

Recuento de la sismicidad en Costa Rica durante el 2019

Report of the seismicity in Costa Rica during 2019

Mario Arroyo*, Lepolt Linkimer e Ivonne G. Arroyo

Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE), Apdo. 214-2060, San Pedro, San José, Costa Rica

*Autor de contacto: mario.arroyosolorzano@ucr.ac.cr

(Recibido: 10/01/2020; aceptado: 10/02/2020)

RESUMEN: Durante el 2019, la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) localizó 4602 sismos. De estos, 252 eventos (~5,5%) fueron sentidos por la población, incluyendo 24 sismos relevantes con magnitudes (M_w) entre 5,0 y 6,6. La mayoría (75%) de los sismos percibidos fueron superficiales (< 30 km) y el 51% tuvo una magnitud baja ($M_w < 3,9$). El fallamiento local y el regional provocaron 113 de los sismos sentidos, mientras que el proceso de subducción de la placa del Coco ocasionó 139. La sismicidad más alta ocurrió en cuatro cúmulos ubicados en el océano Pacífico al oeste de Guanacaste, la cordillera volcánica de Guanacaste, el sureste del Valle Central y una zona al norte de la península de Burica. El sismo más significativo del año fue el de Armuelles del 25 de junio (M_w 6,4), el cual provocó la intensidad sísmica más alta observada (VII) y la mayor cantidad de liberación de energía sísmica durante la semana de su ocurrencia (2,62E+11 kJ). La cantidad de réplicas localizadas para este sismo concuerdan con un pronóstico teórico realizado en este trabajo.

Palabras clave: sismicidad en Costa Rica; réplicas; energía sísmica; escala de intensidad Mercalli Modificada (IMM); Magnitud momento (M_w); subducción.

ABSTRACT: During 2019 the National Seismological Network (RSN: UCR-ICE) located 4602 earthquakes. From the total located events, 252 (~5,5%) were felt earthquakes, including 24 significant events with magnitudes M_w between 5.0 and 6.6. The majority (75%) of the felt earthquakes were shallow (< 30 km) and 51 % had low magnitudes ($M_w < 3.9$). Local and regional faulting caused 113 felt earthquakes, while the subduction of the Cocos Plate caused 139. The largest amount of earthquakes occurred in four clusters located in the Pacific Ocean offshore Guanacaste, the Guanacaste volcanic chain, the Central Valley, and a region north of the Burica Peninsula. The most significant seismic event was the Armuelles earthquake on June 25 (6.4 M_w), which caused the highest seismic intensity observed (VII) and the largest amount of energy released during the first week of its occurrence (2,62E+11 kJ). The number of aftershocks located for this earthquake coincides with a theoretical forecast calculated for this event in this work.

Keywords: Seismicity in Costa Rica; aftershocks; seismic energy; Modified Mercalli Intensity (MMI); Moment Magnitude (M_w); subduction.



INTRODUCCIÓN

El territorio costarricense se ubica en el margen occidental de las placas Caribe y Panamá (Fig. 1), donde la subducción de la placa del Coco tiene lugar a lo largo de la fosa Mesoamericana con velocidades de 83-89 mm/año (DeMets et al., 1994). Al sureste del país, se encuentra un punto triple donde se unen la fosa Meosamericana y la Zona de Fractura de Panamá (ZFP), esta última limitando las placas del Coco y Nazca. El límite entre las placas Caribe y Panamá ocurre en el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR, Montero, 2001; Marshall, Fisher y Gardner, 2000) y en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP, Adamek, Frohlich y Pennington, 1988). La compleja interacción entre estos elementos tectónicos resulta en una alta sismicidad.

La Red Sismológica Nacional (RSN) es un programa de investigación inscrito en la Universidad de Costa Rica (UCR) que tiene sus raíces en una larga historia de colaboración entre la UCR y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La sede de la RSN se ubica en la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR. El objetivo de la RSN es desarrollar conocimiento científico sobre la geodinámica interna de la Tierra mediante la operación de instrumentación geofísica con el fin de transferirlo a la sociedad costarricense, a través de la docencia, la investigación y la acción social, de manera que pueda ser aplicado en los planes de gestión del riesgo y atención de emergencias en Costa Rica (Linkimer, Arroyo, Alvarado, Arroyo y Bakkar, 2018).

La RSN posee actualmente una red de 158 estaciones sismológicas (Fig. 1) transmitiendo en tiempo real, las cuales son administradas por la UCR (114 estaciones) y el ICE (44). Esta red sísmica incluye 37 estaciones de banda ancha y 121 de periodo corto. En las localizaciones rutinarias se incorporan además lecturas de estaciones administradas por otras redes sismológicas ubicadas en Costa Rica, Panamá y Nicaragua, compartidas directamente o disponibles a través del consorcio IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*). La detección y la localización automática de los sismos se realiza rutinariamente usando los programas de *SeisComp3* (Gempa, 2019). La lectura manual de arribos de ondas, la localización y el cálculo de la magnitud momento (M_w) se lleva a cabo usando los programas *Mulplt* y *Hyp* (Lienert y Havskov, 1995) integrados en el software sismológico *SeisAn* (Ottmøller, Voss y Havskov, 2019). 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 (P) de siete capas basado en Matumoto, Ohtake, Latham y Umana (1977) y una razón de velocidades (V_p/V_s) de 1,75.

Desde 1821, Costa Rica ha sufrido el embate de 68 terremotos, 20 de los cuales han tenido magnitud mayor a 7,0 (e.g., Montero, 1989; Peraldo y Montero, 1994; Linkimer y Alvarado, 2014). En este contexto, el estudio minucioso de la sismicidad de Costa Rica es importante para proveer los datos adecuados para el cálculo de la amenaza sísmica a la cual está expuesta la población. Con ese norte, en este trabajo se realiza un recuento de la sismicidad del país en el 2019 localizada por la RSN, presentando una breve descripción estadística de la distribución de los sismos geográfica y temporalmente, así como su distribución por M_w , profundidad y origen. Se presentan, además, los principales focos de sismicidad en el continente y en los océanos, la energía sísmica liberada y las intensidades de los sismos más relevantes del año. Por último, se presenta un pronóstico para el año 2020 de la ocurrencia de réplicas del sismo de Armuelles de junio 2019 (M_w 6,4) y una comparación del pronóstico determinado para el 2019 con la secuencia real de réplicas localizadas por la RSN.

CARACTERÍSTICAS DE LA SISMICIDAD

En el 2019 la RSN detectó 4602 sismos, cantidad que incluye los eventos ocurridos en Costa Rica (sismos locales), algunos ubicados en América Central (regionales) y otros originados a más de 10 grados de distancia (telesismos). De estos, 4103 fueron sismos locales (Fig. 2 y 3) y 252 (~5,5%) se reportaron como percibidos por la población (Fig. 4 y 5). Durante el año fueron notorios tres sismos con $M_w \geq 6,0$ y 21 con M_w entre 5,0 y 5,9. Aunque la cantidad total de sismos localizados durante el 2019 aumentó con respecto del 2018 (3233 sismos), el número de sismos percibidos fue menor, pues en 2018 la población reportó haber sentido 285 eventos.

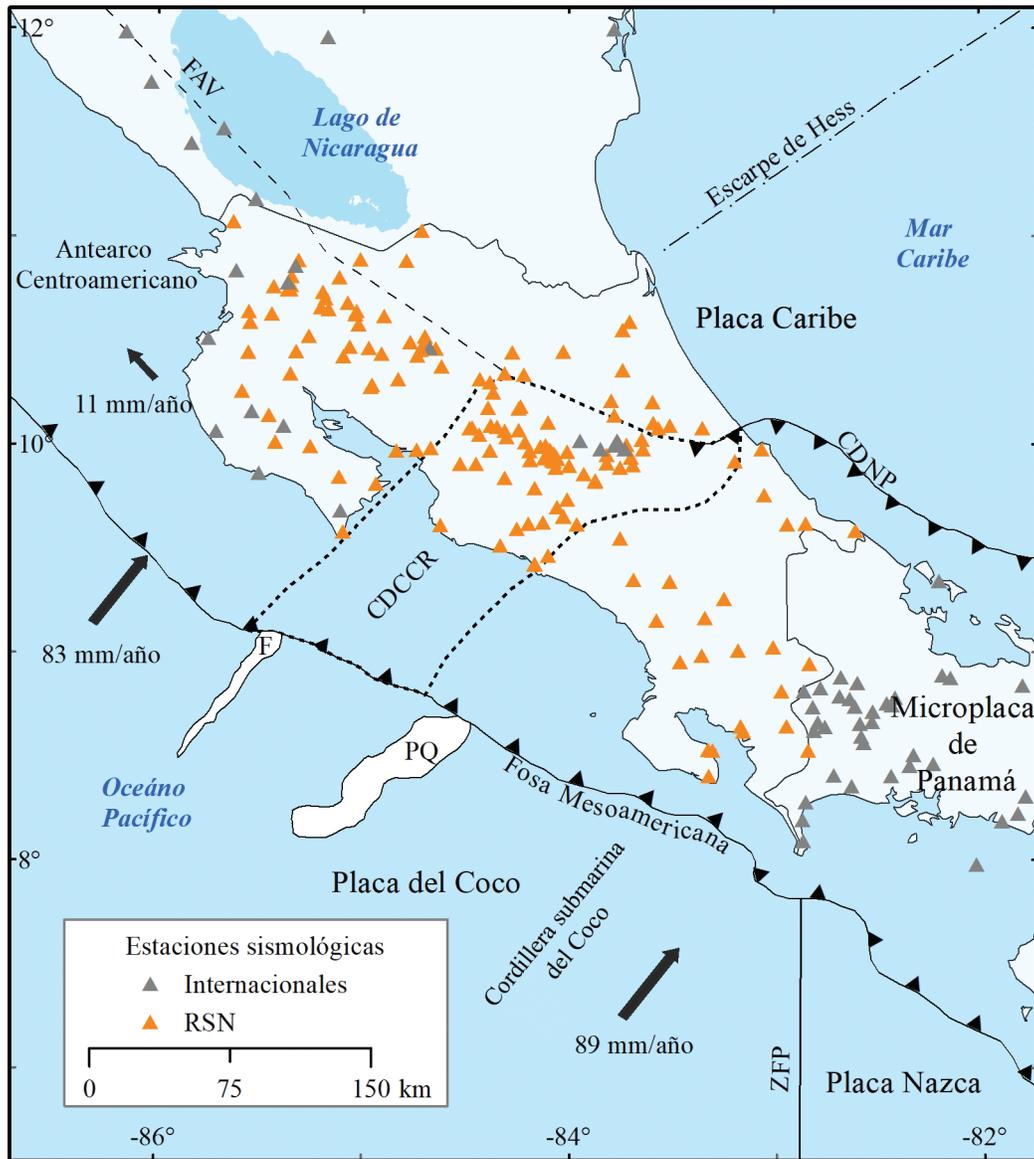


Fig. 1: Contexto tectónico de Costa Rica y estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE). La región contenida dentro de la línea gruesa punteada representa el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR). La línea discontinua representa el límite noreste simplificado del Bloque Antearco Centroamericano a lo largo de las Fallas del Arco Volcánico (FAV) de acuerdo con Franco et al. (2012). CDNP es el Cinturón Deformado del Norte de Panamá, F es el monte submarino Fisher, P significa Plateau de Quepos, y ZFP, Zona de Fractura de Panamá.

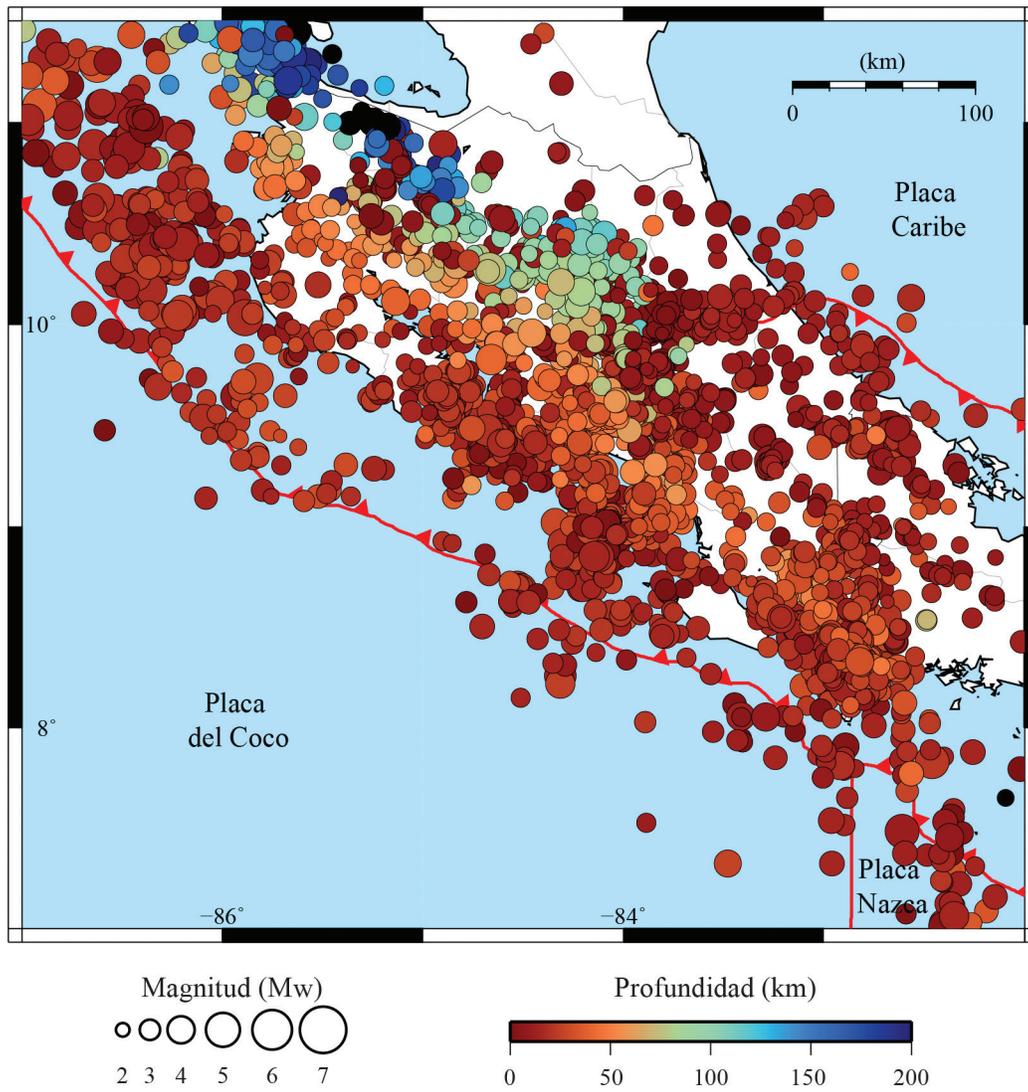


Fig. 2: Ubicación epicentral de los sismos locales detectados por la RSN durante el 2019.

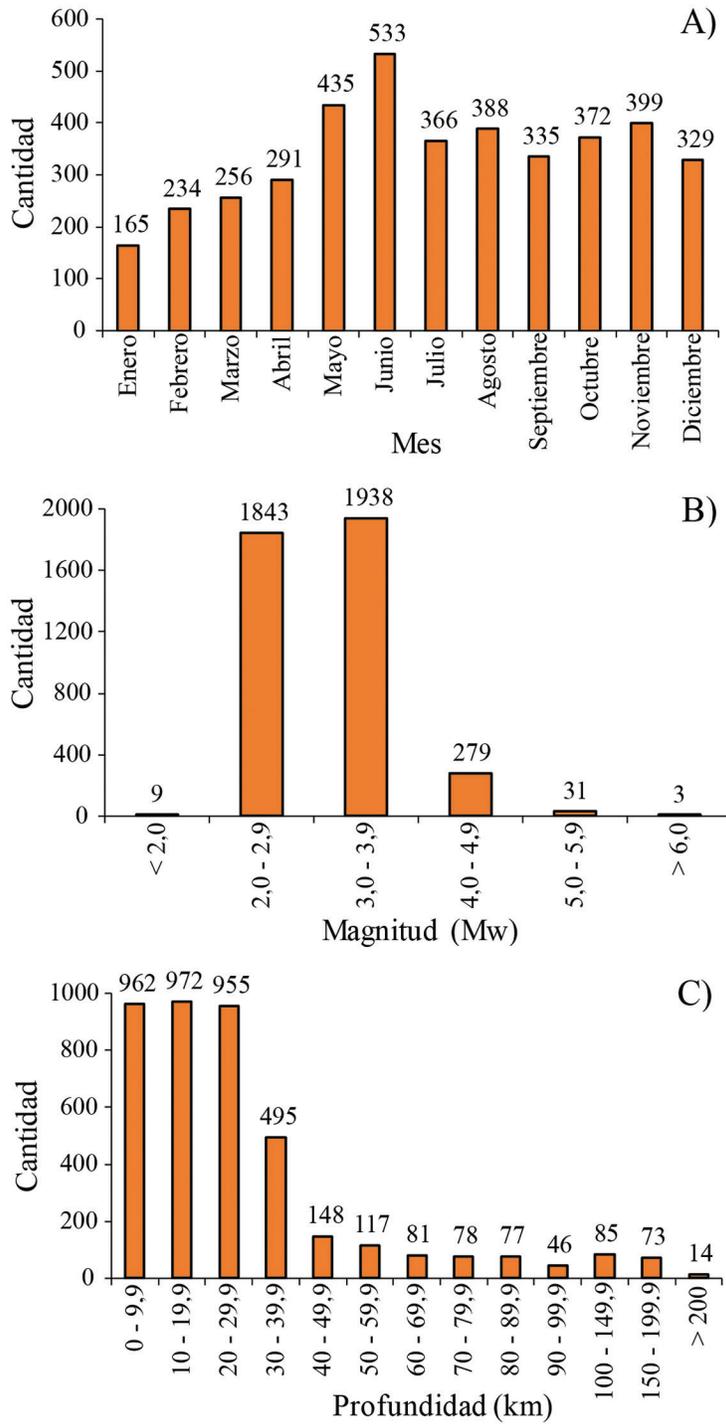


Fig. 3: Distribución de los sismos localizados en el 2019 por A) mes, B) magnitud y C) profundidad. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma.

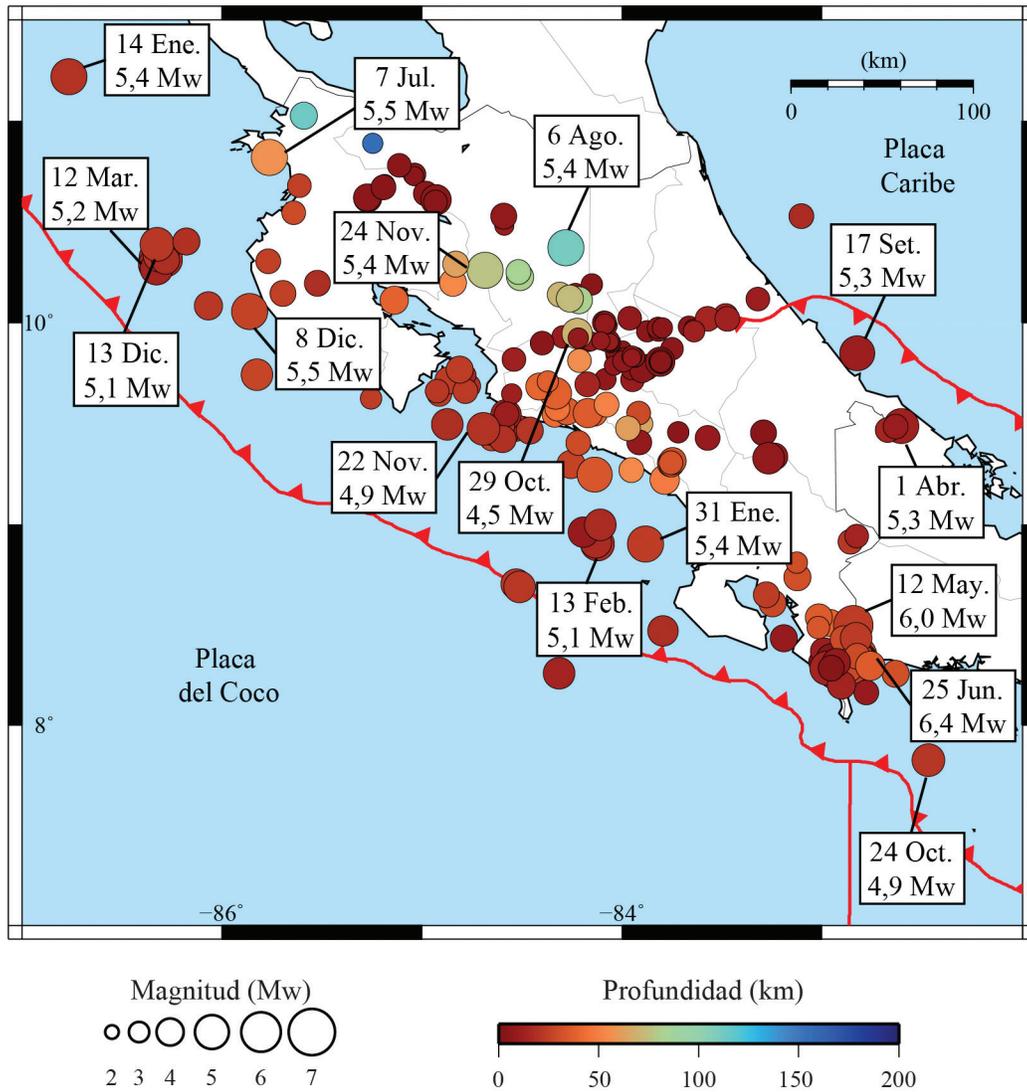


Fig. 4: Ubicación epicentral de los sismos locales sentidos en Costa Rica durante el 2019. Los sismos sentidos más relevantes se señalan con su Mw.

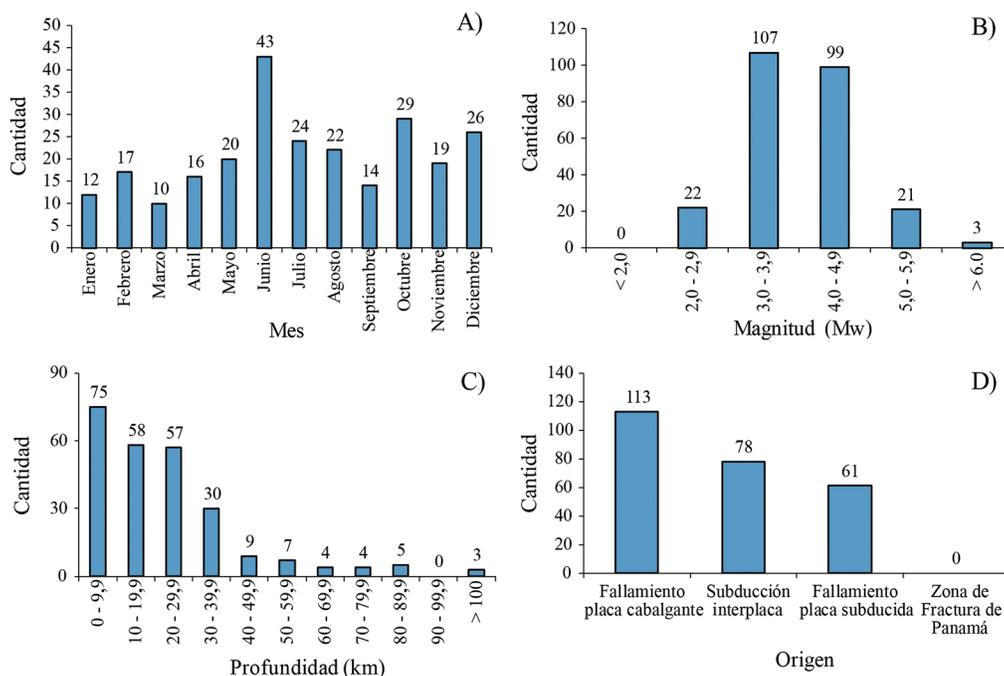


Fig. 5: Distribución de los sismos sentidos en el 2019 por A) mes, B) magnitud, C) profundidad y D) origen. La cantidad de sismos se muestra sobre las barras de cada histograma.

Distribución temporal

Los meses con la mayor cantidad de sismos localizados fueron mayo (435) y junio (533) (Fig. 3A), lo cual está relacionado con las réplicas de los sismos de Canoas del 12 de mayo (Mw 6,0) y Armuelles del 25 de junio (Mw 6,4). Por otro lado, el mes de enero tuvo la menor cantidad de sismos localizados, con 165 (Fig. 3A). Los demás meses tuvieron una cantidad de sismos que varió entre 234 y 399 (Fig. 3A). La distribución temporal de la sismicidad muestra que en el primer cuatrimestre del 2019 la sismicidad fue menor que en el resto del año. El promedio mensual de sismos registrados fue de 342.

Con respecto de la sismicidad percibida, junio y octubre fueron los meses con la mayor cantidad de sismos sentidos (43 y 29) (Fig. 5A). En esos meses hubo una alta sismicidad cerca de Puerto Armuelles y en la Gran Área Metropolitana (GAM), respectivamente. Por otro lado, marzo fue el mes con la menor cantidad de sismos sentidos, con solamente 10 (Fig. 5A). Los meses restantes tuvieron entre 12 y 26 eventos sentidos (Fig. 5A). El promedio mensual de sismos sentidos fue de 21.

Distribución por magnitud

El sismo de mayor magnitud sentido en Costa Rica durante el 2019 ocurrió el 30 de mayo en la costa de El Salvador con una Mw de 6,6. Por su lejanía con Costa Rica, este sismo fue sentido solamente en forma leve en la provincia de Guanacaste y en la Zona Norte de Costa Rica.

El 25 de junio ocurrió el sismo más relevante del año, con Mw de 6,4 y epicentro ubicado 20 km al este del límite político entre Costa Rica y Panamá, muy cerca de la ciudad panameña de Puerto Armuelles (Fig. 4). El segundo sismo en importancia fue el ocurrido el 12 de mayo, con Mw 6,0 y epicentro cerca de Paso Canoas, también cerca del límite entre Costa Rica y Panamá (Fig. 4).

De los sismos localizados, 34 alcanzaron magnitudes iguales o mayores a 5,0, lo que representa el 0,9% del total (Fig. 3B). Con respecto de la sismicidad percibida, hubo 24 eventos con magnitudes iguales o mayores a 5,0, lo que representa el 9,5% del total (Fig. 5B). Con relación a magnitudes bajas ($M_w < 3,9$), se localizaron 3790 sismos (Fig. 3B), de los cuales se percibieron 129 (Fig. 5B) y estos en su mayoría tuvieron sus epicentros cerca de zonas urbanas. La mayoría de los sismos localizados tuvieron M_w entre 2,5 y 2,9 (44,9%) y entre 3,0 y 3,9 (47,2%) (Fig. 3B). El sismo sentido de menor M_w fue de 2,4 y sucedió el 28 de agosto, tuvo su hipocentro a 9 km de profundidad y se localizó 1 km al oeste de Desamparados en San José.

Distribución por profundidad

La mayoría de la sismicidad localizados (70,4%) tuvo profundidades menores a los 30 km (Fig. 3C). Un total de 190 eventos superficiales fueron sentidos, lo cual representa el 75,4% del total (Fig. 5C). Solamente 32 sismos sentidos tuvieron su hipocentro a más de 40 km de profundidad y de estos, tres ocurrieron a más de 100 km (Fig. 5C). El primero de estos eventos ocurrió el 1 de febrero a 113 km de profundidad, 7 km al sureste de La Cruz en Guanacaste, con una M_w de 4,0. El segundo sucedió el 13 de mayo a 155 km de profundidad (siendo el más profundo), 11 km al noroeste de Aguas Claras de Upala, con una M_w de 3,0. El tercero ocurrió el 6 de agosto a 111 km de profundidad, 2 km al norte de Venecia de San Carlos y una M_w de 5,4.

Distribución por origen

El origen de los sismos sentidos se distribuye de la siguiente manera: 113 (44,8%) fueron ocasionados por fallas superficiales en las placas Caribe y Panamá, 78 (31%) ocurrieron en la zona sismogénica interplacas a lo largo del margen Pacífico del país y 61 (24,2%) ocurrieron debido a la deformación interna de la placa del Coco al subducirse debajo de las placas Caribe y Panamá (Fig. 5D). El sismo de Armuelles del 25 de junio (M_w 6,4) es el ejemplo principal de los sismos originados en esa última zona.

Distribución geográfica

La densidad de sismos más alta ocurrió en cuatro cúmulos ubicados en el océano Pacífico al oeste de Guanacaste (Fig. 6, cúmulo 1), la cordillera volcánica de Guanacaste (Fig. 6, cúmulo 2), el sureste del Valle Central (Fig. 6, cúmulo 3) y una zona al norte de la península de Burica (Fig. 6, cúmulo 4). En las zonas de los cúmulos 1 y 2 se presentaron entre 50 y 200 sismos, mientras que en las zonas de los cúmulos 3 y 4, entre 200 y 750 sismos. Por otro lado, la Zona Norte y gran parte del Caribe y la cordillera de Talamanca se caracterizaron por una sismicidad baja, con menos de quince sismos por cada 100 km² durante todo el año.

El sismo más relevante del cúmulo 1 (Fig. 6) tuvo lugar el 12 de marzo con una M_w 5,2 (Fig. 4). En esta zona, cuatro sismos tuvieron $M_w \geq 5,0$. Esta actividad debe su origen al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la Caribe. El sismo más sobresaliente del cúmulo 2 (Fig. 6) ocurrió el 9 de abril, con una M_w de 4,5. Los eventos en esta zona se originaron en fallas locales en la vecindad de los sistemas de fallas Caño Negro y Chiquero. El cúmulo 3 (Fig. 6) corresponde con una alta sismicidad superficial (< 30 km) que se puede relacionar con el CDCCR. En este sector destacan los sismos ocurridos durante octubre y noviembre en los alrededores de Orosi y Tejar de El Guarco en Cartago y en la vecindad de los sistemas de fallas Navarro y Aguacaliente y otras fallas menores. El sismo más importante del cúmulo 4 (Fig. 6) es el de Armuelles del 25 de junio (6,4 M_w). En este sector destaca también el sismo de Canoas (M_w 6,0) del 12 de mayo (Fig. 4) y otros 13 sismos con $M_w > 4,5$.

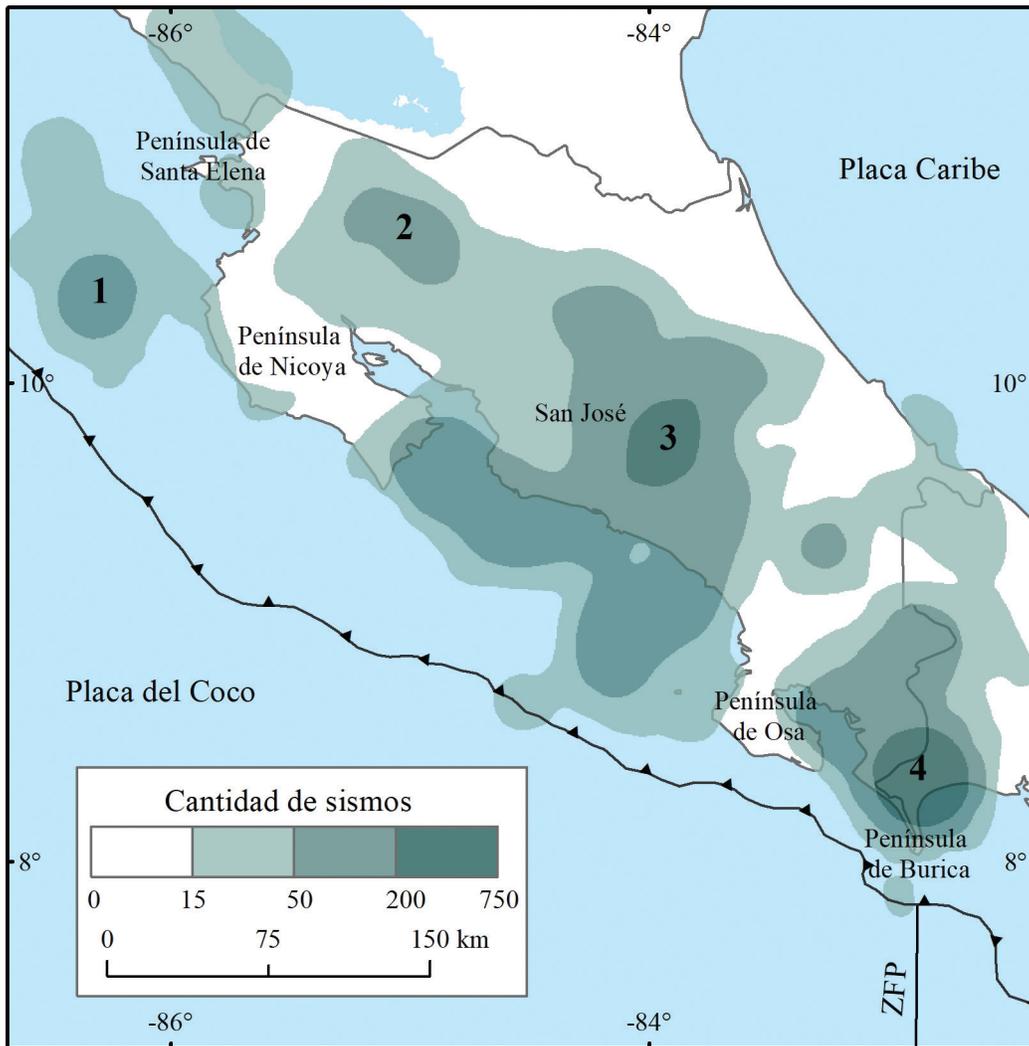


Fig. 6: Densidad de sismos en Costa Rica durante el 2019. Los cúmulos 1, 2, 3 y 4 corresponden con las zonas con mayor cantidad de sismos localizados.

Al examinar la sismicidad registrada en el país y regiones fronterizas en franjas de ~100 km de ancho perpendiculares a la fosa (Fig. 7), se observa que la mayor actividad sísmica corresponde con el Pacífico Central y la región central del país (zona D). El sismo más relevante de esta zona ocurrió el 22 de noviembre con una M_w 4,9 (Fig. 4), el cual fue percibido principalmente en el centro del país. En segundo lugar, la zona de la península de Burica (zona F) también se caracterizó por una alta sismicidad, debido a la ocurrencia de las réplicas de los sismos de Canoas y Armuelles (de 6,0 y 6,4 M_w , respectivamente, Fig 4). En contraste, Guanacaste y la Zona Norte de Costa Rica (incluidas en las zonas A, B, C) tuvieron una sismicidad más baja en comparación con el resto del territorio.

Para examinar la sismicidad por provincias y en los océanos, se contabilizó la cantidad de sismos localizados en cada zona y en Nicaragua y Panamá (Fig. 8). La provincia de Puntarenas fue la que presentó la cantidad más alta de epicentros, con 480. Por su parte el territorio panameño, tuvo 689 epicentros, en su mayoría las réplicas del sismo de Armuelles (M_w 6,4) del 25 junio. Además, la cantidad de epicentros ubicados en el océano Pacífico (1350 eventos) fue significativamente mayor que la del mar Caribe (49). Las provincias con menos epicentros fueron Heredia (80) y Limón (114).

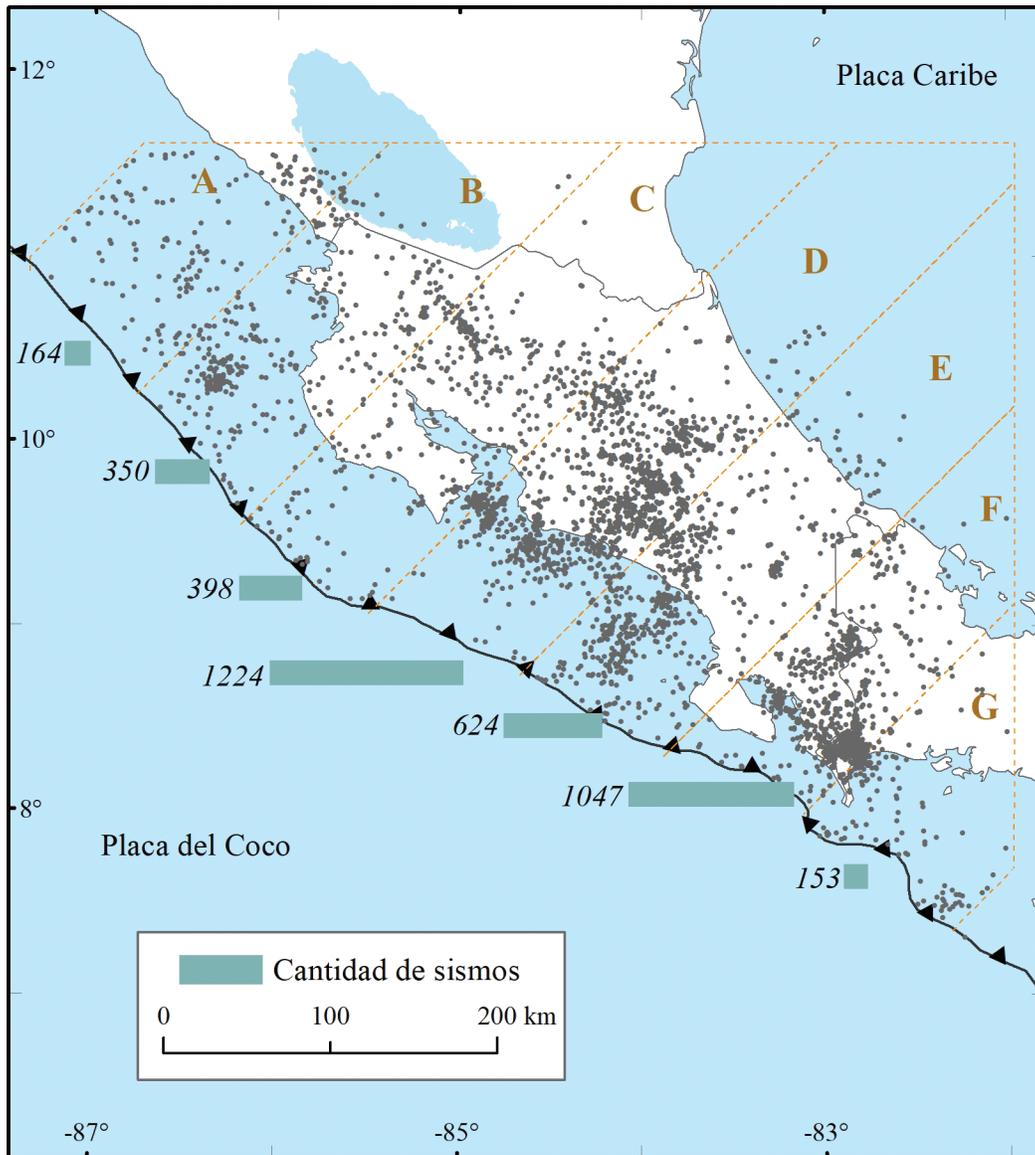


Fig. 7: Cantidad de sismos localizados a lo largo del margen convergente costarricense, separados en franjas de 100 km de ancho.

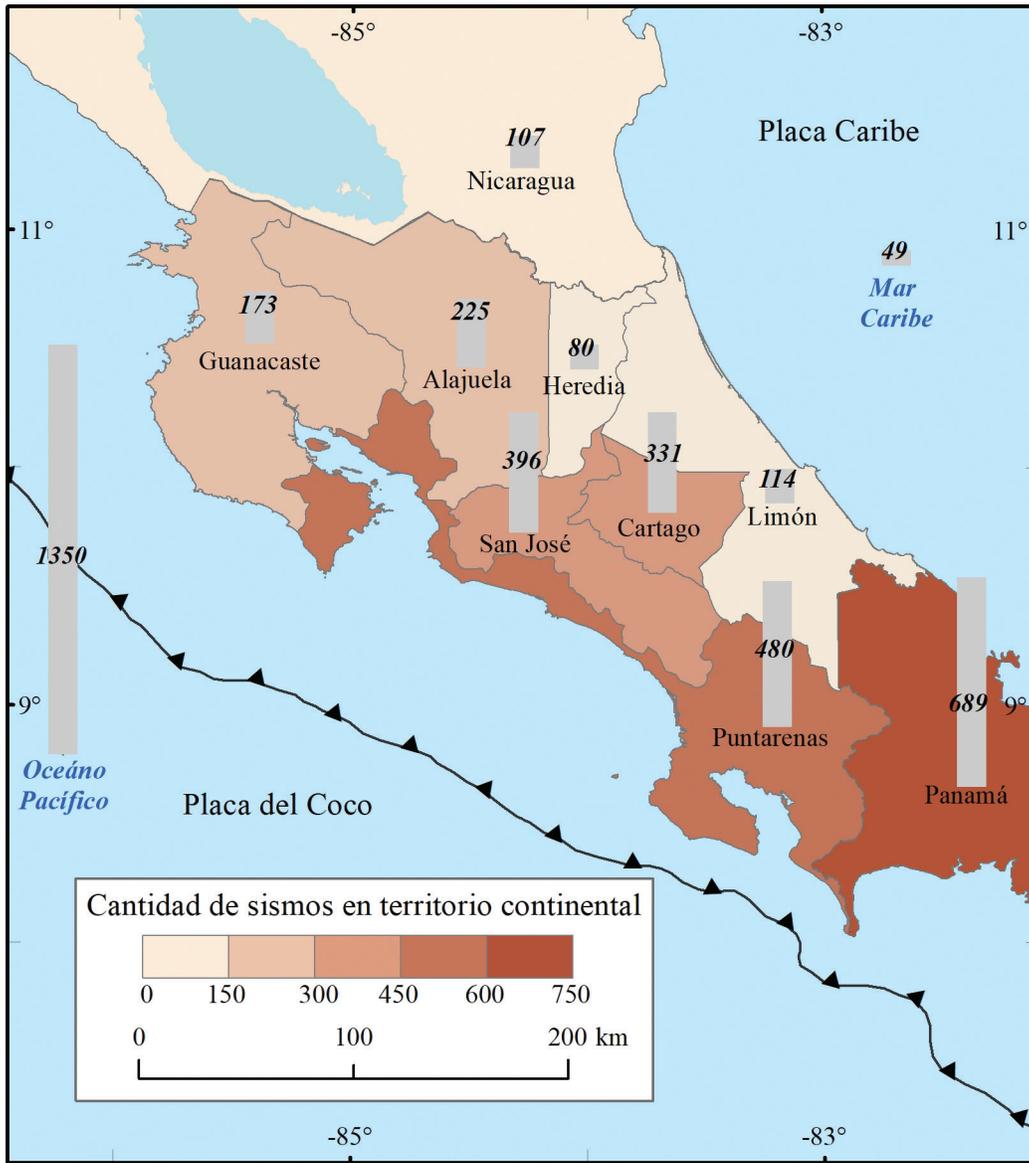


Fig. 8: Distribución de la sismicidad localizada en el territorio continental y en los océanos durante el 2019. La cantidad de sismos se muestra sobre cada zona.

Energía sísmica

La Fig. 9 muestra la energía sísmica (en kilojulios, kJ) liberada por semana durante el 2019. Para su estimación, se calculó la energía de cada sismo, usando la relación desarrollada por Gutenberg y Richter (1956): $\log_{10}E = 11,8 + 1,5 M$, en la que la energía, E, se expresa en ergios ($1 \text{ ergio} = 1 \times 10^{-10} \text{ kJ}$) y M es la magnitud (Spence, Sipkins y Choy, 1989). Los resultados permiten visualizar el aporte energético a través del año, resaltando los sismos más relevantes.

El valor de energía sísmica promedio por semana durante 2019 fue de $1,11E+10 \text{ kJ}$ y la mayor cantidad de energía sísmica se presentó la semana del 23 al 30 de junio, cuando ocurrió el sismo de Armuelles (6,4 Mw), cuya energía liberada fue de $2,62E+11 \text{ kJ}$ (Fig. 9).

Intensidades

Las intensidades en la escala Mercalli Modificada (IMM) fueron determinadas con base en el módulo llamado “¿Lo sentiste?” disponible en la página web de la RSN y en la aplicación de la RSN para teléfonos inteligentes. Además, se determinaron intensidades con base en los registros instrumentales de las estaciones sismológicas de la RSN y a través del software *ShakeMap* (Wald, Wald, Worden y Goltz, 2003), que utiliza un modelo de predicción del movimiento de suelo (Zhao et al., 2006) y uno de intensidad (Wald et al., 1999).

Durante el sismo de Armuelles del 25 de junio (6,4 Mw a 31 km de profundidad) se observaron IMM de hasta VII en los alrededores del epicentro y en Paso Canoas, Golfito y Laurel en Costa Rica, y en Puerto Armuelles, David y pueblos cercanos en Panamá. Esa fue la intensidad más alta que se presentó durante el año 2019. En la GAM, el Pacífico Central y la costa Caribe Sur se sintió con una intensidad de IV a V y muy levemente en gran parte de Guanacaste.

Este sismo tuvo la cantidad más alta de reportes por parte de la población en el módulo ¿Lo sentiste?, con 1298 en todas las provincias de Costa Rica y en el oeste de Panamá (Fig. 10A). Afortunadamente, no hubo pérdida de vidas humanas ni heridos, pero sí se reportaron daños en viviendas en Pérez Zeledón, Osa, Corredores y Palmar Norte, además en Divalá y Gualaca, en Panamá. También se presentaron pérdidas económicas en abarrotes de centros comerciales de la Zona Sur de Costa Rica y oeste de Panamá y se reportó la suspensión del servicio eléctrico en Palmar Sur, Pérez Zeledón, Ciudad Cortés, Puerto Jiménez y Parrita, y la caída del tendido eléctrico en Corredores.

Otro evento relevante fue el de 5,5 Mw del 7 de julio, cerca de la península de Santa Elena a 57 km de profundidad. Durante este sismo se observaron IMM de hasta V cerca de la zona epicentral, mientras que en el Valle Central se percibió con baja intensidad (Fig. 10B).

El sismo en Venecia de San Carlos del 6 de agosto y el de Cahuita del 17 de setiembre también generaron IMM sobresalientes cerca de la zona epicentral. El primero tuvo una Mw de 5,4 a 111 km de profundidad, fue sentido especialmente en la Zona Norte del país y en el Valle Central, con intensidades de III y IV (Fig. 10C). El segundo tuvo una Mw de 5,3 a una profundidad de 11 km y fue sentido en Limón y el Valle Central, con intensidades de V y III, respectivamente (Fig. 10.D).

Pronóstico de réplicas para el sismo de Armuelles del 25 de junio (6,4 Mw)

El 25 de junio a las 11:23 pm (hora local) ocurrió el sismo más significativo del año, no solo por generar altas intensidades en la zona epicentral (de hasta VII), sino por la importante actividad de réplicas que se prolongó por el resto del 2019. Utilizando el código desarrollado por OpenSHA (*Open Seismic Hazard Analysis*, Field, Jordan y Cornell, 2003) se calculó la probabilidad de réplicas asociadas con el sismo de Armuelles. Ese programa se basa en la Ley de Omori para pronosticar la probabilidad de réplicas asociadas con los terremotos con base en su magnitud (Ogata, 1983; Omi, Ogata, Hirata y Aihara, 2015) y permite estimar estas probabilidades para rangos temporales de un día, una semana, un mes o un año a partir del día elegido, posterior al evento principal, para hacer el cálculo.

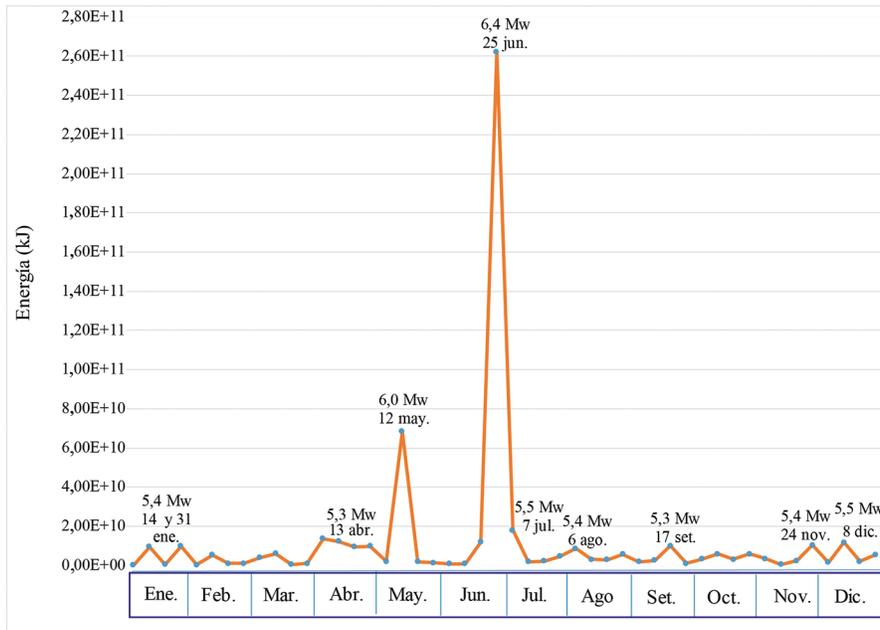


Fig. 9: Energía sísmica semanal durante el 2019. Se indican los sismos más importantes en el aporte energético del año.

Para el sismo de Armuelles se realizó el cálculo a partir del 25 de junio y hasta el 26 de junio (1 día), el 2 de julio (una semana), el 25 de julio (un mes) y el 25 de junio del 2020 (un año, Cuadro 1). Los resultados muestran que, la probabilidad de réplicas de Mw 3,0 es muy alta (99%) desde el primer día de ocurrencia del sismo principal y hasta un año después. La probabilidad estimada para sismos de mayor magnitud fue considerablemente menor, siendo de solo 7% en el primer día para un sismo de Mw > 6,0, 10% en la primera semana, 13% en el primer mes y 20% en el primer año. No hubo ninguna réplica de tal magnitud registrada, al menos durante el primer semestre luego de la ocurrencia del sismo principal.

Con respecto del rango posible de eventos pronosticados por magnitud, los resultados obtenidos concuerdan en general con la cantidad de sismos localizados por la RSN para diversos rangos temporales (Cuadro 1). Por ejemplo, un día después del sismo principal, la RSN localizó 121 sismos, de las cuales 104 tuvieron Mw ≥ 3,0, 11 Mw ≥ 4,0 y uno Mw ≥ 5,0. Para la primera semana posterior al evento, la RSN había localizado 233 réplicas y de estas 184 tuvieron Mw ≥ 3,0, 24 Mw ≥ 4,0 y 2 Mw ≥ 5,0. En el primer mes se tenían 306 réplicas, de las cuales 240 tuvieron Mw ≥ 3,0, 30 Mw ≥ 4,0 y 2 Mw ≥ 5,0. Hasta el 31 de diciembre del 2019, la RSN había localizado 509 réplicas, de los cuales: 388 tuvieron Mw ≥ 3,0, 45 Mw ≥ 4,0 y 4 Mw ≥ 5,0.

El pronóstico anual realizado para el año 2020, a partir del 1 de enero (Fig. 11), muestra que en ese año se pueden esperar con cierta seguridad más réplicas de Mw ≥ 3,0 (97% de probabilidad) y Mw ≥ 4,0 (58%) y es poco probable que ocurran eventos de M ≥ 5,0 (13%), M ≥ 6,0 (2%) y M ≥ 7,0 (1%). Los resultados muestran, además, que la probabilidad de excedencia de la IMM de V para la zona epicentral en el 2020 es de un 9% para el sector de Puerto Armuelles y 6% en partes de la península de Burica, disminuyendo hacia sectores como Golfito y Ciudad Neily en Costa Rica, y La Concepción y David en Panamá, en donde las probabilidades son de entre 1% y 3% (Fig. 12). Cabe mencionar que la tasa de sismos puede variar en caso de ocurrir sismicidad en otras fuentes distintas a la del sismo de Armuelles, como en fallas corticales o en la zona sismogénica interplacas.

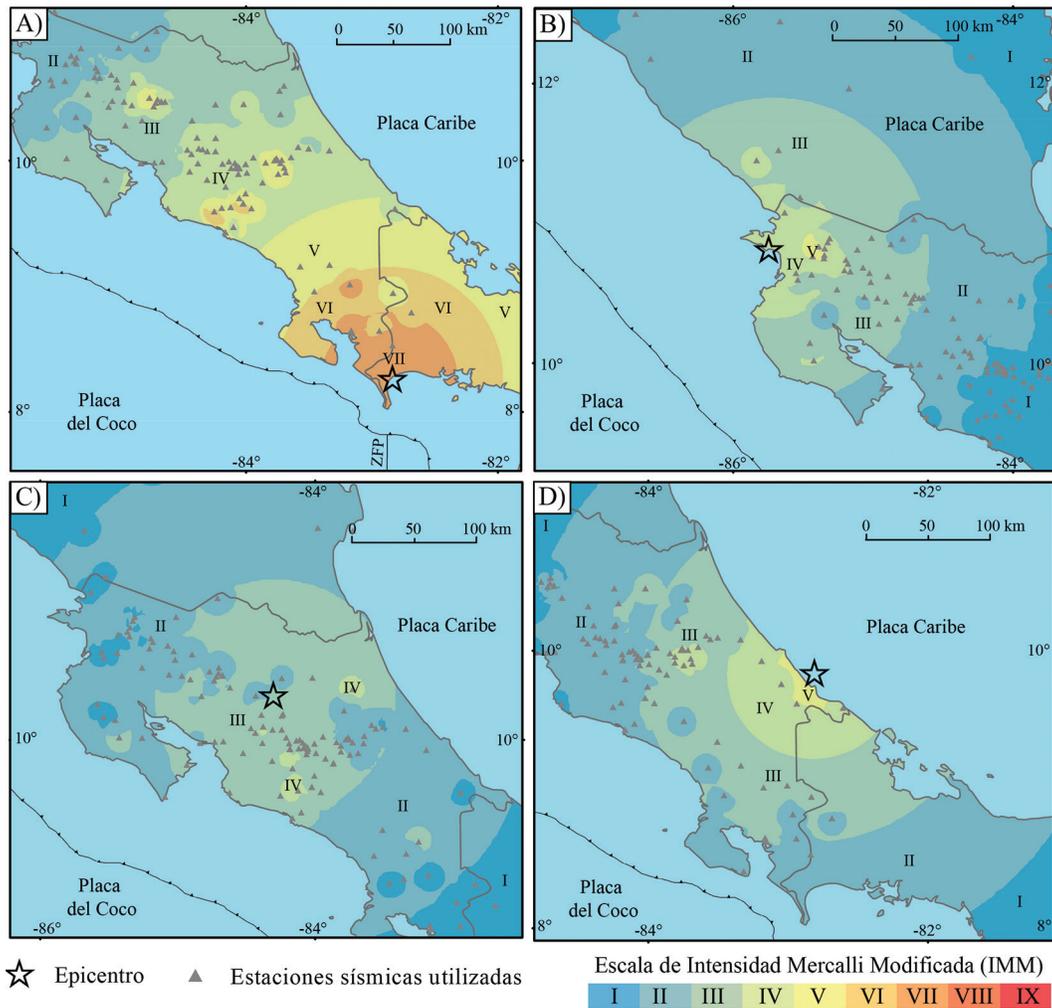


Fig. 10: Intensidades instrumentales para algunos sismos relevantes del 2019. A) Sismo de Armuelles del 25 de junio (Mw 6,4). B) Sismo del 7 de julio (Mw 5,5), cerca de la península de Santa Elena. C) Sismo del 6 de agosto (Mw 5,4), en Venecia de San Carlos. D) Sismo del 17 de setiembre (Mw 5,3), en Cahuita, Talamanca.

Cuadro 1

Pronóstico de ocurrencia de réplicas asociadas con el sismo de Armuelles del 25 de junio de 2019 (Mw 6,4).

| Intervalo del pronóstico | Mw | Número de eventos pronosticados | Rango posible de eventos pronosticados | Probabilidad de ocurrencia |
|---|-------|---------------------------------|--|----------------------------|
| 1 día 25/6/2019 23:23 al 26/6/2019 23:23 | ≥ 3.0 | 45 | 5 - 350 | > 99 % |
| | ≥ 4.0 | 4 | 0 - 35 | 91% |
| | ≥ 5.0 | 0 | 0 - 4 | 40% |
| | ≥ 6.0 | 0 | 0 - 1 | 7% |
| | ≥ 7.0 | 0 | 0 | 1% |
| 1 semana 25/6/2019 23:23 al 2/7/2019 23:23 | ≥ 3.0 | 75 | 11 - 550 | > 99 % |
| | ≥ 4.0 | 7 | 0 - 55 | 96% |
| | ≥ 5.0 | 1 | 0 - 6 | 52% |
| | ≥ 6.0 | 0 | 0 - 1 | 10% |
| | ≥ 7.0 | 0 | 0 | 1% |
| 1 mes 25/6/2019 23:23 al 25/7/2019 23:23 | ≥ 3.0 | 105 | 16 - 800 | > 99 % |
| | ≥ 4.0 | 10 | 1 - 80 | 98% |
| | ≥ 5.0 | 1 | 0 - 9 | 60% |
| | ≥ 6.0 | 0 | 0 - 2 | 13% |
| | ≥ 7.0 | 0 | 0 | 2% |
| 1 año 25/6/2019 23:23 al 26/6/2020 23:23 | ≥ 3.0 | 177 | 25 - 1600 | > 99 % |
| | ≥ 4.0 | 18 | 2 - 170 | > 99 % |
| | ≥ 5.0 | 2 | 0 - 18 | 72% |
| | ≥ 6.0 | 0 | 0 - 3 | 20% |
| | ≥ 7.0 | 0 | 0 - 1 | 3% |

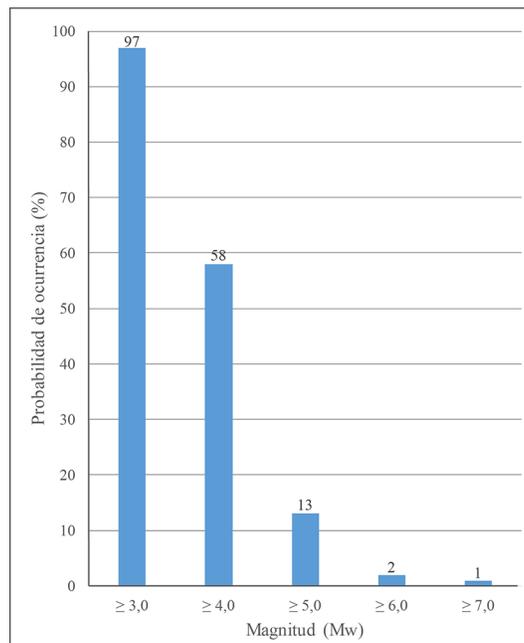


Fig. 11: Resumen del pronóstico de la probabilidad de ocurrencia de réplicas asociadas al evento de Armuelles del 25 de junio (Mw 6,4), para el año 2019. El porcentaje de probabilidad se indica sobre cada barra del histograma.

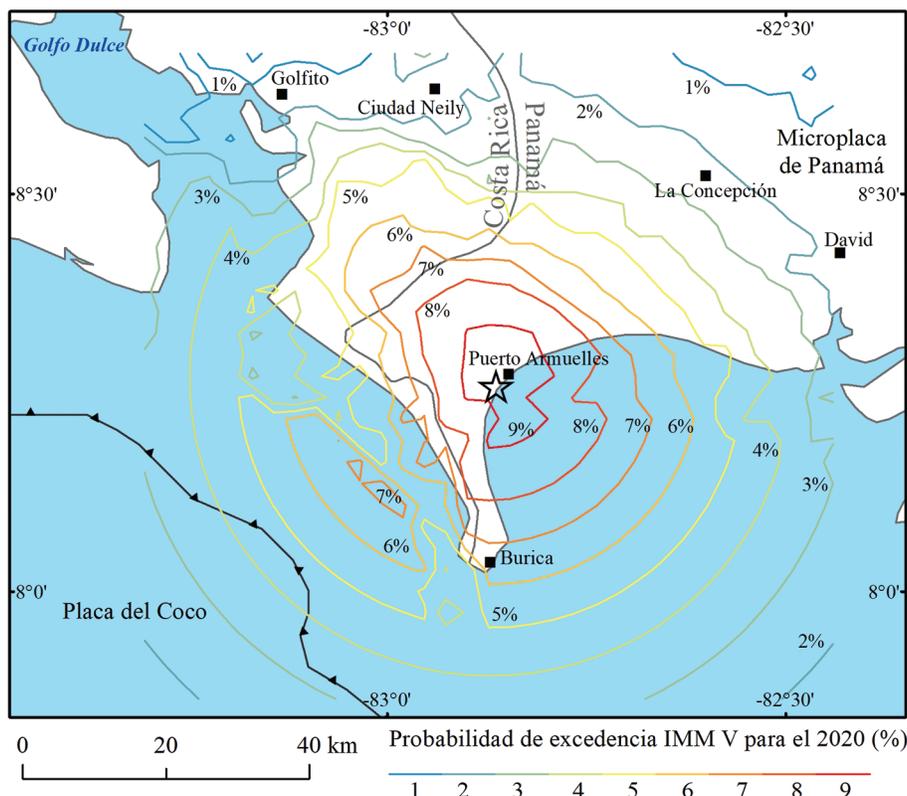


Fig. 12: Probabilidad de excedencia de la Intensidad Mercalli Modificada V para el año 2020, asociada con posibles réplicas en la zona aledaña al epicentro del sismo de Armuelles del 25 de junio (Mw 6,4).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado de los proyectos de investigación 113-B5-704 (Vigilancia Sísmica de Costa Rica) y 113-A1-716 (Apoyo de asistentes a la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica) y del programa de investigación 113-B9-911 (Red Sísmológica 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. Las siguientes personas colaboraron en la localización de sismos durante el 2019: Lic. Juan Luis Porras y Geól. Magda Taylor y los asistentes de la RSN: Brandon Acosta, Alejandro Argüello, Carolina Fallas, Daniela Manzano, Roberto Masis y María Rodríguez.

REFERENCIAS

- Adamek, S., Frohlich, C. y Pennington, W. D. (1988). Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: Constraints on microplate tectonics of the Panama region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B3), 2053-2075.
- 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.

- Field, E. H., T. H. Jordan, C. A. Cornell (2003), OpenSHA: A Developing Community-Modeling Environment for Seismic Hazard Analysis. *Seismological Research Letters*, 74(4), 406-419.
- Franco, A., Lasserre, D., Lyon-Caen, H., Kostoglodov, V., Molina, E., Guzman-Speziale... y 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* [software computacional]. Potsdam, Alemania: Gempa GmbH.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1956): Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration (second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), 105-145.
- 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., Arroyo, I. 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.
- 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. *Geofísica Internacional*, 28(3), 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.
- Ogata, Y. (1983), Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure. *Journal Physics Earth*, 31, 115-124
- Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y. y Aihara, K. (2015), Intermediate-term forecasting of aftershocks from an early aftershock sequence: Bayesian and ensemble forecasting approaches, *Journal Geophysical Research Solid Earth*, 120, 2561-2578, doi: 10.1002/2014JB011456.
- Ottmøller, L., Voss, P. y Havskov, J. (2019). SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx. Recuperado de <http://seis.geus.net/software/seisan/seisan.pdf>
- Peraldo, G. y Montero, W. (1994). *Los temblores del periodo colonial de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

- Spence, W., Sipkins, S. y Choy, G. (1989). Measuring the size of an earthquake. *Earthquakes and Volcanoes*, 21(1), 58-63.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W., 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., Wald, L., Worden, B., Goltz, J. (2003). *ShakeMap, a tool for earthquake response (No. 087-03)*. doi: 10.3133/fs08703
- 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.