

Estadística de la sismicidad del 2021 en Costa Rica

Statistics of the seismicity of 2021 in Costa Rica

Lepolt Linkimer *, Carolina Fallas e Ivonne G. Arroyo

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

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

(Recibido: 21/12/2021; aceptado: 21/01/2022)

RESUMEN: La Red Sismológica Nacional (RSN) localizó 3745 sismos locales durante el año 2021, lo cual es equivalente a la energía sísmica liberada por un evento de magnitud (M_w) 6.9. La sismicidad se localizó principalmente en siete zonas con 50-350 temblores. Hubo 209 sismos (~6% del total) sentidos por la población, incluyendo 31 con M_w entre 5.0 y 6.7. La mayoría de estos sismos fueron superficiales (~88% < 30 km), de magnitud baja (~52% M_w < 3.9) y fueron originados en fallas de las placas Caribe y Panamá (~69%). El sismo mayor del año, de M_w 6.7, se originó en la Zona de Fractura de Panamá, sin generar daños ni víctimas. Todos los sismos de $M_w \geq 5.5$ tuvieron sus epicentros mar adentro y alejados de centros de población por lo que no se reportaron intensidades altas.

Palabras clave: estadística sísmica; energía sísmica; intensidad sísmica; subducción; Zona de Fractura de Panamá.

ABSTRACT: The National Seismological Network (RSN) located 3745 local earthquakes during 2021, which is equivalent to the seismic energy released by an event of magnitude (M_w) 6.9. The seismicity was mainly located in seven zones with 50-350 earthquakes. There were 209 felt events (~6% of the totality), including 31 with M_w between 5.0 and 6.7. Most of these earthquakes were shallow (~88% < 30 km), had a low magnitude (~52% M_w < 3.9), and were originated in faults within the Caribbean and Panama plates (~69%). The largest earthquake of the year of M_w 6.7 originated in the Panama Fracture Zone, without causing damage or casualties. Because all the earthquakes with $M_w \geq 5.5$ were centered offshore and far from the population high intensities were not reported.

Keywords: earthquake statistics; seismic energy; seismic intensity; subduction; Panama Fracture Zone.



Introducción

La Red Sismológica Nacional (RSN) es un programa de investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR) que inició como una cooperación científica y técnica entre esa institución y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Una de las metas de la RSN es el registro continuo de la sismicidad en Costa Rica usando una red conjunta de estaciones sismológicas (Fig. 1) sostenida con personal de ambas instituciones (e.g., Linkimer, Arroyo, Alvarado, Arroyo y Bakkar, 2018).

Desde 1976, la RSN presenta anualmente una publicación resumiendo la sismicidad de cada año, la cual es útil para hacer referencia a los sismos significativos y a la estadística de la sismicidad. Al igual que durante el año 2020, en el 2021 la pandemia del COVID-19 añadió desafíos al mantenimiento de la red de instrumentos, pero a pesar de los obstáculos la RSN no interrumpió sus operaciones.

La sismicidad de Costa Rica es una de las más altas del planeta debido a la ubicación del territorio en una región donde se conectan cinco bloques tectónicos: las placas Coco, Caribe y Nazca, la microplaca de Panamá y el Bloque Antearco Centroamericano (Fig. 1). Los sismos son frecuentes en el margen Pacífico donde ocurre la subducción de la placa Coco, la cual inicia en la fosa Mesoamericana y ocurre a velocidades de 83-89 mm/año (DeMets, Gordon, Argus y Stein, 1994). La sismicidad también es abundante en la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), que corresponde con el límite entre las placas Coco y Nazca. Al norte de la ZFP se encuentra un punto triple, en donde se conectan las placas Coco y Nazca y la microplaca de Panamá. Adicionalmente, ocurren sismos en los límites de la microplaca de Panamá con la placa Caribe, a lo largo del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR; e.g., Marshall, Fisher y Gardner, 2000; Montero, 2001) y en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP, Adamek, Frohlich y Pennington, 1988). Finalmente, el Bloque Antearco Centroamericano en el norte de Costa Rica, se mueve hacia el noroeste con una velocidad de 11 mm/año a lo largo de las fallas del arco volcánico (Franco et al., 2012).

Aunque durante el 2021 hubo sismos de magnitudes relevantes, ninguno de los eventos se ubicó cerca de centros de población, por lo que estos sismos no resultaron en daños ni víctimas en Costa Rica. Esta situación ha sido favorable para el país, pues desde el inicio de la pandemia en marzo del 2020, ningún sismo ha sido destructivo y el país ha podido concentrar los esfuerzos en mitigar los estragos de la pandemia y no en atender las consecuencias de los terremotos.

Desde 1821, Costa Rica ha sido el escenario de 68 sismos destructivos (e.g., Montero, 1989; Peraldo y Montero, 1994; Linkimer y Alvarado, 2014). En presencia de esta amenaza sísmica es indispensable el estudio minucioso de la sismicidad para fortalecer los estudios de riesgo sísmico y la cultura de la preparación para enfrentar los terremotos. Como cada año entonces, se presenta esta publicación que contiene una estadística de la sismicidad en forma geográfica y temporal, así como por magnitud, profundidad y origen. Se presentan además cálculos de la energía sísmica liberada y las intensidades de los sismos más relevantes del 2021.

Metodología

Durante el año 2021, con el uso de 257 estaciones sismológicas (Fig. 1), la RSN detectó los sismos de la región costarricense. Del total de estas estaciones, 128 pertenecen a la UCR, 49 al ICE y 80 a otras entidades como el Ovsicori de la Universidad Nacional (14) y a agencias internacionales (66), por ejemplo la red de Chiriquí, la Universidad de Panamá y el Ineter de Nicaragua, quienes comparten sus estaciones directamente o a través del consorcio IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*). La red instrumental conjunta incluye 71 estaciones de banda ancha, 177 de periodo corto y 9 acelerógrafos.

La sede y centro de registro de la RSN se ubica en la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR, en donde se procesan los datos automáticamente a través de la siguiente metodología. Los sismos son detectados y asociados entre estaciones con programas incluidos en SeisComp3 (Gempa, 2019). En este primer paso, se producen localizaciones iniciales cuyos resultados son publicados durante los primeros dos o tres minutos del tiempo de origen del sismo en las plataformas de Facebook y Twitter y en la aplicación para teléfonos móviles “RSN” (e.g., Linkimer y Arroyo, 2020).

Posteriormente, se realiza la revisión de la localización inicial por parte de un analista entrenado en sismología y la publicación de la localización revisada, entre 5 y 20 minutos después del tiempo de origen. En este segundo paso, el análisis de

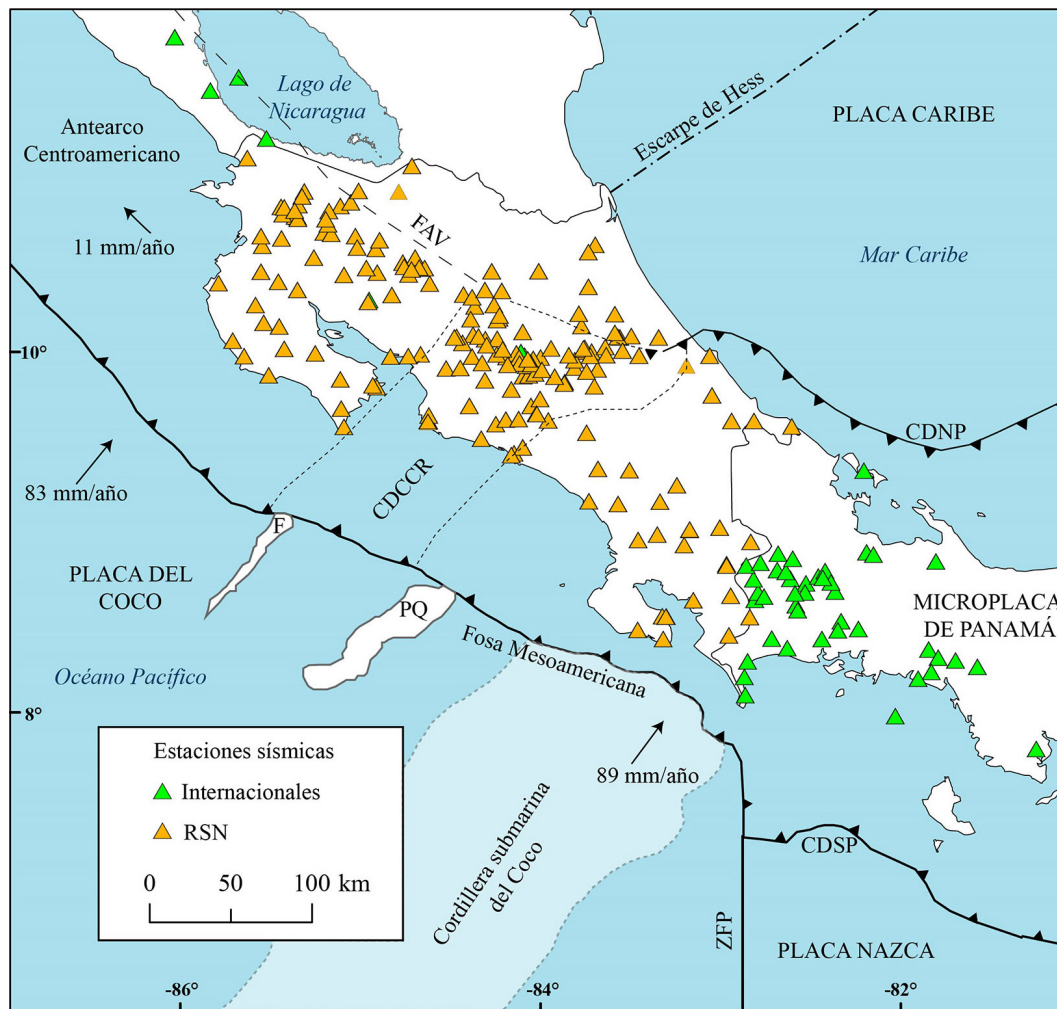


Fig. 1: Mapa de los principales rasgos tectónicos de Costa Rica y las estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) durante el año 2021. La región contenida dentro de la línea punteada representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). La línea discontinua representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV). Otros elementos tectónicos señalados son el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), el monte submarino Fisher (F), el plateau de Quepos (Q) y la Zona de Fractura de Panamá (ZFP).

los sismogramas, la localización y el cálculo de la magnitud momento (M_w) se llevan a cabo usando los programas Mulplt y Hyp (Lienert y Havskov, 1995) integrados en el software sismológico Seisan (Havskov, Voss y Ottemöller, 2020). Para las lecturas de los sismogramas se sigue un esquema de pesos dependiendo de la claridad de los arribos y para la localización de sismos se utiliza un modelo de velocidades de la onda primaria basado en Matumoto, Ohtake, Latham y Umana (1977) y una razón de velocidades (V_p/V_s) de 1,75.

El objetivo de este segundo paso es confirmar y corregir, si fuera necesario, los datos publicados inicialmente. La publicación de cada sismo revisado se realiza en la página web de la RSN, en la aplicación móvil y en las redes sociales mencionadas previamente (e.g., Linkimer y Arroyo, 2020). En el presente trabajo se analizan justamente estas localizaciones revisadas para los sismos del año 2021 ubicados en el territorio de Costa Rica y en las zonas limítrofes (Fig. 2).

El tercer paso es la determinación del origen de los sismos más relevantes. Para esto se calcula el mecanismo focal mediante la determinación de la polaridad del primer arribo de la onda P usando el programa Focmec (Snoke, 1984). Considerando la ubicación epicentral, la profundidad del hipocentro, la solución de los planos nodales del mecanismo focal y la ubicación

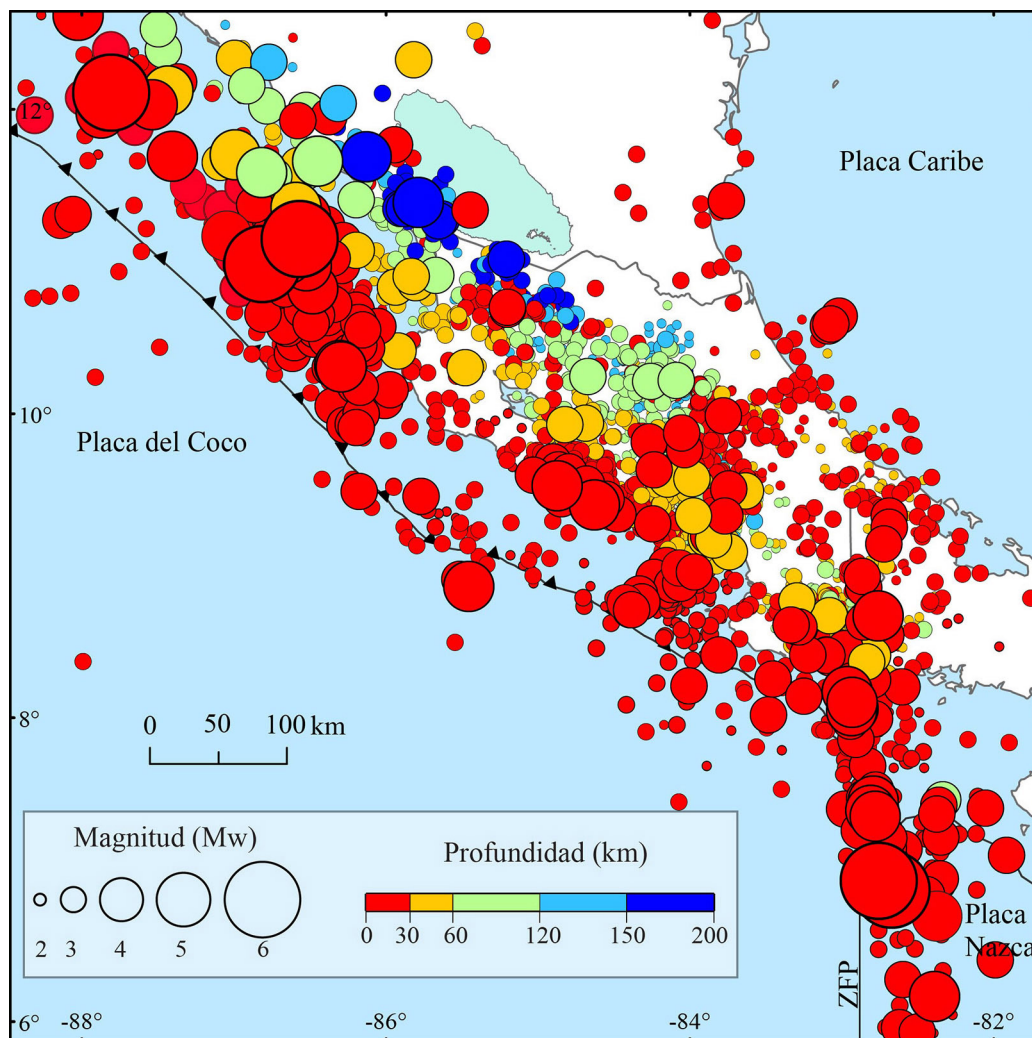


Fig. 2: Epicentros (círculos) de los sismos localizados por la RSN durante el año 2021 en la región de Costa Rica. El tamaño de los círculos es relativo a la magnitud momento (M_w) y su color se muestra de acuerdo con la profundidad de los eventos sísmicos.

de los límites de placas, de las fallas corticales (e.g. Denyer, Montero y Alvarado, 2003), de la zona sismogénica interplacas del margen Pacífico (e.g. DeShon et al., 2006; Arroyo, Husen y Flueh, 2014; Arroyo y Linkimer, 2021) 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 sismo 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), fallamiento en la placa Coco subducida a profundidades mayores a 40 km (o Zona de Wadati-Benioff, ZWB) y Zona de Fractura de Panamá (ZFP).

El cuarto y último paso es el cálculo de la intensidad en la escala Mercalli Modificada (IMM), que se ejecuta en forma rutinaria a partir de un cuestionario de 12 preguntas, llamado “¿Lo sentiste?”, el cual se basa en uno similar del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Atkinson y Wald, 2007; Wald, Quitoriano, Worden, Hopper y Dewey, 2011). Al mismo tiempo, se determinan intensidades a partir de los registros instrumentales de las estaciones sismológicas usando el software ShakeMap (Wald, Wald, Worden y Goltz, 2003), el cual utiliza un modelo de predicción del movimiento de suelo (Zhao et al., 2006) y uno de intensidad (Wald et al., 1999). Los mapas de isosistas que se presentan en este trabajo fueron dibujados a partir de las intensidades recopiladas por los medios mencionados en ese cuarto paso.

Estadística de la sismicidad

En el año 2021, la RSN localizó 3950 eventos sísmicos, cantidad que incluye los sismos ubicados en el territorio de Costa Rica (sismos locales), algunos ubicados en América Central (regionales) y otros originados a más de 10 grados de distancia (telesismos). Del total de sismos localizados, 3745 fueron sismos locales (Fig. 2) y, de estos, 209 (~6 %) fueron reportados como percibidos por la población (Fig. 3). El promedio de los sismos locales localizados y sentidos durante la última década es de 3768 y 231, respectivamente, por lo que comparativamente el año 2021 se puede caracterizar como uno de sismicidad habitual. Las cantidades anuales durante la última década han variado entre 2261 y 6836 sismos locales y 168 y 285 sismos sentidos.

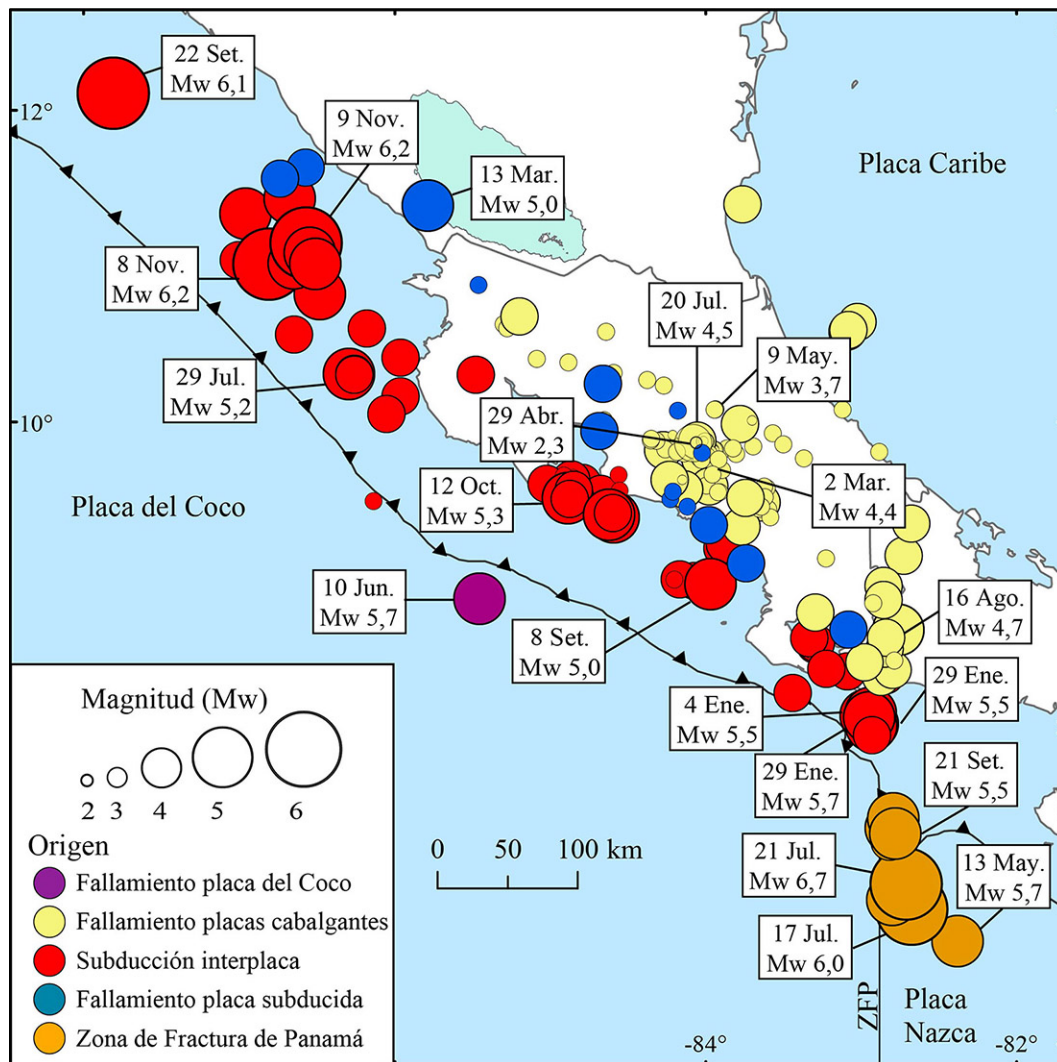


Fig. 3: Mapa epicentral de los sismos sentidos en Costa Rica durante el 2021. Los sismos sentidos más relevantes se señalan con su Mw. El origen de los sismos se indica mediante el color de los círculos: morado corresponde con el fallamiento superficial en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, amarillo se refiere a las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá, rojo se refiere a la zona sísmogénica de la subducción de la placa Coco a lo largo del margen Pacífico, azul es la Zona de Wadati-Benioff (fallamiento debido a la deformación interna de la placa Coco subducida a profundidades > 40 km) y naranja es la Zona de Fractura de Panamá.

Distribución geográfica

El análisis de la distribución geográfica de los sismos del 2021 se realiza en este estudio a partir de los mapas epicentrales (Fig. 2 y 3), la cantidad de sismos por área (Fig. 4) y por franjas del margen Pacífico costarricense (Fig. 5). Los epicentros cubren casi la totalidad del territorio con excepción de la zona noreste que limita con Nicaragua y porciones de la cordillera de Talamanca cerca de la frontera con Panamá (Fig. 2).

Los sismos superficiales (< 30 km, Fig. 2, color rojo) ocurrieron en todas las regiones del país. En términos generales, los sismos de profundidades mayores (> 30 km) se observan en el mapa como bandas de rumbo noroeste-sureste, paralelas a la fosa Mesoamericana: los sismos de profundidades entre 30 y 60 km (Fig. 2, color naranja) se presentaron al noreste de la costa Pacífica desde Nicaragua hasta Panamá; los sismos de profundidades entre 60 y 120 km (Fig. 2, color verde claro) ocurrieron especialmente desde Nicaragua hasta la parte Central del país y algunos pocos en la zona sur. Los sismos entre 120 y 150 km (Fig. 2, color celeste) ocurrieron al noreste del arco volcánico activo y los eventos entre 150 km y 200 km (Fig. 2, color azul) únicamente al noreste de los volcanes de Guanacaste, en la zona limítrofe con Nicaragua.

Durante el año 2021 hubo siete zonas de Costa Rica que geográficamente presentaron una cantidad de sismos mayor a la de las zonas aledañas. Estos sectores son los siguientes (Fig. 4): zona mar adentro del noroeste de la península de Nicoya (Fig. 4, sector 1), zona central del arco volcánico de Guanacaste (Fig. 4, sector 2), zona al sureste de la península de Nicoya (Fig. 4, sector 3), zona al sur de San José (Fig. 4, sector 4), zona al oeste de la península de Osa (Fig. 4, sector 5), gGolfo Dulce (Fig. 4, sector 6) y zona norte de la península de Burica (Fig. 4, sector 7). En todas estas zonas se presentaron entre 50 y 350 sismos. Las zonas 1 y 2, con entre 50 y 100 sismos, se destacan por estar rodeadas de menor actividad. El resto de los sectores numerados entre 3 y 7, presentaron entre 100 y 350 eventos, siendo las zonas 3 y 4, en la parte central del país, las que poseen las mayores dimensiones, con alrededor de 50 km de diámetro (Fig. 4).

Todas las zonas de alta sismicidad a lo largo del margen Pacífico (números 1, 3, 5, 6 y 7) presentaron uno o varios sismos relevantes de $M_w \geq 4,9$ (Fig. 3) y sus respectivas secuencias de réplicas. Las dos zonas en el interior del territorio continental (números 2 y 4) presentaron alta sismicidad pero caracterizada por sismos de magnitudes bajas ($M_w \leq 4,5$). Las zonas con menor sismicidad, por su parte, fueron la península de Nicoya, un sector de la península de Osa y de Talamanca, la Zona Norte y partes del Caribe, en donde se presentaron únicamente entre 1 y 15 eventos (Fig. 2 y 4).

El mapa de la cantidad de sismos por área del año 2021 (Fig. 4) es casi idéntico al del año 2020 (Linkimer, Arroyo y Arroyo, 2021). Además, existen patrones particulares en los mapas de la sismicidad de los años 2021 y 2020 que también se observan claramente en los años previos, en los que la cobertura de estaciones de la RSN también ha sido óptima a nivel nacional. Por ejemplo, en los mapas publicados para los años 2016 (Porrás et al., 2017), 2017 (Porrás et al., 2018), 2018 (Porrás et al., 2019) y 2019 (Arroyo, Linkimer y Arroyo, 2020), se nota un límite abrupto entre zonas de sismicidad alta y baja, con rumbo noreste-suroeste, desde la trinchera hasta el centro de Costa Rica, que ocurre tanto en sismos de la zona interplaca, como en los sismos de la placa superior y dentro de la placa subducida. En la Fig. 4, este límite abrupto de sismicidad corresponde con la terminación hacia el este de las zonas 4 y 5. Otras marcas llamativas de la sismicidad de los últimos seis años son una zona de muy baja sismicidad en el interior de la cordillera de Talamanca (Fig. 4, región al norte de la zona 6) y un grupo de sismos al noreste de Parismina, en la placa Caribe, que siempre está presente en los mapas anuales de epicentros.

Cuando se examina la sismicidad localizada en Costa Rica en franjas perpendiculares a la fosa Mesoamericana (Fig. 5), se nota que la mayor actividad sísmica corresponde con el Pacífico Central y la región central del país (Fig. 5, zona C), en donde se contabilizaron 1943 sismos. En esta zona ocurrieron tres sismos de M_w 5,1-5,3 cerca de Jacó (Fig. 3) y sus réplicas, además de la alta actividad de sismos de baja magnitud en el interior del territorio continental, especialmente al sur de San José. En contraste, la cantidad de sismos en el resto de zonas es mucho más baja, entre 91 y 459 eventos.

La franja que incluye la península de Osa (Fig. 5, zona D), que tuvo 459 sismos, es interesante pues la sismicidad es muy baja en la bahía de Coronado y la cordillera de Talamanca, pero es alta en el golfo Dulce y la zona sureste del límite político con Panamá.

En la península de Burica (Fig. 5, zona E) se contabilizaron 377 sismos. Aquí tuvo lugar la intensa actividad del mes de enero, cuyo sismo más relevante ocurrió el día 29 de ese mes (M_w 5,7; Fig. 3). La zona del golfo de Papagayo y la costa Pacífica del sur de Nicaragua (Fig. 5, zona A) tuvo 361 sismos, incluyendo los dos eventos de M_w 6,2 del mes de noviembre (Fig. 3). La franja que incluye la mayor parte de Guanacaste y la Zona Norte de Costa Rica (zona B) tuvo 345 sismos, sin que

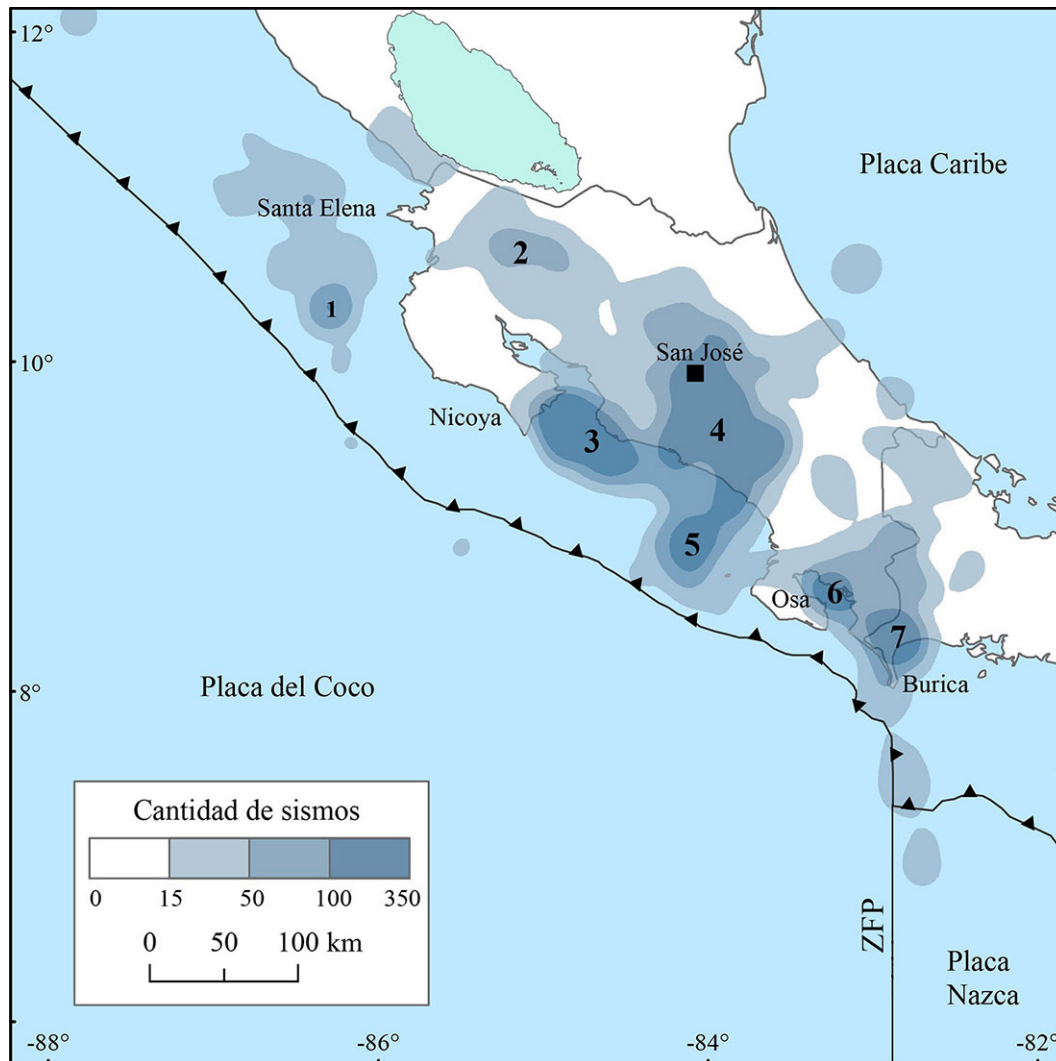


Fig. 4: Cantidad de sismos registrados por la RSN en Costa Rica durante el año 2021 en zonas de 10 x10 km. Las zonas rotuladas con los números del 1 al 7 son mencionadas en el texto. Las penínsulas más sobresalientes del margen Pacífico están rotuladas.

ninguno de estos fuera significativo por su tamaño. Finalmente, en el sector que incluye la ZFP (Fig. 5, zona F), aunque solo fue posible localizar 91 eventos por la lejanía con respecto de la red instrumental, es allí donde ocurrió el sismo más relevante del año, el 21 de julio con Mw 6,7 y otros tres eventos importantes con Mw de 5,5, 5,7 y 6,0 (Fig. 3).

Distribución temporal

El mes con la mayor cantidad de sismos localizados fue mayo, con 360. Otros cuatro meses presentaron una cantidad ligeramente menor y estos fueron octubre (358), abril (354), junio (350) y julio (348). En el otro extremo se encuentra el mes de agosto, que tuvo la menor cantidad de sismos localizados, con 212 (Fig. 6A). Los demás meses tuvieron una cantidad de sismos que varió entre 285 y 328 (Fig. 6A). El promedio mensual de sismos localizados fue de 312.

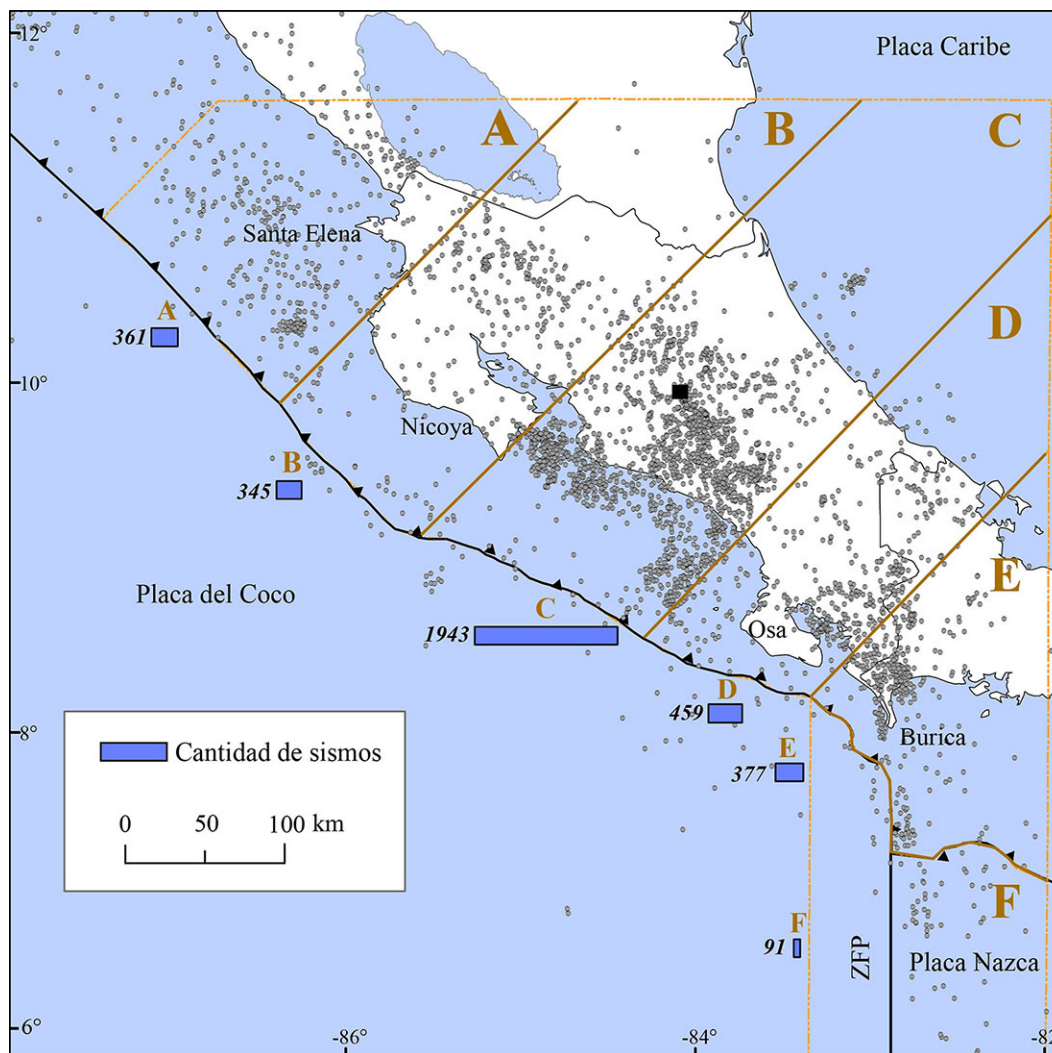


Fig. 5: Cantidad de sismos localizados durante el año 2021 a lo largo del margen convergente costarricense, separados en franjas rotuladas con las letras de la A a la F. Las penínsulas más sobresalientes del margen Pacífico están rotuladas. El cuadro negro representa la ciudad de San José.

Con respecto de la sismicidad percibida, julio fue claramente el mes con más sismos, con un total de 33, seguido por enero con 23. Por otro lado, el mes de diciembre tuvo únicamente siete sismos reportados como sentidos (Fig. 7). Los meses restantes tuvieron entre 13 y 21 eventos percibidos (Fig. 5A) y el promedio mensual para el año 2021 fue de 17.

Distribución por magnitud

El sismo de mayor M_w del año fue de 6,7 y ocurrió el 21 de julio (Fig. 3) 113 km al sur de punta Burica. Durante el 2021 se localizaron cinco sismos con M_w 6,0-6,7 y 37 con M_w 5,0-5,7. (Fig. 6B). Del total de 42 sismos con $M_w \geq 5,0$, hubo 31 que fueron sentidos, estos fueron los cinco eventos con $M_w \geq 6,0$ y 26 con M_w entre 5,0 y 5,7 (Fig. 6B).

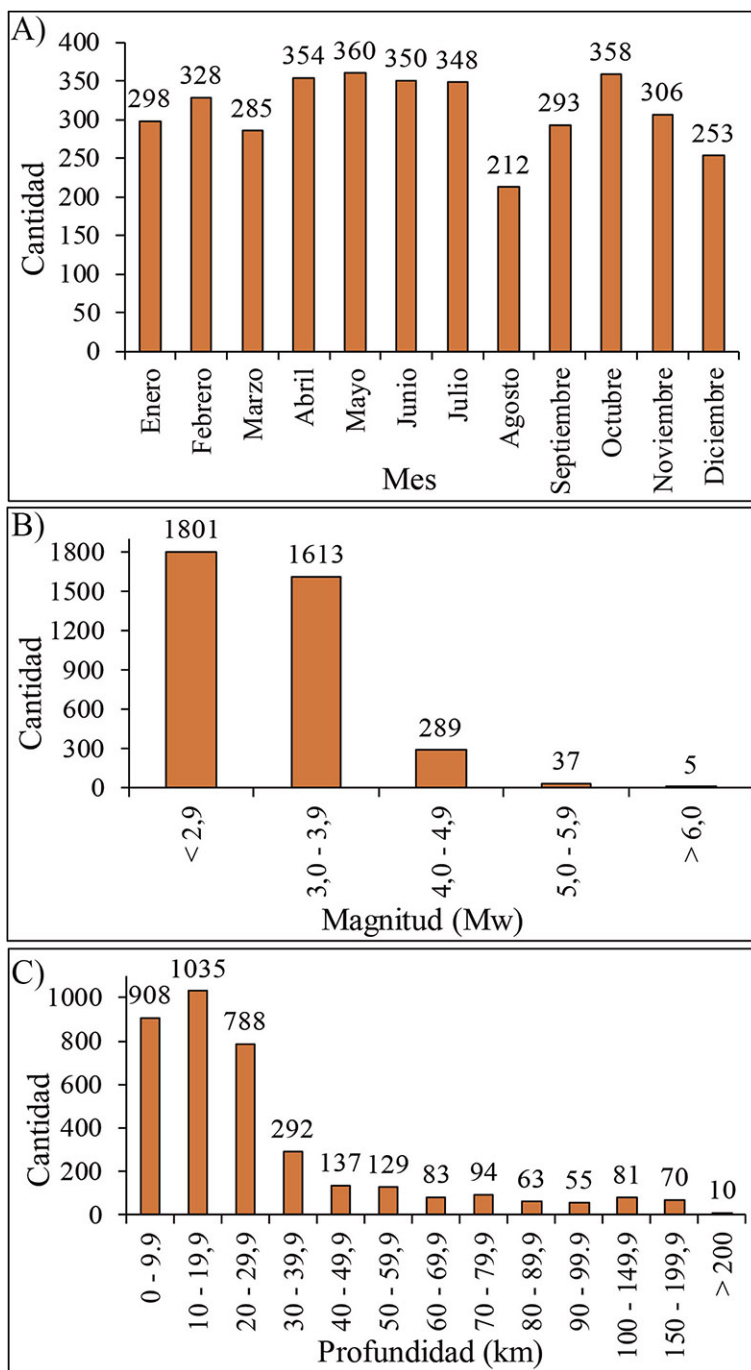


Fig. 6: Distribución de los sismos locales del 2021 de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw) y C) profundidad. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma.

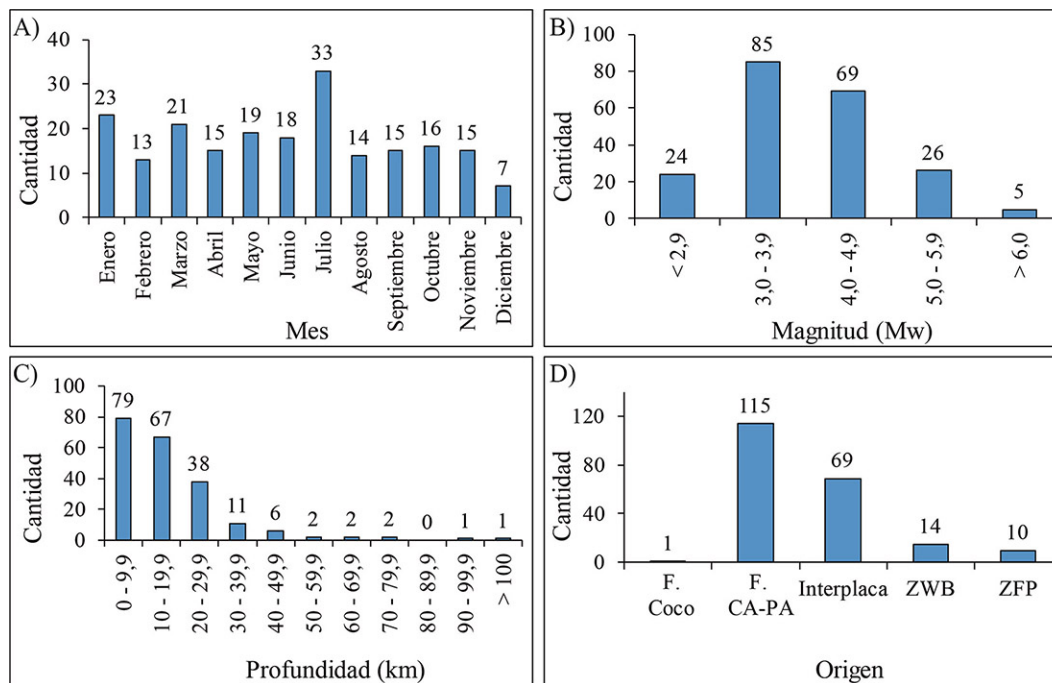


Fig. 7: Distribución de los sismos sentidos del 2021 de acuerdo con A) mes del año, B) magnitud momento (Mw), C) profundidad y D) origen. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma. El significado de las abreviaturas de la parte D es el siguiente: F. Coco es el fallamiento superficial en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana, F. CA-PA se refiere a las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá, Interplaca se refiere a la zona sísmogénica de la subducción de la placa Coco a lo largo del margen Pacífico, ZWB es la Zona de Wadati-Benioff (deformación interna de la placa Coco subducida a profundidades > 40 km) y ZFP es la Zona de Fractura de Panamá.

La mayoría de los sismos localizados tuvieron una Mw baja: ~48% con $Mw \leq 2,9$ y ~43% con Mw entre 3,0 y 3,9 (Fig. 6B). Con respecto de los sismos sentidos, la mayoría tuvieron magnitudes entre 3,0 y 3,9 (~41%) y entre 4,0 y 4,9 (~33%, Fig. 7B). En relación con las magnitudes bajas ($Mw < 2,9$), se localizaron 1801 sismos (Fig. 6B), de los cuales se percibieron 24 (Fig. 7B) y estos en su mayoría tuvieron sus epicentros cerca de las zonas urbanas. El sismo sentido de menor Mw fue de 2,3, sucedió el 29 de abril y tuvo su epicentro en Gravilias de Desamparados, en la parte central del país (Fig. 3).

Distribución por profundidad

Casi toda la sismicidad localizada (2731 eventos o ~73% del total) tuvo profundidades menores a 30 km (Fig. 6C). De estos eventos superficiales hubo 184 que fueron sentidos, lo cual representa el 88% del total (Fig. 5C). Hubo 292 eventos con profundidad entre 30 y 40 km y 722 con una profundidad mayor a 40 km. De este último grupo, solamente 14 fueron sentidos (Fig. 7C). El sismo sentido más profundo ocurrió el 13 de marzo ($Mw 5,0$, Fig. 3) a 168 km de profundidad con epicentro al sureste de Rivas de Nicaragua y fue percibido en algunos sectores de Guanacaste.

Distribución por origen

El origen de los sismos sentidos se distribuye de la siguiente manera (Fig. 7D): 115 (~55%) fueron ocasionados por fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá, 69 (~33%) ocurrieron en la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco a lo largo del margen Pacífico del país, 14 (~7%) ocurrieron en la ZWB debido a la deformación interna de la placa Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá a profundidades mayores de 40 km, 10 (~5%) en la ZFP y solamente un sismo está asociado con el fallamiento superficial en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana.

Todos los sismos sentidos de mayor tamaño ($M_w \geq 5,5$) ocurrieron en la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco, la ZFP y el fallamiento superficial en la placa Coco (Fig. 8). Por otro lado, todos los sismos sentidos originados en las fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá tuvieron M_w bajas, entre 2,3 y 4,7 (Fig. 8).

Cinco sismos significativos (M_w 5,3-6,2) y sus réplicas fueron originados en la zona sismogénica interplacas, como parte del proceso de subducción de la placa Coco (Fig. 8, color rojo y Cuadro 1). Estos cinco sismos presentan mecanismo focal inverso, con un plano nodal buzando hacia noreste, el cual corresponde con la zona de contacto entre placas que ocasionó esta sismicidad (Cuadro 1).

Cuatro sismos significativos (M_w 5,5-6,7) y sus réplicas se originaron en la ZFP (Fig. 8, color naranja y Cuadro 1). Los mecanismos focales de estos sismos son de desplazamiento de rumbo, con un plano nodal casi vertical y orientado casi nort-sur (Cuadro 1), coincidiendo con el rumbo de la ZFP al sur de la península de Burica.

Cuatro mecanismos focales de sismos superficiales (2-18 km), con M_w 3,7-4,7 y ubicados dentro del territorio continental costarricense, fueron calculados para este trabajo (Fig. 8, color amarillo y Cuadro 1). Todos estos sismos poseen un mecanismo focal de falla de desplazamiento de rumbo y debido a que en todos los 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.

Cuadro 1

Mecanismos focales de algunos sismos significativos en Costa Rica durante el año 2021 (Fig. 8), determinados por la RSN o por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y originados en la subducción de la placa Coco en el margen Pacífico (Interplaca), en fallas de las placas cabalgantes Caribe y Panamá (F. CA-PA), en la Zona de Fractura de Panamá (ZFP) y en el fallamiento superficial de la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana (F. Coco). Los números indicados para cada plano nodal corresponden con el rumbo, la inclinación y el ángulo de rake.

Día-Mes	M_w	Prof. (km)	Origen	Plano nodal 1 (°)			Plano nodal 2 (°)			Agencia
29-01	5,7	9	Interplaca	321	55	84	151	35	98	RSN
02-03	4,4	5	F. CA-PA	53	75	13	319	77	165	RSN
09-05	3,7	3	F. CA-PA	118	78	138	219	49	16	RSN
13-05	5,7	23	ZFP	185	77	174	277	84	13	USGS
10-06	5,7	8	F. Coco	359	62	-172	265	83	-28	USGS
17-07	6,0	5	ZFP	175	87	158	267	68	4	USGS
20-07	4,5	9	F. CA-PA	220	84	-8	310	82	-173	RSN
21-07	6,7	5	ZFP	172	80	-174	81	84	-10	RSN
16-08	4,7	18	F. CA-PA	183	74	-143	82	54	-19	RSN
21-09	5,5	15	ZFP	169	69	166	264	77	21	USGS
22-09	6,1	29	Interplaca	304	35	82	134	56	96	USGS
12-10	5,3	18	Interplaca	281	32	49	147	67	112	USGS
08-11	6,2	8	Interplaca	322	18	106	126	73	85	USGS
09-11	6,2	20	Interplaca	314	33	96	126	57	86	USGS

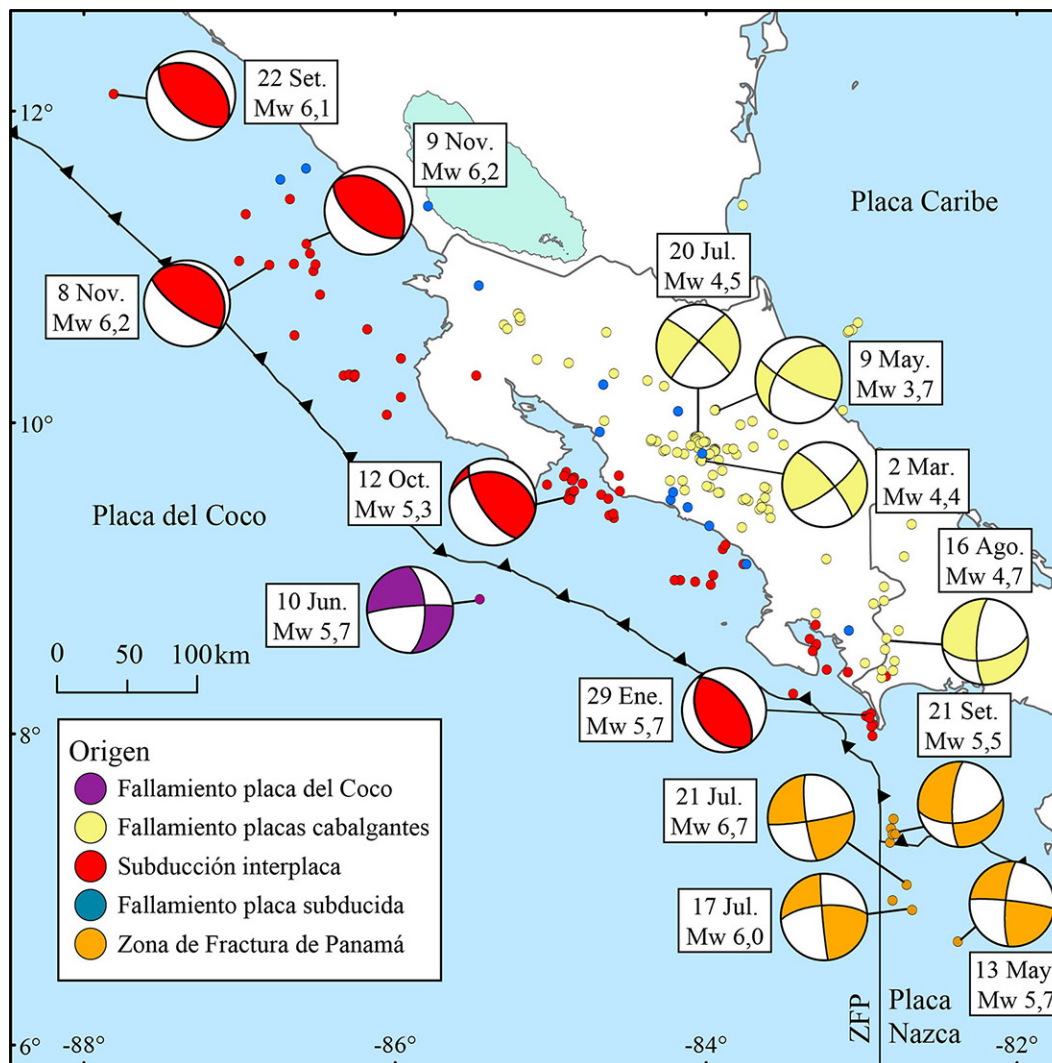


Fig. 8: Mapa del origen de los sismos sentidos del 2021. Se muestran los mecanismos focales y la fecha de algunos de los sismos significativos mencionados en el texto (Cuadro 1). El color de los círculos (epicentros) y de los mecanismos focales indica el origen señalado en la simbología y explicado en la Fig. 3.

El sismo de Mw 5,7 del 10 de junio al suroeste de la fosa Mesoamericana fue ocasionado por una falla en la placa Coco. El mecanismo focal de este evento es de desplazamiento de rumbo y, nuevamente, para este caso no fue posible determinar el plano nodal responsable del evento sísmico.

Energía sísmica

Usando la correlación clásica entre Mw y energía sísmica E en ergios ($1 \text{ ergio} = 1 \times 10^{-10} \text{ kJ}$) $\log_{10} E = 11,8 + 1,5 \text{ Mw}$ (Stein y Wysession, 2003) y tomando en cuenta la energía sísmica total aportada por los 3745 sismos locales del año 2021, se determinó que el valor de la energía sísmica promedio liberada cada semana fue de $2,89 \times 10^{10} \text{ kJ}$, es decir, el equivalente a un sismo de Mw 5,8.

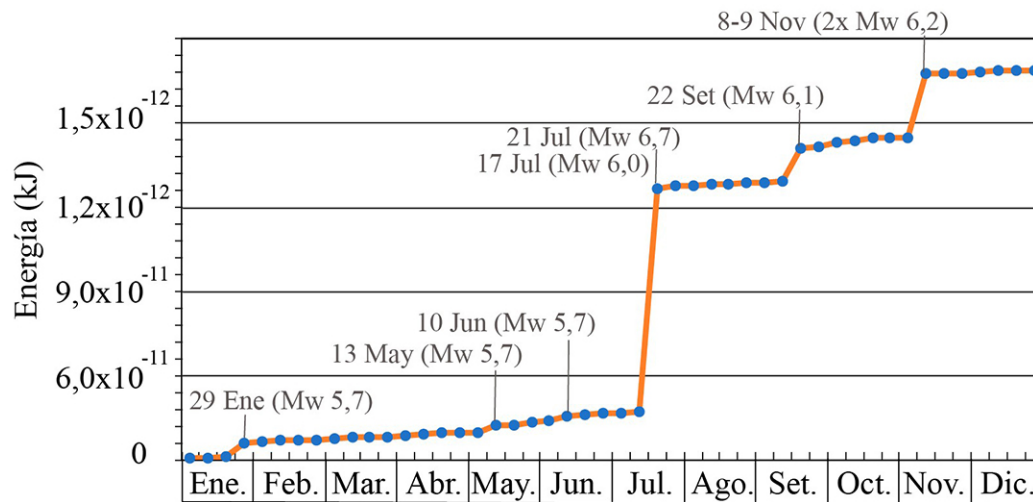


Fig. 9: Energía sísmica semanal en kilojulios (kJ) acumulada a lo largo del año 2021, resaltando los principales eventos (Fig. 3).

La semana con la mayor liberación de energía fue la del 16 al 22 de julio, cuando ocurrieron los sismos en la ZFP de Mw 6,0 y 6,7 y sus réplicas, liberando un total de $7,97 \times 10^{11}$ kJ (Fig. 9). Otras dos semanas del año también tuvieron un aporte considerable en la energía sísmica debido a los sismos de Mw 6,1-6,2 en la costa del Pacífico sur de Nicaragua: estas fueron las semanas del 16 al 22 de setiembre y del 8 al 15 de noviembre, con una energía sísmica de $\sim 1,17 \times 10^{11}$ kJ y $\sim 2,28 \times 10^{11}$ kJ, respectivamente (Fig. 9). La suma de la energía liberada por todos los sismos del 2021 fue de $1,39 \times 10^{12}$ kJ, lo que equivale a un sismo de magnitud 6,9.

Intensidades

La IMM más alta observada en el 2021 en Costa Rica fue V, esto pese a que ocurrieron 13 sismos de magnitud $M_w \geq 5,5$. Afortunadamente todos estos eventos tuvieron su epicentro mar adentro y alejado de centros de población, por lo que no generaron intensidades altas en el territorio continental, incluso algunos de estos no fueron reportados como percibidos.

La intensidad V fue alcanzada en las zonas pobladas más próximas a los epicentros de los sismos del 29 de enero (Mw 5,7, Fig. 10A), 10 de junio (Mw 5,7, Fig. 10B) y 20 de julio (Mw 4,5, Fig. 10C). En estos tres casos, la intensidad V estuvo restringida a un área muy reducida de menos de 10 km de diámetro, en las zonas de punta Burica (Fig. 10A), Cabo Blanco (Fig. 10B) y Desamparados (Fig. 10C), respectivamente. El sismo del 8 de noviembre (Mw 6,2, Fig. 10D) produjo la intensidad de V en una zona más extensa, principalmente en la costa del Pacífico de Nicaragua, pero en Costa Rica esta intensidad fue reportada sólo para un área pequeña del extremo noreste del territorio (Fig. 10D).

Los cuatro sismos mencionados (Fig. 10) fueron sentidos en gran parte de Costa Rica, aunque en la mayoría de las regiones fueron reportadas intensidades leves ($< IV$). La cantidad de reportes por parte de la población en el módulo “¿Lo sentiste?” de la RSN para estos sismos fue de: 191 para el 29 de enero (Mw 5,7, Fig. 10A), 463 para el 10 de junio (Mw 5,7, Fig. 10B), 717 para el 20 de julio (Mw 4,5, Fig. 10C) y 453 para el 8 de noviembre (Mw 6,2, Fig. 10D).

El sismo del 21 de julio (Mw 6,7, Fig. 11), por otra parte, también generó una intensidad de V y fue sentida en un área mucho mayor que los otros cuatro sismos significativos mencionados, abarcando toda la Zona Sur y parte del Caribe de Costa Rica. En la Gran Área Metropolitana (GAM), este sismo se sintió con una intensidad de IV y generó alarma en la población porque la duración de la sacudida se extendió por casi un minuto. Asimismo, la población ya se encontraba alarmada porque el día anterior había ocurrido un sismo por fallamiento cortical muy cerca de Desamparados (Mw 4,5, Fig. 10C) que también había generado localmente la intensidad V y la intensidad IV en una parte de la GAM. El sismo del 21 de julio fue también el que más reportes obtuvo en la plataforma “¿Lo sentiste?” de la RSN, con 989 valores de intensidad obtenidos desde todas las provincias de Costa Rica y el oeste de Panamá (Fig. 11).

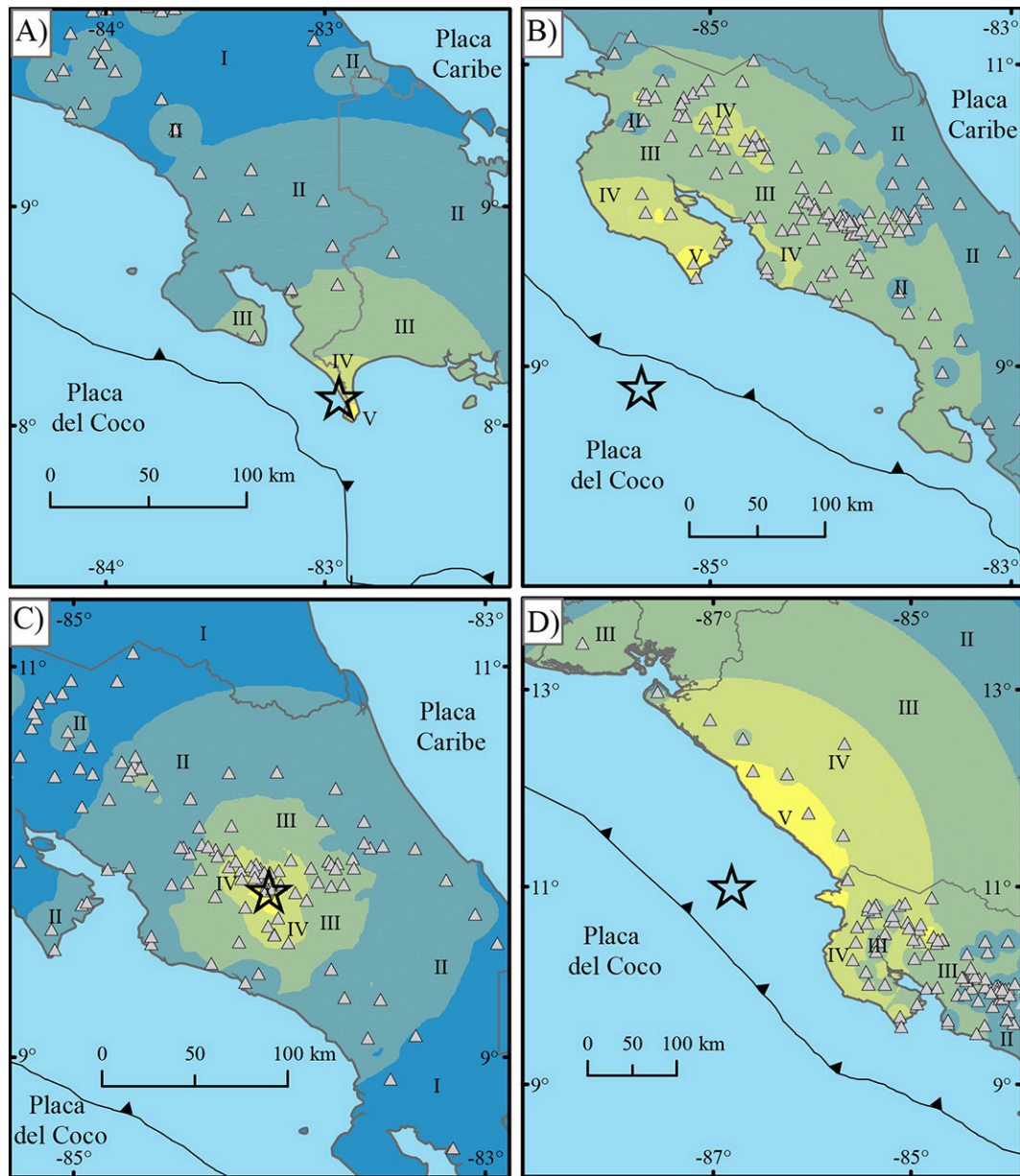


Fig. 10: Mapa de intensidades instrumentales para algunos sismos relevantes del 2021. El epicentro de los sismos está representado por una estrella. A) Sismo de Burica del 29 de enero (Mw 5,7). B) Sismo del 10 de junio (Mw 5,7). C) Sismo de Desamparados del 20 de julio (Mw 4,5). D) Sismo de Nicaragua del 8 de noviembre (Mw 6,2).

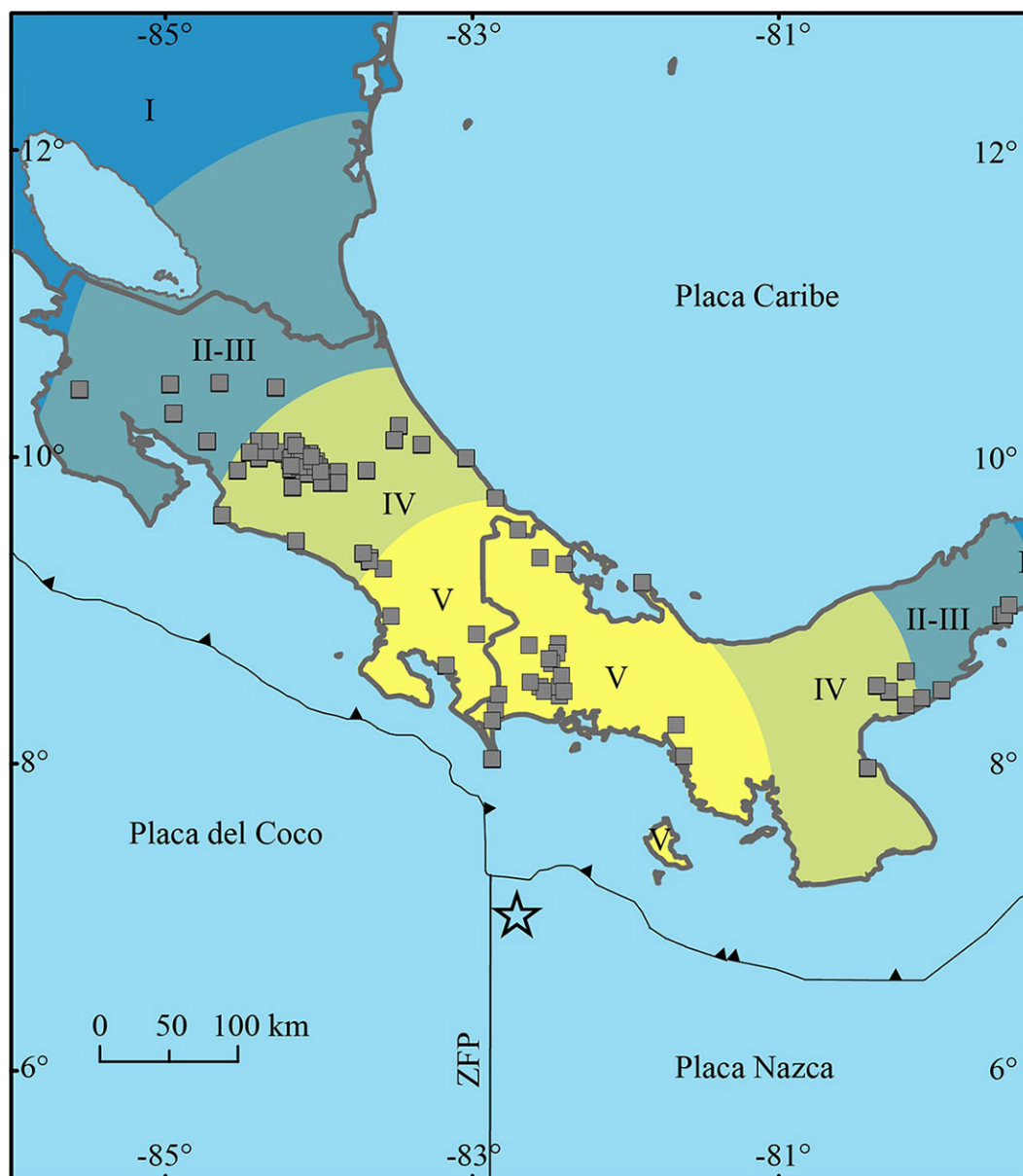


Fig. 11: Mapa de intensidades del sismo en la Zona de Fractura de Panamá del 21 de julio del 2021 (Mw 6,7). El epicentro del sismo está representado por una estrella.

Conclusiones

Los 3745 sismos locales registrados por la RSN durante el año 2021 equivalen a la energía liberada por un sismo de Mw 6,9 (~1,39 x10¹² kJ). De estos sismos, 209 fueron sentidos por la población, incluyendo cinco con Mw entre 6,0 y 6,7 y 26 con Mw entre 5,0 y 5,7. El promedio mensual de sismos localizados fue de 312 y el de sismos sentidos fue de 17. Estas cantidades se encuentran dentro de los niveles de sismicidad reportados por la RSN durante la última década.

El sismo de mayor Mw del año fue de 6,7 y se originó en la ZFP a 113 km al sur de punta Burica. La mayoría de los sismos sentidos del 2021 fueron superficiales (~88% < 30 km), de magnitud baja (~52% Mw < 3,9) y fueron originados por fallas en las placas Caribe y Panamá (~69%). La cantidad más alta de sismos (50-350 eventos) se localizó geográficamente en siete zonas específicas, cinco de las cuales se ubican en el margen Pacífico y presentaron cada una al menos un sismo de Mw ≥ 4,9.

Todos los sismos sentidos de mayor tamaño (Mw 5,5-6,7) se originaron en tres fuentes: la zona sismogénica interplacas de la subducción de la placa Coco, la ZFP y el fallamiento superficial en la placa Coco al suroeste de la fosa Mesoamericana. Afortunadamente, todos estos sismos tuvieron su epicentro mar adentro y alejados de centros de población, por lo que no se reportaron intensidades altas, pese a su gran magnitud. La IMM más alta observada en el 2021 en Costa Rica fue de V y ocurrió en las zonas pobladas más próximas a los epicentros de cinco de los sismos significativos del año.

Agradecimientos

Este artículo es resultado de los proyectos de investigación y acción social 113-B5-704 “Vigilancia Sísmica de Costa Rica”, 113-A1-716 “Apoyo de asistentes a la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica”, EC-533 “Difusión de temas sismológicos en Costa Rica” y del programa de investigación 113-B9-911 “Red Sismológica Nacional”, inscritos en la UCR. Además, ha sido posible gracias a los recursos económicos y de personal brindados por la UCR y el ICE, y al financiamiento que la RSN recibe de la Ley Nacional de Emergencias N° 8488. Agradecemos al personal de la RSN (UCR-ICE) que permite mantener la red de estaciones y los sistemas de localización, especialmente a Luis Fernando Brenes y Jean Paul Calvo. Además, al Lic. Mario Arroyo-Solórzano por proveer los códigos de algunas figuras. Las siguientes personas colaboraron en la localización de sismos durante el 2021: la Geól. Magda Taylor, el Lic. Mario Arroyo-Solórzano y la Dra. María Cristina Araya y los asistentes de la RSN: Brandon Acosta, Daniela Manzano y María Rodríguez.

Referencias bibliográficas

- 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. (2021). 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. doi: 10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2026
- 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. doi: 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(7), 1747-1764. doi: 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.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., y Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), 2191-2194.
- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica*. San José, 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. doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02809.x.
- Franco, A., Lasserre, D., Lyon-Caen, H., Kostoglodov, V., Molina, E., Guzman-Speziale, M. ... Manea, V. C. (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189(3), 1223-1236.
- Gempa. (2019). *SeisComp 3 Real time data acquisition and processing*. Potsdam, Alemania: 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. doi: 10.1785/0220190313
- 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. doi: 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. doi: 10.15517/rgac.v0i64.46623
- 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. doi: 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. doi: 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 Umana, J. (1977). Crustal structure in Southern Central America. *Bulletin of Seismological Society of America*, 67, 121-133.
- 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.
- Morell, K. D., Fisher, D. M., Gardner, T.W., LaFemina, P. C., Davidson, D., y Teletzke, A. (2011). Quaternary outer fore-arc deformation and uplift inboard of the Panama Triple Junction, Burica Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 116, B05402. doi: 10.1029/2010JB007979.
- Peraldo, G., y Montero, W. (1994). *Temblores del periodo colonial de Costa Rica* (Primera ed.). Cartago, Costa Rica: 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. doi: 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: 203-204. doi: 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. doi: 10.15517/rgac.v2019i60.36468.
- 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*. Malden, Estados Unidos: Blackwell Publishing.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W., y Worden, C. B. (1999). TriNet “ShakeMaps”: Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthquake Spectra*, 15(3), 537-555.

- 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. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-087-03/FS-087-03-508.pdf>
- Wald, D. J., Quitoriano, 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. doi: 10.4401/ag-5354.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., y Fukushima, Y. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.