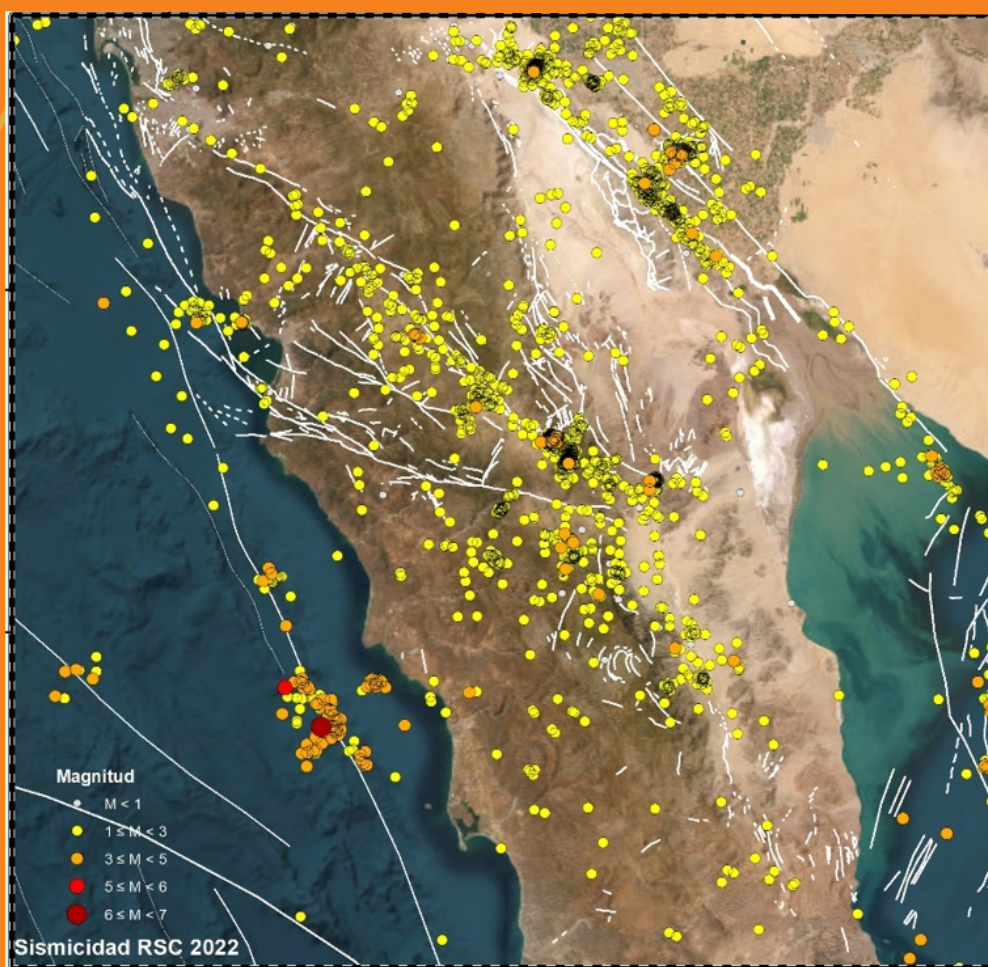


geos



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

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

Dr. Arturo Iglesias Mendoza
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidente

Dr. José Luis Macías Vázquez
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

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

Dra. Ericka Alinne Solano Hernández
Universidad del Mar, Puerto Angel, Oaxaca
Secretaría General

Dra. Lucia Capra Pedol
Centro de Geociencias, UNAM
Secretario de Investigación

Mtra. Caridad Cárdenas Monroy
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretaría de Difusión

Dr. Oscar Castro Artola
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretaría de Educación

Dr. Dante Jaime Morán Zenteno
Instituto de Geología, UNAM
Secretario de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Caridad Cárdenas Monroy
caridad@sismologico.unam.mx
UNAM

Comité Editorial

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

Apoyo Técnico Editorial

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

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

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

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

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

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

EDITORIAL

Disponibilidad y protección del agua	... 211
---	---------

DIVULGACIÓN

Caracterización del deslizamiento de ladera de la colonia Vista Alamar, Tijuana, Baja California, México, mediante el uso de ruido sísmico y el método HVSR	... 213
--	---------

Lenin Ávila Barrientos, Luis A. Yegres Herrera, Arturo Aragón, Mario Rodríguez Corella, Alicia Cruz Berumen

Algunas técnicas de sondeo vertical de la atmósfera urbana	... 231
---	---------

J. Adrián Álvarez Pérez, Napoleón Quiroz Amoroso, Adalberto Tejeda Martínez

Boletín de Sismicidad registrada por la Red Sismológica del Noroeste de México. Enero - diciembre 2022	... 245
---	---------

Luis Humberto Mendoza Garcilazo, Sergio Manuel Arregui Ojeda, Guillermo Eduardo Díaz de Cossío Batani, Francisco Javier Farfán Sánchez, Jesús Oscar Gálvez Valdez, María Alejandra Nuñez Leal, Rogelio Ojeda Aréchiga, Luis Alejandro Yegres Herrera

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL	... 255
---------------------------	---------

Disponibilidad y protección del agua

Como cada año, este 2023 da una nueva muestra del déficit de agua en algunas regiones del país, principalmente en los estados del norte. En algunos lugares, fenómenos como El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) se asocian con lluvia en abundancia, mientras que en otros el efecto es inverso. Eventos como ENOS ocurren desde hace miles de años y su periodicidad es variable. La Organización Meteorológica Mundial declaró el 4 de julio como el inicio de El Niño 2023-2024. Aunque los efectos adversos de este evento son conocidos y hasta cierto punto predecibles, las políticas públicas y las respuestas sociales no contemplan el manejo sustentable del recurso agua, por lo que no modifican su forma de uso. Una muestra de ello es la poca atención que se le da a la educación ambiental en todos los niveles educativos. Afortunadamente aún estamos lejos de una sequía como la sufrida durante 2011, cuando a mediados de año, hasta el 23% de territorio nacional se vio afectado por una sequía de intensidad excepcional 4 (D4 en la clasificación de la CONAGUA). Este nivel se caracteriza por pérdidas excepcionales de cultivos, escasez total de agua en embalses, riesgo excepcional de incendios y por la probable situación de emergencia por falta del líquido. De acuerdo con la misma fuente, a mediados de 2023, más del 20% del país se encontraba en una situación de sequía severa (D2), con tendencia a empeorar, en la cual la misma CONAGUA recomienda imponer restricciones en el uso del agua.

Los informes estadísticos de CONAGUA sobre el agua en México muestran que en su mayor parte, el agua es de uso agrícola y ganadero (76%) y que el “uso doméstico” representa solamente el 10%. El 14% restante se distribuye en la industria, empresas y servicios conectados a las redes. Claramente, esta distribución varía enormemente dependiendo de la región, por lo que estas proporciones ofrecen una perspectiva poco útil para planear el desarrollo de las actividades de la sociedad en todo el país. En ese sentido, la capacidad de una región para que en ella se desarrollen actividades humanas debe considerar una buena calidad de la vida en función del tiempo. La sobreexplotación de los recursos hídricos por las actividades productivas, aunada a la creciente sobrepoblación y demanda de espacio para el crecimiento de las zonas urbanas, así como la falta de políticas de protección de las zonas de recarga de los acuíferos, promueven el desequilibrio social en las grandes urbes y muchos centros de población. Una muestra de la necesidad de tener mayor control sobre el recurso hídrico es el hecho de que, según la organización CartoCrítica (11 abril, 2023), en el 62% de los sitios donde se efectúa extracción minera metálica no se cuenta con concesiones para uso de agua. Sobra decir que los rellenos sanitarios en las inmediaciones de las poblaciones no solo suelen estar mal administrados sino que aumentan el peligro de contaminación de los acuíferos y cuerpos de agua superficiales

por los lixiviados derivados del mal manejo de la basura. Proyectos como la planta de Tesla en Monterrey y la minería en el norte de México son ejemplos del potencial que tienen las industrias de crear un desequilibrio hídrico alto, promovido por una normatividad y planeación deficiente sobre el recurso agua. A lo anterior habrá que añadir el déficit por la disminución en las cuotas de agua de los ríos Colorado y Bravo derivada del viejo Tratado Internacional de Límites y Aguas de 1944 entre EUA-México.

Por todo lo anterior, es importante que entre las acciones primordiales del Estado, se integre el conocimiento adquirido sobre el medio ambiente para ofrecer a la sociedad una reglamentación basada en datos geocientíficos y poder estimar los volúmenes de extracción y consumo de los recursos, de agua principalmente, a un ritmo que garantice su regeneración. Para lograr dicho conocimiento de los ecosistemas y sus capacidades, será necesario también tener organizaciones capaces de emitir opiniones honestas y usuarios responsables. Finalmente, este conocimiento debe permear a la población en programas formales e informales de educación ambiental.

Caracterización del deslizamiento de ladera de la colonia Vista Alamar, Tijuana, Baja California, México, mediante el uso de ruido sísmico y el método HVSR

Lenin Ávila-Barrientos^{1,*}, Luis A. Yegres-Herrera², Arturo Aragón³, Mario Rodríguez-Corella³, Alicia Cruz-Berumen³

¹ CONACyT-CICESE, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología. Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología. Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

³ Unidad Estatal de Protección Civil de Tijuana, Tijuana, Baja California. Pánfilo Natera No. 6400, Col. Francisco Villa, C.P. 22615
ORCID: LA-B 0000-0001-7451-8636; LAY-H 0000-0002-1631-2266

*lenavila@cicese.mx

Resumen

Los deslizamientos de ladera son fenómenos naturales que pueden causar daños severos, lo cual incluye pérdidas económicas y en algunos casos pérdida de vidas. La ciudad de Tijuana, Baja California, México, se ha visto afectada por la ocurrencia de varios deslizamientos de ladera. Del localizado en la colonia Vista Alamar se presenta la caracterización del deslizamiento mediante el uso de ruido sísmico y el método HVSR (*Horizontal Vertical Spectral Ratio*). Los modelos obtenidos de las velocidades de la onda S muestran la posible superficie de deslizamiento, la cual corresponde con la observada en el campo. Los valores altos V_p/V_s se localizan en los extremos sur y norte del deslizamiento. Hacia el extremo sur, se puede especular sobre la migración de fluidos hacia la parte inferior del deslizamiento, la presencia de los valores altos en la parte superior no queda clara, por lo que se recomienda extender el análisis, así como aplicar otras técnicas geofísicas para corroborar los resultados obtenidos.

Palabras clave: Alamar; Deslizamiento; HVSR; Ruido sísmico; Tijuana; V_p/V_s ; V_s

Introducción

Un deslizamiento de ladera, en adelante indicado solo como “deslizamiento”, es un fenómeno natural definido como un movimiento pendiente abajo de masas de roca, tierra o escombros (Cruden, 1991; Turner, 2018). Un deslizamiento puede ser caracterizado como un cuerpo geológico complejo formado por capas con propiedades físicas que contrastan, lo que implica un movimiento repentino o gradual pendiente abajo (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977). Los deslizamientos afectan los materiales geológicos y exhiben muchas formas y volúmenes (Jongmans y Garambois, 2007; Figura 1) Las velocidades de los deslizamientos pueden ser de unos pocos milímetros al año a más de 5 m/s (Turner, 2018). La gravedad es la fuerza que genera un deslizamiento, pero éste solo ocurre

cuando la gravedad supera a las fuerzas inerciales y resistentes, es decir la resistencia al esfuerzo cortante del material (Turner, 2018; Pradhan y Siddique, 2019).

De acuerdo con Turner (2018), los deslizamientos se clasifican de acuerdo al tipo de material y movimiento. La Tabla 1 muestra la clasificación de los deslizamientos (Cruden y Varnes, 1996, en Turner 2018).

La naturaleza del daño por un deslizamiento es compleja por los diferentes factores involucrados, como puede ser el mecanismo de falla, distancia recorrida, características de la pendiente, tipos de estructuras que pudieran ser afectadas, así como la vulnerabilidad de ellas (Wong *et al.*, 1997). Los daños pueden incluir pérdidas económicas,

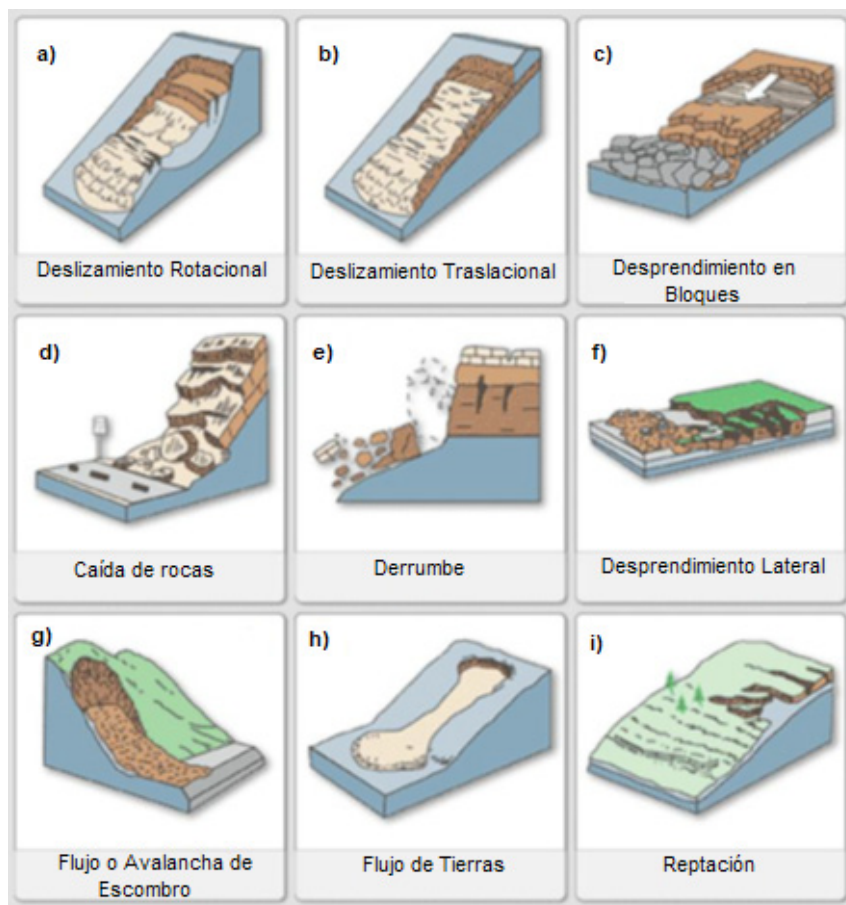


Figura 1. Principales tipos de movimientos en masa (tomado de Gómez, 2010).

Tabla 1. Clasificación de los deslizamientos de acuerdo con Cruden y Varnes (1996), modificado de Turner (2018).

Tipo de movimiento	Tipo de material		
	Roca	Suelos ingenieriles	
		Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caídas	Caída de roca	Caída de escombros	Caída de tierra
Derrumbes	Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra
Deslizamientos Rotacional Traslacional	Deslizamientos de roca	Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de tierra
Propagación lateral	Propagación de roca	Propagación de escombros	Propagación de tierra
Flujos	Flujo de roca	Flujo de escombros	Flujo de tierra
Complejo	Combinación de dos o más tipos de movimientos principales		

afectación a áreas importantes de desarrollo económico, daño a las estructuras ingenieriles, lesiones y hasta la pérdida de la vida (Cruden, 1991; Bogoslovsky y Ogilvy, 1977; Del Gaudio *et al.*, 2014). Los deslizamientos son peligros extendidos y causan miles de muertes, lesiones y billones de dólares en pérdidas cada año (Kjekstad y Highland, 2009).

Determinar la estructura del subsuelo en un área susceptible a deslizamientos ayuda a prevenir su ocurrencia, tomando las medidas necesarias para su estabilización, lo que requiere de una caracterización geológica y geofísica del área (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977). Uno de los estudios geofísicos aplicables es el uso del ruido sísmico, la medición de ruido sísmico para caracterizar la estructura del subsuelo y la estimación de la velocidad de corte (V_s) de las diferentes capas de suelo. Estos estudios se han incrementado en las últimas décadas. Específicamente, el uso de ruido

sísmico en áreas propensas a deslizamientos es útil, ya que a lo largo de la superficie de deslizamiento, hay contraste de las velocidades de corte, lo cual se puede identificar y caracterizar mediante el análisis del ruido empleando el método de cocientes espectrales HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio) (Jongmans y Garambois, 2007; Méric *et al.*, 2007).

El problema de los deslizamientos en Tijuana

La ciudad de Tijuana, Baja California, México, ha sido afectada históricamente por deslizamientos (Olivia *et al.*, 2021; Delgado-Argote *et al.*, 2017, 2012, 2011; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007; Aragón, 1994). Con el crecimiento de la ciudad, la población gradualmente ha ido asentándose en las colinas, zonas de laderas y cauces de arroyo, por lo regular, en forma de asentamientos irregulares (Ángeles, 2020; Bocco *et al.*, 1993; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007).

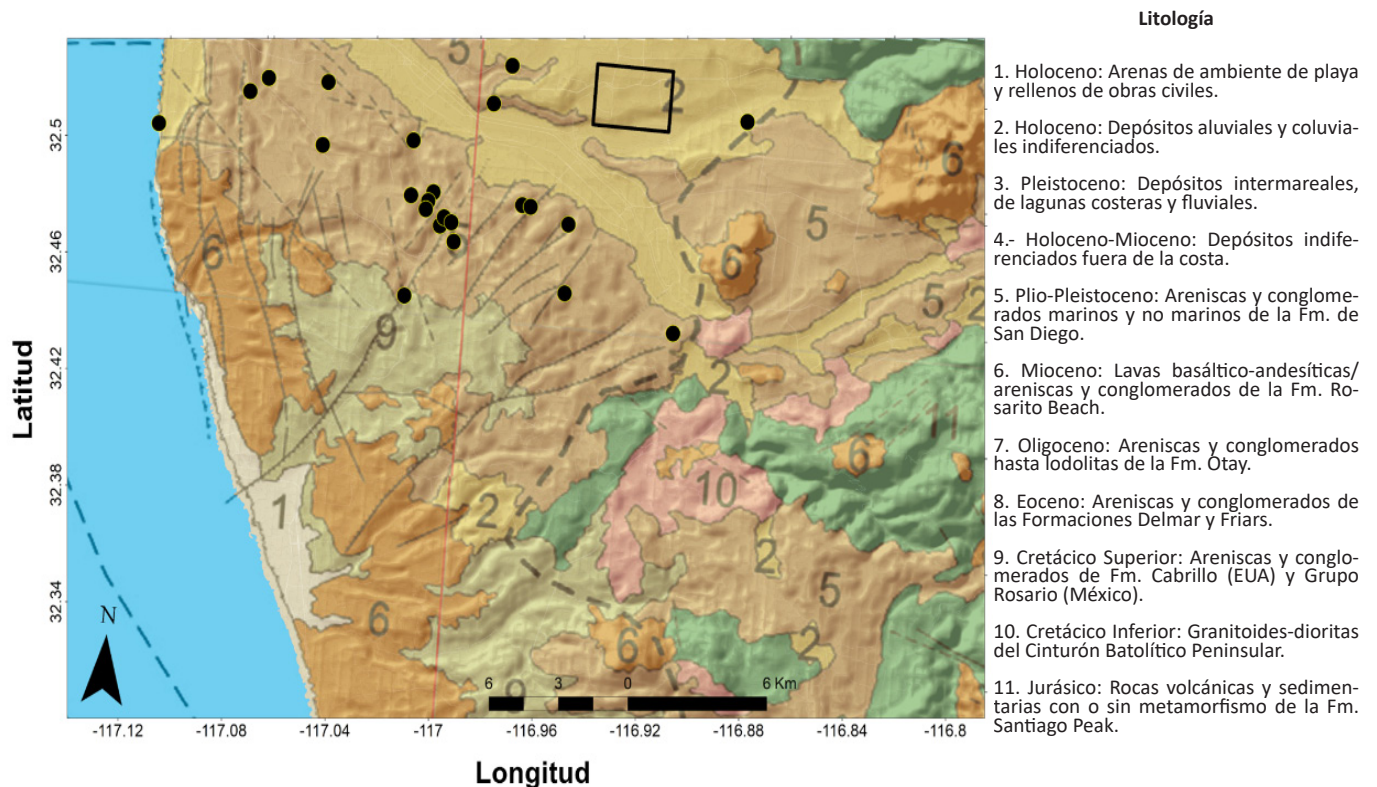


Figura 2. Mapa geológico del municipio de Tijuana (modificado de Delgado-Argote *et al.*, 2017). Se muestran los rasgos estructurales principales (líneas negras continuas). Los círculos representan los deslizamientos ocurridos en el municipio (con información de SEDATU, 2014). El cuadro negro indica el área de estudio

Las condiciones geológicas de la ciudad de Tijuana son propicias para deslizamientos de ladera (Figura 2), debido a que se localiza en un área tectónicamente activa y sobre sedimentos pobremente consolidados (Figura 2) (Delgado-Argote *et al.*, 1996; López-Álvarez, 2001; Mendoza-Garcilazo *et al.*, 2007; Domínguez-Morales *et al.*, 2016). Además, existen otras variables detonadoras como son las pendientes, fracturas, precipitación y saturación de agua en los sedimentos (Delgado-Argote *et al.*, 2011, 2012, 2017).

En el año 2020, en la colonia Vista Alamar ocurrió un deslizamiento (Figura 3), que afectó 13 viviendas, 12 de ellas catalogadas como de alto riesgo y una más en riesgo medio (Protección Civil Tijuana, 2020; Figuras 3 y 4). Al inicio, la zona del deslizamiento era una zona de depresión, probablemente el cauce de un arroyo (Figura 5-A), la cual fue rellena para construir sobre ella una obra civil que según se aprecia en el campo es el cauce del drenaje (Figura 5-B). Posteriormente, ocurrió el deslizamiento de ladera causando un daño severo a la obra civil y afectaciones a las viviendas localizadas pendiente abajo (Figura 5-C).



Figura 3. A) y B) Deslizamiento ocurrido en la colonia Vista Alamar. Las flechas amarillas indican la dirección y sentido del movimiento, el círculo amarillo es el acercamiento visto en C, el círculo amarillo con doble línea es el acercamiento en D.

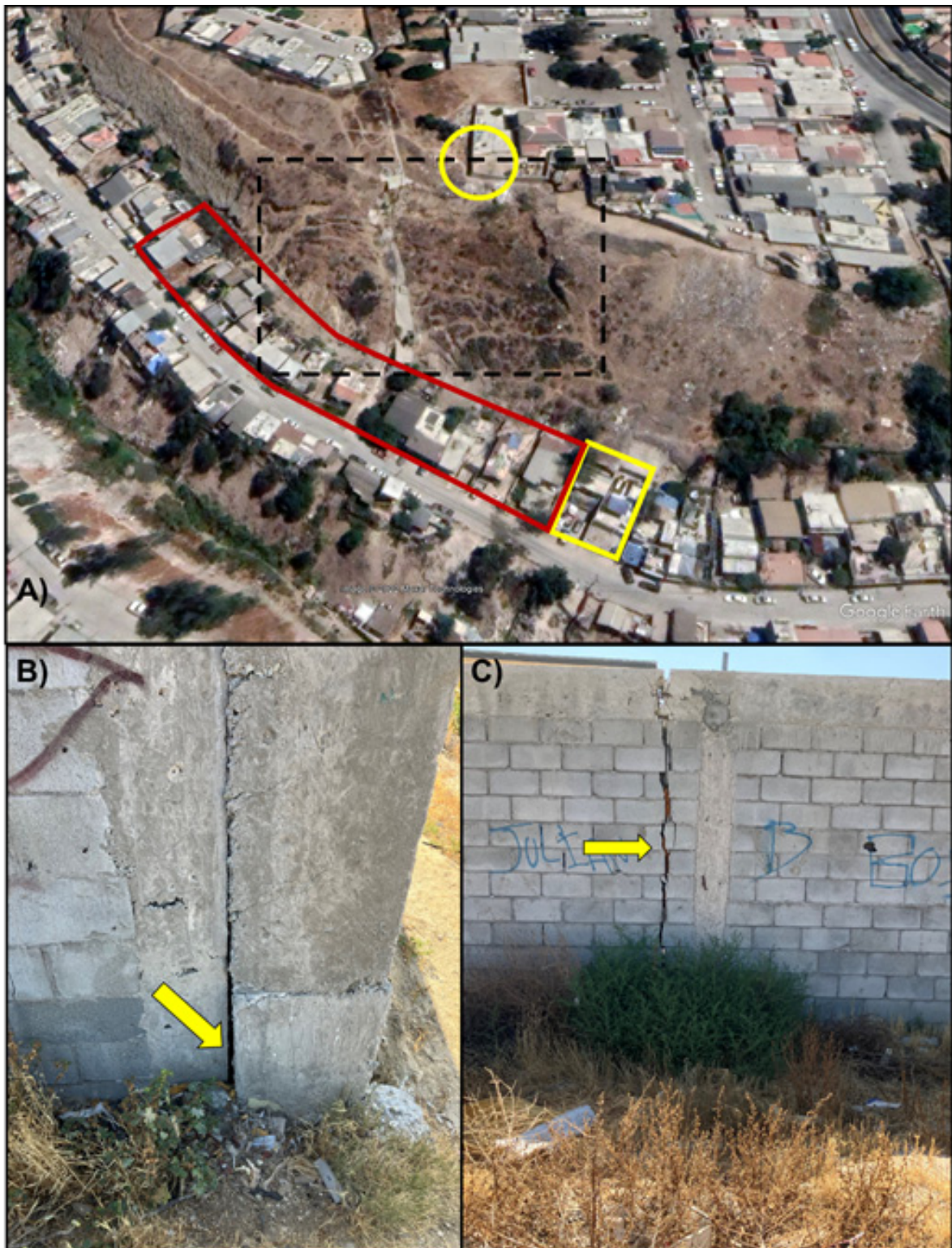


Figura 4. A) Zona afectada por el deslizamiento. El polígono rojo corresponde a viviendas en alto riesgo; el polígono amarillo corresponde a viviendas en riesgo medio (con información de Protección Civil Tijuana, 2020; imagen tomada de Google Earth). El cuadro segmentado indica la zona del deslizamiento. B) y C) Daños observados en una barda localizada en la corona del deslizamiento, su ubicación se muestra en el círculo amarillo en “A”.



Figura 5. Evolución de la zona del deslizamiento (cuadro de línea segmentada). A) Hasta 2009, la zona del deslizamiento era una depresión con orientación NNE-SSW (línea negra segmentada). B) Del 2010 al 2020, se observa la depresión rellena. C) En el 2020, ocurre el deslizamiento dañando la obra construida sobre la depresión (imágenes tomadas de Google Earth).

Ruido sísmico y el método HVSR

El ruido sísmico es definido como las señales sísmicas generadas por el viento, fenómenos atmosféricos, actividades antropogénicas, ondas oceánicas, etc. (Bonnetfoy-Claudet *et al.*, 2006a). Los registros de ruido sísmico usualmente contienen señales generadas por todo tipo de fuentes con frecuencias traslapadas (Flores-Estrella *et al.*, 2022). Lunedei y Malischewsky (2015) mencionaron que el campo de ondas del ruido sísmico está compuesto por todas las fases sísmicas viajando en la superficie, *i.e.* viaja como una combinación de ondas de cuerpo y ondas de superficie, lo cual permite considerarlo para análisis a diferentes escalas. Desde los años 50 se ha usado el ruido sísmico para caracterizar la estructura del subsuelo (Aki 1957, 1965; Kanai *et al.* 1954).

Existen diversas metodologías de análisis, la más popular, es el cociente espectral H/V (Horizontal/Vertical), debido a su practicidad. El uso de ruido sísmico y el método H/V es una herramienta fácil de aplicar, la cual tiene la ventaja de ser rápida en la adquisición de datos, análisis y resultados (Cheng, 2020). La metodología, también denominada HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio), fue inicialmente propuesta por Nogoshi e Igarashi (1971) y después retomada por Nakamura (1989, 2000, 2009; en Mucciareli *et al.*, 2009). El HVSR provee una estimación de los parámetros de las condiciones del sitio, especialmente en lugares con grandes amplificaciones y una geología simple del subsuelo (Nakamura, 1989, 1996, 2000; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994a, 1994b; Bard, 1999; SESAME, 2004; Bonnetfoy-Claudet *et al.*, 2006a, 2006b; Zuccarello *et al.*, 2016; Bergamo *et al.*, 2019, 2021; Torrese *et al.*, 2020; Muzli *et al.*, 2021).

En áreas susceptibles a deslizamientos, la estructura del subsuelo se caracteriza por tener discontinuidades a lo largo de la cual el movimiento de deslizamiento de masa puede ocurrir. Esta superficie está marcada por fuertes contrastes en

la velocidad de corte (V_S). El uso de ruido sísmico y el método HVSR pueden detectar estos contrastes, permitiendo caracterizar la superficie en términos de su localización, profundidad, espesor, etc. (Pazzi *et al.*, 2017; Galea *et al.*, 2014; Panzera *et al.*, 2012). La metodología para el estudio de áreas susceptibles a deslizamientos, anteriormente mencionada, ha sido utilizada en diversas partes del mundo (Méric *et al.*, 2007; Imposa *et al.*, 2017; Pazzi *et al.*, 2017; Suhendra y Sugianto, 2018; Hussain *et al.*, 2019; Gallipolli *et al.*, 2000; Rezaei *et al.*, 2020; Noguchi *et al.*, 2021; Delgado *et al.*, 2021; Tebbouche *et al.*, 2022).

Como se ha mencionado la ciudad de Tijuana ha presentado deslizamientos en diferentes partes. En el ocurrido en la colonia Vista Alamar utilizamos mediciones de ruido sísmico y la metodología HVSR para caracterizar el deslizamiento, como una primera aproximación.

Base de datos y análisis

Para explorar el alcance del análisis del método HVSR, empleamos sismógrafos de periodo corto de tres componentes, SARA SS20, un digitalizador de 24 bits SL06 con 200 muestras por segundo, una batería y una antena GPS. Los registros de ruido sísmico, con una duración de 30 minutos, se tomaron en siete puntos a lo largo de la dirección del deslizamiento (Figura 6).

Las señales sísmicas obtenidas fueron preprocesadas y procesadas usando el software *Geopsy* (Wathelet *et al.*, 2020). Durante el preprocesado se removió la tendencia, se realizó la corrección por línea base y se filtraron en una banda de frecuencias de 0.25 a 25 Hz. Para el análisis se seleccionaron, de manera automática, ventanas de 30 segundos empleando el algoritmo STA/LTA con un STA/LTA mínimo de 0.20 y máximo de 2.00. Para la obtención de las curvas se consideró el promedio de las componentes horizontales (Ec. 1 y 2):

$$H(f) = \sqrt{\frac{N(f)^2 + E(f)^2}{2}} \quad (1)$$

$$H/V = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (2)$$

donde $N(f)$, $E(f)$ y $V(f)$ son los espectros de las componentes del movimiento Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, respectivamente. En la Figura 7-A, se muestra, a manera de ejemplo, las señales de ruido sísmico para las tres componentes registradas en el punto AL-05. En la Figura 7-B, se muestra las curvas HVSR obtenidas para cada ventana de tiempo, representadas por las líneas de colores; la línea negra continua indica el promedio y las líneas negras segmentadas indican la desviación estándar.

Una vez determinadas las curvas HVSR, el análisis consiste en invertir la curva completa para obtener un modelo del subsuelo, tal como ha sido propuesto en trabajos previos (Malischewsky y Scherbaum, 2004; Malischewsky *et al.*, 2010; Zor *et al.*, 2010; Tuan *et al.*, 2011; Flores *et al.*, 2013; Wathelet *et al.*, 2020). La inversión de la curva se llevó a cabo en el módulo *Dinver* del software *Geopsy* (Wathelet *et al.*, 2020), se estimaron las variaciones con la profundidad de las velocidades de las ondas compresional (V_p) y de corte (V_s), *i.e.*, los perfiles de velocidad de V_p y V_s . En el proceso de inversión cada parámetro fue ajustado a los datos observados, *i.e.*, la curva HVSR, con un mínimo error (desajuste). El desajuste es calculado con base en la ecuación 3 (Arintalofa *et al.*, 2020):



Figura 6. Distribución espacial de los puntos en donde se realizaron las mediciones de ruido sísmico (imagen tomada de Google Earth). Cuadro segmentado indica la zona del deslizamiento.

$$misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{Di - Mi}{\sigma_i} \right)^2} \quad (3)$$

donde N es el número de datos de la curva HVSR, Di es dato resultante de la inversión, Mi es el modelo estructural del suelo apropiado a los parámetros de entrada en el modelo de referencia y σ_i es el error de la medida de los datos. Un 10% del ajuste de la dispersión (o de los perfiles del suelo) corresponde a un desajuste de aproximadamente 0.1 (<https://www.geopsy.org/>). Debido a que Di , Mi y σ_i tienen las mismas unidades, el desajuste es adimensional.

En la Figura 8, se muestra el proceso de inversión para curva HVSR mostrada en la Figura 7-B. En la Figura 8-A, se muestra la curva HVSR como la línea sólida oscura, con la desviación estándar para cada punto y las curvas de elipticidad, en colores, obtenida de los perfiles de velocidad (sintético). La barra de colores representa la escala del desajuste entre la curva observada HVSR y las curvas sintéticas. En las Figuras 8-B y 8-C se muestran los perfiles de velocidad para VP y VS y la escala de color corresponde al desajuste.

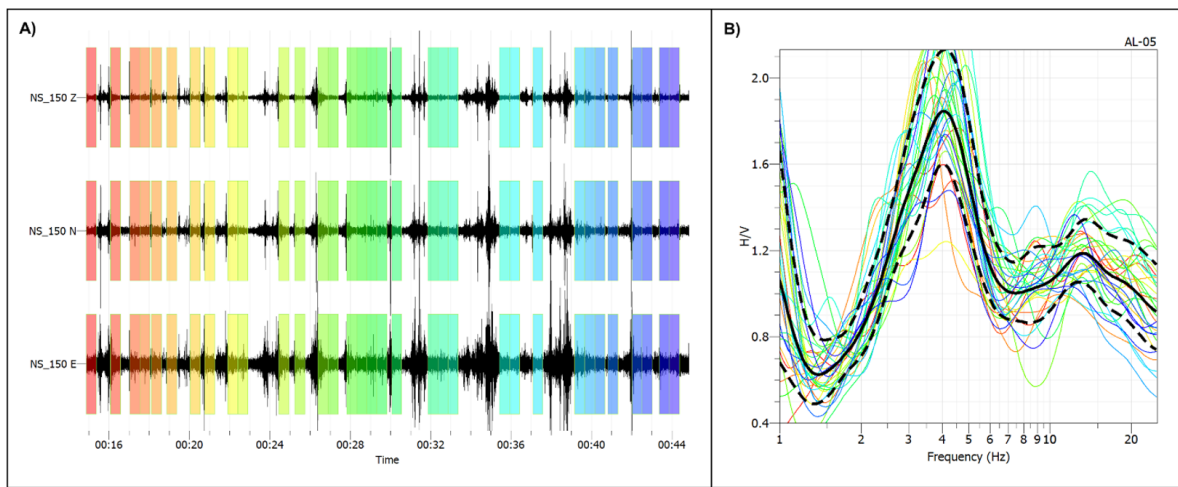


Figura 7. A) Señales de ruido sísmico para las tres componentes: Vertical, Norte-Sur y Este-Oeste. Los rectángulos de colores indican las ventanas seleccionadas; B) curvas HVSR calculadas para cada ventana de “A”, para el punto AL-05.

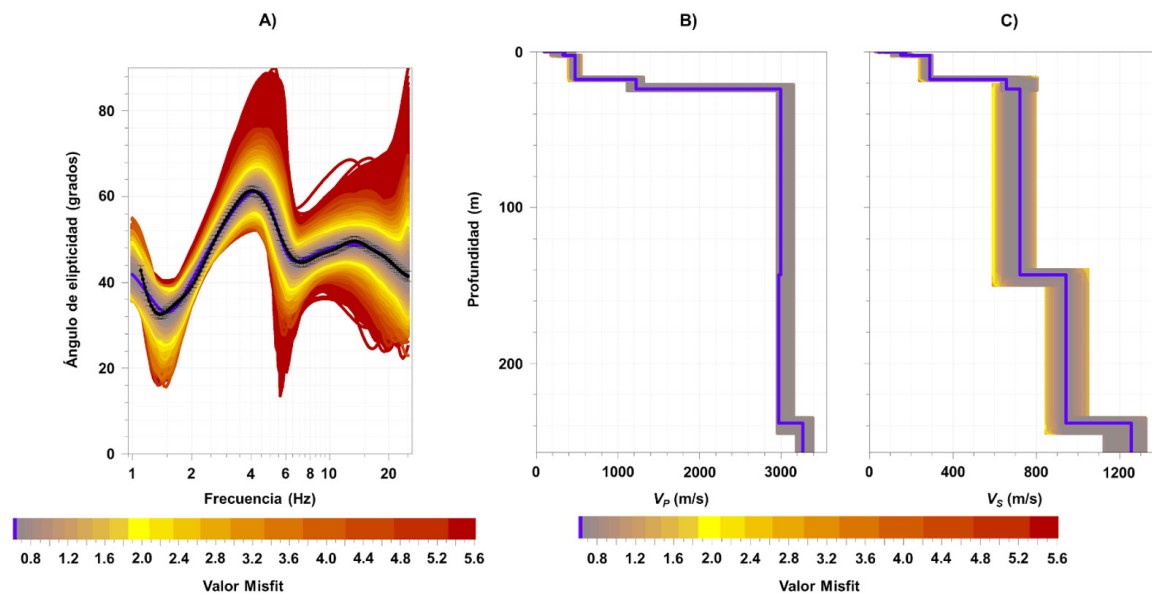


Figura 8. Punto AL-05. A) Ajuste a la curva de elipticidad; B) Perfil de VP; C) Perfil de VS. La línea en azul indica el modelo con el mínimo desajuste.

Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2, la cual contiene el número de ventanas empleadas para la determinación de las curvas HVSR, la frecuencia fundamental (f_0), rango de profundidad, rango de VS y VP, cocientes VP/VS,

así como el mínimo desajuste. Se elaboró el perfil con los resultados obtenidos para el deslizamiento de la colonia Vista Alamar, empleando el software Generic Mapping Tools (GMT; Wessel et al., 2019) en donde se muestra el contraste de las velocidades de la onda de corte (VS, Figura 9-A).

tabla 2. Parámetros obtenidos para cada uno de los puntos en el deslizamiento Alamar. Se muestra el número de ventanas empleadas para la determinación de la curva HVSR, Frecuencia fundamental (f_0), Rango de profundidad, Rango de VS, Rango de VP, Rango del cociente VP/VS y, el mínimo desajuste.

Punto	No. de ventanas	f_0 (Hz)	Rango de Profundidad (m)	Rango de Vs (m/s)	Rango de Vp (m/s)	Rango de Vp/Vs	Desajuste
AL-01	42	2.55	0.00 - 6.47	46.90 – 357.95	93.52 – 605.13	1.99 – 1.69	0.71
			6.47 - 7.77	457.7	825.18	1.80	
			7.77 - 22.58	522.25	1089.24	2.08	
			22.58 - 37.32	595.60 – 757.43	1606.36 – 1306.95	1.72	
			37.32 - 73.27	1059.52	1880.89	1.77	
			73.27 - 78.56	976.34	1949.34	1.99	
			78.56 - 119.58	1405.40	2709.88	1.92	
			119.58	1348.48	2606.51	1.93	
AL-02	44	3.61	0.00 – 5.11	111.49 – 302.20	202.32 – 513.33	1.81 – 1.69	0.62
			5.11 – 18.95	413.69	1013.99	2.45	
			18.95 – 23.85	615.10	1546.33	2.51	
			23.85 – 28.42	774.79	1470.28	1.89	
			28.42 – 86.25	1023.19	2398.85	2.34	
			86.25 – 131.99	1094.16	2321.46	2.12	
			131.99 – 169.56	2158.75	4850.00	2.24	
			169.56	2217.90	4836.38	2.18	
AL-03	45	2.23	0.00 – 6.12	57.21 – 376.28	298.53 – 693.89	5.2 – 1.84	0.51
			6.12 – 7.77	402.69	911.74	2.26	
			7.77 – 24.93	646.94	1315.16	2.03	
			24.93 – 49.29	711.76	1449.26	2.03	
			49.29 – 67.14	843.23	1438.60	1.70	
			67.14 – 106.23	1178.71	2184.55	1.85	
			106.23 – 148.72	1287.51	3271.49	2.54	
			148.72	1210.44	3900.22	3.22	

Punto	No. de ventanas	f_0 (Hz)	Rango de Profundidad (m)	Rango de V_s (m/s)	Rango de V_p (m/s)	Rango de V_p/V_s	Desajuste
AL-04	38	3.19	0.00 – 4.46	95.72 – 151.83	418.97 – 305.50	4.37 – 2.00	1.2
			4.46 – 8.13	166.69	270.59	1.62	
			8.13 – 10.58	245.90	541.17	2.20	
			10.58 – 15.97	255.81	418.97	1.63	
			15.97 – 27.41	381.23	715.75	1.87	
			27.41 – 29.64	358.13	1850.46	5.16	
			29.64 – 171.00	442.30	2059.95	4.65	
			171.00	611.24	3313.10	5.40	
AL-05	33	4.11	0.00 – 2.45	42.17 – 150.96	99.76 – 325.30	2.36 – 2.15	0.65
			2.45 – 17.12	202.41	349.88	1.72	
			17.12 – 23.60	286.75	468.40	1.63	
			23.60 – 142.97	652.96	1210.70	1.85	
			142.97 – 237.82	718.61	2995.99	4.16	
			237.82	943.17	2960.64	3.13	
AL-06	46	2.23	0.00 – 4.03	135.47 – 202.93	513.45 – 606.36	3.79 – 2.98	0.56
			4.03 – 17.90	207.82	369.19	1.77	
			17.90 – 22.95	322.03	823.96	2.55	
			22.95 – 49.80	390.82	850.86	2.17	
			49.80 – 54.50	422.08	758.45	1.79	
			54.50 – 199.96	766.00	2691.96	3.51	
			199.96	719.11	3845.66	5.34	
AL-07	2.1	49	0.00 – 4.49	93.35	158.92	1.66	0.37
			4.49 – 31.02	230.00	393.64	1.71	
			31.02 – 122.85	539.47	915.13	1.69	
			122.85	967.87	3677.90	3.79	

El perfil en la Figura 9-A, muestra el contraste de velocidades para la onda de corte en la dirección del deslizamiento. Se observa que la parte superior del perfil está caracterizada por velocidades bajas que varían entre ~ 100 y 500 m/s por arriba de la línea segmentada en la Figura 9-A. Los valores bajos de velocidad están asociados con el material del deslizamiento (Imposa *et al.*, 2017; Göktürkler *et*

al., 2008). Debajo de la zona de bajas velocidades se encuentra una zona de transición con velocidades de ~ 500 a 600 m/s (línea segmentada en Figura 9-A). Esta zona de transición es la interfaz entre el material de deslizamiento y la capa de roca, debido a las distintas características físicas y mecánicas de los materiales (Imposa *et al.*, 2017) y estaría representado la superficie del deslizamiento,

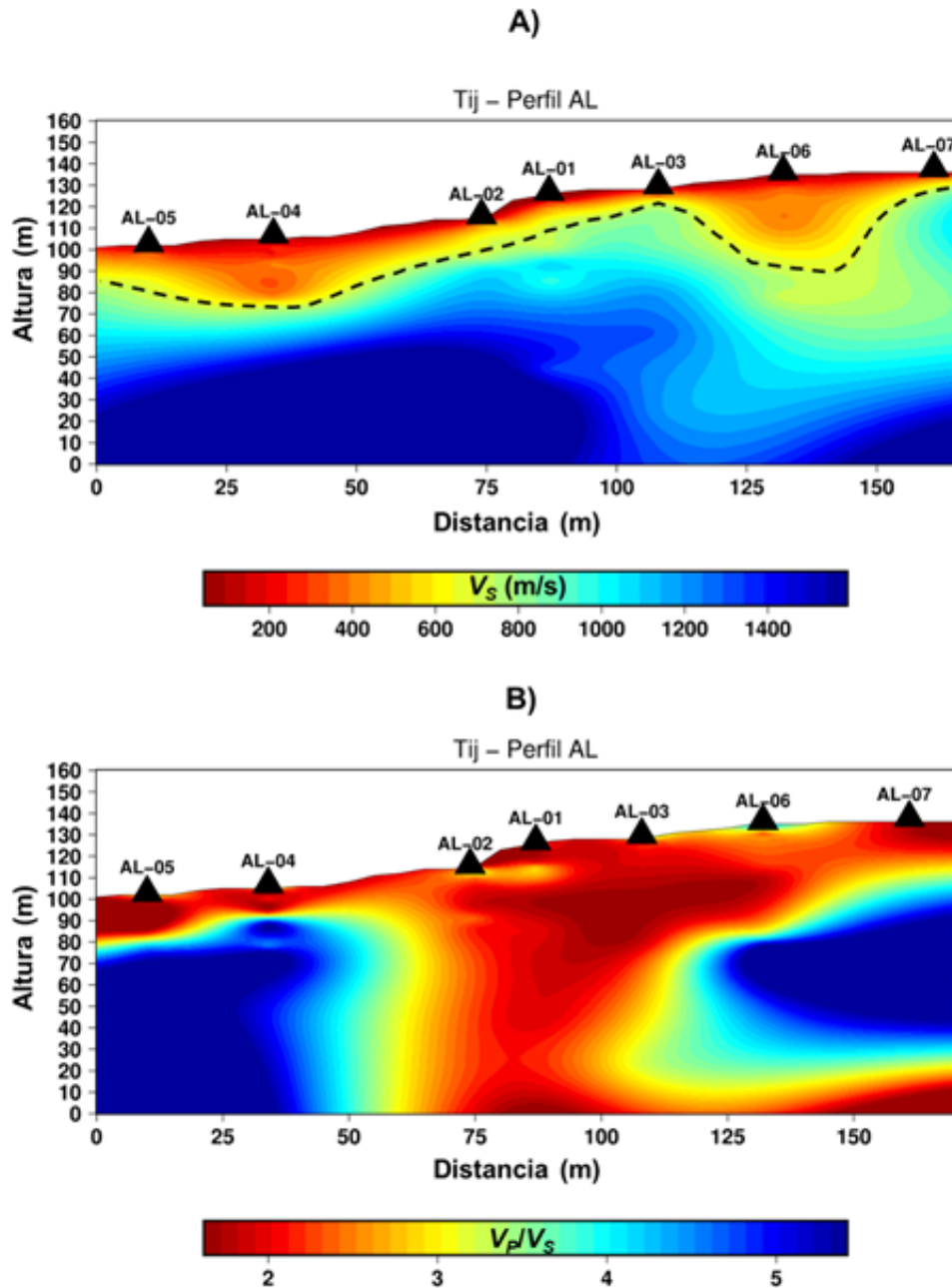


Figura 9. Perfil a lo largo de la dirección del deslizamiento de ladera de la colonia Vista Alamar, A) Perfil de contraste de velocidades de la onda de corte. B) Perfil de los cocientes V_p/V_s .

la cual separa la zona de bajas velocidades de aquellas altas que caracterizan el fondo del perfil. El rango de velocidades que representa a la superficie de deslizamiento (zona de transición), ha sido propuesta por varios autores quienes se apoyaron con métodos geológicos y geofísicos (*e.g.*, Göktürkler *et al.*, 2008; Delgado *et al.*, 2021; Bogoslovsky y Ogilvy, 1977).

En la Figura 9-A se observa, entre los puntos AL-03 y AL-07, una depresión que puede corresponder a material de relleno, cuyo espesor aproximado es de 30 m, los puntos AL-06 y AL-07 se encuentran al interior de la unidad habitacional Residencial Rincón de Otay (Figuras 5 y 6). Después del punto AL-03, localizado entre el deslizamiento y la unidad habitacional, hacia el sur, se observa que la superficie de deslizamiento presenta una inclinación mayor y es en esta parte, donde se observa el movimiento de material (Figura 3). Otra depresión, con materiales que presentan velocidades bajas, es observada en los puntos AL-04 y AL-05, los cuales están ubicados en la parte inferior del deslizamiento (calle Anáhuac), a unos cuantos metros del Cañón de la Amistad (al sur del punto AL-05). Esta depresión podría representar tanto material de relleno como material que se fue depositando pendiente abajo.

Los altos cocientes VP/VS se localizan en los extremos del perfil (Figura 9-B). Hacia el extremo sur podemos especular sobre la migración de fluidos hacia la parte inferior del deslizamiento. El cociente VP/VS incrementa cuando la saturación tiende al 100%, por lo que lo hace sensible al contenido de fluidos en el material (Liu y Zhao, 2015). El origen de los altos valores VP/VS en la parte norte del perfil, correspondiente a la parte superior del deslizamiento no es clara, por lo que es necesario extender el estudio y complementarlo con otras técnicas geofísicas (*e. g.*, métodos eléctricos). El alto valor en el punto AL-03 (Tabla 2) corresponde a la parte más somera (~30 cm), por lo que no se ve reflejado en el modelo 2D (Figura 9-A).

Conclusiones

En este estudio se llevó a cabo el uso de ruido sísmico y la metodología HVSR para caracterizar el deslizamiento ocurrido en la colonia Vista Alamar, Tijuana, Baja California. La metodología empleada, permitió la identificación de la posible superficie de deslizamiento y los resultados obtenidos corresponden con el movimiento observado en el campo.

La corona del deslizamiento está situada en el punto AL-03. La corona se extiende hacia el este y ha causado daño a las estructuras cercanas.

Los valores altos de VP/VS encontrados en la parte inferior del deslizamiento indican la presencia de fluidos, lo cual supone una migración de fluidos hacia la parte inferior del deslizamiento que era una depresión, probablemente el cauce de un arroyo orientado NNE-SSW y cuya pendiente es paralela a la del actual deslizamiento (Figura 5).

Derivado del análisis realizado se recomienda extender el estudio de ruido sísmico para estimar las dimensiones del deslizamiento y aplicar otras técnicas geofísicas, como los análisis eléctricos, con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Felipe Escalona por sus valiosos comentarios de revisión que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

El trabajo de LA-B es apoyado por el programa Investigadoras e Investigadores por México del CONACYT (proyecto 2602). Agradecemos el apoyo del M. C. José G. Acosta Chang, M. C. Luis H. Mendoza Garcilazo y de la Unidad Estatal de Protección Civil de Tijuana.

Referencias

- Aki, K., 1957. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–456.
- Aki, K., 1965. A Note on the Use of Microseisms in Determining the Shallow Structures of Earth's Crust. *Geophysics*, 30, 4, 665–666. <https://doi.org/10.1190/1.1439640>
- Angeles, A. D. S., 2020. La adaptación ante procesos de remoción en masa en Tijuana, B. C. El Colegio de la Frontera Norte, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 75.
- Aragón Arreola, M. D. J., 1994. Evaluación de riesgo geológico debido a movimientos de ladera en la Ciudad de Tijuana B.C., México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 124.
- Arintalofa, V., Yuliyanto, G., Harmoko, U., 2020. Subsurface characterization of Diwak-Derekan geothermal field by HVSR analysis method based on microtremor data. *AIP Conference proceedings* 2296, 020057, <https://doi.org/10.1063/5.0030356>.
- Bard. P. Y., 1999. Microtremor Measurements: A Tool for site effect estimation?, In *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), 1251-1279.
- Bergamo, P., Hammer, C., Fah, D., 2021. On the relation between empirical amplification and proxies measured at swiss and japanese stations: systematic regression analysis and neural network prediction of amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 111, No. 1, 101–120. <https://doi.org/10.1785/0120200228>
- Bergamo, P., Perron, V., Hammer, C., Faeh, D., Panzera, F., 2019. Assessing the Sensitivity of Site Condition Parameters towards seismic local Amplification and their potential Use for Site Response Prediction. 17th Swiss Geoscience Meeting, Fribourg, 2 p. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000390366>
- Bocco, G., Sánchez-Rodríguez, R. A., Reimann, H., 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). *Uso integrado de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. *Revista Frontera Norte* No. 10, vol. 5. Pp. 53-83.
- Bogoslovsky, V. A., Ogilvy, A. A., 1977. Geophysical methods for the investigations of landslides. *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, P. 562-571.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P. Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fäh, D., 2006a. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulation. *Geophysical Journal International*, 167, 2, 827–837. [doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x).
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P. Y., 2006b. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. *Earth Science Reviews*, 79, 3-4, 205–227. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004>
- Cheng, T., 2020. Statistical methods for metermining f0 and its mariance from mingle- and multi-station HVSR measurement. Ph. D. Thesis. The University of Texas, Austin.
- Cruden, D. M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 43.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., 1996. Landslide types and processes. In Schuster, R. L., Turner, A. K., (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press,

Washington, DC, pp 36–75.

- Delgado, J., Galiana-Merino, J. J., García-Tortosa, F.J., Garrido, J., Lenti, L., Martino, S., Peláez, J. A., Rodríguez-Peces, M. J., Sanz de Galdeano, C., Soler-Llorens, J. L., 2021. Ambient noise measurements to constrain the geological structure of the Güevéjar landslide (S Spain). *Applied Sciences*, 11, 1454. <https://doi.org/10.3390/app11041454>
- Delgado-Argote, L. A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., Frías-Camacho, V. M., 1996. Estudio de riesgo reológico en Tijuana, Baja California con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno. *GEOS*, Vol. 16, No. 2. Pp 57-89.
- Delgado-Argote, L. A., Gómez-Castillo, G., Peña-Alonso, T. A., Torres-Carrillo, X. G., Avilez-Serrano, P., 2011. Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, Tijuana, Baja California. *GEOS*, 30 (2).
- Delgado-Argote, L. A., Hurtado-Brito, J. C., Avilez-Serrano, P., Gómez-Castillo, G., 2012. Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: El caso del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente. *GEOS*, 32(2), 1-25.
- Delgado-Argote, L. A., Pérez-Flores, M. A., Herrera-Barrientos, F., Sarychikhina, O., Contreras-López, M., Ochoa-Tinajero, L., Avilés-Esquivel, T. A., 2017. Interpretación geológica y geoeléctrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleo drenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California. *GEOS*, 37(2), 1-17.
- Del Gaudio, V., Muscillo, S., Wasowski, J., 2014. What we can learn about slope response to earthquakes from ambient noise analysis: An overview. *Engineering Geology*, 182, 182-200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.010>
- Domínguez-Morales, L., Castañeda-Martínez, A., González-Huesca, A. E., 2016. Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Flores-Estrella, H., Ávila-Barrientos, L., González-Huizar, H., 2022. Seismological footprint of an anomalous atmospheric activity registered in March 2021, in Baja California, Mexico. *Acta Geophysica*, <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00941-1>.
- Flores, H., Malischewsky, P., Jentzsch, G., 2013. H/V spectral ratio analysis and Rayleigh modelization in Eastern Thuringia, Germany. *Geofísica Internacional*, 52-4: 355-364.
- Galea, P., D'Amico, S., Farrugia, D., 2014. Dynamic characteristics of an active coastal spreading area using ambient noise measurements (Anchor Bay, Malta). *Geophysical Journal International*, 199, 1166-1175. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggu318>.
- Gallipoli, M. R., Lapenna, V., Lorenzo, P., Mucciarelli, M., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in Southern Italy. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, pp. 117-128.
- Göktürkler, G., Balkaya, Ç., Erhan, Z., 2008. Geophysical investigation of a landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 65, 84–96.
- Gómez Castillo, G., 2010. Peligro geológico en la zona de playa Saldamando- El mirador en la autopista Tijuana – Ensenada. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Tesis de maestría, p. 105.

- Hussain, Y., Martínez-Carvajal, H., Condori, C., Uagoda, R., Cárdenas-Soto, M., Cavalcante, A. L. B., Cunha, L. S. Da., Martino, S., 2019. Ambient seismic noise: a continuous source for the dynamic monitoring of landslides. *Terræ Didactica*, 15, 1-5, e01001. doi: 10.20396/td.v15i0.8652455
- Imposa, S., Grassi, S., Fazio, F., Rannisi, G., Cino, P., 2017. Geophysical surveys to study a landslide body (north-eastern Sicily). *Natural Hazards*, 86, S327-S343. DOI 10.1007/s11069-016-2544-1
- INEGI, 2022. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>
- Jongmans, D., Garambois, S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, No. 2, pp. 101-112.
- Kanai, K., Osada, T., Tanaka, T., 1954. Measurement of the microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 32, 199-209.
- Kjekstad, O., Highland, L., 2009. Economic and social impacts of landslides. In Sassa, K., Canuti, P. (Eds.). *Landslides-Disaster Risk Reduction*. Springer. P. 649.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 5, pp. 1574-1594.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1994a. Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.
- Lermo, J., Chávez-García, F. J., 1994b. Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.
- Liu, Z., Zhao, J., 2015. An experimental Study of Velocity-Saturation Relationships in Volcanic Rocks. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 8, 142-152.
- López-Álvarez, L. A., 2001. Diagnóstico de riesgos urbanos en el área metropolitana de Tijuana. H. Ayuntamiento Constitucional del Municipio de Tijuana B. C. <http://www.proteccioncivil.tijuana.gob.mx/pdf/planes/estudios/>
- Lunedei, E., Malischewsky, P., 2015. A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations. In: Ansal A. (ed.) *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Vol. 39. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_15.
- Malischewsky, P., Scherbaum, F., 2004. Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves. *Wave Motion*, 40, 57-67.
- Malischewsky, P., Zaslavsky, Y., Gorstein, M., Pinsky, V., Tran, T. T., Scherbaum, F., Flores, H. E., 2010. Some new theoretical considerations about the ellipticity of Rayleigh waves in the light of site effect studies in Israel and Mexico. *Geofísica Internacional*, 49, 141-152.
- Mendoza-Garcilazo, L. H., Vásquez-Hernández, S., Rosquillas-Navarro, A., 2007. Movimientos de ladera o de masas de terreno en Tijuana, B. C. Sus causas y prevenciones. Ayuntamiento Constitucional de Tijuana.
- Méric, O., Garambois, S., Malet, J.-P., Cadet, H., Guéguen, P., Jongmans, D., 2007. Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, No. 2, pp.137-148.

- Mucciarelli, M., Herak, M., Cassidy, J., 2009. Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Dordrecht.
- Muzli, M., Kambali, R. A. P., Nugraha, J., Sulastri, S., Hakim, A. R., Rohadi, S., Triyono, R., Riama, N. F., Karnawati, D., 2021. Site characterizations of BMKG seismic network, Indonesia, based on HVSR analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 873, The 3rd Southeast Asian Conference on Geophysics 3-5 November 2020, Bandung, Indonesia (Virtual). doi:10.1088/1755-1315/873/1/012025
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic characteristics Estimation of Subsurface using Microtremors on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura, Y., 1996. Real-time information systems for hazards mitigation. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Nakamura, Y., 2000. Clear Identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12 World Conference of Earthquake Engineering, New Zealand.
- Nogoshi, M., Igarashi, T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), Journal Seismological Society Japan, 24, 26-40.
- Noguchi, T., Nishimura, I., Kagawa, T., 2021. Estimation of subsurface structure of landslide area based on microtremor observation in the Hojoshima, Nawashiro and Amedaki area, Tottori, Japan. International Journal of GEOMATE, Vol.21, Issue 88, pp.48-53. DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.88.gxi279>
- Oliva González, A.O., Mascareño Jiménez, D., Gallardo Amaya, R.J., Berumen Rodríguez, M.A., 2021. Urban growth and landslide risk in Tijuana, Mexico. Academia Letters, Article 3386. <https://doi.org/10.20935/AL3386>.
- Panzer, F., D'Amico, S., Lotteri, A., Galea, P., Lombardo, G., 2012. Seismic site response of unstable steep slope using noise measurements: the case study of Xemxija bay area, Malta. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 11, 3421-3431. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-3421-2012>.
- Pazzi, V., Tanteri, L., Bicocchi, G., D'Ambrosio, M., Caselli, A., Fanti, R., 2017. H/V measurements as an effective tool for the reliable detection of landslide slip surfaces: Case studies of Castagnola (La Spezia, Italy) and Roccalbegna (Grosseto, Italy). Physics and Chemistry of the Earth, 98, 136-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.014>
- Pradhan, S. P., Siddique, T., 2019. Mass Wasting: An overview. In Pradhan, S. P., Vishal, V., Singh, T. N., (Eds.), Landslides: Theory, Practice and Modelling. Advances in Natural and Technological Hazards Research, Springer, P. 313.
- Protección Civil Tijuana, 2020. Ficha técnica Vista Alamar, 30 de marzo 2020. XXIII Ayuntamiento 2019-2021, Tijuana, Baja California, P. 1
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., Rezaei, H., 2020. Evaluation of ground dynamic characteristics using ambient noise measurements in a landslide area. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79, 1749–1763. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01637-5>
- SEDATU, 2014. Atlas de Riesgos Naturales del municipio de Tijuana 2014. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.

- SESAME, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation SESAME European Research Project, deliverable D23.12.
- Suhendra, Z. B. C., Sugianto, N., 2018. Geological condition at landslides potential area based on microtremor survey. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, No. 8, 3007-3013.
- Tebbouche, M. Y., Benamar, D. A., Hassan, H. M., Singh, A. P., Bencharif, R., Machane, D., Meziani, A. A., Nemer, Z., 2022. Characterization of El Kherba landslide triggered by the August 07, 2020, Mw = 4.9 Mila earthquake (Algeria) based on post-event field observations and ambient noise analysis. *Environmental Earth Sciences*, 81, 46. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10172-8>
- Torrese, P., Rossi, A. P., Unnithan, V., Pozzobon, R., Borrmann, D., Lauterbach, H., Luzzi, E., Sauro, F., 2020. HVSr passive seismic stratigraphy for the investigation of planetary volcanic analogues. *Icarus*, 351, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113970>.
- Tuan, T. T., Scherbaum, F., Malischewsky, P. G., 2011. On the relationship of peaks and troughs of the ellipticity (H/V) of Rayleigh waves and the transmission response of single layer over half-space models: Relationship of peaks and troughs of H/V-ratio. *Geophysical Journal International*, 184, 793–800. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04863.x>
- Turner, A. K., 2018. Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3, 70. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>
- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D., 2019. The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. doi.org/10.1029/2019GC008515.
- Wong, H. H., Ho, K. K. S., Chan, Y. C., 1997. Assessment of consequence of landslides. In Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Balkema, Rotterdam.
- Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Tapırdamaz, M. C., Özalaybey, S. Ç., Tarancıoğlu, A., Erkan, B., 2010. Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active–passive array surface wave and single-station microtremor methods. *Geophysical Journal International*, 182, 1603–1618. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04710.x>
- Zuccarello, L., Paratore, M., La Rocca, M., Ferrari, F., Messina, A., Branca, S., Contrafatto, D., Galluzzo, D., Rapisarda, S., García, L., 2016. Shallow velocity model in the area of Pozzo Pittarone, Mt. Etna, from single station, array methods and borehole data. *Annals of Geophysics*, 59, 4, doi:10.4401/ag-7086.

Manuscrito recibido: 23 de noviembre de 2022

Recepción del manuscrito corregido: 16 de diciembre de 2022

Manuscrito aceptado: 20 de enero 2023

ALGUNAS TÉCNICAS DE SONDEO VERTICAL DE LA ATMÓSFERA URBANA

J. Adrián Álvarez-Pérez y Napoleón Quiroz-Amoroso y Adalberto Tejeda-Martínez

Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz (México)

E-mail: adrianalvarezp@gmail.com, napoleon108@gmail.com y atejeda.martinez@gmail.com

Resumen

Para la obtención de datos en la baja atmósfera se suelen realizar radiosondeos con globos o algún otro vehículo que transporte los instrumentos de medición, o bien mediante sensores remotos que hacen uso de ondas de sonido o haces de luz. Estos sondeos son necesarios en particular para comprender el comportamiento en la vertical de las alteraciones climáticas por la urbanización. En este texto se hace un repaso de técnicas de sondeos verticales de la atmósfera, y se ejemplifica el uso de drones y de sodares con mediciones en dos ciudades de tamaño medio ubicadas en la porción central del litoral mexicano del Golfo de México: Xalapa, a media montaña (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), y Veracruz, en la costa (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm).

Palabras clave: Baja atmósfera, sensores remotos, técnicas de sondeos verticales.

Abstract

To obtain data in the lower atmosphere, radio soundings are usually carried out with balloons or some other vehicle that transports the measuring instruments, or through remote sensors that make use of sound waves or light beams. These probings are required to understand the vertical behavior of climate change due to urbanization. In this text, a review of vertical survey techniques of the atmosphere was made, and the use of drones and sodars were exemplified with measurements made in two medium-sized cities in the central region of the Mexican coast of the Gulf of México: Xalapa, in the middle of the mountains. (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), and Veracruz, on the coast (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm).

Keywords: lower atmosphere, remote sensors, vertical survey techniques

Introducción

Los efectos de la urbanización en el clima local rebasan el dosel y alcanzan alturas que dependen del clima regional, la cubierta superficial (permeabilidad y propiedades térmicas), su estructura (rugosidad y reflexión de radiación entre los elementos urbanos), y del metabolismo de la ciudad como reflejo de la actividad humana (Landsberg, 1981; Stewart y Oke, 2012). En revisiones sobre climatología urbana, como la de Arnfield (2003) o la de Souch y Grimmond (2006), se evidencia que la preocupación fundamental ha sido la estructura y evolución de los campos horizontales de temperatura, calidad del aire, precipitación, viento y en menor medida radiación

solar. El estudio de la estructura vertical de las atmósferas urbanas es menor en cantidad, pero muy relevante, pues busca, en primer término, la explicación tridimensional del fenómeno a partir de la comprensión de los intercambios de calor sensible y los efectos de los cañones urbanos en la reflexión y dispersión de la radiación solar; del calor latente y del ciclo del agua —permeabilidad y contenido de agua de las superficies—, y de la transferencia de momento mecánico, principalmente por la turbulencia que generan las edificaciones y la superficie. En segundo lugar, las mediciones verticales también son fundamentales para la modelación de la dispersión de contaminantes y de la climatología a escala de la ciudad (Jacobson, 1999).

Por otra parte, Stewart y Oke (2012) se han ocupado de la ambigüedad en la clasificación de zonas como urbanas y rurales. En efecto, en muchos casos el tránsito de una a otra se da en modos graduales que dejan a vastos territorios en la mayor indefinición al señalarlos como suburbanos. Además, como apuntan los mismos autores, la palabra “clima urbano” se puede referir a una multitud de ambientes determinados por las características físicas, económicas, culturales, sociales y otras, de cada ciudad, por lo que proponen una clasificación de zonas climáticas aplicable a estudios térmicos, pero que se pueda extrapolar a otros campos de la climatología urbana. Más adelante regresaremos a este punto.

Hasta aquí, quedan como ideas centrales la necesidad de realizar estudios del comportamiento en la vertical de las alteraciones climáticas por la urbanización, los que tendrían que responder a interrogantes propias del contexto urbano, para lo cual la clasificación de Stewart y Oke (2012) de las zonas climáticas locales (local climate zones) sería de ayuda. La medición de dichas alteraciones es fundamental para anticipar su evolución en las décadas venideras, y muy probablemente será rutinaria hacia mediados del siglo, desde luego con tecnologías insospechadas. Por el momento, el uso de drones y de sodares, como se verá más adelante, es una posibilidad que se ejemplificará con mediciones en dos ciudades de tamaño medio en la porción central del litoral mexicano del Golfo de México, Xalapa, a media montaña (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm), y Veracruz, en la costa (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm). Para mayores detalles ver Quiroz-Amoroso (2017) y Álvarez-Pérez (2016).

Técnicas de sondeo

En esta sección se describirán algunas técnicas de sondeo atmosférico, como el uso de globos libres, cautivos o controlados, aviones tripulados y el lidar. En la siguiente sección nos ocuparemos del sodar y el uso de dron.

Globos

Los sondeos con globo libre son ampliamente conocidos: globos de látex con una radiosonda atada a ellos, equipada con sensores que obtienen información de humedad del aire, temperatura, presión atmosférica y, de la trayectoria del globo, se infieren la dirección y rapidez del viento. Esta información es transmitida por ondas de radio a una computadora en superficie que codifica y guarda la información. En observatorios sobre el continente y desde algunos buques, se procura realizar dos lanzamientos por día, a las 0 y 12 horas del meridiano de Greenwich. Los datos están disponibles en la página del Departamento de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Con esta técnica se puede alcanzar una altura de 30 km aproximadamente antes de romperse el globo, y mediciones bajo condiciones de alta convección. Su desventaja es que para campañas intensivas en un sitio en específico donde se requieren varios lanzamientos en un corto periodo, resulta costoso al no poder recuperar los sensores.

Un globo cautivo o sonda anclada consiste principalmente en un globo atado a un hilo resistente enrollado en un malacate o cabestrante con uno o varios sensores meteorológicos atados al hilo de sujeción. Al desenrollar el hilo, el globo eleva los sensores registrando las variables meteorológicas de interés a una frecuencia dada. Se pueden realizar comparaciones entre los datos del ascenso y el descenso del globo, lo que ayuda a depurar datos erróneos por mal funcionamiento de los instrumentos, o en un periodo relativamente corto obtener información de dos sondeos.

Un inconveniente es que la altura que alcanza el globo depende de la longitud del hilo que lo sujeta, por lo tanto, sólo se pueden obtener perfiles de variables hasta alturas de 800 a 1000 m por encima

del nivel del suelo, principalmente por el peso que ejerce el hilo que sujeta el globo, el cual aumenta conforme el globo se eleva, y a la intensidad de viento.

El sondeo con globo cautivo tiene la ventaja de que en la obtención de datos de las capas bajas de la atmósfera no se pierden los sensores, a diferencia de un radiosondeo con globo libre (Gutiérrez- y otros, 2007). En las últimos tres décadas se han sucedido diversos intentos por mejorar estos sistemas de sondeo utilizando materiales más ligeros, hasta poder alcanzar alturas aproximadas de 8,000 m (Bely y Ashford, 1995; Aglietti, 2009).

Los globos meteorológicos controlados (CMET, por sus siglas en inglés) fueron inventados por Paul Voss, del Smith College Picker Engineering Program, en Northampton, Massachusetts. Sobre su funcionamiento y algunas aplicaciones ver Voss y otros (2010). Son globos con volumen de aire controlado por una bomba con válvula que suministra o retira helio del globo a través de una señal transmitida por satélite. Esta técnica de sondeo se utiliza principalmente para estudios en la baja atmósfera para conocer el transporte de los flujos de aire a diferentes alturas y sus correspondientes datos meteorológicos.

Un ejemplo de su uso fue el monitoreo del transporte de contaminantes por corrientes de viento realizado en la ciudad de México en el 2006 en el proyecto Iniciativa para Megaciudades: Observaciones de investigación local y global (MILAGRO, por sus siglas en inglés), donde se utilizaron globos CMET con un tamaño de 0.9 m de diámetro y 3.2 m de longitud con una carga útil de 400 gramos, que contenía una sonda que medía velocidad del viento en la horizontal, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa además de un módem satelital que permitía recopilar los datos y ordenaba al globo realizar ascensos y descenso durante el vuelo.

Cometa de viento

Aquí se le llamará cometa a un dispositivo compuesto por un armazón ligero y plano sobre la cual se extiende y pega papel o tela, con una cola de cintas o trozos de papel, el cual se sujeta con un hilo y se arroja al aire para que el viento lo eleve. En algunas regiones de México se le llama papalote.

Hacia finales de 1980 el Instituto Cooperativo de Investigación de las Ciencias Ambientales (CIRES) de la Universidad de Colorado empleó cometas con una serie de sensores electrónicos atados en intervalos a lo largo de una cuerda para obtener perfiles del campo eléctrico atmosférico en las Islas Navidad en el Pacífico Ecuatorial (Balsley, 1992).

La cometa usada por CIRES posee un diseño de paracaídas aerodinámico tipo Ram – air, que le proporciona estabilidad, portabilidad y la capacidad de cargar equipos con peso razonable a gran altitud. Por lo general se construyen con telas resistentes como las llamadas Mylar, Spectra o Kevlar o combinación de ellas. El área de la cometa se extiende desde 5 m² hasta 20 m².

Para que ascienda y se mantenga la cometa en vuelo a una altura deseada, se requieren velocidades de vientos aproximadas de 5 a 7 m s⁻¹. Los diferentes tamaños de la cometa dependen de la tensión que puede soportar el cabrestante para enrollar o desenrollar la cuerda que sujeta al cometa y la carga útil.

Aviones tripulados-instrumentados

A partir de 1930 el uso de aeronaves tripuladas para realizar sondeos en la atmósfera fue cada vez más frecuente, ya que por su capacidad para obtener perfiles verticales y de áreas extensas a cierta altura, se vio como una forma económica para conocer las características de la atmósfera no superficial en una región (para más detalles de esta técnica, ver Haluani, 2014).

La utilización de esta técnica para la obtención de la altura de la capa límite atmosférica está basada en la detección de discontinuidades de temperatura, como inversiones térmicas en el tope de la capa. Normalmente los sensores se sitúan lejos de la perturbación del flujo que genera el propio avión. Debido a la velocidad del avión (entre 50 ms⁻¹ y 100 ms⁻¹) la respuesta de los sensores tiene que ser suficiente como para ofrecer medidas adecuadas de las características de la capa límite

Lidar

El contenido de humedad, las particularidades térmicas y la concentración de partículas de la capa límite han permitido la utilización de una serie de equipos basados en el principio de funcionamiento del radar, diseñados para medir el espesor de dicha capa en función de las intermitencias detectadas en la interfase entre las dos capas y que suele registrarse como una señal de energía de retorno. En particular el lidar (Light Detection and Ranging) usa la presencia en la capa límite de polvo y contaminación para obtener el espesor de mezcla basándose en la propiedad de esta capa de homogeneizar las concentraciones de los componentes que hay en ella. Transmite hacia la atmósfera un haz luminoso, emitido por un láser

pulsado, que sufre dispersión en la capa límite por la presencia de moléculas del aire, gotitas de lluvia y aerosoles (Garratt,1992).

Sondeos en zonas urbanas de Veracruz

Para evaluar la influencia de la urbanización en el clima en altura, es necesario realizar sondeos atmosféricos con una resolución espacial de decenas de metros o menos. Esto se puede conseguir mediante sensores acoplados a un dron, con un sodar o un lidar, por ejemplo.

Los sondeos que se mostrarán en esta sección se realizaron con dron en la ciudad de Xalapa en los campos deportivos de la Unidad de Servicios Bibliotecarios y de Información (USBI-X en lo sucesivo) de la Universidad Veracruzana (19°30'44.82"N, 96°54'53.79"W, 1359 msnm) y mediante sodar en la Posta Zootécnica Torreón del Molino de la misma Universidad en la ciudad de Veracruz (19°10'17.86"N, 96°12'37.00"W, 15 msnm; Pozotomo en adelante). Ambos sitios caen en los tipos en la clasificación de zonas urbanas de Stewart y Oke (2012) vi(b), es decir, espacios abiertos con edificaciones de altura baja y árboles dispersos (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades geométricas y de la cubierta superficial de la USBI X y de la POSOTOMO, según las parametrizaciones clasificación de Stewart y Oke (2012), en la zona climática local vi (b). Los valores son adimensionales salvo que se declaren las unidades. Se consideró un radio de 2 km a la redonda del punto de medición.

Propiedad	Valor Aproximado
Factor de vista o fracción de hemisferio celeste visible	0.6 a 0.8
Altura entre anchura de los cañones urbanos	0.3 a 0.8
Porcentaje de superficie edificada	20 a 40
Porcentaje de superficie impermeable	20 a 50
Altura de rugosidad (m). Promedio ponderado de la altura de edificios y plantas (m)	3
Admitancia (J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹)	1,100 a 1,800
Albedo	0.13 a 0.25
Emisión de calor antropogénico (w m ⁻²)	< 25

Sondeos con dron

El vehículo aéreo no tripulado (VANT, por sus siglas en español o dron, término introducido al Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española en su edición de 2013), se define como un vehículo que puede volar semi o completamente autónomo gracias a un ordenador interno y una serie de sensores (UNEP, 2013).

El dron puede elevarse desde cientos de metros hasta kilómetros, dependiendo del modelo y capacidad, que se reflejan principalmente en su precio y si su uso es civil o militar. Además de la capacidad de transportar carga meteorológica útil, el dron es utilizado para capturar imágenes o video y obtener mapeos de un sitio de interés, lo que permite identificar la topografía del lugar, zonas de deforestación, y ayuda a tener un registro gráfico de la zona de estudio (UNEP, 2013).

Las principales ventajas como método para la obtención de datos de la atmósfera es la capacidad de realizar perfiles con una velocidad controlada, como en el caso del multicoptero, que puede mantenerse estático durante el vuelo, lo que ayuda a tener una mejor resolución para sondeos en la capa límite superficial, urbana o rural. Durante el vuelo se pueden obtener imágenes y videos de alta resolución, además de que los sensores que

se utilizan pueden ser recuperados, a diferencia de otras técnicas como los sondeos con globo libre. Al no necesitar equipo adicional más que el control remoto, el dron es ligero y fácil de transportar, además de que se puede desplazar en diferentes direcciones tanto en la vertical como en la horizontal. Puede realizar las mismas funciones que los sondeos con avión instrumentado pero a menor costo tanto de equipo como de personal (Haluani, 2014).

Hay también limitantes que se deben tener en cuenta al usar este método, como el tiempo de vuelo y el peso de la carga de equipo meteorológico útil. No se pueden realizar vuelos en presencia de tormentas o fuertes rachas de viento. Los accidentes de vuelo dependen del mantenimiento del equipo, su buena programación y la experiencia del piloto remoto. La interferencia de señales de radio o de otro tipo puede ocasionar fallas durante el vuelo de los drones operados por control remoto.

Del 9 al 11 de agosto del 2016 en la USBI-X se llevaron a cabo los sondeos que se reportan aquí, con un data logger Raspberry Pi provisto de un sensor de temperatura y humedad relativa (sensor SHT71) y de uno de presión atmosférica (BMP180) (Figura 1), adheridos a un dron (Figura 2) modelo DJI F500.

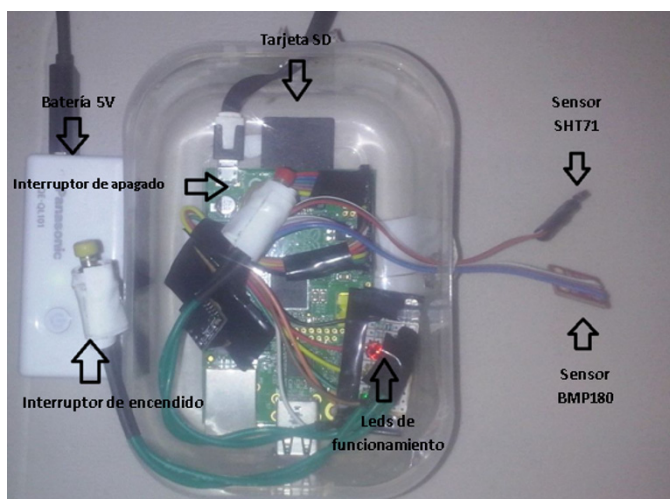


Figura 1. Diseño final de la sonda Raspberry pi modelo B donde los sensores se encuentran por fuera del recipiente que contiene la tarjeta y el circuito.

Además del dron (e) y sonda Raspberry Pi (f), se emplearon baterías LiPo (a), un control remoto (b), un tripié (c), una pantalla que recibe señal de radio (d) y una cámara GoPro que graba el video en tiempo real del ascenso del dron (g) (Figura 2). Se montó la sonda Raspberry Pi en la base inferior del dron y fue programada para registrar datos cada cinco segundos. La máxima elevación alcanzada fue de 800 metros a una velocidad de ascenso constante de 3ms^{-1} .

La pantalla con la que cuenta el dron en superficie recibe la señal del video tomado por la cámara GoPro del dron y monitorea la velocidad de ascenso del dron, su estabilidad, la carga de la batería, el

GPS del dron, la altura a la que se encuentra el dron y la detección de fenómenos meteorológicos como nubosidad, corrientes de aire, entre otros (ver Figura 3).

De la lectura de la pantalla se obtuvieron datos que se anotaban manualmente cada cien metros: altura, condiciones meteorológicas y características del vuelo como la estabilidad del dron, la variación de la velocidad de ascenso o descenso por rachas de viento y la presencia de nubes, con el fin de complementar el análisis de los perfiles de temperatura y humedad relativa ya que el registro comprende los fenómenos que pueden influir en el comportamiento de estas dos variables (tabla 2). Las



Figura 2. Dron DJI F500 con Raspberry Pi. USBI-X 9 al 11 de agosto de 2016.



Figura 3. Pantalla que se usa para los vuelos con dron.

Tabla 2. Formato para registro de altura cada cien metros del dron y las condiciones meteorológicas y mecánicas durante el vuelo.

Hora de inicio: 19:00	Co.Me.: 7/8	Número de batería: 2
Hora final: 19:07	Tip.Nub.: Cumulus/Estratocumulus	Fecha: 30/Agosto/2016
Altura [m]	Tiempo de vuelo	Observaciones
100	00:35	Entra a nube en 200 metros de ascenso En 500 metros sale de la nube Corrientes ascendentes (ascenso) Corrientes ascendentes en descenso (desde los 700 m)
200	01:09 [Nube]	
300	01:42 [Nube]	
400	02:13 [Nube]	
500	02:48	
600	02:21	
700	03:54	

figuras 4 a 8 muestran los resultados obtenidos con la aplicación de esta técnica de sondeo con dron.

En general, en las figuras 4 a 8 se observa la disminución de la temperatura con la altura y el registro de inversiones térmicas de entre tres y dos grados. Con respecto al data logger Raspberry-Pi se puede decir que es adecuado para el registro de la variación de la temperatura con la altura y es capaz de detectar inversiones térmicas y variaciones de temperatura debidas al transporte que genera la capa límite turbulenta.

Sondeos con SODAR

El sodar (por sus siglas en inglés Sonic Detection and Ranging) es un instrumento meteorológico para medir la dispersión de ondas acústicas en un volumen de la atmósfera a distancia, sin la necesidad de que se sitúe físicamente en la porción de volumen donde se realizan las mediciones. Se usa para medir velocidad, intensidad y dirección del viento en la vertical, y la estructura termodinámica de la capa baja de la atmósfera. Un sodar es semejante a un radar, excepto que se usan ondas de sonido y no de radio.

Su funcionamiento se basa en una antena que emite pulsos cortos de sonido hacia la atmósfera que las heterogeneidades de la temperatura del aire y de la turbulencia de pequeña escala

dispersan y reflejan. La antena entonces recibe los pulsos producidos por el eco, generado por efecto Doppler, que varían según la rapidez del viento, la turbulencia y la estructura térmica. Estos ecos contienen información detallada sobre la estructura de la turbulencia en la capa límite atmosférica; esta información se obtiene evaluando el espectro de energía acústica que regresa al sodar producido por el eco y así es posible determinar la rapidez del viento.

El sodar registra la energía acústica reflejada, llamada backscatter. La potencia acústica causada por el eco que llega al sodar es proporcional a la turbulencia térmica. Por lo tanto la intensidad del eco contiene la información acerca de la distribución vertical de las capas turbulentas en la atmósfera; cuanto más intensa es la energía acústica reflejada, mayor turbulencia se presenta en la atmósfera. El llamado sodar Doppler usa diferencias de frecuencias llamadas cambio Doppler entre la energía acústica transmitida y la reflejada. Los resultados de la rapidez y dirección del viento en la horizontal representan un promedio en un intervalo de tiempo determinado. Las alturas son asignadas acorde al viaje de la energía acústica emitida por el sodar y al tiempo que tarda la señal desde la antena a los blancos de dispersión y de regreso a los transductores (para más detalles, ver Remtech And Radian Electronics System, 2003).

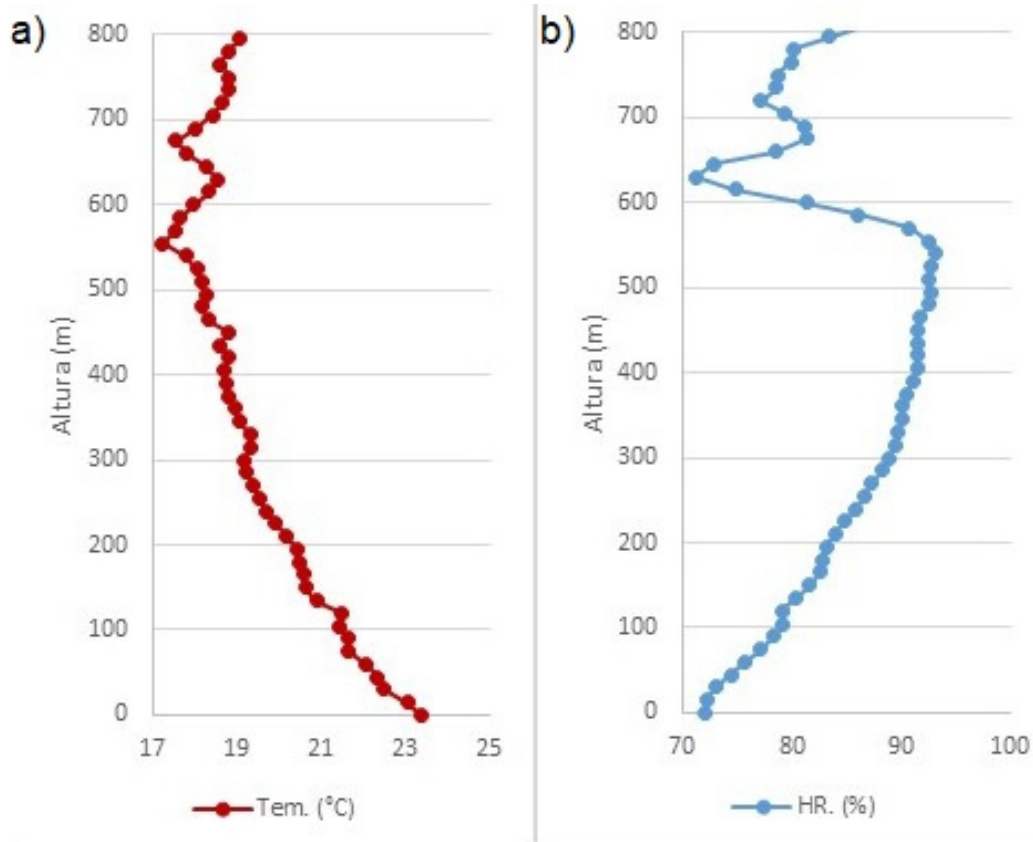


Figura 4. a) Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. b) Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 09 de agosto del 2016 a las 13:10 horas.

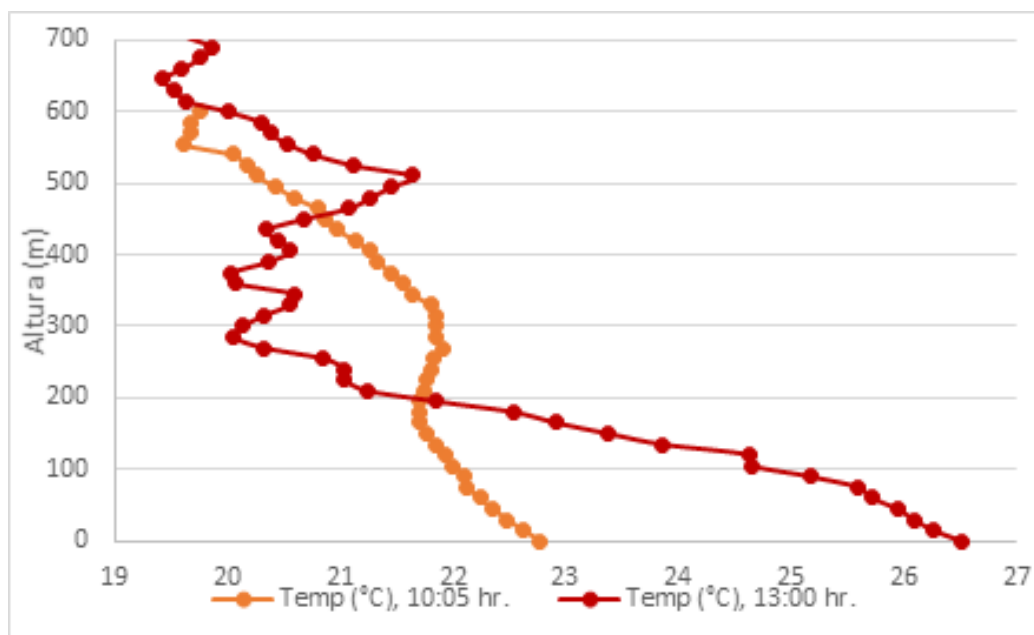


Figura 5. Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 10 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 hOrAs .

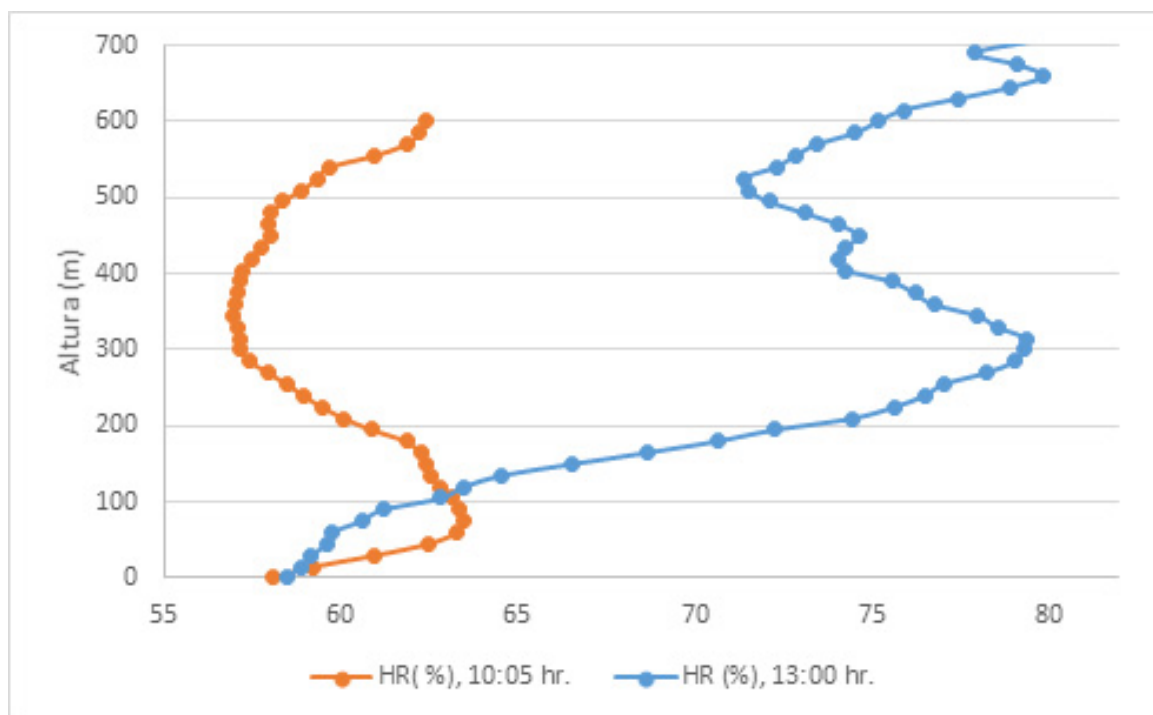


Figura 6. Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 10 de agosto del 2016 a las 10:05 y 13:00 horas.

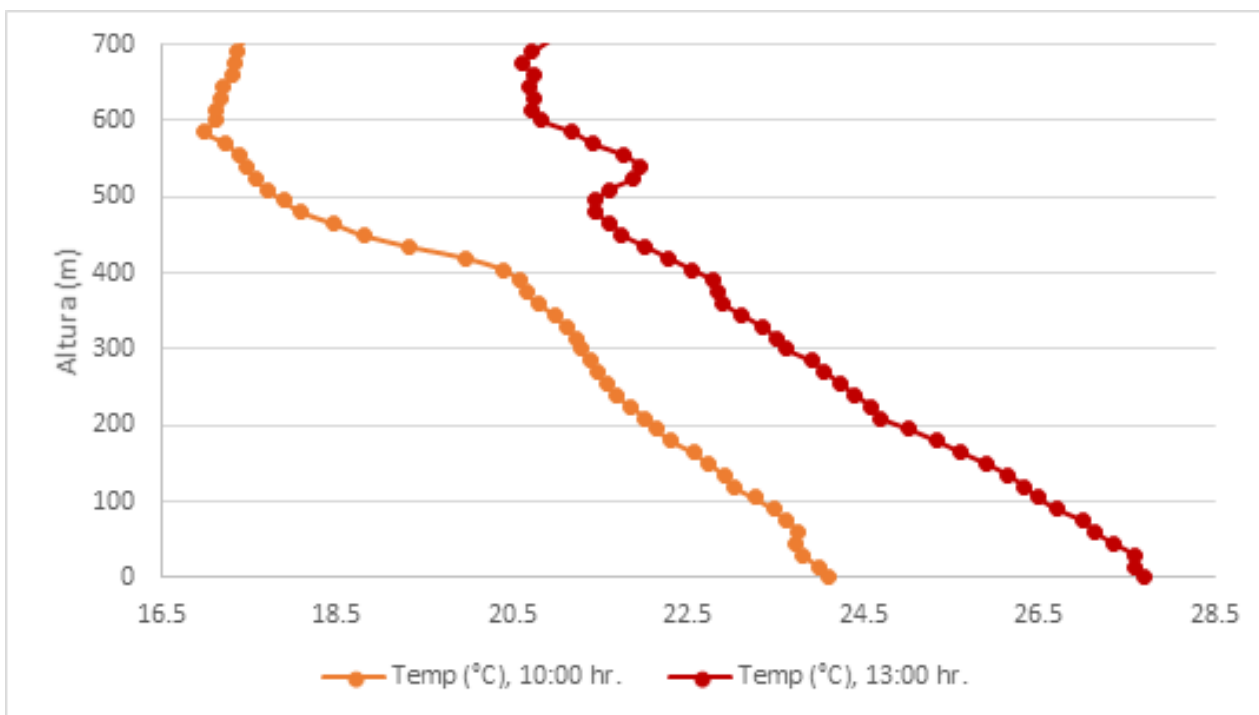


Figura 7. Comportamiento de la temperatura con la altura. Sondeo con dron en la USBIX. 11 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 horas.

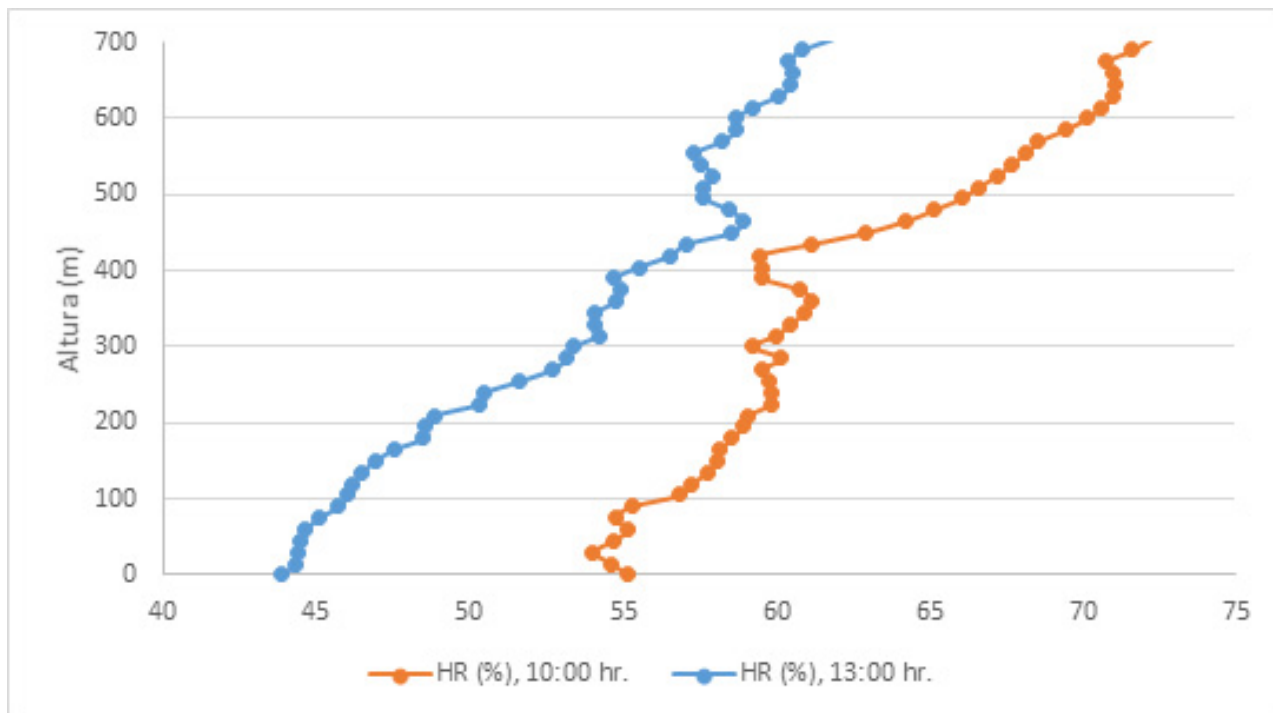


Figura 8. Comportamiento de la humedad relativa con la altura. Sondeo con dron en la USBI-X. 11 de agosto del 2016 a las 10:00 y 13:00 horas.

Para la descripción del viento tanto en la vertical como en la horizontal en los diferentes perfiles, se ha utilizado un método gráfico que indica la rapidez del viento ascendente o descendente, así como gráficas de la rapidez y dirección del viento en los diferentes niveles a partir de 30 metros sobre la superficie; la distancia entre cada nivel es de 10 metros. Los perfiles de viento horizontal indican la dirección hacia donde se dirigía el viento en cada uno de los niveles a partir del punto de medición.

Como ejemplos se presentan casos de perfiles obtenidos en la Pozotomo. Durante estas mediciones se presentó nubosidad dispersa en la zona montañosa central del estado, interactuando con el frente frío número 19 en el noroeste del Golfo de México y con una débil vaguada en las costas de la entidad.

A las 8:20 horas el viento horizontal fue mayormente con dirección hacia el este entre 40 y 160 metros de altura, a los 30 metros se dirigía hacia el noreste.

Entre 30 y 100 metros la rapidez aumenta de 2.7 a 4.4 m/s, fluctúa entre 4.3 y 4.6 m/s en 110 hasta 150 metros, en 160 metros disminuye hasta alcanzar una rapidez de 3.5 m/s (Figura 9). El viento vertical a las 8:20 horas presentó subsidencia entre 30 y 160 metros, aumentando la rapidez de 0.16 a 0.24 m/s entre 30 y 60 metros; también presentó aumento entre 100 y 160 metros de 0.12 a 0.18 m/s, y se presentó una disminución de la intensidad del viento de 0.24 a 0.12 m/s entre 60 y 100 metros (Figura 10).

Desde luego estas mediciones sólo son el primer paso de análisis subsecuentes, como el ajuste de perfiles de viento para la componente horizontal que se muestra en la Figura 11. El perfil resultó logarítmico (Arya, 1999) con un coeficiente de correlación lineal de 0.6419 entre datos observados y estimados, lo que concuerda bien con teorías sobre el comportamiento de la capa superficial turbulenta.

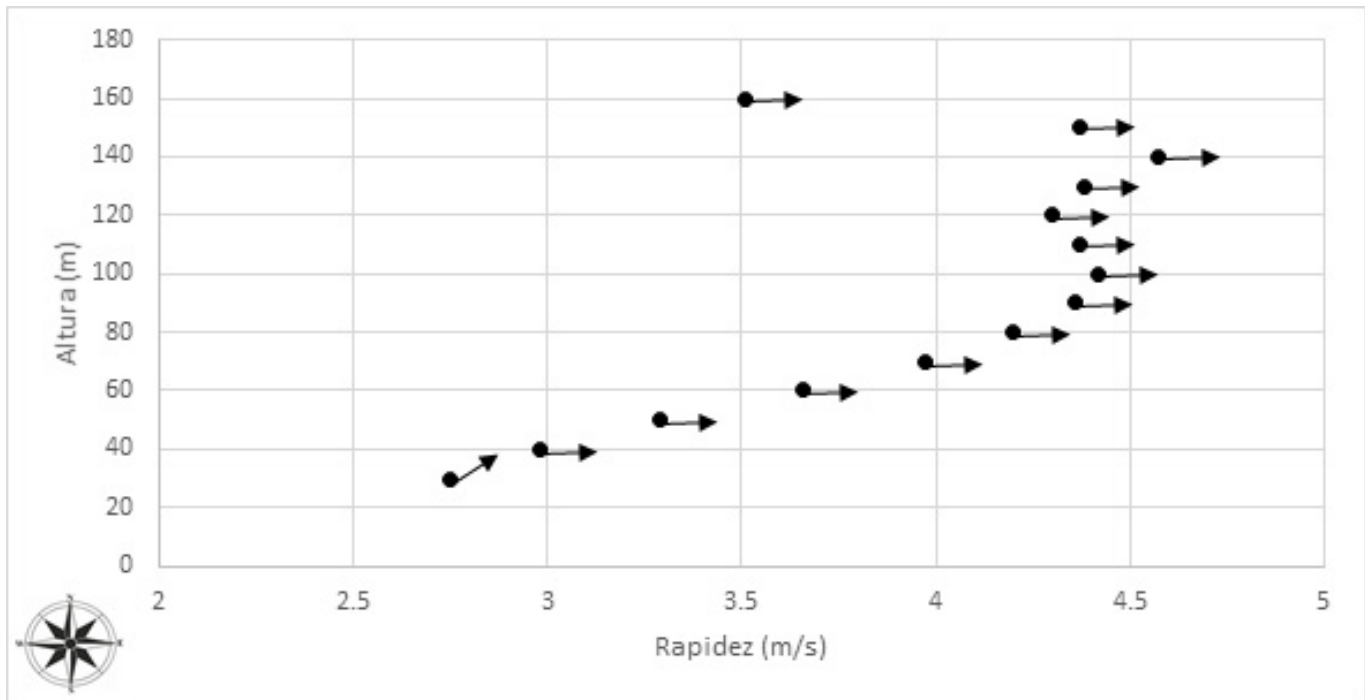


Figura 9. Comportamiento del viento horizontal con la altura a las 8:20 horas. Pozotomo 16 diciembre de 2014.

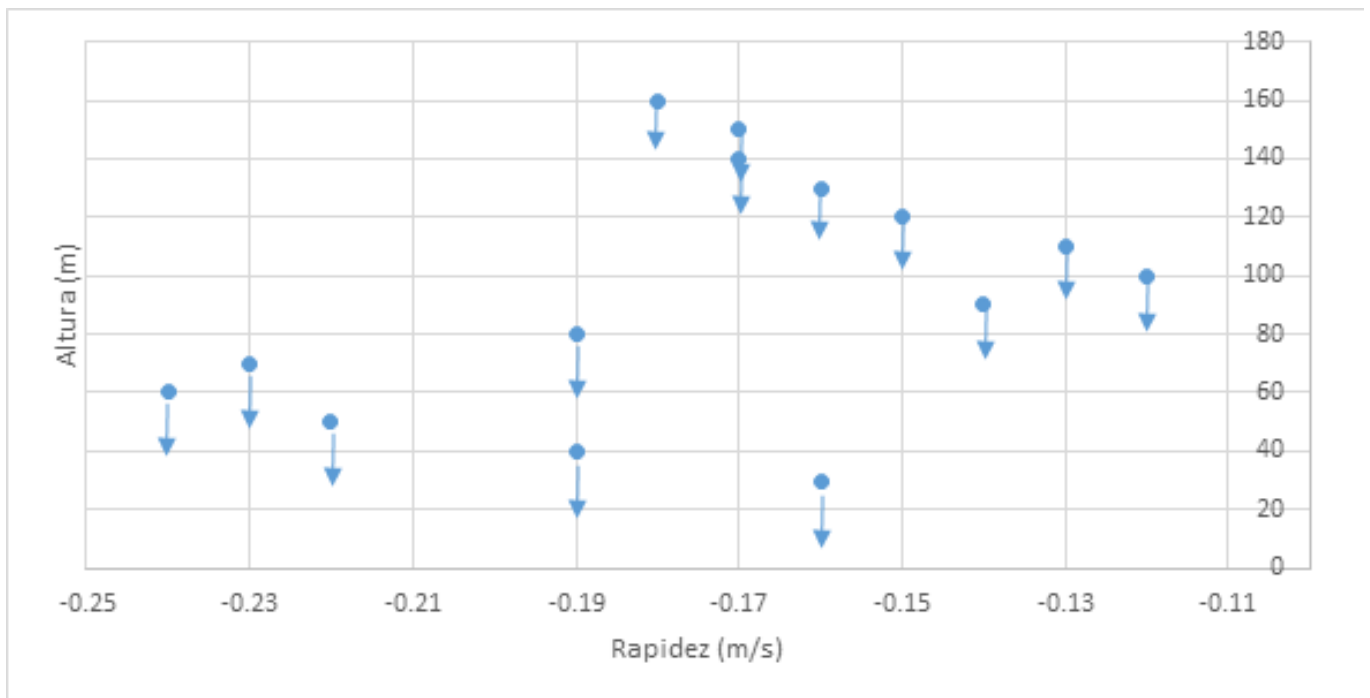


Figura 10. Comportamiento del viento vertical con la altura observado con sodar a las 8:20 horas. Pozotomo, 16 de diciembre de 2014.

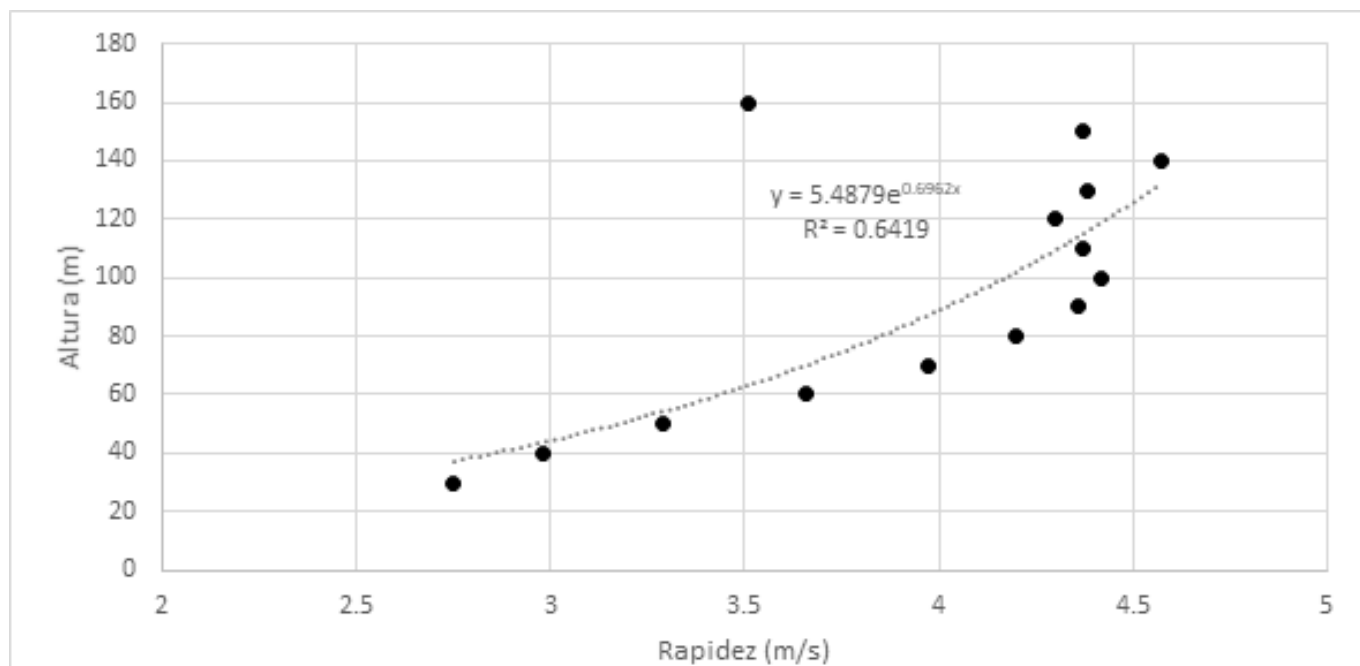


Figura 11. Perfil empírico para la componente horizontal del viento observado con sodar a las 8:20 horas. Pozotomo, 16 de diciembre de 2014.

Comentarios finales

El sodar y el dron son dos alternativas para la realización de sondeos verticales de las atmósferas urbanas, como aquí que se ejemplifican con mediciones en la zona climática local vi (b) según la clasificación de Stewart y Oke (2012). No obstante, dentro del dosel de áreas urbanas compactas de gran, mediana o baja altura (las zonas climáticas locales 1, 2 y 3 de la mencionada clasificación), no son alternativas viables por la obstrucción de las edificaciones, pero sí lo son del dosel hacia arriba. También pueden aplicarse para mediciones de las influencias de la urbe viento abajo en la dispersión de contaminantes, alteraciones de los campos térmicos y de viento, por ejemplo, y, desde luego, sobre superficies no urbanizadas.

El sodar provoca un ruido molesto a la población y los vuelos con dron deben cumplir con la normatividad aplicable al uso del espacio aéreo, lo que en ambos casos limita su uso cotidiano y lo restringe a sólo cortas campañas de mediciones.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de los resultados del proyecto Interacción superficie/atmósfera en la zona montañosa central de la vertiente del Golfo de México: observaciones y modelación a alta resolución (CONACYT CB-2012-01; 183040). Los autores agradecen al Dr. David R. Fitzjarrald, de la State University of New York at Albany (SUNYA) las facilidades para hacer uso del sodar, a las autoridades de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Veracruzana, el apoyo para realizar mediciones con el sodar en la Pozotomo, y al Dr. Cuauhtémoc Turrent por sus convenientes y relevantes comentarios en la revisión de este trabajo.

Referencias

Álvarez-Pérez, J.A. (2016). El uso del sodar para estudios de la atmósfera baja en un punto de la costa central del estado de Veracruz. Tesina de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (México), 96 p. (copias disponibles en pdf).

- Aglietti, G. S. (2009). Dynamic response of a high-altitude tethered balloon system. *J. of aircraft* 46 (6), 2032-2040.
- Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. of Clim.* 23 (1): 1-26.
- Arya, S.P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press, London, 307 p.
- Balsley, B. B. (1992). Atmospheric research using kites: here we go again!. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 73, 17-29.
- Bely, P., y Ashford, R. L. (1995). High-altitude aerostats as astronomical platforms. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering* 2478, 101-116. doi:10.1117/12.210916
- Foken, D. T. (2008). *Micrometeorology*. Bayreuth Germany: Springer, 71-76 pp.
- Garratt. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 316 p.
- Gutiérrez, W., García, M., Magaña, V., & Escalante, J. (2007). Diseño y construcción de globo meteorológico cautivo instrumentado. *Ingeniería y Ciencia* 3 (5): 29-42.
- Haluani, M. (2014). La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: historia, tipos y funciones de los drones letales. *Cuestiones Políticas* 30 (52): 46-89.
- Jacobson, M. Z. (1999). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press, 556 p.
- Quiroz-Amoroso, J.N. (2017). *Métodos alternos para realizar sondes en la baja atmósfera*. Tesina de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (México). 70 p. (copias disponibles en pdf).
- Remtech And Radian Electronics System, (2003). *Operation and maintenance manual for the PA1, PA2, PA1-LR, and RASS*. Remtech, 117 p.
- Souch, C. y S. Grimmond (2006). Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography* 30 (2): 270-279.
- Stewart, I.D. y T.R. Oke (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93 (12): 1879-1900.
- Stull B. R. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 670 p.
- UNEP. (2013). *Global environmental alert service (GEAS)*. Consultado el 27 de noviembre 2016: http://www.unep.org/pdf/UNEP-GEAS_MAY_2013.pdf
- Voss, P. B., Zaveri, R. A., Flocke, F. M., Mao, H., Hartley, T. P., & DeAmicis, P. (2010). Long-range pollution transport during the MILAGRO-2006 campaign: a case study of a major Mexico City outflow event using free-floating altitude-controlled balloons. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (15): 7137–7159.

Manuscrito recibido: 6 de enero de 2023
 Recepción del manuscrito corregido: 28 de febrero de 2023
 Manuscrito aceptado: 3 de marzo de 2023

Boletín de Sismicidad registrada por la Red Sismológica del Noroeste de México Enero – diciembre 2022

Grupo de Trabajo RESNOM¹

Personal que integra el Grupo de Trabajo RESNOM

Personal Académico: Luis Humberto Mendoza Garcilazo

Personal Técnico: Sergio Manuel Arregui Ojeda, Guillermo Eduardo Díaz de Cossío Batani, Francisco Javier Farfán Sánchez, Jesús Oscar Gálvez Valdez, *María Alejandra Núñez Leal, Rogelio Ojeda Aréchiga, Luis Alejandro Yegres Herrera.

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología.

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

*E-mail: anunez@cicese.mx

Introducción

La Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) ha operado durante más de cuatro décadas y forma parte importante de la infraestructura del Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Esta Red, detecta y registra de forma continua la actividad sísmica que ocurre en Baja California, Sonora, Golfo de California, Baja California Sur y Sinaloa, para lo cual se procesan las señales de 116 estaciones (72 en tiempo real) de las siguientes subredes: Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) (CICESE, 1980), Red Sismológica de Banda Ancha del Golfo de California (RESBAN) (Castro et al., 2018), Redes Acelerométricas Urbanas de Baja California (RAUBC), RESNOM Movimientos Fuertes (RESNOM-MF), Red Sismológica de La Paz (RSLP). A través de convenios de colaboración interinstitucionales, se procesan las señales de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN; UNAM, 1998) y la Red Sísmica del Sur de California (SCSN, por sus siglas en inglés) (Caltech, 2013). Las señales se procesan inicialmente de manera automática para obtener la localización, magnitud y el mapa preliminar de intensidades. Posteriormente, se realiza un post-procesamiento donde intervienen analistas para obtener datos más precisos de localización y magnitud ML, MC, y Mw para los sismos de magnitud $M > 6$, así como mecanismo

focal y tensor de momento sísmico (TMS) para los sismos importantes.

Durante el año 2022 RESNOM registró un total de 2611 sismos de magnitudes entre ML 0.5 y Mw 6.1. El sismo de mayor magnitud (6.1), ocurrió el 22 de noviembre de 2022 a las 09:39:04 hora local (Pacífico) frente a las costas de San Quintín, Baja California, 128 km al sur de la ciudad de Ensenada.

Estaciones RESNOM

Actualmente RESNOM cuenta con 28 estaciones de banda ancha, de las cuales, 13 están integradas por un sensor de velocidad triaxial marca Guralp 3ESPC y un sensor de aceleración triaxial marca Kinometrics, modelo Episensor FBA ES-T. Las señales se digitalizan utilizando digitalizadores Reftek 130-01 de seis canales con 24 bits de resolución. Otras 13 estaciones cuentan con un sismómetro de banda ancha marca Nanometrics modelo Trillium Compact 120S, un sensor de aceleración triaxial marca Kinometrics Episensor FBA ES-T y un digitalizador Reftek 130-01 de seis canales con 24 bits de resolución. Una estación cuenta con un sismómetro de banda ancha Nanometrics, Trillium Compact 120S, un sensor de aceleración triaxial Nanometrics modelo Titan y un digitalizador Nanometrics Centaur de seis canales. La estación restante, está conformada

por un sensor de velocidad marca Guralp CM-40T y un digitalizador DAS Reftek 130 de tres canales. Todas las señales se digitalizan a 100 muestras por segundo y, para el control de tiempo universal, se utilizan Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Las señales digitalizadas se transmiten de manera continua en tiempo real al Centro de Procesamiento de datos de RESNOM en el CICESE utilizando Internet convencional, celular o satelital.

Para la localización de los sismos y el cálculo de magnitudes, además de las estaciones propias de RESNOM, se procesan 17 estaciones de RESBAN (banda ancha y aceleración), 25 estaciones de RAUBC (aceleración), una estación de la RSLP (banda ancha), ocho estaciones del Servicio Sismológico Nacional (banda ancha) y 16 estaciones de la Red del Sur de California (banda ancha y periodo corto). La cobertura de todas las estaciones procesada se muestra en la Figura 1.

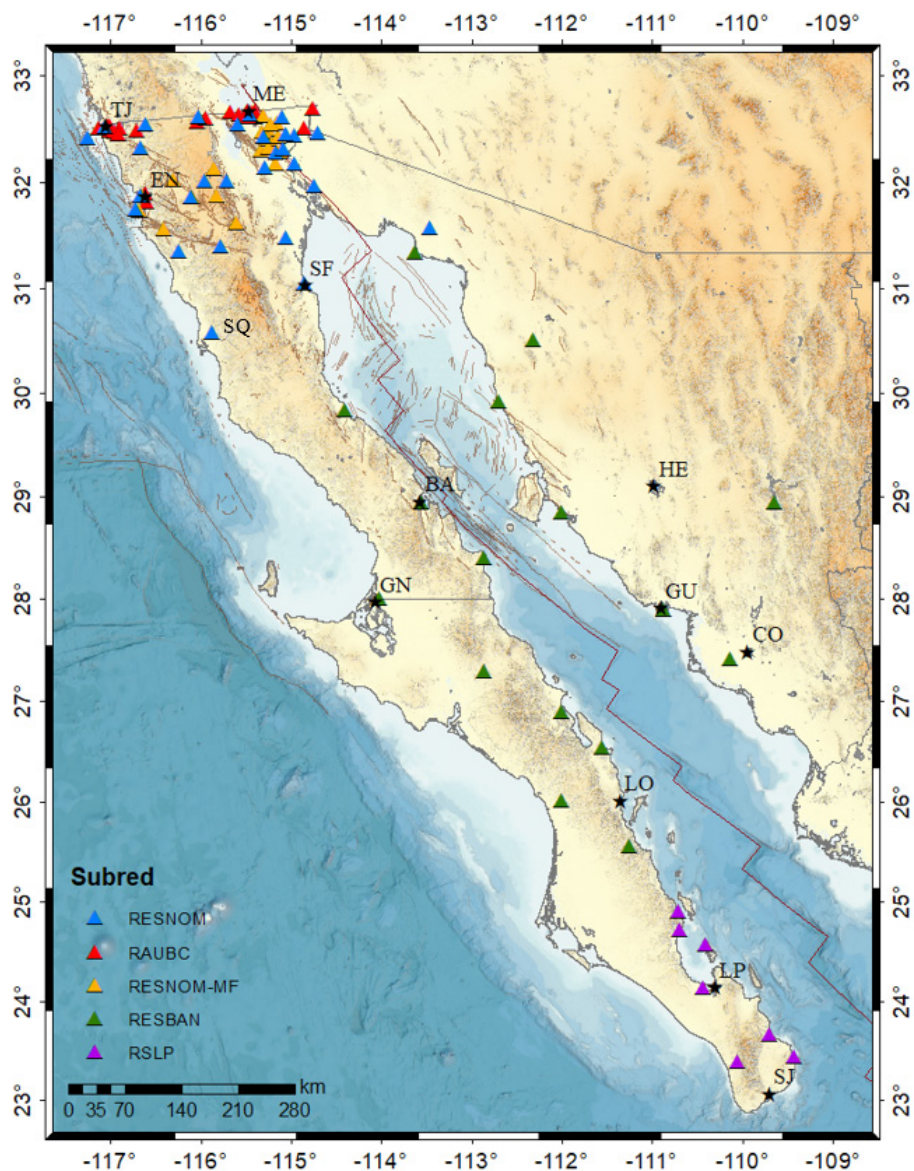


Figura 1. Ubicación de las estaciones procesadas por RESNOM para la detección de actividad sísmica en el noroeste de México durante el año 2022. Ciudades importantes: ME-Mexicali, TJ-Tijuana, EN-Ensenada, SF-San Felipe, SQ-San Quintín, GN-Guerrero Negro, BA-Bahía de los Ángeles, LO-Loreto, LP-La Paz, SJ-San José del Cabo, HE-Hermosillo, GU-Guaymas, CO-Ciudad Obregón.

Procesamiento de Datos

Automático

Tras el arribo de las señales sísmicas al centro de procesamiento de RESNOM, éstas se analizan y procesan automáticamente utilizando el sistema AQMS/Earthworm (Hartog et al., 2020 y Johnson et al., 1995). Para la detección, el cálculo de tiempos de arribo, localización hipocentral y cálculo de magnitudes M_L y M_C de los sismos, los detalles se describen en la sección Magnitud. Además, para los sismos de magnitud $M > 3$ se generan mapas de intensidades utilizando el programa Shakemap (Worden y Wald, 2016).

Manual

Después del proceso automático, un analista revisa los datos para obtener tiempo de origen, localización hipocentral y magnitudes, con una precisión mayor que la del sistema automático. Además, para los sismos importantes se complementa la información con la obtención de mecanismos focales utilizando el programa FMHASH. Para el postprocesamiento se utilizan los programas Seisan (Havskov et al., 2020) y Jiggle (Hartog et al., 2020).

Localizaciones Hipocentrales

El cálculo de la localización hipocentral automática se realiza con el programa Earthworm junto con ANSS Quake Monitoring System (AQMS, por sus siglas en inglés) y con el programa Hypoinverse (Kleim, 2002). Para el cálculo manual, el cual es el reportado en este boletín y en el catálogo de RESNOM, se utilizan los programas Jiggle y Seisan (Vidal et al., 2018).

Modelos de Velocidades

Para el proceso de localización de eventos locales y regionales se usan cinco modelos de velocidades, los cuales se muestran en la Tabla 1. Para los sismos en el Macizo Rcoso se utiliza el modelo de velocidades de Nava y Brune (1982) y para el Valle de Mexicali se utiliza una versión modificada del modelo de velocidades propuesto por McMechan y Mooney (1980) para el Valle Imperial. Para el Golfo de California son utilizados tres modelos de velocidades: en el Sur se utiliza el modelo propuesto por Fabriol y colaboradores (1999) y, para el resto del Golfo, se tomaron los modelos de Dorsey y colaboradores (2013).

Tabla 1.- Modelos de Velocidades Sísmicas utilizados por RESNOM.

Macizo Rcoso		Valle de Mexicali		Bahía		Golfo Centro		Golfo Sur	
Profundidad Km	Velocidad km/s	Profundidad Km	Velocidad km/s	Profundidad Km	Velocidad km/s	Profundidad Km	Velocidad km/s	Profundidad Km	Velocidad km/s
0.0 – 5.0	5.6	0.0 – 0.1	1.7	0.0	1.96	0.0	4.0	0.0	4.0
5.0 – 19.8	6.6	0.10 – 0.73	2.0	2.0	4.60	4.0	5.7	2.0	6.0
19.8 – 41.8	7.0	0.73 – 1.8	2.3	8.0	5.52	8.0	6.7	7.0	6.40
41.8 –	8.0	1.8 – 2.9	2.6	19.0	6.66	24.0	8.0	14.0	6.90
		2.9 – 5.6	3.0	24.0	7.90			24.0	7.60
		5.62 – 10.0	5.0	55.0	8.30			80.0	8.0
		10.0 – 20.0	6.1						
		20.0 – 30.0	7.8						
		30.0 –	8.0						

Magnitudes reportadas

RESNOM reporta tres tipos de magnitudes: Magnitud local (ML), Magnitud de coda (Mc) y para los sismos de magnitud > 5, la Magnitud Momento (Mw).

Magnitud Local (ML)

ML se calcula con base en las amplitudes registradas corregidas por la respuesta instrumental (amplitudes Wood-Anderson sintéticas en nm). Para este cálculo, son utilizadas las fórmulas de Vidal y Munguía (1999).

Para los sismos en el Valle de Mexicali:

$$M_L = \log_{10}(amp) + 1.0134 \log_{10}(dist) + 0.0025(dist) - 2.11$$

Para los sismos en el Macizo Rocosco:

$$M_L = \log_{10}(amp) + 1.1319 \log_{10}(dist) + 0.0017(dist) - 2.11$$

Donde *dist* es la distancia hipocentral en km y *amp* es la amplitud corregida por la respuesta instrumental (amplitudes Wood-Anderson sintéticas en nm).

Magnitud de coda (Mc)

La Mc se calcula con base en la duración de la señal. Se obtiene con la fórmula propuesta por González y García (1986):

$$M_c = -0.85 + 2.24 \log_{10}(T)$$

Donde T es la longitud de coda en segundos.

Magnitud Momento (Mw)

El cálculo de la Magnitud Momento se basa en la medición de la energía total que se libera en un sismo y está definida por el momento sísmico (Mo).

$$M_w = 2/3 (\log_{10}(M_o) - 9.1)$$

Tabla 2.- Sismos registrados por RESNOM en el año 2022

Mes	No. Sismos	M<1	1≤M<2	2≤M<3	3≤M<4	4≤M<5	5≤M<6	6≤M<7	M≥7
Enero	186	6	120	39	17	3	1	0	0
Febrero	159	1	90	45	20	3	0	0	0
Marzo	171	4	96	49	20	2	0	0	0
Abril	255	8	142	78	23	4	0	0	0
Mayo	168	10	92	55	11	0	0	0	0
Junio	281	12	155	49	58	4	3	0	0
Julio	276	22	161	65	25	3	0	0	0
Agosto	192	14	108	50	19	1	0	0	0
Septiembre	208	7	131	50	17	2	1	0	0
Octubre	147	3	88	32	22	2	0	0	0
Noviembre	309	7	121	100	70	8	1	2	0
Diciembre	259	17	134	76	27	5	0	0	0
Total	2611	111	1438	688	329	37	6	2	0

Descripción de la sismicidad Enero a Diciembre de 2022

Durante el año 2022 la Red Sísmica del Noroeste de México registró y procesó 2611 eventos dentro de un rango de $0.5 \leq M \leq 6$. En la Tabla 2 se muestra la distribución de los sismos por mes y magnitud.

En los mapas de las Figuras 3 y 4 se muestran los epicentros de la actividad sísmica registrada en Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Golfo de California (Figura 3). En la Figura 4 se presenta un acercamiento de la región correspondiente al norte de Baja California y sur de California, E.U.A. El color y tamaño del círculo de los epicentros indica la magnitud. En color rojo oscuro se muestran dos sismos de magnitud $M > 6$

registrados, uno en el Pacífico, frente a las costas de San Quintín, Baja California, y otro en el Golfo de California, al sur de Bahía Kino, Sonora.

Disponibilidad de datos

El catálogo completo de RESNOM está disponible y abierto al público en su página web *resnom.cicese.mx*. Además, mensualmente se generan boletines de localizaciones y Tiempos de arribo, los cuales también se encuentran disponibles en la sección de Boletines de la Página web y son enviados al Centro Internacional de Sismología (ISC por sus siglas en inglés). Los tiempos de arribo mensuales de RESNOM, están disponibles al público en su página web <http://www.isc.ac.uk/>.

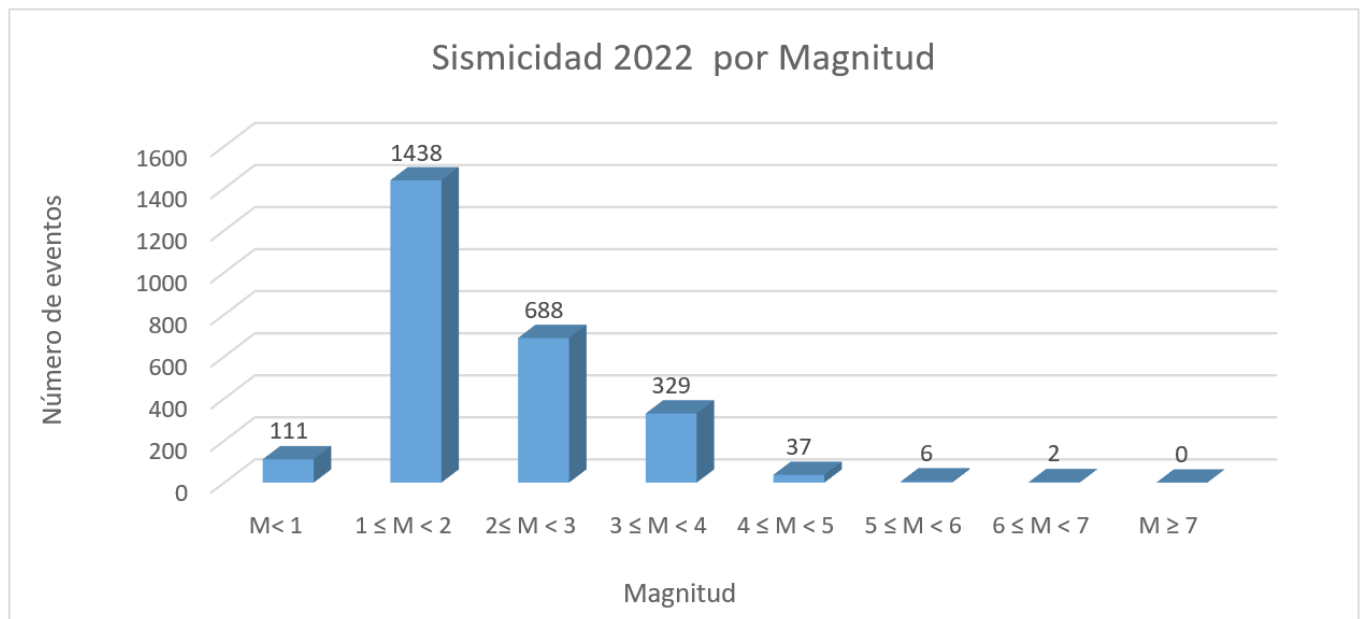


Figura 2.- Distribución por magnitud de sismos registrados por RESNOM en el año 2022.

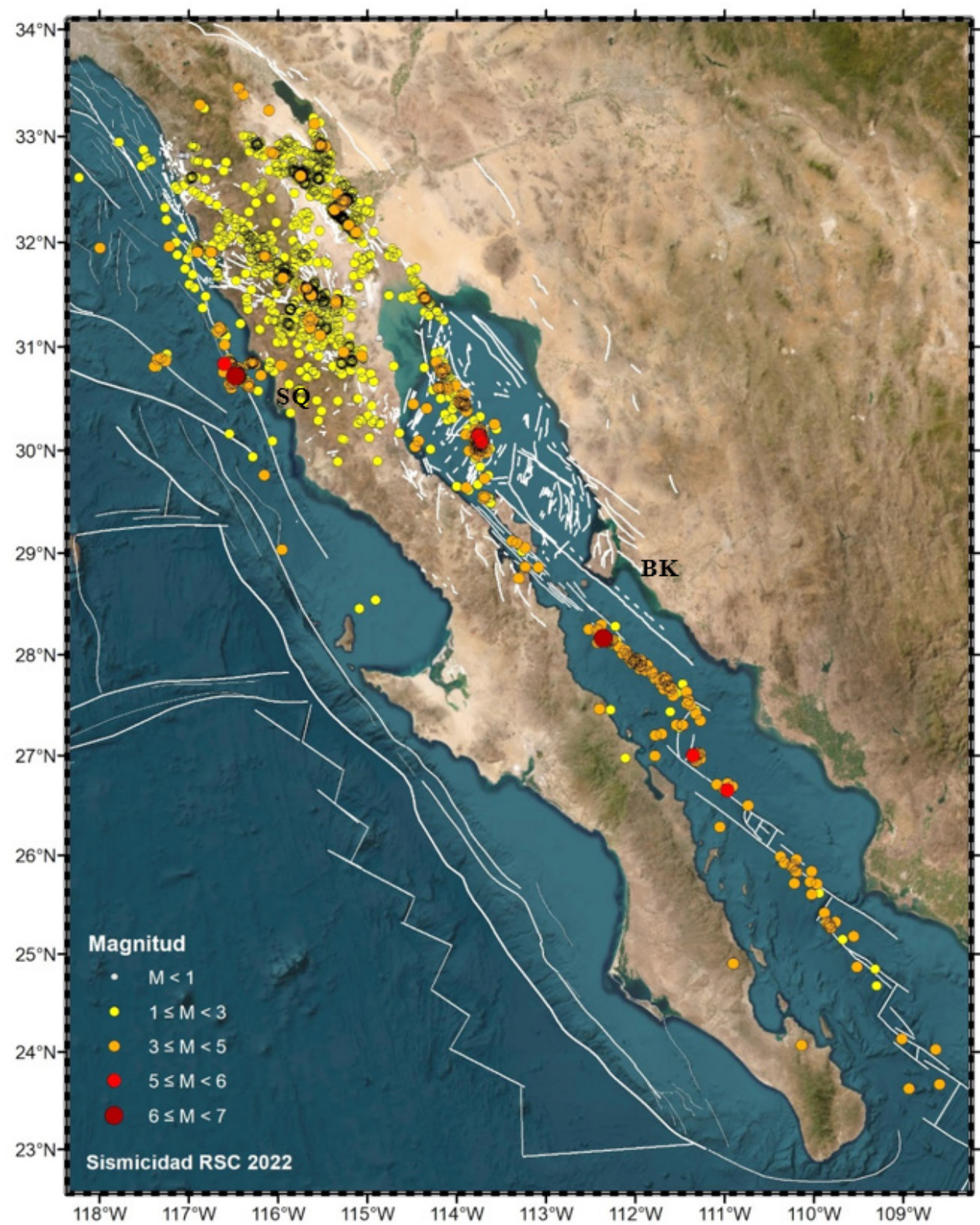


Figura 3. Mapa de Sismos registrados por RESNOM durante el periodo Enero-Diciembre de 2022.

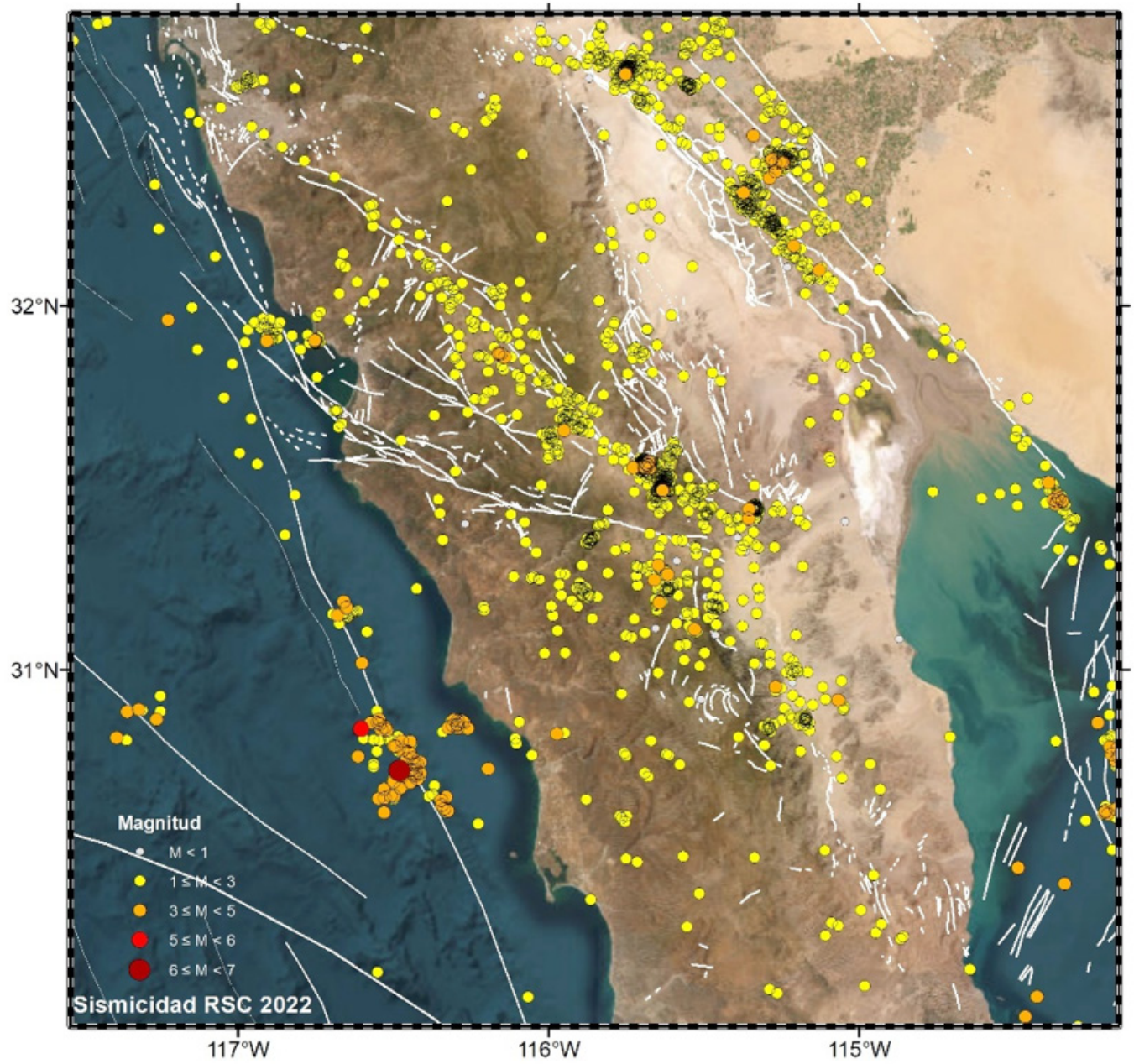


Figura 4. Sismicidad registrada por RESNOM, en el norte de Baja California durante el periodo Enero-Diciembre de 2022.

Referencias

- Caltech (2013), Southern California Earthquake Center. <https://doi.org/10.7909/C3WD3xH1>.
- Castro, R. R., Mendoza-Camberos, A. y Pérez-Vertti, A. (2018), The Broad Band Seismological Network (RESBAN) of the Gulf of California, México. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 338-344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1785/0220170117>
- CICESE (1980), Red Sísmica del Noroeste de México. <http://www.fdsn.org/networks/detail/BC/> (accessed 5.17.21).
- Dorsey, R. J., P. J. Umhoefer, P. J., Oskin, M. E., and Arrowsmith, R. (2013), Rupturing Continental Lithosphere in the Gulf of California & Salton Trough. *GeoPRIMS Newsletter*, no. 30.
- Fabriol, H., y Munguía, L. (1997), Seismic activity at the Cerro Prieto Geothermal area (México) from August 1994 to December 1995, and the relationship with tectonics and fluid exploitation. *Geophysical Research Letters* 24, no. 14, 1807-1810. doi: 10.1029/97GL01669.
- González-G., J. J. y R. García-A., 1986. Escala de Magnitud-Coda para Estaciones Sismográficas en el Norte de Baja California. *Resumen extenso, Memorias de la Reunión 1986 de la Unión Geofísica Mexicana*, 399-406.
- Hartog, J. R., Friber, P. A. Kres, V. C. Bodin y Bhadha, R. (2020), Open-Source ANSS Quake Monitoring System Software. *Seismological Research Letters*, Vol. 91, No. 2A, pp. 677–686. <https://doi.org/10.1785/0220190219>
- Havskov, J., Voss P. H. y Ottemöler L. (2020), *Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN*. *Seismological Research Letters*, Vol. 91 No.3, pp. 1846-1852
- Johnson, C E, A Bittenbinder, B Bogaert, L Dietz y W Kohler (1995), “Earthworm: A flexible approach to seismic network processing”. *Iris Newsl.* 14, pp. 1-4.
- Kleim, F. W. (2002), User’s guide to Hypoinverse-2000, a FORTRAN program to solve for earthquake locations and magnitude, U.S. Geological Survey Open-File Rept. 02–171, 121.
- McMechan G. A. and Mooney W. D. (1980), Asymptotic ray theory and synthetic seismograms for laterally varying structure s: theory and application to the Imperial Valley, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, 2021-2035.
- Nava, F. A., and Brune J. N. (1982), An earthquake-explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of southern California and Baja California Norte, *Bulletin of the Seismological Society of America* 72, no 4, 1195-1206.
- UNAM (1998), Servicio Sismológico Nacional. UNAM. URL <http://www.ssn.unam.mx/> (accessed 5.17.21).
- Vidal Villegas, J. A., & Munguía Orozco, L. (1999), The ML scale in northern Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3), 750-763. (ID: 2916).

Vidal Villegas, J. A., Munguía Orozco, L., González Ortega, J. A., Nuñez Leal, M. A., Ramírez Ramos, E. E., Mendoza Garcilazo, L. H., Castro Escamilla, R. R., & Wong Ortega, V. M. (2018), The Northwest Mexico Seismic Network: real time seismic monitoring in northern Baja California and northwestern Sonora, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 324 - 337. doi: 10.1785/0220170183.

Worden, C.B., and Wald, D. J. (2016), ShakeMap manual online: Technical manual, user's guide, and software guide, U.S. Geological Survey, doi: 10.5066/F7D21VPQ

Manuscrito recibido: 31 de julio de 2023

Recepción del manuscrito corregido: 11 de agosto de 2023

Manuscrito aceptado: 15 de agosto de 2023

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Caridad Cárdenas Monroy
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

