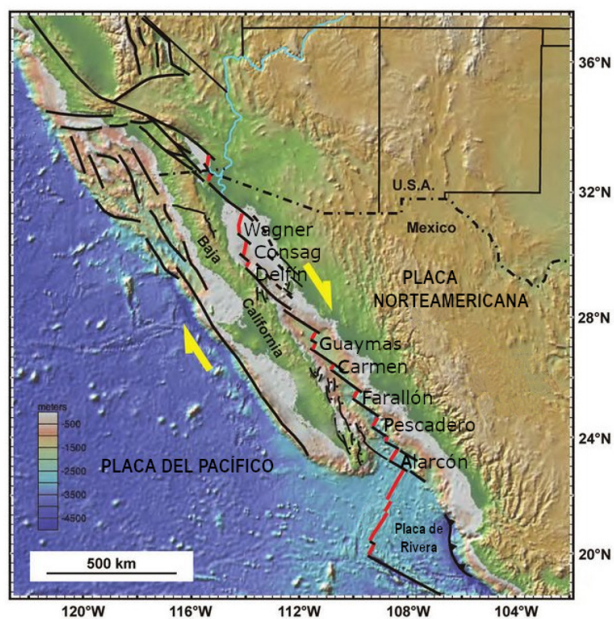


Figura 2. Fallas transformes (líneas en negro), centros de dispersión (líneas en rojo) y nombres de cuencas extensionales a lo largo del Golfo de California (Modificada de Umhoefer, 2011).



Figura 3. Buque oceanográfico Alpha Helix en el Puerto de Santa Rosalía, BCS (Cortesía de Steven Constable).

Golfo de California es un escenario de perfectas condiciones debido a la frontera entre la placa del Pacífico y la Norteamericana, la cual corre a todo lo largo del Golfo y queda expuesta por un gran sistema de fallas transformes que conectan centros de dispersión y cuencas extensionales (Figura 2).

El CeMIEGeo propuso el proyecto P03 “Campaña intensiva de exploración geotérmica de las cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del sistema de rifts del Golfo de California”, con el objetivo de identificar y analizar zonas con potencial geotérmico. Se realizaron campañas a bordo del buque oceanográfico Alpha Hélix del CICESE (Figura 3), en las que se adquirieron datos de flujo de calor y batimetría, se hicieron estudios electromagnéticos marinos con el método magnetotelúrico (MT) y de fuente controlada (CSEM), también se realizó sísmica de refracción y reflexión, hidrogeoquímica, y se tomaron muestras de sedimentos y rocas del fondo marino.

2. Energía electromagnética

Los estudios electromagnéticos marinos se realizaron en dos zonas del Golfo de California, la primera campaña fue al norte, en la Cuenca de Wagner, en el año 2015; al año siguiente se realizó la segunda campaña en la zona central del Golfo, al noroeste de la Cuenca de Guaymas y cerca de las costas de Santa Rosalía y la Caldera Reforma (BCS). En dichos cruceros se contó con el trabajo de investigadores, técnicos y estudiantes del CICESE; además, la toma de datos geofísicos electromagnéticos se realizó con la supervisión del Dr. Steven Constable y el equipo de técnicos de Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California, quienes construyeron la instrumentación y tienen muchos años de experiencia en investigación y aplicación de los métodos electromagnéticos marinos.

Pero, ¿de qué se tratan los métodos electromagnéticos y por qué decimos que nos ayudan a conocer el interior de la Tierra? El

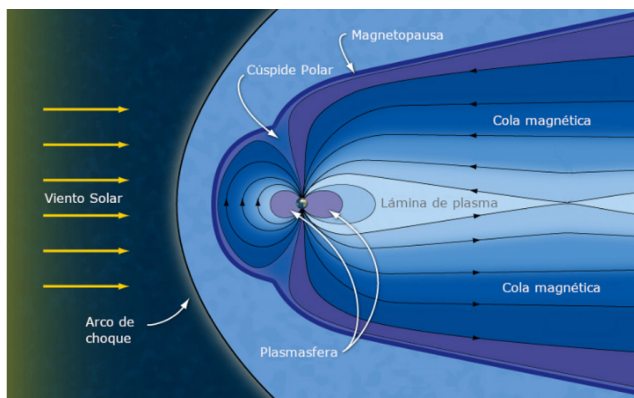


Figura 4. Esquema de la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra (Modificada de "Catching Space Weather in the Act", 2011).

viento solar que irradia del Sol es un cúmulo de partículas cargadas, protones y electrones, que viajan a través del universo. El viento solar que va con dirección a nuestro planeta choca con el campo magnético natural de la Tierra, el cual que actúa como escudo, desviando las partículas y protegiéndonos de esa radiación. Sin embargo, algunas partículas logran colarse y al interactuar con la magnetósfera y la ionósfera se producen campos que son inducidos hacia la Tierra (Figura 4).

La energía electromagnética se propaga en forma de ondas que tienen una componente magnética y una eléctrica, perpendiculares entre sí, y que varían en longitudes de onda y frecuencia (Figura 5). En el método magnetotelúrico se utilizan los

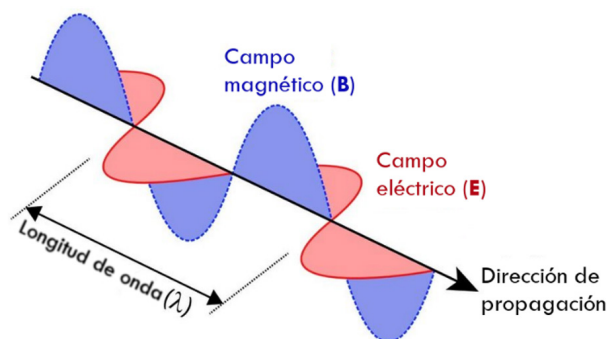


Figura 5. Propagación de una onda electromagnética con sus componentes eléctrica y magnética (Modificada de Verhoeven, 2017).

campos EM inducidos como fuente, y se mide la respuesta de la Tierra al paso de éstos. Las mediciones se realizan en superficie mediante bobinas magnéticas (o magnetómetros) para medir las variaciones del campo magnético y electrodos para medir las variaciones del campo eléctrico. Los campos electromagnéticos que se miden en la superficie de la Tierra contienen información del subsuelo, y entre más tiempo se mida, se puede obtener información a mayor profundidad.

En el método magnetotelúrico marino, los equipos de medición se tienen que sumergir hasta el piso oceánico. En las campañas de exploración de CeMIEGeo se utilizaron los Ocean Bottom Electromagnetic receivers, OBEMs (Constable, 2013). En la figura 6 se muestra un ejemplar de estos instrumentos que están formados de dos magnetómetros, o bobinas de inducción, los cuales miden las componentes horizontales del campo magnético; dos electrodos de 10 metros cada uno miden las componentes horizontales del campo eléctrico. La parte electrónica, donde

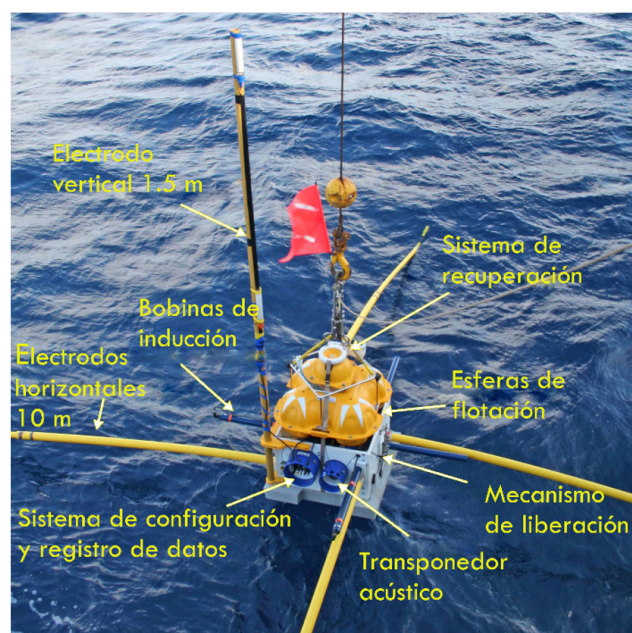


Figura 6. Componentes de un receptor marino electromagnético (Modificada de "Instruments: EM Receiver", 2009).



Figura 7. Despliegue de un instrumento de medición EM (Cortesía de Steven Constable).

se programan las instrucciones de medición como la hora de inicio y fin, la frecuencia de muestreo y también donde se graban los datos medidos, van en un cilindro sellado al vacío. Todo lo anterior está contenido en una caja de acrílico de 1 m por lado. Los instrumentos son configurados en el buque y soltados en los puntos de interés (Figura 7), de modo que van anclados a una plancha de concreto para que puedan sumergirse hasta el fondo y tengan estabilidad en el piso oceánico.

Para su recuperación cuentan con un detector acústico que, al recibir una señal desde el barco, desengancha la plancha de concreto y así el instrumento sale a flote gracias al sistema de boyas que tiene en la parte superior. Por último, cada instrumento tiene una brújula-inclinómetro electrónico que mide su orientación e inclinación

una vez cada hora, durante las primeras 24 horas después del despliegue; esto es de gran importancia ya que cada instrumento llega al fondo marino con diferentes orientaciones y el procesamiento tradicional de los datos requiere conocer esa información para realizar interpretaciones correctas.

Estos instrumentos registran los campos electromagnéticos naturales en el fondo marino. Adicionalmente, se utiliza otra técnica conocida como método electromagnético con fuente controlada (CSEM) en la que se tiene una fuente transmisora que produce campos EM de más alta frecuencia para obtener información en los primeros kilómetros bajo el fondo oceánico. Hay diferentes instrumentos para realizar mediciones con fuente controlada, en los estudios del Golfo de

California se utilizó un transmisor SUESI (Scripps Undersea Electromagnetic Source Instrument) (Figura 8) y el DUESI (Deployed Undersea Electromagnetic Source Instrument), éstos generan pulsos electromagnéticos a diferentes frecuencias. Deben sumergirse y desplazarse a unos metros sobre el fondo oceánico siguiendo el perfil de los receptores OBEM (Figura 9). El método de fuente controlada tiene muy buena resolución en los primeros kilómetros de profundidad, y recupera la información que se pierde de la fuente natural debido a la capa conductora de agua de mar.

Después de medir las variaciones en el campo electromagnético, ¿qué logramos saber? Los materiales tienen diversas propiedades físicas, una de éstas es la conductividad eléctrica, que indica cuánta corriente eléctrica deja pasar cada material. Gracias a las ecuaciones que rigen la física de éstos métodos, al medir los campos EM podemos calcular la conductividad eléctrica del subsuelo, o su inversa, la resistividad. Ya que cada material presenta un rango característico de esta propiedad, se puede estimar qué tipo de materiales se tienen en cada zona de estudio. El método magnetotelúrico es muy utilizado en la exploración de recursos geotérmicos, ya que se presentan grandes contrastes de resistividad entre los fluidos almacenados a

altas temperaturas, las zonas de alteración que se generan debido a éstos y las rocas que se encuentran alrededor de los yacimientos.

Los métodos electromagnéticos aplicados en el mar son muy utilizados para la detección de yacimientos de petróleo y gas en algunos países como Estados Unidos y Noruega. En nuestro país también se utilizaron estas metodologías para la búsqueda de hidrocarburos, en el Golfo de México. Mientras que es la primera vez que se realizan este tipo de estudios en el Golfo de California y, en nuestro conocimiento, es la primera vez que se utilizan con fines de exploración geotérmica marina en todo el mundo.

3. Radiografías del interior de la Tierra

Después de procesar los datos medidos, los resultados que se obtienen son como radiografías o imágenes del subsuelo que nos indican, en una escala de colores, las zonas más conductoras (tonos cálidos) y las más resistivas (tonos fríos). Por ejemplo, en la figura 10 se presenta el resultado de un perfil en la zona central del Golfo de California (Montiel-Álvarez, 2018); la primera capa delgada, en la parte superior del modelo, en color azul representa el aire altamente resistivo, por debajo se ve otra delgada capa en color rojo que representa el agua de mar muy conductora (0.3 Ohm-m). Se observa un límite discontinuo entre ese medio homogéneo y lo que le subyace,

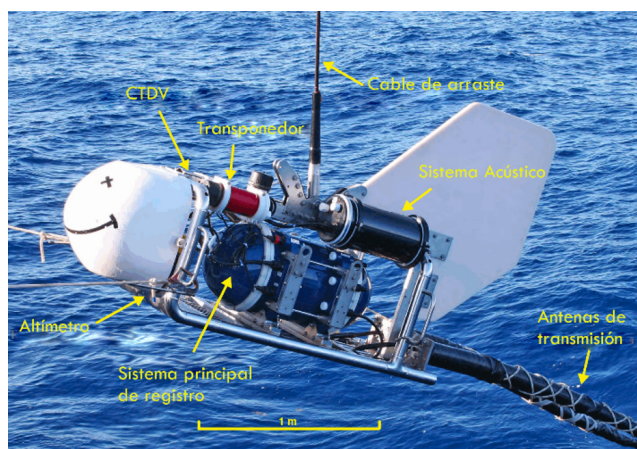


Figura 8. Transmisor electromagnético SUESI con sus componentes (Modificada de "Instruments: SUESI", 2009).

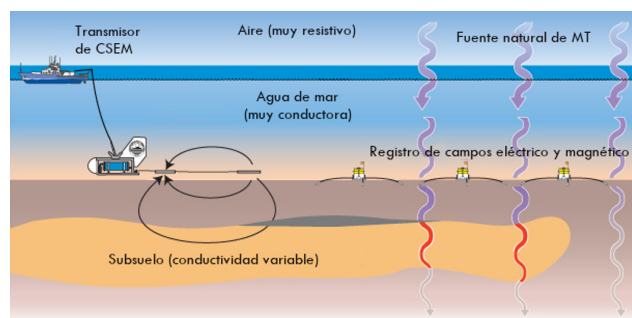


Figura 9. Esquema de la adquisición con métodos electromagnéticos MT y CSEM (Modificada de "CSEM and MT Exploration", 2009).

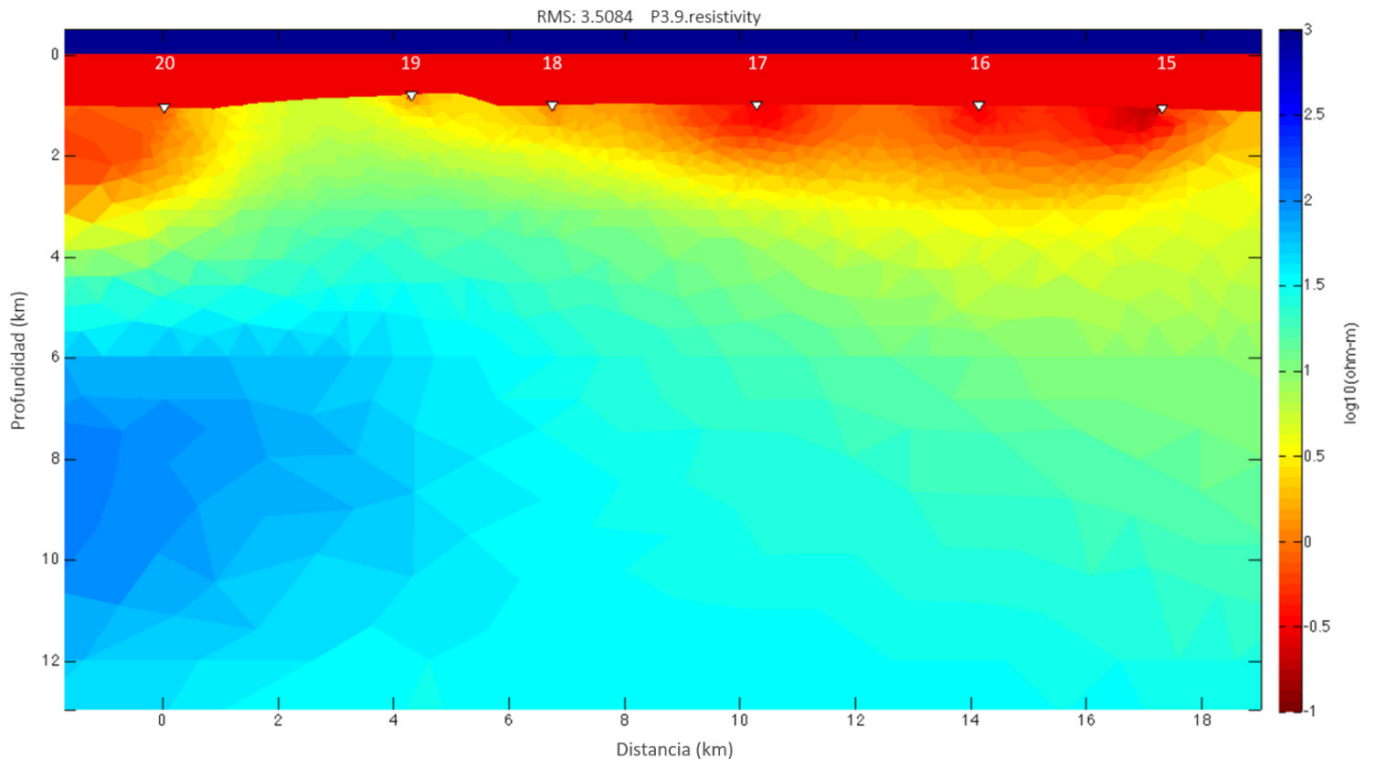


Figura 10. Perfil de resistividad eléctrica a partir de seis sitios MT en la zona de Santa Rosalía (Montiel-Álvarez, 2018).

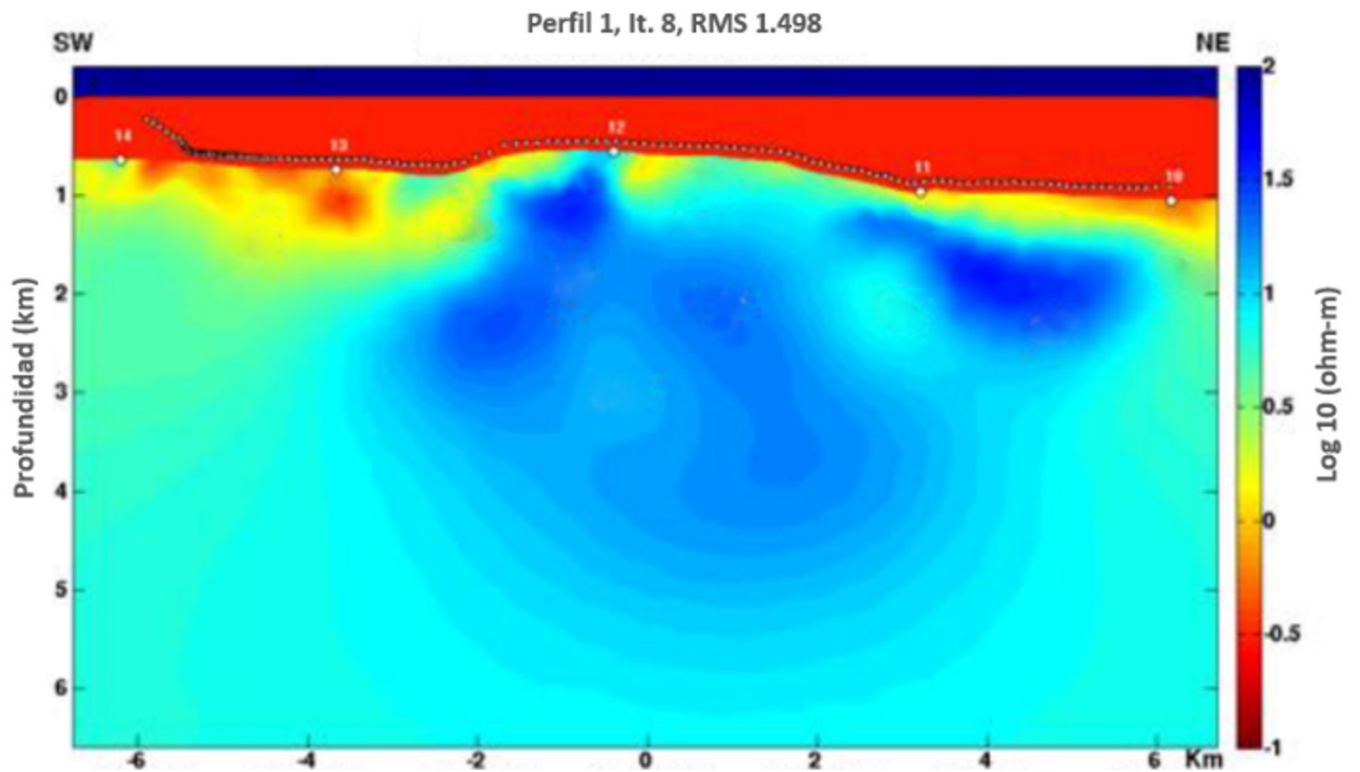


Figura 11. Perfil de resistividad eléctrica a partir de datos de fuente controlada en otro perfil de Santa Rosalía (Córdoba-Ramírez, 2018).

que representa la batimetría (forma del piso oceánico) y deja ver en la parte izquierda un pequeño montículo que corresponde al perfil de un monte volcánico submarino llamado Alto Vírgenes. Se observa que hacia los extremos de dicho monte hay zonas conductoras (en rojo) que alcanzan hasta 3 km de profundidad, éstas están asociadas a los sedimentos marinos que adquieren esos valores de resistividad gracias a que están saturados de agua salada. Se puede observar que el monte presenta valores más altos de resistividad con respecto a sus alrededores debido a que la composición es distinta, son montes volcánicos, que en general son rocas resistivas. A profundidad se observa un cuerpo resistivo (en azul) que aparece del SW del perfil, entre 4 y 12 km de profundidad que parece subir ligeramente hacia el monte volcánico.

De ese mismo perfil, se tiene el resultado de fuente controlada (Figura 11), que profundiza menos, pero tiene mejor resolución y más sensibilidad a cuerpos resistivos. Éste permitió detectar más estructura en la zona del volcán submarino, donde algunas formas coinciden con estructuras geológicas mencionadas en artículos previos.

4. Para saber más

Se obtuvieron tres perfiles en total de la zona de estudio de Santa Rosalía y se realizaron trabajos similares en la Cuenca de Wagner, en el extremo norte del Golfo de California, donde se han confirmado zonas de alto flujo de calor. Los resultados e interpretaciones de éstos proyectos, así como los trabajos de tesis de maestría y doctorado relacionados, se encuentran en la Colección Digital de CeMIEGeo (<https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/>) o serán puestos próximamente para su consulta pública. En ellos se dan detalles de las campañas de observación de datos, de las teorías que rigen los métodos, de las metodologías de procesamiento de datos usadas para obtener resultados, así

como de las interpretaciones geológicas y estructurales que se tienen hasta el momento.

Agradecimientos

Gracias a Luis Alberto Delgado Argote, editor de GEOS, y al revisor anónimo por sus comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

Bibliografía

- Cacho Carranza, Y. (2018). Estado de la Energía Geotérmica en México. En Petroquímex. Recuperado de <https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/>
- Catching Space Weather in the Act (2011). En NASA. Recuperado de https://www.nasa.gov/mission_pages/ibex/news/spaceweather.html
- Colección Digital CeMIEGeo. En CeMIEGeo <https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/>
- Constable, S. (2013). Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding. *Geophysical Prospecting*, 61, 505-532.
- Córdoba Ramírez, F. (2018). Interpretación de datos electromagnéticos marinos de fuente controlada sobre la cresta volcánica Tortuga, Golfo de California (Tesis de maestría). CICESE, México
- CSEM and MT Exploration for Petroleum (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de https://marineemlab.ucsd.edu/resources/concepts/CSEM_MT.html
- Hiriart Le Bert, G. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.

IEA Geothermal (2019). 2018 Annual Report. Draft for GeoTHERM 2019. Recuperado de <http://iea-gia.org/publications-2/annual-reports/>

Recibido: 6 de mayo de 2019

Corregido por el autor: 20 de junio de 2019

Aceptación: 25 de junio de 2019

Instruments: EM Receiver (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de <https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/receiver.html>

Instruments: SUESI (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de <https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi.html>

Montiel Álvarez, A.M. (2018). Estudio magnetotelúrico en el Golfo de California entre Isla Tortuga y Caldera Reforma para una prospección geotérmica preliminar (Tesis de maestría). CICESE, México.

Sen Nag, O. (2017). Largest Geothermal Power Plants In The World. En worldatlas. Recuperado de <https://www.worldatlas.com/articles/largest-geothermal-power-plants-in-the-world.html>

Technology for exploration of geothermal reservoirs (s.f.). En JOGMEC. Recuperado de http://www.jogmec.go.jp/english/geothermal/geothermal_10_000004.html

Umhoefer, P. J. (2011). Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly?—Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA Today*, 21(11), 4-10.

Valle Pereña, J.A., y Ortega Navarro, H.O. (2012). *Prospectivas de Energías Renovables 2012–2026*. Secretaría de Energía (SENER). México.

Verhoeven, G. (2017). The reflection of two fields: electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. *AARGNEWS*, 55, 13-18.

La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra: Los Grandes Terremotos en México

Héctor González Huizar

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

Resumen

Los sismos se encuentran entre los fenómenos naturales que causan más daño a los seres humanos. Tan sólo en el presente siglo alrededor de medio millón de personas a nivel mundial han muerto a causa de sismos. México es uno de los países que a sufrido terremotos de gran magnitud en años recientes, tanto en el norte como en el sur, los cuales han causado muertes y grandes daños materiales. En este artículo se presenta un breve resumen de los conceptos básicos necesarios para entender por qué ocurren los terremotos y se exploran las características de algunos terremotos relevantes ocurridos en México. El presente documento sirvió como guía de estudio a la Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra, efectuada en el CICESE.

La Olimpiada de Ciencias de la Tierra en su edición XXIV (<http://olimpiadas.ugm.org.mx>) se realizó el día 14 de junio del 2019 en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (CICESE) en Baja California, México. El tema de la Olimpiada fue “Los grandes terremotos en México”. Participaron 91 estudiantes de preparatorias públicas y privadas del Estado de Baja California. Los ganadores de la Olimpiada fueron: Primer lugar, Xania Lizeth Hernández Pérez, perteneciente al COBACH Plantel Tijuana Siglo XXI, asesorada por la maestra Gabriela de la Selva; segundo lugar Andrea López Márquez del CETMAR No. 11 de Ensenada, asesorada por el maestro Roberto Carlos Martínez Peralta y tercer lugar, Adrián Virgilio Padilla Mondragón del Bachillerato UNDL de Ensenada, asesorado por el maestro Sergio Pou. Además, dentro de los 10 primeros lugares también se encontraron estudiantes del Centro Educativo Patria (de Ensenada), la Preparatoria Xochicalco (campus Mexicali), y el Bachillerato Anáhuac (de Ensenada).

Abstract

Earthquakes are one of the natural phenomena that cause more damage to people. Only in the present century around a half million fatalities have occurred related to earthquakes worldwide. Mexico is one of the countries that has been hit by large magnitude earthquakes in recent years, from north to south, causing deaths and a large economic impact. This article presents a brief summary of basic concepts needed for understanding why earthquakes occur, and explores the characteristics of some relevant earthquakes occurred in Mexico. This document served as study guide for the XXIV Earth Science Olympiad, hosted at CICESE.

1. Introducción

Los sismos se encuentran entre los fenómenos naturales que causan más daño a los seres humanos. Desde el año 2000 a la fecha en que se elaboró este documento alrededor de medio millón de personas murieron a causa de sismos a nivel mundial. México se encuentra entre los países que han sido golpeados por sismos de

gran magnitud en los últimos años; por ejemplo, se estima que los sismos ocurridos en septiembre del 2017 al sur de México causaron la muerte de cerca de 500 personas y afectaciones por más de 2 mil millones de dólares (Capraro et al., 2018). Al norte del país también se han presentado sismos importantes en años recientes. En Baja California en el año 2010 un sismo de magnitud 7.2 ocurrió cerca de la ciudad de Mexicali, dando

como resultado la muerte de cuatro personas, cerca de un centenar de heridos, y cuantiosos daños materiales. En este trabajo se presentan algunos de los conceptos básicos de sismología necesarios para entender por qué ocurren terremotos en todo el mundo, y en particular en México. Además, se exploran algunas de las características de cinco eventos sísmicos ocurridos en México, que por su magnitud y efectos son relevantes. Los sismos no se pueden predecir, sin embargo, el estudio de las causas y efectos de sismos pasados nos provee de valiosa información que ayuda a entender mejor estos fenómenos naturales y a tomar las acciones necesarias para reducir el daño que causan a la sociedad.

El presente documento sirvió como base para la preparación de los estudiantes que participaron en la Olimpiada XXII de Ciencias de la Tierra organizada por la División de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Unión Geofísica Mexicana (UGM). Al final del documento se presentan las preguntas basadas en este temario que fueron añadidas al examen, así como algunos datos relacionados a la Olimpiada.

2. Conceptos Básicos De Sismología

¿Sismos, terremotos o temblores?

Seguramente alguna vez has escuchado que a un mismo evento se le llama sismo, terremoto y temblor, ¿pero cual es la diferencia?. La palabra “sismo” es de origen griego y la palabra “terremoto” de origen latino, sin embargo, ambas tienen el mismo significado: “movimiento de la tierra”. Científicamente hablando, estos términos significan lo mismo. De hecho, es más correcto llamarlos simplemente “sismos”. Un sismo es un rompimiento repentino de las rocas en el interior de la Tierra que resulta en una liberación de energía, la cual se propaga en forma de ondas

elásticas (conocidas como ondas sísmicas) que provocan el movimiento del suelo. La energía que se libera en un sismo es principalmente energía potencial elástica, similar a la que se acumula y se libera si lentamente comprimimos un resorte y luego lo soltamos rápidamente. Para entender el origen de esta energía es necesario entender que es la Tectónica de Placas.

Las Placas Tectónicas

La Tierra se formó aproximadamente hace 4,600 millones de años. Inicialmente pequeñas partículas transitando en el espacio en forma de gas eran atraídas entre sí por fuerzas electromagnéticas. Una vez que cúmulos de partículas alcanzaban ciertas dimensiones, eran atraídos entre sí por su fuerza gravitacional. Eventualmente, se fueron formando grandes cuerpos masivos, como asteroideos, y pequeños planetas primitivos, o protoplanetas los cuales también colisionaban entre sí, algunos de ellos finalmente dando forma a nuestro planeta. Factores como la rotación de la Tierra, su fuerza gravitacional interna, la emisión de energía por elementos radioactivos, así como las colisiones de asteroides en su superficie, dieron lugar a que lentamente el interior de la Tierra se fuera seccionando. La Tierra no es simplemente una roca sólida compuesta homogéneamente de los mismos materiales. En su interior está dividida en diferentes capas, que tienen diferente composición y propiedades físicas.

En el centro de nuestro planeta se encuentra una masa sólida conocida como el “**núcleo interno**”, compuesto mayormente de los elementos químicos hierro y níquel, y se estima que se encuentra a una temperatura de más de 5000°C. Rodeando el núcleo interno se encuentra una capa que es conocida como “**núcleo externo**”, que tiene una composición similar a la del núcleo interno, con la diferencia que en el núcleo externo estos elementos se encuentran en estado más o menos líquido, quizás algo similar

a la consistencia del hierro fundido. Luego, existe una gran zona conocida como **“manto”** que está principalmente compuesta de magma, es decir, roca fundida. La parte más profunda del manto se encuentra a una temperatura mucho mayor que en su parte más superficial. Esta diferencia en temperatura (de $\sim 2000^{\circ}\text{C}$) causa que el magma más profundo tienda a subir a través del manto. Una vez que esto sucede, este mismo magma enfriado tiende a sumergirse hacia la parte profunda del manto. Este proceso genera corrientes de magma conocidas como **“celdas de convección”**. La capa más superficial de la Tierra, que es la formada por la roca sólida con la que tenemos contacto en el fondo de los océanos y sobre los continentes, se conoce como **“corteza”**. Es una capa relativamente delgada. Ahora bien, aunque en su gran mayoría el manto se forma de magma parcialmente líquido, en su parte más superficial, es decir, justo por debajo de la corteza, se empieza a solidificar y a unir a la roca de la corteza, para así formar una sola capa sólida. A esta capa sólida, formada en su conjunto por la corteza, más la parte solidificada del manto, se le conoce como **“litósfera”**. La litósfera tiene en promedio un ancho de alrededor de 75 km por debajo el suelo de los océanos y de 125 km donde hay continentes (Figura 1).

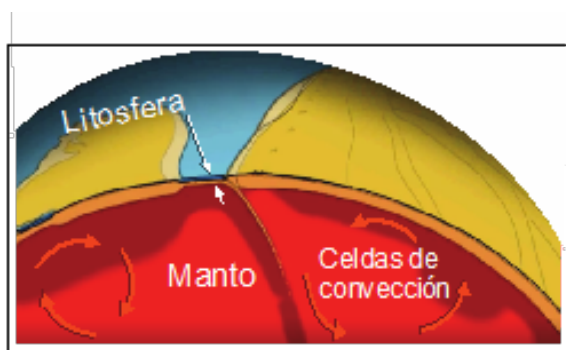


Figura 1. Sección transversal de la Tierra donde se muestra la litósfera (roca sólida) y el manto (magma parcialmente líquido). En el manto, la gran variación de la temperatura con la profundidad causa el flujo del magma, generando las celdas de convección.

La litósfera en sí misma no se forma de una sola pieza. Se divide en grandes fragmentos que se pueden mover en diferentes direcciones. Estos fragmentos se conocen como **“placas tectónicas”**. Es decir, las placas tectónicas son como las piezas de un gran rompecabezas que forman la litósfera. La Figura 2 muestra las principales placas tectónicas. Es importante notar que aunque algunas de las placas solo tienen en su superficie océanos (por ejemplo, la placa de Nazca), sobre otras placas se puede encontrar a la vez océanos y corteza continental. La placa Norteamérica, por ejemplo, sostiene en su superficie parte del océano Atlántico así como a algunos países del continente Americano (incluyendo México, Estados Unidos y Canadá) y algunos países de Asia (incluyendo partes de Rusia y de Japón). En general, las placas tectónicas que sostienen en su superficie mayormente océanos, conocidas como **placas oceánicas**, son mucho más densas y pesadas que las placas que sostienen mayormente continentes, a las cuales se les conoce como **placas continentales**.

¿Qué causa que se muevan las placas tectónicas? Se cree que las placas se mueven principalmente debido a las celdas de convección. Si consideramos cada placa como un barco flotando sobre el manto líquido, las celdas de convección serían como las corrientes que empujan a estos barcos en cierta dirección. Cabe mencionar que el magma no fluye en la misma dirección en todas las celdas. Note por ejemplo, en la Figura 1, que se representa una de las celdas como magma circulando en el sentido de las manecillas de un reloj, mientras que en la otra celda el magma circula en sentido contrario. Esto causa que las placas, que navegan empujadas por la corriente de estas celdas, también se muevan en diferentes direcciones. El movimiento de las placas tectónicas ocurre muy lentamente, en promedio entre 5 a 10 cm por año (cm/año). Sin embargo, puesto que este movimiento ha ocurrido por millones de años, las placas se han desplazado grandes distancias. Se sabe, por ejemplo, que el movimiento de las

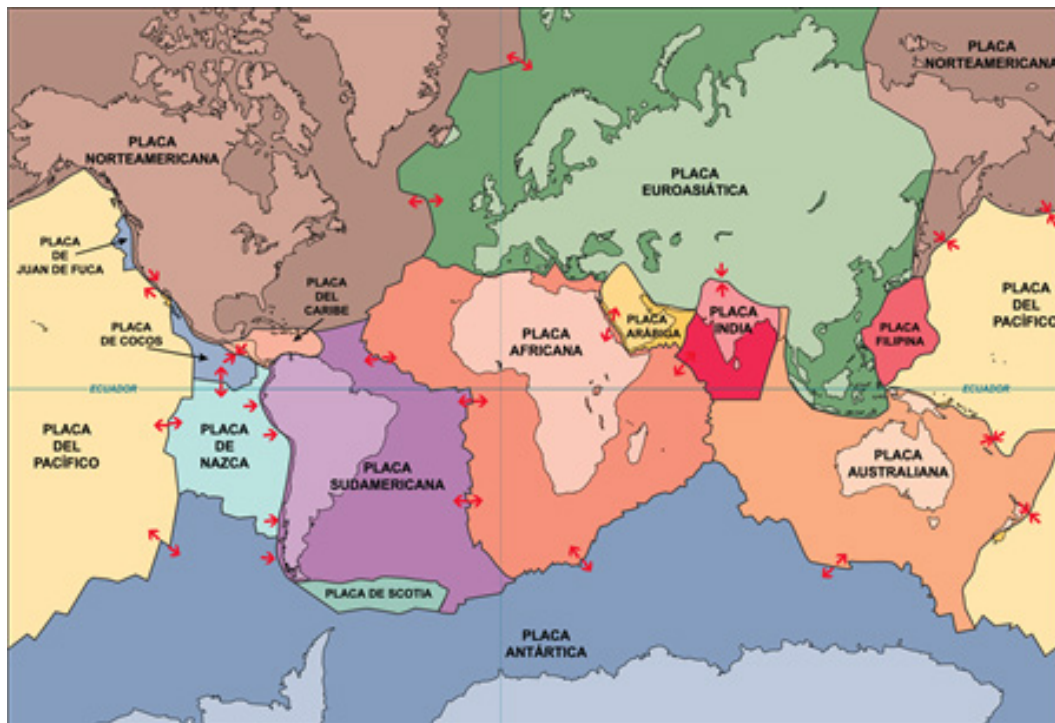


Figura 2. Principales placas tectónicas. Flechas rojas representan la dirección de movimiento relativo entre placas. Imagen modificada de: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>.

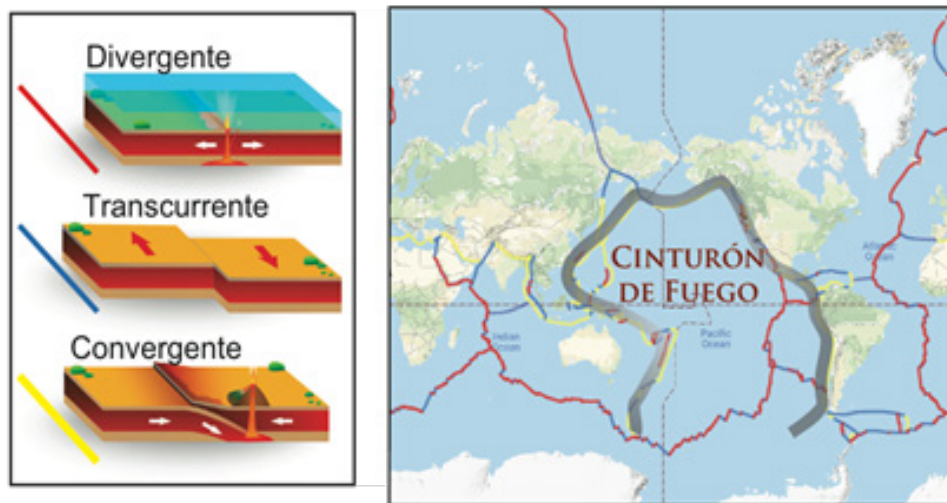


Figura 3. Los modelos muestran el movimiento relativo para los tres tipos de fronteras entre placas. El mapa muestra dónde ocurre cada tipo de frontera, de acuerdo a los colores definidos. El área gris representa el Cinturón de Fuego. Figura de modelos modificada de: <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.

placas tectónicas unió a todos los continentes en un mega continente llamado **“Pangea”** hace unos 300 millones de años, y que estos se empezaron a separar hace unos 200 millones de años, hasta llegar a su posición actual.

La dirección en que se mueve cada placa tectónica con relación a sus placas tectónicas vecinas es sumamente importante para los sismólogos, puesto que estas direcciones nos ayudan a estimar el peligro sísmico para cada

región en particular. La región entre dos placas tectónicas se conoce como **“frontera”** o **“límite”** entre placas. Se pueden definir **tres tipos de fronteras** según el movimiento relativo entre las placas: fronteras **“divergentes”**, **“convergentes”** y **“transcurrentes”** (Figura 3).

Fronteras Divergentes (de extensión). Son aquellas donde dos placas se mueven alejándose una de la otra. En este tipo de frontera, por el espacio que queda entre las dos placas, emerge magma desde el manto, el cual eventualmente se solidifica y se une a las placas que se están separando, y de esta forma se genera nueva litósfera. En estas regiones, las cuales usualmente se localizan en medio de los océanos, se pueden encontrar muchos volcanes submarinos, que conforman las zonas conocidas como **“dorsales oceánicas”**. Las dorsales son zonas elevadas sobre el piso oceánico que llegan a medir hasta 3 km sobre el nivel medio del suelo oceánico. Este tipo de frontera ocurre, por ejemplo, entre la placa Sudamericana y la placa Africana.

Fronteras Convergentes (de compresión). Son aquellas donde dos placas tectónicas chocan de frente. Este tipo de movimiento genera que se eleven grandes cordilleras de montañas, como los Himalaya, que son el resultado de la colisión entre la placa tectónica Euroasiática y la placa India. En los Himalaya se encuentra el **Monte Everest**, la montaña más alta del mundo, que alcanza casi 9 km de altura respecto al nivel del mar. Cuando la colisión ocurre entre una placa tectónica que sostiene continentes y una que sostiene océanos (la cual es más pesada), la placa oceánica se sumerge (o **subduce**) por debajo de la continental (que **cabalga**). A estas regiones se les conoce como **“zonas de subducción”**. Por ejemplo, la placa Nazca subduce por debajo de la placa Sudamericana. En general, en las zonas de subducción se forman volcanes sobre la placa cabalgante. Además, la gran deformación que ocurre entre placas crea depresiones muy profundas en los océanos, justo donde las placas

colisionan, conocidas como **“fosas oceánicas”**. Por ejemplo, donde se unen la placa Pacífico con la placa Filipina se forma la **“Fosa Oceánica de las Marianas”**, la cual es la parte más profunda conocida de los océanos en el mundo, llegando a una profundidad de cerca de 11 km. Se piensa que además de las celdas de convección, la fuerza de gravedad que se ejerce sobre la placa que se sumerge también contribuye al movimiento de ésta. En una zona de subducción, la placa que subduce eventualmente se deshidrata y funde parcialmente para formar magma y así forma parte del manto.

Fronteras Transcurrentes. En estas zonas una placa tiene un movimiento lateral una con respecto a la otra. Mientras que en las dorsales oceánicas (que son fronteras divergentes) se crea nueva litósfera y en las zonas de subducción (que son fronteras convergentes) se destruye litósfera, en las fronteras transcurrentes no ocurren ninguno de estos procesos. Como ejemplo, la falla de San Andrés forma parte la frontera transcurrente entre la placa Norteamérica y la placa Pacífico, donde esta última se mueve lateralmente hacia el noroeste con respecto a la primera.

Placas Tectónicas, Fallas Geológicas y Sismos

El movimiento de las placas tectónicas causa que estén sujetas a grandes esfuerzos y deformaciones, principalmente cerca de las fronteras. Estos esfuerzos causan la acumulación de energía, en fallas geológicas, que se libera en forma de sismos.

Los sismos ocurren en **“fallas geológicas”**, que son áreas que dividen dos bloques de roca. Un sismo puede iniciar en una falla ya existente, o bien, inicia con el rompimiento de la roca, formando una nueva falla. El sismo se genera cuando uno de los bloques se desliza súbitamente con respecto al otro, causando gran fricción a

lo largo de la falla. En algunos casos las fallas se pueden observar en la superficie, pero en otros casos existen solo por debajo de la superficie, y muchas veces sólo son identificadas una vez que generan sismos. A la parte de una falla que se puede observar en la superficie, que aparece comúnmente como una desnivelación en el suelo, se le conoce como **“escarpe de falla”**. Mientras más grande es la falla, mayor la magnitud del sismo que puede producir.

La mayoría de las fallas se encuentran dentro de las áreas que se consideran fronteras entre placas. De hecho, las fronteras entre placas no son siempre muy claras. Es difícil especificar exactamente el límite donde termina una placa y comienza la siguiente. En muchos casos, un grupo de fallas (y los sismos que generan), pueden ayudar a delimitar más claramente la frontera entre dos placas. Por ejemplo, la falla de San Andrés, en Estados Unidos, junto con otras fallas de menor tamaño, como la falla Imperial cerca de Mexicali, y las fallas dentro del Mar de Cortés, ayudan a delimitar la frontera entre las placas Norteamérica y Pacífico. A los sismos que

ocurren en fallas que se consideran ser parte de la frontera entre placas se les puede llamar sismos **“interplaca”**, es decir, que se localizan entre dos placas. Aunque la mayoría de las fallas se encuentran cerca de estas fronteras, algunas otras se encuentran lejos, por ejemplo, hacia dentro de los continentes. Del mismo modo, también existen fallas dentro de las placas que se mueven por debajo de otras. A los sismos generados por fallas relativamente lejos de las fronteras tectónicas se les puede llamar sismos **“intraplaca”**, es decir, que ocurren dentro de una placa tectónica.

La gran mayoría de los sismos que ocurren en nuestro planeta (cerca del 90%), así como los de mayor magnitud, son localizados a lo largo de la región conocida como el **“Cinturón de Fuego”** o **“Cinturón del Pacífico”** (Figura 3). Además, en esta área se localizan cerca del **75%** de los volcanes actualmente activos. El Cinturón de Fuego es una franja que se extiende alrededor del océano Pacífico, a lo largo de la cual se localizan un gran número de zonas de subducción, responsables de los volcanes y de los sismos de gran magnitud.

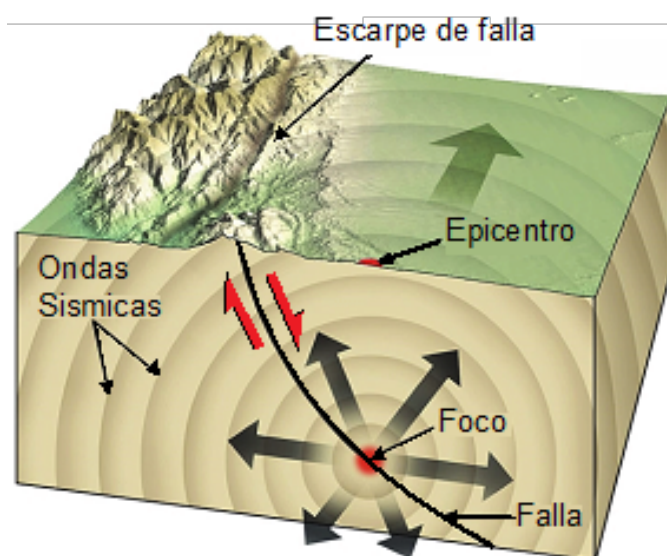


Figura 4. La imagen muestra una falla geológica y el escarpe que sobresale en la superficie. Las flechas de color rojo representan la dirección en la que se desplazan los bloques a cada lado de la falla, generando el sismo. Se muestra el epicentro del sismo y su relación con el foco. Las ondas sísmicas se propagan alejándose del foco. Imagen modificada de Tarbuck y Lutgens (2001).

Ondas Sísmicas y Localización de Sismos

Al punto en una falla donde un sismo se origina se le conoce como **“foco”** o **“hipocentro”**. Recordemos que los sismos se generan por un deslizamiento súbito en una falla. El foco es el punto donde este deslizamiento comienza. El **“epicentro”**, por otro lado, es el punto, sobre la superficie de la Tierra, justo por encima del foco. Si queremos definir la localización del epicentro de un sismo, es necesario conocer su latitud y longitud; mientras que para definir la localización del foco, es necesario conocer, además de su latitud y longitud, también su profundidad (Figura 4).

Una vez que ocurre el deslizamiento súbito en una falla, se generan vibraciones, que afectan a la roca y su alrededor, causando que también vibre. Estas vibraciones se van transmitiendo a suelo cada vez mas lejano, propagándose grandes distancias, hasta que finalmente se disipan. A estas vibraciones que se propagan a través del suelo es a lo que se le conoce como **“ondas sísmicas”**. La propagación de las ondas sísmicas es algo similar a lo que observamos cuando lanzamos una piedra en el agua. Las ondas de agua inician donde cae la piedra, se propagan y finalmente se disipan a cierta distancia. Sin embargo, mientras que estas ondas de agua durante un segundo se propagarían menos de un metro de distancia, las ondas sísmicas pueden viajar incluso más de 10 kilómetros por segundo. De hecho, las ondas sísmicas viajan por el suelo mucho más rápido que el sonido en el aire (aproximadamente a 0.34 km/s).

Un mismo sismo genera diferente tipos de ondas sísmicas, a continuación se describen brevemente los tres tipos más importantes. Las **“ondas P”** (también conocidas como **“ondas primarias”**) son las más veloces, y por lo tanto son las que llegan primero a cualquier lugar, de ahí su nombre. Por lo general este tipo de onda viaja a una velocidad de entre 4 a 7 kilómetros por segundo (km/s) en

la corteza, pero dentro del manto puede llegar a velocidades superiores a 12 km/s. Este tipo de onda causa compresiones y descompresiones de la roca por la que se propaga, por lo tanto las partículas individuales se mueven en dirección paralela a la dirección de propagación de la onda (Figura 5). Las **“ondas S”** (también conocidas como **“ondas secundarias”**) son un poco más lentas que las ondas P, por lo tanto, llegan a cualquier lugar en segundo puesto, después de las ondas P. Las ondas S tienen una velocidad de entre 3 y 4 km/s en la corteza, y pueden alcanzar más de 7 km/s dentro del manto. Las ondas S causan movimiento en dirección perpendicular a la dirección en la que se propaga la onda. Las ondas S tienen dificultad para propagarse en líquidos. La viscosidad y densidad del manto aún permite que las ondas S se propaguen a través de éste; sin embargo, en el núcleo externo las ondas S no se pueden propagar debido a que su consistencia es demasiado líquida. A las ondas P y S también se les conoce como **“ondas de cuerpo”** o **“internas”**, puesto que pueden viajar dentro del interior de la Tierra. Otro tipo de ondas sísmicas son las **“ondas superficiales”**. Las ondas superficiales son más lentas que las ondas P y S, y a diferencia de éstas, solo pueden propagarse cerca de la superficie de la Tierra, es decir, no pueden viajar muy profundo. Las ondas superficiales resultan de una combinación de movimientos en diferentes direcciones. Por ejemplo, pueden desplazar el suelo en un movimiento hacia delante y hacia atrás al mismo tiempo que hacia arriba y abajo, lo que resulta en un movimiento elíptico, similar al que causan las olas del mar en un pequeño barco (Figura 5). Frecuentemente, hemos escuchado que a los sismos se les clasifica como oscilatorios (movimiento lateral del suelo) o trepidatorios (movimiento vertical); sin embargo, el tipo de movimiento sentido va a depender de dónde y que tan lejos nos encontramos con respecto al foco del sismo. Es decir, un mismo sismo siempre genera ambos movimientos (laterales y verticales), puesto que se generan los tres tipos

de ondas (Figura 5), pero estos movimientos pueden ser percibidos con diferente intensidad, dependiendo de dónde nos encontramos.

Para los sismólogos es muy importante conocer a qué velocidades se propagan las ondas sísmicas a través de las diferentes capas y los diferentes materiales que forman nuestro planeta. Esa información permite, por ejemplo, localizar la fuente de los sismos cuando sus ondas sísmicas llegan a cierto lugar y son analizadas. Por ejemplo, una vez que se conoce a qué velocidad se propagan las ondas P y S, midiendo el tiempo que transcurre entre la llegada de la onda P y la llegada de la onda S a una estación sismológica, se puede calcular a qué distancia de la estación se encuentra el epicentro del sismo que generó estas ondas. Esta distancia se conoce como **“distancia epicentral”**. Si se registran los tiempos de arribo de las ondas P y S en al menos tres estaciones sismológicas y con esta información se calculan las distancias epicentrales para cada estación, entonces es posible usar la técnica conocida como **“triangulación”** para obtener la localización del epicentro. Para entender

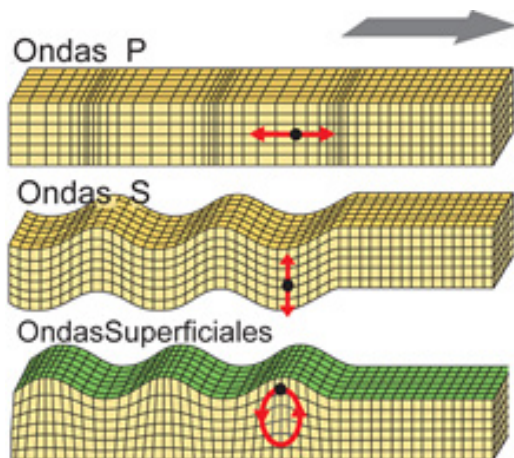


Figura 5. Representación del movimiento que causan los tres tipos de ondas sísmicas. La flecha de color gris representa la dirección en la que se propagan las ondas. Las flechas pequeñas de color rojo muestran la dirección en la que vibraría el suelo en cierto punto al paso de cada tipo de onda. Figura modificada de Bolt (1993).

mejor este método, te recomendamos leer el documento que se encuentra en: https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/cmo_son_localizados_los_terremotos.

Intensidad y Magnitud

Comúnmente después de que ocurre un sismo, en los medios de comunicación los términos intensidad y magnitud son usados erróneamente como sinónimos para describir qué tan grande fue el sismo. Sin embargo, estos términos representan dos cosas diferentes. La magnitud se utiliza para medir el tamaño del sismo, con base en la energía que libera, mientras que la intensidad es una descripción de los efectos causados por el sismo.

La **“intensidad”** se asigna en función de los daños o efectos causados en las personas y construcciones. Para un mismo sismo varios lugares pueden reportar diferentes intensidades dependiendo del daño causado en cada lugar. En general, mientras más alejado se encuentre un lugar del epicentro menor será el daño, y por lo tanto, menor la intensidad reportada para ese lugar. La escala más común para medir la intensidad se conoce como escala de **“Intensidades Modificada de Mercalli (MMI)”**, que se basa en cómo las personas perciben el sismo y el daño observable que causa en construcciones. Esta escala varía del 1 al 12, donde por ejemplo, un número 2 representa que se sintió el movimiento del suelo muy levemente sin causar daños notables en construcciones, mientras que un número 11 significa que el suelo se sacudió muy violentamente, destruyendo puentes y derrumbando la mayoría de las construcciones (Figura 6).

La **“Magnitud”** mide qué tan grande fue un sismo, con base en la energía que libera. A diferencia de la intensidad que depende de dónde se mide, a un sismo se le asigna un solo valor para definir su magnitud. Existen varias escalas para definir la

Escala Sísmica Modificada de Mercalli	
I. Imperceptible	Microsismo, detectado por instrumentos
II. Muy Leve	Sentido por algunas personas (generalmente en reposo)
III. Leve	Sentido por algunas personas dentro de edificios
IV. Moderado	Sentido por algunas personas fuera de edificios
V. Poco Fuerte	Sentido por casi todos
VI. Fuerte	Sentido por todos
VII. Muy Fuerte	Las construcciones sufren daño moderado
VIII. Destructivo	Daños considerables en estructuras
IX. Muy Destructivo	Daños graves y pánico general.
X. Desastroso	Destrucción en edificios bien contruidos
XI. Muy Desastroso	Casi nada queda en pie
XII. Catastrófico	Destrucción total

Figura 6. Escala de Intensidades Modificada de Mercalli (MMI). Figura tomada de Pin-Molina (2019).

magnitud de un sismo. Entre las más conocidas se encuentra la **“escala de Richter”**. Esta escala fue desarrollada en 1935 para medir sismos en el sur de California, y se basa en el tamaño de las ondas P y S registradas por un tipo en partícula de sismógrafo y a una distancia específica desde el epicentro. Esta escala ya no es comúnmente usada por los sismólogos, puesto que ya existen escalas mucho más generales y precisas. Una de estas escalas, particularmente útil para medir sismos grandes, es la que se conoce como **“Magnitud de Momento”** y se representa con las siglas **Mw**. La magnitud de momento es proporcional al desplazamiento que ocurrió sobre la falla que generó el sismo y al área (en el plano de la falla) que se deslizó. La magnitud se calcula a partir de las ondas sísmicas que se registran en estaciones sismológicas alrededor del mundo. Sin embargo, un sismo tiene solo un valor de magnitud, independientemente de donde se midan sus ondas. Es importante mencionar que las escalas de magnitud son escalas logarítmicas. El incremento de una unidad en la escala de magnitud es equivalente a un aumento de 10 veces la amplitud de las ondas registradas. Es decir, un sismo de magnitud 7 causa ondas sísmicas de 10 veces mayor amplitud que un sismo de magnitud 6. En términos de energía, el incremento de una unidad en la

escala de magnitud es equivalente a 32 veces de aumento en la energía liberada. Es decir, un sismo de magnitud 6 libera 32 veces más energía que uno de magnitud 7, y uno de magnitud 8 libera 32 veces más que uno de magnitud 7. Como referencia, un sismo de magnitud 6 libera aproximadamente la misma energía que se liberó por la bomba atómica en la ciudad japonesa de Hiroshima al final de la Segunda Guerra Mundial; por lo tanto, un sismo de magnitud 8 liberará la energía equivalente a aproximadamente 1024 (es decir, 32x32) bombas atómicas como la de Hiroshima.

El sismo más grande que ha sido registrado en el mundo ocurrió en **Chile en 1960**. Tuvo una magnitud de **9.5**. El sismo que ha causado más muertes en el presente siglo fue el ocurrido en **Sumatra en 2004**, de magnitud de **9.1**, el cual causó un gran tsunami, resultando en la muerte de cerca de 228 mil personas en 14 diferentes países. Otro sismo que causó un gran número de muertes ocurrió en **2010 en Haití**. Este sismo posiblemente causó la muerte de más de 200 mil personas, además de grandes pérdidas económicas que aún afectan a ese país, todo esto a pesar de que sólo fue de magnitud **7**. Por otro lado, el sismo que ha causado más daños económicos fue el ocurrido en **Japón en**

2011, de magnitud de **9.1**. Este sismo, junto con un gran tsunami que generó, causaron daños económicos de cerca de \$235,000 millones de dólares (Kajitani et al., 2013).

En general, un sismo de magnitud menor a 3 es casi imperceptible por las personas, mientras que uno de magnitud 4 puede ser sentido por alguien que se encuentre relativamente cerca de su epicentro. Los sismos de magnitud 5 son los que generalmente empiezan a causar daños ligeros en construcciones. Los sismos mayores que 7, si ocurren cerca de poblaciones, generalmente causan pérdidas de vidas y grandes daños materiales. Cada día ocurren miles de sismos alrededor del mundo, la gran mayoría son sismos pequeños e imperceptibles. Estadísticamente, se estima que alrededor del mundo cada año ocurren:

- ~1 millón de sismos de magnitud ≥ 2 ,
- ~1,500 sismos de magnitud ≥ 5 ,
- ~18 sismos de magnitud ≥ 7 ,
- ~1 sismo de magnitud ≥ 8 .

En la siguiente sección se describe la tectónica de México, así como algunos de los sismos ocurridos en México que por su magnitud y por el daño causado son relevantes.

3. Tectónica y Grandes Sismos en México

Tectónica en México

En México interactúan cinco placas tectónicas: las placas Norteamérica, Pacífico, Cocos, Caribe, y la pequeña placa Rivera (Figura 7). Las placas Rivera y Cocos se encuentran en el océano Pacífico, es decir, son placas oceánicas. La mayor

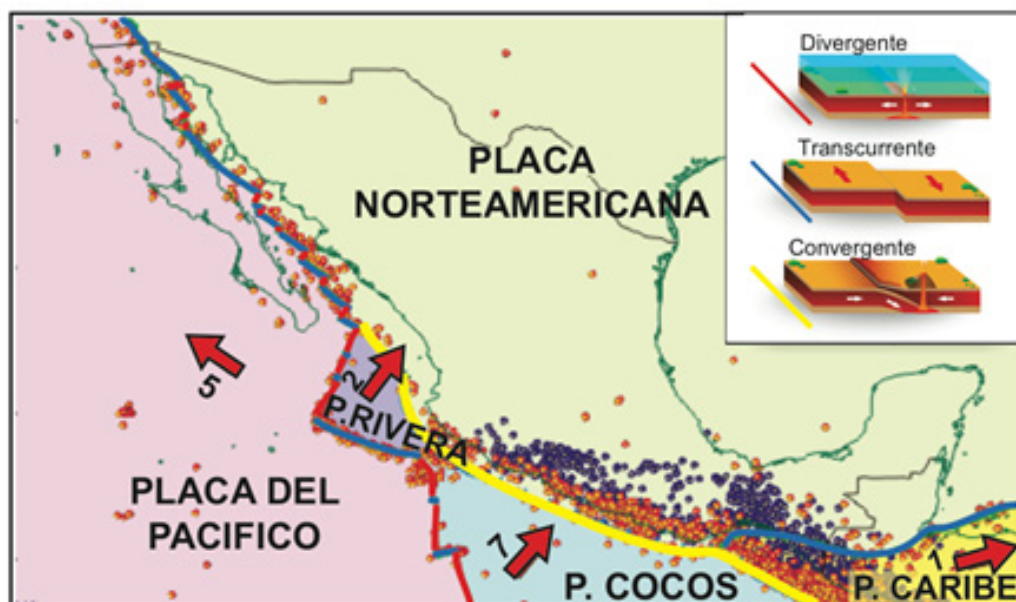


Figura 7. Mapa de las placas tectónicas que interactúan en México. Las flechas rojas representan la dirección de movimiento de cada placa con respecto a la placa de Norteamérica, y el número cerca de la flecha representa su velocidad en cm/año. Los colores de las fronteras entre placas corresponden al tipo de frontera (divergente, convergente o transcurrente) de acuerdo a los modelos en la esquina superior derecha. Los puntos representan epicentros de sismos. Mapa modificado de Kostoglodov y Pacheco (1999) y figura de modelos modificada de <https://bjolley.weebly.com/plate-tectonics-quiz-1-study-guide.html>.

parte de México se encuentra sobre la placa Norteamérica, sin embargo, la península de Baja California se encuentra sobre la placa Pacífico, y una parte de Chiapas se encuentra sobre la placa Caribe.

Como se puede observar en la Figura 7, en México ocurren los tres tipos de frontera entre placas. La placa Pacífico se desplaza a una velocidad de aproximadamente 5 cm/año hacia el noroeste con respecto a la placa Norteamérica. Este proceso ha causado que la península de Baja California, junto con parte del estado de California, se separen lentamente del resto del continente, lo cual comenzó a ocurrir hace aproximadamente 12 millones de años (Espíndola y Pérez, 2018). Desde entonces, la península de Baja California se ha desplazado hacia el noroeste aproximadamente 330 km, dando espacio para el Mar de Cortés. La dirección de desplazamiento de la placa del Pacífico causa que la frontera entre esta placa y la placa Norteamérica sea mayormente del tipo transcurrente, especialmente hacia el norte; sin embargo, a lo largo del Mar de Cortés alternan fronteras del tipo transcurrente y divergente.

Las placas Cocos y Rivera se mueven hacia la placa Norteamérica a una velocidad de aproximadamente 7 cm/año y 2 cm/año, respectivamente. Esto causa que las placas Cocos y Rivera formen fronteras del tipo convergente con la de Norteamérica. Puesto que Cocos y Rivera son placas oceánicas, se sumergen por debajo de la placa Norteamérica formando zonas de subducción cerca de la costa. Gran parte de esta región se conoce como la **“Fosa Mesoamericana”**. Como en otras zonas de subducción, esto causa que se generen volcanes en la placa cabalgante, en este caso la placa de Norteamérica, y por eso existen muchos de los volcanes en el centro del México (incluyendo el Popocatepetl), a los que en su conjunto se les conoce como el **“Eje Neovolcánico Mexicano”** o **“Faja Volcánica Transmexicana”**. La frontera tectónica entre las placas Cocos Norteamérica

se considera como una de las más activas sísmicamente en el Mundo.

La placa Caribe se mueve hacia el este, a aproximadamente 1 cm/año con respecto a la placa Norteamérica. Esta placa contiene a la parte sur del estado de Chiapas, así como a los países de Centroamérica y a gran parte de las islas caribeñas. En general, la placa Caribe forma una frontera de tipo transcurrente con respecto a la placa Norteamérica, es decir, el movimiento es lateral, sin embargo, en ciertos fragmentos también existe divergencia (Kostoglodov y Pacheco, 1999). A lo largo de la frontera entre estas dos placas se forma un sistema de fallas conocido como **Polo chic-Motagua**.

Toda esta actividad tectónica causa que México sea uno de los países sísmicamente más activos en el mundo. Desde el año 1900, a la fecha en que se elaboró este documento, en México han ocurrido 84 sismos de magnitud ≥ 7 ; 4 de ellos fueron de magnitud ≥ 8 (Sismos Históricos de México, 2014). Usando estos números, podemos decir que, en promedio, cada 1.4 años ocurre un sismo de magnitud ≥ 7 en México. Aunque de muchos de los sismos no se conocen datos exactos, es posible que desde 1900 a la fecha, los sismos en México hayan cobrado más de 40,000 vidas. A continuación se describen algunos de los sismos más relevantes ocurridos en México.

Los Sismos y el Tsunami de 1787

En **1787** ocurrió una secuencia de cuatro sismos enormes al sur de México, entre los cuales quizás se encuentre el más grande ocurrido en México del que se tenga conocimiento. Estos ocurrieron los días 28, 29 y 30 de mayo, y 3 de junio, y fueron seguidos por un gran número de réplicas en los días posteriores. El primero coincidió con la celebración religiosa de San Sixto, por lo que se les conoce como **“Los Temblores de San Sixto”**. Los primeros sismógrafos se empezaron a desarrollar poco antes de 1900, por lo tanto,

en 1787 no existía la instrumentación necesaria para registrar las ondas sísmicas y así poder definir los epicentros y la magnitud de los sismos. Sin embargo, existen archivos históricos con descripciones y relatos que permiten conocer en qué lugares, qué tan fuerte, y por cuánto tiempo las personas sintieron que el suelo se sacudía (ver por ejemplo: Sismos Históricos de México, 2014). Además, existen archivos con descripciones de los daños ocurridos, por ejemplo, en iglesias, haciendas y palacios de gobierno. Con esta información se puede definir una intensidad para cada lugar de donde hay reportes. Luego, usando esas intensidades se puede estimar donde fue el epicentro, y más o menos qué magnitud debieron haber tenido los sismos. Para los temblores de San Sixto existen reportes de daños en las ciudades de Oaxaca, Puebla, Veracruz, Acapulco y la Ciudad de México, entre otras (Figura 8). Usando esta información se sabe que los sismos ocurrieron cerca de las costas de Oaxaca y Guerrero, por lo que probablemente están relacionados a la frontera convergente entre las placas Cocos y Norteamérica, así que se pueden catalogar como sismos interplaca. En cuanto a

la magnitud de cada sismo, no es muy clara. Las descripciones escritas sugieren que los cuatro sismos (o al menos los dos primeros y el cuarto) fueron sentidos como “igual de potentes”. Este tipo de secuencia no es tan común, puesto que usualmente en una secuencia primero ocurre un sismo de mayor tamaño, llamado “**sismo principal**”, y luego le siguen las “**réplicas**” de menor tamaño, cada vez más pequeñas conforme avanza el tiempo. Con base en las intensidades se cree que al menos uno de los cuatro sismos de 1787 tuvo una magnitud (M_w) de alrededor de **9.0**, lo que lo convierte en el sismo de mayor magnitud en México del que se tenga registro histórico. Otra característica importante es que el primero de los cuatro sismos generó un gran tsunami. De acuerdo a los testigos, el mar se alejó unos 5 km, dejando al descubierto “tierras de colores, peñascos y árboles submarinos” (Sismos Históricos de México, 2014), y luego regresó violentamente entrando casi 7 km tierra adentro, provocando la muerte de algunos pescadores y ganado. Este parece ser el tsunami más grande registrado México (Sismos Históricos de México, 2014).



Figura 8. Mapa muestra las intensidades, usando la escala de Intensidades Modificada de Mercalli (IMM), obtenidas a partir de información histórica, para diferentes ciudades después de los temblores de San Sixto. Datos obtenidos de: Sismos Históricos de México (2014).

El Sismo de Xalapa de 1920

Como se mencionó, la gran mayoría de los sismos ocurren entre dos placas tectónicas; sin embargo, también pueden ocurrir dentro ellas, es decir, ser sismos intraplaca, y causar mucho daño. Un ejemplo de esto es el sismo ocurrido cerca de la ciudad de Xalapa, Veracruz el 3 de enero de **1920**. Este sismo tuvo magnitud **6.4** y se originó dentro de la placa Norteamérica, aparentemente, en una falla que podría tener relación con la Faja Volcánica Transmexicana, donde existen varias fallas activas que han provocado sismos importantes en el pasado.

En Xalapa se registraron daños en construcciones por el movimiento propio del sismo (Figura 9); sin embargo, la verdadera catástrofe ocurrió debido a otros eventos inducidos por el mismo. El movimiento brusco provocó una avalancha de lodo sepultando varias poblaciones. Se calcula que en algunas partes el lodo alcanzó una profundidad de más de 60 metros (Flores y Camacho, 1922), matando a más de 400 personas. Además, el sismo también generó el nacimiento



Figura 9. Fotografía tomada en Xalapa, Veracruz, después del sismo de 1920. Imagen obtenida de Servicio Sismológico Nacional (2019).

de manantiales, derrumbes en montañas, inundaciones de lodo, y hundimientos de suelo. Se estima que todo esto causó la muerte de alrededor de 650 personas. Esto lo convierte en el segundo evento sísmico que ha causado más muertes en México de que se tiene registro. La Figura 10 muestra la localización del epicentro de este sismo, junto con los epicentros de los otros sismos importantes ocurridos en México que se discuten en este documento.

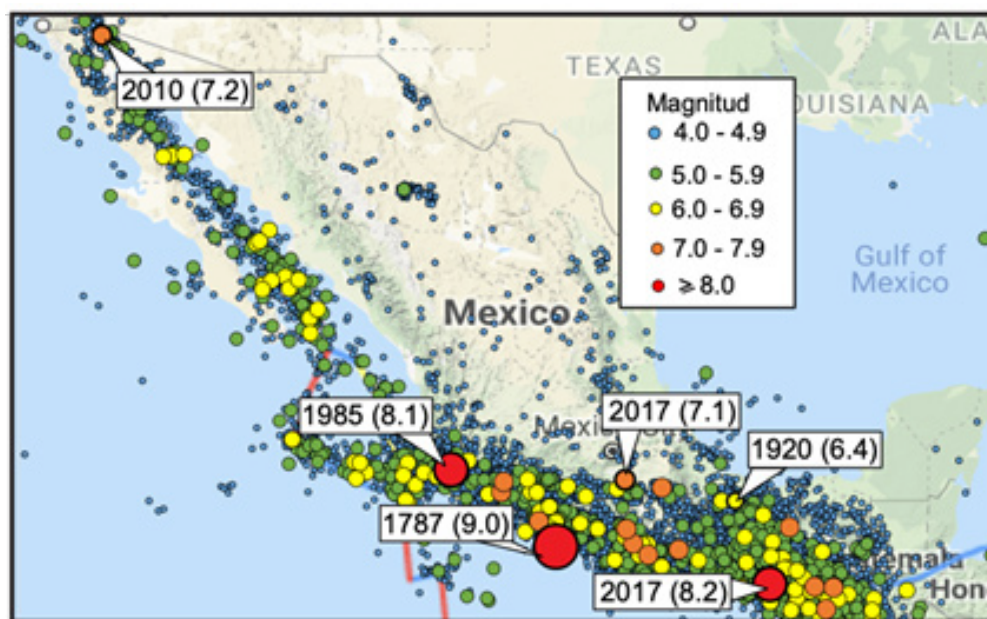


Figura 10. El mapa muestra los epicentros de sismos registrados en México desde 1900. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud. Están etiquetados con el año y la magnitud los sismos descritos en este documento (se incluye la posible localización del sismo de magnitud 9.0 de los terremotos de San Sixto de 1787

El Sismo de 1985

Definitivamente, el sismo que ha causado más muertes en México fue el ocurrido el **19 de septiembre de 1985** en las costas de Michoacán, de magnitud (Mw) **8.1** (Figura 11). Existe mucha controversia acerca de la cifra real de muertos pero el número de víctimas pudo haber alcanzado 40,000, principalmente en la Ciudad de México (<https://www.milenio.com/cultura/cuantos-muertos-causo-el-terremoto-de-1985>). Este sismo derrumbó cientos de edificios y casas, causando daños materiales calculados en unos \$8,000 millones de dólares (Najar, 2017) por lo que también es el sismo que ha causado más daño económico al país.

Este fue un sismo interplaca ocurrido en la zona de subducción en la frontera convergente entre las placas Norteamérica y Cocos, una de las fronteras entre placas más activas del mundo. Causó dos grandes réplicas, la primera un día después, de magnitud 7.5, y la segunda siete meses después, de magnitud 7.0.

A pesar de que el epicentro del sismo ocurrió a una distancia de más de 350 km de la Ciudad de México, ahí el suelo se sacudió fuertemente, alcanzando una intensidad (MMI) de 9. Estudios posteriores han mostrado que esto se debió

en gran parte a cómo responde el suelo de la Ciudad de México al paso de las ondas sísmicas. Esta ciudad se construyó sobre una isla en la mitad del antiguo Lago de Texcoco. La que se conoció como la Ciudad de México-Tenochtitlan se fue expandiendo sobre el lago, a través de chinampas, usadas para la agricultura y para ganar territorio a la superficie del lago. Gran parte de la actual Ciudad de México se encuentra sobre los restos de este antiguo lago, donde el subsuelo está formado por arcilla suave con un gran contenido de agua. En algunos lugares este material alcanza una profundidad de más de 30 metros. Este tipo de suelo, junto con la propia geometría del antiguo lago, causan que las ondas sísmicas se amplifiquen, además de que se genere un efecto de resonancia, lo que causa que el movimiento del suelo sea más brusco y dure por más tiempo. Estos efectos, conocidos como **“efectos de sitio”**, son los responsables de que ondas sísmicas puedan causar mucho daño al pasar por la Ciudad de México, incluso cuando estas ondas provienen de sismos con epicentros muy lejanos a la ciudad. En el caso del sismo de 1985, las ondas sísmicas tardaron en llegar desde el epicentro a la Ciudad de México alrededor de 2 minutos, y una vez que llegaron a la ciudad en algunos lugares la sacudida del suelo se sintió hasta por 4 minutos.



Figura 11. Fotografía del edificio Nuevo León de Tlatelolco, en que murieron entre 200 y 300 personas en el sismo de 1985. Imagen tomada de Najjar (2017).

Este sismo también generó un tsunami, el cual se observó en Manzanillo y Colima, y causó daños en las ciudades de Lázaro Cárdenas, Michoacán y en Zihuatanejo, Guerrero, con olas que alcanzaron los 3 metros de altura en esta última ciudad (Moreno, 1995).

El Sismo de Mexicali del 2010

Este sismo ocurrió el **4 de abril de 2010**, a las 3:40 pm tiempo local. El epicentro se localizó a unos 60 km al sureste de la ciudad de Mexicali, B.C., en una falla a lo largo de la sierra Cucupah y el cerro El Mayor, por lo que se le conoce como el **“Terremoto El Mayor-Cucupah”**, o de **“Easter Sunday (domingo de pascua)”** por la fecha en que ocurrió. Esta falla, junto con otras como la falla de Cerro Prieto y la Falla Imperial, forman un sistema de fallas que se puede considerar como la continuación de la Falla de San Andrés en California. Estas fallas están relacionadas al movimiento a lo largo de la frontera transcurrente entre las placas Norteamérica y Pacífico (Figura 7), por lo tanto se considera un sismo interplacas.

Este sismo causó un gran número de réplicas; tan sólo durante las 6 horas siguientes ya se habían registrado más de 90 réplicas. El sismo principal tuvo una magnitud (M_w) de **7.2**, y en algunos lugares se calcula que alcanzó una intensidad (MMI) de hasta 9 (Figura 12). El daño mayor se sufrió en las ciudades de Calexico, California y en Mexicali, B.C. donde se le asigna una intensidad (MMI) de 7. Este sismo causó la muerte de 4 personas y al menos 100 heridos en Mexicali, donde también se suscitaron varios incendios debido a la afectación en tuberías de gas. Además, el sismo causó que aguas subterráneas salieran a la superficie, inundando canales de irrigación. En Mexicali, uno de los principales hospitales de la ciudad sufrió daños por los que los pacientes tuvieron que ser transferidos a otros hospitales. El sismo también fue sentido claramente en ciudades como Ensenada, Tijuana, San Diego, e incluso en Los Ángeles, California (Figura 12). Además, se suscitó un derrumbe en la carretera que conecta las ciudades de Tijuana y Mexicali, causando graves problemas viales (Figura 13). Se estima que alrededor de 25,000 personas fueron afectas por este sismo.

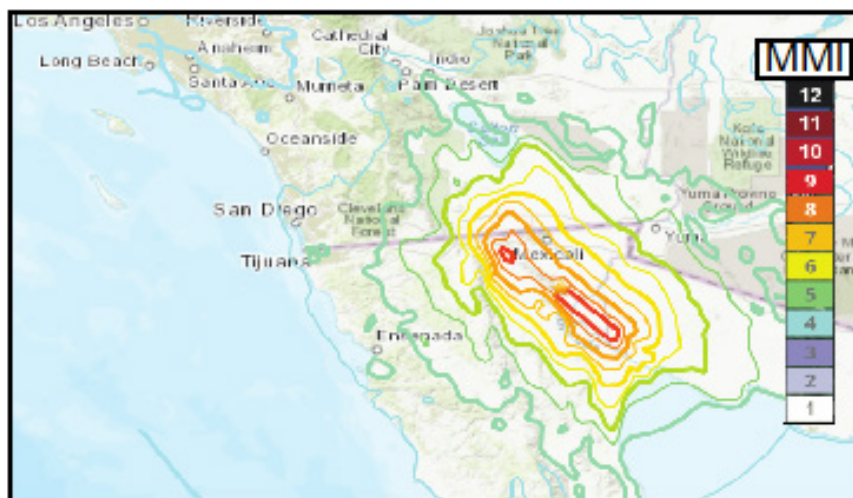


Figura 12. El mapa muestra las intensidades, usando la escala de Intensidades Modificada de Mercalli (IMM), para el sismo de 2010. Mapa generado por el U.S. Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov>)



Figura 13. La imagen muestra el derrumbe de la carretera que conecta a las ciudades de Tijuana y Mexicali, B.C., causado por el sismo del 2010.

Los Dos Sismos en Septiembre del 2017

En septiembre del **2017** ocurrieron dos de los sismos que han causado más víctimas en nuestro país. El primero de estos ocurrió poco antes de la media noche del **7 de septiembre** y tuvo su epicentro cerca de las costas de Chiapas, con una magnitud (M_w) de **8.2** (Figura 10). Este fue el sismo de mayor magnitud registrado en México después de los Temblores de San Sixto de 1787. El sismo del 7 de septiembre ocurrió relativamente cerca de la frontera entre las placas Cocos y

Norteamérica, sin embargo, diversos estudios han mostrado que fue un sismo muy profundo (~ 70 km) que se generó como una ruptura dentro de la placa Cocos, en la parte que se encuentra ya por debajo de la placa Norteamérica. Por lo tanto, se considera un sismo intraplaca. El epicentro se localizó a unos 140 km de la ciudad de Pijijiapan, Chiapas, dentro del Golfo de Tehuantepec, por lo que se le conoce como el “sismo de Pijijiapan”, “**sismo de Tehuantepec**” o “sismo de Chiapas”. El sismo también generó un gran número de réplicas, incluyendo una de magnitud 6.1 el 23 de septiembre. El sismo principal causó al menos 100 muertos y 900 heridos, principalmente en los estados de Chiapas y Oaxaca (Figura 14). Además, originó un tsunami que causó olas de hasta 3 metros de altura en las costas de Chiapas. Este sismo fue tan grande que incluso causó afectaciones en Guatemala, El Salvador y Honduras.

El sismo del 7 de septiembre fue sentido en la Ciudad de México, donde incluso activó la alerta sísmica, causando la evacuación de cientos de personas de sus casas, afortunadamente sin causar víctimas. Sin embargo, tan solo 12 días después, el **19 de septiembre**, un sismo de magnitud (M_w) **7.1** sacudió fuertemente la



Figura 14. Fotografías muestran el daño causado por el sismo del 7 de septiembre en el estado de Oaxaca. Fotografías tomadas el 12 de noviembre del 2017.

Ciudad de México. Este sismo, al igual que el del 7 de septiembre, parece ser el resultado de una ruptura dentro de la placa Cocos, por lo que también es un sismo intraplaca. A diferencia del sismo del 7 de septiembre, el del 19 de septiembre ocurrió muy cerca de la ciudad de México (Figura 10), casi por debajo de esta ciudad, por lo que se sintió con una gran intensidad, causando que el suelo se sacudiera fuertemente por cerca de 20 segundos. El sismo causó la muerte de 370 personas y la caída de cerca de 40 edificios. Este es el sismo que ha causado más muertes en la Ciudad de México después del de 1985.

Es curioso que el sismo del 19 septiembre del 2017 haya ocurrido en la misma fecha que el de 1985. Sin embargo, gracias al estudio de grandes bases de datos de sismos recientes e históricos, los sismólogos estamos seguros que no hay nada en particular en esa fecha, o en ninguna otra, que sugiera que los sismos son más probables de ocurrir en cierto día. Es decir, ambos ocurrieron un 19 de septiembre simplemente por casualidad.

Como ya se mencionó, México es uno de los países del mundo donde ocurren más sismos y de los de mayor tamaño, y aunque “los sismos no se pueden predecir”, los científicos en México y en el mundo estamos haciendo un gran trabajo para entender dónde es más probable que ocurran, de qué tamaño pueden ser, y qué efecto pueden tener en nuestras ciudades. Por otro lado, es responsabilidad de las autoridades y de los ciudadanos entender cuál es el riesgo de que ocurra un gran terremoto en sus ciudades, y tomar las medidas necesarias para reducir los daños si se presenta la ocasión.

4. Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra. Problemas

Los participantes tomaron un examen que contenía un total de 100 preguntas de opción múltiple, de las cuales 70 fueron basadas en los temarios de las tres ediciones pasadas de la

Olimpiada, es decir, en las ediciones de los años 2016, 2017 y 2018, cuyos temas fueron “Energía”, “El Cosmos y Nuestro Planeta” y “Erupciones Volcánicas”, respectivamente. El examen también contenía 30 preguntas basadas en el presente documento, las cuales se presentan a continuación

1. ¿Aproximadamente hace cuánto tiempo se formó el planeta Tierra?
 - a) 2,019 años
 - b) 4,600 años
 - c) 4,600 millones de años
 - d) 60,000 millones de años
2. ¿Cuál de las siguientes capas de la Tierra está compuesta principalmente de magma?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) manto
 - d) corteza
3. ¿Cuál de las siguientes capas de la Tierra está compuesta principalmente de hierro y níquel en estado más o menos líquido (similar a hierro fundido)?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) manto
 - d) corteza
4. ¿La litósfera se forma de la parte superior solidificada del manto y de qué otra capa de la Tierra?
 - a) núcleo interno
 - b) núcleo externo
 - c) atmósfera
 - d) corteza
5. ¿Qué es lo que se piensa causa el movimiento de las placas tectónicas?
 - a) la rotación de la Tierra
 - b) la traslación de la Tierra
 - c) la rotación del núcleo interno
 - d) las celdas de convección

6. ¿Qué nombre se le conoce al mega continente que se formó de todos los presentes continentes hace unos 300 millones de años?

- a) Mega América
- b) Pangea
- c) Litósfera
- d) Continente tectónico

7. ¿Cuál es ancho promedio de la litósfera por debajo del suelo oceánico?

- a) 7 km
- b) 25 km
- c) 75 km
- d) 125 km

8. ¿Cuál es el ancho promedio de la litósfera por debajo de los continentes?

- a) 7 km
- b) 25 km
- c) 75 km
- d) 125 km

9. En este tipo de frontera entre placas tectónicas una placa se mueve lateralmente con respecto a la otra.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

10. En este tipo de frontera entre placas tectónicas una placa se mueve alejándose de la otra, y nueva litósfera se forma entre ellas.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

11. En este tipo de frontera entre placas tectónicas las placas chocan de frente.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

12. En este tipo de frontera entre placas tectónicas se forman las dorsales oceánicas.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

13. En este tipo de frontera entre placas tectónicas se forman las zonas de subducción.

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

14. ¿Aproximadamente qué porcentaje de los sismos del todo los planetas ocurren alrededor del Cinturón de Fuego (del Pacífico)?

- a) 30 %
- b) 50 %
- c) 60 %
- d) 90 %

15. ¿En general a qué velocidad viajan las ondas sísmicas "P" en la corteza?

- a) entre 1 y 2 km/s
- b) entre 3 y 4 km/s
- c) entre 4 y 7 km/s
- d) entre 7 y 10 km/s

16. ¿En general a qué velocidad viajan las ondas sísmicas "S" en la corteza?

- a) entre 1 y 2 km/s
- b) entre 3 y 4 km/s
- c) entre 4 y 7 km/s
- d) entre 7 y 10 km/s

17. Un sismo de magnitud 8 liberará aproximadamente la misma energía que:

- a) 10 sismos de magnitud 7
- b) 32 sismos de magnitud 6
- c) 10 sismos de magnitud 5
- d) 32 sismos de magnitud 7

18. ¿Aproximadamente a qué velocidad se mueve la placa del Pacífico con respecto a la placa Norteamérica?

- a) 1 cm/año
- b) 2 cm/año
- c) 5 cm/año
- d) 7 cm/año

19. ¿Aproximadamente a qué velocidad se mueve la placa Cocos con respecto a la placa Norteamérica?

- a) 1 cm/año
- b) 2 cm/año
- c) 5 cm/año
- d) 7 cm/año

20. ¿Qué tipo de frontera entre placas existe entre la placa Norteamérica y la placa Cocos?

- a) divergente
- b) convergente
- c) transcurrente
- d) rotacional

21. ¿Aproximadamente qué distancia se ha desplazado hacia el noroeste la península de Baja California con respecto al resto de México desde que se empezó a separar, hace unos 12 millones de años?

- a) 300 km
- b) 500 km
- c) 900 km
- d) 1000 km

22. ¿Cuál de los siguientes sismos ha causado más muertes en México del que se tenga registro histórico?

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

23. ¿Cuál de los siguientes sismos se considera que fue el de mayor magnitud en México del que se tenga registro histórico?

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

24. ¿Cuál de los siguientes sismos se considera que fue el segundo que ha causado más muertes en México? La mayoría de estas muertes fueron causadas por una avalancha de lodo.

- a) Uno de los sismos de 1787
- b) El sismo de Xalapa de 1920
- c) El sismo de 1985
- d) El sismo de Mexicali de 2010

25. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido cerca de Mexicali en 2010 de magnitud 7.2?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

26. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido en Xalapa, Veracruz en 1920 de magnitud 6.4?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

27. ¿Qué tipo de sismo fue el ocurrido en México en 1985 de magnitud 8.1?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

28. ¿Qué tipo de sismo fueron los ocurridos en México en 2017 de magnitudes 7.1 y 8.2?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

29. ¿Qué tipo de sismo se cree que fueron los temblores de San Sixto de 1787?

- a) intraplaca dentro de la placa cabalgante
- b) intraplaca dentro de la placa que se subduce
- c) interplaca en una frontera transcurrente
- d) interplaca en una frontera convergente

30. ¿De qué magnitud fue el sismo conocido como “El Mayor-Cuapah” del 2010?

- a) 5.0
- b) 6.2
- c) 7.2
- d) 8.2

Referencias

Bolt A.B. (1993), *Earthquakes*: New York, W. H. Freeman, p. 33.

Capraro, S., S. Ortiz, R. Valencia (2018), Los efectos económicos de los sismos de septiembre, *Economía Informal*, 408, pp.16-33.

Espindola, V.H. y X. Pérez (2018), ¿Qué son los sismos, dónde ocurren y cómo se miden?, *Ciencia*, v. 69, n. 3, pp. 8-15.

Flores T., H. Camacho. (1922). “Terremoto Mexicano del 3 de enero de 1920”, *Boletín* 38, Instituto Geológico Mexicano.

Kajitani, Y., S.E. Chang, M.EERI, H. Tatano (2013), Economic Impacts of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake and Tsunami. *Earthquake Spectra*: March 2013, Vol. 29, No. S1, pp. S457-S478.

Kostoglodov, V. y J. F. Pacheco (1999), “Cien años de sismicidad en México”, Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <<http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Moreno J.M. (1995), The 1985 Mexico earthquake, *Geofís. Colombiana*, n.3, pp 5-19.

Najar, A. (2017), Terremoto de 1985: el devastador sismo que cambió para siempre el rostro de la Ciudad de México. BBC Mundo News. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150917_mexico_sismo_antes_despues_fotos_an>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Pin-Molina, J.A. (2019), ¿Cómo se mide un Terremoto?, Siemicknowledge, <<http://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/tag/escala-de-mercalli>>, Consultado el 10 de mayo de 2019.

Tarback, E., F. Lutgens (2001), *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*, 6 ed., p. 540. Prentice Hall, Madrid España.

Otros sitios de Internet referidos:

¿Cuántos muertos causó el terremoto de 1985?. Milenio. <<https://www.milenio.com/cultura/cuantos-muertos-causo-el-terremoto-de-1985>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica de la UNAM, <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/1920/SSNMX_rep_his_19200103_xalapa_M64.pdf>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Sismos Históricos de México. Instituto de Geofísica de la UNAM (2014) <<http://www.sismoshistoricos.org/>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

XXIV Olimpiadas Estatal de Ciencias de la Tierra. Unión Geofísica Mexicana, <<http://olimpiadas.ugm.org.mx>>. Consultado el 10 de mayo de 2019.

Recibido: 4 de septiembre de 2010

Corregido por el autor: 2 de octubre de 2019

Aceptación: 5 de octubre de 2019

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).

La 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.

Secciones:

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.**

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.

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

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

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

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

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.

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.

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)

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

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>

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

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

Ejemplos:

Tomado de Google Hearth (2014).

Modificado de Pérez (2014) p. 234.

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

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.

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

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Víctor H. de la Luz
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

