

Mecanismos focales de los sismos sentidos en Costa Rica durante el año 2024

Focal mechanisms of felt earthquakes in Costa Rica during 2024

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 José, Costa Rica

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

(Recibido: 07/02/2025; aceptado: 29/03/2025)

RESUMEN: Este estudio presenta 139 nuevos mecanismos focales elaborados en el marco del resumen anual de la sismicidad del año 2024. En total, la Red Sismológica Nacional (RSN) localizó 5378 eventos, cuya energía conjunta equivale a un sismo de magnitud momento (Mw) 6,6. Solo el ~3,8 % (204) del total de sismos fue percibido por la población. Los mecanismos focales y las localizaciones de estos eventos permitieron agrupar su origen en cinco categorías: fallamiento en las placas cabalgantes Caribe y Panamá, zona interplacas de la subducción de la placa Coco, deformación interna de la placa Coco subducida, fallamiento del límite entre las placas Coco y Nazca y fallamiento de la placa Coco previo a la subducción. Los sismos superficiales (< 35 km) en las placas cabalgantes, al igual que los asociados con el límite Coco-Nazca, ocurrieron principalmente en fallas de desplazamiento de rumbo, mientras que los relacionados con subducción fueron de tipo inverso. Los diez sismos sentidos más relevantes en 2024 alcanzaron magnitudes Mw 5,5-6,2. La intensidad máxima observada fue de V, en áreas muy reducidas cerca de los epicentros de seis eventos (Mw 4,9 y 6,2).

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



ABSTRACT: This study presents 139 new focal mechanisms calculated in the context of the annual seismicity review of 2024. In total, the National Seismological Network (RSN) located 5378 events, whose combined energy is equivalent to an earthquake of moment magnitude (Mw) 6.6. Only ~3.8 % (204) of the earthquakes were perceived by the population. The focal mechanisms and locations of these events allowed the earthquake source to be grouped into five categories: faulting in the Caribbean and Panama upper plates, interplate seismogenic zone of the Cocos plate, internal deformation of the subducted Cocos plate, faulting in the boundary between the Cocos and Nazca plates, and faulting in the Cocos plate prior to subduction. The shallow (< 35 km) earthquakes in the upper-plates and in the Cocos-Nazca boundary occurred mainly on strike-slip faults, while those related to subduction were reverse. The ten most significant earthquakes felt in 2024 reached magnitudes of Mw 5.5-6.2. The maximum intensity was V, observed in very small areas near the epicenters of six earthquakes (Mw 4.9 and 6.2).

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

Introducción y contexto tectónico

El mecanismo focal es una representación sencilla para simbolizar la geometría y el tipo del fallamiento que originó un sismo. Durante el año 2024, el programa de investigación Red Sismológica Nacional (RSN) de la Universidad de Costa Rica (UCR) ha incorporado la elaboración del mecanismo focal de cada sismo sentido como parte de sus labores rutinarias. En años previos, este ejercicio solamente se realizaba para los sismos de mayor magnitud o más significativos por su percepción, sin embargo, con el aumento en el número de estaciones sismológicas y la automatización de procedimientos, ahora es posible generar el mecanismo focal en casi todos los eventos perceptibles por la población.

Desde sus inicios en 1976, la RSN ha estado registrando de manera sistemática e ininterrumpida la actividad sísmica en el país. Este programa de investigación de la UCR surgió de una colaboración entre dicha universidad y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), iniciada en los años 70 y que sigue vigente mediante un acuerdo de cooperación científica y técnica. Gracias a esta alianza, la RSN cuenta con una extensa red de estaciones distribuidas por todo el país, propiedad de ambas instituciones (Fig. 1; por ejemplo, Linkimer et al., 2018). Este monitoreo continuo facilita una mejor comprensión de los patrones sísmicos y sus implicaciones para la amenaza sísmica, lo que resulta fundamental para mitigar los riesgos derivados de los terremotos.

La elevada sismicidad de Costa Rica se debe a su ubicación en una región tectónica de gran complejidad, donde interactúan cinco bloques tectónicos: las placas Cocos, Caribe, Nazca y Panamá, junto con el Bloque Antearco Centroamericano (Fig. 1). La subducción de la placa Cocos bajo las placas Caribe y Panamá ha producido terremotos destructivos frecuentes a lo largo del margen Pacífico, con magnitud momento (Mw) $\geq 7,0$. En la costa del Caribe sur, la placa Caribe se desliza debajo de la placa Panamá, comenzando en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP, Adamek et al., 1988), lo que también origina grandes sismos y tsunamis. Además de los sismos provocados por esta doble subducción (Arroyo y Linkimer, 2021b), la actividad sísmica también ocurre en otras zonas de contacto entre bloques, especialmente en el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR; e.g., Marshall et al., 2000; Montero, 2001) y en las fallas asociadas con el arco volcánico de Guanacaste, debido al movi-

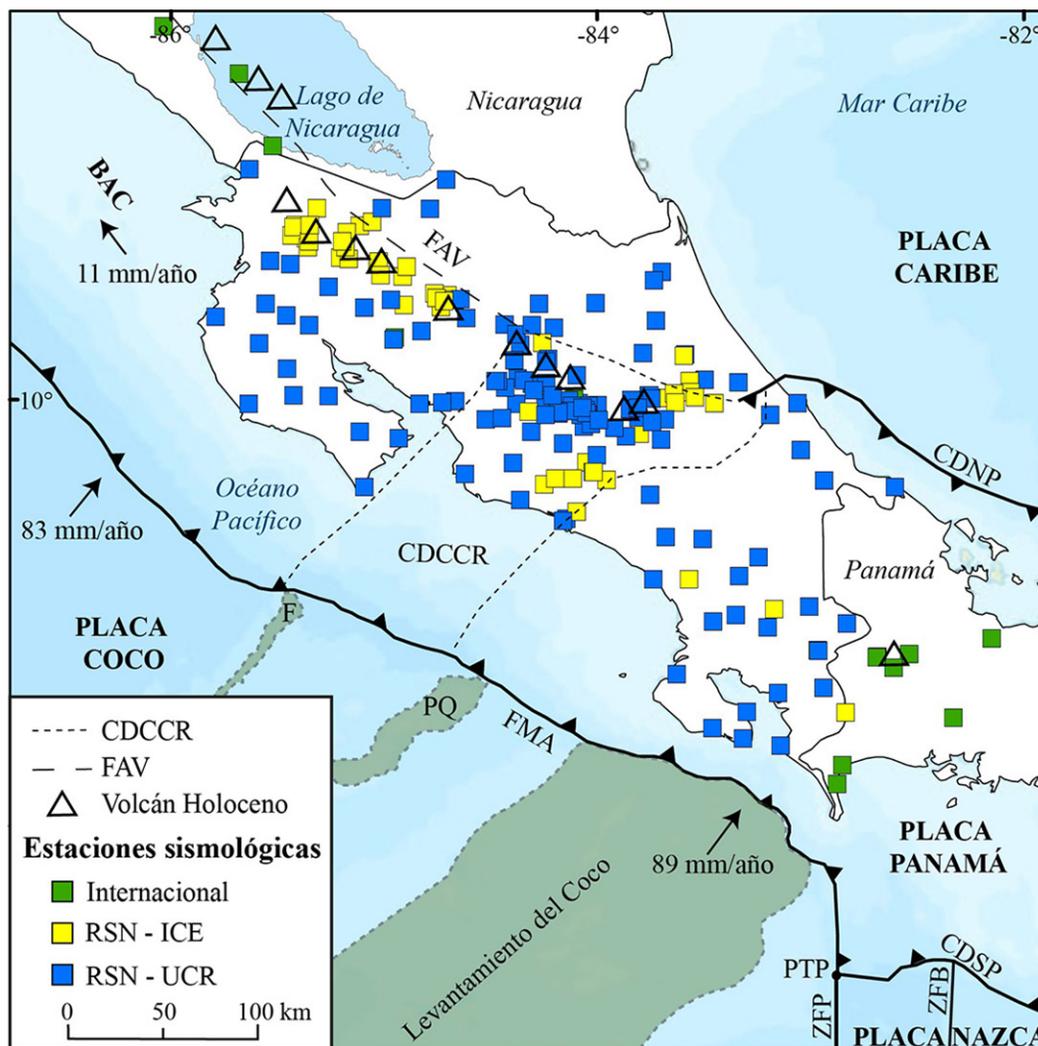


Fig. 1: Mapa de ubicación de las estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) y de los principales rasgos tectónicos del país, señalados con las siguientes abreviaturas: BAC (Bloque Antearco Centroamericano), CDCCR (Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica), CDNP (Cinturón Deformado del Norte de Panamá), CDSP (Cinturón Deformado del Sur de Panamá), F (monte submarino Fisher), FAV (Fallas del Arco Volcánico), FMA (Fosa Mesoamericana), PQ (plateau de Quepos), PTP (punto triple de Panamá), ZFP (Zona de Fractura de Panamá) y ZFB (Zona de Fractura de Balboa).

miento hacia el noroeste del Bloque Antearco Centroamericano (e.g., Montero et al., 2017). Finalmente, en la región alrededor del punto triple de Panamá, donde convergen las placas Coco, Nazca y Panamá, se conectan 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) y hacia el sureste también existen la Zona de Fractura de Balboa (ZFB) y la Zona de Fractura de Coiba (ZFC; e. g. Kolarsky y Mann, 1995; Adamek et al., 1988). Todas estas estructuras son responsables de la alta sismicidad en la región del punto triple de Panamá.

La alta sismicidad de Costa Rica, la diversidad en estilos de fallamiento y la alta cantidad de datos sísmicos que pueden ser recopilados actualmente, convierten al país en un laboratorio natural para la elaboración de mecanismos focales. El estudio de los mecanismos focales y de los patrones de sismicidad que realiza la RSN cada año, son importantes ya que esta información permite actualizar de manera periódica las estimaciones de la amenaza sísmica, una labor relevante para un país que ha sufrido el embate de casi 70 terremotos documentados a lo largo de su historia (e.g., Linkimer y Alvarado, 2014; Montero, 1989; Peraldo y Montero, 1994). Con ese norte, en esta publicación se presentan los mecanismos focales de los sismos percibidos por la población durante el año 2024. Se incluyen detalles sobre la distribución espacial y temporal de todos los eventos registrados y sentidos, así como su magnitud y profundidad. También se muestran los mapas de isosistas de cuatro de los sismos más significativos ocurridos en territorio costarricense durante 2024 y una estimación de la energía liberada por todos los sismos registrados durante el año.

Metodología

Para este trabajo, los sismogramas usados para la determinación de los tiempos de arribo de las fases sísmicas y las polaridades provienen principalmente de las estaciones sísmicas de la RSN. La red de instrumentos de la UCR forma parte de un proyecto de investigación llamado Vigilancia Sísmica de Costa Rica que sostiene en funcionamiento 125 estaciones ubicadas en el territorio continental de Costa Rica y en la isla del Coco. Además, como parte de un convenio de cooperación científica y técnica, la RSN recibe la señal sísmica de 50 estaciones del ICE y, por la vía de los sistemas de SAGE (Seismological Facility for the Advancement of Geoscience), tiene acceso a 48 estaciones que pertenecen a otras instituciones dentro y fuera de Costa Rica, por ejemplo, el Ineter de Nicaragua (16 estaciones), el Ovsicori de la Universidad Nacional de Costa Rica (12), la red de Chiriquí (10) y la Universidad de Panamá (3). En conjunto, esta red sísmica de 223 estaciones contiene 81 instrumentos de banda ancha, 134 de período corto y 8 acelerógrafos.

La localización de los sismos analizados en este estudio sigue un proceso estructurado en cuatro etapas. En primer lugar, se detecta el evento y se asocia entre estaciones mediante los programas del paquete SeisComP4 (Gempa, 2019). Este procesamiento automático se lleva a cabo en el Laboratorio de Sismología de la RSN, situado en la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR. Como resultado, se generan las localizaciones preliminares iniciales para cada sismo, las cuales se publican automáticamente en las redes sociales X y Facebook dentro de los dos minutos posteriores al tiempo de origen (Linkimer y Arroyo, 2020).

El siguiente paso consiste en la revisión de la localización preliminar, tarea llevada a cabo por especialistas en Sismología que emplean los programas *Mulplt* y *Hyp* (Lienert y Havskov, 1995) del paquete *Seisan* (Havskov et al., 2020). Este proceso inicia con la identificación de los arribos de las ondas P y S en los sismogramas de cada estación, aplicando un esquema de cinco pesos de incertidumbre según la claridad de los arribos y el nivel de ruido sísmico. Luego, se determina la localización del evento utilizando un modelo unidimensional de la velocidad de la onda P, basado en Matumoto et al. (1977), junto

con una razón de velocidades (V_p/V_s) de 1,75. Como parte de este segundo paso, se determina la magnitud momento (M_w) de cada sismo, como un promedio aritmético de todas las estaciones en las que fue determinada la M_w .

Toda la información de cada sismo revisado se publica en el mapa de eventos de la RSN y en la aplicación móvil “RSN” (e.g., Linkimer y Arroyo, 2020). En caso de ser un sismo importante, sentido o potencialmente sentido, se realiza un reporte adicional en las redes sociales mencionadas con la información de la localización revisada. Esto ocurre entre 5 y 20 minutos después del tiempo de origen, y tiene el objetivo de confirmar y corregir, si fuera necesario, la localización preliminar publicada previamente. Los sismos presentados en este artículo corresponden con las localizaciones revisadas de este segundo paso.

Como parte del tercer paso se determina el mecanismo focal y el origen de los sismos. Para esto, se seleccionan cuidadosamente las polaridades del primer movimiento de la onda P en el sismograma de cada estación y luego se estima el mecanismo focal utilizando el programa Focmec (Snoke, 1984), que utiliza como parámetros de entrada la polaridad del primer arribo y los ángulos de despegue, que son calculados usando el modelo unidimensional de la velocidad de la onda P mencionado en el primer paso. El mecanismo focal se calcula a partir de una búsqueda con incrementos de cinco grados en el rumbo y en el buzamiento para encontrar todos los planos nodales permisibles que separen sin errores los grupos de polaridades positivas y negativas. Para garantizar una alta calidad, se publican en este estudio solo las soluciones que tuvieron un mínimo de 15 polaridades bien distribuidas en toda la esfera focal, aunque la mayoría de los eventos tiene muchas observaciones con un promedio de polaridades usadas de 50 por sismo. Además, se impuso como restricción adicional una variación de menos de 20° , tanto en el rumbo como en el buzamiento, para todas las posibles soluciones del plano nodal. También, se requirió que las soluciones separaran las polaridades positivas y negativas sin errores o con menos de dos errores de polaridad, siempre y cuando estas se ubiquen cerca ($< 5^\circ$) de los planos nodales. Debido a estos requerimientos de calidad, no todos los sismos sentidos cuentan con un mecanismo focal de alta calidad. La solución del mecanismo focal seleccionada como final es la definida por el promedio geométrico de los polos de los múltiples pares de planos nodales posibles para cada evento.

Para determinar el origen de cada evento sísmico se consideran diversos factores, como la ubicación epicentral, la profundidad del hipocentro, la solución de los planos nodales del mecanismo focal y la distribución de los límites de placas y fallas corticales (e.g., Denyer et al., 2003). También se analiza la zona sismogénica interplacas del margen Pacífico (e.g., DeShon et al., 2006; Arroyo et al., 2014; Arroyo y Linkimer, 2021a) y la posición del techo de la placa Coco bajo Costa Rica (e.g., Lücke y Arroyo, 2015). Con base en esta información, cada sismo se asocia con una 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 (incluyendo la Zona de Wadati-Benioff, ZWB) y el límite entre las placas Coco y Nazca, que abarca la ZFP, la ZFB y la ZFC.

El cuarto paso y final es la determinación de la intensidad en la escala Mercalli Modificada (IMM). Para ello, se recopilan observaciones de usuarios y colaboradores de la RSN, quienes responden voluntariamente un cuestionario en línea de 12 preguntas. Esta herramienta, denominada “¿Lo sentiste?”

(Linkimer y Arroyo, 2020), fue desarrollada por la RSN tomando como referencia un modelo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Atkinson y Wald, 2007; Wald et al., 2011). Una vez completado el cuestionario, se asigna un valor de intensidad a las coordenadas geográficas proporcionadas por el usuario. Además, se obtienen valores de intensidad a partir de registros instrumentales en las estaciones sismológicas mediante el uso del paquete ShakeMap (Wald et al., 2003). Finalmente, se combinan los datos de intensidad instrumental y las observaciones de los usuarios para generar mapas de isosistas que reflejan la distribución de los efectos del sismo en distintas regiones del país.

Características de los sismos del 2024

La RSN localizó 5378 sismos en el año 2024 (Fig. 2). Esta cantidad corresponde principalmente con sismos locales, es decir, aquellos ubicados en el territorio de Costa Rica y algunos sismos regionales, que tienen su epicentro en los otros países de América Central. Un total de 204 eventos, es decir, el ~3,8 % del total de sismos localizados, fue reportado como sentido por la población del país. La cantidad anual de sismos localizados por la RSN desde el 2012 ha variado entre 2547 eventos en el año 2013 y 6989 en el 2015, para un promedio anual de 4414 considerando los últimos 13 años. Estas cantidades indican que el año 2024 tuvo una cantidad de sismos mayor que el promedio anual mencionado. Por su parte, la cantidad de sismos sentidos ha variado entre 153 en el año 2023 y 285 en el 2018, para un promedio de 220 desde el año 2012. Este valor es muy cercano al número de sismos sentidos del año, por lo que, comparativamente, el año 2024 se puede caracterizar como uno de sismicidad usual para Costa Rica.

Distribución geográfica

La distribución geográfica descrita en este apartado se realiza con base en los mapas de epicentros y cantidad de sismos de las Figs. 2, 3 y 4. Los sismos más superficiales (< 30 km, Fig. 2, color rojo) se ubicaron en todas las regiones del país, pero especialmente en los márgenes del Pacífico y del Caribe sur y también en la ZFP y la ZFB. Los sismos con hipocentro a mayor profundidad (> 30 km) presentaron el habitual patrón de bandas con orientación noroeste-sureste: los sismos con profundidades de entre 30 y 60 km (Fig. 2, color naranja) se ubicaron principalmente al noreste de la línea de costa Pacífica, desde Nicaragua hasta Panamá; los eventos con profundidades de entre 60 y 120 km (Fig. 2, color verde claro) ocurrieron a lo largo de la costa del Pacífico 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 bordeando el lago de Nicaragua.

Ocho sectores geográficos presentaron una sismicidad más alta que las regiones aledañas (Fig. 3). Estos “nidos” de sismicidad se ubican: 1) mar adentro al oeste de la península de Nicoya, 2) al sureste de la península de Nicoya, 3) al norte de la península de Burica, 4) en la intersección entre la ZFB y el CDSP, 5) en la parte central del arco volcánico de Guanacaste, 6) al sur y sureste de San José, 7) al noreste de Parismina en el mar Caribe, y 8) al sur de Sixaola, en el territorio continental de Panamá.

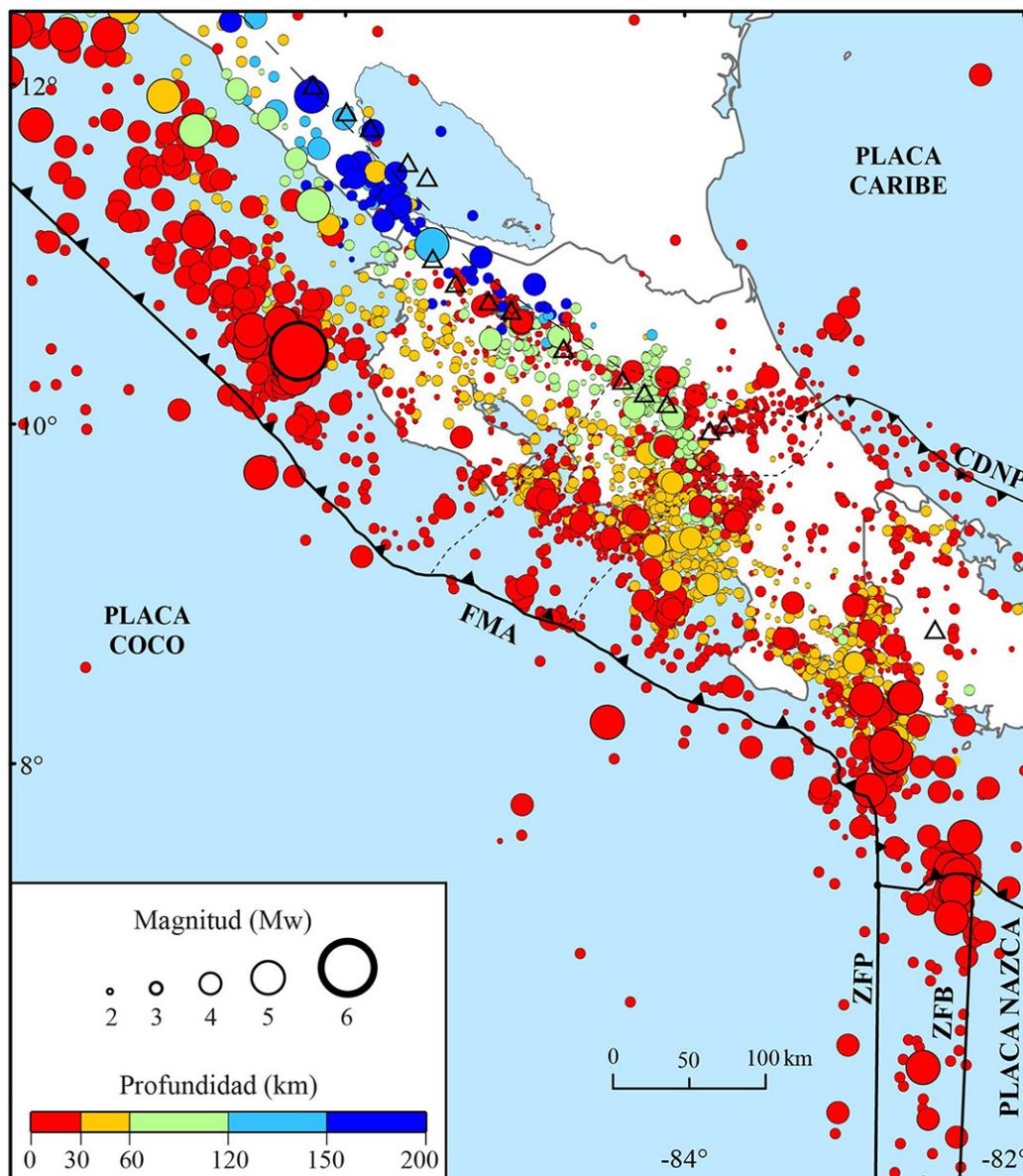


Fig. 2: Epicentros (círculos) de los sismos localizados por la RSN durante el año 2024 en la región de Costa Rica. El tamaño de los círculos muestra la relación con la magnitud momento (M_w) y su color la profundidad del hipocentro. Las abreviaturas son las mismas mencionadas en la Fig. 1.

En las zonas numeradas como 1, 2, 3, 5 y 6 de la Fig. 3, se localizaron entre 200 y 400 sismos y en las zonas 4, 7 y 8, entre 50 y 200. En el resto de las zonas del país, la sismicidad fue más baja, con menos de 50 sismos. La mayoría de los “nidos” de sismicidad tienen dimensiones menores a 25 km de diámetro, excepto las zonas numeradas como 5 y 6, ambas en el interior del país, en donde la cobertura de estaciones permite detectar sismos muy pequeños. Las tres zonas con alta sismicidad a lo largo del margen Pacífico (numeradas del 1 al 3) se caracterizan por tener dimensiones de solo 20-30 km de diámetro y

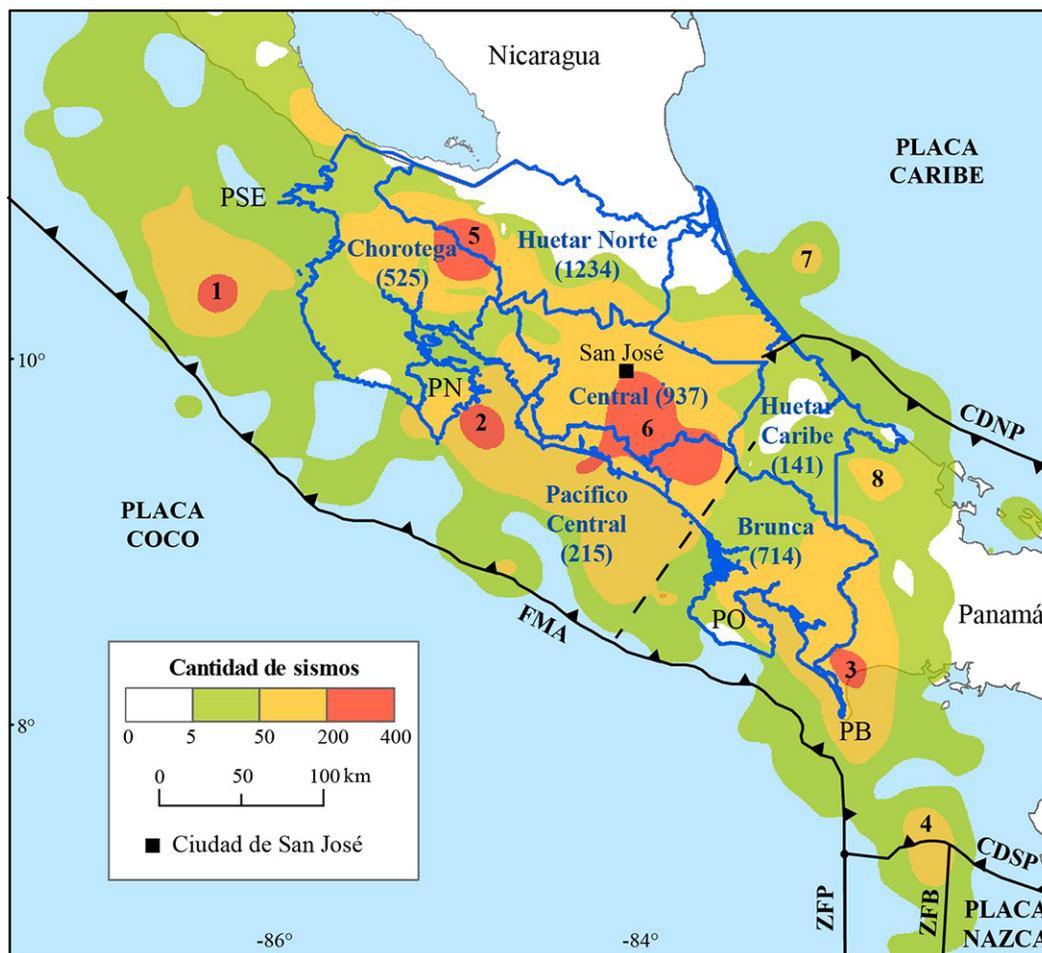


Fig. 3: Número de sismos localizados durante el año 2024 en zonas de 10 x10 km. Las zonas con la mayor cantidad de sismos se indican con los números del 1 al 8. Las líneas azules representan los límites continentales de las seis regiones socioeconómicas de Costa Rica (Mideplan, 2018) y los números entre paréntesis la cantidad de sismos en cada zona rotulada. La línea negra discontinua muestra el límite abrupto en la sismicidad mencionado en el texto. Las penínsulas de la costa Pacífica están rotuladas como: PB (Burica), PN (Nicoya), PO (Osa) y PSE (Santa Elena). Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son los mismos mostrados en la Fig. 1.

por presentar uno o varios sismos relevantes de hasta Mw 6,2 (Fig. 4) y sus respectivas secuencias de réplicas. La zona al sureste de la península de Burica, cerca de la ZFB (número 4), presentó varios sismos relevantes de Mw 4,9-5,9 (Fig. 4). En contraste, existen 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 hacia el Caribe sur (Figs. 2 y 3).

De los 5378 sismos localizados, 3766 (aproximadamente el ~68,2 %) tuvieron su epicentro dentro del territorio continental de Costa Rica. El resto de los sismos se localizaron en los océanos o en el territorio de Nicaragua y Panamá. Al analizar la distribución de los epicentros en relación con las seis regiones socioeconómicas de Costa Rica (Mideplan, 2018; Fig. 3), se observa que una zona entre las regiones

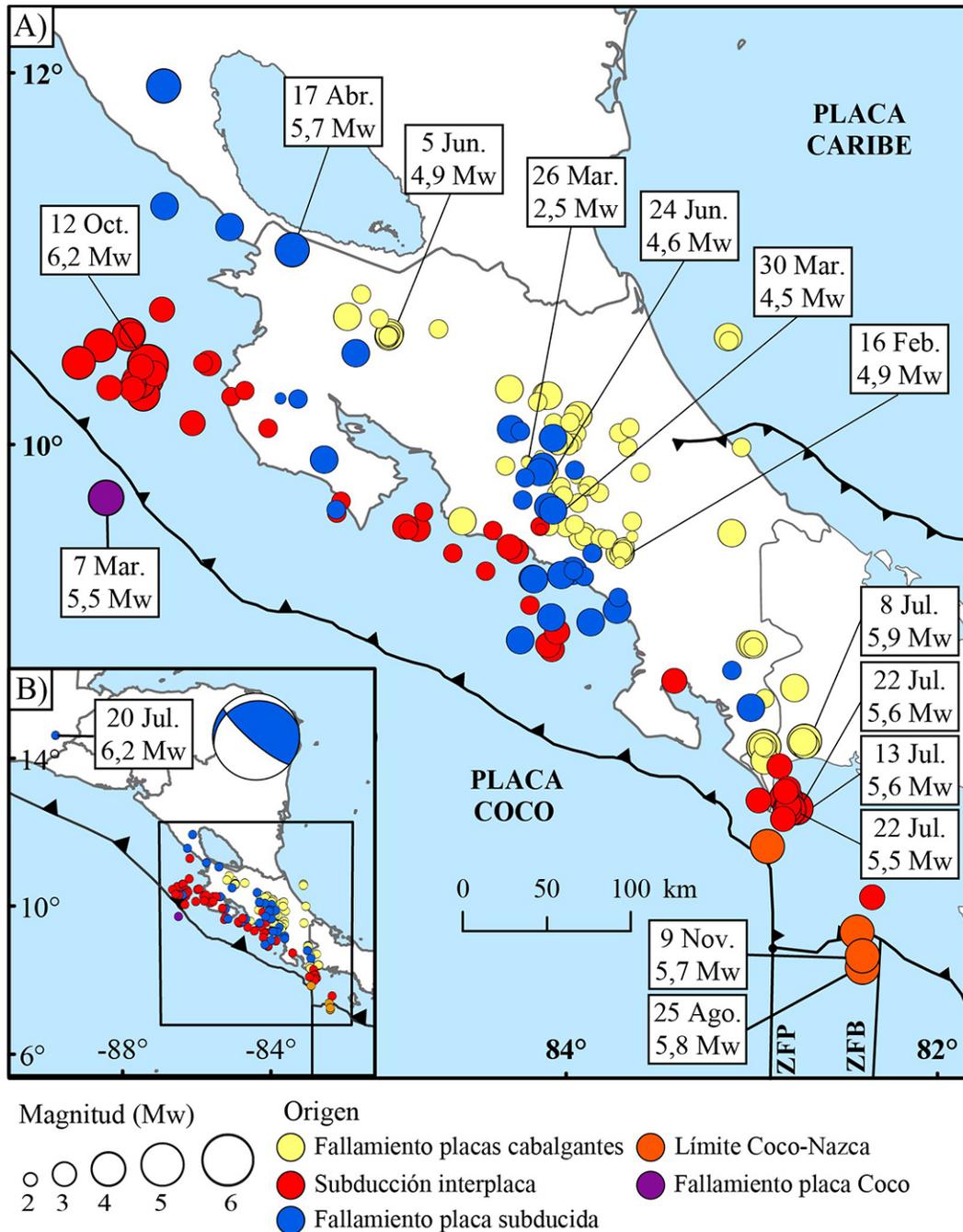


Fig. 4: Mapa de sismos sentidos en Costa Rica durante el 2024. Los eventos mencionados en el texto y en el Cuadro 1 se rotulan con su Mw entre paréntesis. El origen de los sismos se describe mediante el color de los círculos en la simbología. Los elementos tectónicos señalados con abreviaturas son explicados en la Fig. 1. A) Detalle de los epicentros de los sismos en la región de Costa Rica y zonas adyacentes. B) Mapa de epicentros a nivel centroamericano donde se muestra un sismo sentido en Costa Rica que tuvo su epicentro en Guatemala con su mecanismo focal.

Huetar Norte y Chorotega fue la sísmicamente más activa, con 1234 eventos, seguida de la región Central con 937 (ver Fig. 3). La alta cantidad de sismos entre las regiones Huetar Norte y Chorotega se explica principalmente por una vigorosa secuencia sísmica que tuvo lugar en junio en la cordillera volcánica de Guanacaste, durante la cual se registraron más de 469 eventos, destacando un sismo principal el 5 de junio con una magnitud de 4,9 (ver Fig. 4). Por otra parte, el resto de las regiones presentaron entre 141 y 714 eventos sísmicos.

Nuevamente, la sismicidad anual marca tendencias observadas en años previos. Los ocho nidos de sismicidad y las tendencias en la cantidad y distribución de la sismicidad, son similares a las documentadas en el año 2023 (Linkimer et al., 2024). Otra vez se observa con claridad el cambio abrupto en la cantidad de sismos a lo largo de un sector en el Pacífico con rumbo noreste-suroeste, desde la trinchera hasta el centro de Costa Rica (Fig. 3, línea punteada). Este claro límite en la sismicidad ocurre tanto en sismos de la zona interplacas, como en los sismos de la placa superior y dentro de la placa subducida. Esta particularidad de los epicentros ha sido documentada año tras año en los estudios anuales desde el 2016 (Arroyo et al., 2020; Linkimer, Arroyo y Arroyo, 2021; Linkimer, Fallas y Arroyo, 2022; Linkimer, Fallas y Arroyo, 2023; Linkimer, et al., 2024; Porras et al., 2017; Porras et al., 2018; Porras et al., 2019). Más aún, existen otros elementos llamativos de la sismicidad de Costa Rica visible en los años recientes, por ejemplo: la zona con baja sismicidad en el interior de la cordillera de Talamanca (Figs. 2 y 3, zona sin sismos en región Brunca y Huetar Caribe) y un grupo de sismos al noreste de Parismina (Fig. 3 número 7), en la placa Caribe.

Con respecto de la distribución espacial de los 204 sismos sentidos del año, la mayoría (88 sismos, 43 %) ocurrieron en la sección central del país (Fig. 4). El otro grupo importante de sismos sentidos (25 eventos) se localizó en la zona limítrofe con Panamá, alrededor de la península de Burica. Finalmente, 20 sismos se ubicaron en la zona de las provincias de Alajuela y Guanacaste, además de 19 sismos mar adentro al oeste de Tamarindo. Solo tres sismos sentidos tuvieron su epicentro en la costa caribeña (Fig. 4).

Distribución temporal

El mes con la mayor cantidad de sismos localizados fue junio con 928 eventos, lo que lo convierte en el mes con más sismos desde septiembre de 2012, cuando se registraron 962 sismos luego del terremoto de Nicoya. Después de junio, los meses con mayor actividad sísmica fueron octubre con 464 sismos y febrero con 432 (ver Fig. 5A). En contraste, diciembre fue el mes con menos sismos, con solo 339, seguido por septiembre y marzo, con 368 y 381 sismos, respectivamente. El promedio mensual de sismos localizados durante el año fue de 448.

En cuanto a la sismicidad percibida, febrero destacó como el mes con más sismos sentidos, con 30 eventos reportados. Le siguieron junio y julio, con 26 y 24 sismos sentidos, respectivamente. Por otro lado, abril fue el mes con la menor cantidad de sismos percibidos, con solo ocho. En general, el segundo semestre del 2024 fue más tranquilo para la población, ya que en agosto, septiembre, noviembre y diciembre se reportaron entre 10 y 17 sismos sentidos por mes (ver Fig. 6A). El promedio mensual de sismos sentidos en 2024 fue de 17.

Distribución por magnitud

Los dos sismos de mayor magnitud del año alcanzaron una M_w de 6,2. El primero de estos ocurrió el 20 de julio fuera del territorio costarricense, en Guatemala (Fig. 4B), y el segundo, el 12 de octubre mar adentro al oeste de Tamarindo en Guanacaste (Fig. 4A). Los siguientes sismos en importancia por su tamaño ocurrieron el 8 de julio con M_w 5,9 al suroeste de Chiriquí en Panamá (Fig. 4A) y el 25 de agosto con M_w 5,8 al oeste de la isla de Coiba, también en Panamá (Fig. 4A). A pesar de que estos cuatro sismos tuvieron una magnitud significativa, sus epicentros se ubicaron alejados de los centros de población costarricenses, por lo que fueron sentidos en el país con intensidades bajas.

Dentro del territorio costarricense, los sismos de mayor tamaño (Fig. 4A) fueron el ya mencionado al oeste de Tamarindo del 12 de octubre (M_w 6,2), y los sismos cerca de La Cruz de Guanacaste el 17 de abril (M_w 5,7), cerca de Rivas de Pérez Zeledón el 16 de febrero (M_w 4,9) y en Tierras Morenas de Tilarán el 5 de junio (M_w 4,9).

Del total de sismos localizados, 34 tuvieron una M_w entre 5,0 y 5,9, pero de estos solo 24 fueron sentidos (Figs. 5B y 6B), ya que el resto tuvieron su epicentro mar adentro y distante a la población. La mayoría de los sismos percibidos estuvo en el rango de M_w de entre 3,0 y 3,9, con 100 eventos (49 % del total de sentidos) y luego en el rango entre 4,0 y 4,9, con 72 (35 %, Fig. 6B). Con respecto a la cantidad de sismos localizados, la mayoría fueron pequeños, con $M_w < 2,9$ (53 %, Fig. 5B) y de estos solo 6 fueron percibidos (3 % del total de 204 sentidos) porque su epicentro se localizó muy cerca o dentro de las ciudades. El sismo sentido de menor M_w fue de 2,5 el 26 de marzo y se localizó en Piedades de Santa Ana, en la parte central del país (Fig. 4A).

Distribución por profundidad

De los sismos localizados, aproximadamente el 76 % tuvo su hipocentro a profundidades menores de 30 km (ver Fig. 5C). De estos sismos superficiales, 166 fueron percibidos, lo que representa el 81 % del total de eventos sentidos (Fig. 6C). En 2024, se registraron 452 sismos con profundidades entre 30 y 40 km (Fig. 5C), de los cuales 11 fueron reportados como sentidos (Fig. 6C). Además, hubo 841 sismos localizados a más de 40 km de profundidad (Fig. 5C), y de estos, solo 27 fueron percibidos (Fig. 6C).

El sismo más profundo registrado dentro del territorio costarricense ocurrió el 17 de abril en la región de La Cruz, cerca del límite con Nicaragua, a una profundidad de 150 km y con una M_w de 5,7 (Fig. 4A). Fuera de Costa Rica, el sismo más profundo sentido por la población costarricense fue el ocurrido en Guatemala, con una magnitud de 6,2 y una profundidad de 266 km (ver Fig. 4B).

Intensidades

En el año 2024, afortunadamente, no se observaron altas intensidades como consecuencia de los sismos. La máxima intensidad de V en la escala Mercalli Modificada (IMM) fue documentada para seis sismos, que en orden cronológico son los siguientes: Pérez Zeledón del 16 de febrero (M_w 4,9; Fig. 7A), Tilarán del 5 de junio (M_w 4,9; Fig. 7C), Chiriquí del 8 de julio (M_w 5,9; Fig. 7D), Burica del 13 de julio

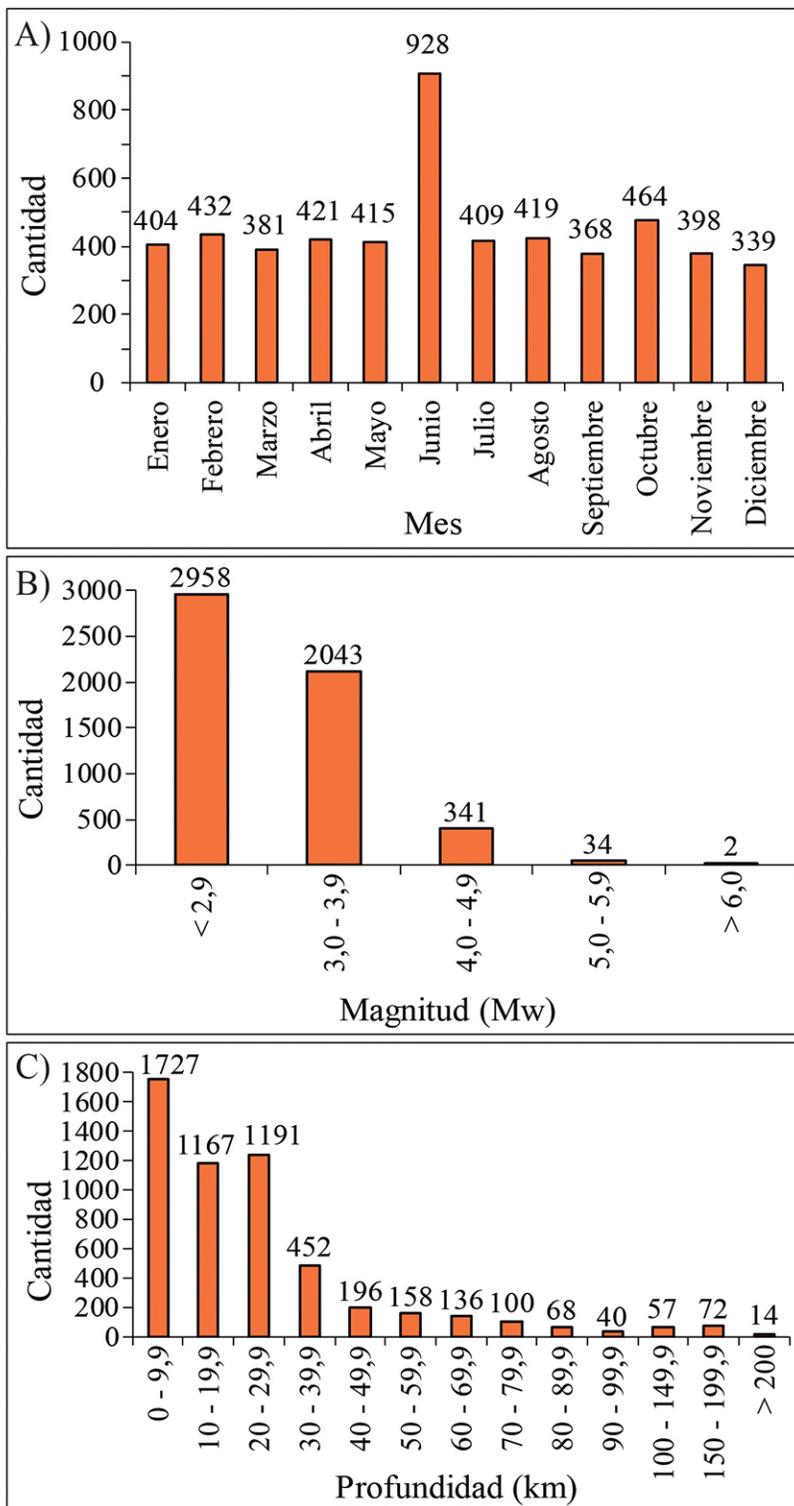


Fig. 5: Cantidad de sismos localizados por la RSN durante el 2024 (Fig. 2) de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw) y C) profundidad. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma.

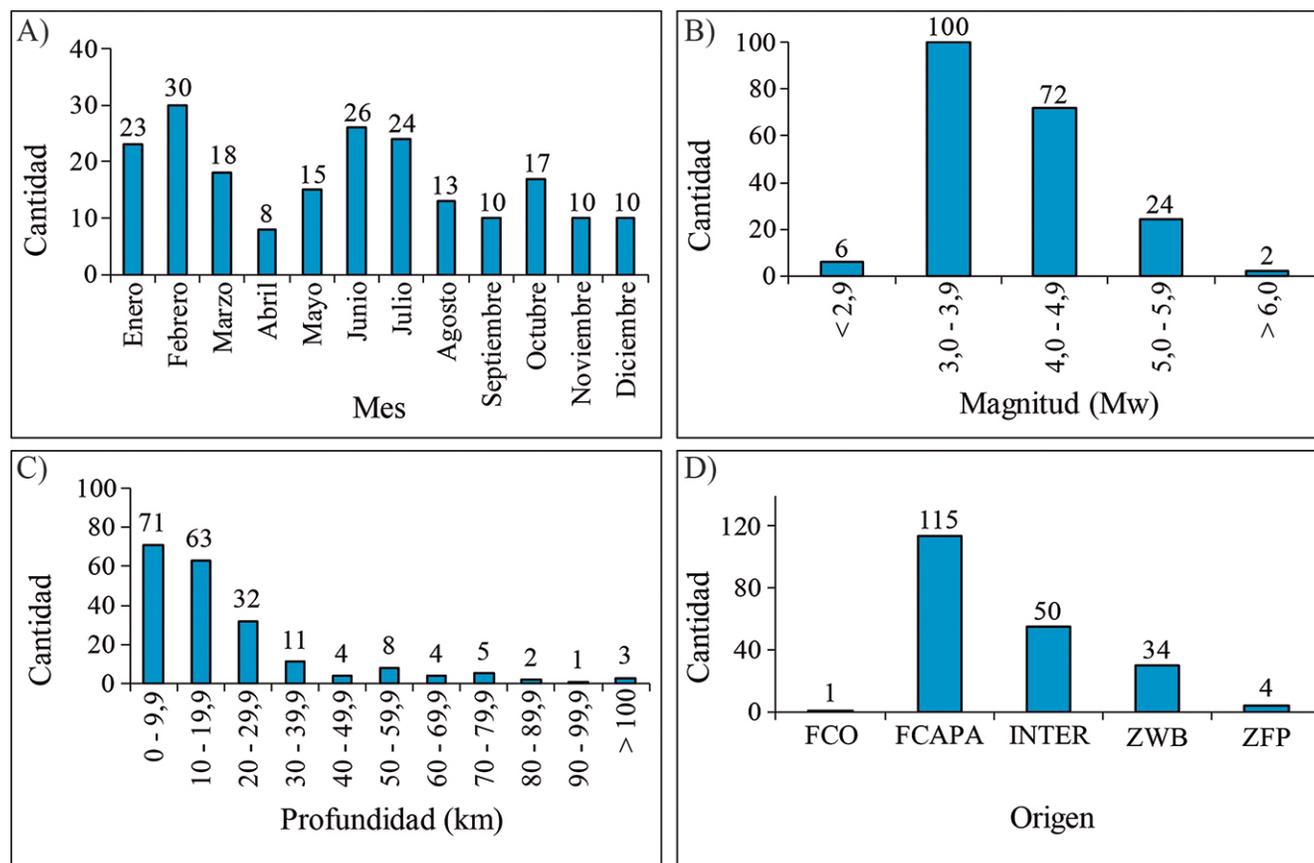


Fig. 6: Número de sentidos en el 2024 de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw), C) profundidad y D) origen. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma. El significado de las abreviaturas de la parte D es el siguiente: FCO fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, FCAPA fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá, INTER zona sismogénica de la subducción de las placas Coco y Nazca a lo largo del margen Pacífico, ZWB deformación interna de la placa Coco subducida a profundidades > 20 km y ZFPB zonas de fractura de Panamá y Balboa.

(Mw 5,6), Burica del 22 de julio (Mw 5,6) y Tamarindo del 12 de octubre (Mw 6,2). Desafortunadamente, no fue posible construir el mapa completo para los últimos tres sismos, pero sí se documentó una intensidad de V en las zonas más cercanas a los epicentros a través de las redes sociales y del módulo “¿Lo Sentiste?” de la RSN. Además, un sismo relevante por su gran área de percepción ocurrió el 17 de abril cerca de La Cruz de Guanacaste (Mw 5,7; Fig. 7B), el cual alcanzó intensidades máximas de IV en gran parte de las provincias de Guanacaste y Alajuela.

Para los sismos de Pérez Zeledón del 16 de febrero (Mw 4,9; Fig. 7A) y Tilarán del 5 de junio (Mw 4,9; Fig. 7C) se observó la intensidad V en un área reducida de menos de 20 km de diámetro cerca de los epicentros. Aunque ambos sismos provocaron alarma en la población debido a la gran cantidad de réplicas, ninguno de los dos eventos provocó daños o víctimas (Diario Extra, 2024; Sánchez, 2024).

Por su parte, el sismo de La Cruz (Mw 5,7; Fig. 7B), aunque tuvo intensidades máximas menores que las descritas anteriormente, provocó gran inquietud debido a que fue percibido con una intensidad IV en un área muy grande, de unos 150 km de radio alrededor del epicentro. Según reportes periodísticos

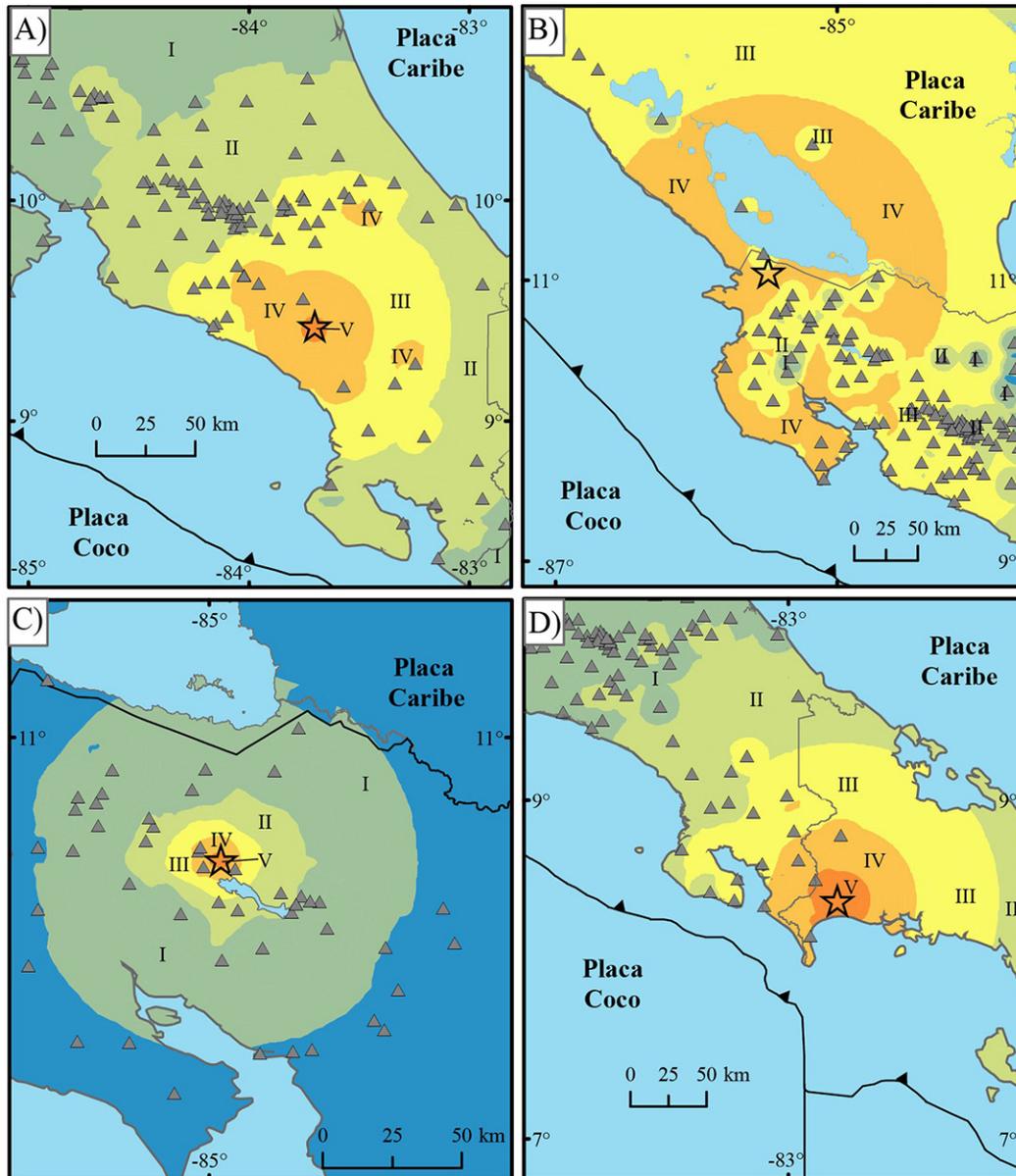


Fig. 7: Mapas de isosistas para cuatro sismos significativos del 2024. El epicentro de los sismos está representado por una estrella y las estaciones sismológicas usadas en cada caso por triángulos. Cada mapa muestra números romanos para identificar las zonas con distintos grados de la intensidad Mercalli Modificada. A) Sismo de Pérez Zeledón del 16 de febrero (Mw 4,9). B) Sismo de La Cruz del 17 de abril (Mw 5,7). C) Sismo de Tilarán del 5 de junio (Mw 4,9). D) Sismo de Chiriquí del 8 de julio (Mw 5,9).

(Fonseca, 2024), este sismo se sintió con fuerza en La Cruz, Carrillo, Santa Cruz, Liberia y Bagaces, aunque no se reportaron daños ni caída de objetos. Para este evento se recopiló la mayor cantidad de reportes de intensidad del año en el módulo "¿Lo sentiste?" de la RSN con 576 observaciones de intensidad.

En el caso del sismo de Chiriquí del 8 de julio (Mw 5,9; Fig. 7D), la intensidad V se observó en un área de 30 km de diámetro en territorio panameño, cerca de la ciudad de David, en la provincia de Chiriquí. En ese sector, se reportaron daños leves en el interior de algunos edificios (Swissinfo, 2024). En Costa Rica fue sentido con intensidad IV en la zona fronteriza sur con Panamá, pero no se reportaron daños.

El sismo de Tamarindo del 12 de octubre alcanzó la intensidad de V en Tamarindo y zonas costeras adyacentes, pero no se reportaron daños. También fue sentido con intensidad IV en la península de Nicoya. En algunos sectores del Valle Central y de Guápiles y San Carlos se reportaron las intensidades II y III. El sismo no fue sentido en el Caribe ni en la Zona Sur de Costa Rica (Madriral, 2024b).

Dos sismos de Mw 5,6 del 13 y 22 de julio, al oeste de la península de Burica, alcanzaron la intensidad V en dicha península y fueron percibidos principalmente en la zona sur de Costa Rica y oeste de Panamá. Para el sismo del 22 de julio llamó la atención un pequeño tsunami que fue reportado en el lado panameño de la península de Burica, el cual se presume fue ocasionado por un deslizamiento submarino (Madriral, 2024a).

Finalmente, dos sismos de baja magnitud cercanos a la ciudad de San José generaron alarma en la parte central del país. Estos fueron los sismos de León Cortés del 30 de marzo (Mw 4,5) y de Aserrí del 24 de junio (Mw 4,6; Fig. 4). Estos sismos fueron sentidos con intensidad de IV en la Gran Área Metropolitana y se recopilaron 564 y 541 reportes, respectivamente, a través del módulo "¿Lo sentiste?" de la RSN, siendo los dos sismos más reportados del año después del sismo de La Cruz descrito más arriba.

Energía sísmica

Por medio de la clásica ecuación $\log_{10} E = 11,8 + 1,5 M_w$ que relaciona la M_w con la energía sísmica (E) en ergios (1 ergio = 1×10^{-10} kJ) (Stein y Wysession, 2003), se calculó que el promedio de la energía sísmica liberada durante cada semana del año 2024 fue de $1,16 \times 10^{10}$ kJ, es decir, el equivalente a un sismo de Mw 5,5.

La semana del año con la mayor liberación de energía ($1,48 \times 10^{11}$ kJ) fue la del 8 al 15 de octubre (Fig. 8) cuando ocurrió el sismo de mayor Mw del año dentro del territorio costarricense al oeste de Tamarindo (Mw 6,2). La segunda semana con mayor liberación de energía fue la del 8 al 15 de julio ($3,28 \times 10^{10}$ kJ) en la que ocurrieron los sismos de Chiriquí del 8 de julio (Mw 5,9) y Burica del 13 de julio (Mw 5,6; Figs. 4 y 8). Otras cinco semanas del año presentan picos considerables de energía coincidentes con la ocurrencia de sismos con Mw de entre 5,5 y 5,9 (Fig. 8).

La sumatoria de la energía liberada por todos los sismos localizados en el 2024 en la región de Costa Rica mostrada en la figura 2 fue de $5,55 \times 10^{21}$ kJ, lo que equivale a un sismo de Mw 6,6. Este valor es igual al obtenido para el año 2023 (Linkimer et al., 2024), pero es mucho menor a los calculados para los años 2022 (Mw de 7,0; Linkimer et al., 2023) y 2021 (Mw 6,9; Linkimer et al., 2022).

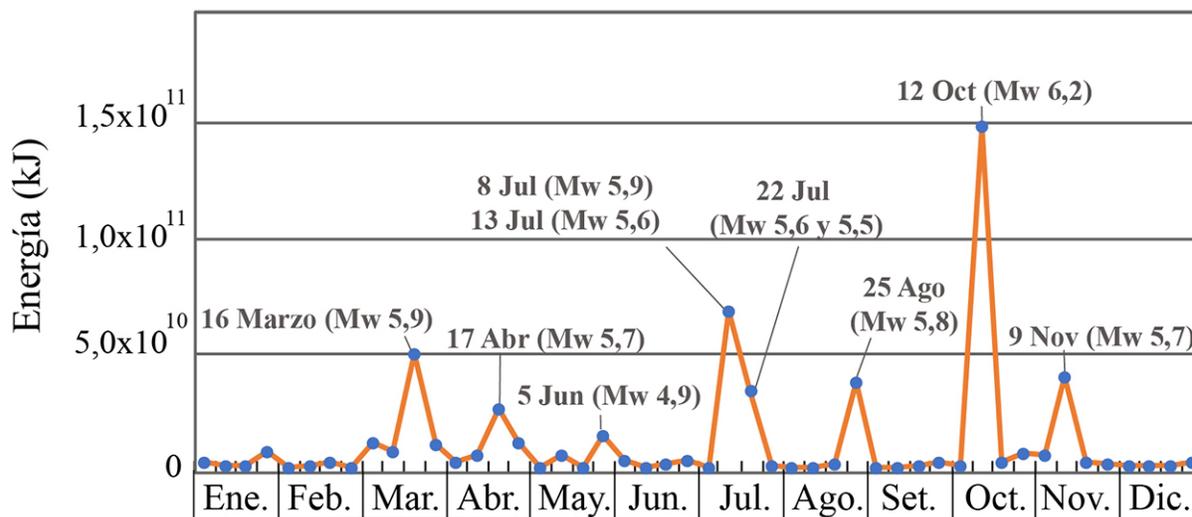


Fig. 8: Variación de la sumatoria de la energía sísmica semanal en kilojulios (kJ) liberada a lo largo del año 2024 usando la totalidad de la sismicidad mostrada en la Fig. 2. Se rotulan los sismos con mayor liberación de energía. El sismo del día 16 de marzo (hora local 6:44 pm) no fue sentido por la población debido a que se ubicó mar adentro de la costa del Pacífico de Nicaragua, muy lejos de los centros de población en Costa Rica; sin embargo, por su magnitud (Mw 5,9), sí contribuyó en la cantidad de energía liberada del año.

Origen de la sismicidad y mecanismos focales

El origen de los sismos sentidos del 2024 ha sido agrupado en cinco categorías (Figs. 4, 6D y 9). La mayoría (115 eventos, ~56 % del total) fueron ocasionados por fallas corticales (< 35 km) en las placas cabalgantes Caribe y Panamá, seguido por los sismos en la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco, en donde ocurrieron 50 eventos (24 %). La tercera categoría con más sismos es la deformación interna de la placa Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá, que incluye 34 (17 %). El cuarto tipo de origen es el asociado con el límite entre las placas Nazca y Coco, en donde se presentaron cuatro sismos sentidos (Fig. 6D). Finalmente, hubo un sismo que ocurrió en el fallamiento superficial de la placa del Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana.

En este trabajo se presentan 139 nuevos mecanismos focales calculados siguiendo el procedimiento descrito en la sección de metodología. Se incluyen, además, 13 mecanismos focales calculados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, s.f.). El conjunto de 152 mecanismos focales se muestran en las Figs. 4B y 9 y en el cuadro 1.

Un total de 23 mecanismos focales de tipo inverso u oblicuos con una alta componente inversa (color rojo, Figs. 4 y 9A) pueden ser asociados con la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco. Estos mecanismos se caracterizan por tener plano nodal inclinado mayoritariamente entre 25° y 50° hacia el noreste y que coincide con la zona de contacto entre las placas (Fig. 9A, Cuadro 1).

El sismo más grande del año al oeste de Tamarindo (Mw 6,2, número 135 en Fig. 9A) se originó en la zona sismogénica interplacas. Los epicentros de las réplicas de esta secuencia se distribuyeron en un área de 40 x 40 km al noreste de la fosa Mesoamericana, en donde inicia la subducción de la placa Coco

Cuadro 1

Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 (Figs. 4B y 9) 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, FCAPA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, FCO para el fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, 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.

#	Día-Mes	Hora Local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1	Plano nodal 2	Agencia
1	5-ene	21:19	4,4	72	ZWB	275/70/-90	95/20/-90	RSN
2	9-ene	08:56	3,3	10	FCAPA	255/68/-35	359/58/-154	RSN
3	9-ene	23:33	4,0	58	ZWB	295/81/-60	40/31/-163	RSN
4	10-ene	00:19	3,3	12	FCAPA	248/61/-24	351/69/-149	RSN
5	13-ene	11:50	4,2	23	INTER	105/50/90	285/40/90	RSN
6	13-ene	22:36	3,3	10	FCAPA	237/86/-34	330/56/-175	RSN
7	15-ene	12:13	3,7	15	FCAPA	83/90/10	353/80/-180	RSN
8	16-ene	17:06	4,4	36	ZWB	107/50/-4	200/87/-140	RSN
9	20-ene	08:38	4,6	36	ZWB	94/60/-19	194/73/-149	RSN
10	24-ene	12:11	4,3	32	ZWB	104/90/0	14/90/180	RSN
11	25-ene	17:50	4,7	51	ZWB	113/71/5	21/85/161	RSN
12	26-ene	06:37	3,7	50	ZWB	285/84/-35	19/56/-173	RSN
13	27-ene	23:55	5,0	71	ZWB	164/70/-2	255/88/-160	RSN
14	30-ene	05:50	3,9	23	INTER	71/46/70	278/48/109	RSN
15	31-ene	00:02	3,1	6	FCAPA	225/86/-4	315/86/-176	RSN
16	31-ene	00:05	2,9	5	FCAPA	225/71/30	124/62/158	RSN
17	31-ene	00:46	3,5	5	FCAPA	225/71/30	124/62/158	RSN
18	3-feb	03:24	3,1	13	FCAPA	90/46/90	270/44/90	RSN
19	3-feb	03:40	4,0	12	FCAPA	68/50/90	248/40/90	RSN
20	4-feb	18:49	4,0	14	FCAPA	98/54/90	278/36/90	RSN
21	4-feb	22:38	3,5	12	FCAPA	90/55/90	270/35/90	RSN
22	5-feb	08:30	3,9	5	FCAPA	227/90/15	137/75/-180	RSN
23	10-feb	01:28	4,8	22	INTER	291/42/67	141/52/109	RSN
24	10-feb	16:35	3,6	13	FCAPA	265/36/83	94/54/95	RSN
25	10-feb	17:53	3,3	15	FCAPA	27/76/-4	118/86/-165	RSN
26	11-feb	23:43	4,1	15	INTER	117/46/76	317/46/104	RSN
27	11-feb	23:55	4,4	32	ZWB	279/84/-1	9/89/-174	RSN
28	16-feb	02:01	4,1	80	ZWB	159/59/16	60/76/148	RSN
29	16-feb	19:10	4,0	16	FCAPA	31/57/-3	122/87/-147	RSN
30	16-feb	19:31	4,2	4	FCAPA	90/25/90	270/65/90	RSN
31	16-feb	20:29	4,9	16	FCAPA	34/67/20	296/71/156	RSN
32	16-feb	22:46	4,5	16	FCAPA	26/78/-9	118/81/-168	RSN

Cuadro 1 (continuación)

Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 (Figs. 4B y 9) 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, FCAPA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, FCO para el fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, 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.

#	Día-Mes	Hora Local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1	Plano nodal 2	Agencia
33	17-feb	02:24	4,4	4	FCAPA	66/17/69	268/74/96	RSN
34	17-feb	02:58	3,6	12	FCAPA	20/70/-2	111/88/-160	RSN
35	17-feb	06:59	4,0	17	FCAPA	29/66/18	291/73/155	RSN
36	20-feb	20:33	2,8	9	FCAPA	245/81/-4	335/86/-171	RSN
37	24-feb	04:11	3,9	6	FCAPA	64/80/3	333/87/170	RSN
38	27-feb	14:11	3,2	4	FCAPA	321/34/81	151/56/96	RSN
39	28-feb	16:55	4,3	29	INTER	150/65/90	330/25/90	RSN
40	3-mar	21:50	4,2	23	FCAPA	294/57/13	197/79/147	RSN
41	4-mar	18:51	3,5	6	FCAPA	192/74/46	86/46/157	RSN
42	4-mar	23:37	3,2	12	FCAPA	58/76/14	324/76/166	RSN
43	7-mar	02:20	5,5	22	FCO	312/46/-80	117/45/-100	USGS
44	8-mar	06:15	3,7	18	INTER	130/45/90	310/45/90	RSN
45	8-mar	13:38	3,6	15	FCAPA	7/51/-43	127/58/-132	RSN
46	9-mar	06:12	3,6	6	FCAPA	115/45/83	305/45/97	RSN
47	10-mar	05:53	3,7	76	ZWB	46/82/35	311/55/170	RSN
48	10-mar	21:47	5,2	22	INTER	327/21/115	120/71/81	USGS
49	13-mar	12:11	4,4	22	INTER	120/45/90	300/45/90	RSN
50	16-mar	07:54	3,6	25	FCAPA	277/46/-10	14/83/-135	RSN
51	21-mar	18:00	3,7	7	FCAPA	244/60/-19	343/73/-149	RSN
52	24-mar	12:57	3,7	37	INTER	120/75/90	300/15/90	RSN
53	30-mar	12:34	4,5	59	ZWB	321/60/-27	65/67/-147	RSN
54	30-mar	21:46	5,4	24	INTER	107/58/84	298/32/99	RSN
55	30-mar	21:50	4,8	24	INTER	97/57/83	290/33/101	RSN
56	6-abr	11:25	4,5	7	FCAPA	245/88/-10	336/80/-178	RSN
57	17-abr	15:21	5,7	150	ZWB	291/35/58	149/61/111	USGS
58	18-abr	04:59	3,7	31	FCAPA	256/68/-14	351/77/-157	RSN
59	19-abr	18:59	4,7	17	INTER	134/57/71	347/37/117	RSN
60	23-abr	08:14	4,1	26	ZWB	143/88/3	52/87/178	RSN
61	23-abr	19:20	5,4	11,5	ZFPBC	22/52/163	123/77/39	USGS
62	25-abr	16:05	3,6	17	FCAPA	46/76/49	301/43/160	RSN
63	2-may	14:14	3,9	72	ZWB	200/51/-86	14/39/-95	RSN
64	11-may	18:10	5,1	151	ZWB	291/43/43	167/63/124	RSN

Cuadro 1 (continuación)

Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 (Figs. 4B y 9) 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, FCAPA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, FCO para el fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, 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.

#	Día-Mes	Hora Local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1	Plano nodal 2	Agencia
65	15-may	08:27	3,3	9	FCAPA	95/64/79	299/28/112	RSN
66	18-may	10:09	4,0	20	INTER	119/41/90	299/49/90	RSN
67	18-may	11:20	3,2	6	FCAPA	359/38/-87	175/52/-93	RSN
68	19-may	11:31	3,7	15	FCAPA	204/71/-36	307/56/-157	RSN
69	23-may	09:02	3,5	9	FCAPA	253/42/37	134/67/125	RSN
70	24-may	16:45	3,7	15	FCAPA	83/46/35	328/66/130	RSN
71	25-may	02:54	3,9	9	FCAPA	160/30/90	340/60/90	RSN
72	25-may	14:11	5,4	10	FCAPA	150/45/90	330/45/90	RSN
73	25-may	22:37	4,8	10	FCAPA	332/32/86	156/58/92	RSN
74	1-jun	09:01	3,5	6	FCAPA	255/67/-11	349/80/-157	RSN
75	1-jun	14:32	4,5	58	ZWB	91/42/-31	205/70/-128	RSN
76	1-jun	17:25	3,5	5	FCAPA	263/81/3	172/87/171	RSN
77	3-jun	05:46	3,8	5	FCAPA	252/60/-19	352/73/-149	RSN
78	3-jun	06:36	3,5	5	FCAPA	265/87/4	175/86/177	RSN
79	4-jun	08:08	4,1	4	FCAPA	57/87/-15	148/75/-177	RSN
80	4-jun	14:28	3,8	6	FCAPA	251/86/15	160/76/176	RSN
81	4-jun	17:45	3,6	6	FCAPA	265/85/0	355/90/-175	RSN
82	4-jun	23:37	3,7	5	FCAPA	262/74/-12	355/79/-163	RSN
83	5-jun	00:08	4,4	5	FCAPA	245/83/-21	337/69/-173	RSN
84	5-jun	00:09	4,9	5	FCAPA	244/76/-6	336/84/-166	RSN
85	5-jun	02:57	3,7	5	FCAPA	226/71/-24	324/67/-160	RSN
86	5-jun	09:47	3,8	5	FCAPA	263/77/8	171/83/167	RSN
87	8-jun	00:46	4,1	5	FCAPA	258/77/-8	350/83/-167	RSN
88	8-jun	03:03	3,6	4	FCAPA	259/44/81	91/46/98	RSN
89	9-jun	05:42	3,5	6	FCAPA	265/87/4	175/86/177	RSN
90	13-jun	19:52	3,3	10	FCAPA	262/69/-13	356/78/-158	RSN
91	16-jun	13:15	4,1	68	ZWB	160/35/-12	260/83/-124	RSN
92	18-jun	16:05	3,4	5	FCAPA	255/85/-1	345/89/-175	RSN
93	18-jun	16:05	4,0	5	FCAPA	257/75/-13	351/77/-164	RSN
94	23-jun	20:19	3,8	19	ZWB	250/62/-48	8/49/-141	RSN
95	24-jun	16:48	4,6	9	FCAPA	253/89/-4	344/86/-179	RSN
96	24-jun	19:41	3,0	9	FCAPA	72/83/35	337/55/171	RSN

Cuadro 1 (continuación)

Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 (Figs. 4B y 9) 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, FCAPA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, FCO para el fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, 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.

#	Día-Mes	Hora Local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1	Plano nodal 2	Agencia
97	28-jun	10:10	3,1	8	FCAPA	66/87/35	334/55/177	RSN
98	8-jul	03:54	5,9	21	FCAPA	116/44/22	10/75/132	USGS
99	8-jul	06:31	5,0	20	FCAPA	92/67/-9	186/82/-156	RSN
100	8-jul	10:49	3,1	7	FCAPA	68/70/0	338/90/160	RSN
101	12-jul	03:36	4,3	17	FCAPA	61/87/-9	152/81/-177	RSN
102	13-jul	15:34	5,6	11	INTER	323/34/54	184/63/112	USGS
103	14-jul	01:54	3,4	9	FCAPA	221/70/-2	312/88/-160	RSN
104	14-jul	23:49	4,8	9	INTER	150/84/88	349/6/108	RSN
105	16-jul	06:53	3,8	53	ZWB	113/83/45	16/46/170	RSN
106	19-jul	22:02	3,9	20	INTER	120/65/90	300/25/90	RSN
107	20-jul	02:53	6,2	266	ZWB	256/19/37	131/79/105	USGS
108	22-jul	13:19	5,6	5	INTER	353/35/92	170/55/88	USGS
109	22-jul	14:17	5,5	1	INTER	329/31/78	163/59/97	USGS
110	23-jul	12:51	3,7	11	FCAPA	257/45/64	111/50/114	RSN
111	25-jul	04:48	3,6	40	INTER	150/40/90	330/50/90	RSN
112	27-jul	01:41	2,7	8	FCAPA	73/74/-20	169/71/-163	RSN
113	30-jul	20:07	3,8	32	ZWB	146/83/-17	238/73/-173	RSN
114	31-jul	21:21	4,1	62	ZWB	75/79/56	329/35/161	RSN
115	5-ago	10:04	3,8	21	INTER	94/50/82	286/40/99	RSN
116	8-ago	16:53	3,6	21	FCAPA	237/61/9	143/83/151	RSN
117	8-ago	18:58	3,9	71	ZWB	137/50/0	47/90/140	RSN
118	9-ago	09:48	4,2	19	INTER	305/58/83	138/33/101	RSN
119	11-ago	19:58	4,3	31	ZWB	293/80/-39	31/52/-168	RSN
120	15-ago	00:20	3,7	8	FCAPA	68/78/28	332/63/166	RSN
121	17-ago	03:30	3,6	16	FCAPA	223/83/-29	317/61/-172	RSN
122	17-ago	22:49	3,3	4	FCAPA	45/85/1	315/89/175	RSN
123	25-ago	23:08	5,8	30	ZFPBC	4/83/-163	272/73/-7	USGS
124	28-ago	03:35	3,8	23	FCAPA	170/21/-64	323/71/-100	RSN
125	9-Set	02:45	3,0	9	FCAPA	234/42/-17	337/79/-131	RSN
126	9-Set	05:33	2,7	8	FCAPA	253/73/-10	346/80/-163	RSN
127	12-Set	23:36	2,8	10	FCAPA	232/78/-28	328/63/-166	RSN
128	23-Set	22:30	4,1	48	ZWB	122/39/-13	222/82/-128	RSN

Cuadro 1 (continuación)

Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 (Figs. 4B y 9) 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, FCAPA para las fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá, FCO para el fallamiento en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, 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.

#	Día-Mes	Hora Local	Mw	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1	Plano nodal 2	Agencia
129	24-Set	16:14	4,4	9	FCAPA	125/40/90	305/50/90	RSN
130	26-Set	23:22	3,7	46	ZWB	240/61/-55	5/44/-136	RSN
131	7-oct	00:29	4,3	3	FCAPA	235/90/5	145/85/180	RSN
132	8-oct	11:37	3,5	9	FCAPA	86/46/76	286/46/104	RSN
133	11-oct	02:58	3,9	92	FCAPA	149/69/22	51/69/158	RSN
134	11-oct	20:24	4,4	21	FCAPA	5/36/-87	181/54/-92	RSN
135	12-oct	11:43	6,2	15	INTER	319/23/105	123/68/84	USGS
136	16-oct	08:29	4,5	69	ZWB	137/87/40	44/50/176	RSN
137	20-oct	12:19	3,9	10	FCAPA	273/35/81	103/55/96	RSN
138	9-nov	13:30	5,7	5	ZFPBC	354/76/143	94/54/17	USGS
139	11-nov	16:59	3,6	6	FCAPA	213/62/11	118/80/152	RSN
140	12-nov	07:42	4,1	40	ZWB	67/78/-54	173/38/-160	RSN
141	13-nov	14:39	3,7	10	FCAPA	74/77/-16	168/75/-167	RSN
142	19-nov	18:48	3,9	56	ZWB	106/90/70	16/20/180	RSN
143	20-nov	20:23	5,0	12	ZFPBC	168/88/144	259/54/2	USGS
144	23-nov	00:47	3,9	9	FCAPA	88/63/14	352/78/152	RSN
145	23-nov	01:27	4,4	12	FCAPA	270/82/24	176/67/171	RSN
146	3-dic	20:36	4,1	19	INTER	89/75/80	304/18/124	RSN
147	8-dic	09:07	3,1	6	FCAPA	235/84/-40	330/51/-172	RSN
148	11-dic	18:43	4,1	18	FCAPA	258/67/-59	22/37/-141	RSN
149	17-dic	15:54	3,8	60	ZWB	235/49/-7	330/85/-138	RSN
150	23-dic	02:42	4,2	11	FCAPA	247/37/45	118/65/118	RSN
151	25-dic	11:47	4,9	87	ZWB	212/55/84	42/35/99	RSN
152	29-dic	23:13	4,2	52	ZWB	72/82/-9	163/81/-172	RSN

bajo la placa Caribe. La profundidad de los sismos varió principalmente entre 10 y 30 km, coincidiendo con la zona de contacto entre las placas en ese sector. El sismo principal se localizó en el extremo noreste del conjunto de sismos por lo que se infiere que la ruptura ocurrió desde ese punto hacia la fosa Mesoamericana. Cabe destacar que la sismicidad del 2024 se encuentra fuera del área de réplicas del terremoto del 2012 (Linkimer et al., 2013) y a unos 100 km al noroeste del epicentro de ese terremoto.

Otros tres sismos al oeste de la península de Burica, con Mw entre 5,5 y 5,6 (números 102, 108 y 109 en Fig. 9A), poseen mecanismo focal inverso y coinciden con la zona sismogénica, que en este sector

tiene un rumbo nor-noreste. Estos sismos y sus réplicas abarcan en un área epicentral reducida de 10 x 6 km, a unos 25 km al noreste de la fosa Mesoamericana.

Por otro lado, 33 mecanismos focales pueden ser asociados con la deformación interna de la placa Coco (color azul, Figs. 4 y 9B). La mayoría de los planos nodales para estos eventos son de tipo transcurrente puro (42 %), seguidos por oblicuos con componente normal (29 %), oblicuos con componente inversa (17 %) y muy pocos eventos de tipo normal puro (6 %) o inverso puro (6 %). El evento de mayor tamaño dentro de esta categoría de origen se ubicó en Guatemala a una profundidad de 266 km (Fig. 4B), mientras que dentro de Costa Rica fue el sismo de La Cruz del 17 de abril (Mw 5,7) con una profundidad de 150 km y con un mecanismo focal oblicuo con una alta componente inversa (número 57 en Fig. 9B). Otro ejemplo es el sismo de León Cortés del 30 de marzo (Mw 4,5), con una profundidad de 59 km, que tuvo un mecanismo focal de tipo transcurrente, con un plano nodal de rumbo noroeste de tipo sinistral y un plano nodal de rumbo noreste de tipo dextral (número 53 en Fig. 9B). Esta configuración de rumbo y tipo de movimiento es opuesta a la que sucede para los sismos originados en las fallas de las placas superiores.

Se calcularon 91 mecanismos focales de sismos que están asociados con las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá (color amarillo en Figs. 4 y 9C). Los resultados muestran que durante el 2024 dentro el territorio continental de Costa Rica 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 (51 %) principalmente a lo largo del arco volcánico o en las estribaciones de la cordillera de Talamanca. En menor medida, se contabilizan sismos oblicuos con componente inversa (19 %), oblicuos con componente normal (15 %), inversos puros (12 %) y muy pocos de tipo normal puro (3 %).

Tres secuencias sísmicas importantes en las fallas de la placa superior sucedieron en fallas de desplazamiento de rumbo en Pérez Zeledón en febrero, Tilarán en junio y Aserrí en junio. El sismo principal de la secuencia en Pérez Zeledón sucedió el 16 de febrero con una Mw de 4,9 (Figs. 4 y 9C). El mecanismo focal determinado (número 31, Fig. 9C) y la distribución de 82 sismos relocalizados de la secuencia permite concluir que la falla que ocasionó la sismicidad es de tipo sinistral con orientación noreste-suroeste y con un ángulo de inclinación de 80 grados hacia el sureste y que la parte sismogénica de esta falla abarca profundidades de entre 12 y 17 km. Aunque los epicentros se encuentran muy cerca de las fallas Buenavista, Canaán y División identificadas previamente (Boschini et al., 1988; Mora y Peraldo, 2011; Montero, 2021), la localización de los epicentros de febrero y los mecanismos indican que ninguna de estas fallas cartografiadas anteriormente corresponde con el origen de la nueva sismicidad, sino que la secuencia sísmica ha ocurrido en una falla hasta ahora desconocida en la superficie.

La secuencia sísmica de Tilarán tuvo su sismo principal el 5 de junio (Mw 4,9; Fig. 4 y 9C). Del análisis realizado de 469 sismos de la secuencia y del mecanismo focal del sismo principal (número 84, Fig. 9C) y de sus réplicas, se concluye que el origen de los sismos corresponde con varios segmentos del sistema de fallas Chiripa, que transcurre en la zona del lago Arenal. Los epicentros ocurren en un área de 4,5 km de largo y 2 km de ancho, orientados en sentido norte-sur y coincidiendo con la intersección de dos segmentos de falla del mencionado sistema. Este fallamiento tiene alrededor de 30 km de longitud, con un rumbo que oscila entre norte y noroeste y se compone de fallas de tipo predominantemente transcurrente (Camacho, 2015; Montero et al., 1998).

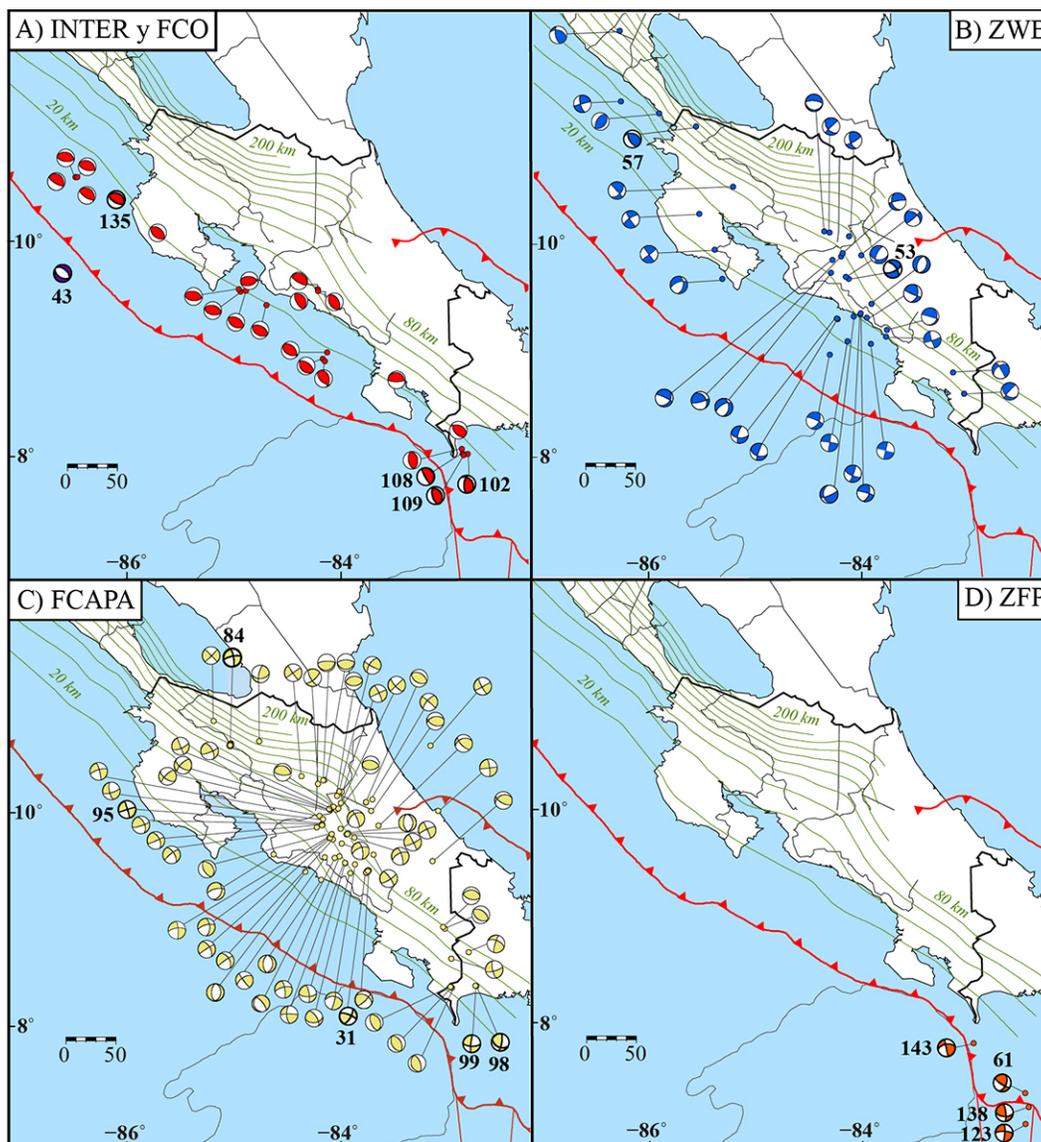


Fig. 9: Mecanismos focales de los sismos sentidos del 2024 de acuerdo con su origen. El color de los círculos (epicentros) y de los mecanismos focales indica el origen señalado en la simbología de la Fig. 4 y los números indican los mecanismos focales referidos en el texto y mostrados en el Cuadro 1. Se incluyen ciertos elementos tectónicos explicados en la Fig. 1 y, además, los contornos del techo de la losa cada 20 km de acuerdo con Lücke y Arroyo (2015). A) Sismos originados en la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco. Se incluye un sismo originado en el fallamiento superficial en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana (color morado). B) Sismos originados por la deformación interna de la placa Coco subducida a profundidades > 20 km. C) Sismos originados en las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá. D) Sismos originados en las zonas de fractura de Panamá y Balboa.

Por su parte, la secuencia de Aserrí tuvo un sismo principal el 24 de junio con una M_w 4,6; Fig. 4 y 9C). La ubicación de la sismicidad ocurre en una zona de 1 km de largo orientada hacia el noroeste y de forma paralela a la falla Aserrí, ubicada 5 km más al norte. Sin embargo, al igual que con la secuencia de Pérez Zeledón, la sismicidad no coincide con ninguna falla identificada en los estudios geológicos previos por lo que se concluye que su origen ocurre en una falla aún no descrita en la literatura. El mecanismo de la fuente del sismo principal (número 95, Fig. 9C) coincide con la tendencia de las réplicas e indica que esta falla es de un tipo dextral.

El sismo más grande originado en una falla de las placas superiores fue el del 8 de julio en la provincia de Chiriquí con M_w 5,9 (número 98, Fig. 9C). Este sismo y la réplica de mayor tamaño (M_w 5,0, número 99, Fig. 9C) muestran un mecanismo focal con un plano nodal de rumbo norte-sur, de tipo dextral y con componente inversa, que podría coincidir con la posible falla causante de la actividad, ya que el rumbo coincide con la tendencia regional de la orientación de las fallas en la zona limítrofe entre Costa Rica y Panamá.

Finalmente, cuatro mecanismos focales de M_w 5,0-5,8 pueden asociarse con el límite entre las placas Nazca y Coco (color naranja en Figs. 4 y 6D). Uno de estos mecanismos fue originado en la ZFP (número 143 en Fig. 9D) y tres en la ZFB (números 61, 123 y 138 en Fig. 9D). Estos cuatro mecanismos focales se caracterizan por tener un plano nodal de rumbo cercano al norte-sur de tipo dextral puro o con una componente inversa. Finalmente, un mecanismo focal de un sismo ubicado al suroeste de la fosa Mesoamericana es de tipo normal puro (número 43 en color morado en Fig. 9A) y está asociado con las fallas normales ubicadas en la zona del levantamiento (outer rise) en la placa Coco, que responden a la deformación previa a la subducción.

Conclusiones

Los mecanismos focales y las localizaciones de los sismos sentidos en Costa Rica durante el 2024 indican que su origen puede agruparse en cinco categorías: la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco, la deformación interna de la placa Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá, el fallamiento superficial (< 35 km) en las placas cabalgantes (Caribe y Panamá), el fallamiento asociado con el límite entre las placas Nazca y Coco y el fallamiento de la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana.

El sismo de mayor tamaño del año 2024 dentro del territorio de Costa Rica fue de M_w 6,2 al oeste de Tamarindo y fue originado por la subducción de la placa Coco. Sin embargo, el fallamiento superficial en las placas cabalgantes ocasionó la mayoría de los sismos sentidos (115). Los mecanismos focales de estos eventos demuestran que dentro del territorio continental de Costa Rica las fallas de desplazamiento de rumbo son las más comunes y las fallas normales las más escasas, y que, además, existe una alta diversidad en la orientación de los planos del fallamiento. Tres secuencias sísmicas en fallas de desplazamiento de rumbo sobresalieron en el 2024 en Pérez Zeledón, Aserrí y Tilarán, siendo esta última una de las secuencias con más sismos detectados en la historia de la RSN, con casi 500 sismos localizados en menos de un mes.

La distribución de la sismicidad del 2024 muestra nuevamente ocho sectores geográficos que resaltan por su sismicidad mayor en relación con las áreas circundantes. Esta distribución de la sismicidad, así

como el cambio abrupto en la cantidad de sismos a lo largo de un sector del margen Pacífico 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 más de una década.

Todos los sismos localizados en la región de Costa Rica durante el 2024 equivalen a la energía liberada por un sismo de Mw 6,6 ($\sim 5,55 \times 10^{21}$ kJ), un valor similar al del año 2023, pero muy por debajo del calculado para el 2021 y el 2022 (Mw 6,9-7,0). El año 2024 no tuvo sismos con intensidades altas, daños o víctimas. La IMM más alta fue de V y fue documentada para seis eventos en diversas zonas del país. Además, la intensidad de V fue observada solamente en zonas geográficas muy pequeñas, de menos de 30 km de diámetro alrededor de los epicentros.

Agradecimientos

Este artículo es 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 2024, especialmente a Jean Paul Calvo y Óscar Chavarría. Las siguientes personas colaboraron en la localización de sismos durante el 2024: Dra. María Cristina Araya y la Lic. María de los Ángeles Rodríguez y los asistentes de la UCR: Raquel Barrientos, Sonia Hajaji, Andrés Leandro, Alejandro Medina, Joselyn Ramírez, Julián Rodríguez y Luis Salas.

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., 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. <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.
- Boschini, L., I. M., Alvarado I., G. E., y Rojas Q., W. (1988). El terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón (julio 3, 1983): evidencia de una fuente sismogénica intraplaca desconocida en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 8, 111-121.
- Camacho, J., (2015). *Caracterización geofísica y neotectónica de la falla Cote-Arenal, Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- 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>
- Diario Extra. (6 de junio de 2024). Seguidilla de sismos en Tilarán alerta a expertos. *Diario Extra*. <https://www.diarioextra.com/noticia/seguidilla-de-sismos-en-tilaran-alerta-a-expertos>
- Gempa (2019). *SeisComp 3 Real time data acquisition and processing*. Gempa GmbH. Informe interno.
- Fonseca, H. (17 de abril de 2024). Fuerte sismo sentido en gran parte del país. *El Guardián*. <https://elguardian.cr/fuerte-sismo-sentido-en-gran-parte-del-pais/>
- 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.v0i66.50150>
- 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., Fallas, C., y Arroyo, I. G. (2024). Origen de los sismos sentidos en Costa Rica durante el año 2023. *Revista Geológica de América Central*, 70(1), 1-18. <https://doi.org/10.15517/rgac.2024.58439>
- 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>
- Linkimer, L., Arroyo, I., Mora, M., Vargas, A., Soto, G. J., Barquero, R., Rojas, W., Taylor, W., & Taylor, M. (2013). El terremoto de Sámara (Costa Rica) del 5 de setiembre del 2012 (Mw 7,6). *Revista geológica De América Central*, 49, 73–82. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i49.13104>
- 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>
- Madrigal, L. M. (24 de julio de 2024a). Deslizamiento submarino causó tsunami en Punta Burica el 22 de julio, confirma Sinamot. *Delfino.cr*. <https://delfino.cr/2024/07/deslizamiento-submarino-causo-tsunami-en-punta-burica-el-22-de-julio-confirma-sinamot>
- Madrigal, L. M. (12 de octubre de 2024b). Sismo con epicentro en Guanacaste sacude buena parte del país. *Delfino.cr*. <https://delfino.cr/2024/10/sismo-con-epicentro-en-guanacaste-sacude-buena-parte-del-pais>
- 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 División 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>
- Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G.E., Cowan, H., Machette, M., Haller, K., & Dart, R., (1998). *Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions*. USGS. Reporte preliminar.
- Mora, M. M., y Peraldo, G. (2011). Análisis macrosísmico del terremoto de buena vista de Pérez Zeledón, 3 de julio de 1983 (ms = 6,1), Costa Rica. *Revista geológica De América Central*, 44. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i44.3445>
- 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, 203-214. <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>
- Sánchez, S. (16 de febrero de 2024). Temblor de 4,8 grados en Pérez Zeledón. *La Nación*. <https://www.nacion.com/sucesos/seguridad/temblor-de-48-grados-en-perez-zeledon/4DF3TB5BCJANDKMWEYXZYP5K3I/story/>
- 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.
- Swissinfo. (08 de julio de 2024). Un sismo de 5,9 sacude la frontera entre Panamá y Costa Rica sin víctimas mortales. *Swissinfo*. <https://www.swissinfo.ch/spa/un-sismo-de-5,9-sacude-la-frontera-entre-panam-%C3%A1-y-costa-rica-sin-v%C3%ADctimas-mortales/83130790>
- United States Geological Survey (USGS). (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*. USGS Fact Sheet FS-087-03. USGS.
- Wald, D. J., Quidroni, 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>