

Origen de los sismos sentidos en Costa Rica durante el año 2023

Origin of earthquakes felt in Costa Rica during 2023

Lepolt Linkimer^{1*}, Carolina Fallas¹ e Ivonne G. Arroyo¹

¹Universidad de Costa Rica (UCR), Red Sismológica Nacional (RSN) y Escuela Centroamericana de Geología (ECG), San Pedro, San José, Costa Rica

* Autor para contacto: lepolt.linkimer@ucr.ac.cr

(Recibido: 05/01/2024; aceptado: 23/01/2024)

ABSTRACT: The 153 earthquakes felt in Costa Rica during 2023 can be grouped into four categories according to their origin: faulting in the Caribbean and Panama upper plates, interplate seismogenic zones of the Cocos and Caribbean plates, internal deformation of the subducted Cocos plate, and faulting in the boundary between the Cocos and Nazca plates. The felt seismicity represents only ~3 % of the total of 4438 events located by the National Seismological Network (RSN) in 2023, which together are equivalent to the energy released by an earthquake of moment magnitude (Mw) 6.6. The earthquakes caused by shallow faulting occurred on faults of all types and geometries, while those caused by subduction were of the reverse type and those associated with the Cocos-Nazca boundary were pure strike-slip. The focal mechanisms of the earthquakes due to internal deformation of the Cocos plate were oblique with normal or reverse components. The largest felt earthquakes in 2023 were four events of Mw 6.4-6.5 with epicenters in neighboring countries, so they were slightly perceived in Costa Rica. The maximum intensity observed in 2023 was VI, due to two earthquakes (Mw 5.5 and 5.2) caused by faulting in the overriding plates.

Keywords: seismicity of Costa Rica, subduction, earthquake statistics, seismic energy, seismic intensity.

RESUMEN: Los 153 sismos sentidos en Costa Rica durante el 2023 pueden agruparse en cuatro categorías de acuerdo con su origen: fallamiento en las placas cabalgantes Caribe y Panamá, zonas interplacas de la subducción de Coco y Caribe, deformación interna de la placa Coco subducida y fallamiento del límite entre las placas Coco y Nazca. La sismicidad sentida representa solo el ~3 % del total de 4438 eventos localizados por la Red Sismológica Nacional (RSN) en el 2023, los cuales, equivalen en conjunto a la energía liberada por un terremoto de magnitud momento (Mw) 6,6. Los sismos ocasionados por fallamiento superficial ocurrieron en fallas de todos los tipos y geometrías, mientras que los ocasionados por subducción fueron de tipo inverso y los asociados con el límite Coco-Nazca de desplazamiento de rumbo. Los mecanismos focales en los sismos por deformación interna de la placa Coco fueron oblicuos con componentes normales o inversas. Los sismos sentidos de mayor tamaño del 2023 fueron cuatro eventos de Mw 6,4-6,5 con epicentros en países vecinos, por lo que se percibieron de forma leve en Costa Rica. La intensidad máxima observada en el 2023 fue de VI, debido a dos sismos (Mw 5,5 y 5,2) originados por fallamiento en las placas cabalgantes.

Palabras clave: sismicidad de Costa Rica, subducción, estadística sísmica, energía sísmica, intensidad sísmica.



Introducción

La alta sismicidad de Costa Rica es el resultado de su ubicación en un contexto tectónico de alta complejidad, en el cual interactúan cinco bloques tectónicos: las placas Coco, Caribe, Nazca y Panamá y el Bloque Antearco Centroamericano (Fig. 1). La placa Coco se hunde debajo de las placas Caribe y Panamá en el margen Pacífico, originando sismos destructivos con magnitud momento (M_w) ≥ 7.0 . En la costa del Caribe sur, por su parte, la placa Caribe se hunde debajo de la placa Panamá (i. e., Arroyo y Linkimer, 2021b) a partir del Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP, Adamek et al., 1988) generando también grandes terremotos y tsunamis. Aparte de la sismicidad de esta doble subducción, los sismos también son originados a lo largo de los otros límites entre bloques, principalmente en el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR; e.g., Marshall et al., 2000; Montero, 2001) y a lo largo de las fallas del arco volcánico de Guanacaste debido al movimiento del Bloque Antearco Centroamericano hacia el noroeste (e. g., Montero et al., 2017).

La unión de las placas Coco, Nazca y Panamá, define el punto triple de Panamá (PTP, Fig. 1), ubicado al sur de la península de Burica. En ese sector, se unen la Fosa Mesoamericana (FMA), la Zona de Fractura de Panamá (ZFP) y el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP, e. g. Kolarsky y Mann, 1995; Westbrook et al., 1995). Aparte de la ZFP, la sismicidad en el límite entre las placas Coco y Nazca también se origina en la Zona de Fractura de Balboa (ZFP) y en la Zona de Fractura de Coiba (ZFC; e. g. Kolarsky y Mann, 1995; Adamek et al., 1988).

Como parte de las labores de la Red Sismológica Nacional (RSN) de la Universidad de Costa Rica (UCR), se publica un resumen anual de la sismicidad del país desde 1976. La RSN es un programa de investigación en la UCR consolidado a partir de una colaboración entre la UCR y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), que inició en los años 70s y que se mantiene vigente a través de un convenio de cooperación científico y técnico. De esta forma, la RSN posee una densa red de estaciones distribuidas en todos los rincones del país, pertenecientes a ambas instituciones (Fig. 1; e. g., Linkimer et al., 2018).

El estudio de la sismicidad de Costa Rica es importante, ya que el país ha experimentado 69 sismos destructivos a lo largo de su historia (e.g., Montero, 1989; Peraldo y Montero, 1994; Linkimer y Alvarado, 2014). La determinación del origen de los sismos y las características de las fuentes generadoras permite refinar periódicamente la estimación de la amenaza sísmica. Con esa intención, se presentan en esta publicación las características y el origen de los sismos percibidos por la población durante el año 2023. Se incluye la descripción espacial, temporal y por magnitud y profundidad, así como los mecanismos focales de los sismos más relevantes. Además, se presentan los mapas de isositas de los cuatro sismos más intensos en territorio costarricense durante el 2023 y una estimación de la energía liberada por todos los sismos del año.

Datos y métodos

Los sismos presentados en esta publicación fueron registrados por una red de sismómetros compuesta por 223 estaciones (Fig. 1), de las cuales 73 son instrumentos de banda ancha, 142 de periodo corto y 8 son acelerógrafos. La red está constituida por 125 estaciones administradas por la UCR, 50 por el ICE y 48 por otras instancias que comparten sus estaciones directamente o a través de los sistemas de SAGE (*Seismological Facility for the Advancement of Geoscience*), por ejemplo, el Ineter de Nicaragua (16), el Ovsicori de la Universidad Nacional de Costa Rica (12), la red de Chiriquí (10) y la Universidad de Panamá (3).

La localización de los sismos presentados en este trabajo es el resultado de un proceso que puede resumirse en cuatro pasos. El primero consiste en la detección del evento y su asociación entre estaciones a partir de los programas del paquete SeisComP4 (Gempa, 2019). Este procesamiento ocurre en el centro de registro de la RSN, ubicado en la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR, y da como resultado las localizaciones iniciales preliminares para cada temblor, que son publicadas de forma automática en las redes sociales X (antiguo Twitter) y Facebook durante los primeros dos minutos después del tiempo de origen (Linkimer y Arroyo, 2020).

El segundo paso corresponde con la revisión de la localización preliminar, la cual es realizada por profesionales entrenados en Sismología y usando los programas Mulplt y Hyp (Lienert y Havskov, 1995) del paquete Seisan (Havskov et al., 2020). El procedimiento que se sigue es la identificación del arribo de las ondas P y S en el sismograma de cada estación aplicando un esquema de cinco pesos dependiendo de la claridad de los arribos y del ruido sísmico. Posteriormente, se procede a la

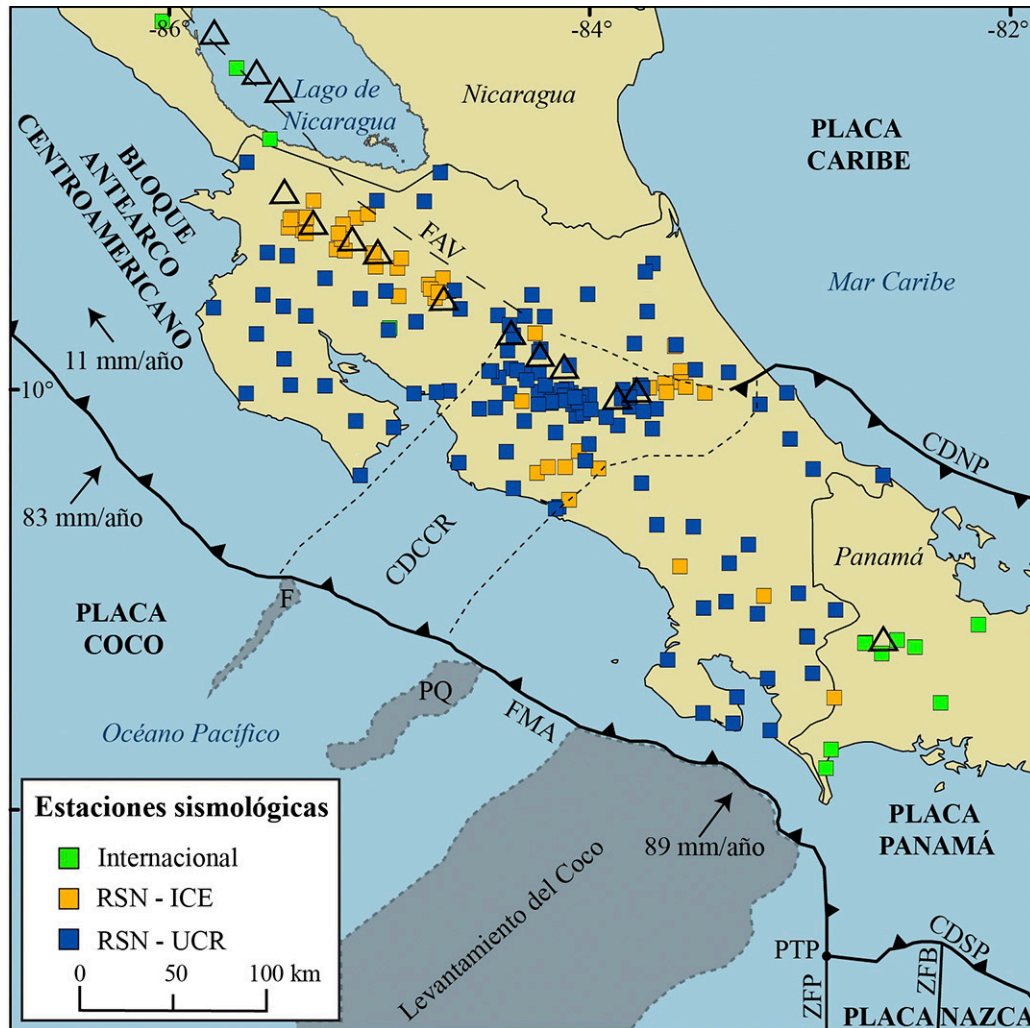


Fig. 1: Contexto tectónico de Costa Rica y ubicación de las estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE). La región contenida dentro de la línea punteada representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) y la línea discontinua las Fallas del Arco Volcánico (FAV). Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son: el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), el Cinturón Deformado del Sur de Panamá (CDSP), la Fosa Mesoamericana (FMA), el monte submarino Fisher (F), el plateau de Quepos (PQ), el punto triple de Panamá (PTP), la Zona de Fractura de Panamá (ZFP) y la Zona de Fractura de Balboa (ZFB). Los volcanes del Holoceno se representan como triángulos.

localización usando un modelo unidimensional de la velocidad de la onda P basado en Matumoto, Ohtake, Latham y Umaña (1977) y una razón de velocidades (V_p/V_s) de 1,75. También se calcula la M_w .

Dependiendo de la importancia del sismo, se realiza un reporte adicional en las mismas plataformas mencionadas con la información de la localización revisada, entre 5 y 20 minutos después del tiempo de origen, con el objetivo de confirmar y corregir, si fuera necesario, la localización preliminar publicada previamente. Toda la información de cada sismo revisado se publica además en la página web de la RSN y en la aplicación móvil “RSN” (e.g., Linkimer y Arroyo, 2020). Los sismos analizados en este trabajo corresponden con las localizaciones revisadas de este segundo paso.

Para el tercer paso se determina el origen de los sismos. Primero se identifica la polaridad del primer arribo de la onda P en el sismograma de cada estación y luego se estima el mecanismo focal utilizando el programa Focmec (Snook, 1984), a partir de búsquedas de planos nodales que logren separar satisfactoriamente las regiones de la esfera con polaridades positivas

y negativas. Tomando en cuenta la ubicación epicentral, la profundidad del hipocentro, la solución de los planos nodales del mecanismo focal y la ubicación de los límites de placas, de las fallas corticales (e.g. Denyer et al., 2003), de la zona sismogénica interplacas del margen Pacífico (e.g. DeShon et al., 2006; Arroyo et al., 2014; Arroyo y Linkimer, 2021a) y del techo de la placa Coco bajo Costa Rica (e.g., Lücke y Arroyo, 2015), entre otros aspectos, se asocia el origen de cada evento con alguna de las siguientes fuentes sismogénicas: fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, fallamiento en las placas cabalgantes (Caribe y Panamá), zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco a nivel superficial (< 40 km), zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Nazca a nivel superficial (< 40 km), zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Caribe a nivel superficial (< 40 km), fallamiento en la placa Coco subducida a profundidades mayores a 20 km (que incluye la Zona de Wadati-Benioff, ZWB) y el límite entre las placas Coco y Nazca, que corresponde con la ZFP, la ZFB y la ZFC.

El último paso es el cálculo de la intensidad en la escala Mercalli Modificada (IMM). Esto se logra a partir de las observaciones de los usuarios y colaboradores de la RSN, quienes voluntariamente responden un cuestionario en línea de 12 preguntas que es parte de una herramienta llamada “¿Lo sentiste?” (Linkimer y Arroyo, 2020), que fue diseñada por la RSN con base en una similar del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Atkinson y Wald, 2007; Wald et al., 2011). Una vez respondido el cuestionario, se determina el valor de intensidad en las coordenadas geográficas reportadas por el usuario. Además de estas observaciones de intensidad, se determinan valores de intensidad a partir de los registros instrumentales en los sitios en donde se ubican las estaciones sismológicas y a partir del paquete ShakeMap (Wald et al., 2003). Finalmente, se combinan los valores de intensidad instrumentales y observados por los usuarios en diversas regiones del país, que son usados para la elaboración de los mapas de isosistas.

La sismicidad del 2023

Durante el 2023, la RSN localizó 4438 eventos sísmicos, cantidad que incluye los sismos situados en el territorio de Costa Rica (sismos locales) y algunos ubicados en América Central (regionales). Del total de sismos localizados, 153 (~3,4 % del total) fueron reportados como percibidos por la población costarricense.

La cantidad anual de sismos localizados por la RSN desde el 2012 ha variado entre 2547 (año 2013) y 6989 (2015), con un promedio anual de 4332 para los últimos 12 años. Esto quiere decir que el año 2023 tuvo una cantidad de sismos ligeramente mayor que el promedio anual mencionado. Con respecto de la cantidad de sismos sentidos, el 2023 es el año con la menor cantidad desde el 2012, cuando se habilitó el uso de redes sociales de la RSN para el reporte de eventos. Los siguientes años con pocos sismos fueron el 2015 con 168 y el 2022 con 184. El año con más sismos sentidos desde el 2012 fue el 2018, con 285.

Distribución espacial

La distribución geográfica se describe a partir del mapa de epicentros de los sismos localizados (Fig. 2), de la cantidad de sismos por área (Fig. 3) y del mapa epicentral de sismos sentidos (Fig. 4).

Los sismos superficiales (< 30 km, Fig. 2, color rojo) ocurrieron en todas las regiones del país, pero especialmente en los márgenes del Pacífico y el Caribe y también en la ZFP y la ZFB. Los sismos originados a mayor profundidad (> 30 km) presentan un patrón de bandas de rumbo noroeste-sureste paralelas a la fosa Mesoamericana: los eventos con profundidades de entre 30 y 60 km (Fig. 2, color naranja) se ubican principalmente al noreste de la línea de costa Pacífica, desde Nicaragua hasta Panamá; los sismos con profundidades de entre 60 y 120 km (Fig. 2, color verde claro) ocurrieron a lo largo de la costa pacífica de Nicaragua y del arco volcánico de Costa Rica, desde el límite con Nicaragua hasta la región central, y algunos pocos en la Zona Sur. Los sismos más profundos, entre 120 y 200 km (Fig. 2, colores celeste y azul) se ubicaron únicamente en una franja al noreste de los volcanes de Guanacaste y en Nicaragua.

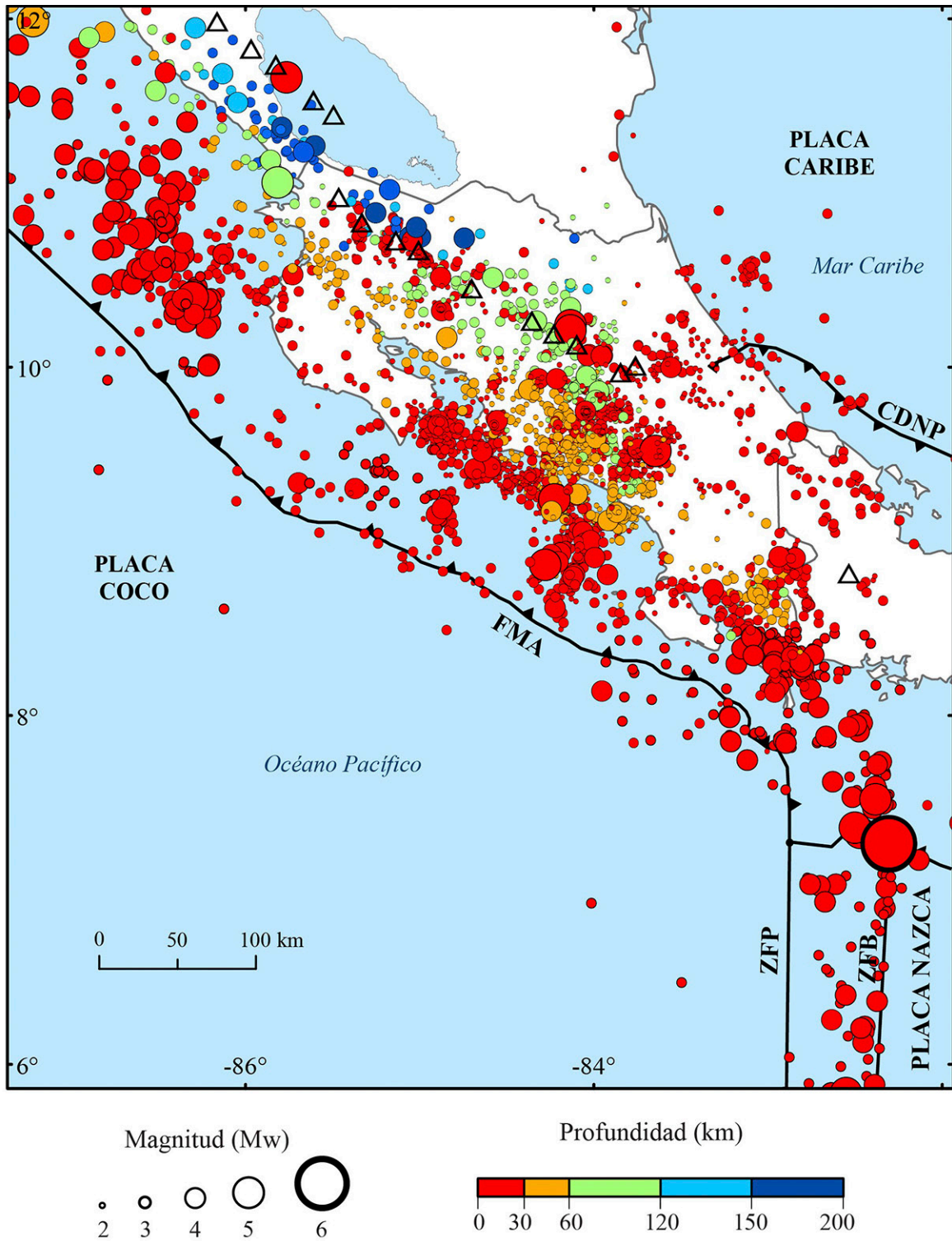


Fig. 2: Mapa de epicentros (círculos) de los sismos localizados por la RSN durante el año 2023 en la región de Costa Rica. El tamaño de los círculos es relativo a la magnitud momento (M_w) y su color a la profundidad del hipocentro. Las abreviaturas son las mismas mencionadas en la Fig. 1.

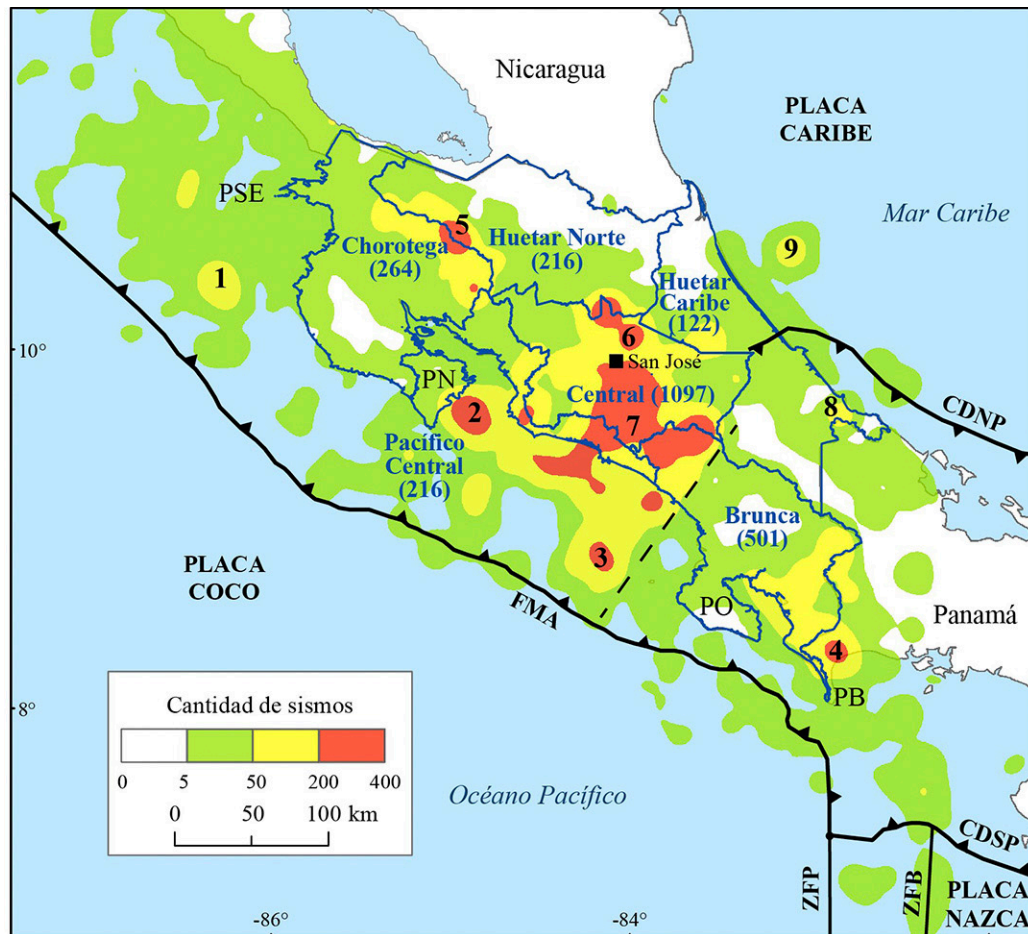


Fig. 3: Cantidad de sismos localizados por la RSN durante el año 2023 en zonas de 10 x10 km. Las zonas con la mayor cantidad de sismos se indican con los números del 1 al 9. Los límites de las seis regiones socioeconómicas de Costa Rica (Mideplan, 2018) se muestran como líneas azules y los números entre paréntesis corresponden con la cantidad de sismos en cada zona. La línea negra discontinua representa el límite abrupto en la sismicidad mencionado en el texto. Las penínsulas de la costa Pacífica están rotuladas: Burica (PB), Nicoya (PN), Osa (PO) y Santa Elena (PSE). El cuadro negro representa la ciudad de San José. Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son los mismos mostrados en la Fig. 1.

En la distribución espacial de la sismicidad del 2023 se pueden reconocer nueve sectores con una cantidad de sismos mayor a la de las zonas aledañas. Estas zonas son las siguientes: mar adentro del noroeste de la península de Nicoya (Fig. 3, número 1), al sureste de la península de Nicoya (número 2), al noroeste de la península de Osa (número 3), península de Burica (número 4), centro del arco volcánico de Guanacaste (número 5), al norte de San José (número 6), al sur de San José (número 7), Caribe limítrofe entre Costa Rica y Panamá (número 8) y noreste de Parismina en el mar Caribe (número 9). En las zonas numeradas del 2 al 7 se presentaron entre 200 y 400 sismos y en las zonas 1, 8 y 9, entre 50 y 200. El resto de las zonas del país tuvo una sismicidad menor a 50 eventos.

Las cuatro zonas con alta sismicidad a lo largo del margen Pacífico (numeradas del 1 al 4) se caracterizan por tener dimensiones de solo 20-30 km de diámetro y por presentar uno o varios sismos relevantes de Mw 4,5-5,5 (Fig. 4) y sus respectivas secuencias de réplicas. Por su parte, las tres zonas en el territorio continental (números del 5 al 7) se caracterizan por tener mayores dimensiones, especialmente la zona 7 que se extiende por 80 km de ancho, desde San José hasta la costa Pacífica, pero, en general, los sismos se caracterizan por tener menor tamaño que los eventos del margen Pacífico. En contraste, existen

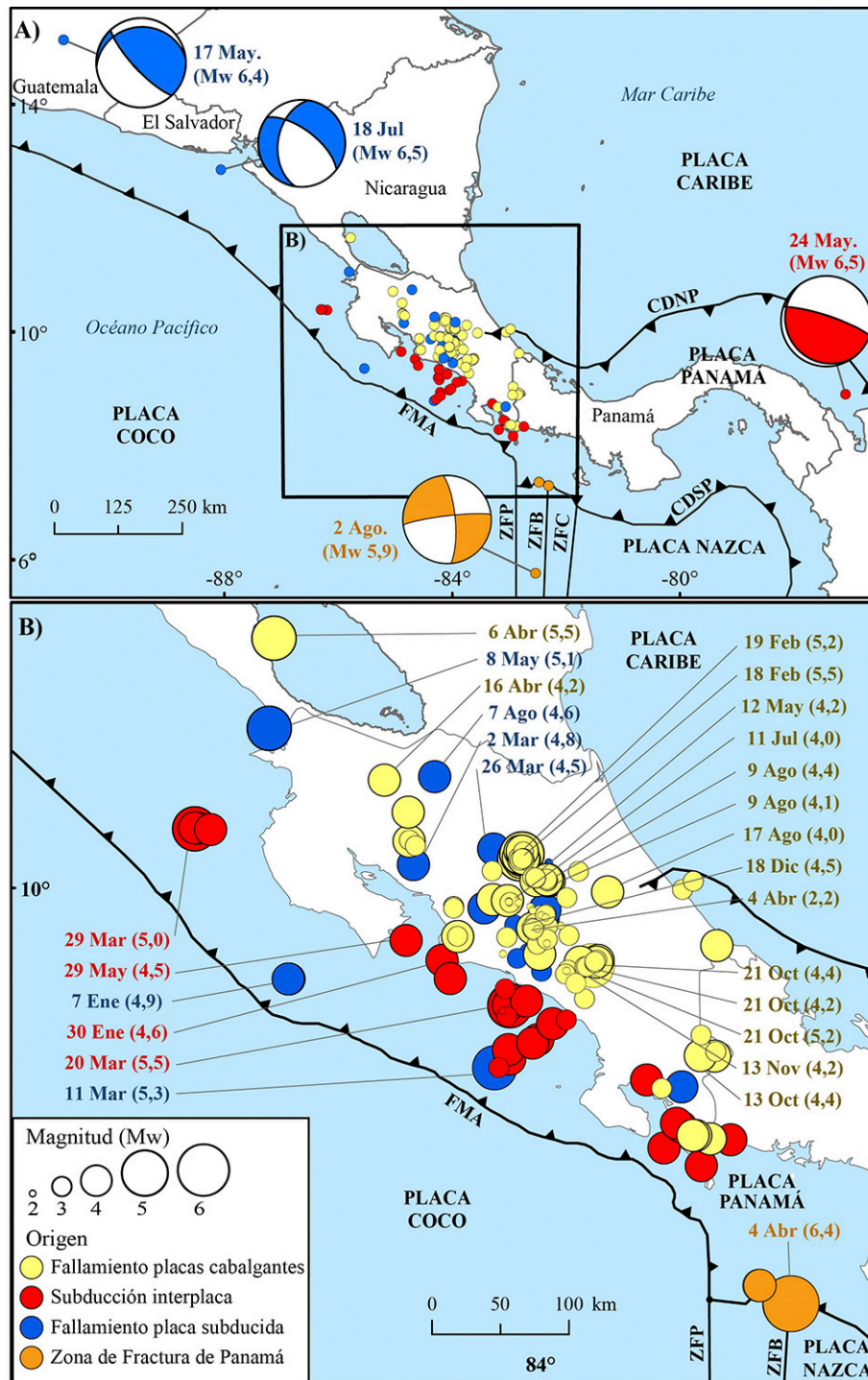


Fig. 4: Sismos sentidos en Costa Rica durante el 2023. A) Mapa de epicentros incluyendo cuatro sismos originados en la región centroamericana. Se muestran los mecanismos focales coloreados de acuerdo con el origen indicado en la parte B. B) Mapa epicentral de sismos sentidos en territorio costarricense. Los eventos mencionados en el texto y en el Cuadro 1 se rotulan con su Mw entre paréntesis. El origen de los sismos se describe mediante el color de los círculos. Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son los mismos mostrados en la Fig. 1.

zonas sin sismicidad o con menos de cinco sismos, como porciones de las penínsulas de Osa y Nicoya, la zona norte de Costa Rica limítrofe con Nicaragua y un segmento de la cordillera de Talamanca (Figs. 2 y 3).

De los 4438 sismos localizados, 2416 (~54,4 %) tuvieron su epicentro dentro del territorio continental de Costa Rica. La cantidad restante se ubicó en los océanos o en el territorio continental de Nicaragua y Panamá. Una inspección de los epicentros ubicados dentro del territorio continental con respecto de las seis regiones socioeconómicas de Costa Rica (Mideplan, 2018), muestra que la zona Central es por mucho la más sísmicamente activa, con 1097 eventos, seguida de la región Brunca con 501 (Fig. 3). Las regiones Chorotega, Pacífico Central, Huetar Norte y Huetar Caribe presentaron entre 122 y 264 eventos.

La distribución de la sismicidad localizada en el año 2023 fue muy similar a la documentada el año anterior, ya que todos los sectores con alta sismicidad también fueron observados en el 2022 (Linkimer, Fallas y Arroyo, 2023). Una vez más se observa un cambio abrupto en la cantidad de sismos a lo largo de un sector con rumbo noreste-suroeste, desde la trinchera hasta el centro de Costa Rica (Fig. 3, línea punteada). Este patrón en la distribución geográfica de la sismicidad ha sido documentado en los mapas publicados desde el 2016 (Porrás et al., 2017; Porrás et al., 2018; Porrás et al., 2019; Arroyo et al., 2020; Linkimer et al., 2021, 2022, 2023). Este claro límite en la sismicidad ocurre tanto en sismos de la zona interplaca, como en los sismos de la placa superior y dentro de la placa subducida y aún no ha sido explicado en la literatura. Otros rasgos llamativos de la sismicidad observados en los mapas publicados en los últimos siete años son: una zona sin sismicidad en el interior de la cordillera de Talamanca (Fig. 3, zona sin sismos en región Brunca) y un grupo de sismos al noreste de Parímina (Fig. 3 número 9), en la placa Caribe.

La distribución geográfica de los 153 sismos sentidos del 2023 muestra que la mayoría (115 sismos, 75 %) de los epicentros ocurrieron en la sección central del país (Fig. 4). Otro grupo de 17 sismos se ubicaron en la zona sur limítrofe con Panamá y 14 en la zona de las provincias de Alajuela y Guanacaste. Solo tres sismos sentidos tuvieron su epicentro en la costa caribeña (Fig. 4).

Distribución temporal

Octubre fue el mes con la cantidad más alta de sismos localizados, con 470, seguido por abril con 452 y diciembre con 448 (Fig. 5A). En contraste, julio presentó la menor cantidad con solo 268. Los meses de febrero y junio también presentaron pocos eventos con 275 y 288, respectivamente. El promedio mensual de sismos localizados fue de 370.

En relación con la sismicidad percibida por la población, el mes de marzo fue el más relevante con 21 sismos sentidos, seguido por febrero y mayo con 20 y 19, respectivamente. El mes con la menor cantidad de sismos reportados como sentidos fue julio, con solo seis (Fig. 6A). Durante el 2023, el segundo semestre fue significativamente más quieto para la población, ya que entre julio y diciembre la mayoría de los meses presentaron menos de 10 sismos sentidos (Fig. 6A). El promedio mensual de sismos sentidos para el año 2023 fue de 13.

Distribución por magnitud

En el 2023, los sismos de mayor tamaño alcanzaron una M_w de 6,4-6,5. Estos cuatro eventos tuvieron su epicentro en la región centroamericana (Fig. 4): dos con M_w de 6,5 el 24 de mayo al oeste de Panamá y el 18 de julio al sur de El Salvador, y dos con M_w de 6,4 el 4 de abril al sur de la provincia de Chiriquí en Panamá y el 17 de mayo en Guatemala. Los siguientes sismos en importancia por su tamaño ocurrieron el 2 de agosto con M_w de 5,9, ubicado 207 km al sur de la isla de Coiba en Panamá (Fig. 4A) y el 6 de abril con M_w de 5,5 en Rivas de Nicaragua (Fig. 4B). Aunque estos seis epicentros se encuentran alejados de los centros de población de Costa Rica, por su tamaño sí fueron percibidos en algunos sectores del territorio costarricense con intensidades bajas.

Del total de sismos localizados, 21 tuvieron una M_w entre 5,0 y 5,9, pero de estos solo 9 fueron sentidos (Figs. 5B y 6B), ya que el resto tuvieron su epicentro mar adentro muy alejado de los centros de población. Los sismos de mayor tamaño dentro del territorio costarricense tuvieron una M_w de 5,5 y estos fueron los sismos de Varablanca del 18 de febrero y de Quepos del 20 de marzo (Fig. 4B).

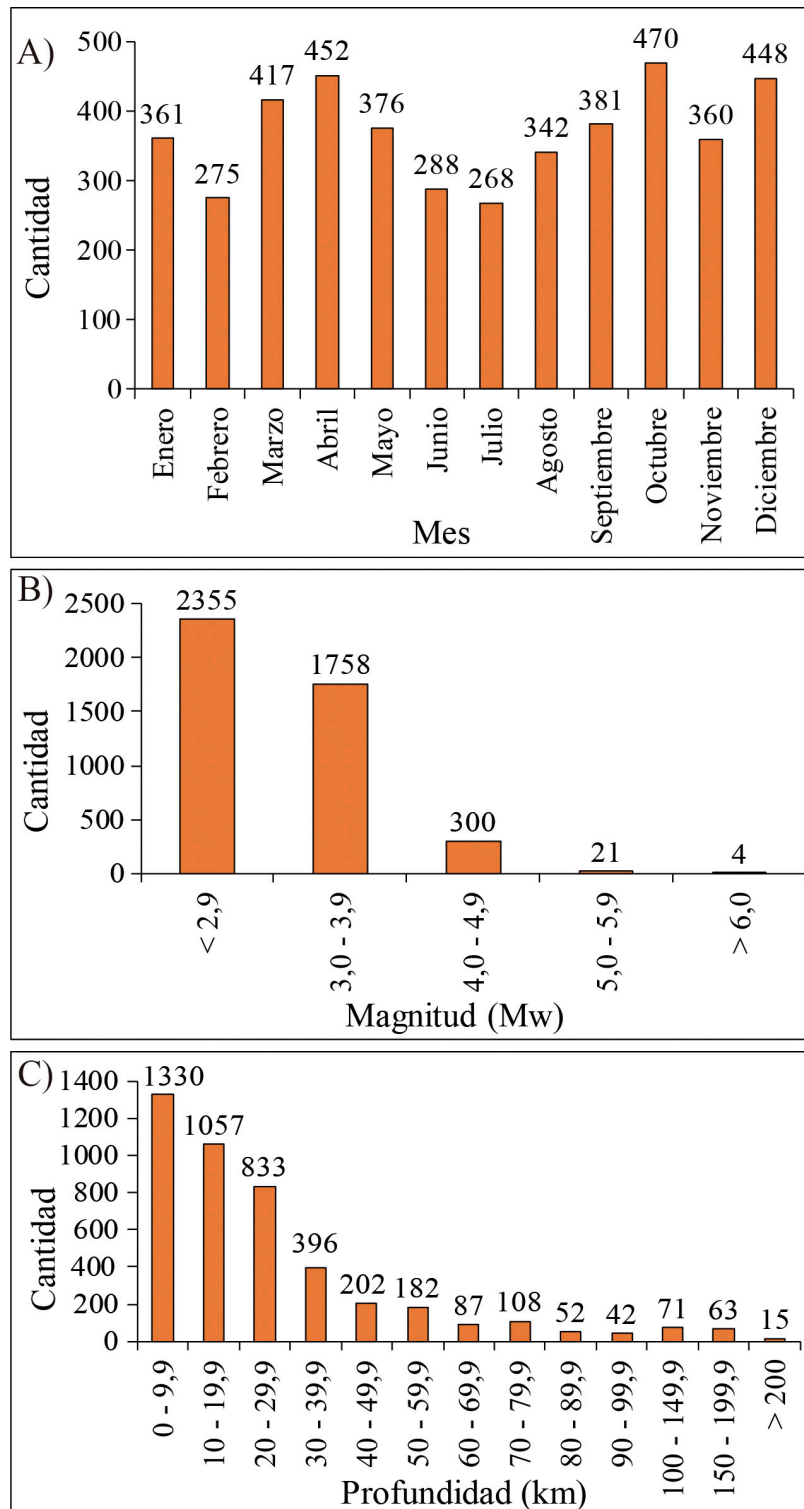


Fig. 5: Variación en la cantidad de sismos localizados por la RSN durante el 2023 (Fig. 2) de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw) y C) profundidad. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma

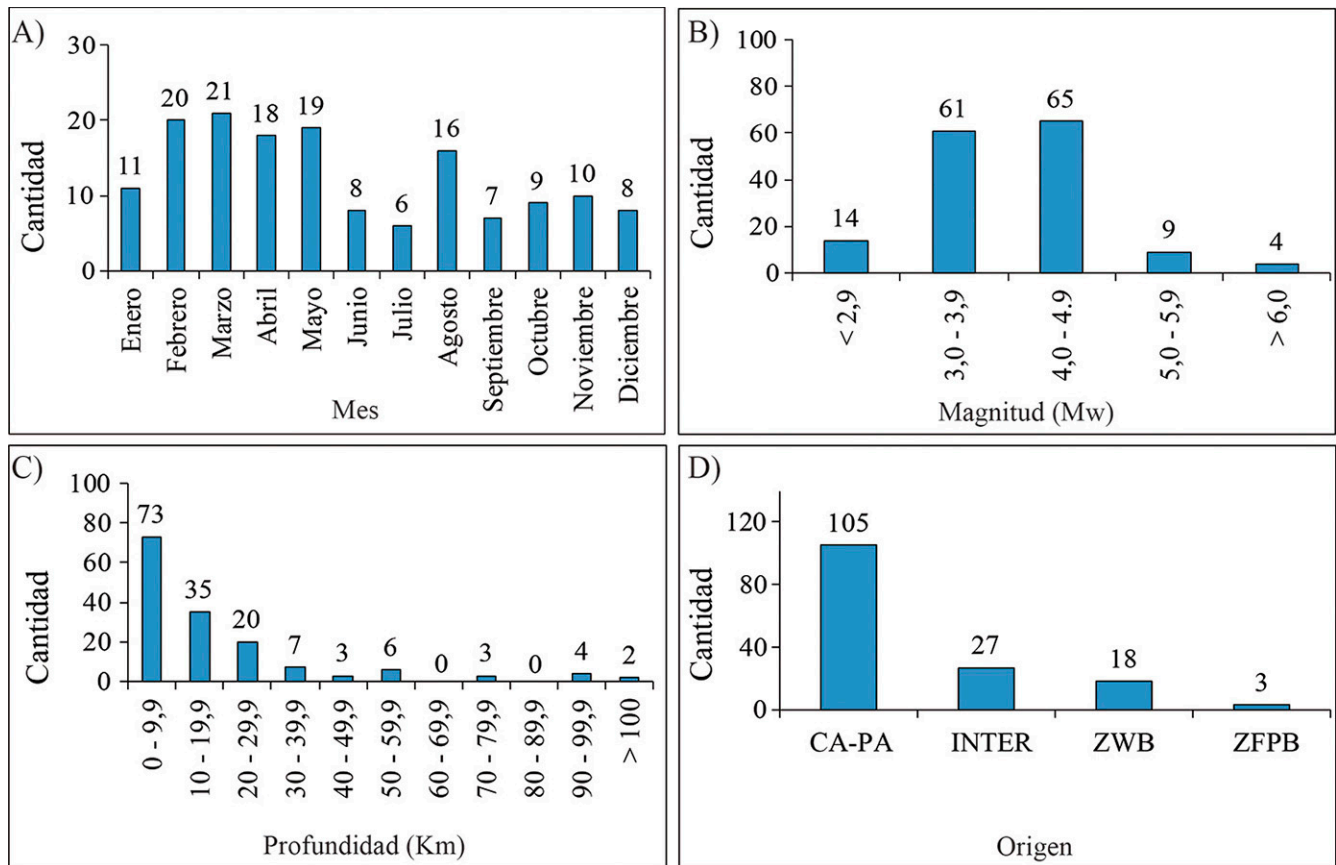


Fig. 6: Variación del número de sentidos del 2023 de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw), C) profundidad y D) origen. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma. El significado de las abreviaturas de la parte D es el siguiente: CA-PA se refiere a las fallas en las placas cabalgantes Caribe y Panamá, INTER se refiere a las zona sísmogénicas interplacas de las subducciones de las placas Coco y Caribe, ZWB es deformación interna de la placa Coco subducida a profundidades > 20 km y ZFPB corresponde con las zonas de fractura de Panamá y Balboa.

La mayoría de los sismos percibidos se ubicó en el rango de Mw de entre 4,0 y 4,9, con 65 eventos (42 % del total de sentidos) y luego entre 3,0 y 3,9, con 61 (40 %, Fig. 6B). La mayoría de los sismos del 2023 fueron microsismos con Mw < 2,9 (53 %, Fig. 5B) y de estos solo 14 fueron percibidos (9 % del total de 153 sentidos) porque su epicentro se localizó muy cerca o dentro de las regiones urbanas. El sismo sentido de menor Mw fue de 2,2, sucedió el 4 de abril y se localizó 3 km al sur de San Cristóbal de Desamparados, en la parte central del país (Fig. 4B).

Distribución por profundidad

Del total de sismos localizados, el ~73 % tuvo su hipocentro a profundidades menores a 30 km (Fig. 5C). De estos sismos superficiales, 128 fueron reportados como percibidos, lo cual representa el 84% del total de sismos sentidos (Fig. 6C). En el 2023, se localizaron 396 eventos con profundidad entre 30 y 40 km (Fig. 5C) de los cuales 7 fueron sentidos (Fig. 6C). Además, hubo 822 con una profundidad mayor a 40 km (Fig. 5C) y de estos solamente 18 fueron sentidos (Fig. 6C).

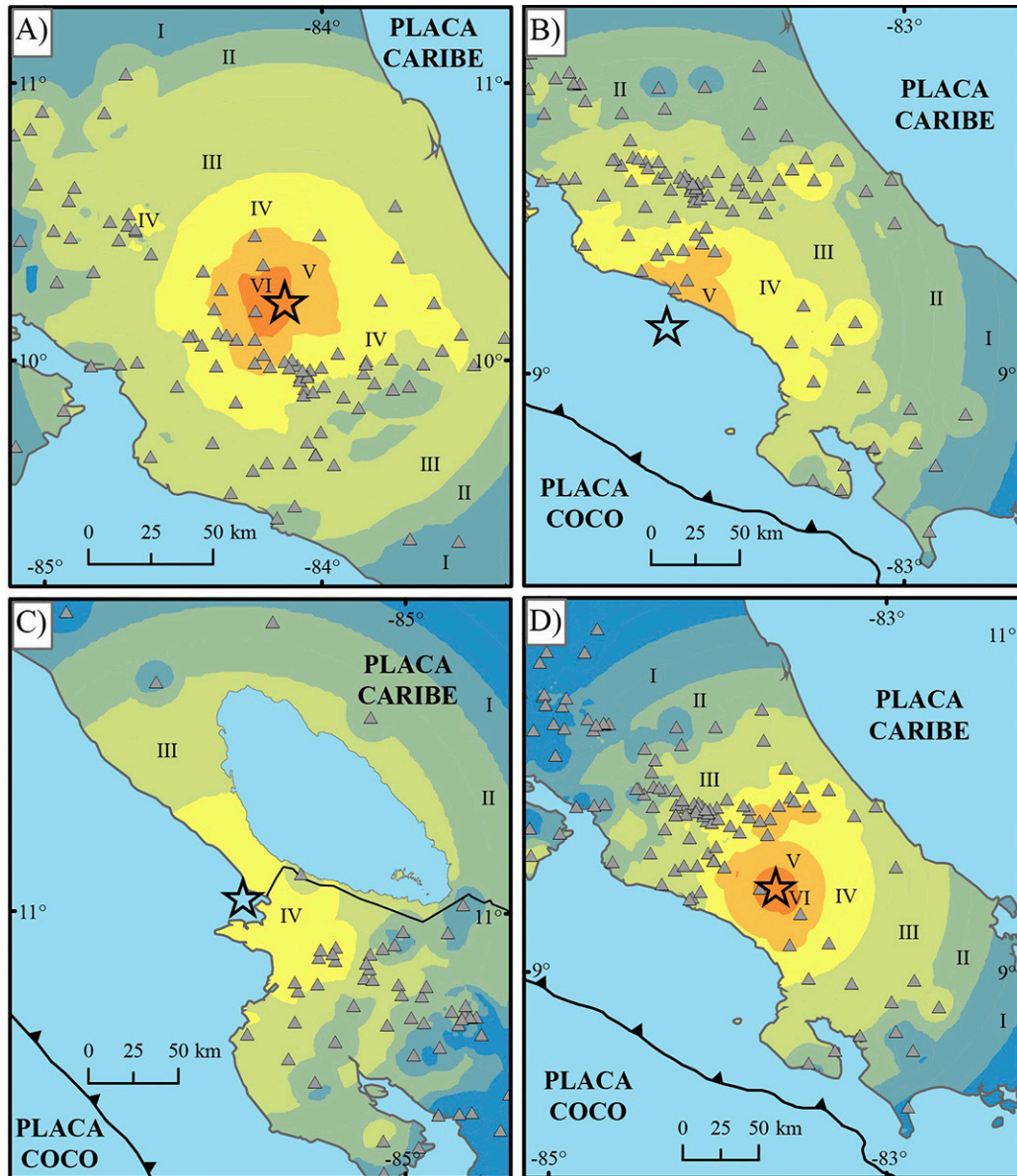


Fig. 7: Mapa de isosistas para algunos sismos relevantes del 2023. El epicentro de los sismos está representado por una estrella y las estaciones sismológicas usadas en cada caso por triángulos. En cada mapa se rotula con números romanos el grado de la intensidad en la escala Mercalli Modificada. A) Sismo de Varablanca del 18 de febrero (Mw 5,5). B) Sismo de Quepos del 20 de marzo (Mw 5,5). C) Sismo de La Cruz del 8 de mayo (Mw 5,1). D) Sismo de Rivas de Pérez Zeledón del 21 de octubre (Mw 5,2).

El sismo sentido más profundo con epicentro dentro del territorio costarricense sucedió a 181 km de profundidad en la región de Los Chiles, cerca del límite político con Nicaragua (7 de agosto; Mw 4,6; Fig. 4B). Otro sismo relevante se ubicó a 93 km de profundidad bajo la zona de Toro Amarillo (26 de marzo, Mw 4,5; Fig. 4B). Fuera de los límites de Costa Rica, el sismo de Guatemala de Mw 6,4 a una profundidad de 252 km, es el más profundo percibido por la población costarricense (Fig. 4A).

Intensidades

La IMM más alta observada durante el 2023 dentro del territorio costarricense fue de VI y ocurrió debido a los sismos de Varablanca del 18 de febrero (Mw 5,5; Fig. 7A) y de Rivas de Pérez Zeledón del 21 de octubre (Mw 5,2; Fig. 7D). Aunque hubo eventos de mayor magnitud, estos sucedieron mar adentro o en países vecinos (Fig. 4A), por lo que las intensidades observadas dentro del territorio costarricense fueron bajas, de II-III.

La intensidad VI relacionada con los sismos de Varablanca y Pérez Zeledón fue reportada en un área de 20-25 km de diámetro, en las comunidades más cercanas a los epicentros. Para ambos sismos se reportó la caída de objetos livianos en las casas y comercios y grietas y pequeños deslizamientos de tierra en caminos rurales, por ejemplo, cerca de la localidad de Cinchona (Ramírez, 2023) y en el camino de Zapotal de San Pedro de Pérez Zeledón (CRHoy, 2023).

Afortunadamente, no hubo daños materiales o víctimas, pero al ocurrir en horas de la madrugada (2:24 am Varablanca y 4:45 am Pérez Zeledón), ambos sismos despertaron a la mayoría de la población del país, generando alarma. Los dos eventos fueron percibidos con la intensidad IV en la Gran Área Metropolitana de San José y de forma leve en sectores del Pacífico Central y la costa del Caribe. La cantidad de reportes recibidos por parte de la población en el módulo “¿Lo sentiste?” de la RSN para estos sismos fue de: 573 para el sismo de Varablanca (Fig. 7A) y de 957 para el evento de Pérez Zeledón (Fig. 7D).

Otro sismo relevante por sus intensidades ocurrió el 20 de marzo, al sur de Quepos (Mw 5,5; Fig. 7B). Este evento alcanzó intensidades de V en el sector del Pacífico Central y de III en la Gran Área Metropolitana de San José. Por su parte, el sismo del 8 de mayo (Mw 5,1; Fig. 7C) al oeste de La Cruz de Guanacaste, generó intensidades de IV en la región limítrofe entre Costa Rica y Panamá, pero no fue sentido en el centro y sur de Costa Rica.

Energía sísmica

Usando la correlación clásica entre Mw y energía sísmica (E) en ergios ($1 \text{ ergio} = 1 \times 10^{-10} \text{ kJ}$) $\log_{10} E = 11,8 + 1,5 M_w$ (Stein y Wysession, 2003), se determinó que el promedio de la energía sísmica liberada durante cada semana del año 2023 fue de $9,18 \times 10^{09} \text{ kJ}$, es decir, el equivalente a un sismo de Mw 5,4. La suma de la energía liberada por todos los 4438 sismos localizados durante el 2023 en la región de Costa Rica mostrada en la Fig. 2 fue de $4,40 \times 10^{21} \text{ kJ}$, lo que equivale a un sismo de Mw 6,6. Este valor implica una disminución considerable en la cantidad de energía liberada calculada para los años previos, cuando se determinó el equivalente a un sismo de 7,0 en el 2022 (Linkimer et al., 2023) y de 6,9 en el 2021 (Linkimer et al., 2022).

La semana con la mayor liberación de energía fue la del 1 al 7 de abril (Fig. 8), cuando ocurrieron los sismos de ZFB (Mw 6,4) y Rivas de Nicaragua (Mw 5,5) (Fig. 4), liberando un total de $2,70 \times 10^{21} \text{ kJ}$. Otras cuatro semanas del año liberaron una cantidad considerable de energía, aunque mucho menor al pico de abril, debido a la ocurrencia de tres sismos de Mw 5,5 el 18 de febrero (sismo de Varablanca), el 20 de marzo (sismo de Quepos) y el 16 de junio (hora local 10:58 pm en la ZFB), así como debido al sismo de Mw 5,4 del 27 de noviembre (8:26 pm en la ZFB). Estos últimos dos eventos tuvieron su epicentro a 70-74 km al oeste de la isla de Coiba en Panamá, por lo que no fueron percibidos debido a la gran distancia con respecto a los centros de población en Costa Rica.

Mecanismos focales y origen de la sismicidad

Se determinaron 18 mecanismos focales siguiendo el procedimiento descrito en la sección de datos y métodos. Adicionalmente, se presentan nueve mecanismos focales determinados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey [USGS], s.f.) y mostrados en las Figs. 4A, y 9 y en el Cuadro 1.

El origen de los 153 sismos sentidos del 2023 fue agrupado en cuatro categorías (Figs. 4, 6D y 9). La mayoría (105 eventos, ~69 % del total) fueron ocasionados por fallas corticales (< 35 km) en las placas cabalgantes Caribe y Panamá, seguido por los sismos en las zonas sismogénicas interplacas de las subducciones de las placas Coco y Caribe, en donde ocurrieron 27 eventos. La tercera categoría es la deformación interna de la placa Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá,

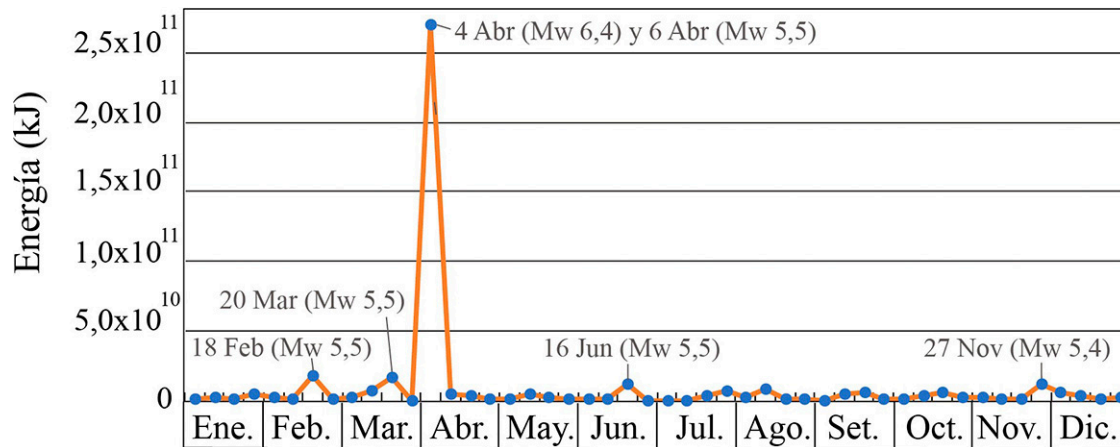


Fig. 8: Variación de la energía sísmica semanal liberada en kilojulios (kJ) durante el año 2023, para la sismicidad localizada en la región mostrada en la Fig. 2. Se rotulan los eventos con mayor liberación de energía. Los sismos de los días 16 de junio (hora local 10:58 pm) y 27 de noviembre (8:26 pm) no fueron sentidos por la población debido a que se ubicaron mar adentro y muy distantes de los centros de población en Costa Rica; sin embargo, por su magnitud (Mw 5,4-5,5), sí contribuyeron en la cantidad de energía liberada del año.

que incluye 18 sismos. Finalmente, el cuarto tipo de origen es el límite entre las placas Nazca y Coco, en donde se presentaron tres sismos sentidos (Fig. 6A).

Los mecanismos focales de los sismos asociados con las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá (color amarillo en Fig. 9) muestran que dentro del territorio continental de Costa Rica, durante el 2023, hubo actividad en fallas de todos los tipos y orientaciones. La mayoría de los mecanismos focales de sismos originados en fallas superficiales fueron de desplazamiento de rumbo puro y estos se localizaron principalmente a lo largo del arco volcánico (números 10, 11 y 12 en Cuadro 1 y Fig. 9) o en las estribaciones de la cordillera de Talamanca (números 16, 26 y 27). Debido a que en todos estos casos existen fallas cercanas a los epicentros con rumbos similares a los planos nodales, la determinación del plano causante de la sismicidad requiere de un estudio más profundo, fuera de los propósitos de este trabajo.

Por otra parte, los mecanismos focales de tipo inverso asociados con fallas superficiales se ubican al norte de San José y hacia el Caribe (números 3, 4, 19, 20, 21 en Cuadro 1 y Fig. 9). Uno de estos eventos fue el sismo de Varablanca del 18 de febrero (Mw 5,5) que estaría asociado con una falla inversa en ese sector. Para todos estos eventos se infiere que el plano de falla causante de la sismicidad es el plano nodal de más bajo ángulo, que buza hacia el suroeste o sureste, consistente con la geometría de las fallas Siquirres-Matina, Guápiles, San Miguel y otras identificadas al norte del arco volcánico (e.g. Denyer et al., 2003).

Un mecanismo focal de tipo oblicuo, con alta componente inversa y con un plano nodal de rumbo noroeste-sureste (número 22) fue determinado para la zona limítrofe entre Costa Rica y Panamá. En esa zona han sido identificadas fallas con esa dirección (e.g., Arroyo, 2001) que podrían coincidir con dicho plano nodal.

Tres sismos con mecanismo focal de tipo normal ocurrieron en la zona de Rivas de Pérez Zeledón (números 23, 24 y 25). La localización de los epicentros coincide con la ubicación de la falla División, estudiada por Montero (2021) y a la cual se le atribuyen los terremotos históricos de Buenavista de Pérez Zeledón en 1983 (Mw 6,5) y de Cuericí en 1991 (Mw 6,1). Los tres mecanismos focales de tipo normal se ubican en un sector en donde la falla División muestra un salto o cambio de rumbo, que provoca una zona transtensiva, por lo que la sismicidad coincide con las observaciones de Montero (2021).

Los mecanismos focales asociados con la zona sismogénica de la subducción de la placa Coco son de tipo inverso (color rojo, Figs. 4 y 9), con un plano nodal inclinado hacia el noreste con un ángulo de 32-45°, que coincide con la zona de contacto entre las placas (números 2, 7 y 15 en Cuadro 1). Otro sismo asociado con la subducción, pero de la placa Caribe bajo Panamá (número 14), tiene un plano nodal de bajo ángulo (12 °) que se inclina al suroeste, coincidiendo con la geometría del límite de placas en ese sector (Fig. 4A).

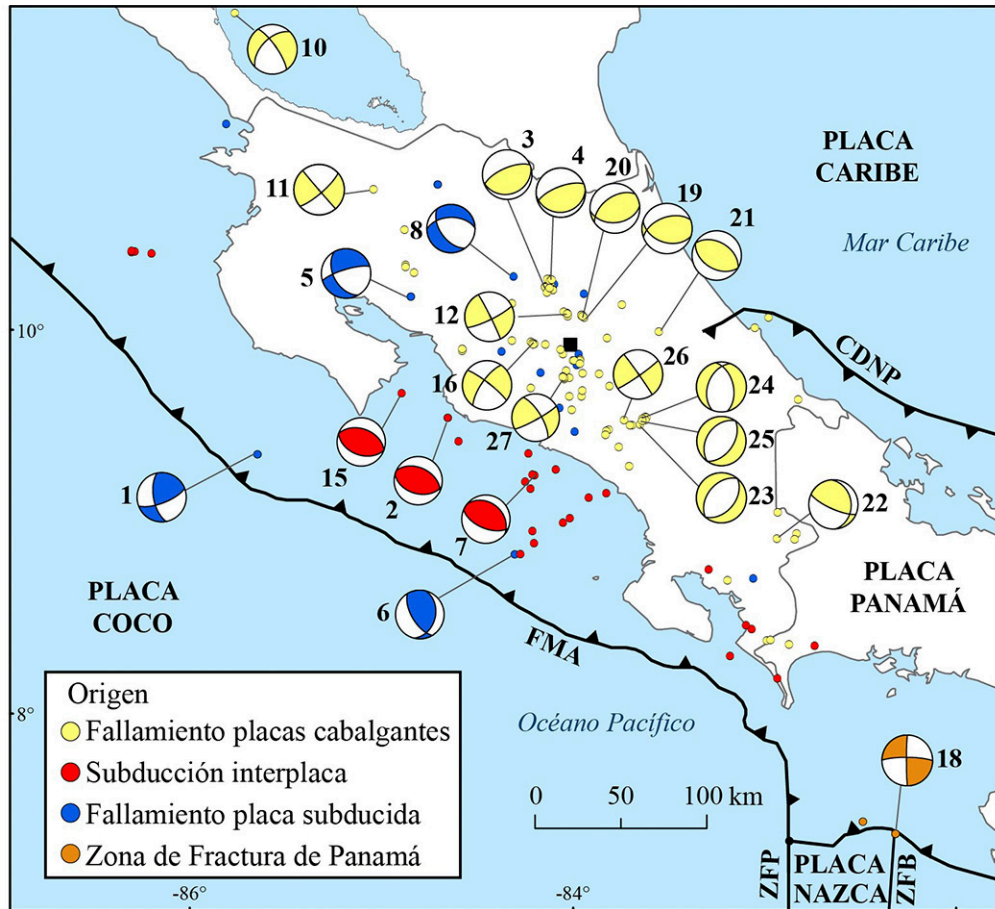


Fig. 9: Mecanismos focales y origen de los sismos sentidos del 2023. Los números de los mecanismos focales corresponden con los mostrados en el Cuadro 1. El cuadro negro representa la ciudad de San José. El color de los círculos (epicentros) y de los mecanismos focales indica el origen señalado en la simbología y explicado en la Fig. 6D. Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son los mismos mostrados en la Fig. 1.

Hubo dos sismos significativos de Mw 6,4 y 5,9 (números 9 y 18 en Cuadro 1) que se originaron en la ZFB (color naranja, Figs. 4A y 9). El mecanismo focal de estos eventos es de una falla de desplazamiento de rumbo dextral, con un plano nodal casi vertical y orientado norte-sur, coherente con la ZFB en esa zona (Figs. 4A y 9).

Finalmente, seis mecanismos focales pueden ser asociados con la deformación interna de la placa Cocos (color azul, Figs. 4 y 9). Los dos eventos de mayor tamaño se ubicaron en El Salvador (Mw 6,5) y Guatemala (Mw 6,4; Fig. 4A) con mecanismos focales muy distintos entre sí, de falla normal e inversa, respectivamente. Otros dos mecanismos focales fueron determinados para sismos en el interior del territorio costarricense (números 5 y 8) que sugieren fallamiento oblicuo con una alta componente normal dentro de la placa Cocos subducida a profundidades entre 50 y 90 km. Por otro lado, dos mecanismos focales con epicentro mar adentro, pero al noreste de la fosa Mesoamericana y a profundidades de ~20 km, sugieren que existen fallas oblicuas con componente inversa dentro de la placa Cocos al iniciar la subducción en ese sector (números 1 y 6 en Cuadro 1 y Fig. 9).

Cuadro 1

Mecanismos focales de algunos sismos importantes del 2023 mostrados en las Figs. 4A y 9 y determinados por la RSN o por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las abreviaturas para el origen de los sismos son las siguientes: INTER para la subducción en el margen Pacífico, CA-PA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, ZFPB para la Zona de Fractura de Panamá-Balboa y ZWB para la deformación interna de la placa Coco subducida. Los números indicados para cada plano nodal corresponden con el rumbo, la inclinación y el ángulo de rake. Los números resaltados en negrita son los valores del plano de falla cuando fue posible determinarlo.

#	Día-Mes	Hora local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1 (°)			Plano nodal 2 (°)			Agencia
1	7-ene	23:54	4,9	21	ZWB	69	71	151	169	62	21	USGS
2	30-ene	08:11	4,6	26	INTER	105	45	83	295	45	97	RSN
3	18-feb	02:24	5,5	4	CA-PA	72	22	95	245	68	88	RSN
4	19-feb	16:56	5,2	3	CA-PA	84	21	104	245	70	85	RSN
5	2-mar	10:50	4,8	54	ZWB	151	48	-18	254	76	-137	RSN
6	11-mar	11:08	5,3	16	ZWB	14	36	129	150	62	65	USGS
7	20-mar	19:44	5,5	17	INTER	309	32	104	113	59	81	USGS
8	26-mar	08:24	4,5	93	ZWB	144	54	-50	270	52	-131	RSN
9	4-abr	16:18	6,4	13	ZFPB	355	75	-173	263	83	-16	USGS
10	6-abr	00:39	5,5	20	CA-PA	325	76	-144	225	55	-17	USGS
11	16-abr	09:31	4,2	6	CA-PA	49	78	-1	139	89	-169	RSN
12	12-may	16:18	4,2	4	CA-PA	64	80	3	333	87	170	RSN
13	17-may	17:02	6,4	252	ZWB	265	21	40	138	77	107	USGS
14	24-may	21:05	6,5	13	INTER	143	12	124	289	80	83	USGS
15	29-may	19:08	4,5	24	INTER	110	45	90	290	45	90	RSN
16	11-jul	23:58	4,0	6	CA-PA	215	72	-9	307	82	-162	RSN
17	18-jul	18:22	6,5	92	ZWB	307	65	-128	190	44	-36	USGS
18	2-ago	19:25	5,9	9	ZFPB	180	87	170	271	80	3	USGS
19	9-ago	13:54	4,4	6	CA-PA	250	53	65	107	44	120	RSN
20	9-ago	14:06	4,1	5	CA-PA	235	52	71	84	42	113	RSN
21	17-ago	19:25	4,0	13	CA-PA	120	45	90	300	45	90	RSN
22	13-oct	13:24	4,4	31	CA-PA	114	75	65	355	29	148	RSN
23	21-oct	04:45	5,2	14	CA-PA	220	45	-90	40	45	-90	RSN
24	21-oct	06:33	4,4	10	CA-PA	201	45	-64	346	50	-114	RSN
25	21-oct	06:55	4,2	11	CA-PA	215	40	-90	35	50	-90	RSN
26	23-nov	21:06	4,2	9	CA-PA	55	85	2	325	88	176	RSN
27	18-dic	18:35	4,5	10	CA-PA	61	83	19	329	71	172	RSN

Conclusiones

El origen de los 153 sismos sentidos en Costa Rica durante el 2023 puede agruparse en cuatro categorías: fallas superficiales (< 35 km) en las placas Caribe y Panamá, las zonas sismogénicas interplacas de la subducción de las placas Coco y Caribe, la deformación interna de la placa Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá y el fallamiento asociado con el límite entre las placas Nazca y Coco.

La energía liberada por los 4438 sismos localizados por la RSN durante el año 2023 equivale a un sismo de Mw 6,6 (~4,40 x10²¹ kJ), un valor muy por debajo del calculado para años anteriores (Mw 6,9-7,0). El 2023 es, además, el año con la menor cantidad de sismos sentidos desde el 2012, cuando se habilitó el uso de redes sociales de la RSN para el reporte de eventos.

Los sismos de mayor tamaño dentro del territorio costarricense tuvieron una Mw de 5,5 y estos fueron los sismos de Varablanca del 18 de febrero y de Quepos del 20 de marzo, el primero originado por fallamiento superficial inverso y el segundo por la subducción de la placa Coco. Seis sismos de Mw entre 5,5 y 6,5 también fueron sentidos en Costa Rica, pero tuvieron su epicentro en la región centroamericana y por su gran distancia con los centros de población costarricenses, solo se percibieron con intensidades bajas.

La IMM más alta observada durante el 2023 dentro del territorio costarricense fue de VI y ocurrió en una zona de 20-25 km de diámetro alrededor de los epicentros de los sismos de Varablanca del 18 de febrero (Mw 5,5) y de Rivas de Pérez Zeledón del 21 de octubre (Mw 5,2). El resto de los sismos presentaron intensidades máximas menores en distintos sectores del país y, afortunadamente, en el año 2023 no hubo daños mayores o víctimas relacionadas con los sismos en Costa Rica.

Nueve sectores geográficos del país resaltaron en el 2023 con una cantidad de entre 50 y 400 sismos. Esta distribución de la sismicidad, así como el cambio abrupto en la cantidad de sismos a lo largo de un sector con rumbo noreste-suroeste, desde la trinchera hasta el centro de Costa Rica, y una zona sin sismicidad en el interior de la cordillera de Talamanca, son rasgos llamativos observados en los mapas de la sismicidad anual publicados por la RSN durante la última década.

Agradecimientos

Este artículo es un producto de los proyectos 113-B5-704 “Vigilancia sísmica de Costa Rica”, 113-A1-716 “Apoyo de asistentes a la sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica” y EC-533 “Difusión de temas sismológicos en Costa Rica”, adscritos al programa de investigación 113-B9-911 “Red Sismológica Nacional” de la UCR. Además, ha sido posible gracias al financiamiento que la RSN recibe a través de la Ley Nacional de Emergencias N° 8488. Agradecemos al personal de la UCR y del ICE que permitió mantener la red de estaciones durante el año 2023, especialmente a Jean Paul Calvo. Las siguientes personas colaboraron en la localización de sismos durante el 2023: Dra. María Cristina Araya y la Geol. María de los Ángeles Rodríguez y los asistentes de la UCR: Christian Aguilar, Sonia Hajaji, Andrés Leandro, Alejandro Medina y Julián Rodríguez.

Referencias

- Adamek, S., Frohlich, C., y Pennington, W. D. (1988). Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: Constraints on microplate tectonics of the Panama region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93 (B3), 2053-2075
- Arroyo, I. G. (2001). *Sismicidad y Neotectónica en la región de influencia del proyecto Boruca: hacia una mejor definición sismogénica del Sureste de Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica.
- Arroyo, I. G., y Linkimer, L. (2021a). Geometría de la zona sismogénica interplacas en el sureste de Costa Rica a la luz de la secuencia sísmica de Golfito del 2018. *Geofísica Internacional*, 60-1, 51-75. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2026>
- Arroyo, I., y Linkimer L. (2021b). Modelo de velocidad sísmica unidimensional y características tomográficas del Caribe Sur de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 65, 1-15. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i65.46696>
- Arroyo, M., Linkimer, L., y Arroyo, I. (2020). Recuento de la sismicidad en Costa Rica durante el 2019. *Revista Geológica de América Central*, 62, 116-133. <https://doi.org/10.15517/rgac.v62i0.40639>
- Arroyo, I. G., Husen, S., y Flueh, E.R. (2014). The seismogenic zone in the Central Costa Rican Pacific margin: high-quality hypocentres from an amphibious network. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 1747-1764. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0955-8>
- Atkinson, G., y Wald, D. (2007). “Did You Feel It?” intensity data: A surprisingly good measure of earthquake ground motion. *Seismological Research Letters*, 78(3), 362-368.
- CRHoy. (18 de febrero de 2023). Vecinos reportan grietas en el suelo en Cinchona tras fuerte sismo de esta madrugada. *CRHoy.com*. <https://www.crhoy.com/nacionales/vecinos-reportan-grietas-en-el-suelo-en-cinchona-tras-fuerte-sismo-de-esta-madrugada/#>

- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica*. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- DeShon H.R., Schwartz, S. Y., Newman, A.V., González, V., Protti, M., Dorman, L. M., Dixon, T. H., Sampson, D. E., y Flueh, E. R. (2006). Seismogenic zone structure beneath the Nicoya Peninsula, Costa Rica, from three-dimensional local earthquake P- and S-wave tomography. *Geophysical Journal International*, 164, 1, 109–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02809.x>
- Global Earthquake Monitoring Processing Analysis (Gempa). (2019). *SeisComp 3 Real time data acquisition and processing*. Gempa GmbH. Informe interno.
- Havskov, J., Voss, P. H., y Ottemöller, L. (2020). Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1846-1852. <https://doi.org/10.1785/0220190313>
- Kolarsky, R. A., y Mann, P. (1995). Structure and neotectonics of an oblique subduction margin, southwestern Panama. En P. Mann (ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (Geological Society of America Special Paper 295, pp. 225-233). The Geological Society of America, Inc. <https://doi.org/10.1130/SPE295>
- Lienert, B. R., y Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66(5), 26-36.
- Linkimer, L., y Alvarado, G. E. (2014). Distribución espacio-temporal de la sismicidad sentida en Costa Rica (1976-2013) en el marco histórico del 30 aniversario (1982-2012) de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE). *Revista Geológica de América Central, Número Especial 30 aniversario*, 45-71. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.16569>.
- Linkimer, L., y Arroyo, I. (2020). Ciencia ciudadana y herramientas de comunicación en la Red Sismológica Nacional de la Universidad de Costa Rica. *Revista Comunicación*, 29(2), 2-21.
- Linkimer L., Arroyo, M., y Arroyo, I. G. (2021). Sismicidad y ruido sísmico en Costa Rica durante la pandemia del año 2020. *Revista Geológica de América Central*, 64, 1-18. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i64.46623>
- Linkimer, L., Fallas, C., y Arroyo, I. G. (2022). Estadística de la sismicidad del 2021 en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 66, 1-18, 2021. <https://doi.org/10.15517/rgac.v66i0.50150>
- Linkimer, L., Fallas, C., y Arroyo, I. G. (2023). Sismicidad localizada por la Red Sismológica Nacional durante el 2022. *Revista Geológica de América Central*, 68(1), 1-18. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.54122>
- Linkimer, L., Arroyo, I. G., Alvarado, G., Arroyo, M., y Bakkar, H. (2018). The National Seismological Network of Costa Rica (RSN): An Overview and Recent Developments. *Seismological Research Letters*, 89 (2A), 392-398. <https://doi.org/10.1785/0220170166>
- Lücke, O., y Arroyo, I. G. (2015). Density structure and geometry of the Costa Rican subduction zone from 3-D gravity modeling and local earthquake data. *Solid Earth*, 6, 1169-1183. <https://doi.org/10.5194/se-6-1169-2015>
- Marshall, J. S., Fisher, D. M., y Gardner, T. W. (2000). Central Costa Rica deformed belt: Kinematics of diffuse faulting across the western Panama block. *Tectonics*, 19(3), 468-492.
- Matumoto, T., Ohtake, M., Latham, G., y Umaña, J. (1977). Crustal structure in Southern Central America. *Bulletin of Seismological Society of America*, 67, 121-133.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (Mideplan). (2018). *Mapa de Division regional-cantonal*. <https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/KLpLoXCwT0yU96gKSI4PVQ>
- Montero, W. (1989). Sismicidad histórica de Costa Rica 1638–1910. *Geofísica Internacional*, 28, 531-559.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- Montero-Pohly, W. (2021). Los terremotos de Cuericí del 24 de abril de 1991 (Mw 6,1) y de Buenavista del 3 de julio de 1983 (Ms 6,3): dos rupturas contiguas de la falla División en el centro de Costa Rica. *Revista geológica De América Central*, 65, 1-22.
- Montero, W., Lewis, J.C., y Araya, M.C. (2017). The Guanacaste Volcanic Arc Sliver of Northwestern Costa Rica. *Scientific Reports*, 7, 1797. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01593-8>
- Peraldo, G., y Montero, W. (1994). *Temblores del periodo colonial de Costa Rica* (Primera ed.). Editorial Tecnológica.
- Porras, J. L. Linkimer, L., Araya, C., Arroyo, M., Taylor, M., y Rojas, W. (2017). Sismicidad registrada por la RSN en el 2016. *Revista Geológica de América Central*, 56, 117-128, 2017. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i56.29239>

- Porras, J. L., Linkimer, L., Arroyo, I., Arroyo, M., y Taylor, M. (2018). Actividad sísmica percibida en Costa Rica durante el 2017. *Revista Geológica de América Central*, 58: 203-2014. <https://doi.org/10.15517/rgac.v58i0.32852>
- Porras, J. L., Linkimer, L., Arroyo, I., Arroyo, M., Taylor, M., y Fallas, C. (2019). La sismicidad del 2018 en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 60, 133-144. <https://doi.org/10.15517/rgac.v2019i60.36468>
- Ramírez, A. CRhoy. (21 de octubre de 2023). Fotos: reportan grietas en vías de Pérez Zeledón tras fuerte sismo. *CRHoy.com*. <https://www.crhoy.com/nacionales/fotos-reportan-grietas-en-vias-de-perez-zeledon-tras-fuerte-sismo/>
- Snoke, J., Munsey, J., Teague, A., y Bollinger, G. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and Sv-P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, 55, 15-20.
- Stein, S., y Wysession, M. (2003). *An introduction to Seismology, earthquakes, and earth structure*. Blackwell Publishing.
- United States Geological Survey. (s.f.). *NEIC Catalog* [Catálogo de información sísmica]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>
- Wald, D. J., Wald, L., Worden, B., y Goltz, J. (2003). *ShakeMap, a tool for earthquake response*. U.S. Geological Survey Fact Sheet 087-03. <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-087-03/FS-087-03-508.pdf>
- Wald, D. J., Quitariano, V., Worden, C. B., Hopper, M., y Dewey, J. W. (2011). USGS “Did You Feel It?” Internet-based Macroseismic Intensity Maps. *Annals of Geophysics*, 54(6), 688-707. <https://doi.org/10.4401/ag-5354>
- Westbrook, G. K., Hardt, N. C., y Heath, R. (1995). Structure and tectonics of the Panama–Nazca boundary. En P. Mann (ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (Geological Society of America Special Paper 295, pp. 225-233). The Geological Society of America, Inc. <https://doi.org/10.1130/SPE295>