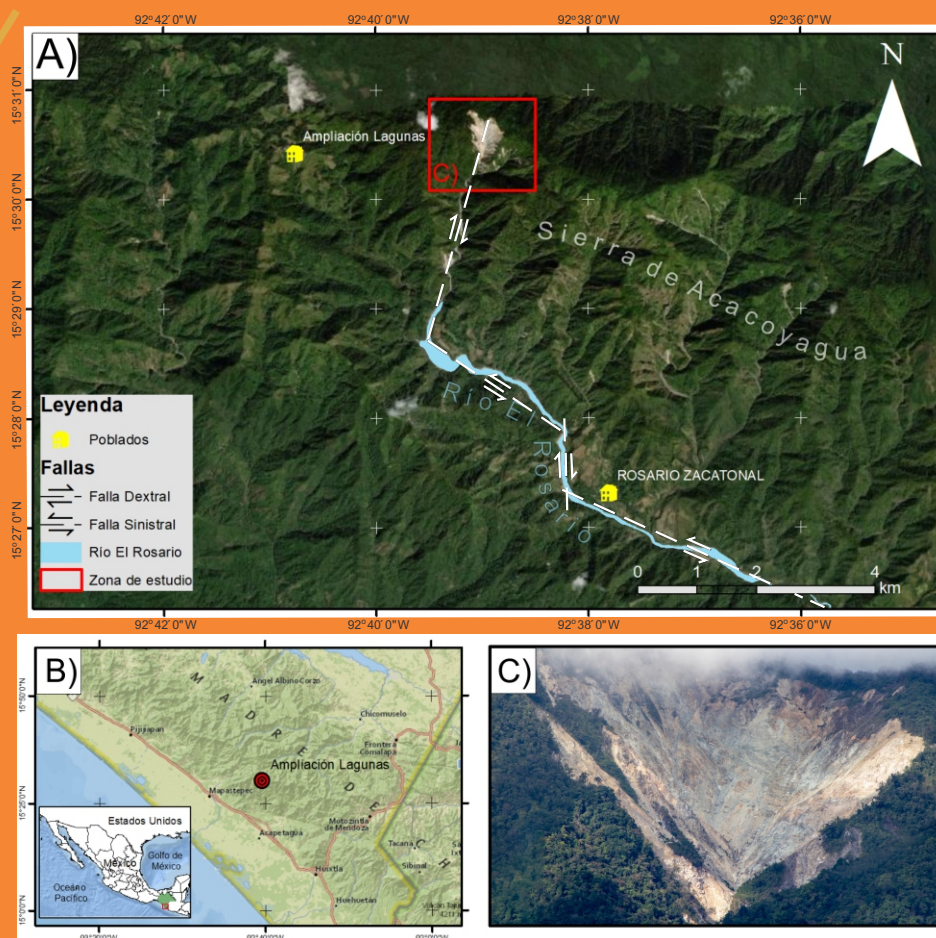


geos



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 2024-2025

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

Dr. Américo González Esparza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

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

Dr. Antonio Pola Villaseñor
ENES Morelia
Secretario General

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

Dra. Avith Mendoza Ponce
IIGERCC, UNICACH
Secretaría de Difusión

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

Dra. Elva Escobar
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Secretario de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Avith Mendoza Ponce
avith.mendoza@unicach.mx
UNICACH

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Carlos Flores Luna, CICESE
Efraín Gómez Arias, CICESE
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

Los plásticos como marcadores geológicos	... 231
---	---------

ARTÍCULOS

Análisis multitemporal de la evolución de un deslizamiento del terreno en la Sierra de Acacoyagua, Chiapas mediante imágenes satelitales	... 233
---	---------

José Daniel Rendón Vázquez, Bodo Weber, Alejandro Hinojosa Corona, Eduardo Monreal Roque, Yuly Tatiana Valencia Morales

Evidencia geodésica del sismo de Mw 7.0 de abril de 2012 a lo largo de un transecto Pacífico-Golfo de California, península de Baja California, México	... 253
---	---------

Carlos E. Reinoza, Elvia Ramón, Andrés Navarro, Luis Yegres, Franck A. Audemard M., Alejandro González Ortega

REPORTE

Boletín de Sismicidad registrada por la Red Sismológica del Noroeste de México. Enero - diciembre 2023	... 265
---	---------

Oscar Alberto Castro Artola, Rogelio Arce Villa, 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

DIVULGACIÓN

Y el afelio se hizo viral: La XXV Olimpiada de Ciencias de la Tierra	... 275
---	---------

Enrique Gómez Treviño

COMUNICACIONES

POLITICA EDITORIAL	... 289
---------------------------	---------

Los plásticos como marcadores geológicos

Durante el pasado 22 de abril, Día de la Tierra, en distintos foros académicos y de divulgación científica se mostraron diversos estudios sobre el estado de los ecosistemas y sus amenazas. Algunas de estas últimas son la contaminación atmosférica, hídrica y del suelo, o de largo plazo y menos evidentes, como el calentamiento global. El registro de las modificaciones al ambiente debidas a la acción humana ha derivado en la propuesta de reconocer el Antropoceno como una nueva época geológica identificada por cambios biológicos y geofísicos (atmósfera, océano y tierra sólida) a escala planetaria, cuyo inicio está marcado por la Primera Revolución Industrial después de mediados del siglo XVIII. Dichas modificaciones son tan recientes que ahora se habla incluso de periodos de aceleración emparentadas, sobre todo, con guerras de gran magnitud pues éstas, así como la consiguiente reconstrucción de las infraestructuras dañadas y restablecimiento de la economía, aceleran el uso de materias primas y de energía. A partir de la década de 1950, en un periodo de posguerra, inició la fabricación masiva de plásticos, uno de los materiales que por su bajo costo y amplio rango de aplicaciones ha marcado un cambio en la vida cotidiana. La razón por la que el plástico se ha vuelto prácticamente omnipresente se debe a que gran parte de ellos se usa para fabricar material desechable o de vida corta, como empaques, cosméticos, neumáticos, vestimenta e insumos agrícolas, entre otros. Se estimaba en 2009 que aproximadamente el ocho por ciento de la producción mundial de petróleo y gas se usaba como materia prima y en energía para la producción de plásticos. Ahora se habla de un tipo de roca que mezcla partículas sedimentarias unidas por plásticos conocida como “plastiglomerado”.

Debido a la abundancia de desechos plásticos, uno de los mayores problemas, sobre todo en las zonas urbanas, es su disposición final pues su proceso de degradación puede tardar cientos de años. El manejo de los residuos sólidos es tan deficiente o inadecuado que, menos de la mitad del plástico producido en el mundo es reciclado y generalmente, el resto se tira en basureros a cielo abierto. Como resultado, los desechos plásticos se fragmentan principalmente por abrasión y radiación ultravioleta hasta formar fibras o fragmentos microplásticos de hasta una micra, o incluso nanoplásticos cuyo comportamiento es coloidal. En el caso de estos últimos, su presencia se ha identificado tanto en insectos y microorganismos que habitan en el suelo como en tejidos del cuerpo humano; las consecuencias a largo plazo para la salud son aún desconocidas. Con respecto a los macroplásticos (> 2 cm), se estima que los océanos reciben entre 5 y 12 millones de toneladas cada año. En márgenes continentales como en el sur de China, responsable de la tercera parte de la contaminación mundial por plásticos, sumergibles tripulados han identificado y cuantificado la acumulación de basura a lo largo de cañones submarinos en donde las corrientes de turbidez transportan principalmente macroplásticos hasta profundidades mayores a los 2,000 m. Comparativamente, Latinoamérica en su conjunto aporta el 4 por ciento de la contaminación mundial por plásticos y México, cuya economía ocupa el lugar 13

en el mundo, se ubica como el séptimo responsable de los plásticos mal gestionados. En nuestro país los residuos sólidos urbanos se disponen principalmente en basureros de tierra donde la separación, y en consecuencia el aprovechamiento del material reutilizable son deficientes, lo que hace necesario explotar recursos nuevos.

En estos tiempos de campañas electorales, la banca estima que México tiene el potencial para pasar de la posición 13 a la 10 en la economía del mundo. Es de sospechar que tan bienaventurada estimación conlleva mayor producción y consumo, desatendiendo la forma en la que se produce y qué se debe hacer con los residuos. Poco o muy poco se propone ante la pobre gestión de la basura, la cual amenaza de forma irreversible al medio ambiente y la calidad de vida de la población. La basura en general y los plásticos en particular, también son tema de política pública y de interés científico amplio.

Análisis multitemporal mediante imágenes satelitales de la evolución de un deslizamiento del terreno en la Sierra de Acacoyagua, Chiapas

José Daniel Rendón Vázquez, Bodo Weber, Alejandro Hinojosa Corona, Eduardo Monreal Roque, Yuly Tatiana Valencia Morales

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

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología

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

*E-mail: jrendon@cicese.edu.mx

Resumen

En la chiapaneca Sierra de Acacoyagua, y cercana a la localidad de Ampliación Lagunas, se localiza un deslizamiento vasto con forma de cuña. Para determinar las causas y evolución de este proceso geodinámico, se realizó un análisis multitemporal a través del uso de imágenes satelitales Landsat (7EMT+ y 8 OLI) del periodo 2005 a 2020. Además, se recopilaron datos de sismicidad y precipitación de la zona de estudio. Los resultados obtenidos revelan que el deslizamiento se formó en octubre de 2005, desencadenado por las abundantes precipitaciones durante el paso del Huracán Stan. Mediante modelos digitales de elevación, se calculó que el volumen removido en este evento fue de >6 millones de m³. Al analizar la evolución de este proceso, se encontró que entre los años 2005 y 2010, fueron removidos un total de 72,504 m³ de material, lo que equivale a una tasa de 1.8 ha por año. El continuo crecimiento de esta estructura es consecuencia de factores estructurales, climáticos y geológicos locales.

Palabras clave: Deslizamientos de ladera, teledetección, cálculo de volumen, análisis multitemporal, Chiapas, imágenes satelitales.

In the Sierra de Acacoyagua, Chiapas near the town of Ampliación Lagunas, a large wedge-shaped landslide is located. To determine the causes and evolution of this geodynamic process, a multi-temporal analysis was carried out using 2005 to 2020 Landsat satellite images (7EMT+ and 8 OLI). In addition, seismicity and precipitation data were collected for the study area. The results obtained reveal that the landslide was formed in October 2005, triggered by heavy rainfall during the passage of Hurricane Stan. Using digital elevation models, it was calculated that the volume removed in this event was >6 million of m³. When analyzing the evolution of this process, it was found that between 2005 and 2010, a total of 72,504 m³ of material was removed, which is equivalent to a rate of 1.8 ha per year. The continuous growth of this structure is a consequence of local structural, climatic, and geological factors.

Keywords: Landslides, remote sensing, multitemporal analysis, Chiapas, Satellite images, volume calculation.

Introducción

Los procesos de remoción de masa son un conjunto de procesos geológicos que pueden causar la liberación y movimiento de grandes volúmenes de suelo y roca. Entre los tipos más comunes de procesos de remoción de masa se encuentran las avalanchas, los flujos de lodo, los desprendimientos de rocas y los deslizamientos. Un deslizamiento consiste en el desplazamiento de una masa de roca, suelo o derrubios de una ladera en sentido descendente (Cruden, 1991). Estos procesos de remoción de masa son controlados generalmente por factores condicionantes o internos, como morfología, entorno litológico y estructural, uso de suelo o tipo y densidad de la cubierta vegetal y los factores desencadenantes o externos que pueden ser intensas precipitaciones, terremotos o la actividad humana (Alcántara-Ayala et al., 2001). Por otro lado, la disponibilidad de las imágenes aéreas y satelitales han llevado al desarrollo de la percepción remota, una técnica que permite obtener información detallada sin contacto físico con el objeto que se examina (Lillesand y Kiefer, 2015). El objeto de estudio es la superficie terrestre, cuya información es obtenida mediante sistemas satelitales los cuales, por medio de sus distintos sensores, capturan imágenes y adquieren la información electromagnética de los objetos en la superficie por medio de la luz que reflejan, permitiendo distinguir diferentes coberturas como las de vegetación o suelo. Asimismo, la periodicidad con la que estas imágenes son tomadas permite tener un registro temporal de la zona de interés. En el campo de la percepción remota, una técnica para caracterizar los procesos de remoción de masa es el análisis multitemporal, el cual consiste en la comparación de coberturas en dos imágenes de satélite de un mismo lugar en diferentes fechas. Esto permite identificar los cambios en las coberturas clasificadas (Chuvienco, 2010).

En conjunto, las observaciones de campo y el análisis de imágenes satelitales posibilitan reconocer y caracterizar los procesos de remoción de masa,

tales como los deslizamientos, identificando los factores condicionantes y estableciendo una correlación causal entre el régimen climático y las condiciones geológicas/morfológicas. Además, mediante el análisis multitemporal es posible observar la evolución de estos procesos, permitiendo proyectar su comportamiento a futuro y ayudando a tomar decisiones para la prevención de desastres.

La Sierra de Chiapas (Figura 1B), en el estado homónimo, es una cadena montañosa paralela a la costa del Pacífico. Debido a sus características orográficas con laderas de pendientes fuertes a escarpadas, es una región donde es común la ocurrencia de deslizamientos.

En la parte alta de la Sierra de Acacoyagua y cercano a la localidad de Ampliación Lagunas se encuentra un vasto deslizamiento. Mediante las observaciones de campo y el análisis de imágenes satelitales se caracterizó este proceso, definiendo su evolución y las causas que desencadenaron su formación.

Ubicación

La zona del deslizamiento abarca las coordenadas geográficas 15°30'55" N, 15°30'05" N, 92°39'30" W y 92°38'30" W, y altitudes desde 2000 m.s.n.m en el pie de la estructura hasta 2540 m.s.n.m en la cabecera. Esta zona se encuentra dentro de la Sierra de Acacoyagua, en el municipio del mismo nombre y a 2.9 km del poblado de Ampliación Lagunas (Figura 1A). Los bloques y rodados desprendidos de la estructura pueden encontrarse desde la cabecera de la misma (Figura 1C) hasta los alrededores del poblado Rosario Zacatonal a aproximadamente 6 km al sureste (Figura 1A). Dichos rodados son transportados a través del cauce del río El Rosario, el cual fluye hasta la planicie costera, donde es conocido como río Cintalapa.

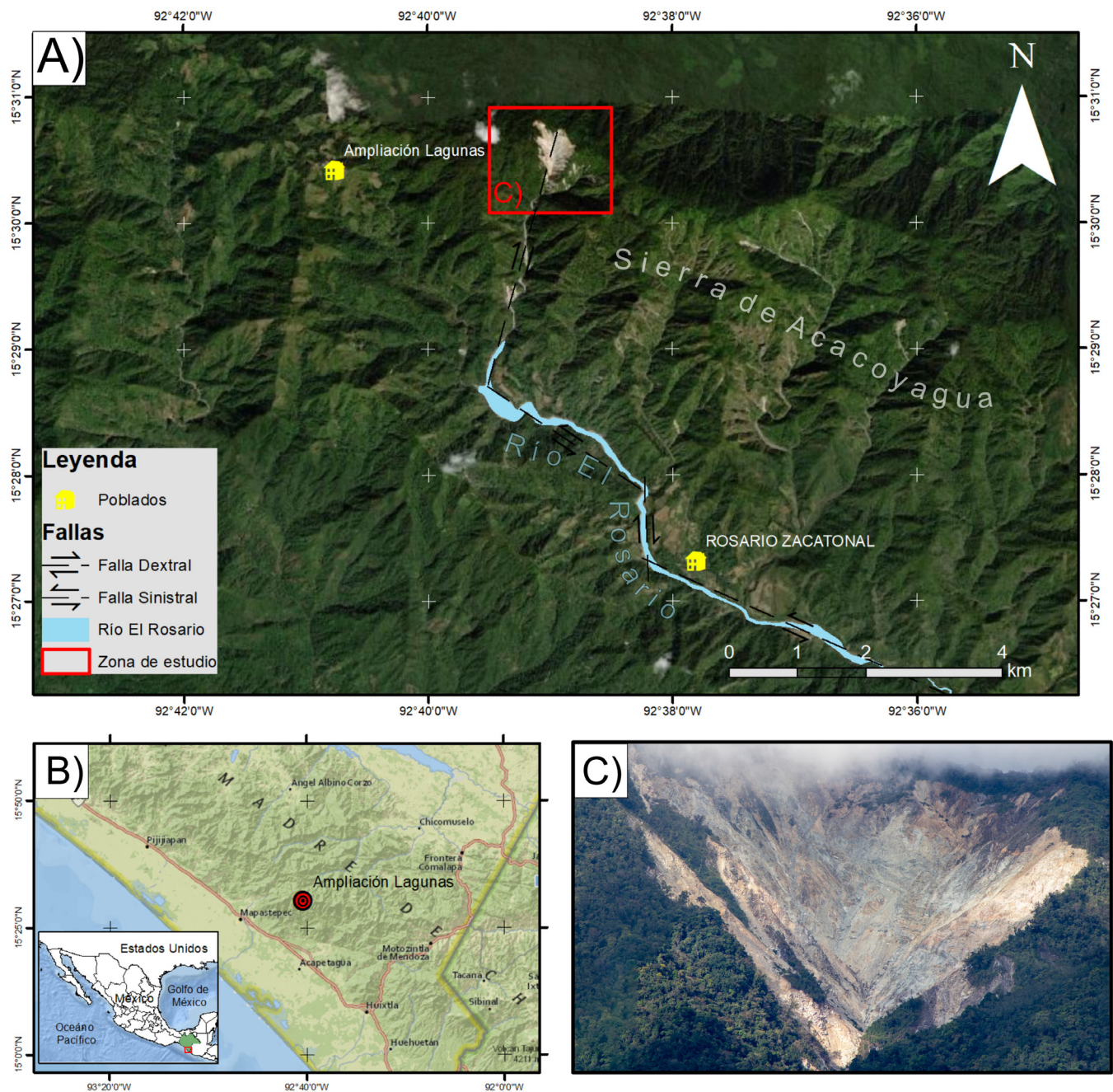


Figura 1. A) Imagen satelital mostrando la ubicación del deslizamiento y las localidades cercanas a él. B) Mapa de caminos del estado de Chiapas mostrando la localidad de Ampliación Lagunas. C) Fotografía del deslizamiento tomada con un teleobjetivo.

Trabajo de campo

Dentro de la cabecera del deslizamiento, las actividades realizadas durante la fase de campo consistieron en la descripción de los afloramientos rocosos, colecta de muestras representativas para su estudio macroscópico y microscópico, así como en la toma de datos estructurales para la caracterización geométrica de la estructura.

Datos y procesamientos

El análisis multitemporal consiste en la aplicación de técnicas en imágenes satelitales en un intervalo de fechas, lo que ayuda a analizar los cambios asociados con un área discreta, permitiendo estimar las diferencias en el terreno, como cambios en la cobertura vegetal o el porcentaje de área afectado por un proceso de remoción en masa. Asimismo, las imágenes satelitales multiespectrales permiten realizar combinaciones de color con las bandas más útiles de acuerdo con las unidades litológicas o áreas de interés forestal a estudiar. El uso de estas dos características permite clasificar las coberturas de acuerdo con sus propiedades electromagnéticas y determinar la pérdida o ganancia de las mismas a través del tiempo.

Para realizar dicho análisis se utilizaron cinco imágenes Landsat ((7 EMT+ y 8 OLI) de las fechas 10 de octubre del 2005, 19 de diciembre del 2010, 16 de febrero del 2015, 4 de enero del 2017 y 29 de enero del 2020, con el Path/Row 21/49 (USGS, 2005, 2010, 2015, 2017a, 2020). La combinación de bandas usadas para las imágenes Landsat 7 EMT+ del 2005 a 2010 fue 7, 5, 4 y la combinación 7, 6 y 5 para las imágenes Landsat 8 OLI para el periodo 2015 a 2020. Estas combinaciones permiten visualizar o resaltar los afloramientos rocosos y diferenciarlo del suelo o de la cubierta vegetal, pues al colocar la banda 7 (en rojo) se cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben la energía. Para facilitar el manejo de estas imágenes y con ayuda del software Arcmap 10.8, se recortó el

área de estudio mediante un polígono de 3 x 3 km, obteniendo imágenes adecuadas con la región estudiada. Posteriormente, se crearon polígonos que cubren el área deslizada para las diferentes imágenes y se calculó el área de cada uno.

Con el fin de estimar el volumen de material removido, se adquirieron dos pares de modelos digitales de elevación (MDE) de los años 2001 y 2006 con resolución espacial de 30 m del satélite ASTER (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems y U.S./Japan ASTER Science Team, 2001, 2006) y del 2006 y 2011 con una resolución espacial de 12.5 m del satélite ALOS PALSAR (ASF-DAAC, 2006, 2011). Estos MDE se recortaron contra el polígono del área de estudio y se generaron superficies TIN (Triangulated Irregular Network) para posteriormente calcular la diferencia entre ellas, usando como límite el polígono del deslizamiento del año 2021 obtenido de las imágenes satelitales. Finalmente, para correlacionar los factores desencadenantes de este deslizamiento, se recopilaron datos de precipitación media mensual y diaria del año 2005 de la estación meteorológica Independencia (código 7348) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016). Además, se analizaron los datos de precipitación media anual de los periodos 2005 al 2015 de dos estaciones meteorológicas (Independencia y Finca La Paz). Por otro lado, se compilieron datos de sismicidad en la región, consultando el catálogo histórico de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2023) del periodo 2000 al 2020, en un rectángulo de coordenadas 14.73° N y 16.34°N, -94.14° W y -92.24°W para sismos de magnitudes entre 4.0 a 9.0 e hipocentros superficiales a profundos.

Litología de la zona de deslizamiento

Como resultado de la colecta de datos y de las observaciones realizadas, tanto en el campo como en el laboratorio, fue posible agrupar las rocas encontradas de acuerdo con su composición y textura en tres principales litologías: granitoides, micaesquistos y gneises anfibolíticos. Algunas de

estas litologías pudieron ser asociadas a unidades litodémicas reportadas en la literatura como: la Unidad Jocote y la Unidad Candelaria (Weber et al., 2008; 2018; Estrada-Carmona et al., 2012; González-Guzmán et al., 2016). La descripción detallada de cada una de las litologías se expone a continuación.

Micaesquistos de rutilo y cianita

Los afloramientos de estas rocas se encuentran distribuidos en los flancos del deslizamiento, tienen entre 10 y 15 m de altura, hasta 20 m de longitud y una inclinación general de la estructura de $\sim 55^\circ$ (Figuras 2A y 2B). Localmente, las rocas están foliadas y tienen un color verdoso claro a gris oscuro con tonalidades blancas y amarillas

(Figura 2C). Asimismo, siguiendo los planos de foliación, se encuentran estrías de falla, sugiriendo desplazamientos recientes en la zona (Figura 2D). En muestra de mano, se identificaron minerales de muscovita, clorita y cuarzo, donde la esquistosidad está marcada por filosilicatos.

En lámina delgada, esta roca metamórfica es de grano fino con una esquistosidad primaria bien definida (S1) marcada por la intercalación de bandas de grosor variable de minerales de cuarzo, muscovita y clorita, sugiriendo un origen sedimentario (Figura 3A). Por otro lado, se pudieron identificar minerales como rutilo y cianita (Figura 3B), los cuales indican que la roca estuvo sujeta a metamorfismo en condiciones de temperatura y presión superiores a 600°C y 8 kbar.

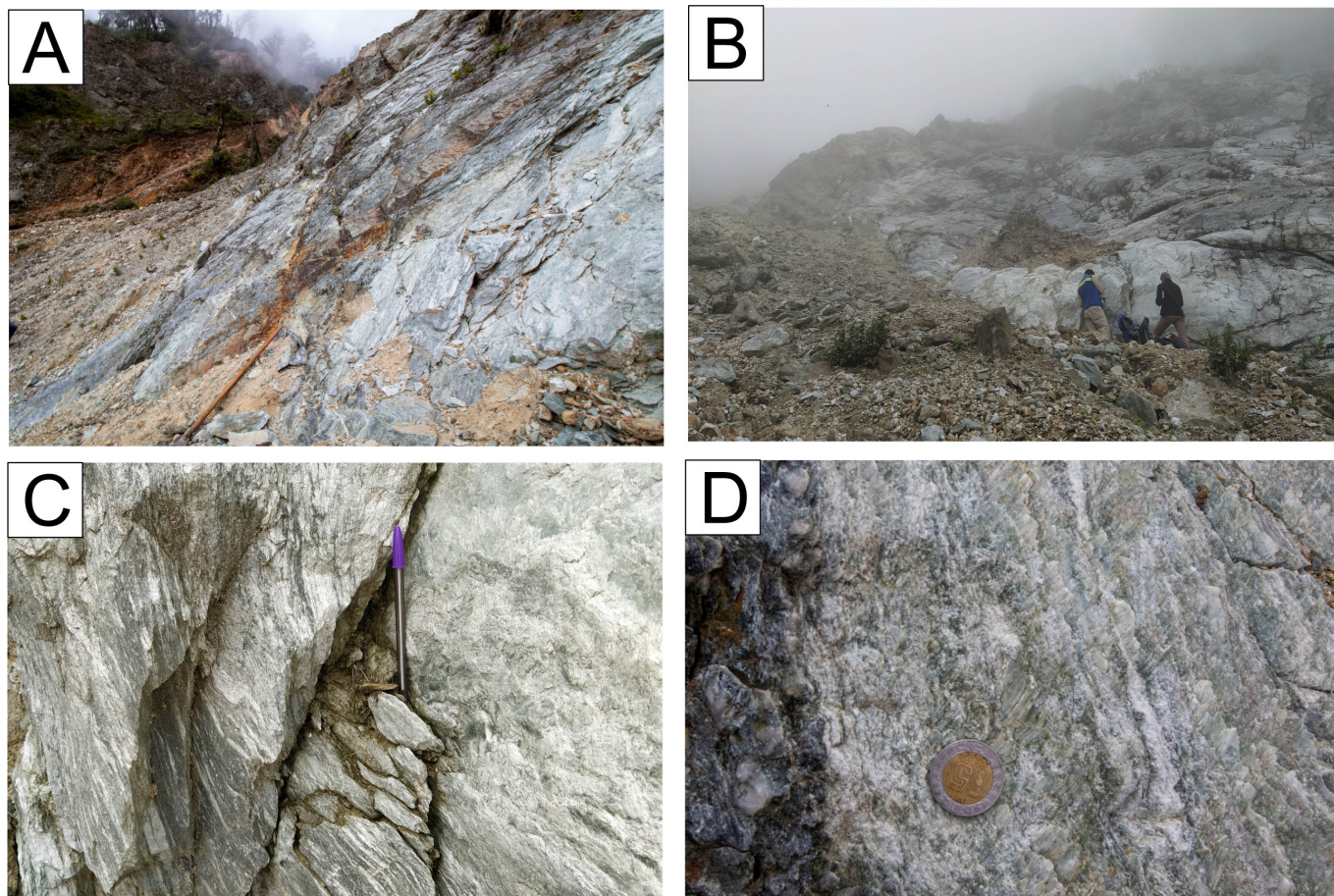


Figura 2. A) y B) Fotografía del afloramiento de micaesquisto de rutilo y cianita. C) Afloramiento de micaesquistos mostrando foliación. D) Estrías de falla en micaesquistos.

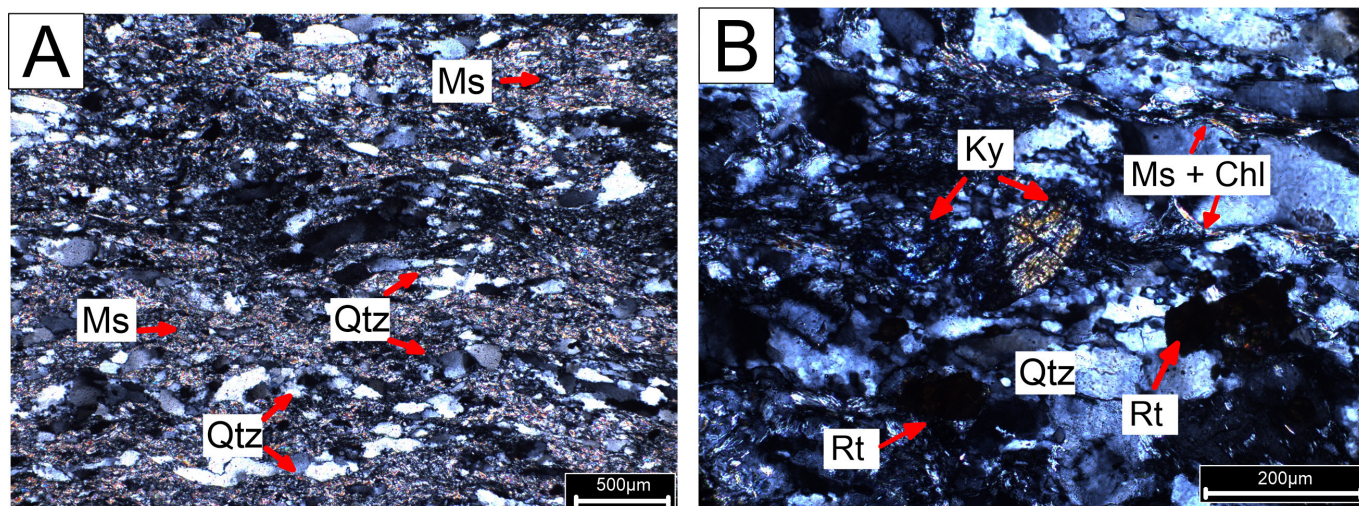


Figura 3. Microfotografías mostrando: A) foliación marcada por cuarzo elongado (Qtz) y muscovita (Ms); B) cristales de cianita (Ky) y rutilo (Rt) rodeados por Qtz y Ms.

Gneises anfibolíticos

Los afloramientos de este tipo de roca se localizan en la cabecera del deslizamiento. Estas rocas tienen un color negro con bandas deformadas de color claro (neosoma) y oscuro (paleosoma). Están afectadas por grietas y es común encontrarlos como grandes bloques deslizados (Figura 4A y B). Estas rocas se definen como anfibolitas parcialmente migmatizadas, donde la intercalación entre leucosoma y neosoma forma una estructura gnéisica. Las bandas de melanosoma presentan un grosor de 13 a 5 cm y están constituidas por hornblenda, clorita, plagioclasas y óxidos de hierro (Figura 4C). El melanosoma, a su vez, está afectado por microfallas e intrusionado por leucosoma. Este último presenta un grosor entre 3 cm y 15 cm y está constituido por minerales como cuarzo y feldespato alcalino, a los que se debe su color claro (Figura 4D). Se infiere un contacto intrusivo entre los gneises anfibolíticos y los micaesquistos de rutilo y cianita.

Granitoides

En la parte superior de la zona de deslizamiento se encuentran afloramientos de rocas cuya composición varía de granítica a diorítica. Las de composición granítica se caracterizan por ser de coloración clara con tonalidades crema, de textura fanerítica e inequigranular y con un tamaño de grano que varía de medio a grueso. Estas rocas frecuentemente están foliadas y son las más afectadas por el intemperismo (Figura 5A). Por su parte, las de composición diorítica están emplazadas como diques (Figura 5B), dispuestos discordantemente a los micaesquistos.

Además, en la parte superior del deslizamiento, es posible encontrar una potente cubierta de suelo, donde las rocas de composición granítica parecen haber sido parte del material original formador del suelo. En algunas zonas, estos suelos están altamente saturados de agua, por lo que tienen un comportamiento fangoso.

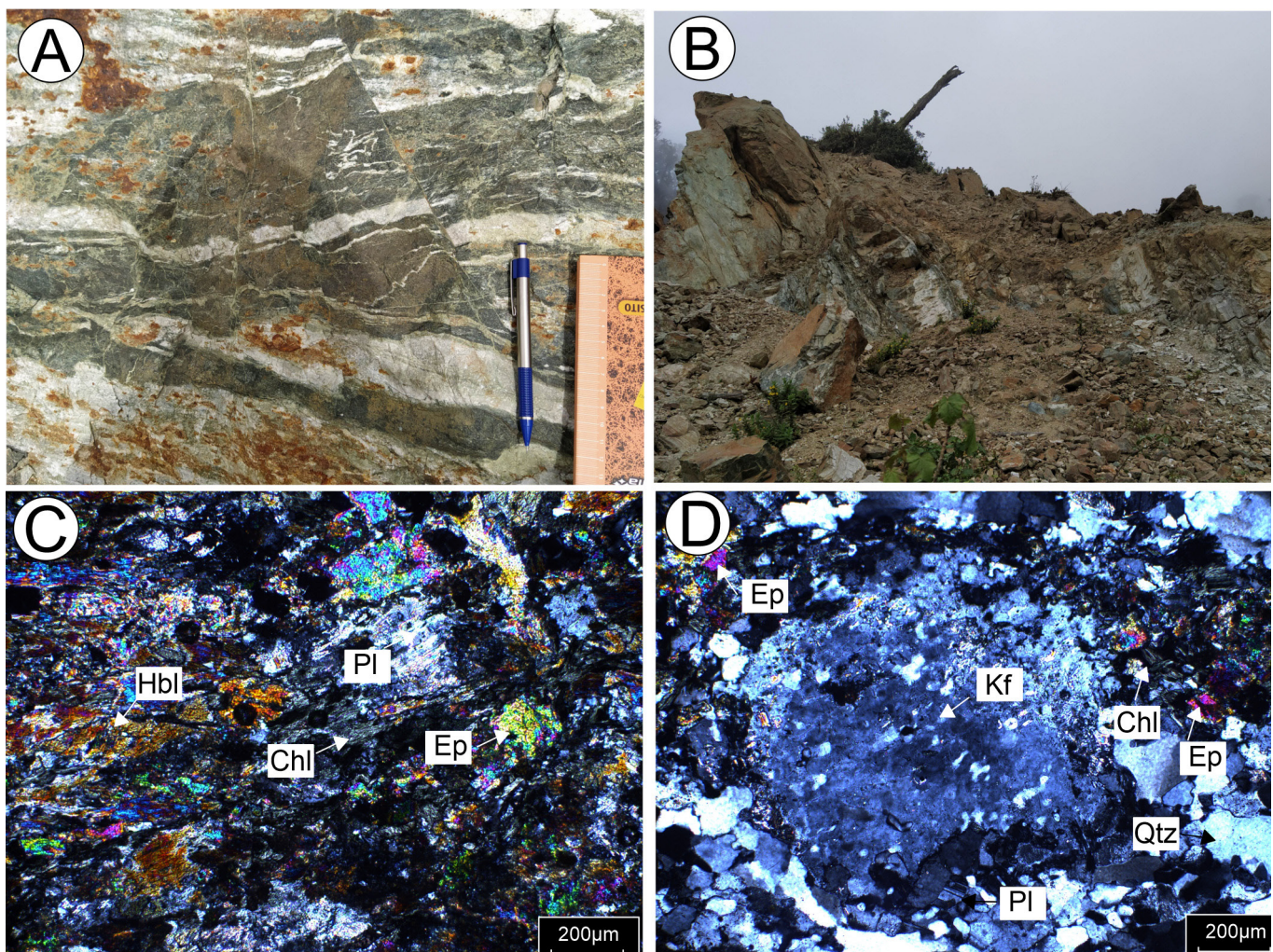


Figura 4. Fotografía de un gneis anfibolítico afectado por microfallas. B) Bloques o rodados de gneises anfibolíticos. C) Microfotografías del melanosoma mostrando cristales de hornblenda (Hbl), clorita (Chl), plagioclasa (Pl) y epidota (Ep). D) microfotografías del leucosoma mostrando porfidoblastos de feldespato (Kf) en una matriz de Qtz y Pl.

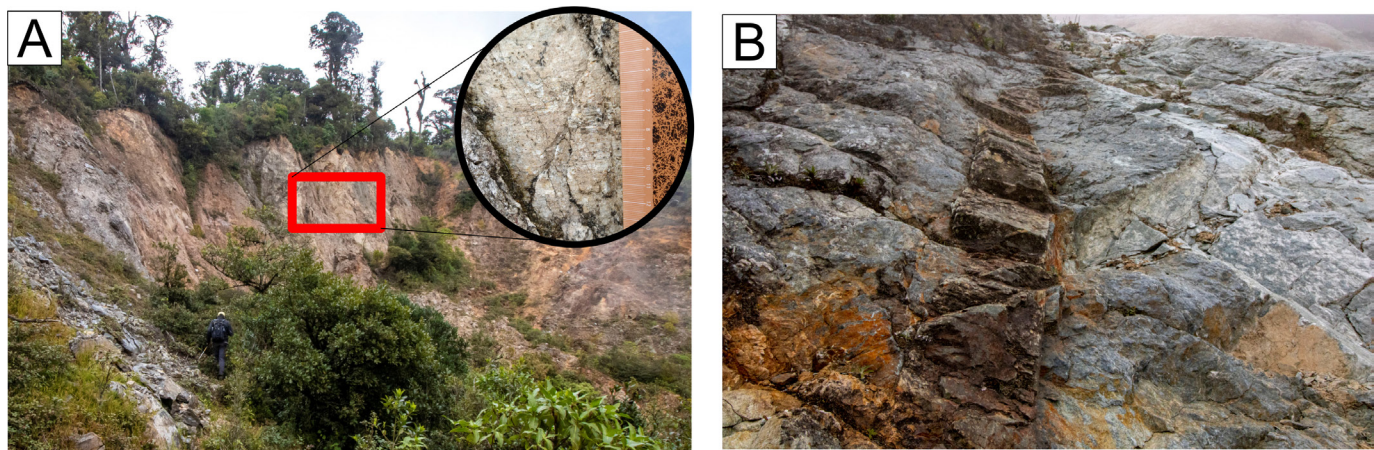


Figura 5. A) Afloramiento en la cabecera del deslizamiento constituido por granitos de textura foliada. B) Diques dioríticos cortando a los micaesquitos.

Análisis multitemporal del deslizamiento

Para determinar cuando ocurrió el deslizamiento, se revisaron imágenes satelitales desde el año 2000 al 2020, encontrando que el proceso de remoción ocurrió entre los meses de mayo y octubre del 2005.

Con ayuda del software ArcMap se realizó el cálculo del área del deslizamiento para cada una de las imágenes a partir del 2005 (Figura 6). El área calculada para la imagen satelital del año 2020 (Figura 6D) es de 39 ha, en contraste con las 17 ha de la imagen de 2005 (Figura 6A), teniendo un aumento de 22 ha en 15 años. Los valores comparativos de cada una de las imágenes y sus áreas se muestran en la Tabla 1.

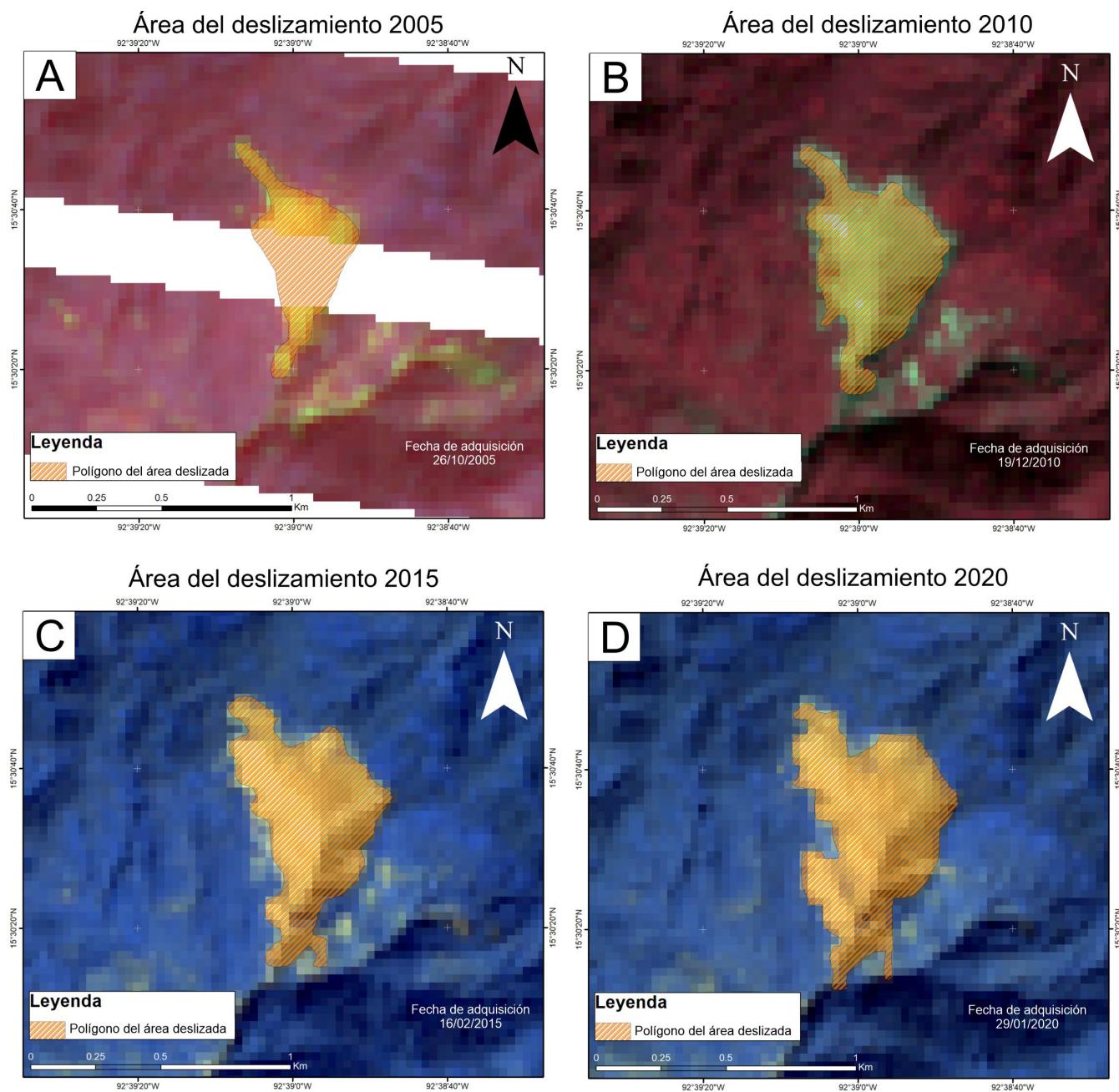


Figura 6. Análisis multitemporal de imágenes satelitales para el periodo 2005-2020.

Tabla 1. Comparación entre áreas y perímetros de los polígonos del deslizamiento para diferentes años.

Año	Área deslizada (ha)	Perímetro	Diferencia de área (ha) respecto a 2005
2005	17	2360	0
2010	26	3032	9
2015	32	3399	15
2017	36	3530	19
2020	39	3849	22

Tabla 2. Porcentajes de cambio de área en los periodos analizados.

Periodo	Diferencia de área (Ha)	Porcentaje de cambio (%)
2005-2010	9	53
2010-2015	6	23
2015-2020	7	22

En la Tabla 2, se presenta un resumen de los resultados obtenidos al analizar los diferentes polígonos del deslizamiento en periodos de cinco años. El periodo de remoción de masa de mayor envergadura parece haberse generado en el periodo 2005-2010, donde hubo un crecimiento de 9 hectáreas, con una tasa de crecimiento de 1.8 hectáreas por año. Dicho evento es seguido por el periodo 2015-2020 con un porcentaje de cambio del 22% equivalente a 7 hectáreas y con una tasa de crecimiento del área deslizada de 1.4 hectáreas por año.

Estimación de volumen removido

La estimación del volumen removido se llevó a cabo a partir de superficies TIN generadas de los siguientes MDE de diferentes periodos y resoluciones: (1) del satélite ALOS PALSAR (12.5 m de resolución espacial) de los años 2006 y 2011 y (2) del satélite ASTER (30 m de resolución espacial) de los años 2001 y 2006. Posteriormente, con ayuda de la herramienta Surface Difference de ArcMap se hizo el cálculo de la diferencia entre superficies.

Este procedimiento permite realizar la comparación entre dos superficies, una de entrada y una de referencia. La herramienta provee un análisis visual de este cálculo, detectando la intersección de los triángulos de las superficies, subdividiéndolos dentro de porciones clasificadas como positivo (1, azul), negativo (-1; verde) o coplanar (0; gris) respecto a la superficie de referencia. De esta manera, triángulos contiguos con la misma clasificación son agrupados en polígonos y sus contribuciones volumétricas son sumadas (ESRI, 2016).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al calcular la diferencia entre las superficies referidos a los años 2001 (referencia) y 2006 (entrada), con el fin de estimar el volumen removido inmediatamente después del evento. Para este caso se generaron nueve polígonos (Figura 7A) que, con base en la categorización establecida por la herramienta, determina que durante este periodo el área estudiada perdió 6,291,969 m³ de material. Los resultados del cálculo pueden consultarse en la Tabla 3.

Por otro lado, con el fin de determinar el volumen removido después del evento, se realizó el mismo procedimiento entre superficies de los años 2006 (referencia) y 2011 (entrada), generando un total

de 254 polígonos (Figura 7B). El resultado de este cálculo arrojó un volumen removido para este periodo de 72,504 m³ de material. Los resultados del cálculo pueden observarse en la Tabla 4.

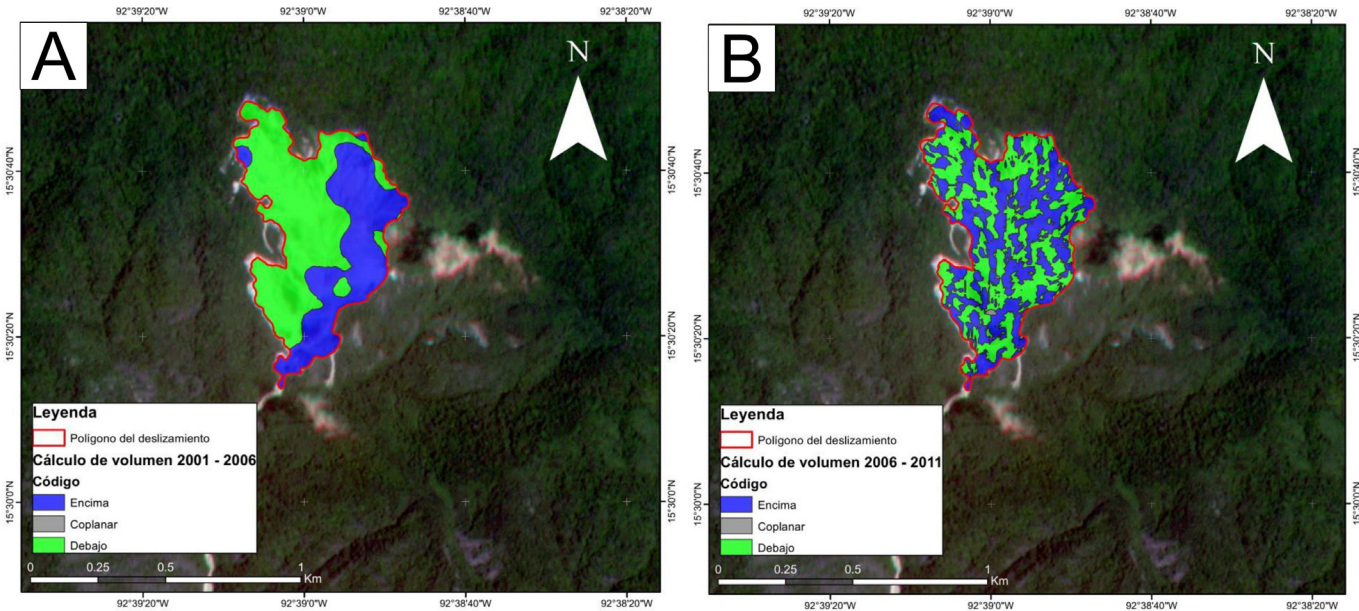


Figura 7. Mapa de diferencia de superficies. A) Años 2001 y 2006; B) Años 2006 y 2011.

Tabla 3. Volumen total de áreas donde la superficie de entrada (2006) se encuentra por encima (1) o por debajo (-1) de la superficie de referencia (2001).

No. de polígonos	Suma de los volúmenes (m ³)	Código
5	6,291,969	-1
4	2,665,032	1

Tabla 4. Volumen total de áreas donde la superficie de entrada (2011) se encuentra por encima (1) o por debajo (-1) de la superficie de referencia (2006).

No. de polígonos	Suma de los volúmenes (m ³)	Código
98	72,504	-1
52	0	0
104	68,019	1

Precipitación

Con la información recabada del análisis multitemporal se dedujo que el deslizamiento ocurrió entre los meses de mayo y octubre del 2005. Buscando una relación entre este evento y algún fenómeno desencadenante, como las precipitaciones, se consultaron los datos de la estación meteorológica Independencia (Código 7348) ubicada 19.2 km al sureste del deslizamiento. El análisis de la información reveló que los meses de mayor precipitación fueron septiembre y octubre, con 882 y 1152 mm, respectivamente (Figura 8A). Las precipitaciones del mes de octubre son concordantes con la llegada del Huracán Stan, el cual, de acuerdo con el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC, 2006), tocó tierra en las costas de Yucatán el 2 de octubre, degradándose a tormenta tropical el 4 de octubre y desvaneciéndose el día 5 del mismo mes en la zona montañosa de Oaxaca.

Los datos de precipitación mensual muestran que la precipitación en la región comenzó desde mayo, siendo julio y septiembre los meses más lluviosos antes de la llegada del huracán. La lluvia acumulada entre el día 1 de mayo y el día 1 de octubre fue de 3560 mm. A la llegada del huracán, del 2 hasta el 10 de octubre, las lluvias acumuladas alcanzaron los 1095 mm, donde el día 5 de octubre fue el más intenso, registrando 477 mm de precipitación (Figura 8B). De esta manera, el total de precipitación acumulada desde el 1 de julio hasta el 10 de octubre fue de 4710 mm.

Mediante este análisis es claro inferir que la lluvia acumulada desde el mes de mayo jugó un papel importante para la formación del deslizamiento, sin embargo, las intensas precipitaciones provocadas por el paso del Huracán Stan en la región parecen ser el factor detonante del evento.

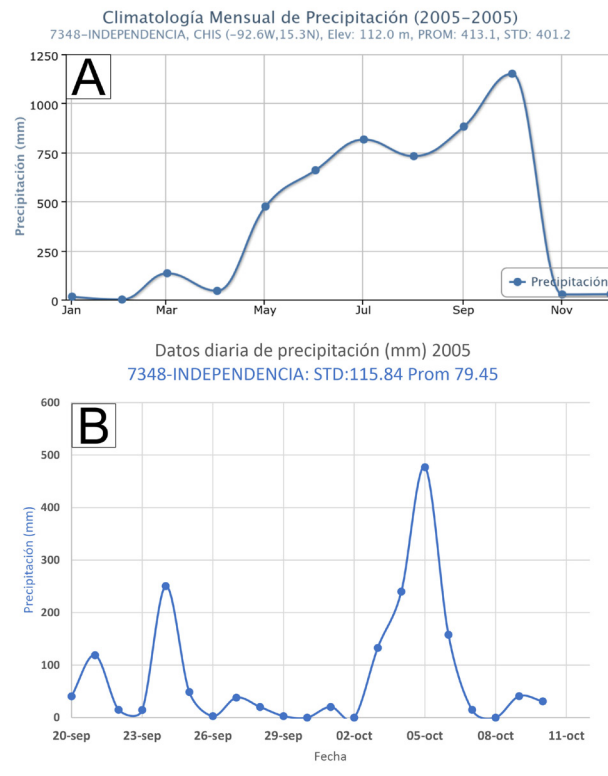


Figura 8. A) Gráfica mostrando datos de precipitación mensual de 2005. B) Gráfica mostrando datos de precipitación diaria del 20 de septiembre al 10 de octubre. Datos obtenidos del SMN (2016).

Por otro lado, buscando una correlación entre los períodos de mayor crecimiento del área del deslizamiento con la precipitación en la zona, se consultaron los datos de la estación meteorológica Independencia para el periodo 2005 al 2010 y la estación Finca La Paz (Código 7393) para el periodo 2010 al 2015. No hay datos disponibles para años posteriores. Estos períodos, tienen en común altas tasas de precipitación anual, donde el periodo 2005-2010 tuvo un promedio de 4128 mm (Figura 9A) mientras que para el periodo 2010-2015 se registró un promedio de 4045 mm (Figura 9B).

Es notable, que para el periodo 2010-2015, en 2015, se presentaron bajas tasas de precipitación respecto a años anteriores. Según la CONAGUA (2015), Chiapas fue el 14vo estado con menores precipitaciones del país, presentando sequías moderadas a severas en al menos 52.2% de su territorio durante ese año. Lo anterior es consecuencia de la formación del fenómeno El Niño, el cual se desarrolló durante los últimos meses del 2014 y 2015, siendo uno de los tres más intensos desde 1950.

Al analizar lo anterior, es posible notar que los periodos con mayor precipitación contribuyen al crecimiento del deslizamiento. En este sentido, el

crecimiento mayor en área del deslizamiento, parece concordar con las altas precipitaciones ocurridas durante el periodo 2005-2010, mientras que una disminución en su crecimiento se correlaciona con una baja en las precipitaciones durante el periodo del 2010-2015, como consecuencia de las sequías provocadas por el patrón climático El Niño durante los años 2014 y 2015.

Sismicidad

Otro de los factores que promueven o desencadenan los procesos de remoción de masa es la sismicidad. El Estado de Chiapas se encuentra en una de las regiones sísmicas más activas del país, debido principalmente a la subducción de la placa Cocos bajo la placa Norteamérica. Con el fin de encontrar una relación de la sismicidad con el crecimiento del deslizamiento, se consultó el catálogo histórico de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2023), del periodo 2000 al 2020, en un área de coordenadas 14.73°N 16.34°N y -94.14°W -92.24°W para sismos de magnitudes entre >4.0 a 9.0 e hipocentros superficiales a profundos. La Tabla 5 presenta un resumen del número de sismos entre 2000 y 2020, así como el evento de mayor magnitud para cuatro períodos de cinco años.

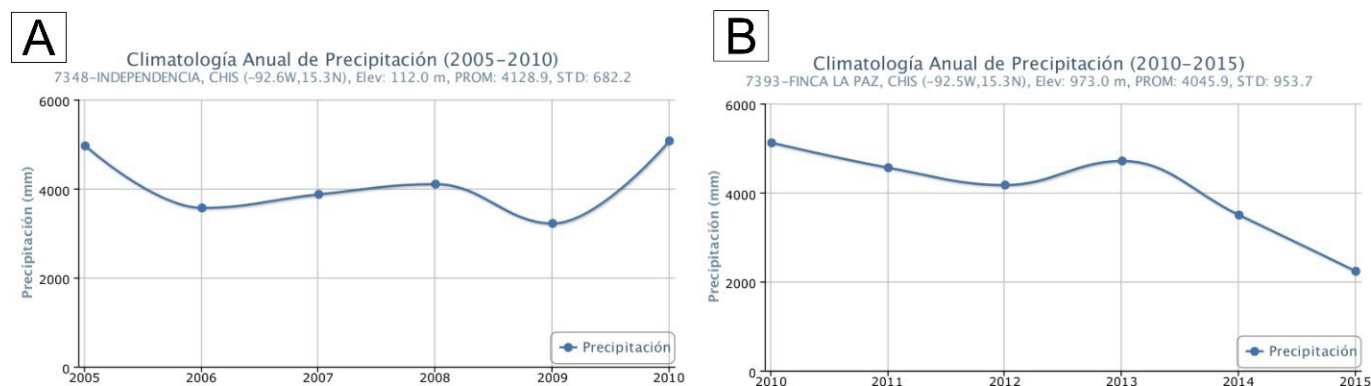


Figura 9. Gráficas con datos de la precipitación anual promedio para los períodos A) 2005-2010 y B) 2010-2015. Datos obtenidos del SMN (2016).

Tabla 5. Resumen del número, magnitud promedio y magnitud máxima de los sismos registrados por periodo.

Periodo	no. De sismos	Magnitud promedio	Magnitud máxima	Fecha del evento de máxima magnitud	Diferencia de área (Ha)
2000-2005	367	4.3	6.4	16/01/2002	N/A
2005-2010	313	4.2	6.2	05/07/2007	9
2010-2015	469	4.2	6.6	17/12/2015	6
			6.2	21/01/2012	
2015-2020	1170	4.1	8.2	08/09/2017	7

Al analizar los datos para los periodos de 2005-2010 y 2010-2015 no parece haber diferencia significativa entre ambos, pues presentan una cantidad de sismos y una magnitud promedio similar. A pesar de ello, no parece haber una correlación clara entre la cantidad y magnitud de los sismos con el crecimiento de la estructura para estos periodos. Sin embargo, al examinar la proximidad de los epicentros al deslizamiento, se encontró que entre 2005 y 2010 tres sismos de magnitud moderada ($M = \sim 4.3$) ocurrieron en un radio de 2 a 10 km del deslizamiento estudiado. Al comparar el promedio de precipitación mensual durante el año de ocurrencia de cada sismo, se observó que estos sucedieron durante la temporada de lluvias, con excepción de uno. Es probable, que tanto la precipitación como los sismos, fueron los factores que contribuyeron al crecimiento de la estructura de deslizamiento entre 2005 y 2010, haciendo de este periodo el de mayor crecimiento.

Durante el periodo 2015-2020, la cantidad de sismos registrados aumentó respecto a los periodos anteriores. A pesar de ello, esto no se tradujo en un crecimiento significativo de la estructura, teniendo una pequeña diferencia respecto al periodo de 2010-2015. Además, la falta de datos de precipitación en este lapso, dificulta evaluar el impacto de alguno de los factores desencadenantes (sismicidad y precipitación) en el crecimiento de la estructura. Por otra parte, durante este periodo se registró el sismo de mayor magnitud ($M = 8.2$, 8 de septiembre de 2017) respecto a periodos

anteriores, cuyas repercusiones en la estructura se discuten más adelante.

Por otro lado, se consultaron los mapas de intensidad sísmica (Figura 10) de los eventos de mayor magnitud de cada periodo estudiado, con el fin de evaluar una posible relación de estos eventos con el crecimiento de la estructura. El PGA (Pico de Aceleración del Terreno, por sus siglas en inglés) o intensidad, es frecuentemente utilizado en la evaluación de riesgo de deslizamientos provocados por sismos, siendo el movimiento del suelo, uno de los factores críticos que los desencadena (Shao y Xu, 2022). En estos mapas, se utilizó la escala de Mercalli modificada por Worden et al. (2012), donde la intensidad es la medición del evento de acuerdo con la percepción de la población y su equivalente en PGA.

Los mapas de intensidad (USGS, 2017b) para los sismos del 16 de enero del 2002 ($M = 6.4$; Figura 10D), 21 de enero del 2012 ($M = 6.2$; Figura 10C) y 17 de diciembre del 2015 ($M = 6.6$; Figura 10B) revelan que la intensidad registrada en la estructura alcanza una escala entre V y IV (ligera a moderada). Los inventarios globales disponibles sobre deslizamientos causados por sismos, muestran que estos eventos se concentran principalmente en sismos de intensidad VI o un PGA apenas inferior a 21.5 (%g) (Chen et al., 2020; Meunier et al., 2007; citados en Shao y Xu, 2022). Es poco factible, que la intensidad registrada en la zona debido a los sismos mencionados, haya causado la reactivación

o crecimiento del deslizamiento. En contraste, para el sismo del 8 de septiembre de 2017 ($M=8.2$; Figura 10A), se registró una intensidad VI (considerada como fuerte a muy fuerte) cerca del deslizamiento. Es probable que este evento haya contribuido al debilitamiento o crecimiento de la estructura entre 2015 y 2020.

Análisis estructural

La observación y medición de las estructuras en las rocas es fundamental para visualizar el contexto general de la disposición de las mismas en campo, lo que nos permite encontrar discontinuidades (estratificación, foliaciones, fracturas o fallas) en el macizo rocoso. Estas últimas se consideran

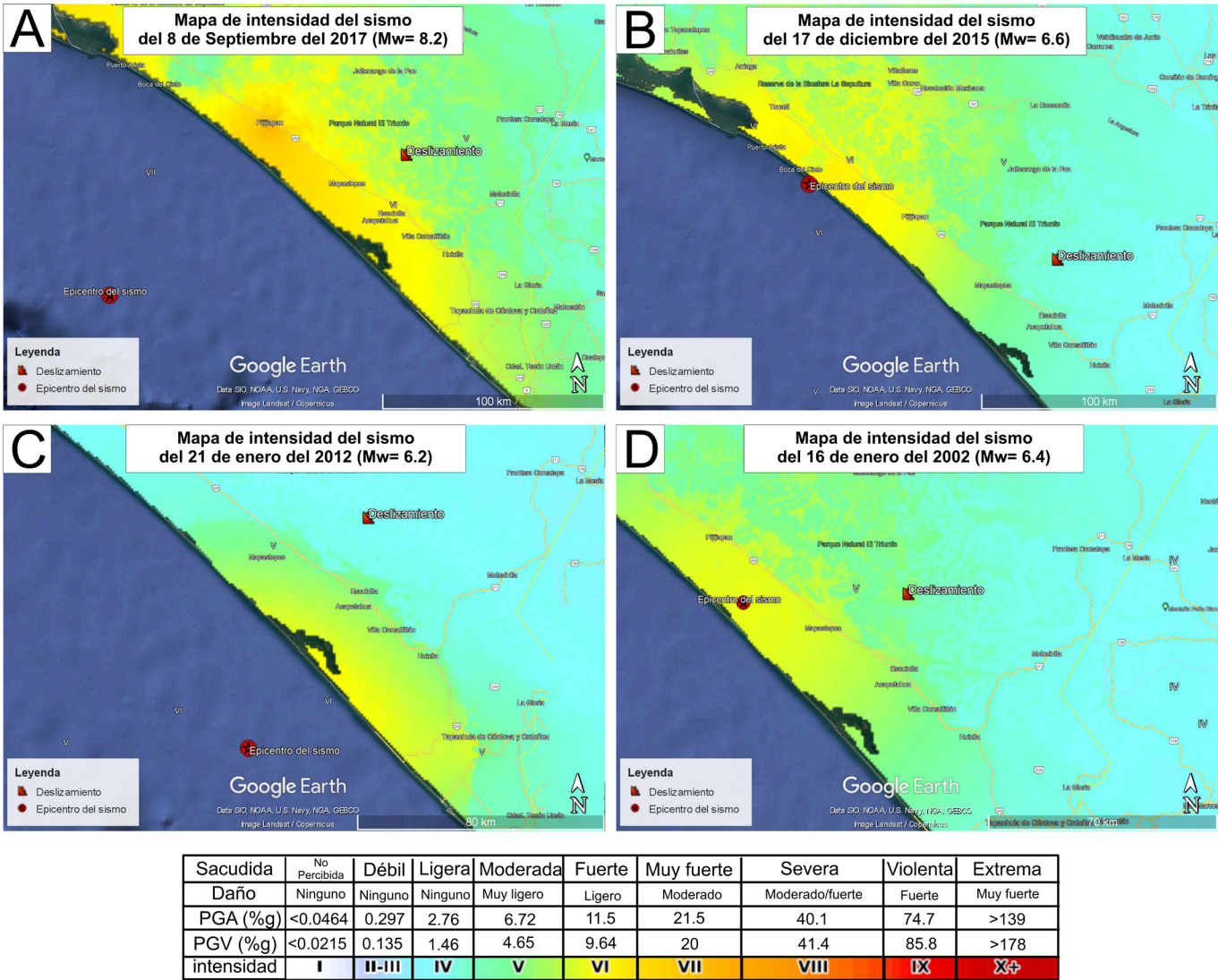


Figura 10. Mapas de intensidad sísmica para los sismos de mayor magnitud. PGA (Pico de aceleración del terreno) y PGV (Pico de velocidad del terreno).

como planos para su estudio, siendo importante la medición de su orientación e inclinación. La geología estructural provee un marco de referencia para la colecta de estos datos y permite su interpretación para identificar los posibles factores de inestabilidad.

El método estereográfico es la herramienta típicamente usada para un análisis cinemático, donde una de sus mayores fortalezas es que permite traducir un problema tridimensional a dos dimensiones, de forma que los planos se pueden representar mediante líneas y las líneas mediante puntos. Además, permite representar en un único elemento las discontinuidades del macizo rocoso y los planos de los taludes a estudiar.

La evaluación estereográfica de la disposición de los planos de un macizo rocoso es un primer paso para la estimación de la probabilidad y consecuencias de un posible deslizamiento.

El trabajo de campo permitió obtener mediciones de distintos planos dentro del escarpe del deslizamiento: a) doce planos de foliación correspondientes a los micaesquitos (en negro), los cuales tienen un rumbo promedio de $303^{\circ}/74^{\circ}$. Estas rocas a su vez contienen evidencias cinemáticas, tales como estrías de falla (Figura 2D), que indican fallamiento normal. Se midieron seis planos con estrías de los cuales se obtuvo un rumbo promedio de $067^{\circ}/57^{\circ}$ (en verde). Por otro lado, mediante el análisis de imágenes satelitales (Figura 1A), pudo observarse que el río El Rosario presenta cambios de dirección abruptos en su cauce, los cuales son atribuidos a un sistema de fallas laterales. Este sistema parece extenderse hasta el área del deslizamiento con un rumbo general de 195° (en azul). Finalmente, con ayuda de modelos digitales de elevación e imágenes satelitales se obtuvo el plano del talud que contiene el deslizamiento, obteniendo valores de $123^{\circ}/60^{\circ}$ (en rojo).

Con el fin de evaluar la estabilidad y la probabilidad de derrumbe de esta estructura, los distintos planos obtenidos en campo se graficaron en el diagrama estereográfico (Figura 11). Los rompimientos del tipo cuña ocurren cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud. El análisis cinemático de una rotura en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos.

De los planos graficados en el estereograma, existen tres distintas intersecciones entre planos ($195^{\circ}/50^{\circ}$, $106^{\circ}/44^{\circ}$ y $014^{\circ}/72^{\circ}$). Para que una intersección entre planos llegue a ser inestable, consideramos que deben de cumplirse algunas condiciones estructurales, las cuales se resumen a continuación.

- a. La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la dirección del buzamiento de la superficie del talud.
- b. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud .
- c. El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de rozamiento promedio de las dos superficies.

El análisis cinemático revela que la intersección en $195^{\circ}/50^{\circ}$ es la causante del rompimiento cuneiforme de la estructura. Al superar el ángulo de fricción promedio para rocas metamórficas (30° , Hoek y Bray, 1981) y al aflorar en la cara del talud, esta intersección cumple con los criterios establecidos para considerar a la estructura como inestable y con alta probabilidad de seguir derrumbándose.

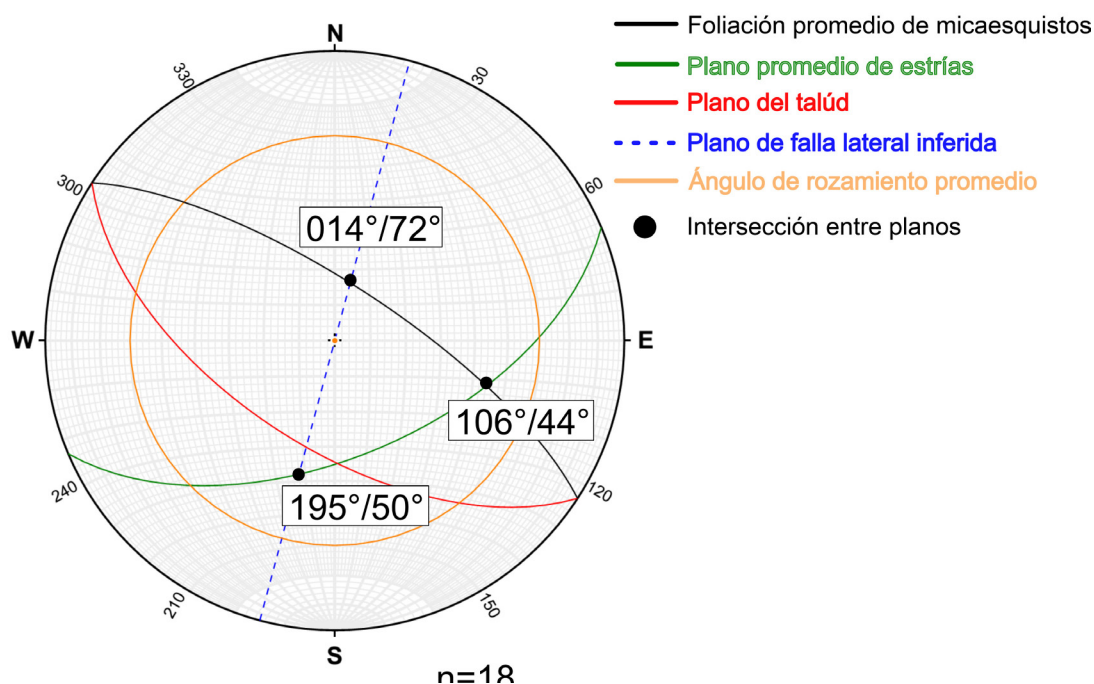


Figura 11. Análisis estructural del deslizamiento. Los diferentes planos promedio obtenidos de la estructura se muestran graficados en el estereograma: Plano promedio de las estrías (en verde); plano promedio de foliación de los micaesquistos (en negro) así como el plano de una falla lateral inferida (en azul). Asimismo, las intersecciones entre estos planos están dibujadas con un punto negro indicando su orientación e inmersión dentro del estereograma.

Conclusiones

Mediante el análisis multitemporal, se encontró que el deslizamiento se formó en el mes de octubre del 2005. Las altas tasas de precipitación en este mes están relacionadas con la llegada del Huracán Stan a las costas de México. Este exceso de precipitaciones causó el arrastre superficial de partículas y saturación de los suelos, así como la disminución en la resistencia de las fracturas, que pudieron desencadenar la formación de este movimiento en masa. Si bien, no se encontró una relación directa de la sismicidad como factor desencadenante del evento de remoción de masa, no se descarta que ésta pudo haber sido un factor adicional en el debilitamiento de la estructura del talud. En este sentido, la combinación de factores geológicos y climáticos, ocasionó la formación de este gran deslizamiento en la región, resultando en la remoción de ~ 6 millones de m^3 de material.

Por otra parte, al analizar la evolución del deslizamiento en lapsos de cinco años, se encontró que los periodos con altas tasas de precipitación tienen una relación directa con el crecimiento de la estructura. Aunado a ello, el análisis estructural reveló que el talud de la estructura es inestable y propenso a seguir creciendo. En este sentido, las altas tasas de precipitación y la intensa actividad sísmica que caracteriza a la región, pueden debilitar los planos de intersección generando superficies o bloques susceptibles a deslizarse. Esto parece cumplirse al examinar los epicentros de los sismos de acuerdo a su cercanía a la estructura, encontrando una relación directa entre el crecimiento de la estructura y estos eventos para los periodos de 2005-2010 y 2015-2020.

El intemperismo acentuado de las rocas que conforman el deslizamiento, la inestabilidad de la estructura, sumado al levantamiento constante de

la sierra (~ 0.4 km/Ma; Villagómez y Pindell, 2020), imposibilitan y hacen inviable la estabilización del talud del deslizamiento. De acuerdo con lo anterior, el monitoreo de esta estructura es de vital importancia, especialmente en periodos de fuertes lluvias, pues desastres secundarios pueden derivarse de la reactivación de las estructuras que promueven el deslizamiento. Tales riesgos pueden incluir flujos de escombros o flujos de lodo, los cuales pueden ser transportados a través del cauce del Río El Rosario. En este sentido, es de especial interés crear un mapa de riesgos para este posible escenario, principalmente enfocado a las localidades de Rosario Zacatonal y Cintalapa, las cuales están más cercanas al cauce de este río.

Agradecimientos

Agradecemos a todo el personal de la Reserva de la Biósfera “El Triunfo”, en especial a Miriam Janette González García, cuya disponibilidad e inmejorable gestión hicieron posible las diferentes campañas en el área. Al equipo conformado por Manuel Cruz Landa, Rossana Megchún Guerrero, Octavio Arcenio y Adolfo Carbajal Gómez, que nos brindaron todo el apoyo y las facilidades para trabajar en la zona. A los habitantes del poblado de Ampliación Lagunas, en particular a Gilberto Cifuentes, pues sin su conocimiento del área, el recorrido hasta el deslizamiento hubiera sido más complicado.

Finalmente agradecemos a los revisores Felipe Escalona Alcázar y Roberto Rocha Miller cuyos comentarios y observaciones ayudaron a mejorar y enriquecer el contenido del manuscrito, así como al editor Luis Delgado Argote y el equipo editorial de la revista GEOS que hacen posible la divulgación de este trabajo.

Referencias

- Alcántara-Ayala, I., Echavarría-Luna, A., Gutiérrez-Martínez, C., Domínguez-Morales, L. y Noriega-Rioja, I. (2001). Inestabilidad de Laderas. 2a edición, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 39pp. https://www.researchgate.net/publication/288369167_Inestabilidad_de_Laderas.
- ASF-DAAC (2006) ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res, Includes Material © JAXA/METI 2006. Descargado a través de EarthExplorer, <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, el 2023-07-29. DOI: <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- ASF-DAAC (2011) ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res, Includes Material © JAXA/METI 2011. Descargado a través de EarthExplorer, <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, el 2023-07-29. DOI: <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Chen, M., Tang, C., Xiong, J., Shi, Q. Y., Li, N., Gong, L. F., Wang, X. D., & Tie, Y. (2020). The long-term evolution of landslide activity near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake in China. *Geomorphology*, 367, 107317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107317>
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 3er edición. Barcelona, 594 pp.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>

- CONAGUA (2015). Reporte Anual del Clima en México: Reporte anual 2015, Autor. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico%20Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20México/Anual2015.pdf>
- Estrada-Carmona, J., Weber, B., Martens, U., López-Martínez, M. (2012). Petrogenesis of Ordovician magmatic rocks in the southern Chiapas Massif Complex: Relations with the early Palaeozoic magmatic belts of northwestern Gondwana. *International Geology Review*, 54(16), 1918–1943. DOI: 10.1080/00206814.2012.68555.
- ESRI. (2016). ArcGIS for Desktop. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-surface-difference-3d-analyst-works.htm>
- González-Guzmán, R., Weber, B., Manjarrez-Juárez, R., Cisneros de León, A., Hecht, L., Herguera-García, J.C. (2016). Provenance, age constraints and metamorphism of Ediacaran metasedimentary rocks from the El Triunfo Complex (SE Chiapas, México): evidence for Rodinia breakup and Iapetus active margin. *International Geology Review*, 58(16), 2065–2091. DOI: 10.1080/00206814.2016.1207208.
- Hoek, E. y Bray, J.W. (1981) *Rock Slope Engineering*. Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341-351. <https://books.google.com.mx/books?id=VScRRWxHf4C>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. 7th edition. New Jersey, 770 pp.
- Meunier, P., Hovius, N., y Haines, A. J. (2007). Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophysical Research Letters*, 34(20). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2007GL031337>
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team (2001), ASTER On-Demand L3 DEM and Orthorectified Images, GeoTIF Format, AST14DMO_00301162001165919, tomada el 16 de enero del 2001. Descargada el 2023-07-29 de <https://doi.org/10.5067/ASTER/AST14DMO.003>.
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team (2006), ASTER On-Demand L3 DEM and Orthorectified Images, GeoTIF Format, AST14DMO_00312072006165301, tomada el 7 de diciembre del 2006. Descargada el 2023-07-29 de <https://doi.org/10.5067/ASTER/AST14DMO.003>.
- National Hurricane Center, NHC (2006). Tropical Cyclone Report, Hurricane Stan. Autor. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL202005_Stan.pdf
- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2005). Landsat 7 LE7021049200529EDC00, GEOTIFF. DOI: <https://doi.org/10.5066/P9TU80IG>.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2010). Landsat 7 LT50210492010353CHM00, GEOTIFF. DOI: <https://doi.org/10.5066/P9IAXOVV>.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2015). Landsat 8 LC80210492015047LGN02, GEOTIFF. DOI: <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>.

- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2017a). Landsat 8: LC80210492017004LGN01, GEOTIFF. DOI: <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2020). Landsat 8: LC80210492020029LGN00, GEOTIFF. DOI: <https://doi.org/10.5066/P975CC9B>.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS, (2017b), ShakeMap – Earthquake Ground Motion and Shaking Intensity Maps: U.S. Geological Survey. DOI: <https://doi.org/10.5066/F7W957B2>.
- Shao, X., & Xu, C. (2022). Earthquake-induced landslides susceptibility assessment: A review of the state-of-the-art. *Natural Hazards Research*, 2(3), 172–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.03.002>
- SMN (2016). Base de datos climatológica nacional (CLICOM) [Conjunto de datos]. Recuperado de la plataforma web del CICESE. (s.f) <http://clicom-mex.cicese.mx>
- SSN (2023): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. Datos de sismicidad 2000 a 2020. Extraído el 29 de julio de 2023 desde <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>.
- Villagómez, D., & Pindell, J. (2021). Cooling and uplift history of the Chiapas Massif and its influence on sedimentation and deformation in the adjacent Sierra de Chiapas Basin. In U. C. Martens & R. S. M. Garza (Eds.), *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins* (Vol. 546, p. 0). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(17\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(17))
- Weber, B., Valencia, V. A., Schaaf, P., Pompa-Mera, V., Ruiz, J. (2008). Significance of provenance ages from the chiapas massif complex (Southeastern Mexico): Redefining the paleozoic basement of the maya block and its evolution in a peri-gondwanan realm. *Journal of Geology*, 116(6), 619–639. DOI: 10.1086/591994
- Weber, B., González-Guzmán, R., Manjarrez-Juárez, R., Cisneros de León, A., Martens, U., Solari, L., Hecht, L., y Valencia, V. (2018). Late Mesoproterozoic to Early Paleozoic history of metamorphic basement from the southeastern Chiapas Massif Complex, Mexico, and implications for the evolution of NW Gondwana. *Lithos*, 300–301, p. 177–199. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.12.009.
- Worden, C. B., Gerstenberger, M. C., Rhoades, D. A., Wald, D. J. (2012). Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), p. 204–221. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120110156>.

Manuscrito recibido: 12 de octubre, 2023

Recepción del manuscrito corregido: 15 de abril, 2024

Manuscrito aceptado: 19 de abril, 2024

Evidencia geodésica del sismo de Mw 7.0 de abril de 2012 a lo largo de un transecto Pacífico-Golfo de California, península de Baja California, México.

Carlos E. Reinoza¹, Elvia Ramón¹, Andrés Navarro¹, Luis Yegres¹, Franck A. Audemard M.^{1,2},
Alejandro González-Ortega¹

¹División de Ciencias de La Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CP.22860, México.

²Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.
E-mail: reinoza@cicese.mx

Resumen

Desde finales de 2022, revisitamos algunos sitios de observación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) en la parte central de la península de Baja California. De los 10 sitios medidos, 8 contaban con mediciones previas en 2009; los dos sitios restantes LOL0 y RSJ0 fueron recién instalados y medidos por primera vez como parte de este trabajo. Para llevar a cabo las observaciones, se realizaron mejoramientos importantes en materia de almacenamiento y alimentación, con el fin de alargar la vida útil de receptores geodésicos obsoletos. El objetivo de las nuevas campañas GPS es calcular la tasa de desplazamiento en mm a⁻¹ para cada uno de estos sitios y resolver algunas interrogantes en términos de deformación de la denominada “Microplaca de Baja California” (MBC) para esta zona en particular. Sin preverlo, luego del procesamiento e integración de los resultados de 2009 y 2022 se observó un gradiente de desplazamiento decreciente NE-SO en cinco sitios de medición distribuidos a lo largo de un perfil al oeste y perpendicular a la falla Salsipuedes (Sistema de fallas de Guaymas-SFG); estructura aparentemente responsable del sismo de Mw 7.0 del 12 de abril de 2012. Si bien, estudios previos indican que el 90% del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico es acomodado por las fallas que cruzan el Golfo de California, y que la deformación interna se ha observado en los sitios más cercanos a las fallas que cruzan el Golfo; los valores de velocidad obtenidos para los sitios más cercanos a la falla Salsipuedes son mucho más altos de lo esperado. Con base en todo esto, inferimos que el sismo del 2012 pudo haber generado desplazamiento cosísmico y posiblemente postsísmico, afectando algunas localidades cercanas como posiblemente lo evidencian algunos de nuestros sitios de medición. Se espera reocupar los vértices próximamente, con el fin de ofrecer más luces sobre el comportamiento del SFG así como de la falla Tosco-Abreojos en la costa pacífica.

Palabras clave: GNSS, desplazamiento cosísmico, Sistema de fallas de Guaymas, Vizcaíno, Sismo.

Introducción

La idea de un límite de placas transformante como un simple alineamiento es una asunción o sobre-simplificación en tectónica de placas. De allí, que el concepto de zonas complejas, activas y de considerable ancho como límite (Plate Boundary Zone-PBZ), son más usuales y cercanos a la realidad (Audemard, 2014; Mann & Burke, 1984; Reinoza *et al.*, 2020). El límite de placas Pacífico-Norteamérica

en el sur de California y noroeste de México ha sido estudiado validando muy bien su carácter de una extensa zona de deformación y con presencia de varios bloques (McCaffrey, 2005; Meade & Hager, 2005). Por otro lado, la península de Baja California es uno de los mejores ejemplos de translación de un bloque tectónico a lo largo de un límite de placas divergente (Umhoefer & Dorsey, 1997). Las diferencias de movimiento relativo entre Baja California y la placa del Pacífico se han reportado

por diversos autores (Dixon *et al.*, 2000; Fletcher & Munguía, 2000; Gonzalez-Garcia *et al.*, 2003; Michaud *et al.*, 2004) y recientemente se han llevado a cabo estudios de geodesia espacial (GPS) pero con nuevas interpretaciones acerca de las fuerzas que controlan esta variación en la tasa de movimiento (Plattner *et al.*, 2007). A pesar de los diferentes esfuerzos desde posicionar equipos como distanciómetros electrónicos en la década de los ochenta (Lesage *et al.*, 1988) hasta receptores GPS/GNNS en las tres últimas décadas en la península de Baja California, hay una zona considerable entre las latitudes 26.5°N y 30.5°N (exceptuando las latitudes 28°-29°N aproximadamente) donde no se han realizado mediciones geodésicas. Desde CICESE, los esfuerzos de los últimos años han estado más enfocados en densificar las redes geodésicas del Norte de Baja California (González-Ortega *et al.*, 2018; REGNOM, 2017); en parte por las consecuencias del terremoto Mw 7.2 El Mayor-Cucapah de abril de 2010. Más aún, la parte central de la península se caracteriza por su difícil acceso, las condiciones y escasez de la vialidad, la lejanía a centros poblados importantes, hacen que se requieran recursos económicos importantes al momento de emprender un proyecto de adquisición de datos en estas zonas poco pobladas. No obstante, desde 2019 se planteó la necesidad de retomar los estudios hacia la parte central de la península, y de allí, que a finales de 2022, revisitamos algunos monumentos de mediciones GPS/GNSS previamente ocupados durante el 2009 por una cooperación germano-estadounidense con apoyo técnico del CICESE (Plattner *et al.*, 2015; Malservisi, 2011b, 2011a); pero de los cuales, al menos en seis sitios no se conocen vectores de velocidad calculados.

En este trabajo, además de incluir el procesamiento de datos adquiridos en 2009 y 2022, se incluyen detalles de la instalación de dos nuevos sitios de observación geodésica GPS/GNSS (RSJ0 y LOL0) y una propuesta de adecuación de instrumental de observación geodésica. Adicionalmente, se presentan secciones de resultados, discusión y

conclusiones preliminares donde se incluyen en el análisis: velocidades simuladas con base en el modelo de movimientos de placas ITRF2014 y un vector de velocidad de la estación IAGX con el fin de ampliar la discusión. En líneas generales, el objetivo de las nuevas campañas GPS es calcular la tasa de desplazamiento en mm a⁻¹ para cada uno de estos sitios y resolver algunas interrogantes en términos de deformación de la denominada “Microplaca de Baja California” (MBC) para esta zona en particular (Figura 1).

Recopilación de datos GPS

Entre el 7 y el 18 de noviembre de 2022, se ocuparon 10 sitios con receptores doble frecuencia GPS y antenas geodésicas choke-ring, logrando observaciones de hasta 120 horas continuas (cinco días continuos) para la mayoría de los sitios con intervalos de muestreo de 15 s y una máscara de elevación de 0°. Detalles de la duración de las observaciones se muestran en la Tabla 1. Se realizó una adecuación de los receptores con mejoras en almacenamiento y alimentación eléctrica que se describe en una sección más adelante. Del total de sitios, 8 habían sido ocupados en el año 2009; el par restante, corresponden a nuevos sitios de medición instalados siguiendo la metodología de utilizar “spits” o adaptadores de metal embutidos (Reinoza, 2015; Reinoza *et al.*, 2017) en afloramientos rocosos (sitio LOL0) o en monumentos de concreto (sitio RSJ0). La metodología sugiere que se realicen perforaciones de aproximadamente 1 ¼ pulgada y 10 cm de profundidad con el propósito de insertar y posteriormente pegar los adaptadores de acero inoxidable utilizando pegamento especial tipo epoxy, cuidando la verticalidad de estos mediante el uso de un nivel circular (Figura 2). En algunos casos se puede requerir el uso de una base nivelante para corregir la verticalidad de la instalación.

Las estaciones medidas durante el año 2009 (SANF, PROG, SV3A, PURI y ARCO) tienen datos disponibles previos y posterior al sismo de Mw 6.9 (Castro *et al.*, 2011) del 3 de septiembre de 2009 en el Canal

de Ballenas; aunque en el procesamiento solo se utilizaron los datos adquiridos posteriores a este evento. Los sitios SANF, PROG y SV3A se midieron durante 4 días continuos en septiembre de 2009 y las estaciones ARCO y PURI por 4 días continuos en diciembre del mismo año. El resto de las estaciones

(BTAP, PCLY y PEUG) a unos 200 km de distancia de la estación SANF, solo tenían datos disponibles de tres a cinco días continuos de medición adquiridos en mayo de 2009. Los datos disponibles muestran tasas de muestreo de 15 s (Tabla 1).

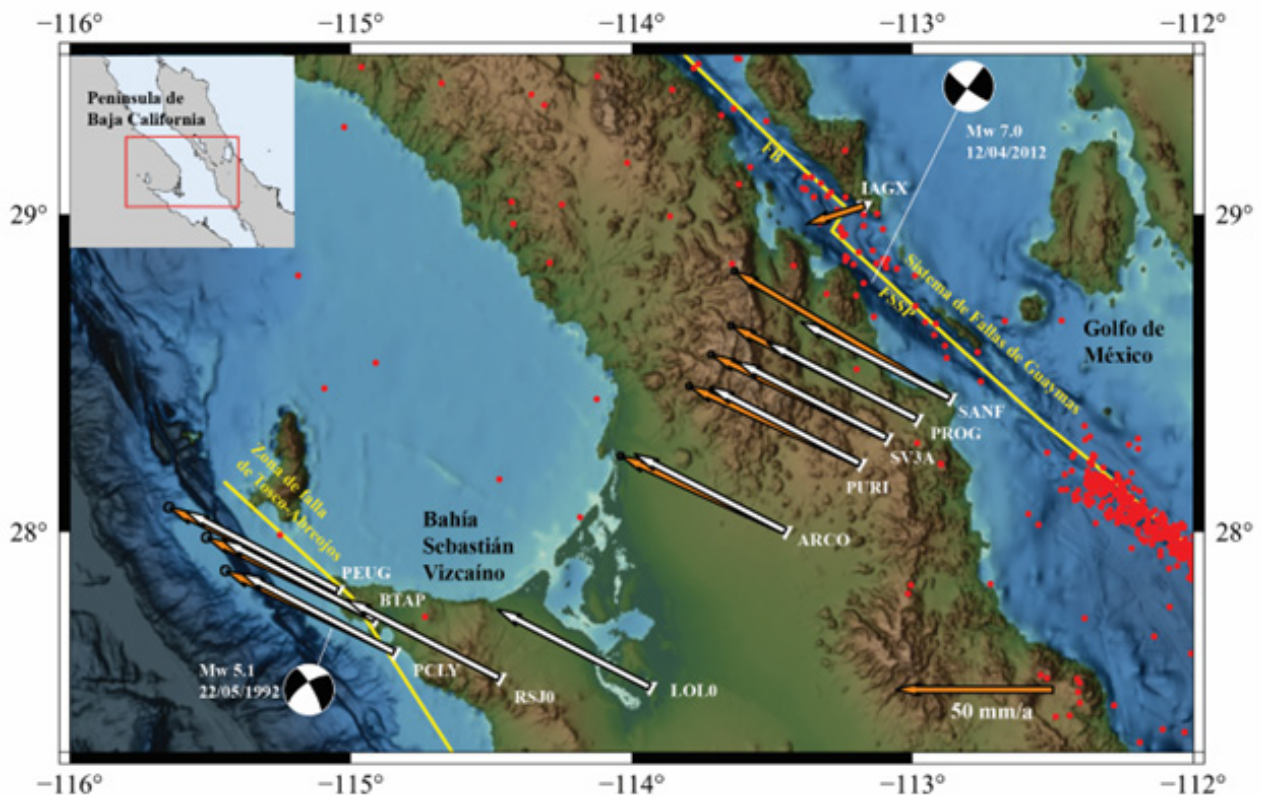


Figura 1. Velocidades observadas (flechas naranjas) expresadas en el marco de referencia ITRF2014. El vector IAGX, procesado en REGNOM está expresado en la realización IGB14. Las velocidades simuladas (flechas blancas) se representan con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). Adicionalmente, se muestra la distribución de la sismicidad desde octubre, 1995 hasta septiembre, 2023 (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), 1980), mecanismos focales del sismo Mw 5.3 de 1992 (Michaud et al., 2005) y del evento Mw 7.0 de 2012 (Liu et al., 2015). FB: falla Ballenas. FSSP: falla Salsipuedes.

Tabla 1. Estaciones medidas con sus respectivos días de ocupación durante 2009 y 2022 utilizados en este estudio.

Estación	Long (grados)	Latitud (grados)	Ocupación 2009*	Ocupación 2022
ARCO	-113.455	28.003	338-341	313-316
BTAP	-114.916	27.725	128-130	317-322
LOLO**	-113.937	27.509		320-322
PCLY	-114.847	27.620	128-132	317-322
PEUG	-115.048	27.816	128-130	317-320
PROG	-112.987	28.358	268-271	312-315
PURI	-113.189	28.216	338-340	312-316
RSJO**	-114.473	27.538		318-322
SANF	-112.868	28.423	268-271	311-315
SV3A	-113.094	28.297	268-271	312-316

* (Rocco Malservisi, 2011b, 2011a)

**Las estaciones LOLO y RSJO solo tienen una campaña de adquisición y no se incluyeron en el procesamiento.



Figura 2. Antena geodésica choke-ring sujeta por medio de una extensión al adaptador en acero inoxidable para piezas con rosca de 5/8"-11. (Manufactura: Laboratorio de Metalmecánica – CICESE) en el vértice LOLO.

Estrategias de procesamiento

Para el procesamiento se utilizó el programa Bernese 5.2 (Dach *et al.*, 2015) con el fin de proveer una nueva solución en el marco de referencia ITRF2014, siguiendo una estrategia de doble-diferencia utilizada en estudios previos (Ávila-Barrientos *et al.*, 2021; Jouanne *et al.*, 2011; Reinoza *et al.*, 2015; Reinoza *et al.*, 2020) y utilizando modelos de desplazamientos absolutos del centro de fase a la antena, así como órbitas precisas finales del IGS (International GNSS Service; Beutler *et al.*, 1999) y parámetros de rotación terrestre IGS. La influencia de las mareas oceánicas sobre la posición se estimó utilizando el modelo de mareas oceánicas FES2004 (Lyard *et al.*, 2006) mediante la herramienta disponible en internet de Hans-Georg Scherneck (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>) Para determinar las ambigüedades, coordenadas y desviaciones troposféricas, la estrategia sigue: (a) el análisis inicial de ionósfera-libre con cálculo de residuales, (b) análisis de residuales, (c) resolución de ambigüedades de banda ancha basado en código con todas las líneas base (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985) utilizando archivos DCB, (d) resolución de ambigüedades banda ancha (L5) basado en la fase para líneas base < 200 km y cálculo de la solución libre de ionósfera con la introducción de las ambigüedades resultantes, (e) resolución de ambigüedades sin resolver previamente para líneas base < 2000 km utilizando la estrategia de resolución de cuasi ionósfera libre, (f) resolución de ambigüedades directas L1/L2 para líneas base < 20 km y (g) cálculo de las ecuaciones normales. Las soluciones diarias GPS se transformaron en el marco de referencia ITRF2014 con una solución Helmert de seis parámetros utilizando estaciones IGS como sitios de referencia (BILL, BLYT, DHLG, GUAT, INEG, MDO1, MERI, PALX, PIE1, SCIP, TNHM, USMX y VNDP) y por su parte, las ecuaciones normales diarias son analizadas en conjunto para determinar coordenadas y velocidades (archivos de salida .CRD y .VEL).

Se procesaron ocho sitios de medición, con excepción de RSJO y LOL0, que solo cuentan con una campaña de ocupación reciente en 2022. Sin embargo, se obtuvieron las velocidades simuladas para estas dos estaciones (Figura 1) con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi *et al.*, 2016). El programa BERNESE subestima los errores de las coordenadas diarias debido a errores sistemáticos o parámetros modelados erróneamente que no se incluyen en el error formal (Hugentobler *et al.*, 2001). Para obtener un error estimado realista, se ajustaron los errores formales de las velocidades multiplicando por un factor de 10. Aunque el ITRF2014 introduce una innovación con la corrección para Deformación Post-Sísmica (PSD, por sus siglas en inglés), se seleccionaron solo estaciones de referencia sin correcciones PSD para derivar velocidades lineales de nuestra serie de ecuaciones diarias normales (Dach & Fridez, 2019). Las velocidades expresadas en el marco de referencia ITRF2014 se muestran en la Figura 1.

Adecuación del instrumental de observación geodésica

Los kits de campaña GPS/GNSS son ideales para llevar a cabo adquisiciones de datos de varios días, semanas e incluso meses. Los componentes básicos son el receptor y antena geodésica, la unidad de alimentación eléctrica y la unidad de almacenamiento de datos. Se decidió actualizar un conjunto de receptores GPS Ashtech Micro-Z que desde hace años ya mostraban signos de obsolescencia. La memoria original del receptor Ashtech Micro-Z no es extraíble y tiene una capacidad de 80MB; con la limitación de descarga de datos a un protocolo de transferencia ZMODEM que puede durar horas. Por otro lado, los receptores no cuentan con la funcionalidad de transmitir datos vía Internet. Debido a todo esto, se trabajó en la adaptación de una microcomputadora Raspberry Pi 4B (RPi4B) que permite la descarga diaria de datos, por lo que se desarrolló un código automático para

la descarga y borrado diario en el receptor con el fin de liberar la memoria interna del mismo. Con esta facilidad, el paso siguiente era adecuar un gabinete con todos los equipos y conexiones, de manera que el receptor-antena geodésica, microcomputador (almacenamiento) y baterías-celdas solares (alimentación eléctrica) actuaran como una unidad autónoma (Figura 3). La implementación de estos gabinetes transportables permite la instalación y desinstalación de forma rápida en el campo, así como en una reducción importante en el espacio requerido para su traslado. Los gabinetes o “case” pueden ser camuflajeados, son resistentes y significativamente menos costosos que otros tipos de estaciones GPS/GNSS. En el diseño se incluyó una capa de etilvinilacetato (EVA por sus siglas en inglés) para aislar la temperatura dentro del gabinete.

La tendencia de las adquisiciones de datos GPS/GNSS es incrementar la frecuencia de la tasa de muestreo y aumentar el tiempo de almacenamiento de los datos in situ, sin requerir la descarga continua por parte del operador como se ha mencionado previamente. Los microcomputadores RPi4B están programados para almacenar y enviar datos generados por el receptor GPS/GNSS. Básicamente el procedimiento llevado a cabo por el microcomputador es: (1) comunicarse cada hora con el receptor a través del puerto serial (RS232) preguntando si existe un archivo en la memoria, (2) en caso de existir, éste es descargado en la memoria de almacenamiento (espacio libre inicial 21 GB) y subsecuentemente el archivo es borrado dejando todo el espacio de almacenamiento libre en el receptor. (3) En el caso de contar con servicio de internet, los datos pueden ser enviados al servidor de la Red Geodésica del Noroeste de México (REGNOM).

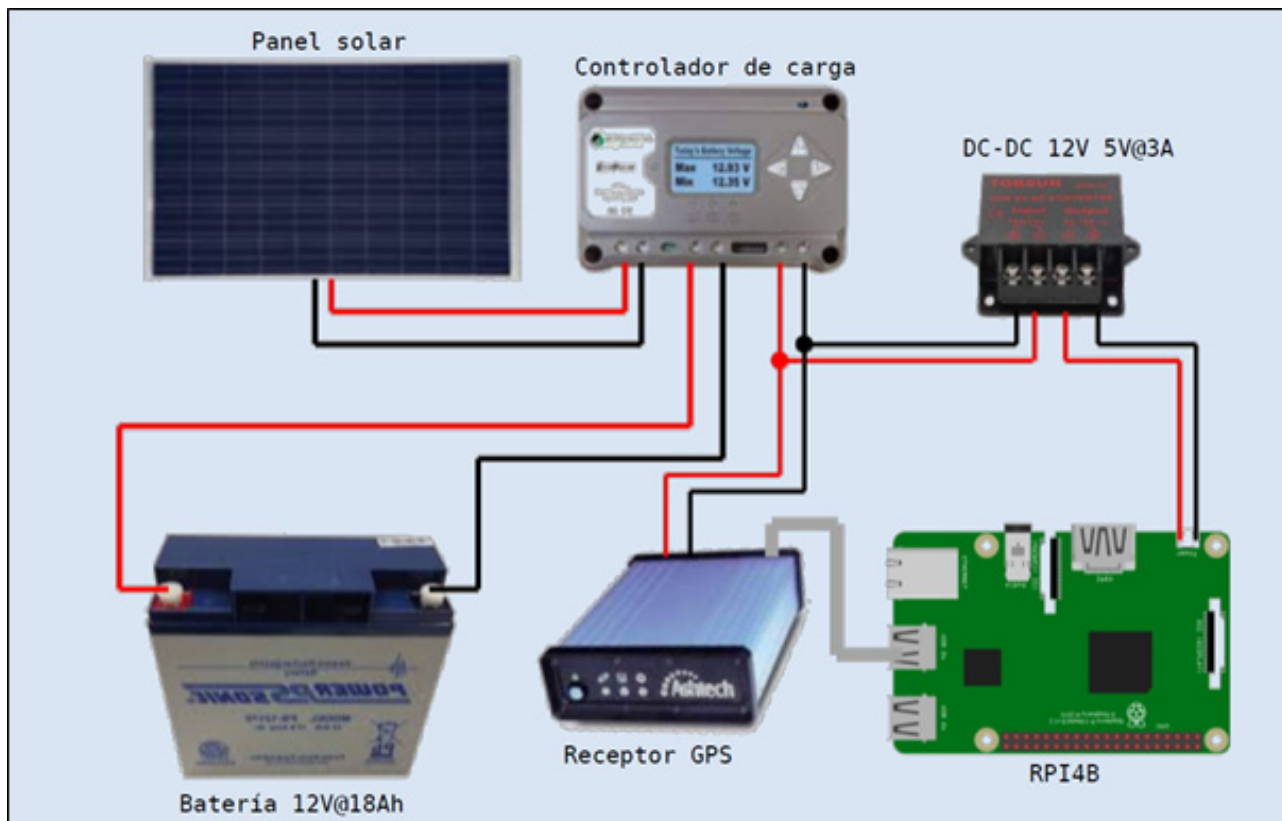


Figura 3. Diagrama de la conexión receptor geodésico - RPi4B, que incluye las baterías de 12V@18Ah, convertidor DC-DC 12V a 5V@3A, controlador de carga y panel solar.

Para el uso del programa principal es necesario instalar Raspbian en el microprocesador RPi4B, seguidamente actualizar los paquetes Raspbian, y montar el puerto serial y consola serial en las preferencias Raspberry. Y, por último, instalar el ftp, zmodem, minicom, bklid, y paquetes de extracción (eject). Cuando todos los paquetes y programas están ya instalados el siguiente paso consiste en conectar la RPi4B mediante un convertidor USB-serial. La microcomputadora cuenta con un puerto USB, mientras que el receptor Ashtech Micro-Z cuenta con un puerto RS232. El receptor geodésico es alimentado con 12V y la RPi4B con 5V; por lo que se hace necesario utilizar un convertidor DC-DC 12V a 5V@3A (Figura 3). El código que permite la descarga y eliminación de archivos del receptor es escrito en Python (.py); y es ejecutado cada hora a través de un comando Unix que crea una tabla o lista de comandos (crontab). En caso de contar con servicio de Internet, el programa envía los datos al FTP de REGNOM a través de una función hecha en bash y ejecutada también a partir de un crontab.

En lo que respecta a la alimentación eléctrica, se incluye una celda solar de 100 vatios, con dos baterías o acumuladores de 12V@18Ah, que permitiesen el funcionamiento de todo el equipo durante todo el día y la noche, evitando así la visita a la estación por parte del operador para el recambio de baterías.

Resultados a lo largo del perfil San Francisquito-península Vizcaíno

El campo de velocidades observadas (Figura 1) hacia el oeste de la falla Salsipuedes (Sistema de fallas de Guaymas-SFG) muestra un gradiente de desplazamiento decreciente NE-SO en los primeros cinco sitios de medición (SANF, PROG, SV3A, PURI y ARCO). Se calcularon las velocidades en la componente N50°O (rumbo del SFG) y a partir de la comparación de éstas, se encontró una variación de aproximadamente 23 mm a⁻¹ entre los vértices SANF y ARCO, distanciados unos 75 km entre sí. Esta tasa de desplazamiento decrece ≈0.3 mm

por cada km hacia el SO, como se evidencia en los tres vértices intermedios (PROG, SV3A y PURI). Hacia la península de Vizcaíno (costa Pacífico) las velocidades observadas de las estaciones PEUG, BTAP y PCLY muestran un azimut de ≈296° muy similar al azimut del resto de vértices que varía entre 294.5° y 300°, y aumentan en magnitud ligeramente con respecto al vértice ARCO. Entre ellos, los vértices PEUG, BTAP y PCLY muestran diferencias en sus magnitudes de velocidad de 0.3-0.5 mm a⁻¹. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 1 se calcularon las velocidades simuladas para los 10 sitios que conforman el perfil San Francisquito-península Vizcaíno con base en el modelo de movimiento de placas ITRF2014 (Altamimi et al., 2016), y se incluye la velocidad del sitio IAGX, una estación de monitoreo continuo procesada en REGNOM y expresada en la realización IGB14.

Discusión y conclusiones preliminares

En los modelos de movimiento de placas (e.g., ITRF2014-Altamimi et al., 2016; GSRM v2.1-Kreemer et al., 2014) las velocidades absolutas en la placa Pacífico presentan un sentido de movimiento NO, que claramente contrasta con el sentido SO del vector IAGX, de lado este al SFG, y que definitivamente marca una transición dentro de esta compleja zona de deformación entre las placas Norteamérica y Pacífico. Lo esperado, es que las velocidades en la placa Pacífico se incrementen de este a oeste a partir del Golfo de California; e incluso si se precisa hablar en términos de la MBC, esta microplaca se desplaza más lento que la placa Pacífico teniendo como límite entre éstas la zona de cizalla de Baja California (Plattner et al., 2007). Sin embargo, los valores de velocidad obtenidos para los sitios más cercanos a la falla Salsipuedes son mucho más altos de lo esperado (Figura 1). Si revisamos la actividad reciente entre 2009 y 2022, nos encontramos con el sismo de Mw 7.0 del 12 de abril de 2012, el sismo de magnitud ≥ 7 más reciente y el primero después de 60 años en el Golfo de California; y que precisamente estaría

asociado a la falla Salsipuedes (Plattner *et al.*, 2015; FSSP en Figura 1), la estructura más cercana a los vértices observados y calculados en este trabajo. Se infiere que el sismo del 2012 pudo haber tenido un desplazamiento cosísmico importante afectando algunas localidades cercanas como lo evidencian algunos de nuestros sitios de medición. Esta zona está prácticamente deshabitada, de allí que no existan mayores reportes sobre daños asociados con este sismo.

Aunque estudios previos indican que el 90% del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico es acomodado por el Golfo de California, y que la deformación interna se ha observado en los sitios más cercanos a las fallas que cruzan el Golfo de California, no se puede perder de vista seguir analizando las posibles diferencias que existen entre las velocidades de los sitios observados en la península de Vizcaíno. Es actualmente muy arriesgado aseverar que la diferencia en velocidades entre los vértices PEUG, BTAP y PCLY sean debidos a la actividad de alguna estructura del sistema de falla Tosco-Abreojos; y en parte porque la diferencia está dentro del error de las observaciones. En todo caso y muy a pesar de que esta falla sea considerada como el límite transformante entre las placas Pacífico y Norteamérica hasta el Plioceno temprano; la actividad sísmica reciente, algunos rasgos geomorfológicos y las evidencias geodésicas soportan la idea de un sistema lateral derecho activo.

Con estos resultados preliminares, esperamos reocupar los sitios de medición próximamente con el fin de calcular una tasa de movimiento intersísmico reciente, posterior a la deformación cosísmica y postsísmica del evento de 2012. Suponiendo que la tasa de desplazamiento intersísmica es la característica de la falla Salsipuedes, se podrá obtener una estimación de las componentes cosísmica y post-sísmica del sismo Mw 7.0 de 2012, y con estos resultados a partir de un enfoque de modelado a seleccionar, se podrá estimar el deslizamiento a lo largo de la

dislocación en profundidad y de esta forma realizar una mejor correlación de la geometría de la falla y el proceso de ruptura (Liu *et al.*, 2015). También está planteado reocupar los sitios ubicados en la península de Vizcaíno, así como los sitios LOL0 y RSJ0, lo que permitiría evaluar la acumulación de la deformación intersísmica de estructuras del sistema de falla Tosco-Abreojos en la costa Pacífico. Finalmente, con el conjunto completo de datos se podrá construir un perfil de velocidades observadas que cruce la parte central de la península de Baja California, desde el Golfo de California hasta la costa Pacífico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Xóchitl Torres y al Dr. René Vázquez con sus valiosos comentarios y sugerencias. Gracias al M.C. Ignacio García Meza por facilitar el valor de velocidad de la estación IAGX, resultado en el marco de su tesis doctoral. Agradecemos el apoyo logístico del personal académico, técnico y administrativo de CICESE que nos apoyaron en todas las actividades; así como a la comunidad y propietarios en los sitios de medición. Este trabajo es una contribución al proyecto CONAHCYT CF-194151.

Referencias

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Audemard, F. (2014). Active block tectonics in and around the Caribbean: A review. In M. Schmitz, F. Audemard, & F. Urbani (Eds.), *El Límite Noreste de la Placa Suramericana – Estructuras Litosféricas de la Superficie al Manto* (pp. 29–77). Universidad Central de Venezuela y FUNVISIS.

- Ávila-Barrientos, L., Cabral-Cano, E., Nava Pichardo, F. A., Reinoza, C. E., Salazar-Tlaczani, L., & Fernández-Torres, E. (2021). Surface deformation of Ceboruco volcano, Nayarit, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107338>
- Beutler, G., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T. A., Kouba, J., & Neilan, R. E. (1999). The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences. *Advances in Space Research*, 23(4), 631–653. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00160-X](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00160-X)
- Castro, R. R., Valdes-Gonzalez, C., Shearer, P., Wong, V., Astiz, L., Vernon, F., Perez-Vertti, A., & Mendoza, A. (2011). The 3 August 2009 Mw 6.9 Canal de Ballenas Region, Gulf of California, Earthquake and Its Aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 929–939. <https://doi.org/10.1785/0120100154>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), E. B. C. M. (1980). Red Sísmica del Noroeste de México [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/https://doi.org/10.7914/SN/BC>
- Dach, R., & Fridez, P. (2019). Bernese GNSS Software Version 5.2, Tutorial Processing Example Introductory Course Terminal Session. Astronomical Institute, University of Bern.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. Bern. University of Bern, Bern Open Publishing.
- Dixon, T. H., Farina, F., Demets, C., Suárez-Vidal, F., Fletcher, J. M., Márquez-Azúa, B., Miller, M. M., Sánchez, O. G., & Umhoefer, P. J. (2000). New Kinematic Models for Pacific-North America Motion from 3 Ma to Present, II: Evidence for a “Baja California shear zone.”
- Fletcher, J. M., & Munguía, L. (2000). Active continental rifting in southern Baja California, Mexico: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California. *Tectonics*, 19(6), 1107–1123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999TC001131>
- Gonzalez-Garcia, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., & Agnew, D. (2003). Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical Research Letters*, 30(16). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2003GL017732>
- González-Ortega, J. A., González-García, J. J., & Sandwell, D. T. (2018). Interseismic Velocity Field and Seismic Moment Release in Northern Baja California, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 526–533. <https://doi.org/10.1785/0220170133>
- Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P., Beutler, G., Bock, H., Brockmann, E., Dach, R., Gurtner, W., Ineichen, D., Johnson, J., & others. (2001). Bernese GPS software, version 4.2.
- Jouanne, F., Audemard, F. A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., & Reinoza, C. (2011). Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics*, 51(5), 398–410. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2010.11.003>

- Kreemer, C., Blewitt, G., & Klein, E. C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(10), 3849–3889. <https://doi.org/10.1002/2014GC005407>
- Lesage, P. H., Kasser, M., Pagarete, J., Ruegg, J. C., Ortlieb, L., Guerrero, J., Duch, N., Roldán, J., Castellanos, F., Montano, T., Rodríguez, J. L., & Calmus, T. (1988). Mediciones geodésicas de largas distancias: aplicación al estudio del movimiento de placas en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 27(3), 351–377. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1988.27.3.1205>
- Liu, C., Zheng, Y., & Xiong, X. (2015). Focal mechanism and rupture process of the 2012 M w 7.0 Santa Isabel, Mexico earthquake inverted by teleseismic data. *Journal of Earth Science*, 26(3), 384–390. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0503-x>
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5), 394–415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>
- Malservisi, R. (2011a). Central Baja 2009 - Central Baja 2009 December. In GPS/GNSS Observations Dataset. The GAGE Facility operated by EarthScope Consortium. <https://doi.org/https://doi.org/10.7283/T58W3BMM>
- Malservisi, R. (2011b). Central Baja 2009 - Central Baja 2009 September. In GPS/GNSS Observations Dataset. The GAGE Facility operated by EarthScope Consortium. <https://doi.org/https://doi.org/10.7283/T5JD4V34>
- Mann, P., & Burke, K. (1984). Neotectonics of the Caribbean. *Reviews of Geophysics*, 22(4), 309–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/RG022i004p00309>
- McCaffrey, R. (2005). Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004JB003307>
- Meade, B. J., & Hager, B. H. (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2004JB003209>
- Melbourne, W. G. (1985). The case for ranging in GPS based geodetic systems (pp. 373–386).
- Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Royer, J.-Y., Bourgois, J., Chabert, A., Bigot-Cormier, F., Bandy, B., Mortera-Gutiérrez, C., & Dymment, J. (2005). La zona de falla Tosco-Abreojo: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 53–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a3>
- Michaud, F., Sosson, M., Royer, J.-Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus, T., Mortera, C., Bigot-Cormier, F., Bandy, W., Dymment, J., Pontoise, B., & Sichler, B. (2004). Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abreojo fault revisited. *Geophysical Research Letters*, 31(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004GL019665>

- Plattner, C., Malservisi, R., Amelung, F., Dixon, T. H., Hackl, M., Verdecchia, A., Lonsdale, P., Suarez-Vidal, F., & Gonzalez-Garcia, J. (2015). Space geodetic observation of the deformation cycle across the Ballenas Transform, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8), 5843–5862. <https://doi.org/10.1002/2015JB011959>
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T. H., LaFemina, P., Sella, G. F., Fletcher, J., & Suarez-Vidal, F. (2007). New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1373–1380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x>
- REGNOM. (2017). Red Géodesica del Noroeste de México, Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. <http://regnom.cicese.mx>
- Reinoza, C. E. (2015). Geodesy and Geodynamics. *Bol. Acad. C. Fís., Mat. y Nat.*, LXXV(1), 43–54.
- Reinoza, C. E., Audemard, F. A., Quintana, G., Pousse-Beltrán, L., Jouanne, F., López, R. J., & Moncada, J. A. (2017). Aplicación de la Geodesia Espacial en el Estudio de Fallas Activas en Venezuela. II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial, 1–7.
- Reinoza, C. E., Audemard M, F. A., Jouanne, F., Pousse-Beltrán, L., & Beck, C. (2020). Strain calculations of active tectonic blocks in northeastern Venezuela from GNSS analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102661. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102661>
- Reinoza, C., Jouanne, F., Audemard, F. A., Schmitz, M., & Beck, C. (2015). Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 2014JB011483. <https://doi.org/10.1002/2014JB011483>
- Umhoefer, P. J., & Dorsey, R. J. (1997). Translation of terranes: Lessons from central Baja California, Mexico. *Geology*, 25(11), 1007–1010. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2)
- Wübbena, G. (1985). Software Development for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements. In Goad C.C. (Ed.), *Proc. of First Int. sym. on Precise Position with GPS* (pp. 403–412).

Manuscrito recibido: 7 de noviembre de 2023

Recepción del manuscrito corregido: 14 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 15 de diciembre de 2023

Boletín de Sismicidad registrada por la Red Sismológica del Noroeste de México Enero – diciembre 2023

Correo electrónico y página web RESNOM: resnor@cicese.mx; resnom.cicese.mx

Grupo RESNOM

Oscar Alberto Castro Artola (Coordinador), Rogelio Arce Villa, 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.

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

*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 en 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 (83 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), RANOM (Red Acelerométrica del Noroeste de México), Red Sismológica de La Paz (RSLP). A través de convenios de colaboración interinstitucionales, 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) envían datos de estaciones de interés para la región. Todas las señales se procesan inicialmente de manera automática para obtener localización, magnitud y mapa preliminar de intensidades. Posteriormente se realiza un post-procesamiento donde intervienen analistas para obtener datos más precisos de localización, magnitud (ML, MC y, para los sismos de magnitud $M > 6$, se calcula MW),

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

Durante el año 2023 la RESNOM registró un total de 3 027 sismos de magnitudes entre ML 0.4 y Mw 6.4. El sismo de mayor magnitud (6.4), ocurrió el 18 de junio de 2023 a las 20:30:22 hora UTC en el Golfo de California, a 106 km al este de las costas de San José del Cabo, Baja California Sur.

Estaciones RESNOM

Actualmente la RESNOM cuenta con 28 estaciones de banda ancha, 13 de las cuales están integradas por un sensor de velocidad triaxial marca Guralp 3ESPC y un sensor de aceleración triaxial marca Kinematics, 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 Kinematics 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 la RESNOM en el CICESE utilizando enlaces de 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 procesadas se muestra en la Figura 1.

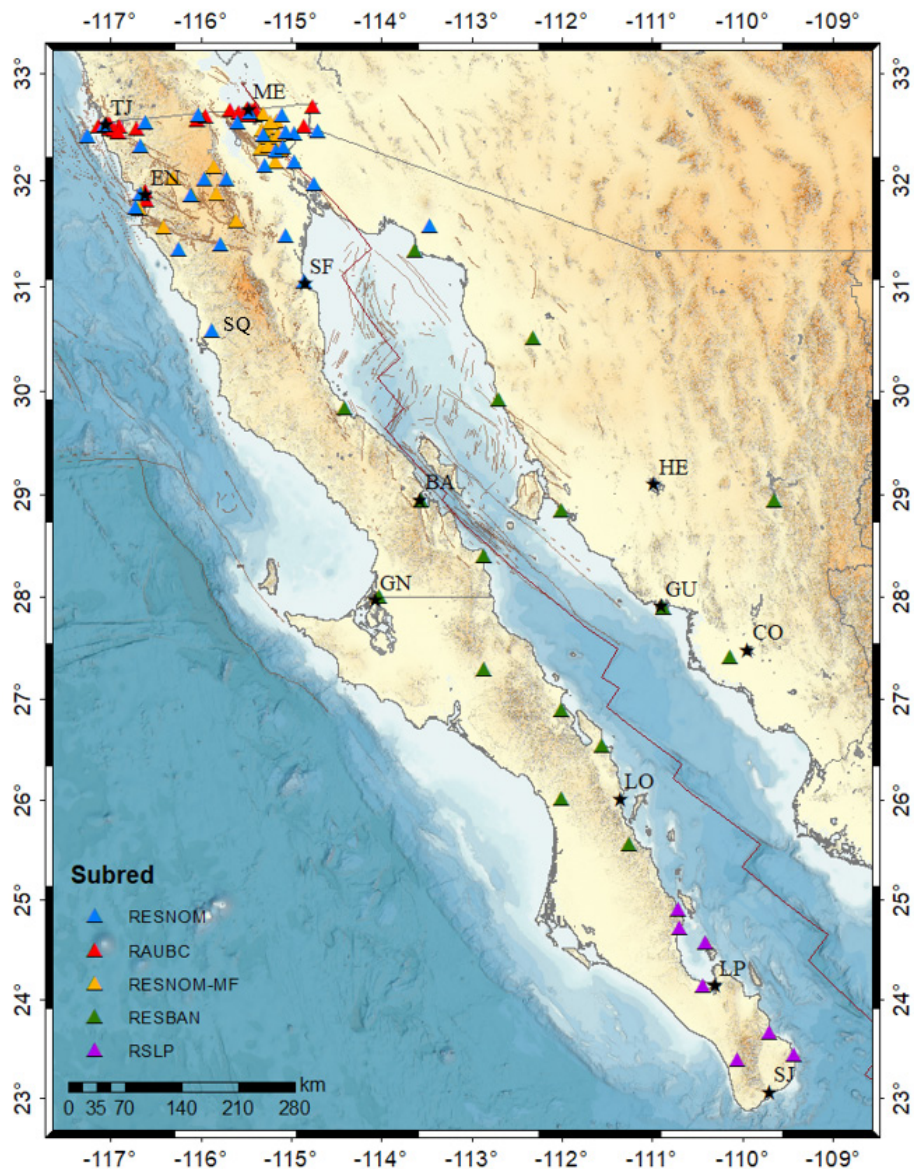


Figura 1. Ubicación de las estaciones procesadas por RESNOM para la detección de actividad sísmica en el noroeste de México durante 2023. Ciudades importantes: BA-Bahía de los Ángeles, CO-Ciudad Obregón, EN-Ensenada, GN-Guerrero Negro, GU-Guaymas, HE-Hermosillo, LO-Loreto, LP-La Paz, ME-Mexicali, SF-San Felipe, SJ-San José del Cabo, SQ-San Quintín, TJ-Tijuana.

Procesamiento de Datos

Automático

Las señales sísmicas se reciben en el centro de procesamiento de la RESNOM y 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, la localización hipocentral y el cálculo de magnitudes M_L y M_c (en la sección Magnitud se describen los detalles). Además, para los sismos de magnitud $M > 3$ se generan mapas de intensidad 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 incertidumbre menor que la del sistema automático. Además, para los sismos importantes se complementa la información con la obtención de mecanismos focales utilizando el programa FMHASH y/o ISOLA (Kalafat *et al.*, 2019). Los programas utilizados para el post-procesamiento son Seisan (Havskov *et al.*, 2020) y Jiggle (Hartog *et al.*, 2020).

Localizaciones Hipocentrales

El cálculo de la localización hipocentral automática es realizado con el programa Earthworm en conjunto 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 que se muestran en la Tabla 1. Para los sismos en el Macizo Rocos de Baja California se utiliza el modelo de velocidades de Nava y Brune (1982) y, para el Valle de Mexicali, una versión modificada del modelo de velocidades propuesto para el Valle Imperial por McMechan y Mooney (1980). En el Golfo de California se utilizan tres modelos de velocidades: en el sur se usa el modelo propuesto por Fabriol y colaboradores (1999) y, para el resto del Golfo, se toman los modelos de Dorsey y colaboradores (2013).

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

Macizo Rcoso (O)		Valle de Mexicali (V)		Bahía (F)		Golfo Centro (G)		Golfo Sur (L)	
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

En este boletín se reportan tres tipos de magnitudes: Magnitud local (ML), Magnitud de coda (MC) y, para los sismos de magnitud > 5 , se reporta la magnitud de 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) que se muestran enseguidas.

Para los sismos en el Valle de Mexicali:

$$ML = \log_{10}(amp) + 1.0134 \log_{10}(dist) + 0.0025(dist) - 1.96$$

Para los sismos en el Macizo Rocosos:

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

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)

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

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

Donde T es la longitud de coda en segundos.

Magnitud Momento (Mw)

El cálculo de la Magnitud Momento se basa en el momento sísmico escalar (Mo).

$$Mw = 2/3 (\log_{10}(Mo) - 9.1)$$

Descripción de la sismicidad Enero a Diciembre de 2023

Durante el año 2023 la Red Sísmica del Noroeste de México registró y procesó un total de 3 027 eventos dentro de un rango de $0.4 \leq M \leq 6.4$. En la Tabla 2 y figura 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). El color del círculo de los epicentros indica la profundidad, el tamaño y la magnitud. El sismo de mayor magnitud registrado fue de $Mw \sim 6.4$ y se localiza a 106 km al este del poblado de San José del Cabo, Los Cabos, Baja California Sur. En la Figura 4 se muestra un acercamiento de la región correspondiente al norte de Baja California y sur de California, E.U.A.

Disponibilidad de datos

El catálogo completo de la RESNOM se encuentra 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 están disponibles en la sección de Boletines de la misma página web y son enviados al Centro Internacional de Sismología (ISC por sus siglas en inglés). Los tiempos de arribo mensuales de la RESNOM, están disponibles al público en su página web <http://www.isc.ac.uk/>.

Agradecimientos y financiamiento

Al CONAHCYT y al CICESE por el soporte económico para la operación y mantenimiento de la RSC, bajo el proyecto COf117 “Redes Sismológicas del CICESE”. Al personal administrativo y de apoyo del CICESE. Al personal técnico y coordinadores de las subredes de la RSC: RESBAN RANOM, RAUBC, REGNOM y RSLP. A los directores y personal técnico del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) y la Red Sísmica del Sur de California (SCSN) en

Tabla 2.- Sismos registrados por RESNOM durante 2023

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	191	3	113	59	16	0	0	0	0
Febrero	237	7	100	107	22	1	0	0	0
Marzo	191	2	94	78	16	1	0	0	0
Abril	244	3	136	86	13	6	0	0	0
Mayo	266	7	116	88	42	13	0	0	0
Junio	244	17	144	58	23	1	0	1	0
Julio	298	12	166	87	25	8	0	0	0
Agosto	303	16	174	89	22	2	0	0	0
Septiembre	251	16	152	70	11	2	0	0	0
Octubre	226	7	144	56	19	0	0	0	0
Noviembre	234	13	139	63	17	2	0	0	0
Diciembre	342	23	225	72	20	2	0	0	0
Total	3027	126	1703	913	246	38	0	1	0

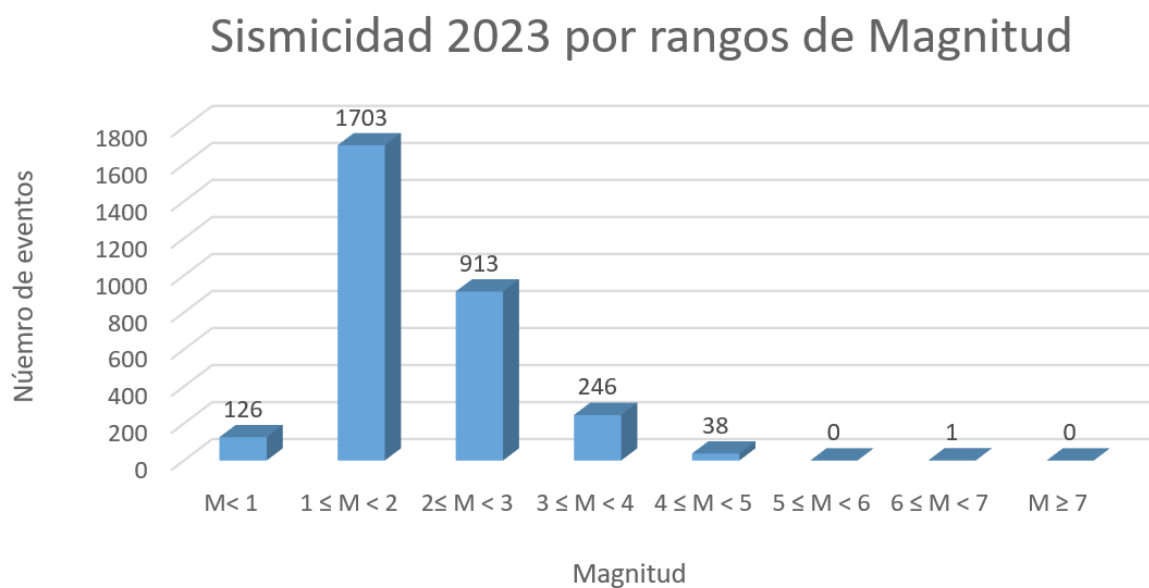


Figura 2.- Distribución por magnitud de sismos registrados por RESNOM durante 2023.

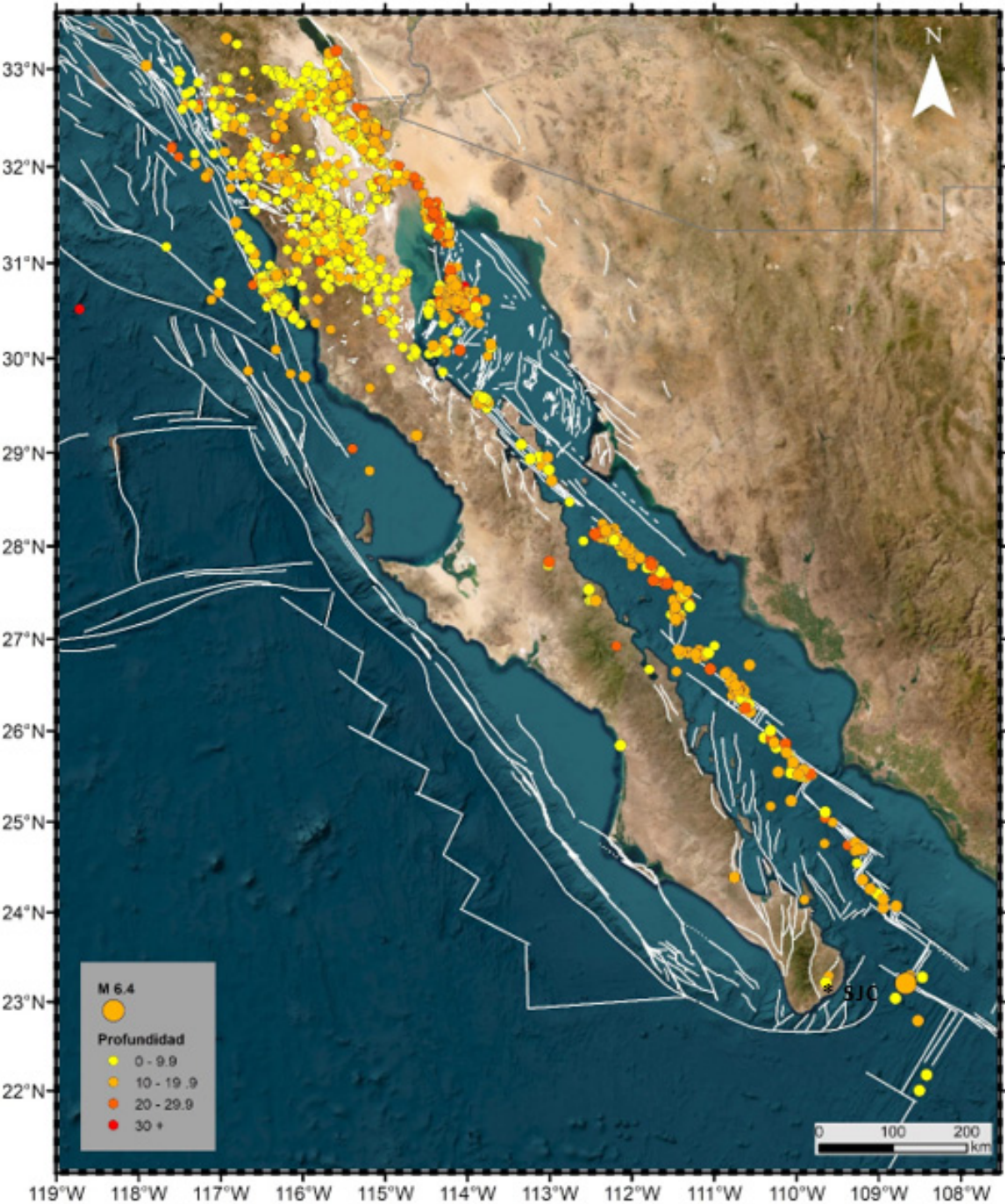


Figura 3. Mapa de sismos registrados por RESNOM durante el periodo Enero-Diciembre de 2023. SJC-San José del Cabo, Los Cabos, Baja California Sur.

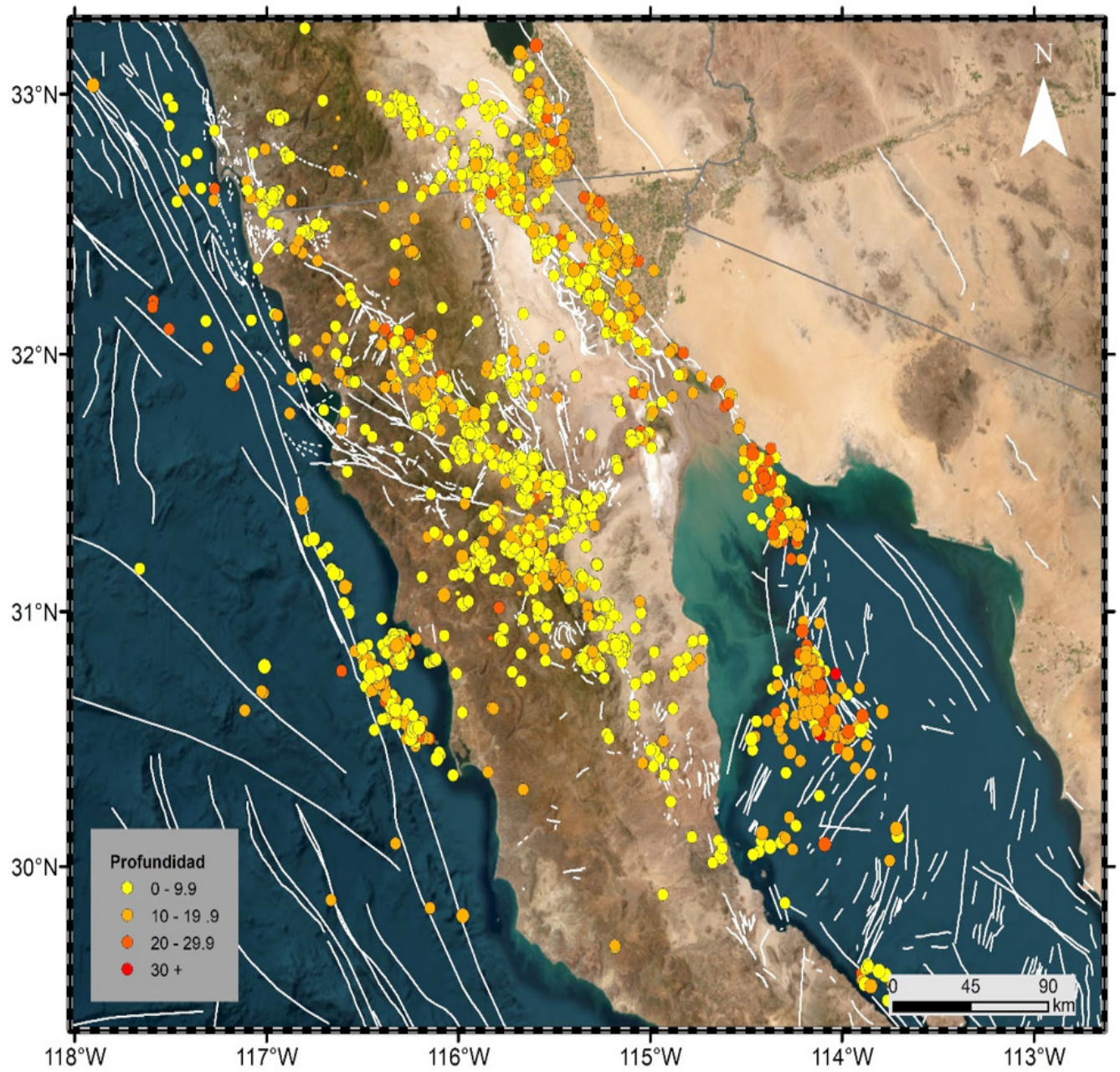


Figura 4. Sismicidad registrada por RESNOM, en el norte de Baja California durante el periodo Enero-Diciembre de 2023.

los EE.UU., por su disposición y apoyo para el intercambio de datos en tiempo real.

Referencias

- Caltech (2013). Southern California Earthquake Center. <https://doi.org/10.7909/C3WD3xH1>
- Castro, R. R., Mendoza-Camberos, A. and 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/10.1785/0220170117>
- CICESE (1980). Red Sísmica del Noroeste de México. <http://www.fdsn.org/networks/detail/BC/> (accedida el 5.17.21).
- Dorsey, R. J., Umhoefer, P.J., Oskin, M.E., and Arrowsmith, R. (2013). Rupturing Continental Lithosphere in the Gulf of California and Salton Trough. *GeoPRIMS Newsletter*, no. 30.
- González-Fernández, A., J. J. Dañobeitia, L. A. Delgado-Argote, F. Michaud, D. Cordoba, and R. Bartolomé (2005). Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfin basins, northern Gulf of California, *J. Geophys. Res.* 110, B01313, <https://doi.org/10.1029/2003JB002941>
- González-G., J.J. y García-A., R. (1986). Escala de Magnitud-Coda para Estaciones Sismográficas en el Norte de Baja California. *Memorias de la Reunión 1986 de la Unión Geofísica Mexicana*, 399-406 (resumen extenso).
- Havskov, J., Voss, P. H. and Ottemöler, L. (2020). Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, Vol. 91 No.3, pp. 1846-1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>.
- Johnson, C. E., Bittenbinder, A., Bogaert, B., Dietz, L. and Kohler, W. (1995). Earthworm: A flexible approach to seismic network processing. *Iris Newsl.* 14, pp. 1-4.
- Kalafat, D., Kekovali, K. and Pinar, A. (2019). *Moment Tensor Solutions* SPRINGER 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9>
- 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.
- Renate Hartog, J., Friberg, P. A., Kress, V. C., Bodin, P. and 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>

UNAM (1998). Servicio Sismológico Nacional. UNAM. URL <http://www.ssn.unam.mx/> (accedida el 5.17.21).

Vidal Villegas, J. A., and Munguía Orozco, L. (1999). The ML scale in northern Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3), 750-763.

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., and 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 <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.5066/F7D21VPQ>

Manuscrito recibido: 14 de marzo, 2024

Recepción del manuscrito corregido: 12 de abril, 2024

Manuscrito aceptado: 18 de abril, 2024

Y el afelio se hizo viral: la XXV Olimpiada de Ciencias de la Tierra

Enrique Gómez Treviño

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

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica aplicada.

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

egomez@cicese.mx

Presentación

A pesar de que sabemos que la Tierra es redonda, no deja de ser contraintuitivo imaginar que vivimos sobre una esfera, y que en estos momentos la gente en China está caminando con la cabeza hacia abajo, y que en algún lugar intermedio se camina horizontalmente. En perspectiva, primero hubo que aceptar la idea de la esfera y luego repensar y buscarle explicación, como de hecho se le dio mucho después con la fuerza de gravedad. Fueron los viajes largos, terrestres y marítimos, los que permitieron contrastar observaciones realizadas en lugares distantes cuya única explicación era que vivíamos sobre una esfera. Civilizaciones antiguas muy avanzadas como la de los mayas no llegaron a plantearse lo de la esfera porque el efecto no es notorio localmente.

Actualmente no es necesario viajar para comparar observaciones realizadas en lugares distantes. Estudiantes de preparatoria en diferentes puntos del país, o incluso del mundo, equipados solamente con una estaca y una regla de medir, podrían intercambiar fotografías simultáneas de la sombra de la estaca. Verían que las sombras tienen diferentes longitudes y direcciones. A mayores distancias mayores diferencias, pero no arbitrarias sino en patrones regulares dependiendo de los puntos cardinales. Buscando explicaciones, sin duda llegarían a la conclusión de que la única forma de entender el comportamiento de las sombras es que todos vivimos sobre una esfera.

La XXV olimpiada se centró alrededor de la inclinación del Sol en diferentes latitudes y longitudes, relacionándola con las estaciones del año y la medición del radio de la Tierra. También se incluyó el fenómeno diario y anual del retraso de la máxima temperatura con respecto a la máxima radiación que se recibe del Sol. La guía sobre el tema se publicó un mes antes del examen. Asistieron 109 estudiantes provenientes de preparatorias de Mexicali, Tijuana, Rosarito y Ensenada.

El evento fue inaugurado por el Director General del CICESE Dr. David Covarrubias Rosales y por el Dr. Mario González Escobar, Director de la División de Ciencias de la Tierra y representante de la Unión Geofísica Mexicana. Los ganadores fueron: PRIMER LUGAR. Alumno: Emilian Robles Arce. Profesor: Francisco Rosario Mayboca Chávez. Escuela: COBACH Plantel Ensenada. SEGUNDO LUGAR. Alumno: Máximo Meyer Castañeda. Profesor: Roberto Carlos Martínez Peralta. Escuela: Centro de Estudios Tecnológicos del Mar # 11. TERCER LUGAR. Alumno: Edgar Murillo Palacio. Profesora: Gabriela de la Selva Rubio. Escuela: COBACH Plantel Tijuana Siglo XXI.

Palabras clave: Afelio; Olimpiada de Ciencias de la Tierra

Y el afelio se hizo viral. Guía para la XXV Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 28 de abril de 2023, Auditorio Institucional del CICESE, Ensenada, Baja California

Introducción

El mes de febrero de 2023 fue más frío de lo habitual en Baja California. Para explicarnos este fenómeno alguien revivió un comunicado con información falsa que se había hecho viral sobre inviernos en otros países. Al buscar en internet “afelio falso Baja California” encontrarán muchos artículos de la prensa donde tratan el tema. Al parecer, esto se inició hace más de un año en Indonesia y poco a poco se propagó en muchos idiomas a todo el mundo. Incluso la NASA se pronunció al respecto. Quien haya originado esta broma sabía perfectamente lo que hacía. Utilizó lenguaje científico y mezcló a propósito datos reales con falsos. Además, pide a la gente que se cuide del frío lo que hace pensar en las buenas intenciones de la nota. Por si esto fuera poco, en el caso de Baja California el comunicado supuestamente provenía de una institución oficial. Todo ello motivó a mucha gente a reenviar la noticia. Y así fue como el afelio se hizo viral también en Baja California.

¿Están las estaciones del año reguladas por la distancia de la Tierra al Sol? Este asunto del afelio reveló que muchos no tenemos una idea muy clara de cómo funcionan las estaciones y otros fenómenos relacionados. Este fenómeno de comunicación motivó el tema de este año para la XXV Olimpiada. Revisaremos el papel que juega la altura del Sol con respecto al horizonte en diferentes fechas clave. También recordaremos cómo Eratóstenes midió el radio de la Tierra hace más de dos mil años utilizando la luz del Sol. Veremos también en detalle el fenómeno que es responsable de que exista un retraso en el calentamiento de la Tierra respecto al mes donde recibe mayor radiación. Y lo mismo para el retraso diario que se observa después del mediodía.

Altura del Sol con respecto al horizonte

Lo primero que hay que observar es lo que pasa en el suelo cuando se cambia el ángulo de incidencia de los rayos solares, como se ilustra en la Figura 1. Cuando la luz incide en forma oblicua en el suelo se ilumina un área mayor que cuando lo hace verticalmente. Esto hace que la energía que se recibe por metro cuadrado sea menor para los rayos oblicuos. Tomen una linterna de mano e iluminen verticalmente cualquier superficie horizontal. Ahora inclinen la linterna y verán que se ilumina una superficie mayor. La misma cantidad de energía ahora se distribuye en un área mayor, por lo tanto, cada cm cuadrado recibe menos energía cuando la linterna está inclinada que cuando está vertical y por eso hace que se caliente menos.

La Figura 2 muestra la altura o ángulo del Sol con respecto al horizonte en diferentes fechas para Tijuana. Los rayos de luz solar llegan al suelo con ese mismo ángulo por lo que se aplica lo mostrado en la Figura 1. Para entender la Figura 2 imaginen que están de cara al Norte, parados en la posición del observador (Obs.) y viendo hacia la derecha en la figura. El Este (E) estará a su mano derecha, el Oeste (W) a su mano izquierda y el Sur (S) a sus espaldas. Esto se puede apreciar mejor en la elipse central que corresponde al 21 de marzo. Si se quedan viendo al Norte no podrán observar la posición del Sol porque éste está siempre a sus espaldas. Ahora imaginen que giran hacia el Sur. Ahora sí que podrán apreciar la altura del Sol respecto al horizonte. Así es como se debe ver la Figura 2. La elipse es sólo para tener como referencia los cuatro puntos cardinales, por lo que no representa la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol.

Se puede observar en la Figura 2 que diciembre 21 tiene la menor altura o menor ángulo (34.5°) y corresponde a la entrada del invierno. Para marzo 21 el ángulo crece hasta 58° y corresponde a la entrada de la primavera. El ángulo sigue creciendo hasta 81.5° y corresponde a la entrada del verano. De ese máximo el ángulo disminuye hasta llegar otra vez a 58° , el mismo de la primavera, pero ahora decreciendo. Esto corresponde a la entrada del otoño. A partir de

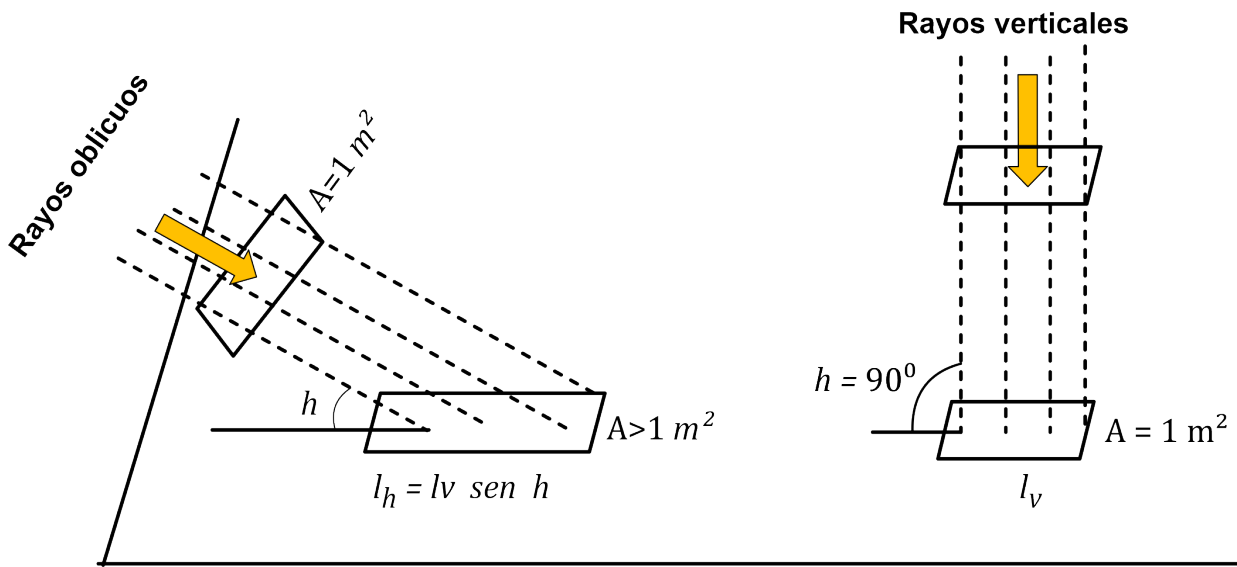


Figura 1. Cuando la luz incide en forma oblicua en el suelo se ilumina un área mayor que cuando lo hace verticalmente. Esto hace que la energía que se recibe por metro cuadrado sea menor para los rayos oblicuos.

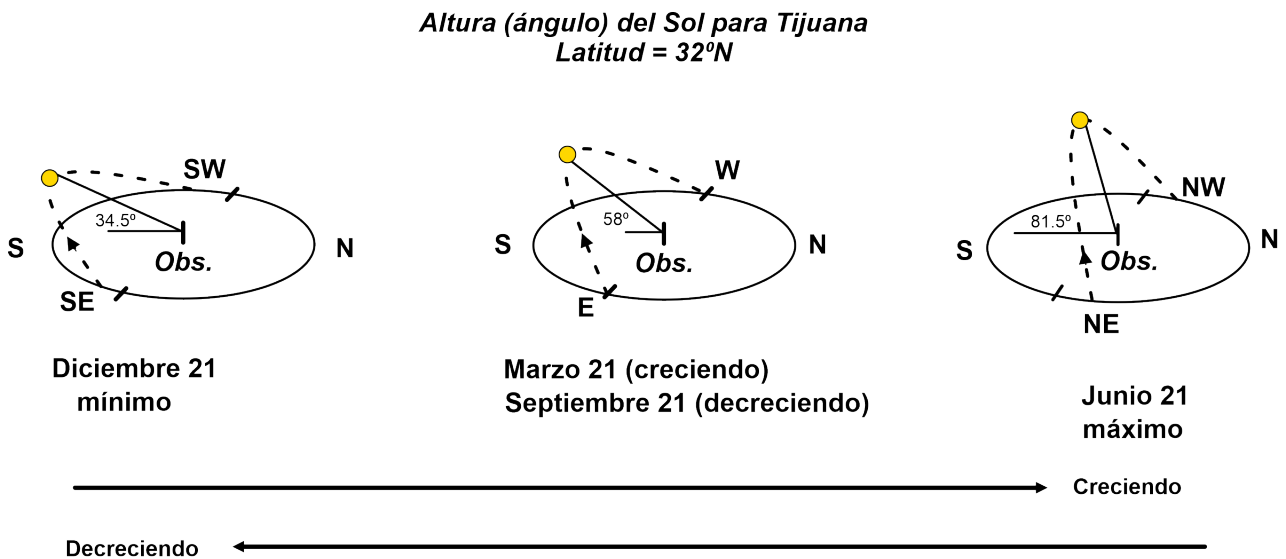


Figura 2. Se muestra la altura del Sol respecto al horizonte para Tijuana en diferentes fechas. Diciembre 21 tiene la menor altura o menor ángulo (34.5°) y corresponde a la entrada del invierno. Para marzo 21 el ángulo crece hasta 58° y corresponde a la entrada de la primavera. El ángulo sigue creciendo hasta 81.5° y corresponde a la entrada del verano. De ese máximo el ángulo disminuye hasta llegar otra vez a 58°, el mismo de la primavera, pero ahora decreciendo. Esto corresponde a la entrada del otoño. De ahí el ángulo sigue decreciendo hasta llegar al mínimo de 34.5° que corresponde a la entrada del invierno. Y desde ahí todo se repite.

ese punto el ángulo sigue decreciendo hasta llegar al mínimo de 34.5° que corresponde a la entrada del invierno. Y desde ahí todo se reinicia el ciclo.

La Figura 2 es sólo un dibujo que resume lo que pasa en un año en la realidad, pero no es la realidad. Idealmente deberíamos hacer nuestras propias observaciones y después hacer un dibujo para explicárselo a los demás. A diferencia de otros temas como lo puede ser la estructura interna de la Tierra, en el presente caso no se requiere de aparatos especializados para realizar las observaciones. De hecho, podemos utilizar nuestra propia sombra al mediodía, o la de una estaca para estimar el ángulo que hace el Sol con el horizonte. No se deben hacer observaciones mirando directamente al Sol.

Para mejor familiarizarse con lo que representa la Figura 2 es conveniente hacer algunas observaciones. Las pueden hacer con una estaca de alrededor de un metro de largo clavada verticalmente en el suelo. En internet pueden buscar cómo se encuentra el norte geográfico siguiendo la sombra de la estaca. El método más simple es marcar cómo varía la sombra antes y después del mediodía. Pueden comprobarlo con la brújula de su teléfono celular. La inclinación del Sol se puede obtener combinando las longitudes de la sombra y de la estaca. Sus mediciones serán sólo para el mes de abril, pero si le siguen hasta el próximo año verán cómo cambia la inclinación con las estaciones.

Tijuana y Mexicali están casi en la misma latitud y distan 150 km de Este a Oeste. O sea que el Sol sale más temprano en Mexicali, y se oculta más tarde en Tijuana. Mexicali debería tener un horario un poco más adelantado que Tijuana. Sin embargo, esto no se hace por razones prácticas, además de que casi no se notaría la diferencia. Sin embargo, comparando con Cd. Juárez, la cual tiene la misma latitud, pero dista de Tijuana 1,000 km, la diferencia sí se nota. El mediodía en Cd. Juárez sucede aproximadamente una hora antes que en Tijuana porque el Sol viaja de Este a Oeste y Tijuana está al Oeste. Practiquen con este tipo de ejercicios y se convencerán que viven en una esfera, y que las estaciones del año se

deben al ángulo que hace el Sol con el horizonte al mediodía.

Otra cosa que cambia con las estaciones es el número de horas de luz. Esto también se resume en la Figura 2. El 21 de marzo el Sol sale exactamente del Este y se oculta exactamente en el Oeste. Estos son días de 12 horas. En el invierno el Sol retrocede hacia el Sur y el tiempo entre su salida y puesta es de menos de 12 horas. En el dibujo, esto se resume diciendo que el Sol sale por el SE y se pone por el SW. En el verano la salida y puesta migran hacia el Norte. Se dice que sale por el NE y se pone por el SW. En este caso el día tiene más de 12 horas.

Método de Eratóstenes para medir el radio de la Tierra

Como se muestra en la Figura 2 en invierno y en verano el Sol no sale exactamente del Este ni se pone exactamente en el Oeste. Esto se debe a que vivimos en una esfera. Esto ya lo sabían los antiguos griegos hace más de 2,000 años. De hecho, uno de ellos midió el radio de la Tierra de una forma muy ingeniosa. Eratóstenes era un matemático que trabajaba en la biblioteca de Alejandría en Egipto. No era el bibliotecario en el sentido actual, era un científico en todo el sentido de la palabra. Recuerden que Alejandro Magno extendió la cultura griega a los reinos que conquistaba, uno de ellos fue Egipto en donde se fundó la ciudad de Alejandría en honor a Alejandro. La biblioteca de Alejandría fue mucho más que una biblioteca, fue la institución de investigación científica más avanzada por muchos siglos. Vean la película “Ágora” del 2009 sobre la matemática, filósofa y astrónoma Hipatia de Alejandría, precursora del papel que jugarían en el futuro las mujeres en la ciencia. La película recibió siete premios Goya. Está ambientada alrededor del año 400 de nuestra era, 600 años después de la hazaña de Eratóstenes. No es una película aburrida.

Años antes de las mediciones de Eratóstenes, Aristarco de Samos había deducido que la Tierra era redonda viendo su sombra en un eclipse de Luna. También había deducido que el Sol estaba mucho más lejos que la Luna. Esta lejanía la

interpretó correctamente Eratóstenes al suponer que los rayos del Sol llegan paralelos a la Tierra como se ilustra en la Figura 3. Eratóstenes supo que en determinado día en un pozo en Syene, al sur de Alejandría, los rayos del Sol llegaban hasta el fondo del pozo, y ni las personas ni las edificaciones hacían sombra ese día. Por otro lado, sabía que ese mismo día en Alejandría las sombras de las personas y de las edificaciones era de 7.2 grados. Utilizando sus conocimientos matemáticos ideó el método que se ilustra en la Figura 3. La clave está en que el ángulo α de las edificaciones está relacionado con el radio de la Tierra. El ángulo que se forma en el centro de la Tierra no lo podemos medir porque no vivimos en el centro de la Tierra, pero es el mismo que hacen las sombras de las personas o las edificaciones en la superficie de la Tierra. Y ahí sí que lo podemos medir porque vivimos en la superficie de la Tierra. Esto de medir algo inaccesible para nosotros relacionándolo con otro algo que sí está a nuestro alcance es uno de los pilares de la ciencia moderna.

Ubiquen las ciudades de Alejandría y Syene y piensen entre qué ciudades se podrían hacer estas observaciones en México. De hecho, tal

vez esto se debería hacer para contrarrestar la tendencia mundial de gente que piensa o cree que la Tierra es plana. Según encuestas recientes esta tendencia está creciendo aceleradamente, por lo que podría ser el tema de una próxima olimpiada. Por ahora conviene repasar lo que son los círculos imaginarios conocidos como paralelos. Con ellos se mide qué tan al Norte o al Sur estamos del ecuador. En la Figura 2 que muestra la altura del Sol para Tijuana se indica que la latitud es de 32° N. Y es que la altura del Sol no es la misma para todas las latitudes. Hay fórmulas para calcular la altura (ángulo) en términos de la latitud y la fecha pero no es el propósito de utilizarlas aquí. De lo que se trata es de revivir la curiosidad por conocer el planeta en que vivimos mediante observaciones. Por ejemplo, pueden contactar a un pariente que viva muy al Sur de la península y preguntarle sobre la altura del Sol en ese lugar, en el mismo día de sus observaciones. Cerca de Cabo Pulmo en BCS hay un monumento que marca el punto por donde pasa el paralelo llamado Trópico de Cáncer. Su latitud es de 23.5° N. ¿Por qué es importante? El Círculo Polar Ártico es el paralelo que tiene una latitud de 66° N. Revisen lo que pasa allí. Es fascinante.

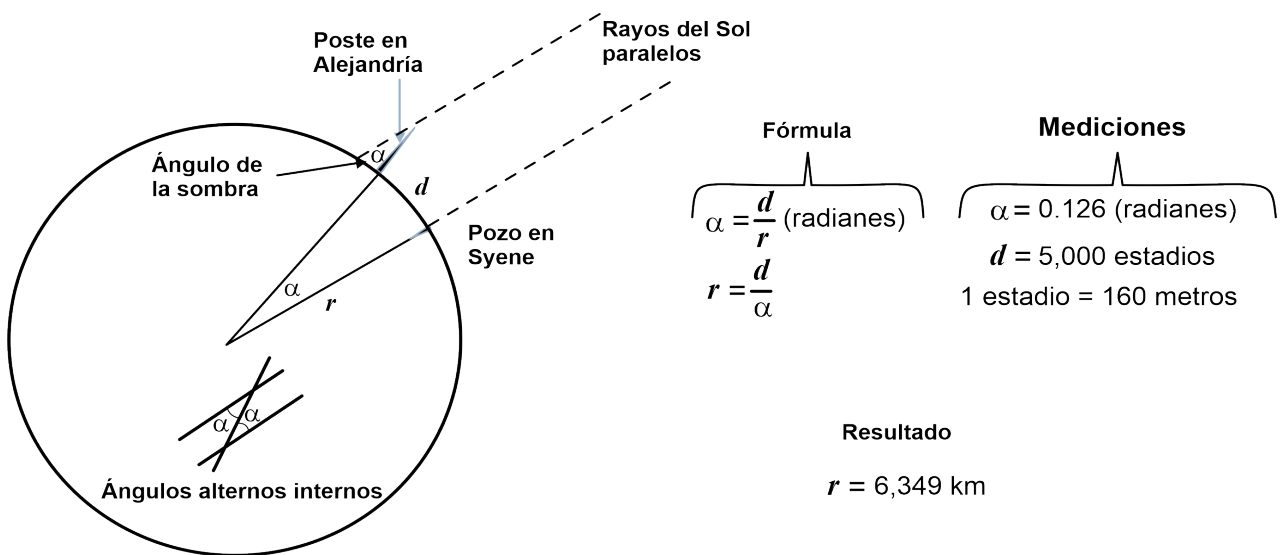


Figura 3. Esquema del método de Eratóstenes para medir el radio de la Tierra.

Los paralelos no indican en dónde estamos en la dirección Este-Oeste. Para eso se utilizan los meridianos. Tijuana está en el meridiano -117° , 117° Oeste o bien 117° W. Todo esto de paralelos y meridianos fueron avances que se dieron más de mil años después de Eratóstenes, iniciados por los navegantes portugueses y españoles que le dieron la vuelta al mundo. Conocemos muy bien la Tierra gracias a la acumulación de sus observaciones y al diseño de estos círculos imaginarios. Incluso en su teléfono celular aparecen estos números como sus coordenadas. Y las estaciones del año se explican con estas coordenadas y no como dice el bromista del afelio, con la distancia al Sol.

Retraso anual de la temperatura máxima respecto a la máxima radiación

Seguramente habrán notado que la hora en que hace más calor no es al mediodía, sino unas horas después. El máximo de calor está retrasado con respecto al máximo de radiación que recibimos del Sol. Lo mismo pasa en la escala de un año. El máximo de radiación es en junio, pero el mes más caluroso es agosto. Esto pasa tanto en tierra como en el océano. Los huracanes se empiezan a formar cuando la temperatura del

agua llega a 26.5°C , la cual se alcanza en agosto y septiembre. La temporada de huracanes en el Atlántico empieza el 1 de junio y termina el 30 de noviembre, pero el máximo número ocurre en agosto y septiembre. En ambos retrasos se puede intuir que hay un efecto acumulativo de calor, pero eso no explica el fenómeno. ¿Cómo es que a pesar de que la radiación va disminuyendo la temperatura sigue aumentando?

La explicación a este fenómeno es más reciente que el de las estaciones. En el siglo XIX se descubrieron diversos tipos de energía y se establecieron sus reglas de comportamiento. Una de ellas se refiere a la energía electromagnética que incluye a la luz y a los rayos de calor o infrarrojos. La ley de Stefan-Boltzmann establece que la radiación térmica que emite un objeto es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. No hay duda que el Sol emite energía, pero también lo hace la Tierra aunque esté a menor temperatura. Tomen una silla metálica y expónganla un rato a los rayos del Sol. Ahora llévenla dentro de la casa y acerquen su mano por arriba y por debajo del asiento. Sin necesidad de un medidor de radiación notarán que la silla está emitiendo calor.

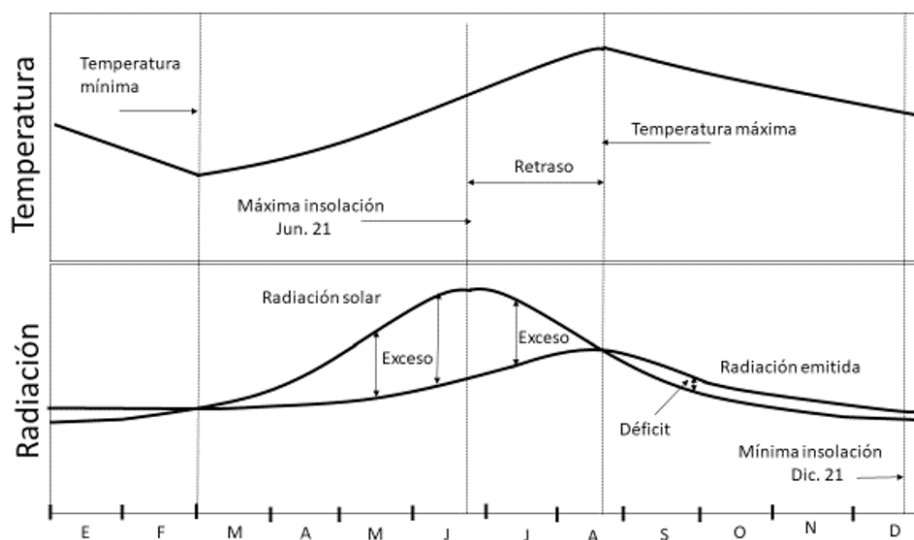


Figura 4. El retraso anual del máximo de temperatura respecto al máximo de radiación solar. La temperatura sigue aumentando a pesar de que la radiación solar está disminuyendo. Esto se debe a que sigue habiendo un exceso de energía. La temperatura empieza a bajar cuando empieza el déficit.

Lo anterior es lo único que necesitamos para explicar el retraso diario y anual de la temperatura con respecto a la energía que recibe la Tierra. La pregunta planteada era: ¿Cómo es que a pesar de que la radiación va disminuyendo la temperatura sigue aumentando? Esto se representa en la Figura 4. En la parte inferior se ilustra la radiación solar cuyo máximo se alcanza el 21 de junio. En la parte superior se muestra la temperatura cuyo máximo se alcanza hacia finales de agosto. La cuestión es explicar este retraso. La explicación es simple una vez que se supo en el siglo XIX que la Tierra al irse calentando por la radiación recibida, emite cada vez más energía. Esto se representa en la curva de radiación emitida. Como se puede observar en la Figura 4, aunque la curva de radiación solar va disminuyendo a partir de junio 21, es superior a la que emite o pierde la Tierra al ir aumentando de temperatura. Hay un exceso de energía de parte del Sol que hace que la Tierra se siga calentando. Ese exceso eventualmente disminuye con el tiempo porque la Tierra recibe menos radiación, pero mientras se mantenga, la Tierra estará recibiendo más energía de la que pierde por emisión y por lo tanto seguirá aumentando su temperatura. Cuando estas dos energías sean iguales se alcanzará la máxima temperatura porque a partir de ese día el exceso de energía se convierte en un déficit. O sea que la Tierra empezará a enfriarse porque pierde más

energía de la que recibe.

Cuando hay déficit la Tierra emite más energía de la que recibe y necesariamente se estará enfriando. Esto sucede a partir de los últimos de agosto y hasta los últimos de febrero. En todo este tiempo la Tierra se está enfriando y alcanza su mínimo en febrero cuando la insolación es igual a la emisión. En invierno también existe el retraso de frío porque la mínima insolación es en diciembre 21 como se indica en la parte inferior derecha de la Figura 4. La Tierra vuelve al periodo de exceso de energía en marzo y vuelve a calentarse poco a poco en un nuevo ciclo. Esta explicación es aplicable para el hemisferio norte. Las fechas de máxima y mínima insolación no varían de año en año ni de lugar a lugar. Sin embargo, la cantidad de insolación sí cambia de lugar a lugar siendo mayor en el ecuador y menor cerca de los polos. Por otro lado, las fechas de los cambios de exceso a déficit y de déficit a exceso dependen de condiciones locales. Esto se debe a que unos materiales se calientan más rápido que otros. Por ejemplo, hay diferencia entre el suelo y el agua. A la misma radiación recibida uno se calienta más rápido que el otro. Para el que se calienta más rápido, la curva de radiación emitida crecerá más rápido también, e interceptará a la de insolación más cerca de su máximo, por lo que el retraso será menor.

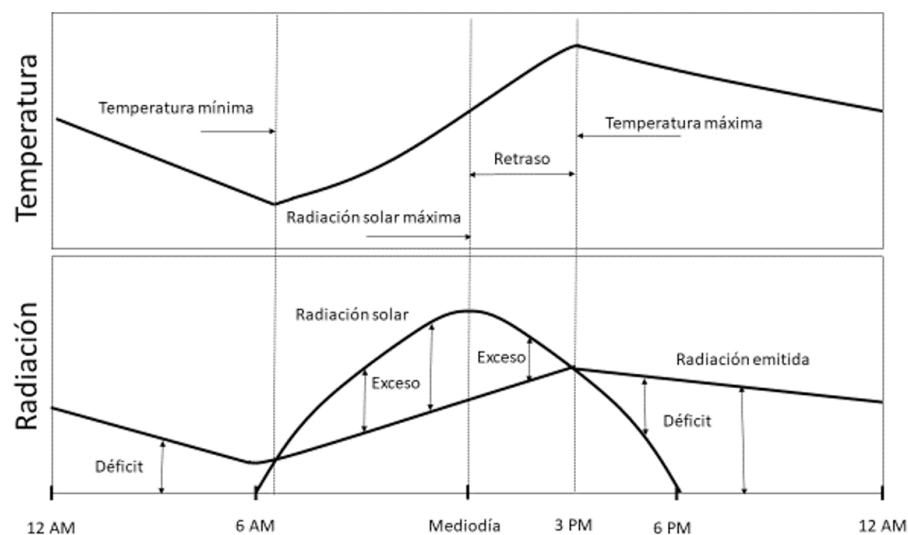


Figura 5. El retraso diario del máximo de temperatura respecto al máximo de radiación solar. La temperatura sigue aumentando a pesar de que la radiación solar está disminuyendo. Esto se debe a que sigue habiendo un exceso de energía. La temperatura empieza a bajar cuando empieza el déficit.

Retraso diario de la temperatura máxima respecto a la máxima radiación

La Figura 5 muestra las curvas correspondientes para el retraso diario del máximo de temperatura respecto al máximo de radiación solar al mediodía. La explicación es la misma que para el retraso anual. La temperatura sigue aumentando a pesar de que la radiación solar está disminuyendo. Esto se debe a que sigue habiendo un exceso de energía. La temperatura empieza a bajar cuando empieza el déficit. Sin embargo, hay algunas diferencias que es importante señalar. La primera es que en el caso del retraso anual la radiación solar está presente en todo el ciclo, y en el caso del retraso diario la radiación solar está ausente en medio ciclo por lo que sólo hay radiación emitida por la Tierra.

Otra diferencia es que la temperatura mínima está retrasada con respecto a la salida del Sol. Esto lo cuentan las personas que madrugan y se siente sobre todo en invierno. Cuando la noche fue muy fría, a la salida del Sol existe un déficit que debe ser cancelado antes de que la temperatura empiece a subir. La cancelación no es inmediata al salir el Sol. Toma tiempo para que el Sol esté lo suficientemente alto para que la radiación compense lo que está emitiendo la Tierra. De ahí en adelante la temperatura se eleva hasta llegar a su máximo en la tarde

Recomendaciones

Lean esta guía varias veces y hagan las observaciones recomendadas con la sombra de la estaca. Hagan sus propias versiones de las figuras de la guía a papel y lápiz para entenderlas mejor. Discutan entre ustedes y con sus maestros. Vean en YouTube videos al respecto, etc.

El examen

El examen consistirá de 50 preguntas y tendrá una duración máxima de dos horas. Se recomienda traer calculadora.

Inscripciones

Es muy conveniente que se inscriban antes del concurso, ya sea en forma individual o en grupo por correo electrónico, según se indica en esta página. Haciéndolo así nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, preparar un día antes los gafetes con sus nombres, imprimir los diplomas de participación, el número de mesas y sillas que necesitaremos, así como la cantidad de alimentos que debemos ordenar.

Por lo general recibimos alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límite, de ser necesario limitaremos a 100 el número de participantes. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 AM se entregarán los gafetes con sus nombres. A las 10:05 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sismológica donde se analizan las señales de los sismos que ocurren en Baja California y Sonora principalmente.

Las premiaciones se harán de 2:00 a 3:00 PM. en las salones de usos múltiples del CICESE.

Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

Las 50 preguntas del examen

1. La palabra afelio viene del griego: (apó = lejos) y (helios = sol) es cuando la Tierra se encuentra en su punto más lejano al Sol en el recorrido de su órbita. Sucede en el mes de

- a) Febrero b) Marzo c) Julio d) Septiembre

2. Kepler demostró con mediciones en 1609 lo que ahora se conoce como primera ley de Kepler: Todos los planetas se desplazan alrededor del Sol describiendo órbitas elípticas. El Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse. En el caso de la Tierra la elipse es casi un círculo. La diferencia entre el eje mayor y el menor es de

- a) 1 % b) 2% c) 3% d) 4%

3. La cantidad de energía por unidad de área que recibe el suelo para un ángulo h del Sol con respecto al horizonte es $I_h = I_v \sin h$, donde I_v es la energía cuando los rayos del Sol inciden verticalmente, o sea cuando $h = 90^\circ$. A este ángulo la incidencia por unidad de área es máxima. La pregunta es: ¿A qué ángulo la energía por unidad de área que se recibe es la mitad del máximo?

- a) 30° b) 45° c) 15° d) 60°

4. Un ángulo expresado en grados nos parece muy familiar. Sin embargo, es mucho más natural expresarlo en radianes. Sabemos que la circunferencia de un círculo viene dada como $C = 2\pi r$, donde r es el radio del círculo. Ahora, tracemos dos radios desde el centro del círculo hacia la circunferencia. El ángulo que se forma entre los dos radios se expresa como la longitud del arco que subtienden los dos radios dividida por el radio. Si el arco abarca toda la circunferencia entonces según la ecuación anterior $C/r = 2\pi$ es el ángulo que comprende todo el círculo, o sea que el ángulo 2π en radianes es lo mismo que 360° , y que π en radianes es 180° , y que $\pi/2$ es 90° y que $\pi/4$ es 45° . ¿Cuál es la fórmula para pasar de grados (gr) a radianes (ra)?

- a) $gr = (ra/\pi^2) 180$ b) $ra = (gr/\pi) 180$
c) $ra = (gr/180) \pi$ d) $ra = (gr/2\pi) 360$

5. El 21 de junio en Cabo Pulmo, BCS, los rayos del Sol hacen al mediodía un ángulo con el horizonte de:

- a) 23.5° b) 90° c) 45° d) 30°

6. Una casa en el estado de Baja California con ventanas que dan a los cuatro puntos cardinales. La ventana por la que nunca entra el Sol da hacia el

- a) Norte b) Sur c) Este d) Oeste

7. El 21 de junio al mediodía en Mexicali, en una calle que corre de Este a Oeste: ¿por cuál acera conviene caminar para cubrirse del Sol con la sombra de las casas? (se aplica a todo el Estado)

- a) Norte b) Sur c) Este d) Oeste

8. El 21 de junio al mediodía en Mérida, Yucatán, en una calle que corre de Este a Oeste: ¿por cuál acera conviene caminar para cubrirse del Sol con la sombra de las casas?

- a) Norte b) Sur c) Este d) Oeste

9. Eratóstenes utilizó las ciudades de Alejandría y Syene para medir el radio de la Tierra. Syene está a 800 km al sur de Alejandría. El caso es similar al de Cabo San Lucas que está a 700 km al sur de Hermosillo. Las dos ciudades podrían utilizarse para medir el radio de la Tierra. Si al mediodía en Cabo San Lucas los postes no hacen sombra y en Hermosillo el ángulo de la sombra con un poste es de 6 grados, la estimación del radio de la Tierra sería de

- a) 6,685 km b) 6,585 km
c) 6,485 km d) 6,385 km

10. También se pueden utilizar Bahía de Tortugas, BCS y Mexicali, BC. Suponer que en Bahía de Tortugas se midió la altura del Sol en un día de invierno. Se utilizó una estaca de 1 m de alto siendo la sombra al mediodía también de 1 m de largo. ¿Cuál sería la altura del Sol?

- a) 42° b) 43° c) 44° d) 45°

11. El mismo día de invierno se midió la altura del Sol en Mexicali. Se utilizó también una estaca de 1 m de alto siendo la sombra al mediodía de 1.2 m de largo. ¿Cuál fue la altura del Sol?

- a) 36° b) 38° c) 40° d) 42°

12. La diferencia de ángulos se puede utilizar para calcular el radio de la Tierra. En realidad, el ángulo que utilizó Eratóstenes no es el de la altura del Sol, sino el ángulo de la sombra con la vertical. Sin embargo, las diferencias son las mismas. Para el caso de Mexicali-Bahía de Tortugas la diferencia es de

- a) 6° b) 5° c) 4° d) 3°

13. Bahía de Tortugas está a 550 km al sur de Mexicali. Utilizando la diferencia correcta de ángulos el radio de la Tierra se puede calcular dividiendo 550 km entre la diferencia de ángulos en radianes. El cálculo da como resultado

- a) 6,685 km b) 6,585 km
c) 6,403 km d) 6,303 km

14. Otra opción es utilizar Nuevo Laredo, Tamaulipas y Acapulco, Guerrero, ya que la segunda está al sur de la primera. Suponer que el 21 de junio se midió al mediodía la altura del Sol en Acapulco, utilizando una estaca de 1 m de alto resultando una sombra de 11 cm. En este caso la sombra no es hacia el sur, sino hacia el norte porque Acapulco está al sur del Trópico de Cáncer. El ángulo o altura del Sol sería

- a) 81.7° b) 82.7° c) 83.7° d) 84.7°

15. El mismo día que se midió la altura del Sol en Acapulco se midió en Nuevo Laredo, Tamaulipas. También se utilizó una estaca de 1 m de alto resultando una sombra de 7 cm. En este caso la sombra es hacia el Sur porque Nuevo Laredo está al Norte del Trópico de Cáncer. El ángulo o altura del Sol sería de

- a) 85.9° b) 86.9° c) 87.9° d) 88.9°

16. Como en el caso de Mexicali-Bahía de Tortugas la diferencia de las alturas del Sol se puede utilizar para calcular el radio de la Tierra. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en Acapulco el ángulo de la sombra es hacia el Norte y en Nuevo Laredo es hacia el sur, por lo que en este caso se deben de sumar. La suma es

- a) 10.4° b) 9.4° c) 8.4° d) 7.4°

17. Considerando que Acapulco está a 1,200 km en línea recta y directamente al sur de Nuevo Laredo, se puede calcular con el método de Eratóstenes el radio de la Tierra con esta diferencia (suma) de ángulos. Con estos datos el radio de la Tierra sería

- a) 6,411 km b) 6,311 km
c) 6,611 km d) 6,711 km

18. El metro se definió originalmente en 1793 como una fracción muy pequeña de la distancia entre el ecuador y el polo norte, medida a lo largo de cualquier meridiano terrestre. La fracción es una

- a) Diezmilésima b) Diezmillonésima
c) Cienmilésima d) Cienmillonésima

19. ¿Cuántos km le corresponde en la superficie de la Tierra a un grado de latitud?

- a) 111 b) 101 c) 32 d) 320

20. La latitud del Trópico de Cáncer actualmente es de 23.5° N. Sin embargo, se tiene que este valor cambia lentamente con un periodo de 41,000 años. El valor mínimo es de 22.1° N y el máximo de 24.5° N. La diferencia es de 2.4° , lo cual en km sobre la superficie de la Tierra equivale a

- a) 2.66 b) 26.6 c) 266 d) 2,660

21. Actualmente el trópico está migrando hacia el sur. En promedio cada año el trópico migra al sur

- a) 6.5 cm b) 65 cm c) 6.5 m d) 65 m

22. El punto más al norte de México es Algodones, B.C. con una latitud de 32.5° N, y el punto más al sur está en la frontera con Guatemala con una latitud de 14.5° N. La diferencia son 18 grados. En términos de latitud México abarca en el hemisferio norte el

- a) 5% b) 10% c) 15% d) 20%

23. Un huso horario equivale a 15 grados de longitud. El punto más al Este en México es Isla Mujeres a una longitud de 87° O, y el más al Oeste (descartando Isla Guadalupe) es Tijuana a una longitud de 117° O. La diferencia son 30 grados, lo cual en husos horarios es

- a) 1 b) 2 c) 3 d) 4

24. El paralelo de la Tierra que tiene mayor circunferencia es el ecuador. Su circunferencia es de

- a) 40,000 km b) 30,000 km
c) 20,000 km d) 10,000 km

25. La circunferencia de los círculos paralelos al Ecuador depende de la latitud θ . La máxima es la del ecuador ($\theta=0^{\circ}$) y la mínima la del polo norte ($\theta=90^{\circ}$). Si L es la circunferencia del ecuador: ¿Cuál de las siguientes fórmulas predice la circunferencia del paralelo con latitud θ ?

- a) $L \tan \theta$ b) $L \sin \theta$
c) $L \cos \theta$ d) $L \cot \theta$

26. La circunferencia del paralelo que pasa por Tijuana (32° N) es de

- a) 25,000 km b) 21,200 km
c) 34,600 km d) 64,000 km

27. Según la respuesta a la pregunta anterior: ¿Cuántos km le corresponde a cada grado de longitud sobre este paralelo?

- a) 96 b) 86 c) 76 d) 66

28. Calcular la circunferencia del círculo polar ártico (latitud 66.5° N) y obtener el número de km por grado de longitud. Estos son

- a) 24 b) 34 c) 44 d) 54

29. Un grado de latitud subtiende el mismo arco en la superficie de la Tierra sin importar la latitud. Por ejemplo, 0-1, 43-44, 83-84.

- a) Verdadero b) Sólo cerca del ecuador
c) Falso d) Sólo en los trópicos

30. Al acercarse el 21 de junio en el círculo polar ártico, el Sol se oculta cada día menos tiempo. El día 21 no se pone el Sol, el día dura 24 horas. A este fenómeno se le conoce como

- a) Sol eterno b) Sol de medianoche
c) Junio 21 d) Luz eterna

31. En el polo norte el 21 de junio el Sol se mantiene a una misma altura y da una vuelta de 360 grados, de tal manera que la sombra de una estaca describe un círculo completo en 24 horas. La altura del Sol es de

- a) 23.5° b) 66.5° c) 30° d) 90°

32. Si la estaca en el polo norte tiene una altura de 1 m, el círculo en el suelo tendrá un radio de

- a) 1.3 m b) 2.3 m c) 3.3 m d) 4.3 m

33. Es muy difícil vivir más al norte del círculo polar ártico. Dependiendo de la latitud, los días continuos de 24 horas de luz pueden durar meses. En el verano el polo norte está más expuesto al Sol porque el eje de rotación de la Tierra hace un ángulo con respecto al plano de la órbita que describe alrededor del Sol. El ángulo es de

- a) 66.5° b) 45° c) 30° d) 23.5°

34. Así como un trompo se mantiene vertical mientras esté girando, así la Tierra mantiene su dirección en el espacio. Cuando en su viaje alrededor del Sol se coloque al lado opuesto, será el polo sur el que esté más expuesto a la luz del Sol. En el hemisferio sur el verano inicia

- a) Marzo 21 b) Junio 21
c) Septiembre 21 d) Diciembre 21

35. En las ciudades fronterizas de Baja California el 21 de diciembre el día dura

- a) 9 horas b) 10 horas
c) 11 horas d) 12 horas

36. En las ciudades fronterizas de Baja California el 21 de Marzo el día dura

- a) 9 horas b) 10 horas
c) 11 horas d) 12 horas

37. En las ciudades fronterizas de Baja California el 21 de septiembre el día dura

- a) 9 horas b) 10 horas
c) 11 horas d) 12 horas

38. En las ciudades fronterizas de Baja California el 21 de junio el día dura

- a) 12 horas b) 13 horas
c) 14 horas d) 15 horas

39. Si la duración del día no cambiara con las estaciones, sino solamente la inclinación del Sol, los inviernos en Baja California serían

- a) Menos fríos b) Más fríos
c) Igual de fríos d) Menos calientes

40. Si la duración del día no cambiara con las estaciones, sino solamente la inclinación del Sol, los veranos en Baja California serían

- a) Menos calientes b) Más calientes
c) Igual de calientes d) Menos fríos

41. El meridiano 117° al Oeste de Greenwich, Reino Unido, pasa por Tijuana. El meridiano 140° al Este de Greenwich pasa por Tokio. El meridiano 0° pasa por Greenwich y se utiliza como referencia para definir lo que se conoce como tiempo universal. A la Tierra le toma 24 horas en dar una vuelta completa de 360° ¿Cuántos minutos le toma a la Tierra girar 1° ?

- a) 6 b) 3 c) 5 d) 4

42. La longitud de Tijuana es 117° O y la de Ciudad Juárez es 106° O. Según la pregunta anterior a la Tierra le toma varios minutos girar 1° . Primero anochece en Ciudad Juárez y después en Tijuana. ¿Cuántos minutos después?

- a) 44 b) 33 c) 22 d) 11

43. Tijuana e Isla Mujeres difieren en 30 grados de longitud. ¿Cuál es la diferencia en minutos?

- a) 30 b) 60 c) 120 d) 240

44. Se determina el mismo día hacia dónde está el Norte en Isla Mujeres y Tijuana. Se hace utilizando estacas cuando sus sombras son mínimas. Las observaciones también indican el mediodía en cada lugar. En Tijuana el mediodía estará retrasado con respecto al de Isla Mujeres en

- a) 1 hora b) 2 horas c) 3 horas d) 4 horas

45. El Sol emite energía y también lo hace la Tierra. Todos los objetos a temperaturas por encima del cero absoluto emiten (pierden) energía. La cantidad emitida depende de su temperatura según se estableció en el siglo XIX en la ley de Stefan-Boltzmann. Si T representa temperatura la energía emitida es proporcional a

- a) T b) T^2 c) T^3 d) T^4

46. Al recibir energía del Sol el suelo se calienta y entre más caliente esté más pierde por emisión. ¿Con cuál de las opciones se pierde más energía?

- a) T b) T^2 c) T^3 d) T^4

47. Al mediodía es cuando se recibe del Sol la mayor radiación por metro cuadrado. Sin embargo, la temperatura del suelo y por lo tanto la del aire es máxima hasta varias horas después. En otras palabras, aunque la radiación que se recibe vaya disminuyendo, la temperatura sigue aumentando. Hay un retraso de la temperatura con respecto a la radiación recibida. El retraso se debe a que

- a) El suelo sigue recibiendo más de lo que emite.
- b) El suelo acumula toda la energía recibida del Sol.
- c) No se sabe todavía. Se está investigando.
- d) El calor penetra al subsuelo y regresa más tarde al suelo.

48. Después de una noche fría la temperatura sigue bajando por un rato después de que haya salido el Sol. En otras palabras, aunque la radiación que se recibe vaya aumentando la temperatura sigue disminuyendo. Hay un retraso de la temperatura con respecto a la radiación recibida. El retraso se debe a que

- a) El suelo no emite radiación en la noche.
- b) No se sabe todavía. Se está investigando.
- c) El suelo sigue emitiendo más de lo que recibe.
- d) El frío penetra al subsuelo y regresa más tarde al suelo.

49. Febrero es el mes más frío del año, aunque cuando se recibe menos energía del Sol es en diciembre. En otras palabras, aunque la radiación que se recibe vaya aumentando la temperatura sigue disminuyendo. Hay un retraso de la temperatura con respecto a la radiación recibida. El retraso se debe a que

- a) El suelo no emite radiación en febrero.
- b) El suelo sigue emitiendo más de lo que recibe.
- c) El frío penetra al subsuelo y regresa más tarde al suelo.
- d) No se sabe todavía. Se está investigando.

50. Agosto es el mes más caluroso del año, aunque cuando se recibe más energía del Sol es en junio. En otras palabras, aunque la radiación que se recibe vaya disminuyendo la temperatura sigue aumentando. Hay un retraso de la temperatura con respecto a la radiación recibida. El retraso se debe a que

- a) El calor penetra al subsuelo y regresa más tarde.
- b) No se sabe todavía. Se está investigando.
- c) El suelo acumula toda la energía recibida.
- d) El suelo sigue recibiendo más de lo que emite.

Agradecimientos

Manuscrito recibido: 7 de julio de 2023

La logística del evento estuvo a cargo de Mario González Escobar, Humberto S. Benítez Pérez, Enid Araceli Morán Valdés y Ángel Daniel Peralta Castro. En las mesas de divulgación y en los laboratorios colaboraron Luis Delgado Argote, Mario González Escobar, Efraín Gómez Arias, Javier Alejandro González Ortega, Carlos Simón Reyes Martínez, Claudio Inguaggiato, Fadia Sara Ceccarelli, Salvador Villarreal Reyes, María del Carmen Maya Sánchez, Cesar Cruz Hernández, así como Gabriel Rendón Marquez, Martín Francisco Pacheco Romero, Porfirio Aviléz Serrano, Fernando Herrera Barrientos, María Alejandra Nuñez Leal, Luis Alejandro Yegres Herrera, María Margarita Martínez Rodríguez, Agustín Mastache Román, Elvia Ramón Morales, Cristian Alejandro Gallegos Castillo, Leonel Pérez Carrasco, Luis Gradilla Martínez, Laura Verónica Vélez Andrade, con el apoyo de los estudiantes de posgrado de diversos programas: Ashley Natalie Vega Donato, Marisol Juárez Reyes, Ignacio Francisco García Meza, Edgar Alan Martínez Salinas, Nina Adhara Elena Ávila Ortiz, Le Roy A. Sankey Alamilla, Samuel A. Hernández Jiménez, María del Carmén Osorio Ramírez, Marisela Rosales Jarquín, Eduardo García Loya, Elvis Alfredo Fernández Padrón, Zeydel Arredondo Castellanos, Alfredo Ramírez Velasco, Arlen González Azuara, Edgar Hernández Limón, Diana Itzel Soto Castañeda, Juan José Cetina Denis, Lizbeth Carrasco Gutierrez, Javier Pliego Jiménez, Carlos Francisco Montañez Molina. En la coordinación de recorridos participaron los estudiantes del Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra. Beatriz Valdés Moreno, Yasmin Hernández Aburto, Thalia Anaid Avilés Esquivel, Diana Valencia Cabrera, Karina Fuentes Bustillos, Martha Carolina Balbuena Salomón, Raúl León Cortez, Ariadna del Carmen Lucho González, Eduardo Monreal Roque, Cristian Alexis García Sandoval y Clara Nayeli Chacón Olivas. Jorge Alcocer y Rocío F. Arellano contestaron y corrigieron el examen antes de su aplicación en el evento.

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Avith Mendoza Ponce
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

