

Concentraciones de gas radón (^{222}Rn) en suelo de la zona urbana de Morelia, Michoacán, México y su relación con fallas potencialmente sísmicas y asociadas con el proceso de subsidencia-fluencia

Octavio Lázaro-Mancilla^{1,*}, Víctor Hugo Garduño-Monroy²,
Avith Mendoza-Ponce³, Ángel Figueroa-Soto⁴, Ricardo Vázquez-Rosas⁴,
Guadalupe Mirella Ramírez-Tapia⁵ y Alejandra Cortés-Silva⁶

¹ Laboratorio de Sismología y Geofísica Aplicada, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Mexicali, B.C., C.P. 21280, México.

² Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

³ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

⁴ CONACyT-Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

⁵ REDGFU, Constitución de Apatzingán No. 47, C.P. 58170, Morelia, Michoacán, México.

⁶ Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, México.

* olazaro@uabc.edu.mx, olazaro2000@yahoo.com

RESUMEN

Este trabajo da a conocer los niveles de concentración de gas radón (^{222}Rn) en suelos de la zona urbana en la ciudad de Morelia, Michoacán y su relación con fallas geológicas potencialmente sísmicas y las asociadas con el proceso de subsidencia-fluencia-falla. La medición promedio de la concentración de gas radón de 86 estaciones distribuidas en la ciudad de Morelia es de 4028.56 Bq/m³. Además, se realizó un análisis variográfico de los datos de concentraciones de gas ^{222}Rn para determinar la posible existencia de anisotropía. De este análisis se infiere que el gas radón en la ciudad de Morelia presenta una anisotropía híbrida, con dirección preferencial N50°E, lo que sugiere que su distribución espacial obedece al campo de esfuerzos extensional del sistema de fallas Morelia-Acambay (σ_2 =NE-SW y σ_3 =NW-SE). Utilizando la técnica de vecinos naturales se construyó un mapa interpolado de las concentraciones de gas radón de la zona urbana, para visualizar su distribución y además, mediante el cálculo del umbral línea base – anomalía, poder identificar las zonas con concentraciones anómalas. Los resultados de esta investigación permiten relacionar las zonas de alto riesgo por radón con fallas activas. Un ejemplo claro es la falla La Paloma, donde 4 de las 7 estaciones de medición ubicadas cerca de esta falla resultaron con valores de concentración de gas ^{222}Rn por encima del umbral. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir de base para hacer mediciones a mayor detalle en la zona urbana de la ciudad de Morelia y para monitorear las fallas activas. También, pueden utilizarse como guía para planear el crecimiento y

desarrollo de la ciudad, permitiendo una ubicación segura de futuras escuelas, centros de salud y fábricas, sin dejar a un lado el aspecto normativo que pudiera derivarse de los resultados de esta investigación.

Palabras clave: ^{222}Rn ; radón; falla La Paloma; falla La Colina; georadar; subsidencia-fluencia-falla; Morelia; México.

ABSTRACT

This work reports on the concentration levels of radon gas (^{222}Rn) coming through the soil in the urban area of the city of Morelia, Michoacán, Mexico and its relationship with potentially active geological faults and with faults associated to subsidence-creep-fault processes. The average measurement of the radon gas concentration of 86 stations distributed in the city of Morelia is 4028.56 Bq/m³. In addition, a variographic analysis was carried out for ^{222}Rn gas concentrations data to determine the possible existence of anisotropy. From this analysis it is inferred that the radon gas in the city of Morelia presents a hybrid anisotropy, with preferential direction N50°E, which suggests that the spatial distribution is driven by the extensional stress field on the Morelia-Acambay fault system (σ_2 =NE-SW y σ_3 =NW-SE). Using the natural neighbor interpolation method, a map of the radon gas concentrations in the urban area was constructed to visualize its distribution. In addition, by calculating the baseline-anomaly threshold, it was possible to identify the areas with

anomalous concentrations. The results of this investigation indicate a relationship between high-risk radon zones and active faults. A clear example is La Paloma fault, where four of the seven stations located near this fault yielded measurements above the threshold. The results obtained in this investigation can be used as a basis for more detailed measurements in the urban area of Morelia City and to monitor the active faults. Also, they can be used as a guide to plan the growth and development of the city, allowing a safe location of future schools, health centers and factories, without leaving aside the normative aspect that could be derived from the results of this investigation.

Key words: ^{222}Rn ; radon; La Paloma fault; La Colina fault; GPR; subsidence-creep-fault; Morelia; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Para entender mejor las relaciones que existen entre las fallas geológicas, el flujo de gas radón en el suelo y la ocurrencia de terremotos, se analizaron las mediciones de la concentración de gas radón (^{222}Rn) registradas en 86 estaciones distribuidas en la ciudad de Morelia. La zona urbana de la ciudad de Morelia se enmarca en una región de gran peligro sísmico debido a la presencia de fallas potencialmente sísmicas. Este hecho permite tener las condiciones ideales del fracturamiento del suelo para explorar la relación entre las concentraciones de gas radón fluyendo hacia la atmósfera y el fallamiento activo.

Las investigaciones que relacionan las fallas geológicas con flujos de gases en el suelo, la ocurrencia de terremotos y sus predicciones se remontan al estudio del terremoto de Tashkent en Asia Central (Fursov *et al.*, 1968), donde se reportó que el aire proveniente de pozos ubicados sobre fallas geológicas contenía 15 veces más mercurio que el aire alejado de las zonas de falla. En 1975, el Scripps Institute of Oceanography inició estudios para el monitoreo de gases (radón disuelto, helio, nitrógeno, metano) como posibles precursores de terremotos (Craig *et al.*, 1975). Las variaciones más significativas identificadas fueron los incrementos en radón, helio, nitrógeno y metano en 1979, justo antes del terremoto de Big Bear en California con magnitud 4.8 (Craig *et al.*, 1980). Además, Shapiro *et al.* (1982) reportaron la instalación de instrumentos de medición de dióxido de carbono en la estación de Lake Hughs, California, cerca de la falla de San Andrés, cuyos datos mostraron la presencia de anomalías correlacionadas con la producción de radón y el dióxido de carbono.

En relación con las investigaciones que se han hecho sobre fallas geológicas para su ubicación, actividad y monitoreo, utilizando solamente mediciones de gas ^{222}Rn (Tabla 1), nos remontamos a King (1984) que reportó variaciones de emanaciones impulsivas de gas ^{222}Rn en un segmento de deslizamiento lento de la falla de San Andrés entre San Benito y San Juan Bautista, en California, seguidas por deslizamientos lentos y sismos. Ioannides *et al.* (2003) midieron gas ^{222}Rn en suelo en sitios de las fallas Almopia, Mygdonia y Manoliassa en Grecia, concluyendo que son fallas geológicas activas. Moussa y El Arabi (2003) realizaron un levantamiento de gas ^{222}Rn en la carretera de Qena-Safaga en el Desierto Oriental de Egipto, en el cual encontraron anomalías de gas ^{222}Rn relacionadas con alineamientos de fallas en las direcciones NW-SE y NE-SW. Lázaro-Mancilla *et al.* (2007) levantaron un perfil de concentración de gas ^{222}Rn transversal a la falla Imperial en Mexicali, en la zona de ruptura del sismo de 1979, estudiada con paleosismología por Thomas (1995). Dicho perfil permitió asociar los valores máximos de radón con las trazas de la falla, las cuales aparecen en los resultados paleosismológicos y en la imagen de georadar levantada en ese sitio. Font *et al.* (2008) concluyeron que

la falla Amer, localizada cerca de la región volcánica de La Garrotxa en España, está activa. Los valores que midieron de ^{222}Rn fluctuaron entre 0.3 y 140 kBq/m³. Otro estudio sobre la emisión de radón en suelo y agua subterránea como precursor de sismos es el realizado por Singh *et al.* (2010). Las anomalías de gas ^{222}Rn (0 a 20 kBq/m³) que observaron en el valle Chamba al noroeste de los Himalaya, India se correlacionaron con eventos sísmicos de magnitud entre 2.2 a 5.0. Estos autores concluyeron que es posible determinar la distancia epicentral, el tiempo precursor y la magnitud de un terremoto por ocurrir, a partir del área observada bajo el pico de la anomalía de ^{222}Rn . Asumadu-Sakyi *et al.* (2011) realizaron un estudio en el National Radioactive Waste Management Centre (NRWMC) de la Ghana Atomic Energy Commission (GAEC) en Accra, Ghana, Africa, para localizar fallas geológicas usando un detector nuclear de estado sólido. Encontraron dos fallas, una en la zona de control y otra en el área de estudio, con valores de ^{222}Rn que fluctuaron entre 6.4±0.4 y 27.5±0.8 kBq/m³ en el NRWMC y de 10.2±0.5 a 23±0.7 kBq/m³ en Dunkonah. Igualmente, Contreras-Corvera y Lázaro-Mancilla (2014) utilizaron mediciones de la concentración de gas radón en suelo para ubicar la traza de la falla Michoacán en la zona urbana de Mexicali inferida por Herrera (2005), la cual no es visible debido a la carpeta asfáltica en la ciudad y a la actividad de siembra en el valle de Mexicali. Por último, Lázaro-Mancilla *et al.* (2014) han comprobado la existencia de una falla en los terrenos del Instituto Tecnológico de Mexicali utilizando mediciones de concentración de gas radón en suelo, combinadas con perfiles de georadar, de sísmica de reflexión y tomografía eléctrica resistiva utilizando arreglo dipolo-dipolo. Aunado a lo anterior una investigación que relaciona las mediciones de gas radón con salud, es la de Ramírez-Guardiola (2014), quien elaboró un mapa de concentración de gas radón en suelo de la zona urbana de Mexicali y lo relacionó con datos de muertes por cáncer pulmonar en el periodo de 2003-2011, encontrando una correlación positiva.

Pasemos ahora a revisar los estudios relacionados con las fallas geológicas que sirven de base para esta investigación. Garduño-Monroy *et al.* (2001) mencionan que en la ciudad de Morelia, existen dos tipos de zonas vulnerables: a) una zona donde existe una falla geológica sinsedimentaria anterior al establecimiento de la zona urbana, con o sin relieve morfológico pero que por sobreexplotación de las aguas subterráneas se ha reactivado con movimientos de fluencia o *creep* (falla La Colina) en las secuencias fluviolacustres, y con tasas de movimiento de 4 a 6 cm anuales; b) una zona en donde existe una falla que puede ser considerada como potencialmente sísmica por tener desplazamientos durante el Holoceno y que por sus características morfológicas está relacionada con inestabilidad de taludes (falla La Paloma) (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002).

Con base en lo anterior y tomando en cuenta que el subsuelo de la zona urbana de la Ciudad de Morelia está conformado en parte por ignimbrita (roca de naturaleza similar a la del granito que puede contener más de 3 ppm de ^{238}U , Keller, 1996) en su estratigrafía. Es de esperarse la presencia de gas ^{222}Rn , producto de la desintegración del ^{238}U , en el suelo o rocas suprayacentes a la misma, el cual puede también fluir a la atmósfera si el suelo tiene grietas, fracturas y fallas. Lo anterior se ha comprobado parcialmente por el estudio intradomiciliario de medición de concentración de gas radón realizado en 250 viviendas de la ciudad de Morelia por Canoba *et al.* (2002), en el cual se obtuvo una media de concentración de gas ^{222}Rn intradomiciliario de 45 Bq/m³, con un mínimo de 15 Bq/m³ y un máximo de 165 Bq/m³.

Por lo tanto, consideramos pertinente realizar esta investigación que tiene como finalidad dos objetivos: primero, conocer la distribución de concentración de gas radón en suelo en la zona urbana de Morelia y segundo, relacionar estas mediciones con los hundimientos y fallas reportados por Garduño-Monroy *et al.* (2001).

Tabla 1. Investigaciones relativas a ^{222}Rn , fallas geológicas y terremotos.

Lugar	Investigación sobre:	Magnitud	Profundidad de muestreo (m)	Niveles de radón	Observaciones	Referencia
San Juan Bautista, California. EE.UU.	Variaciones impulsivas de gas radón en la falla de San Andrés.	Emanación de gas radón en suelo.	0.70 m	5.07 Bq/kg – 12.22 Bq/kg	Monitoreo de emanaciones de gas radón.	King (1984).
Thessaloniki y Ioannina, Grecia.	Fallas geológicas activas.	Concentración de gas radón en suelo.	0.50 m	0.7 kBq/m ³ – 13 kBq/m ³	El gas radón sirve para explorar fallas geológicas.	Ioannides <i>et al.</i> , (2003).
Ciudad de Quena, Egipto.	Fallas geológicas activas.	Concentración de radón en suelo.	0.30 m	20 Bq/m ³ – 150 Bq/m ³	Anomalías de gas radón se relacionan con fallas.	Moussa y El Arabi (2003).
Colonia Castro, Mexicali, B.C., México.	Falla Imperial.	Concentración de radón en suelo.	0.70 m	0.60±1.20 pCi/L– 94.83±18.6 pCi/L	Perfil transversal a la traza de la falla Imperial.	Lázaro-Mancilla <i>et al.</i> , (2007).
Región volcánica de La Garrotxa en España.	Falla Amer.	Concentración de radón en suelo.	1.00 m	0.3 kBq/m ³ – 140 kBq/m ³	Concluyeron que la Falla Amer está activa.	Font <i>et al.</i> , (2008).
Valle Chamba al noroeste de los Himalaya, India.	Distancia epicentral, el tiempo precursor y la magnitud de un terremoto por ocurrir.	Concentración de radón en suelo.	1.00 m	0 – 20 kBq/m ³	Uso de la anomalía de gas radón para calcular la distancia epicentral, el tiempo precursor y la magnitud de un sismo.	Singh <i>et al.</i> , (2010).
National Radioactive Waste Management Centre (NRWMC) en Accra, Ghana, África.	Búsqueda de fallas geológicas.	Concentración de radón en suelo.	0.75 m	6.4±0.4 kBq/m ³ – 27.5±0.8 kBq/m ³ en el NRWMC y 10.2±0.5kBq/m ³ – 23±0.7kBq/m ³ en Dunkonah.	Mediciones de radón son mejores que mediciones de uranio para localizar fallas.	Asumadu-Sakyi <i>et al.</i> , (2011).
Zona urbana, Mexicali, B.C., México.	Búsqueda de la traza de la falla Michoacán.	Concentración de radón en suelo.	1 m	10.5 pCi/L – 735 pCi/L	Perfiles transversales a traza de falla Michoacán.	Contreras-Corvera y Lázaro-Mancilla (2014).
Instituto Tecnológico de Mexicali. B. C. México.	Búsqueda de la traza de falla geológica.	Concentración de radón en suelo.	1 m	17±6.14 pCi/L – 170±63.9 pCi/L	Perfiles de georadar y sísmica de reflexión.	Lázaro-Mancilla <i>et al.</i> , (2014).
Morelia, Michoacán, México.	Fallas La Paloma, La Colina y Central Camionera.	Concentración de gas radón en suelo.	1 m	68.45 Bq/m ³ – 20.17kBq/m ³	Anomalías en fallas La Paloma, La Colina y Central Camionera.	Este estudio.

LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio está localizada en la zona urbana de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México, en la zona irregular delimitada por el libramiento que circunda la ciudad (Figuras 1 y 2). La adquisición de datos se realizó en sitios urbanizados y pavimentados con estaciones espaciadas de manera irregular, pero en lo general siguiendo perfiles transversales a las fallas Central Camionera, La Colina y en otros sitios en donde afloran las fallas El Realito, Chapultepec y la Paloma (Figuras 2 y 3).

Geología regional y local de la ciudad de Morelia

La ciudad de Morelia se ubica dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) (Figura 1). La ciudad cubre parte de la Sierra de Mil Cumbres (SMC), conformada por una serie de rocas volcánicas similares en composición a las de la Sierra Madre Occidental (SMO), donde destacan estructuras caldéricas y mesas de ignimbritas. La diferencia entre SMO y la SMC es la edad y la composición litológica de las mesas de ignimbritas, en el primer caso se ubica en el límite Oligoceno-Mioceno temprano (21 Ma; Pasquaré *et al.*, 1991) y en el segundo caso en el Mioceno (16.8 a 16.3 Ma; Ferrari *et al.*, 1994; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Al SE de la ciudad de Morelia se puede reconocer una morfología típica de la SMO, con estructuras

caldéricas (Atécuaro y La Escalera), y mesas de ignimbritas basculadas hacia el norte y hacia el sur.

Tres sistemas regionales de fallas afectan la parte central del CVTM (Figura 1b); el más antiguo, de dirección NW-SE a N-S; el segundo formado por fallas de dirección NE-SW y el tercero por fallas E-W del sistema de fallas Morelia-Acambay (SFMA) (Garduño-Monroy *et al.*, 2009a). Estos tres sistemas están expuestos en las zonas cercanas a Morelia (Figura 1b). La SMC es un *horst* delimitado en rojo en la Figura 1 que separa hacia el norte las depresiones lacustres del CVTM, y hacia el sur la depresión de Tierra Caliente (Ávila-Olivera, 2008, Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). En ambos casos, la deformación que se observa es generada por las fallas lítricas con planos inclinados hacia el sur y hacia el norte. El basculamiento que se genera va de 20° a 30° en el límite sur del Lago de Cuitzeo, mientras que en el área de Morelia es entre 5° y 10° hacia el sur. Respecto al fracturamiento regional, se reconocen con claridad los fallamientos NE-SW y E-W, ambos conformando la morfología del valle de la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2009a).

La estratigrafía en la zona de la ciudad de Morelia (Figura 3) fue descrita por Garduño-Monroy *et al.* (2001) y por Ávila-Olivera (2008) y está constituida por las siguientes unidades que se describen de la base a la cima: (1) el complejo andesítico de Mil Cumbres del Mioceno (19.62 ± 0.27 Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en andesita, Macías *et al.*, 2008), (2) secuen-

cia de flujos piroclásticos del Mioceno (cantera de Morelia) de edad 17.70 ± 0.5 Ma (K-Ar, Pasquarè *et al.*, 1991), (3) complejo volcánico del Punhuato (Mioceno), (4) secuencia fluviolacustre Cuitzeo-Morelia del Mioceno-Plioceno, (5) vulcanismo del Corredor Tarasco del Cuaternario, y (6) paleosuelos y tepetates.

Respecto a la geología estructural, Garduño-Monroy *et al.* (2001) estudiaron las fallas de Morelia realizando una división de las mismas en dos principales grupos: a) estructuras que son paralelas a los sistemas de fallas regionales NE-SW y se desplazan continuamente por *creep* o fluencia (Radbruch *et al.*, 1966). Estos procesos de subsidencia sólo se presentan en los suelos y en las secuencias fluviolacustres del Mioceno-Pleistoceno que forman el relleno de la cuenca donde se asienta la ciudad. b) Fallas potencialmente sísmicas como aquéllas donde ha ocurrido acumulación de esfuerzos y desplazamientos súbitos durante los últimos 35000 años. En estas últimas se han encontrado evidencias morfológicas y estratigráficas de rupturas durante el Holoceno, y recientemente instrumentales como la relacionada con la crisis sísmica de 2007 (Singh *et al.*, 2012). Estas fallas en algunos lugares, se encuentran ligadas a inestabilidad de taludes.

Paleosismicidad

Los estudios paleosísmicos realizados en las regiones de Pátzcuaro, Morelia y Cuitzeo (Garduño Monroy *et al.*, 2009a), en el estado de Michoacán, así como en Acambay, Valle de Bravo y Pastores (Langridge *et al.*, 2000, 2013; Ortuño *et al.*, 2015) en el Estado de México, han ampliado nuestro conocimiento de la actividad prehistórica de importantes segmentos de fallas pertenecientes al SFMA (Figura 1). Dichos estudios paleosismológicos han permitido constatar una actividad recurrente en fallas cercanas o que cruzan zonas con alta densidad poblacional. De los tres sistemas regionales de fallas mencionados anteriormente que afectan la parte central del CVTM y que están expuestos en la zona Morelia, destacaremos dos segmentos del SFMA que tienen sismicidad potencial y que se describen a continuación.

Segmento Central Camionera de Morelia (CM)

De acuerdo con Garduño-Monroy *et al.* (2009a), el segmento CM está formado por dos subsegmentos de falla normal ENE-WSW, localizados dentro de la ciudad de Morelia (Figura 2), donde el bloque de techo cae hacia el norte conformando escarpes de 20 a 60 m. Uno de ellos está ubicado en la parte norte de la ciudad (los distritos de El

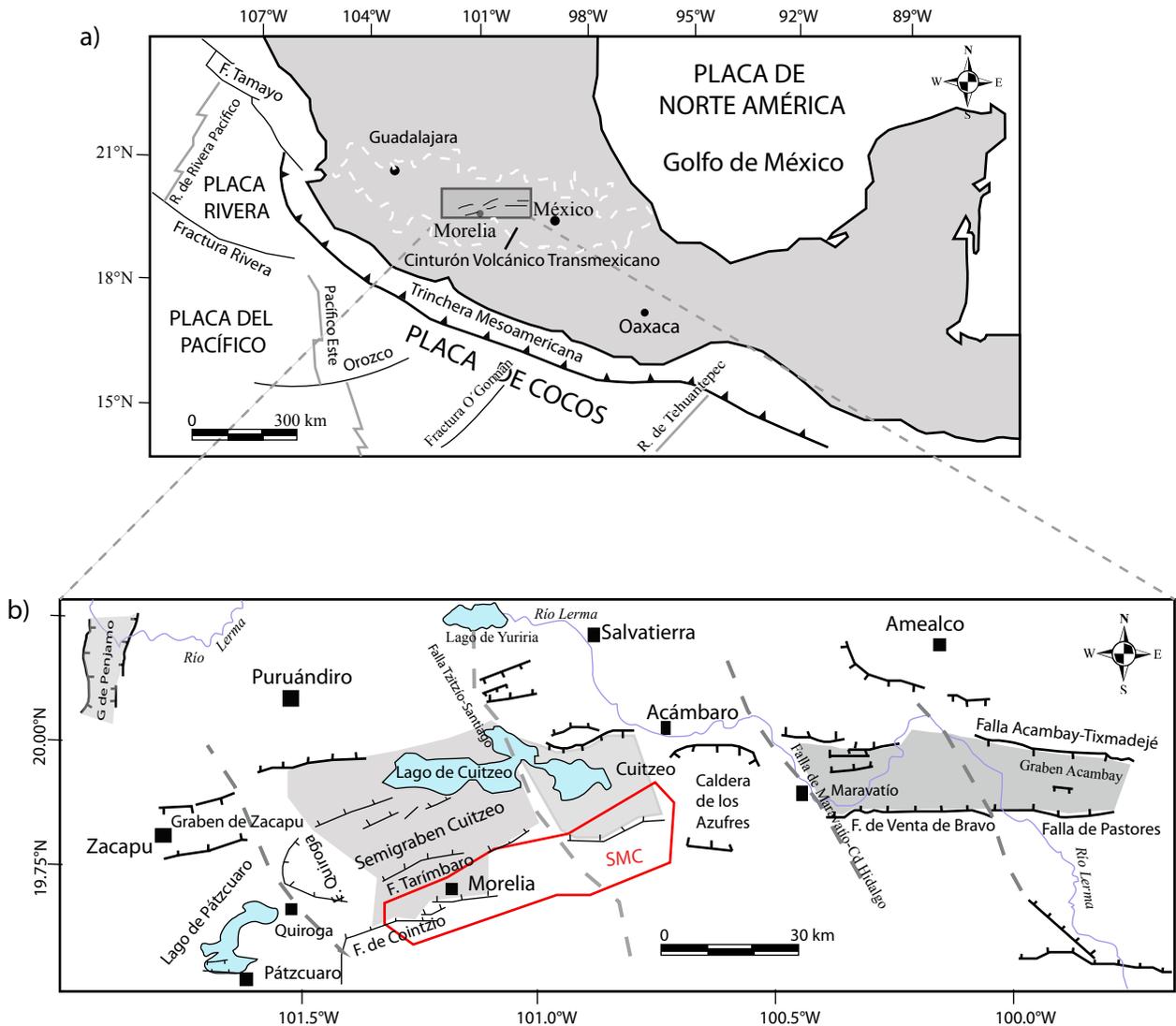


Figura 1. a) Localización del área de estudio dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano. b) El recuadro incluye el sistema de fallas Morelia-Acambay y, dentro del polígono rojo, la localización de la ciudad de Morelia, que colinda al E con la Sierra de Mil Cumbres (SMC).

Realito, Guadalupe y La Colina), y el otro se localiza en el área del centro de la ciudad, al lado de la vieja estación de autobuses. Suponiendo una ruptura total cosísmica de ambos subsegmentos, la longitud de la superficie de ruptura alcanza 5.5 km y el intervalo de la magnitud M_w varía entre 5.8 y 6.5. La tasa de deslizamiento de la falla es 0.12 mm/año y el periodo de recurrencia va de 4.5 a 8 ka (Tabla 2). La subsidencia de superficie ocurre a lo largo de esta falla a una tasa de 4 a 6 cm/año (Garduño-Monroy *et al.*, 1998, 1999), dos órdenes de magnitud más rápido que la tasa de deslizamiento (ver también Suter *et al.*, 2001, siendo la sobreexplotación del agua subterránea uno de los principales motivos de la subsidencia (Garduño-Monroy *et al.*, 2009a).

Segmento La Paloma (LP)

El segmento LP, es el más sobresaliente de la ciudad, por su morfología y por los datos en estudios de paleosismología. Está orientado E-W y separa los valles de Guayangareo o depresión con sedimentación lacustre y la Mesa de La Loma de Santa María y la Sierra de Mil Cumbres (Garduño-Monroy *et al.*, 2009a) (Figura 3). El segmento LP afecta a las ignimbritas del Mioceno, los sedimentos fluvio-lacustres del Plioceno-Pleistoceno y los suelos actuales. En la morfología de la Falla La Paloma la estructura tiene una geometría con un punto de pivote (*tip point*)

hacia el oeste, donde el salto desaparece. Hacia el este la morfología de la falla se expresa con un escarpe de más de 200 m, que sumado al desplazamiento real de la cima de las ignimbritas encontradas en los pozos perforados en el bloque de techo, daría un salto acumulado de más de 300 m. La longitud de la ruptura es de 12 km, y de acuerdo con Garduño-Monroy *et al.* (2009a) la M_w esperada varía entre 6.3 y 6.7 (Tabla 2). Este segmento también presenta diferentes valores de tasa de deslizamiento de falla de acuerdo al periodo, 0.057 mm/año para largo plazo y 0.5 mm/año para corto plazo (Tabla 2). El valor de corto plazo es un orden mayor que el valor de largo plazo. Por lo tanto, el periodo de recurrencia para largo plazo (del Plioceno a la actualidad) varía entre 10 y 20 ka, mientras que para el corto plazo (Holoceno) este intervalo es 1.2 a 2.5 ka para el mismo tamaño de magnitud de sismo esperado ($6.3 < M_w < 6.7$) (Garduño-Monroy *et al.*, 2009a).

Sismicidad regional y local

En el sistema de fallas Morelia-Acambay (SFMA) (Figura 4) (Suter *et al.*, 1991, 1995, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009b) ocurrió el sismo de Acambay el 19 Noviembre de 1912 con magnitud $M_s = 6.7$ (Suter *et al.*, 1996) y es el único sismo registrado en el CVTM con una ruptura en superficie (Ortuño *et al.*, 2015). Durante este sismo, al menos tres fallas

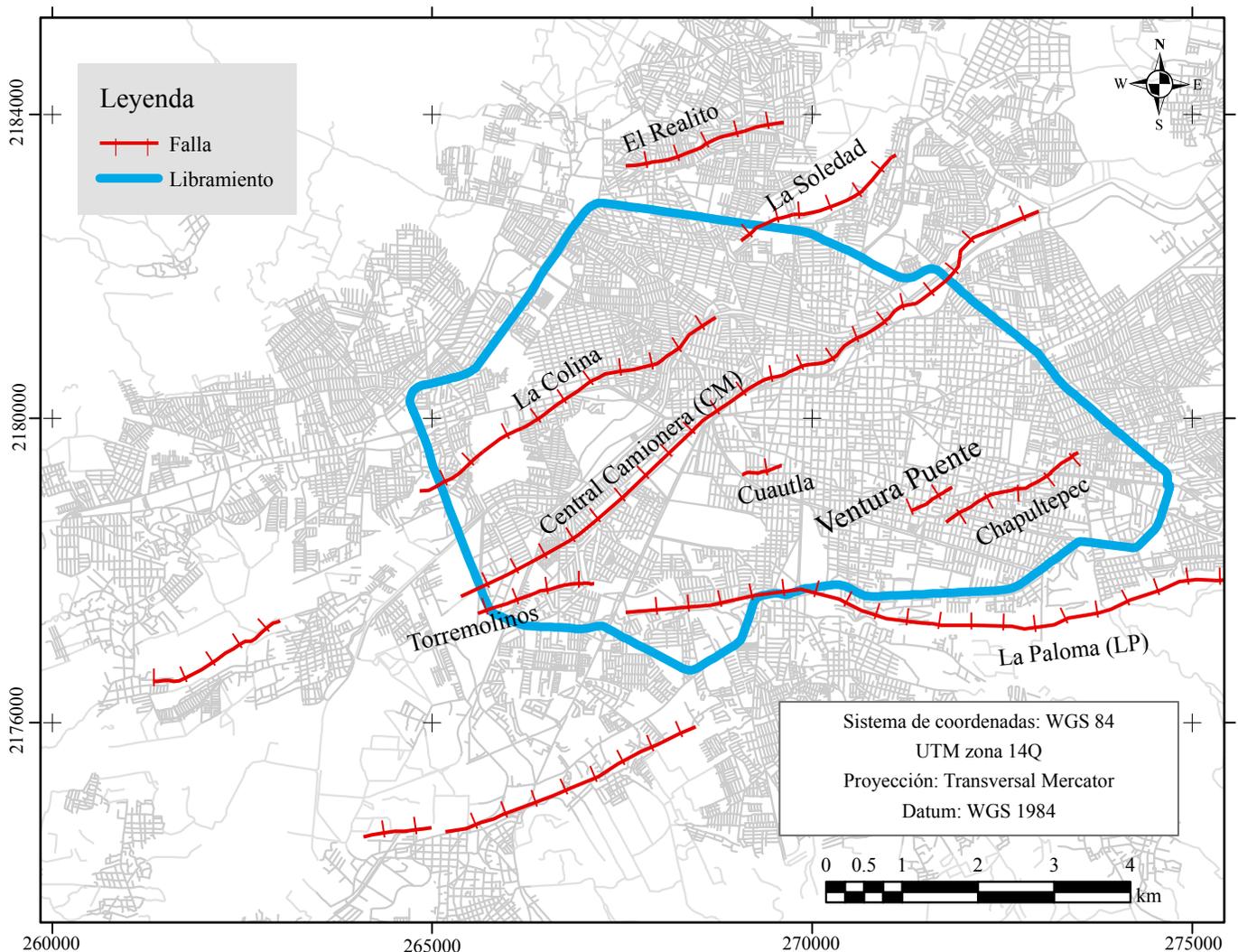


Figura 2. Plano de la ciudad de Morelia donde se muestran las fallas geológicas ligadas a fenómenos de fluencia: Central Camionera (CM), Chapultepec, Torremolino y las potencialmente sísmicas: La Paloma (LP) y La Colina (tomado de Ávila-Olivera, 2008).

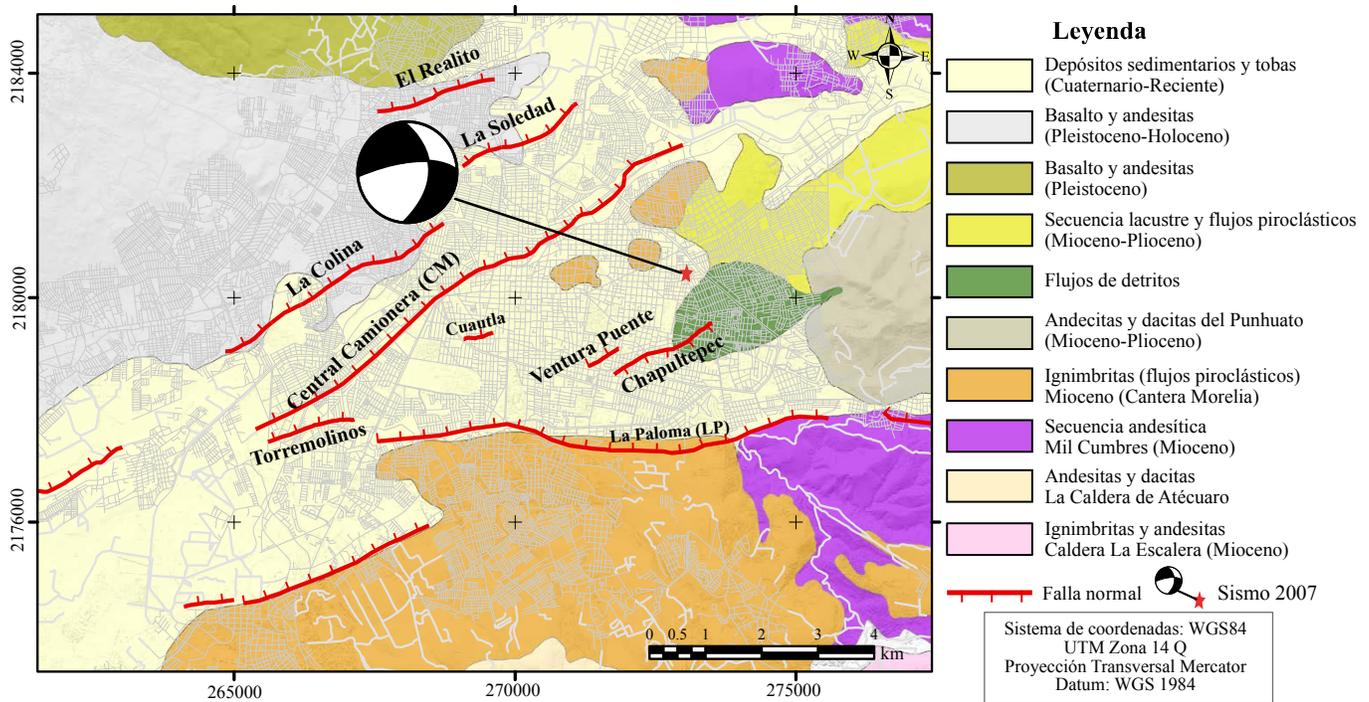


Figura 3. Mapa geológico, fallas y columna estratigráfica de la ciudad de Morelia (modificado de Ávila-Olivera *et al.*, 2010). Se muestra la localización y mecanismo focal de la secuencia de siete sismos de octubre de 2007.

mostraron ruptura en superficie (Urbina y Camacho, 1913), la falla de Acambay-Tixmadejé (con un desplazamiento máximo de 50 cm), la falla de Temascalcingo (con un desplazamiento máximo de 30 cm) y la falla Pastores entre 20 y 50 cm (Ortuño *et al.*, 2015). Posteriormente, otro sismo en 1979 causó daños importantes en Maravatío; este sismo tuvo una profundidad de 8.2 km y una magnitud de 5.3 Mb (Astiz-Delgado, 1980).

En 2007, en la ciudad de Morelia, ocurrió una secuencia de siete sismos ($2.5 < M_w < 3.0$) con mecanismos focales correspondiente a un fallamiento normal con componentes lateral izquierda (Figura 3). Esta serie de temblores ocurrieron en un intervalo de 33 horas en el mes de octubre y fueron registrados por la estación local permanente de banda ancha MOIG del Servicio Sismológico Nacional que está ubicada en el Campus Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México. También, cuatro de los siete eventos fueron registrados por la estación

acelerográfica STAM operada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Singh *et al.*, 2012). Los epicentros se localizaron cerca del punto de coordenadas (19.706°N, 101.163°W) que está en línea recta, a una distancia de 1.91 km de la intersección del Periférico Revolución y la traza de la falla Central Camionera (Singh *et al.*, 2012). La profundidad de los eventos (11.4 km) parece indicar que no hay relación con el abatimiento del nivel freático del acuífero. La longitud de esta falla (8 km), sugiere que puede producir un sismo de magnitud >3 y aceleraciones de 1–2 gales. Esta actividad sísmica corrobora que los segmentos E-W del SFMA están sujetos a un campo de esfuerzos extensional regional del CVTM, y que pueden ser reactivados en el futuro. Si el campo de esfuerzos regional activa un segmento mayor (e.g., falla La Paloma) puede ocurrir un sismo de magnitud de momento entre $6 \leq M_w \leq 7$ (Suter, 2016), causando severos daños a la zona urbana de Morelia, como en el sismo de 1858 (Singh *et al.*, 1996).

Tabla 2. Magnitud esperada para segmentos del sistema de fallas Morelia-Acambay a partir de ecuaciones empíricas por Wells y Copersmith (1994) y Stirling *et al.*, (2002). Extracto de Garduño-Monroy *et al.*, (2009a).

Nombre del segmento	Rumbo	LSR (km)	Edad (ka)	V (m)	Tasa de deslizamiento (mm/año)	Mw (WC94)	Mw (St02)	Tipo de registro	PR* (ka)
Central Morelia	ENE-WSW	5.5	500	60	0.120	5.8	6.2	Instr.	4.5–8
							6.5	Preinstr.	
La Paloma	E-W	12	5300	300	0.057	6.3	6.5	Instr.	10–20
								Preinstr.	
			1.6	0.8	0.500		6.7	**	1.2–2.5

Claves: LSR=Longitud de la superficie de ruptura; V=desplazamiento vertical total; WC94=Wells y Coppersmith (1994); St02=Stirling *et al.* (2002); Instr.=base de datos instrumental; Preinstr.=base de datos preinstrumental; **=Valor a corto plazo; PR= Período de recurrencia para e intervalo de Magnitud Mw a esta tasa de deslizamiento (* Slemmons, 1982).

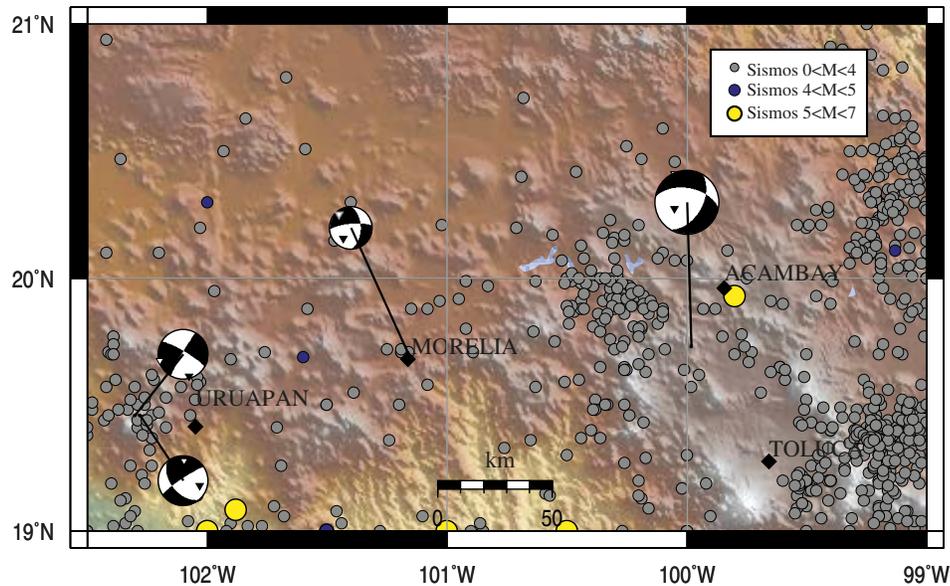


Figura 4. Sismicidad reportada por el Servicio Sismológico Nacional en la zona del SFMA y mecanismos focales reportados por Astiz-Delgado (1980), Pacheco *et al.* (1999) y Singh *et al.* (2012).

METODOLOGÍA

Mediciones de ^{222}Rn

Las mediciones de concentración de gas radón se hicieron utilizando el detector electrónico RAD7 (Durridge Company, Inc.) que permite monitorear de forma continua las concentraciones en suelo, convirtiendo la radiación alfa en señal eléctrica. Para efectuar las mediciones de concentración del gas ^{222}Rn en suelo, en un modelo de terreno obtenido de un modelo Lidar con resolución de 5 m, se elaboró un mapa de estructuras y de unidades geológicas. Las primeras fueron cartografiadas siguiendo los rompimientos de pendientes, que fueron modelados por el movimiento normal de las fallas sinsedimentarias, donde el bloque de techo al descender genera depresiones lacustres que en la cartografía ponen el contraste litológicos entre rocas competentes (ignimbritas o andesitas) con unidades terrígenas (suelos y lacustres). La cartografía de cada estructura fue hecha con base en su morfología y detallada a través de los daños que actualmente están ocasionando estas estructuras por la subsidencia. Para corroborar esta cartografía, se usó la información de la geología del subsuelo acompañada de un levantamiento gravimétrico detallado.

La adquisición de datos de gas radón, consistió en purgar el equipo al aire libre en la estación de medición, para limpiar la cámara donde ingresa el gas, de manera que el detector no mida el gas residual que se queda después de realizar una medición. Mientras se hace la purga, se hace un agujero hasta una profundidad de 1 m, posteriormente se conecta la sonda al instrumento sin introducirla en el agujero. Enseguida, se toma la medición de “background” (medición de fondo o al aire libre) de tres ciclos de cinco minutos cada uno, con la finalidad de medir la concentración de gas radón en el entorno ambiental. Finalmente, se introduce la sonda en el terreno para iniciar la toma de mediciones. El protocolo que se utilizó en el RAD7 para una medición en cada una de las estaciones consistió en tomar mediciones de 11 ciclos de cinco minutos cada uno, previa purga de 10 minutos del aparato antes de la toma de “background” y de las mediciones en suelo. Las unidades de medición fueron Bq/m^3 . Respecto a la temperatura se tuvo el cuidado de no superar los $35\text{ }^\circ\text{C}$ para evitar la inestabilidad en la electrónica del RAD7, precaución importante para la buena operación del instrumento.

Análisis geostatístico de las concentraciones de gas radón

Con el objetivo de conocer la variabilidad espacial, la anisotropía y las zonas de influencia de las concentraciones de gas radón, se sujetaron a un análisis geostatístico que consistió en dos etapas: (1) análisis exploratorio de los datos, basado en las técnicas estadísticas convencionales que permiten describir la muestra bajo estudio, y (2) análisis estructural o variográfico, que es el proceso de estimación y modelación de la función matemática que representa adecuadamente los valores estimados del variograma. Los variogramas nos permiten

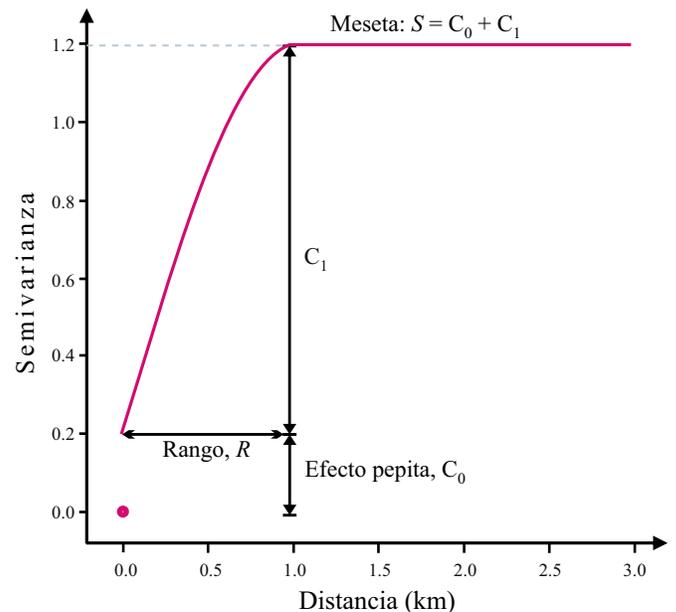


Figura 5. Elementos de un variograma. La meseta (S) es la semivarianza máxima y representa la variabilidad en ausencia de dependencia espacial. El rango (R) representa la zona de influencia de una variable; es decir, hasta esa distancia los puntos están relacionados espacialmente. El efecto pepita (C_0), que es la semivarianza cuando la distancia tiende a cero, puede representar errores de medición, ruido o variabilidad espacial menores que el intervalo de muestreo.

determinar y visualizar el rango y fuerza de la dependencia espacial de la variable bajo estudio (Journal y Huijbregts, 1978). Matemáticamente, el variograma (γ) representa la semivarianza de los datos como una función de la distancia h que separa un par de datos:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1),$$

donde $N(h)$ son los pares de puntos separados por el vector h y $Z(x_i)$ representa a las concentraciones de gas radón definidas en un punto en el espacio x_i . Los elementos de un variograma (Figura 5) son: "Sill" o meseta (S), que es la semivarianza máxima y representa la variabilidad en ausencia de dependencia espacial; "Range" o rango (R), representa la zona de influencia de un dato, es decir hasta dicha distancia los puntos están relacionados espacialmente; y el "Nugget" o efecto pepita (C_0), que es igual a la semivarianza cuando la distancia tiende a cero, puede representar errores de medición, ruido o variabilidad espacial menor que el intervalo de muestreo.

Un variograma es anisotrópico cuando exhibe un comportamiento que varía con la dirección. En la práctica, los variogramas se estudian en diferentes direcciones para determinar la presencia o ausencia de anisotropía. Existen diferentes tipos de anisotropías identificadas en geoestadística. Primero, la anisotropía geométrica se produce cuando el rango es el mismo, pero no la meseta, para diferentes direcciones. En presencia de anisotropía geométrica, la gráfica de los rangos direccionales, en dos dimensiones, forma una elipse, donde los ejes mayor y menor de la elipse corresponden a los rangos mayor y menor de los variogramas direccionales. Segundo, la anisotropía zonal existe cuando la meseta del variograma cambia con la dirección, pero no el rango. Por último, la anisotropía híbrida, cuando ambas anisotropías geométrica y zonal están presentes (Figura 6; Armstrong, 1998).

Tomando en cuenta lo anterior, el procedimiento a seguir fue: (1) El análisis exploratorio de los datos, consistente en la descripción de los histogramas, los diagramas de caja o "boxplot" y las gráficas cuantil-cuantil o "Q-Q plots". (2) Construcción del mapa variograma para

probar la existencia de anisotropía y de los variogramas direccionales experimentales para poder encontrar la dirección de anisotropía principal. (3) El modelado del variograma en las direcciones de máxima y mínima continuidad. El proceso de modelado de un variograma se logra al encontrar la función matemática y los parámetros del variograma (rango, meseta y efecto pepita) que mejor ajustan al variograma experimental. Todos los resultados presentados se han realizado en los entornos de trabajo estadísticos de acceso libre R (R Development Core Team, 2012) y SGeMS (Remy, 2004). Finalmente, (4) el cálculo del umbral línea base - anomalía en el "Q-Q plot" mediante el método de García-Cabrejo y Moreno-Sánchez (2006). Este método se basa en la identificación visual de quiebres o cambios de pendiente en las gráficas cuantil-cuantil. Los cambios de pendiente representan un valor umbral que indica los valores anómalos que no se ajustan a la distribución global; es decir, se alejan de la línea base. La línea base se define como el promedio de la variable analizada.

Mapa de gas radón

Se utilizó la técnica de interpolación de vecino natural para visualizar las zonas de mayor concentración de gas radón. El algoritmo utilizado por la herramienta de interpolación de vecino natural halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981). Sus propiedades básicas son que es local, utiliza sólo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estarán dentro del rango de las muestras utilizadas.

Perfiles de gas radón

Con los datos de ^{222}Rn se trazaron perfiles de concentración caracterizados por la posición de estaciones a lo largo de líneas donde la geología del subsuelo es conocida con la finalidad de ver la asociación con las rocas, fallas, grietas o fracturas.

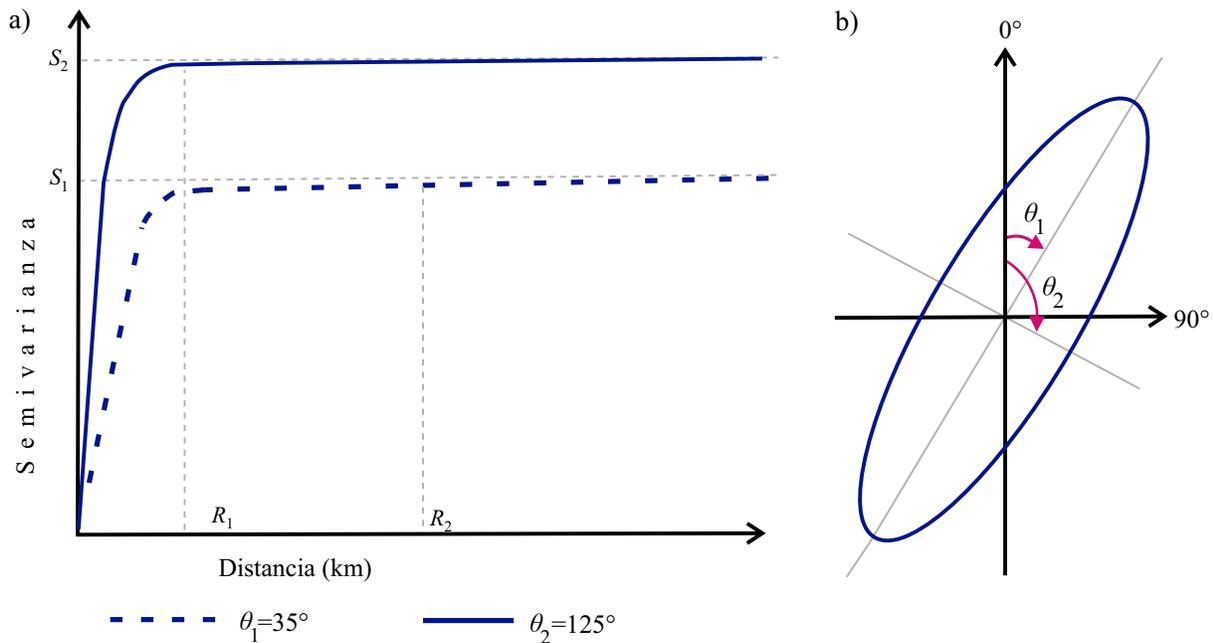


Figura 6. Ejemplo teórico de anisotropía híbrida. a) Suponiendo que en la dirección $\theta_1=35^\circ$, el modelo matemático (línea punteada azul) que mejor ajusta al variograma es una función exponencial con rango R_2 y meseta S_1 , y en la dirección $\theta_2=125^\circ$, el modelo ajustado (línea continua azul) al variograma tiene rango R_1 y meseta S_2 . Como $R_2 > R_1$ (anisotropía geométrica) y $S_2 > S_1$ (anisotropía zonal), los variogramas de este ejemplo presentan una anisotropía híbrida. b) Gráfica de la anisotropía geométrica, donde los ejes mayor y menor de la elipse corresponden a los rangos mayor (R_2) y menor (R_1) de los variogramas direccionales del gráfico a). El rango mayor (R_2) de este ejemplo teórico, se corresponde con la dirección de máxima anisotropía ($\theta_1=35^\circ$).

Tabla 3. Concentraciones de gas ^{222}Rn en la zona urbana de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Los encabezados son: el número de la estación, las lecturas medias, máximas (Máx.), mínimas (Mín) y la desviación estándar (D.S.) de ^{222}Rn en Bq/m³, además de las coordenadas UTM, la altitud en metros, el lugar y la fecha. VMHM: Sitios de máxima subsidencia reportados por Hernández-Madrigal *et al.* (2011).

Estación	Media ^{222}Rn (Bq/m ³)	Máx. ^{222}Rn (Bq/m ³)	Mín. ^{222}Rn (Bq/m ³)	D.S. ^{222}Rn (Bq/m ³)	Coord. X UTM	Coord. Y UTM	Altitud (m s.n.m.)	Lugar	Fecha
1	865.8	1124.8	551.3	197.95	269864	2176654	2013	Kondemba 89	14-oct-16
2	4366	5735	688.2	1409.7	270641	2177172	2039	Cemigeo	17-oct-16
3	7141	8806	1180.3	1838.9	269309	2180399	1900	Oxxo Héroes de Nocupétaro	18-oct-16
4	9879	11877	2893.4	2138.6	269224	2180719	1894	Vivienda N. Héroes de Nocupétaro	18-oct-16
5	4662	5809	817.7	1191.4	269455	2180115	1911	Av. Madero cerca Cuautla	18-oct-16
6	3996	5217	1013.8	965.7	269925	2177612	1958	Escaleras arriba cenadores	19-oct-16
7	2342.1	3015.5	421.8	603.1	269940	2177662	1947	Escaleras en medio cenadores	19-oct-16
8	4773	5735	902.8	1158.1	269969.37	2177726.71	1932	Cenadores	21-oct-16
9	166.13	273.06	34.04	81.4	269357.63	2179181	1899	Falla Cuautla. Línea N-S Geología del Subsuelo	26-oct-16
10	473.6	751.1	273.06	147.26	272568	2178913	1916	Falla Chapultepec. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	29-nov-16
11	68.45	477.3	1.7	130.24	272441.65	2178904.86	1916	Falla Chapultepec	29-nov-16
12	6586	7955	1439.3	1594.7	272530.41	2178594.64	1914	Parque Lineal Av. García de León y Batallón Matamoros	30-nov-16
13	7511	9028	1354.2	1905.5	272432.47	2178154.66	1915	Solidaridad y Ceballos	01-dic-16
14	3942.72	4958	825.1	826.58	272547	2179381	1925	Oxxo Acueducto	01-dic-16
15	984.2	1587.3	204.98	296.37	265235.05	2178915.51	1893	Chevrolet La Colina	17-dic-16
16	662.3	1098.9	307.47	182.41	265232.91	2178892.7	1893	Chevrolet La Colina (Falla).	18-dic-16
17	6771	7992	1424.5	1750.1	268815.82	2178405.26	1909	UMSNH Prado	19-dic-16
18	836.2	1128.5	543.9	147.63	271895.77	2181830.37	1896	Vía tren choque	26-dic-16
19	2349.5	4662	1572.5	862.1	273150.99	2180341.84	1933	Jardín Niños Curtidores Teremendo	27-dic-16
20	4181	4995	821.4	1206.2	274425.06	2179474.59	1972	Paseo de la Republica (Home Depot)	27-dic-16
21	601.25	784.4	410.7	385.54	275626.62	2178722.12	2006	Camellón frente Fraccionamiento	28-dic-16
22	3130.2	3922	1058.2	758.5	274367.83	2177947.96	1934	Secundaria Ocolusen	29-dic-16
23	5809	6993	1372.7	1557.7	272348	2180600	1938	Nuevo León 415	29-dic-16
24	278.24	444	135.79	87.32	269211	2183589	1900	Miguel Arriaga y Manuel Romero (Torreón Nuevo)	30-dic-16
25	1350.5	2027.6	407	462.5	269803.04	2183035.81	1892	Real de Plata y Real de Monte (Torreón Nuevo)	30-dic-16
26	3278.2	4070	821.4	913.9	270248.65	2182660.13	1897	Falla La Soledad. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	03-ene-17
27	2131.2	2749.1	666	606.8	267763.2	2180447.83	1906	Glorieta Av. Pedregal	03-ene-17
28	4181	5513	699.3	1343.1	266482.16	2180689.32	1911	Calle 12 y Cerritos	04-ene-17
29	2467.9	3174.6	629	762.2	266666.9	2179918.48	1908	Ley de Empleados Fed. y Ley Comisión Balsas	04-ene-17
30	1124.8	1986.9	34.41	647.5	266668	2179693	1903	Adolfo Ruiz y Ley Turismo	04-ene-17
31	4440	5661	1483.7	1098.9	267060.23	2177632.73	1893	Insurgentes Oaxaqueños	05-ene-17
32	6438	8769	1017.5	2046.1	266736.61	2178846.01	1893	Vía del Tren Siervo de la Nación	05-ene-17
33	4366	5476	662.3	1461.5	267609	2175938	1918	San José del Cerrito	05-ene-17
34	5698	7215	1069.3	1783.4	269786	2177829	1913	Aguilita (Camelinas)	28-ene-17
35	2401.3	3226.4	510.6	788.1	269799.41	2180579.48	1897	Central Camionera vieja. INEGI	01-feb-17
36	9694	12247	1861.1	2819.4	268968	2177632	1910	Valle Quieto Rincón Quieto	01-feb-17
37	1758.98	2305.1	345.21	577.94	272416.77	2177498.52	1931	Marita e Ignacio Chávez	02-feb-17
38	1110	1613.2	34.78	469.9	272056.09	2176656.26	2075	Capulín y José Ma. Morelos Altozano	02-feb-17
39	954.6	1180.3	799.2	130.61	266395.35	2179692.91	1897	Estación 6. Línea W-S	21-feb-17
40	10064	12247	2012.8	2911.9	265811.45	2179174.77	1890	UNLA	21-feb-17
41	2335.07	2930.4	758.5	648.98	265589	2178731	1890	Manantiales. Punto 30 hundimiento Garita en Construcción	22-feb-17
42	843.6	1258	312.28	290.82	265438.71	2179037.94	1896	Manantiales de Quinceo y Sinduro	22-feb-17
43	1350.5	1875.9	136.53	488.4	273957	2177649	1931	Falla La Paloma. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	15-mar-17
44	4366	13061	34.41	5180	268809	2177579	1912	Fraccionamiento Fresnos	15-mar-17
45	20017	24420	4292	6216	272844	2177592	1907	Secretaría del Medio Ambiente	20-mar-17

continua

Tabla 3 (continuación). Concentraciones de gas ^{222}Rn en la zona urbana de la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Los encabezados son: el número de la estación, las lecturas medias, máximas (Máx.), mínimas (Min) y la desviación estándar (D.S.) de ^{222}Rn en Bq/m^3 , además de las coordenadas UTM, la altitud en metros, el lugar y la fecha. VMHM: Sitios de máxima subsidencia reportados por Hernández-Madriral *et al.* (2011).

Estación	Media ^{222}Rn (Bq/m^3)	Máx. ^{222}Rn (Bq/m^3)	Mín. ^{222}Rn (Bq/m^3)	D.S. ^{222}Rn (Bq/m^3)	Coord. X UTM	Coord. Y UTM	Altitud (m s.n.m.)	Lugar	Fecha
46	13653	16317	4181	3677.8	268213	2177516	1905	Escarpe Falla Paloma atrás Office Depot de La Huerta	22-mar-17
47	1387.5	1838.9	447.7	418.1	264477	2180193	1947	Pozo 23 de Marzo	28-mar-17
48	995.3	1450.4	273.06	355.2	264024	2180409	1965	Estación 94. Línea W-S Geología del Subsuelo	28-mar-17
49	2245.9	3640.8	444	1110	268922.92	2176661.46	1954	Fuentes Morelia	28-mar-17
50	1209.9	1554	418.1	395.9	268872.9	2178330.27	1906	CU. Línea N-S/Línea W-S Geología del Subsuelo	29-mar-17
51	9657	11914	1483.7	3174.6	269639.72	2180764.55	1895	CFE Industrial. Punto 39 de VMHM	26-abr-17
52	9176	11618	2334.7	2689.9	266731.36	2180434	1911	La Corona. Punto 33 de VMHM	04-may-17
53	5624	7400	1339.4	1750.1	269208.91	2180520.23	1897	Glorieta Michoacán	04-may-17
54	17242	20165	2930.4	5365	265474.34	2179326.41	1899	Obras Publicas. Punto 31 VMHM	05-may-17
55	3263.4	4588	1228.4	899.1	267650.47	2180815.13	1905	Mercado Pedregal. Punto 26 VMHM	05-may-17
56	3148.7	4070	1073	1394.9	269567.16	2183709.91	1891	Super 10 Carne Mart Punto 36 VMHM	18-may-17
57	6179	7992	2257	2664	268781.96	2183848.52	1895	Estación 102. Línea NW-SE Geología del Subsuelo. Punto 37 VMHM	18-may-17
58	3651.9	5402	1036	1942.5	271215.24	2177691.75	1920	Ventura Puente y Camelinas	24-may-17
59	1417.1	1909.2	239.02	503.2	271453.13	2178401.49	1913	Ventura Puente y Solidaridad Mc. Donalds.	24-may-17
60	1994.3	2841.6	621.6	1994.3	271490.28	2178732.27	1912	Ventura Puente y García de León	24-may-17
61	3626	4921	862.1	1883.3	271251.46	2179431.76	1918	Estación Base Oro Verde	24-may-17
62	2834.2	3570.5	1587.3	895.4	271344.28	2179923.18	1919	Estación SN2. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	24-may-17
63	5550	7918	1535.5	2926.7	269838.2	2178028.55	1912	Puerta Zoológico Juárez	30-may-17
64	5143	7511	1572.5	2497.5	269878.1	2178789.32	1906	Fin Zoológico	30-may-17
65	2845.3	3996	943.5	1413.4	269907.06	2179381.16	1904	Plaza Carrillo	30-may-17
66	12543	16539	5217	5180	270020	2180043	1924	Catedral	30-may-17
67	3037.7	4662	617.9	1713.1	268237	2181247	1890	Estación 23. Línea N-S Geología del Subsuelo	17-jun-17
68	7955	12765	1887	4551	267792	2185455	1956	Estación 93. Línea N-S Geología del Subsuelo	17-jun-17
69	1572.5	2689.9	363.71	954.6	268847	2183489	1903	Falla Realito. Línea N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
70	2874.9	5180	303.03	2116.4	268903	2183268	1910	Solidaridad. Línea N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
71	158.73	227.18	90.28	59.2	268477	2180728	1894	Falla La Colina. Línea N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
72	2904.5	4292	588.3	1624.3	269013.06	2179564.67	1898	Estación 60. Línea N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
73	147.26	315.98	45.14	129.87	268892.85	2177989.63	1903	Estación 38. Línea N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
74	1483.7	2652.9	135.42	1061.9	268811.84	2176241.2	1938	Estación 58. N-S Geología del Subsuelo	18-jun-17
75	2715.8	4736	506.9	1805.6	265100	2180277	1931	Estación SN. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
76	1450.4	1935.1	503.2	651.2	266490	2179427	1898	Estación OKEN. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
77	2449.4	3552	499.5	1413.4	267335	2178612	1907	Falla Central Camionera. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
78	11211	16613	1542.9	7141	269540	2177706	1923	Falla La Paloma. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
79	4773	8362	728.9	3304.1	269693	2176400	1969	Estación 22. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
80	2397.6	3526.1	410.7	1409.7	270633	2174901	2057	Estación 99. Línea W-S Geología del Subsuelo	19-jun-17
81	8029	11544	2819.4	3922	269389	2183257	1893	Estación 108. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	21-jun-17
82	1047.1	1831.5	1.3	777	270484	2182808	1891	Estación 27. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	20-jun-17
83	1676.1	2212.6	543.9	788.1	271598.77	2182041.63	1894	Estación 33. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	20-jun-17
84	765.9	1006.4	181.67	392.2	271482.16	2181211.48	1890	Estación 89. Línea NW-SE.	21-jun-17
85	2719.5	4810	543.9	1772.3	272335	2178650	1914	Estación TELMEX. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	20-jun-17
86	962	1465.2	180.56	558.7	274288.27	2178236.97	1931	Estación 29. Línea NW-SE Geología del Subsuelo	20-jun-17

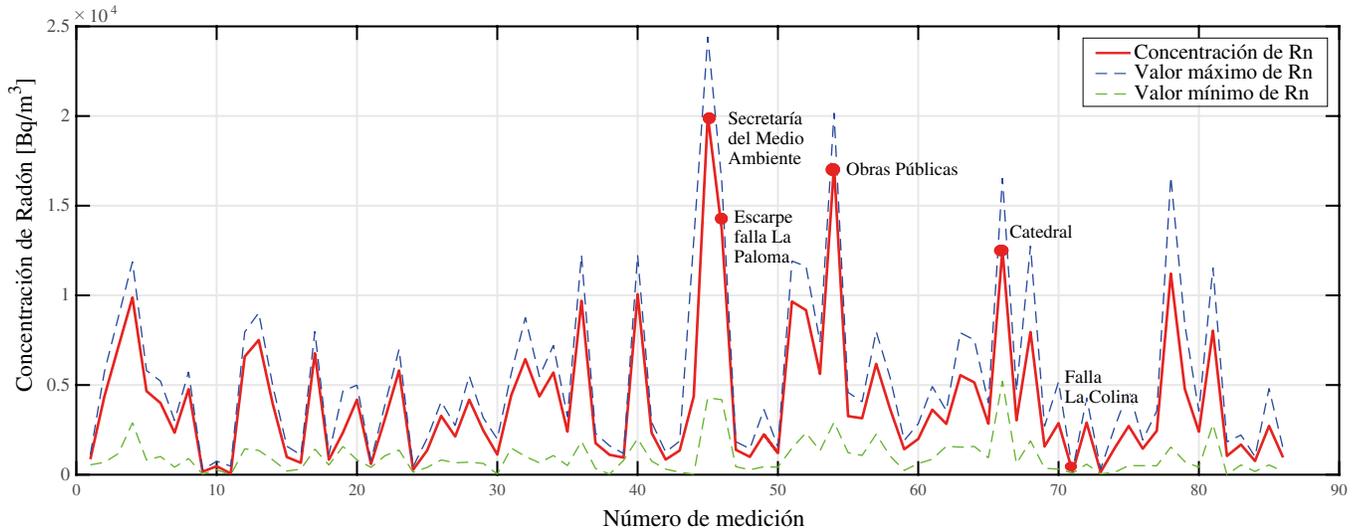


Figura 7. Firmagrama de valores medios, máximos y mínimos de concentraciones de gas ^{222}Rn en la zona urbana de Morelia. Los valores más notorios se asocian a los sitios Secretaría del Medio Ambiente (estación 45), escarpe de la falla La Paloma (estación 46), Obras Públicas (estación 54) y Catedral (estación 66).

Concentración de gas radón en estaciones de subsidencia

En el caso de las variaciones de concentración de gas radón en estaciones donde ha ocurrido subsidencia (Hernández-Madrigal *et al.*, 2011), las mediciones en cada una de ellas se tomaron en dos fechas diferentes, la primera antes del inicio del periodo de lluvias temporales en la ciudad de Morelia y la segunda después del inicio de este periodo.

RESULTADOS

Resultados del análisis geoestadístico

En la Tabla 3 se pueden observar los valores de las concentraciones de gas radón obtenidos durante la toma de datos en la zona urbana de la ciudad de Morelia, Michoacán, durante el periodo comprendido entre el 14 de octubre de 2016 al 20 de junio de 2017. Los valores promedio

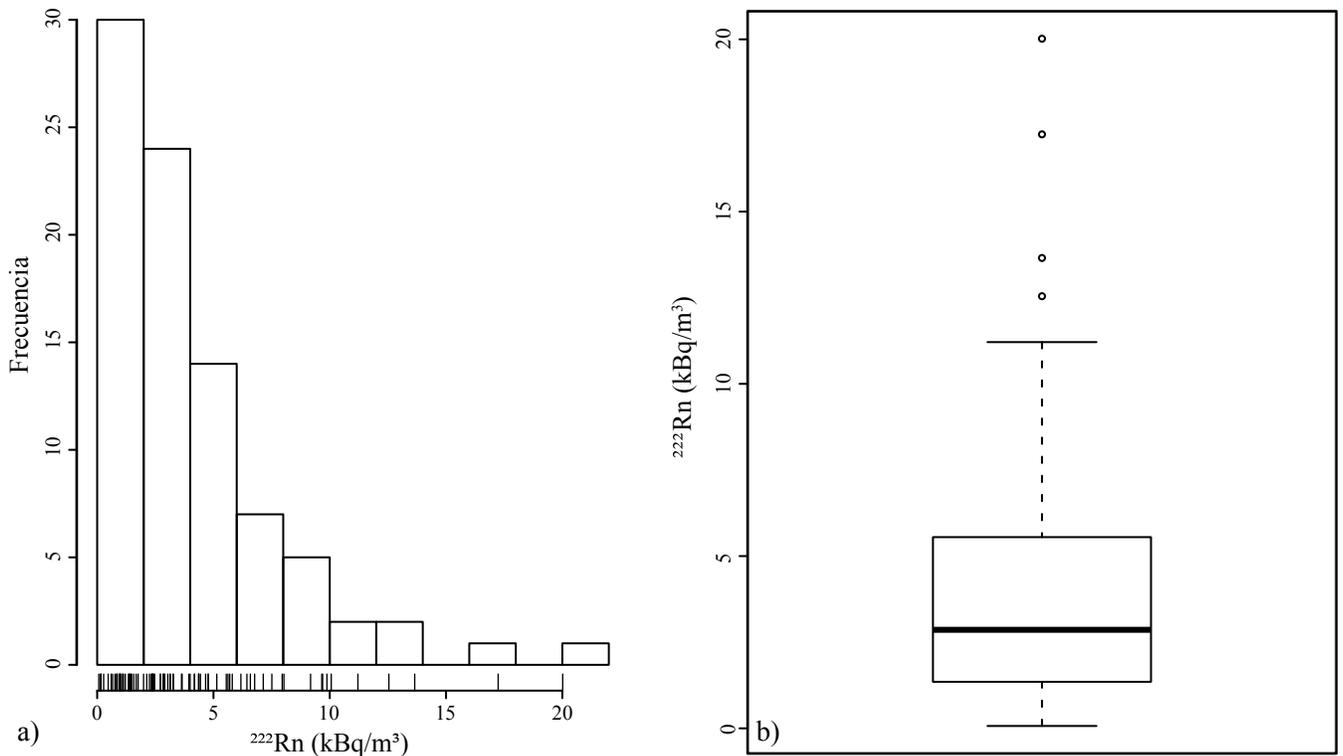


Figura 8. Distribución de las concentraciones de gas radón con sesgo positivo. (a) Histograma de frecuencias de las concentraciones de gas ^{222}Rn en la zona urbana de Morelia. (b) Diagrama de caja o "boxplot" de las concentraciones de gas ^{222}Rn en la zona urbana de Morelia. Como la distribución tiene un sesgo positivo, se necesita una transformación logarítmica para lograr una distribución normal de los datos (ver Figura 9).

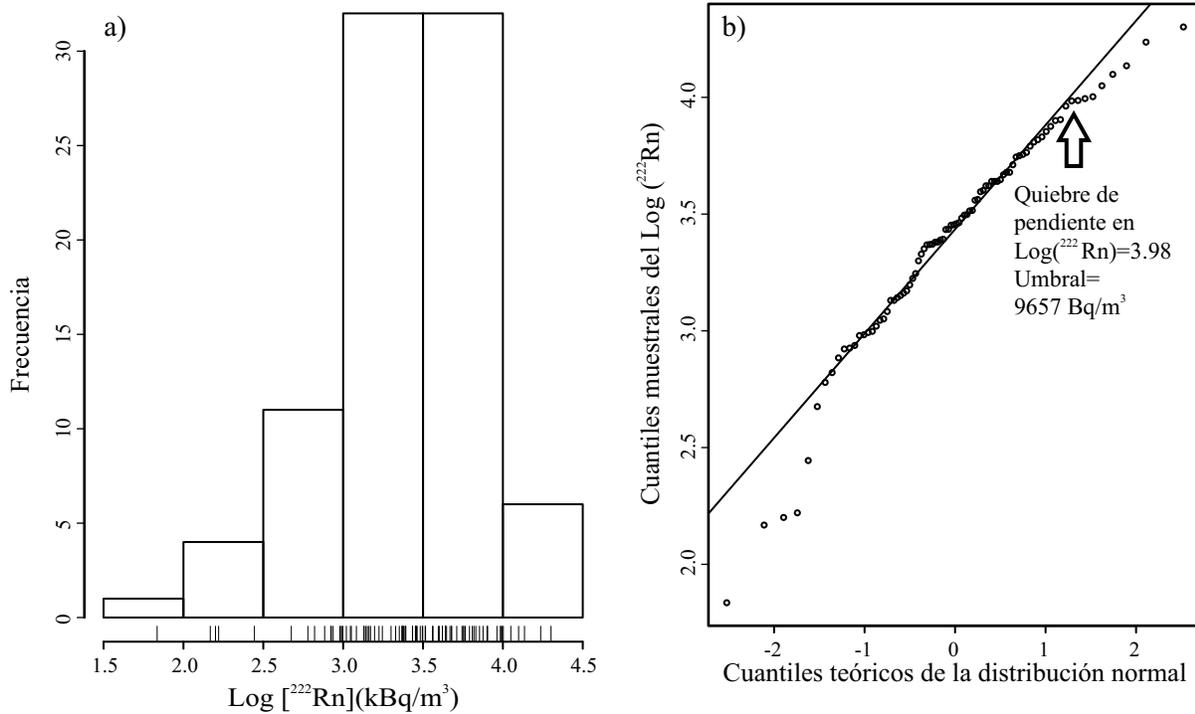


Figura 9. (a) Histograma de la transformación logarítmica de las concentraciones de radón, donde la distribución del logaritmo se distribuye normalmente. (b) Prueba de normalidad para los datos transformados y ubicación del umbral para separar los valores de línea base de los valores anómalos.

obtenidos de la concentración de gas radón en 86 estaciones distribuidas de manera irregular en la zona urbana de la ciudad de Morelia, varían entre 68.45 y 20017 Bq/m³, con una media de 4028.56 Bq/m³, como puede verse en el firmagrama obtenido (Figura 7).

Del análisis exploratorio de las concentraciones de radón se encontró que la distribución tiene un sesgo positivo (Figura 8). Por lo tanto, una transformación logarítmica fue aplicada para lograr una distribución normal de los datos obtenidos en las mediciones (Figura 9). Se definieron los valores medios, los máximos y mínimos de las concentraciones del gas radón con base en los resultados de los histogramas de los datos

obtenidos en las mediciones (Figura 9a), así como en el firmagrama obtenido (Figura 7).

De la Figura 9b se obtuvo el valor logarítmico del umbral igual a 3.98 en el “Q-Q plot” conforme al procedimiento reportado por García-Cabrejo y Moreno-Sánchez (2006). Haciendo una conversión de unidades, el valor umbral es igual a 9657 Bq/m³ y la línea base del ²²²Rn igual a 4028.56 Bq/m³. Por lo tanto, las concentraciones de radón mayores que el valor umbral serán consideradas como valores anómalos.

Los resultados de los variogramas experimentales y de los modelos

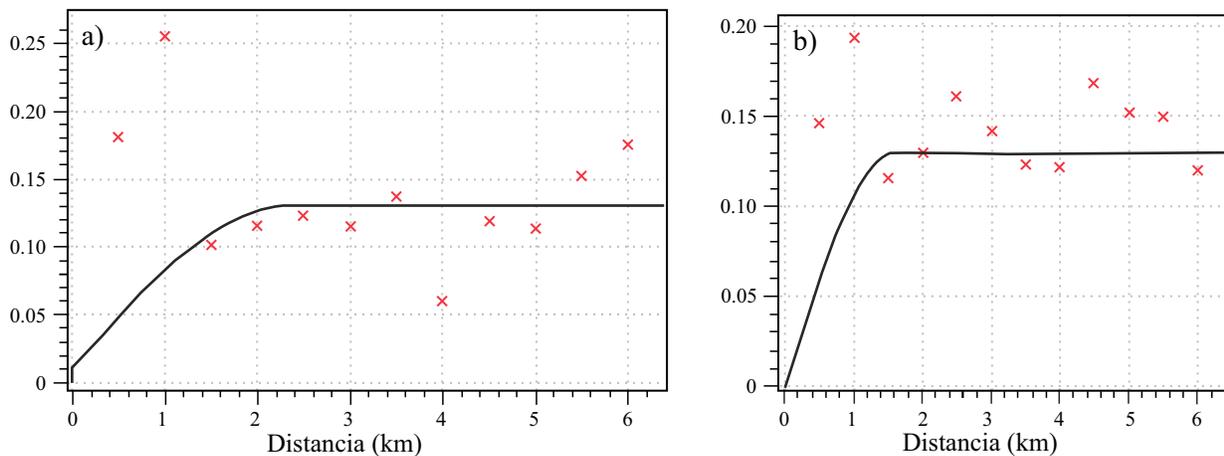


Figura 10. Variogramas direccionales para el Log(²²²Rn) en la zona urbana de Morelia. a) Modelo mejor ajustado (esférico, línea negra) al variograma experimental (cruces rojas) en la dirección N50°E con valores del rango igual a 3540 metros y meseta de 0.155. b) Modelo mejor ajustado (esférico, línea negra) al variograma experimental (cruces rojas) en la dirección N40°W con un rango igual a 1500 metros y una meseta de 0.085. Estos resultados sugieren la existencia de anisotropía híbrida para el Log(²²²Rn) con una dirección anisotrópica en la dirección N50°E en la ciudad de Morelia.

Tabla 4. Parámetros resultantes de los variogramas direccionales. El valor de la meseta es adimensional.

Eje anisotrópico	Modelo	Dirección	Meseta	Rango (m)
Máximo	Esférico	N50° E	0.155	3540
Mínimo	Esférico	N40° W	0.085	1500

ajustados para el ^{222}Rn en Morelia están mostrados en la Figura 10. El modelo mejor ajustado fue el esférico, por lo que existe un comportamiento lineal cerca del origen. Los resultados para la dirección de máxima anisotropía son: (1) el rango es igual a 3540 metros, (2) la meseta es de 0.155 y (3) el efecto pepita es igual a cero, indicando una contribución nula del ruido en los datos. Los parámetros de los variogramas se presentan en la Tabla 4.

Mapa de gas radón (^{222}Rn) de la zona urbana de Morelia

En la Figura 11 se muestra un mapa de las concentraciones del gas radón en la zona urbana de Morelia. Se utilizó la técnica de interpolación de vecino natural para visualizar las zonas de mayor concentración de gas radón, que corresponde a las fallas La Colina y La Paloma como se muestra en el mapa mencionado. En la Figura 11, el umbral que separa la línea base de los valores anómalos corresponde al intervalo [9052-9891] Bq/m³ del vecino natural. Este umbral permite identificar las zonas con concentraciones anómalas de gas ^{222}Rn (colores verde-amarillentos y terrosos) en la zona urbana de la ciudad de Morelia.

Por otro lado y con el fin de relacionar las concentraciones de gas radón con las fallas reportadas por Garduño-Monroy *et al.* (2001), apoyados en la Figura 11 y en los datos de concentraciones de la Tabla 3, ordenamos la información relacionada con las estaciones de las fallas La Paloma, Central Camionera y La Colina, los cuales se muestran en la Tabla 5.

Perfiles de gas ^{222}Rn vs. geología del subsuelo de la zona urbana de Morelia

Ávila-Olivera (2008) elaboró tres perfiles geológicos con orientaciones perpendiculares a las principales fallas urbanas de la ciudad de Morelia. Las Figuras 12 y 13 muestran los tres perfiles de geología del subsuelo del trabajo de Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2008). En este trabajo nos apoyamos en dichos perfiles, para obtener los valores medio, máximo y mínimo medidos de las concentraciones de ^{222}Rn con la finalidad de ver su relación con la geología y las fallas. Los números de estaciones de los perfiles de geología del subsuelo de Ávila-Olivera (2008) se adecuaron a la numeración secuencial de la Tabla 3.

Perfil oeste-sur

En este perfil (Figura 13a), el valor de mayor concentración y anómalo de gas ^{222}Rn corresponde a la estación 78 ubicada en la Falla La Paloma con 11211 Bq/m³, el valor menor de concentración corresponde a la estación 39 ubicada en la Falla La Colina con 954.6 Bq/m³. Mientras que la estación 77 ubicada sobre la Falla Central Camionera resultó con un valor de 2449.4 Bq/m³ y la estación 8 que está sobre la ignimbrita tuvo un valor de 4773 Bq/m³.

Perfil norte-sur

En este perfil (Figura 13b), el valor de mayor concentración de ^{222}Rn corresponde a la estación 68 que tuvo un valor de 7955 Bq/m³, que se encuentra sobre material del vulcanismo del Quinceo y Las Tetillas. La estación 3 o estación Jarritos, que está sobre secuencias lacustres y/o fluvialacustres tuvo un valor de 7141 Bq/m³.

El valor de menor concentración de gas radón corresponde a la estación 71 asociada a la falla La Colina con un valor de 158.73 Bq/m³, el material alrededor de esta falla son secuencias lacustres o fluvialacustres. Otro valor de menor concentración (166.13 Bq/m³) ocurrió en la estación 9 relacionada con la falla Cuautla; esta falla tiene a su alrededor secuencias lacustres y/o fluvialacustres. La estación 69 asociada a la falla el Realito tuvo un valor de 1572.5 Bq/m³; el sitio de esta falla se encuentra sobre materiales del vulcanismo del Quinceo y Las Tetillas. Finalmente, la estación 44 asociada a la falla La Paloma obtuvo un valor de 4366 Bq/m³.

Perfil noroeste-sureste

La estación 81 (Figura 13c), cercana a la falla El Realito, tuvo el mayor valor de concentración en este perfil, 8029 Bq/m³; la estación se encuentra sobre los materiales del vulcanismo del Quinceo y Las Tetillas. La concentración menor de gas radón se obtuvo en la estación 10 cercana a la falla Chapultepec, con un valor de 473.6 Bq/m³, dicha estación se encuentra sobre secuencias lacustres y fluvialacustres. Por otro lado, la estación 26 arrojó un valor de 3278.2 Bq/m³ y también se encuentra sobre secuencias lacustres y/o fluvialacustres cercanas a la falla La Soledad. La estación 84, cercana a la falla Central Camionera, tuvo un valor de 765.9 Bq/m³. Por último, la estación 43 relacionada con la falla La Paloma registró un valor de 1350.5 Bq/m³.

Perfil a detalle de gas radón (^{222}Rn) en la falla La Colina

La Figura 14 incluye un perfil de georadar transversal a la falla La Colina en su extremo NE, en donde se observan los valores de las concentraciones de gas radón y su relación con la zona de ruptura de la falla La Colina. Este perfil nos permite observar que los valores mayores de concentración de gas radón se presentan entre los 20 y 40 metros del perfil, espacio en el cual se observa en el terreno un cambio brusco de 0.5 m, relacionado con una ruptura del mismo en esa parte del perfil. Los valores que se observaron para la estación localizada a 20 m del inicio del perfil fue 5069 Bq/m³, para 25 m 9546 Bq/m³, para 29 m 5957 Bq/m³, para 37.4 m 11618 Bq/m³ y para 42.4 m 7474 Bq/m³. Lo anterior indica que el valor máximo de 11618 Bq/m³ se ubicó a un lado de la traza de la falla y corresponde a un valor anómalo por estar arriba del umbral 9657 Bq/m³.

Variaciones de gas radón (^{222}Rn) en sitios de máxima subsidencia

Por último, tomando en cuenta los sitios con valores de máxima subsidencia reportados por Hernández-Madrigal *et al.* (2011), denotados como VMHM en la Tabla 3 y los datos de mediciones adicionales en estos sitios (Tabla 6), se obtuvo la variación de las mediciones de concentración de gas radón en esos puntos. Las mediciones en cada estación se tomaron en dos fechas diferentes, la primera antes del inicio del periodo de lluvias temporales en la ciudad de Morelia, y la segunda después del inicio de este periodo; estos resultados pueden observarse en la Figura 15.

DISCUSIÓN

Análisis geoestadístico

De los parámetros resultantes de los variogramas direccionales, que se muestran en la Tabla 4, se pueden observar resultados distintos para los rangos y las mesetas, este hecho permite saber que las concentraciones de gas ^{222}Rn en Morelia presentan una anisotropía híbrida, con máxima dirección de anisotropía al N50°E y con un alcance de 3540 metros. La dirección preferencial de las concentraciones del gas radón en Morelia (azimut=N50°E) está optimamente orientado con el campo de esfuerzos actual en la porción central del Cinturón Volcánico

Tabla 5. Valores de concentración de gas radón en estaciones situadas en las fallas La Paloma, Central Camionera y La Colina.

Falla La Paloma		Falla Central Camionera		Falla La Colina	
Estación	²²² Rn (Bq/m ³)	Estación	²²² Rn (Bq/m ³)	Estación	²²² Rn (Bq/m ³)
46	13653	77	2449.4	15	984.2
36	9694	3	7141	42	843.6
78	11211	35	2401.3	39	954.6
45	20017	18	836.2	29	2,467.9
58	3651.9	4	9879	71	158.73
43	1350.5	51	9657	40	10064
22	3130.2			54	17242

Transmexicano ($\sigma_2=NE-SW$ y $\sigma_3=NW-SE$). Lo anterior implica que la anisotropía del radón en la zona urbana de Morelia muestra un alineamiento con la orientación de las fallas activas NE-SW y ENE-WSW identificadas en los alrededores de la ciudad.

Mapa de gas radón

Respecto al mapa de gas radón, puede observarse en la Tabla 5 que cuatro valores anómalos de gas ²²²Rn (encima del umbral 9657 Bq/m³) correspondientes a las estaciones 36, 45, 46 y 78, ocurren en la falla

La Paloma, dos valores asociados a las estaciones 4 y 51 ocurren en falla Central Camionera y dos valores asociados a las estaciones 40 y 54 ocurren en falla La Colina.

Tomando en cuenta lo anterior y graficando sobre la carta geológica del escarpe LP (Figura 16) los valores de gas radón de (1) la estación 58 asociada al sitio denominado Aurrerá, caracterizado por Arreyguez-Rocha et al. (2002), (2) el valor de gas radón de la estación 45 asociada al sitio Secretaría del Medio Ambiente y (3) el valor de gas radón de la estación 22 asociada al sitio Ocolusen, se puede observar que el máximo valor anómalo de gas radón (20,017 Bq/m³) en todo el levantamiento corresponde a la estación 45 (Figura 16), donde existen depósitos de deslizamiento al igual que en la estación 22.

Perfiles asociados a la geología del subsuelo

Respecto a los tres perfiles de gas radón levantados sobre estaciones que cuentan con información de geología del subsuelo (Figura 13), se pudo observar que no todas las trazas de las fallas tienen valores altos de concentración de gas radón, a excepción de los sitios relacionados con la falla La Paloma en los perfiles W-S y N-S. En relación al perfil W-S entre la estación 48 que tuvo un valor de 995.3 Bq/m³ y la estación 75 con valor de 2715.8 Bq/m³, no se cuenta con información de la geología del subsuelo relacionada con la presencia de la ignimbrita o falla geológica alguna. En esa misma figura el valor obtenido en la estación 39 cerca de la falla La Colina es 954.6 Bq/m³, muy por debajo del promedio general y también menor con respecto al obtenido en la

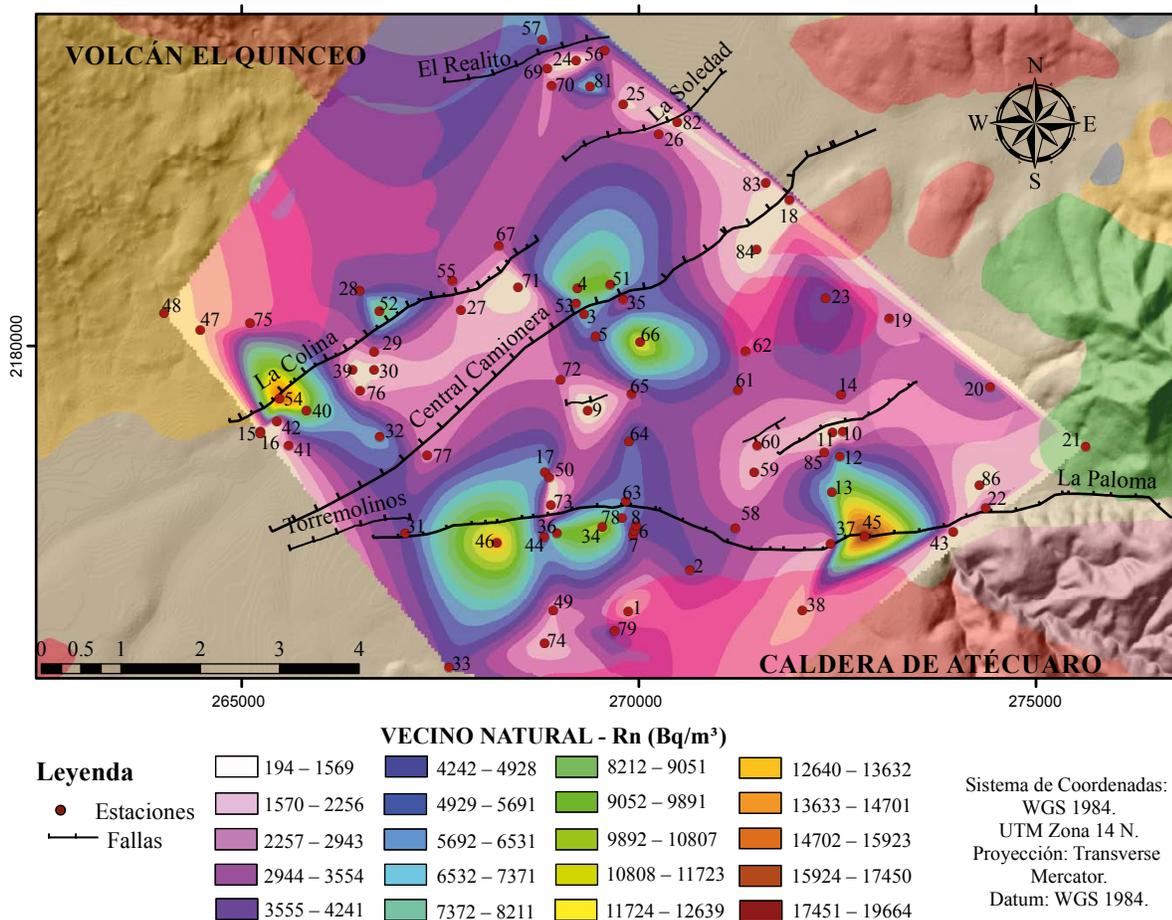


Figura 11. Geología de la ciudad de Morelia y sus alrededores y mapa de la interpolación del gas radón, a partir de los datos promedio del Log(²²²Rn) para cada estación, utilizando la técnica de vecino natural. Los colores terrosos del mapa interpolado indican las concentraciones mayores del gas radón. Los puntos rojos indican la ubicación de las 86 estaciones distribuidas en la ciudad de Morelia y las líneas negras las fallas geológicas.

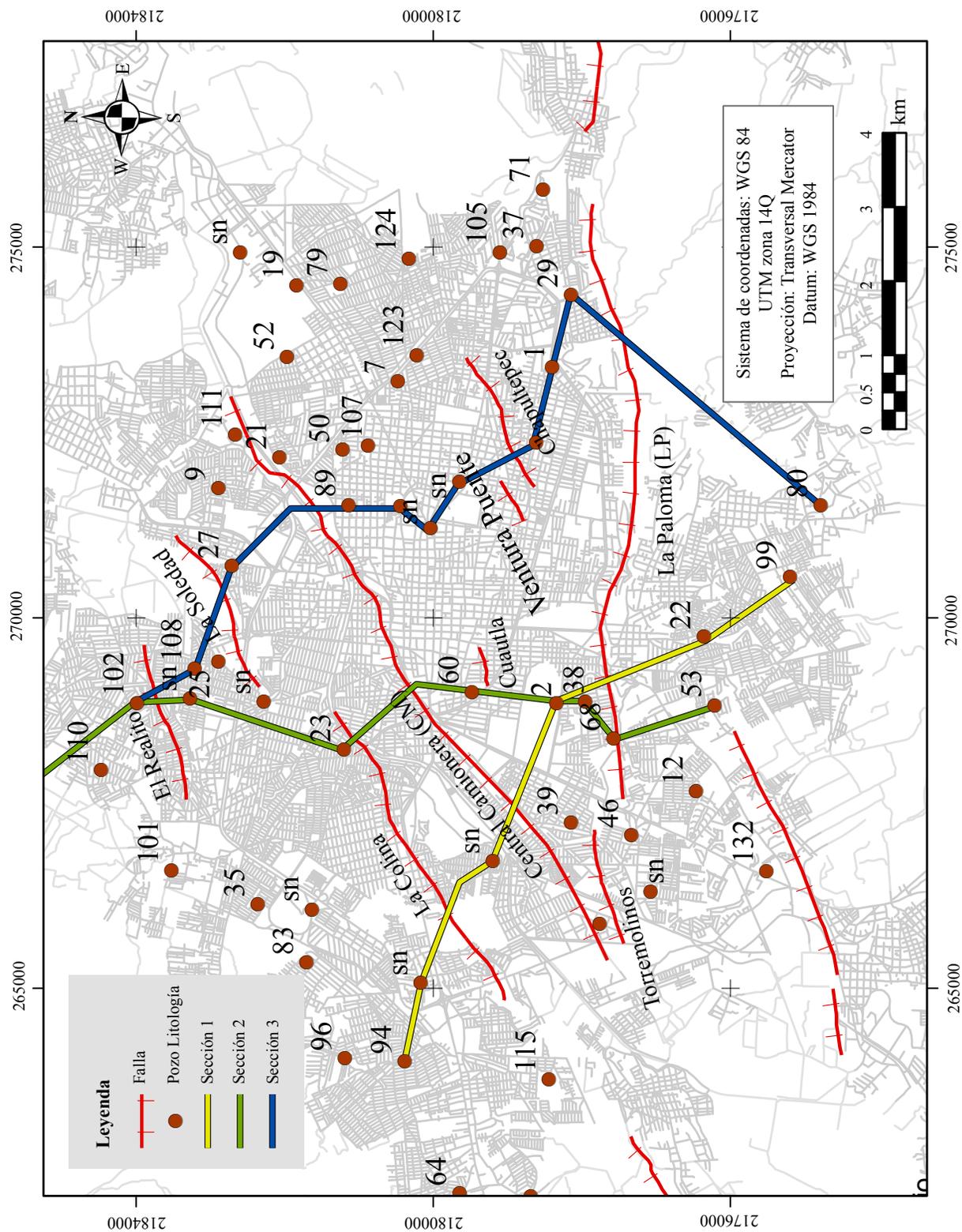


Figura 12. Localización de los perfiles de geología del subsuelo (Sección 1 W-S, Sección 2 N-S, Sección 3 NW-SE) y fallas geológicas de Morelia, Michoacán (modificado de Ávila-Olivera, 2008). Las líneas están asociadas a los perfiles cuyos números corresponden a pozos usados para establecer la geología del subsuelo en el trabajo de Ávila-Olivera (2008) y algunos de esos pozos sirvieron de base para la obtención de mediciones reportadas en el presente trabajo.

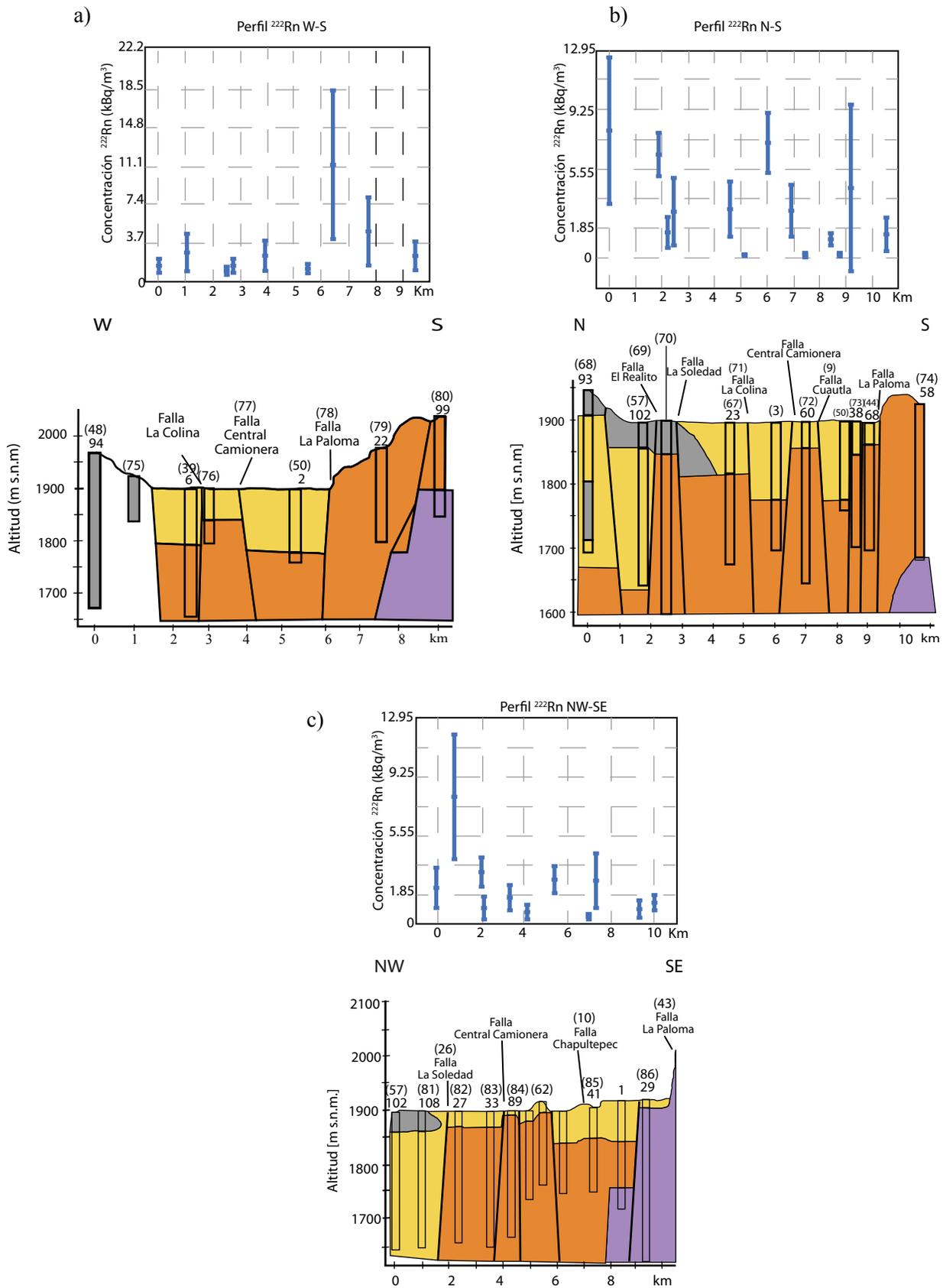


Figura 13. (a) Sección 1. Perfil de gas radón W-S, (b) Sección 2. Perfil de gas radón N-S, (c) Sección 3. Perfil de gas radón NW-SE. Ver la localización de los perfiles en la Figura 12 y la geología superficial en la Figura 3. Los números en paréntesis corresponden a las estaciones medidas que se reportan en la Tabla 3.

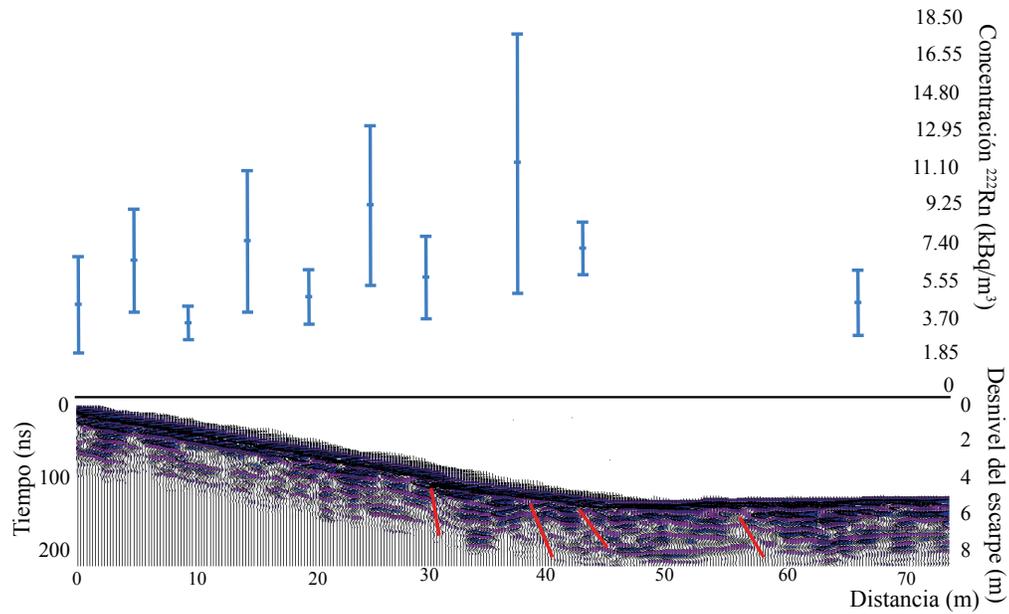


Figura 14. Perfiles de georadar y concentraciones de gas radón medidas sobre la falla La Colina. Las líneas en rojo en el radargrama muestran zonas de ruptura de la falla. A los 38 m se puede observar el máximo valor de concentración de gas radón, que es un valor anómalo.

estación 77 cerca de la Falla Central Camionera que es 2449.4 Bq/m³ y al obtenido en la estación 78 cercana a la falla La Paloma que es 11211 Bq/m³. Lo anterior no ocurre en el perfil N-S ya que en este caso el valor medio obtenido en la estación 68 de 7955 Bq/m³ está por encima del valor promedio de todo el levantamiento y aunque la estación está un poco desplazada hacia el N, se observa la existencia de ignimbrita a unos 300 m de profundidad y además la existencia de una falla geológica sin nombre entre las estaciones 68 y 57. Los valores de concentración de las estaciones ubicadas en este perfil en las trazas de las fallas fueron: falla El Realito (estación 69) 1572.5 Bq/m³, falla

La Colina (estación 71) 158.73 Bq/m³, falla Central Camionera vieja (estación 35) 2401.3 Bq/m³, falla Cuautla (estación 9) 166.13 Bq/m³, y falla La Paloma (estación 44) 4366 Bq/m³. En las estaciones de las fallas anteriores, los valores de concentración de gas radón estuvieron por debajo del promedio y sólo la falla La Paloma tuvo un valor por encima del promedio y del umbral y las fallas La Colina y Central Camionera dos valores por encima del promedio y del umbral. Lo anterior permite observar que aunque se hagan mediciones en las trazas de las fallas no siempre se van a obtener valores altos. El perfil NW-SE permite constatar lo anterior en las estaciones asociadas a las trazas

Tabla 6. Variación en las concentraciones de gas radón en sitios de mayor subsidencia (Hernández-Madrigal *et al.*, 2011), medidas antes del inicio del periodo de lluvias temporales (lectura 1) y después del inicio del periodo de lluvias (lectura 2) en la ciudad de Morelia.

Estación con subsidencia	Subsidencia entre 2005-2010 (mm)	Lectura	Fecha de lectura de gas ²²² Rn	Media de las lecturas de gas ²²² Rn (Bq/m ³)
54 Obras Públicas	-121.9	1	05/05/2017	17242
		2	15/06/2017	7298
		<i>Diferencia</i>	<i>41 días</i>	9953
52 La Corona	-129.3	1	04/05/2017	9176
		2	15/06/2017	7289
		<i>Diferencia</i>	<i>42 días</i>	-1887
53 Glorieta Michoacan	-125.6	1	04/05/2017	5624
		2	14/06/2017	12284
		<i>Diferencia</i>	<i>41 días</i>	6660
51 CFE Industrial	-147	1	26/04/2017	9657
		2	15/06/2017	10064
		<i>Diferencia</i>	<i>50 días</i>	407
56 Super 10	-165.7	1	18/05/2017	3148.7
		2	15/06/2017	3244.9
		<i>Diferencia</i>	<i>28 días</i>	96.2
57 Fin Pavimento	-181.8	1	18/05/2017	6179
		2	15/06/2017	2508.6
		<i>Diferencia</i>	<i>28 días</i>	-3670.4

de las fallas, en donde la mayoría de los valores estuvieron por debajo del promedio de las concentraciones de gas radón para este estudio.

Perfil sobre la falla La Colina

Respecto a los valores de concentración de gas radón del perfil a detalle, transversal a la traza de la falla La Colina (Figura 14), uno de ellos resultó ser anómalo. A simple vista se puede observar que el mayor valor se asocia a los 38 m, pero el desnivel debido a la falla, observado en el terreno, está entre los 30 y 32 m, lo cual indica que el desnivel no es la zona con valor más alto de concentración. En el radargrama de la Figura 14 se han colocado 4 líneas en rojo que se asociaron a lugares de ruptura por fallamiento, pero también otras estaciones entre 0 y 30 m y posteriores a los 60 m presentan discontinuidad de los estratos lo que hace pensar en varias zonas de ruptura en una falla.

Variación de gas ^{222}Rn en estaciones de subsidencia

Por último, de la observación de la Figura 15 se puede destacar lo siguiente: (1) en la estación denominada Obras Públicas o estación 54, correspondiente a un sitio ubicado en el edificio del Ayuntamiento de Morelia en la zona denominada Manantiales, cercano a la falla La Colina, hubo un decremento igual a -9953 Bq/m^3 entre la primera y segunda lectura con 41 días de diferencia entre una y otra lectura. Esta diferencia excede el valor umbral de este estudio y la primera lectura es un valor anómalo igual a 17242 Bq/m^3 ; (2) la estación denominada La Corona o estación 52, cercana a la falla La Colina, tuvo un decremento de -1887 Bq/m^3 en un periodo de 42 días entre la primera y segunda lectura; (3) la estación denominada Fin del pavimento o estación 57 cerca de la falla El Realito, tuvo un decremento de -3670 Bq/m^3 en un periodo de 28 días entre la primera y segunda lectura; (4) la estación denominada Glorieta Av. Michoacán o estación 53 cercana a la falla Central Camionera, tuvo un incremento en las concentraciones de 6660 Bq/m^3 en un periodo de 41 días entre la primera y segunda lectura, siendo la segunda lectura un valor anómalo igual a 12284 Bq/m^3 ; (5) La estación denominada CFE Industrial o estación 51, cercana a la falla Central Camionera, tuvo un incremento de 407 Bq/m^3 en un periodo de 50 días entre la primera y segunda lectura, el primer valor registrado en esta estación corresponde al valor del umbral de este estudio, el segundo valor es un valor anómalo igual a 10064 Bq/m^3 ; (6) La estación 56 cerca de la falla El Realito, tuvo un incremento de 96.2 Bq/m^3 en un periodo de 28 días. En las tres primeras estaciones hubo decremento en las observaciones, en las tres estaciones restantes hubo un incremento. Aunque en unas estaciones hubo decremento en las concentraciones y en otras hubo un incremento en las mismas es

notorio que los valores de concentración cambiaron en todas, lo cual es un indicio de que la concentración en función del tiempo es variable y que habrá que investigar más al respecto para determinar las causas de las variaciones, sobre todo por haberse obtenido valores en las estaciones 51, 53 y 54 por encima de la media y del umbral.

CONCLUSIONES

Las mediciones de las concentraciones de gas radón en 86 estaciones distribuidas de manera irregular en la zona urbana de la ciudad de Morelia sirvieron para obtener un mapa con la distribución de las mismas para explorar la relación existente entre las concentraciones de gas radón, las fallas geológicas, la subsidencia, así como la geología superficial y del subsuelo. Los resultados de los valores promedios obtenidos varían entre 68.45 y 20017 Bq/m^3 , siendo la media 4028.56 Bq/m^3 .

Del análisis geoestadístico se concluye que las concentraciones de gas ^{222}Rn en Morelia presentan una anisotropía híbrida, con máxima dirección de anisotropía al $\text{N}50^\circ\text{E}$ y con un alcance de 3540 metros. La dirección preferencial de las concentraciones del gas radón en Morelia (azimut= $\text{N}50^\circ\text{E}$) está orientada de manera óptima hacia el campo de esfuerzos actual en la porción central del Cinturón Volcánico Transmexicano ($\sigma_2=\text{NE-SW}$ y $\sigma_3=\text{NW-SE}$).

La determinación del umbral de este trabajo indica que a lo largo de la falla La Paloma las estaciones 36, 46, 78 y 45 presentan cantidades anómalas de radón, correspondiendo el mayor valor a la estación 45 cercano a la Secretaría el Medio Ambiente donde se encuentra un deslizamiento del escarpe LP. Por lo anterior, se recomienda continuar con la medición de las concentraciones de gas radón en esta falla, particularmente el monitoreo continuo para ver las variaciones temporales que pueden estar asociadas a la actividad sísmica o a las zonas de inestabilidad. También es necesario hacer notar que hay valores anómalos asociados a las estaciones 4 y 51 de la falla Central Camionera y a las estaciones 40 y 54 de la falla La Colina.

Del análisis de los perfiles de concentración de gas radón que se asociaron con la geología del subsuelo, se concluye que la sola presencia de ignimbrita (cantera de Morelia) a profundidad no es un factor determinante para tener valores altos de concentración de gas radón. Esto refuerza la idea de que en las zonas cercanas a fallas es donde se obtienen valores altos de concentración de gas radón. Por lo tanto, se sugiere considerar, para posteriores investigaciones, la presencia de otros materiales ígneos como contribuyentes a la generación de gas

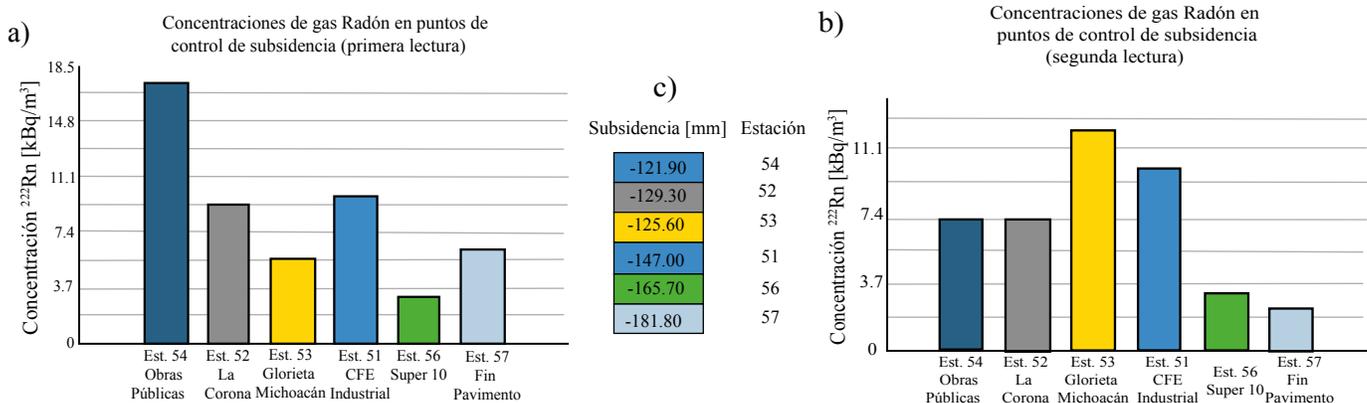


Figura 15. (a) Concentraciones de ^{222}Rn en sitios de máxima subsidencia antes del inicio del periodo de lluvias temporales en la ciudad de Morelia. (b) Concentraciones de ^{222}Rn en sitios de máxima subsidencia después del inicio del periodo de lluvias. (c) Valores de subsidencia máxima en los sitios medidos por Hernández-Madrigal et al. (2011).

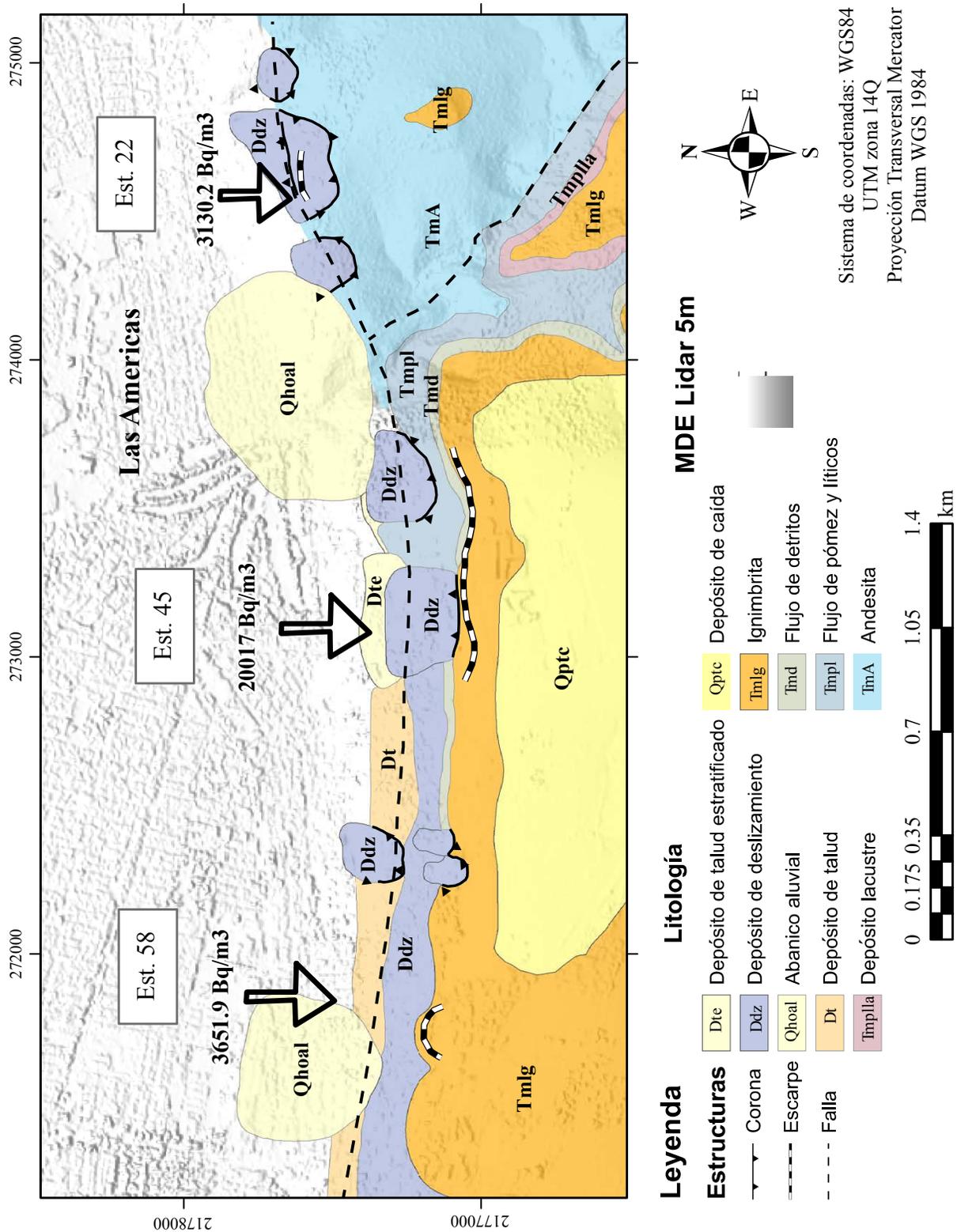


Figura 16. Mapa geológico del escarpe La Paloma y estaciones de medición de la concentración de gas radón en suelo (modificado de Arreygue-Rocha et al., 2004).

radón. No obstante, uno de los valores anómalos (estación 66) tomado cerca de la catedral de Morelia puede asociarse a que en ese lugar la ignimbrita es muy somera.

Del análisis del perfil a detalle sobre la traza de la falla La Colina se concluye que el valor anómalo obtenido está desplazado 6 m del sitio de desnivel del terreno producido por la falla.

En relación a la variación de las concentraciones de gas radón en sitios relacionados con máxima subsidencia se puede concluir que las mediciones de las concentraciones de gas radón en la estación 54 cercana a la falla La Colina y en las 51 y 53 cercanas a la falla Central Camionera, pueden servir como estaciones fijas para monitorear los procesos de subsidencia, en especial los relacionados con subsidencia-fluencia-falla y las variaciones de gas ^{222}Rn debido a los valores anómalos observados en las mismas.

En relación a los efectos en la salud por la presencia de gas radón en suelo es necesario continuar monitoreando las concentraciones de gas radón en zonas de asentamientos humanos, incluyendo mediciones intradomiciliarias además de las reportadas por Canoba *et al.* (2002) que publicaron un valor medio de gas ^{222}Rn igual a 45 Bq/m^3 , mismo que comparado con la media 4028.56 Bq/m^3 obtenida en este trabajo nos da una razón igual al 1.11%, sobre todo porque la mayoría de valores en suelo está muy por encima de los 148 Bq/m^3 , valor que no debería ser rebasado según la guía para radón de la Environmental Protection Agency (EPA), ya que estar expuesto al gas radón y sus derivados por encima de este valor puede ser una causa para desarrollar cáncer de pulmón. Desde el punto de vista de salud pública, el mapa obtenido puede ayudar a la planeación urbana a fin de evitar la construcción de estructuras habitacionales en zonas donde las concentraciones resulten por encima de las permitidas.

Por último se hace notar que los valores de concentración de gas radón obtenidos en este estudio están dentro de los rangos obtenidos en otros estudios a nivel mundial mostrados en la Tabla 1.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, en el marco de la Convocatoria “Estancias Sabáticas Vinculadas a la Consolidación de Grupos de Investigación y/o Fortalecimiento del Posgrado Nacional 2016”. Agradecemos al Dr. Faustino Juárez Sánchez, Jefe del Laboratorio de Radioactividad Natural del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México la calibración del instrumento RAD7. Se agradece a los estudiantes Elizabeth Rivera Calderón, Julio César Gómez Rivera y Yoloxóchtitl García Artellano, alumnos de maestría del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (UMSNH) por el apoyo que prestaron en el levantamiento de georadar del perfil transversal de la falla La Colina, en la ciudad de Morelia, Michoacán. Agradecemos también al personal del Servicio Sismológico Nacional por el mantenimiento de las estaciones sísmicas, la adquisición y distribución de datos sismológicos. Al Dr. Ángel F. Nieto Samaniego y a un árbitro anónimo por la revisión de este trabajo.

REFERENCIAS

- Armstrong, M., 1998, Basic Linear Geostatistics: Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 155 pp.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V.H., Canuti, P., Casaglie, N., Lotti, A., Chiesa, S., 2002, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19(2), 91-106.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V.H., Hernández-Madrugal, V.M., Canuti, P., Casaglie, N., Lotti, A., Mora-Vences, F., Alditurriaga-González, O., 2004, Inestabilidad de taludes en el escarpe La Paloma: Riesgo real y potencial, en Garduño-Monroy, V.H. (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia: Morelia, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 181-198.
- Astiz-Delgado, L.M., 1980, Sismicidad en Acambay, Estado de México-El temblor del 22 de febrero de 1979: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de licenciatura, 130 pp.
- Asumadu-Sakyi, A.B., Fletcher, J.J., Oppon, O.C., Quashie, F.K., Wordson, D.A., Adjei, C.A., Amartey, E.O., Darko, E.O., Amponsah, P., 2011, Preliminary studies on geological fault location using solid state nuclear track detection: Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 3(1), 24-31.
- Ávila-Olivera, J.A., 2008, Evolución de los Procesos de Subsidencia-Creep-Falla, casos: Morelia, Michoacán y Celaya, Guanajuato: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, tesis doctoral. 232 pp.
- Ávila-Olivera, J.A., Garduño-Monroy, V.H., 2008, A GPR study of subsidence creep-fault process in Morelia, Michoacán, México: Engineering Geology, 100(1-2), 69-81.
- Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V.H., Farina, P., 2010, Integrated study of land subsidence in Morelia, Michoacan, Mexico, en Carreón-Freyre, D. (ed.), Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development: Wallingford, Oxfordshire, Hydrological Sciences Journal, Red Books Series, 339, 185-190.
- Canoba, A., López, F.O., Arnaud, M.I., Oliveira, A.A., Neman, R.S., Hadler, J.C., Iunes, P. J., Paulo, S.R., Osorio, A.M., Aparecido, R., Rodríguez, C., Moreno, V., Vázquez, R., Espinoza, G., Golzarri, J.I., Martínez, T., Navarrete, M., Cabrera, I., Segovia, N., Peña, P., Taméz, E., Pereira, P., López-Herrera, M.E., Sajo-Bohus, L., 2002, Indoor radon measurements in six Latin American countries: Geofísica Internacional, 41(4), 453-457.
- Contreras-Corvera, A.A., Lázaro-Mancilla, O., 2014, Levantamiento de ^{222}Rn para la localización de la Falla Michoacán de Ocampo, en la Zona Urbana de Mexicali, Baja California, en Carreón-Díazcontzi, C., Ahumada-Valdez, S., Ramírez-Barreto, E. (coord.), Avances en Investigación Ambiental en la UABC, Medio Ambiente y Sustentabilidad 2014: Mexicali, B.C., Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería, 29-31.
- Craig, H., Lupton, J.E., Chung, Y., Horowitz, R.M., 1975, Investigation of radon and helium as possible fluid-phase precursors to earthquakes: La Jolla, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, Technical Report 3, 24 pp.
- Craig, H., Chung, Y., Lupton, J.E., Damasceno S., Poreda, R., 1980, Investigation of radon and helium as possible fluid phase precursors to earthquakes: United States Geological Survey, Open-file report 81-278, 36 pp.
- Ferrari, L., Garduño-Monroy V.H., Pasquaré G., Tibaldi A., 1994, Volcanic and tectonic evolution of the central Mexico; Oligocene to present: Geofísica Internacional, 33(1), 91-105.
- Font, L., Baixeras, C., Moreno, V., Bach, J., 2008, Soil radon levels across the Amer fault: Radiation Measurements, 43, S319-S323.
- Fursov, V.Z., Voltson, N.B., Khvalovskly, A.G., 1968, Results of a study of mercury vapor in the Tashkent Earthquake Zone: Doklady Akademii Nauk USSR, 179(5), 1213-1215.
- García-Cabrejo, O.J., Moreno-Sánchez, G.M., 2006, Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base-Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 2: Zinc en Sedimentos Activos Plancha 5-09 y 208-Villeta, Colombia: Geología Colombiana, 31, 39-56.
- Garduño-Monroy, V.H., Arreygue, R.E., Chiesa, S., Israde, A. I., Rodríguez, T.G., Ayala, G.M., 1998, Las fallas geológicas y sísmicas de la Ciudad de Morelia y su influencia en la planificación del territorio: Ingeniería Civil, 1(5), 3-12.
- Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez-Torres, G.M., Israde-Alcantara, I., Arreygue, E., Canuti, P., Chiesa, S., 1999, Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de Fluencia de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia: Geos, 19(2), 84-93.
- Garduño-Monroy, V.H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., Rodríguez-Torres, G.M., 2001, Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(1), 37-54.
- Garduño-Monroy, V.H., Pérez-López, R., Israde-Alcántara, I., Rodríguez-Pascua, M.A., Szykaruk, E., Hernández-Madrugal, V.M., García-Zepeda,

- M.L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V.H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E., Mora Chaparro, J.C., 2009a, Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico: *Geofísica Internacional*, 48(3), 319-335.
- Garduño-Monroy, V.H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., VázquezRosas, R., Mijares Arellano, H., Israde-Alcántara, I., Pérez López, R., 2009b, Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleoseismología: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(3), 623-637.
- Gómez-Vasconcelos, M.G., Garduño-Monroy, V.H., Macías, J.L., Layer, P.W., Benowitz, J.A., 2015, The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.
- Hernández Madrigal, V.M., Garduño Monroy, V.H., Ávila Olivera, J.A., 2011, Atlas de Peligros Geológicos de la Ciudad de Morelia, Michoacán: Morelia, H. Ayuntamiento de Morelia, Michoacán, Secretaría de Desarrollo Social, Dirección de Protección de Protección Civil y Bomberos de Morelia, Programa Habitat, 82 pp.
- Herrera, H.L., 2005, Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC: *Geotermia*, 18(1), 37-46.
- Ioannides, K., Papachristodoulou, C., Stamoulis, K., Karamanis, D., Pavlides, S., Chatzipetros, A., Karakala, E., 2003, Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones: *Applied Radiation and Isotopes*, 59(2-3), 205-213.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1978, *Mining geostatistics*: New York, Academic Press, 600 pp.
- King, C.Y., 1984, Impulsive radon emanation on a creeping segment of the San Andreas fault, California: *Pure and Applied Geophysics*, 122(2-4), 340-352.
- Keller, E.A., 1996, *Environmental Geology*: New Jersey, Prentice Hall, 560 pp.
- Langridge, R.M., Weldon, R.J., Moya, J.C., Suárez, G., 2000, Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican volcanic belt: *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 105(B2), 3019-3037.
- Langridge, R.M., Persaud, M., Zúñiga, F.R., Aguirre-Díaz, G.D.J., Villamor, P., Lacan, P., 2013, Resultados paleosísmicos preliminares de la falla Pastores y su papel en el riesgo sísmico del graben de Acambay, Cinturón Volcánico Transmexicano, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(3), 463-481.
- Lázaro-Mancilla, O., Reyes-López, J., López, D.L., 2007, Concentración de gas radón en el suelo y su relación con la ocurrencia de terremotos y efectos en la salud en Mexicali., México: *Espiritu Científico en Acción, COCYT B.C.*, 3(6), 36-41.
- Lázaro-Mancilla, O., González-Fernández, A., Contreras-Corvera, A.A., Stock, J.M., Moreno-Ayala, D., Ramírez-Hernández, J., Reyes-López, Jaime A., Carreón Diazconti, C., López, Dina L., 2014, Geophysical Exploration of Faults, Fissures and Fractures at four Sites in Mexicali, Baja California, Mexico: *American Geophysical Union Fall Meeting, Abstract NS33A-3953*.
- Macías, J.L., Arce, J.L., Garduño, V.H., Castro, R., García-Tenorio, F., Saucedo, R., 2008, Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán: *Comisión Federal de Electricidad, reporte interno*, 73 pp.
- Moussa, M.M., El Arabi, A.G.M., 2003, Soil radon survey for tracing active fault: a case study along Qena-Safaga road, Eastern Desert, Egypt: *Radiation Measurements*, 37(3), 211-216.
- Ortuño, M., Zúñiga, F.R., Aguirre-Díaz, G.J., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Roverato, M., 2015, Holocene paleo-earthquakes recorded at the transfer zone of two major faults: The Pastores and Venta de Bravo faults (Trans-Mexican Volcanic Belt): *Geosphere*, 11(1), 1-26.
- Pacheco, J.F., Valdés-González, C., Delgado, H., Singh, S.K., Zúñiga, F.R., Mortera-Gutiérrez, C.A., Barrón, R., 1999, Tectonic implications of the earthquake swarm of 1997 in the Michoacan Triangle, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 567-577.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán: *Geological Society of America Map and Chart series, MCH072*, 1 sheet, 20 pp.
- R Development Core Team, 2012, *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <<http://www.R-project.org/>>, consulta 2 de diciembre de 2017.
- Radbruch, D.H., Bonilla, M.G., Lennet, B.J., Blanchard, F.B., Laverty, G.L., Cluff, L. S., Steinbrugge, K.V., 1966, Tectonic creep in the Hayward fault zone California: U.S., Geological Survey, Circular 525, 13 pp.
- Ramírez-Guardiola, E.J., 2014, Evaluación de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en suelo. Caso de estudio ciudad de Mexicali y zonas conurbadas: Mexicali, B. C., Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, tesis de maestría, 87 pp.
- Remy, N., 2004, S-GeMS: A Geostatistical Software in Algorithmic and Software Methods for a better Integration of The Geological Information into numerical Models: Stanford, CA, EE.UU., Stanford University, tesis doctoral, 81-175.
- Shapiro, M.H., Melvin, J.D., Tombrello, T.A., Fong-liang, J., Gui-ru, L., Mendenhall, M.H., Rice, A., 1982, Correlated radon and CO₂ variations near the San Andreas Fault: *Geophysical Research Letters*, 9(5), 503-506.
- Sibson, R., 1981, *A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation Interpolating Multivariate Data*: New York, John Wiley & Sons, 21-36.
- Singh, S.K., Ordaz, M., Pérez-Rocha, L.E., 1996, The great Mexican earthquake of 19 June 1858: Expected ground motions and damage in Mexico City from a similar future event: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1655-1666.
- Singh, S., Kumar, A., Bajwa, B. S., Mahajan, S., Kumar, V., Dhar, S., 2010, Radon monitoring in soil gas and ground water for earthquake prediction studies in North West Himalayas, India: *Terrestrial Atmospheric Oceanic Sciences*. 21(4), 685-695.
- Singh, S.K., Iglesias, A., Garduño, V.H., Quintanar, L., Ordaz, M., 2012, A source study of the October, 2007 earthquake sequence of Morelia, Mexico and ground-motion estimation from larger earthquakes in the region: *Geofísica Internacional*, 51(1), 73-86.
- Slemons, D.B., 1982, Determination of design earthquake magnitudes for microzonation, *en Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference*: Seattle, Washington, 119-130.
- Stirling, M., Rhoades, D., Berryman, K.R., 2002, Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the Instrumental and Preinstrumental Era: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), 812-830.
- Suter, M., 2016, Structure and Holocene Rupture of the Morelia Fault, TransMexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5), 2376-2388.
- Suter, M., Aguirre, G., Siebe, C., Quintero, O., Komorowski, J.C., 1991, Volcanism and active faulting in the central part of the trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico, *en Walawender, M.J., Hanan, B.B. (eds.)*, Geological excursions in Southern California and Mexico, Guidebook: Boulder, CO., Geological Society of America, Annual Meeting, 224-243.
- Suter, M., Quintero, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. J., Farrar, E., 1995, The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico: *Tectonics*, 14(5), 1245-1262.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., 1996, Macro seismic study of earthquakes in the central and eastern parts of the trans-Mexican volcanic belt: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1952-1963.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001, Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt: *Geological Society of America Bulletin*, 113(6), 693-703.
- Thomas, A.P., 1995, *Seismotectonics of the Imperial-Mexicali Valley, Northern Baja California*, México: San Diego, CA, EE. UU., San Diego State University, tesis de maestría, 54 pp.
- Urbina, F., Camacho, H., 1913, La zona megasísmica Acambay-Tixmadeje, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912: *Boletín del Instituto Geológico de México*, 2, 320-329.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Manuscrito recibido: septiembre 6, 2019
 Manuscrito corregido recibido: marzo 17, 2020
 Manuscrito aceptado: abril 16, 2020