



El terremoto (Mw 6.4) superficial del 18 de enero de 2021 del Cordón de las Osamentas, Precordillera Central, San Juan, Argentina

Gerardo SÁNCHEZ^{1,2}, Gustavo ORTIZ^{2,3}, Mauro SAEZ^{2,3}, Luciana LÓPEZ^{1,2}, Irene PÉREZ¹, Marcelo MORENO^{1,4}, Agustina VENERDINI^{2,3}, Martín FERNÁNDEZ², Patricia ALVARADO^{1,2,3}

¹Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES)

²Departamento de Geofísica y Astronomía, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan,

³Grupo de Sismotectónica, Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biósfera (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET– Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ), San Juan

⁴Departamento de Informática, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan

E-mail: gsanchez@inpres.gob.ar

Editor: Diego A. Kietzmann

Recibido: 12 de marzo de 2021.

Aceptado: 27 de mayo de 2021.

RESUMEN

El 18 de enero de 2021 a las 23:46 h (hora local) se produjo un terremoto superficial destructivo en la Precordillera a unos 52 km al suroeste de la ciudad de San Juan, Argentina. Utilizando 46 estaciones sísmicas se determinan parámetros sísmicos para la fuente (hipocentro: 31.850°S, 68.936°O, profundidad 5.6 km; magnitud Mw 6.4; momento sísmico M0 6.06x10¹⁸ Nm; intensidad máxima Mercalli Modificada VII en La Rinconada y Carpintería y; mecanismo focal de rumbo dextral según falla orientada en sentido NE-SO con una pequeña componente inversa). Estos resultados y otros preliminares de más de 940 réplicas (420 con magnitud ML ≥ 2.5 en 30 días) acuerdan con la activación de una estructura en el basamento del terreno Cuyania bajo la Precordillera Central y sin evidencia de ruptura superficial cosísmica.

Palabras clave: falla de basamento, Precordillera Central, terremoto intraplaca cortical.

ABSTRACT

The shallow (Mw 6.4) earthquake on 18 January, 2021 in Cordón de las Osamentas, Central Precordillera, San Juan, Argentina.
A shallow damaging earthquake on 18 January 2021 at local time 23:46 h (UTC -3) had epicenter in the Precordillera at about 52 km to the SW of San Juan city, Argentina. Using 46 seismic stations, seismic parameters for the source (hypocenter: 31.850°S, 68.936°W, 5.6 km focal depth; magnitude Mw 6.4; seismic moment M0 6.06 x 10¹⁸ Nm; maximum Modified Mercalli seismic intensity VII at La Rinconada and Carpintería; focal mechanism strike-slip, SW-NE trending fault with dextral movement and a small reverse component). These results and those preliminary from more than 940 aftershocks (420 with magnitude ML ≥ 2.5 in 30 days) agree with the activation of a basement structure of the Cuyania terrane beneath the Precordillera Central, without coseismic surface rupture evidence.

Keywords: basement fault, Precordillera Central, crustal intraplate earthquake

INTRODUCCIÓN

El retroarco andino entre 28°S y 33°S es sísmicamente activo debido a la convergencia casi este-oeste entre la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana a una velocidad relativa de ~7.5 cm/año (DeMets et al. 2010). Ello denota subducción con la losa oceánica en posición horizontal a ~100 km de profundidad por 250-300 km aproximadamente en sentido este-oeste en el centro-oeste de Argentina; hacia el este de 67.5°O, reasume su descenso en el manto (Barazangi e Isacks 1976, Cahill e Isacks 1992, Gutscher et al. 2000, Pardo et al. 2002 y 2004, Anderson et al. 2007, Espurt et al. 2008, Alvarado et al. 2009, Gans et al. 2011, Portner et al. 2020, Linkimer et al. 2020). El proceso de horizontalización de la placa de Nazca desde hace aproximadamente 8-10 Ma (Kay y Abbruzzi 1996, Ramos et al., 2002) ha sido coetáneo a la generación de la faja plegada y corrida de piel fina de Precordillera y al levantamiento de los bloques de basamento de las Sierras Pampeanas en una amplia región del antepaís andino. La sismicidad de profundidad intermedia a aproximadamente 31°S es muy abundante (80 %), predice su correlación con la proyección de la dorsal asísmica de Juan Fernández bajo el continente (ej. Alvarado et al. 2009). Sin embargo, los terremotos más destructivos de tamaño moderado a grande se generan dentro de la placa superior Sudamericana que produce sismicidad superficial (20 %) con profundidades focales menores que 25 km. Entre 1894 y 2020 la provincia de San Juan ha sido epicentro de cinco terremotos superficiales con intensidades máximas Mercalli Modificada (IMM) mayores que VI, con tres de ellos (1894, 1944 y 1952) localizados en la Precordillera. Estos terremotos registraron intensidades máximas IMM de IX (CERESIS 2011, INPRES 2021a) y provocaron considerables pérdidas humanas y económicas. Así, los mapas de zonificación sísmica del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), muestran al sector del sur de la provincia de San Juan y norte de la provincia de Mendoza dentro de la Zona Sísmica 4, representando al valor más elevado del país (INPRES 2021a).

Los estudios sismológicos de los grandes terremotos ocurridos en la provincia de San Juan durante el siglo pasado asociados a la Precordillera Oriental y las Sierras Pampeanas Occidentales, evidencian características diferentes para sus fuentes generadoras y existe un alto grado de dificultad para asociar las rupturas superficiales cosísmicas que predicen las leyes empíricas, observadas inmediatamente luego de ocurridos los grandes terremotos. En varios casos se observaron efectos secundarios para estos terremotos: procesos de licuefacción de suelos, tales como volcanes de arena y sur-

gencia de agua, también deslizamientos de laderas especialmente en la sierra de Pie de Palo (ej. Terremoto de Caucete, 1977) (INPRES 2021b).

En este trabajo se presentan los parámetros sísmicos del terremoto de San Juan del 18/01/2021 e interpretan a los mismos dentro de las características sismotectónicas de la Precordillera sanjuanina provenientes de estudios previos. También se describen algunos efectos del terremoto observados en diferentes sectores del sur de la provincia de San Juan, principalmente en las localidades de Carpintería y La Rinconada, situadas a 36 kilómetros de distancia del epicentro.

MARCO GEOLÓGICO

La faja plegada y corrida de la Precordillera se divide de oeste a este en Precordillera Occidental, Central y Oriental en base a sus depósitos, tiempo y estilo de deformación. La Precordillera Occidental y Central, caracterizadas por una deformación epidérmica, corresponden a una serie de sierras principalmente de rocas paleozoicas y valles lineales delimitados por fallas inversas buzantes al oeste que bordean las mismas con rumbo aproximadamente N-S. En contraste, la Precordillera Oriental está formada por rocas del Paleozoico, Triásico y Cenozoico con fallas inversas buzantes al este que involucran al basamento cristalino en su deformación (Heim 1952, Ortiz y Zambrano 1981). Este sector exhibe dos sistemas de deformación de vergencias opuestas de acuerdo a la secuencia estratigráfica (Zapata y Allmendinger 1996) conformando una zona triangular de piel gruesa, que activamente consume a la deformación de piel fina.

Si bien no se conocen afloramientos de basamento precámbrico en el ámbito de la Precordillera, el mismo ha sido caracterizado a partir de evidencias indirectas provenientes de xenolitos extraídos de rocas volcánicas miocenas vinculadas a los centros volcánicos de Ullum, cerro Blanco, Ciénaga de Gualilán y Tocota (Leveratto 1976). Estudios geocronológicos de U/Pb en circones arrojan una edad grevilliana para el basamento de la Precordillera, coincidente con parte de las rocas que conforman la sierra de Pie de Palo (Kay et al. 1996).

Dentro del corredor tectónico Zonda-Maradona-Pedernal es posible reconocer sistemas de fallas con actividad cuaternaria de expresión superficial sobre la ladera este del Cordón de Las Osamentas (Fig. 2). Resaltan los sistemas de fallas de Las Osamentas, Maradona y Papagayos. Estos sistemas de fallamiento irrumpen en el piedemonte oriental del Cordón de Las Osamentas con escarpas de cara libre orientadas al este, con rumbo submeridional y buzamientos variables me-

nores a 40° (Perucca et al. 2013). Estos sistemas de fallas afectan las unidades de abanicos aluviales pleistocenos, colocando rocas del Pleistoceno temprano sobre depósitos de abanicos aluviales del Pleistoceno tardío a Cuaternario (Lara et al. 2018).

Sin embargo, un aspecto interesante de la deformación de la Precordillera, desarrollada principalmente durante el Mioceno, es que ocurre en una zona que ha registrado una prolongada colisión paleozoica caracterizada por la acreción de diversos terrenos desde el Cámbrico hasta el Ordovícico tardío (Ramos, 1988). Como resultado de estas acreciones, existen estructuras heredadas en el basamento cristalino por debajo de la Precordillera (Zapata 1998). La reactivación de estas estructuras a niveles de corteza media y el control ejercido por la deformación neógena ha sido observada para sismos de magnitudes pequeñas a moderadas (Alvarado et al. 2005 y 2009, Rivas et al. 2019, Venerdini et al. 2020).

EL TERREMOTO DEL 18 DE ENERO DE 2021

El terremoto del 18 de enero de 2021 ocurrió a las 23:46:20.1 hora local (02:46:20.1 UTC del 19/01/2021) con epicentro localizado a 52 km al suroeste de la ciudad de San Juan, Argentina y foco superficial; fue destructivo a pesar de su poca duración (5 s) de la función de fuente (tiempo en el que se registra la mayor liberación de energía sísmica). Posteriormente, se han registrado más de 940 réplicas con magnitudes entre 1.5 y 5.0 (420 con ML ≥ 2.5 durante el primer mes) (INPRES 2021a) (Fig. 1). Inmediatamente después del sismo principal, en cercanías de la localidad de Carpintería a 30 km al sur de la ciudad de San Juan, testigos observaron surgencias de agua y formación de pequeños volcanes de arena concomitantes a la ocurrencia del sismo. Se reportaron

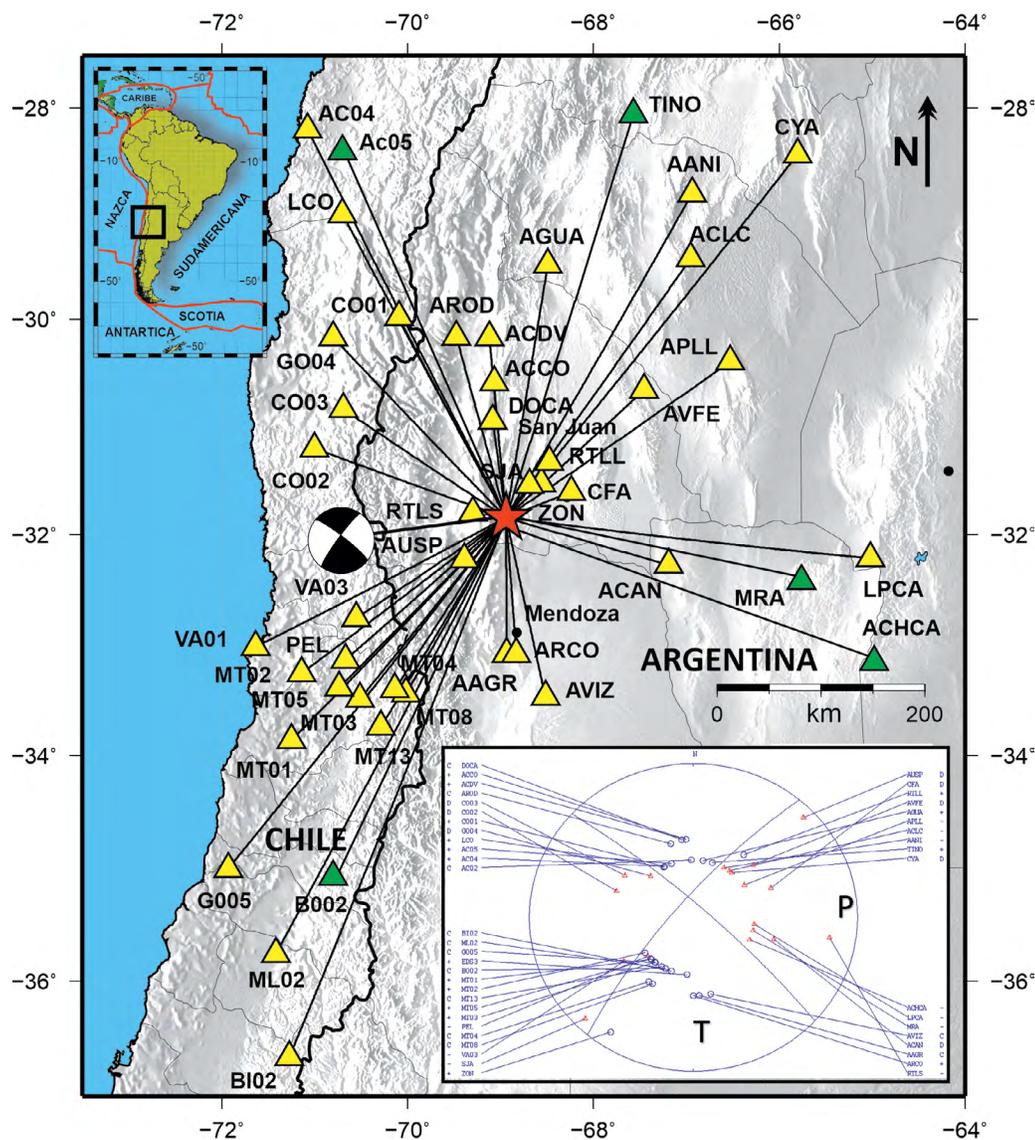


Figura 1. Los triángulos representan las estaciones sísmológicas con sus siglas en mayúsculas utilizadas en la localización sísmica (en amarillo) y en la determinación del mecanismo focal (en amarillo y verde). El recuadro inferior derecho muestra la solución de mecanismo focal utilizando los primeros arribos de ondas P dilatacionales (D-triángulos rojos) y compresionales (C-círculos azules), con indicación de los planos de fallamiento y los ejes de presión (P) y tensión (T) para la proyección estereográfica horizontal de la semiesfera inferior.

y evidenciaron colapsos de viviendas de adobe, derrumbes parciales y otros daños serios principalmente en las localidades de La Rinconada, Carpintería, Los Berros y Va. Media Agua pertenecientes a los Departamentos de Pocito y Sarmiento de la provincia de San Juan. También se produjeron grietas distensivas a lo largo del eje de la Ruta Nacional 40 a la altura de estas localidades, que provocaron la interrupción del tráfico normal. La región epicentral se corresponde con una zona de estructuras geológicas compleja, en la que interactúan corrimientos con orientación general norte-sur (Ahumada y Costa 2009, Perucca et al. 2013, Lara et al. 2018). Cabe resaltar que esta región, forma parte de la zona de contacto entre la faja plegada y corrida epidérmica de Precordillera Central y la faja plegada y corrida de piel gruesa de Precordillera Oriental, dando origen a un sector intensamente plegado y fallado debido al acortamiento de la corteza levantada durante las últimas etapas de la deformación andina (Levina et al. 2014).

Efectos secundarios desencadenados por el terremoto

Los efectos secundarios desencadenados por el terremoto en la localidad de Carpintería (Fig. 2), se asocian a fenómenos de licuefacción de suelos, con generación de sistemas de grietas con dirección N80°E y N26°E, con un ancho de la zona afectada de 15 m y una longitud mapeable por tramos de 3 a 4 km, presentando en algunos casos, una apertura de ~ 5 cm y profundidades de 2 a 3 m. En cercanía a esta localidad, ocurrió el agrietamiento de la RN 40. Se observaron además, grietas menores cortando transversalmente a las principales norte-sur. Cabe destacar que el agrietamiento en la RN 40 puede deberse a que la misma ha sido construida en buena parte sobre rellenos artificiales, los que a su vez se encuentran sobre un sedimento natural que se corresponde con la planicie de inundación del río San Juan (Suvires 2004). Estos suelos generalmente se encuentran saturados de agua y ante la sacudida generada por el paso de las ondas sísmicas tienen una respuesta de amplificación, desencadenando fenómenos de licuefacción, asentamientos diferenciales o subsidencias localizadas. Este comportamiento sería responsable del agrietamiento de la carretera o de los desplazamientos laterales que desarrollaron rupturas severas de la superficie de rodamiento incluyendo el relleno.

Otros procesos de remoción en masa y caída de bloques, indicativos de la inestabilidad de laderas, fueron reconocidos en el sector norte del corredor tectónico Maradona-Pedernal, específicamente en los puestos de Maradona y Papagayos, a una distancia menor que 15 km hacia el norte del epicentro

(Fig. 2). Estos puestos se ubican sobre la terraza generada a la espalda de la escarpa tectónica de los corrimientos Maradona y Papagayos, respectivamente. Allí se advierte la generación de grietas circulares en depósitos finos asociados a las vertientes de aguas permanentes. La saturación de los suelos en estas localidades y pendientes de laderas cercanas al 9%, generarían las condiciones propicias para estos procesos de remoción en masa observados. Además, se generó la caída de grandes bloques sobre las carreteras principales de las localidades de Zonda y Pedernal, a 38 y 26 km hacia el noreste y sureste del epicentro, respectivamente.

ANÁLISIS SISMOLÓGICO

Para la localización hipocentral del sismo principal y sus réplicas se utilizaron las trazas sísmicas registradas por 41 estaciones sismológicas pertenecientes a la Red Nacional de Estaciones Sismológicas (RNES) del INPRES, al Observatorio Sismológico de CONICET (CIGEOBIO-UNSJ) y otras reportadas por *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS, EEUU) localizadas en Chile y Argentina (Fig. 1).

Se utilizó el software Hypocenter a través del paquete SEISAN v11 (Ottemöller et al. 2018) para el procesamiento de los datos sismológicos. Se identificaron en los sismogramas los tiempos de arribo de ondas P y S. Se aplicó ponderación por calidad de acuerdo a los residuales de tiempo y a la distancia epicentral (esta metodología puede seguirse con más detalle en Venerdini et al. 2016, 2019 y 2020, y Rivas et al. 2019). Se utilizó el modelo de estructura sísmica cortical local (Venerdini et al. 2016) determinado a partir de la inversión de tiempos de viajes de ondas P y ondas S independientes, consistente en 5 capas intracorticales apoyadas sobre la discontinuidad de Mohorovicic situada a 47 km de profundidad. La localización del terremoto del 18 de enero de 2021 consideró un total de 53 lecturas de tiempos provenientes de 34 fases P, 12 fases S y 7 diferencias S-P, que satisfacían los criterios de calidad. El hipocentro obtenido se halla en 31.850°S, 68.936°O y profundidad focal 5.6 km (Fig. 1). El error rms (error cuadrático medio entre la diferencia de tiempo calculado y observado) es de 0.46 s, la falta de cobertura acimutal (GAP primario) de estaciones sismológicas es de 61° y la secundaria de 131° (igual que el GAP primario pero, omitiendo el registro de una estación cualquiera de las que fueron consideradas en la localización del sismo). La solución hipocentral dista 35 km de la estación sismológica más cercana, a menos de 75 km de distancia de 6 estaciones sismológicas, a menos de 150 km de distancia de 10 estaciones sismológicas y a menos de 250

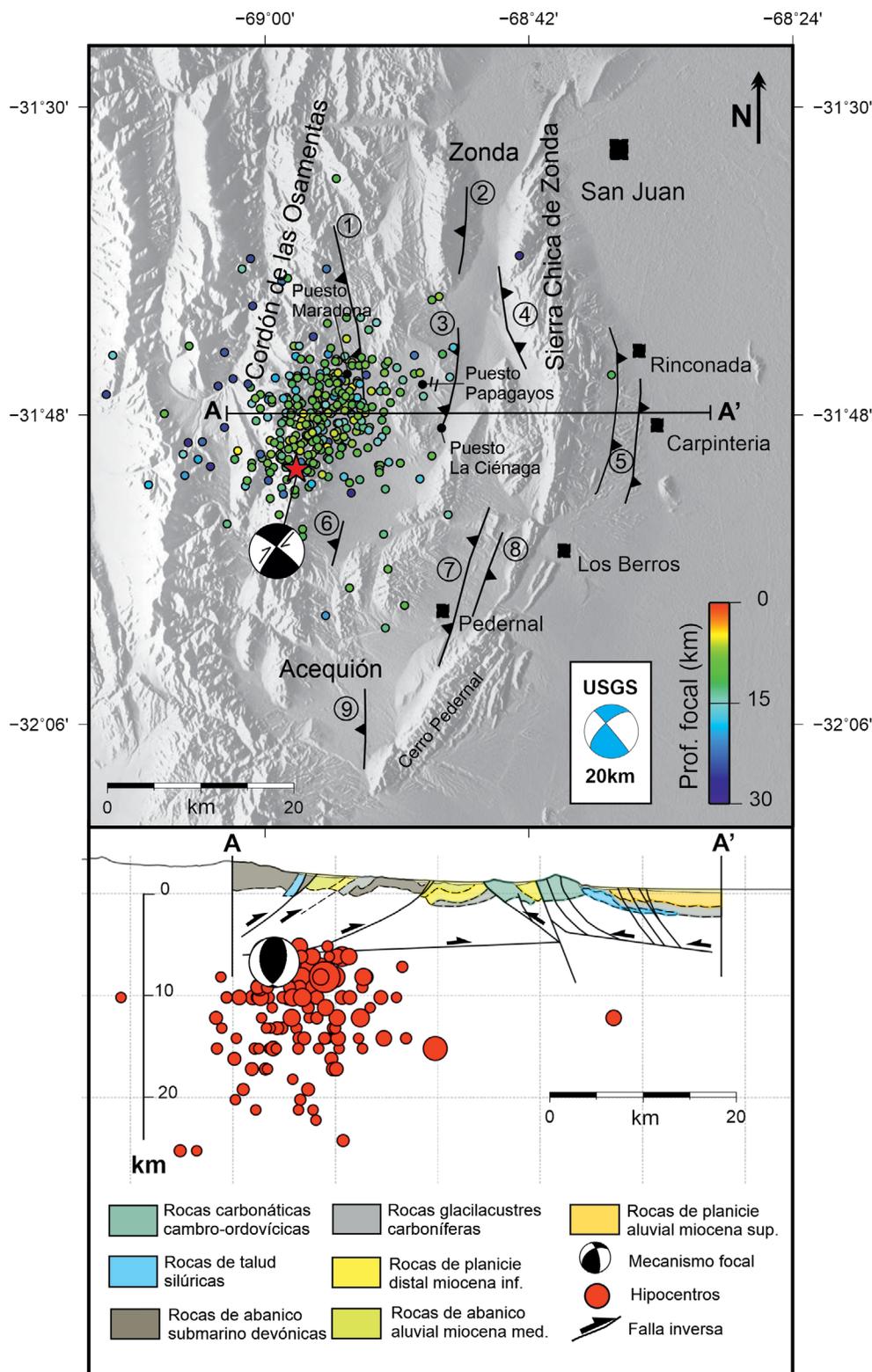


Figura 2. Mapa en planta que muestra la sismicidad superficial asociada al terremoto Mw 6,4 del 18 de enero de 2021, incluyendo al sismo principal (estrella) con su solución de mecanismo focal (véase recuadro de la Fig. 1) y 420 réplicas con $M_L \geq 2,5$ registradas durante los siguientes 30 días. Para comparar, se muestra en color celeste la solución global del USGS (EEUU) con profundidad focal de 20 km. También se indican fallas con actividad cuaternaria: 1) falla Maradona; 2) sistema falla Cerro Zonda Sur; 3) sistema de falla Papagayos; 4) sistema de falla Zonda; 5) sistema de falla La Rinconada; 6) falla Las Osamentas; 7) falla La Chilca, 8) sistema de falla El Mocho; 9) falla Acequión. (abajo): Sección vertical localizada según el perfil A-A' en el mapa de planta. En este caso el mecanismo focal del sismo principal de 2021 se muestra en proyección estereográfica vertical de la semiesfera posterior. (véanse en el texto principal las citas de las referencias geológicas).

km distancia de 25 estaciones sismológicas.

Para la validación de la localización sísmica, se calculó la métrica de la red (ΔU) (Bondár y McLaughlin 2009) y se comparó con la clasificación *Ground Truth GT* (Bondár et al. 2004). El parámetro ΔU normalizado es sensible a la cantidad

de estaciones y su distribución de las mismas (acimut y distancia) con respecto al epicentro; ΔU es igual a 0 para una red sísmica homogéneamente distribuida alrededor del epicentro, o bien ΔU es igual a 1 para la situación más desfavorable, suponiendo que el conjunto de estaciones se encuentre con

el mismo acimut con respecto al epicentro. Para el terremoto de San Juan del 18 de enero de 2021 se obtuvo una métrica $\Delta U=0.196$. El valor hallado para la métrica permite clasificar a la localización resuelta, como un evento sísmico GT5 asegurando un error espacial real igual o menor a 5 km con un 95 % de certeza para el epicentro y de 7 km con un 90% de certeza para la profundidad focal; cabe destacar que GT refiere a la definición de *Ground Truth* dada por Bondár et al. (2004) para clasificar eventos sísmicos según su precisión de localización real (no matemática) con un 95 % de certeza, siendo GT0 una clasificación asignada a una explosión artificial sin error en su ubicación y GT25 un sismo con error de 25 km en su localización (Bondár et al. 2004 y, Bondár y McLaughlin 2009). La localización final obtenida corresponde a 31.850°S, 68.936°O y profundidad focal de 5.6 km. Se destaca que la localización sísmica determinada originalmente, se procesó nuevamente con un modelo de velocidades sísmicas regional de Sánchez et al. (2013) y también, se evaluó con el modelo global IASPEI91 (Kennett y Engdahl 1991); en ambos casos el epicentro queda determinado dentro de un radio de 3 km con respecto a la solución propuesta por este trabajo. Se calcularon 940 réplicas con magnitud ML entre 1.5 y 5.0 (420 con magnitud $ML \geq 2.5$) durante los meses de enero y febrero, y localizadas en un radio de ~20 km con respecto al epicentro del sismo principal. La distribución de réplicas muestra que más del 90% de su concentración se ubica al norte del foco del terremoto del 18/01/2021, presentando una orientación aproximada NE-SO (Fig. 2).

Se estimó la magnitud momento (M_w) para el sismo principal y sus réplicas utilizando el paquete de programas SEISAN v11 (Ottemöller et al. 2018) siguiendo la metodología detallada en Venerdini et al. (2019, 2020) y, utilizando un valor de atenuación regional $Q_s = 400$ y de atenuación local cerca de la superficie de $\kappa = 0.02$ (Sánchez et al. 2013), entre otros parámetros. La magnitud espectral estimada es de $MW 6.4 \pm 0.1$ correspondiente a un momento sísmico $M_0 6.06 \times 10^{18}$ Nm.

El mecanismo focal calculado para el sismo principal se determinó considerando 46 polaridades de primeros arribos de ondas P (Fig. 1). Así, se identificaron y separaron polaridades positivas (movimiento compresivo) de aquellas negativas (movimiento distensivo) para cada estación sísmica situada a una determinada distancia epicentral y acimut respecto del epicentro; además, se clasificaron a las mismas como emergentes o impulsivas. Se utilizó el algoritmo FOCMEC (Snoke 2003), dentro del paquete SEISAN v11 (Ottemöller et al. 2018). Así, se obtuvieron acimut (Az), buzamiento (Bz) y ángulo del vector desplazamiento (Rk) para dos posibles planos de fallamiento del mecanismo focal. En este trabajo se ha

adoptado la convención de Aki y Richards (1980) que reporta el acimut del plano de falla con buzamiento comprendido entre 0° y 90°, medido para el bloque techo situado siempre a la derecha cuando se mira en dirección al acimut y, el ángulo del vector desplazamiento correspondiente al ángulo del movimiento del bloque techo respecto al bloque piso medido sobre el plano de falla desde la dirección de acimut. El conjunto de soluciones incluyó 612 posibilidades con una media de $Az = 219^\circ$, $Bz = 78^\circ$ y $Rk = 172^\circ$ (Fig. 2), y desviaciones estándar de 3°, 3° y 4°, respectivamente.

La determinación sísmica del sismo principal ha sido comparada con la solución del USGS (EEUU) la cual utiliza otro tipo de ondas sísmicas y modelos de velocidades sísmicas globales (Fig. 2). El mecanismo focal es similar al determinado en este trabajo y la profundidad focal mayor, de unos 20 km. Esta diferencia muestra la importancia de contar con redes sísmicas y modelos de estructuras de velocidades locales que mejoran las observaciones sísmicas globales aunque requieren de mayor análisis y procesamiento.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El sismo principal se localizó en 31.850°S y 68.936°O (5 km de error) y 5.6 km de profundidad focal (con un error de 7 km); las réplicas se distribuyen hacia el norte y noreste del epicentro del sismo principal con notoria ausencia hacia el sur del epicentro (Fig. 2). Estas localizaciones sugieren la ocurrencia del sismo en la porción austral de la Precordillera Central y por debajo del despegue sugerido por Cardó et al. (2020) alrededor de los 8 km de profundidad, desencadenando rupturas de basamento puestas en evidencia por la gran cantidad de réplicas, las cuales se posicionan en su mayoría a profundidades mayores o iguales que la del sismo principal. Este análisis indica que no es posible asociar el evento sísmico principal y su conjunto de réplicas registradas hasta ahora, con los sistemas de fallamiento neotectónicos expuestos en superficie y en las cercanías, tales como los de Las Osamentas, Maradona y Papagayos. En forma similar, estudios de la sismicidad temporal entre 2008 y 2010 en la Precordillera han identificado un nivel medio de corteza continental sísmicamente activo que estaría comprendido a profundidades entre zonas de despegue (Rivas et al. 2019, Venerdini et al. 2020). Esto evidencia la reactivación de estructuras de basamento formadas durante el Paleozoico en el terreno de Cuyania (Ramos et al. 1988) con potencialidad de generación de sismos de tamaño moderado a grande, a poca profundidad focal (5-15 km) como el terremoto $M_w 6.4$ del 18/01/2021. Este terre-

moto representa el más grande y destructivo (IMM máxima de VII) en las últimas cuatro décadas caracterizado cuantitativamente con su secuencia de réplicas. Se prevé que las mismas van a continuar y que un análisis más refinado que incluya la inspección manual de miles de lecturas de arribos de ondas sísmicas podrá disminuir los errores hipocentrales. No obstante, la distribución de las réplicas determinada por este trabajo sugiere una correspondencia con el plano de falla de orientación según $Az 219 \pm 3^\circ$, $Bz 78 \pm 3^\circ$ al noroeste y $Rk 172 \pm 4^\circ$. Esto induce a proponer la reactivación de una estructura de basamento no reconocida en superficie, orientada con sentido NE-SO, que se corresponde con una zona de debilidad del basamento de Cuyania.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por el uso de los datos al Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) y al Observatorio Sismológico de CONICET-CIGEOBIO (CONICET – UNSJ). Asimismo, al rápido procesamiento de datos de réplicas del Departamento Investigaciones Sismológicas y al mantenimiento de la red del Laboratorio Sismológico del INPRES.

El editor desea agradecer la labor de revisión del Dr. Víctor A. Ramos.

REFERENCIAS

- Ahumada, E.A. y Costa, C.H. 2009. Deformación cuaternaria en la culminación norte del corrimiento las Peñas, frente orogénico andino, Precordillera Argentina. 12° Congreso Geológico Chileno, CD-Rom: 4 p., Santiago de Chile.
- Aki, K. y Richards, P.G. 1980. Quantitative seismology: Theory and methods. W.H. Freeman and Co., 932p., New York.
- Alvarado, P., Beck, S., Zandt, G., Araujo, M. y Triep, E. 2005a. Crustal deformation in the south-central Andes backarc terranes as viewed from regional broad-band seismic waveform modelling. *Geophysical Journal International* 163(2): 580-598.
- Alvarado, P., Pardo, M., Gilbert, H., Miranda, S., Anderson, M., Saez, M. y Beck, S.L. 2009b. Flat-slab subduction and crustal models for the seismically active Sierras Pampeanas región of Argentina. En: Kay, S.; Ramos, V.A.; Dickinson, W. (eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America, Memoria 204, 261-278, Boulder.
- Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G. y Beck, S. 2007. Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca plate, central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International* 171 (1): 419-434.
- Barazangi, M. e Isacks, B. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology* 4 (11): 686-692.
- Bondár, I., Myers, S.C., Engdahl, E.R. y Bergman, E.A. 2004. Epicentre accuracy based on seismic network criteria. *Geophysical Journal International* 156(3): 483-496.
- Bondár, I. y McLaughlin, K.L. 2009. A new ground truth data set for seismic studies. *Seismological Research Letters* 80(3): 465-472.
- Cahill, T. e Isacks, B. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research* 97 (B12): 17503-17529.
- Cardó, R., Díaz, I., Bordonaro, O. y Cardinali, A. 2020. Hoja Geológica 3169-34 Los Berros, Provincia de San Juan. Boletín 397. 36 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.CERESIS. 2011. Centro Regional de Sismología para América del Sur. Intensidades sísmicas para los terremotos destructivos de Argentina. www.ceresis.org.
- DeMets, C., Gordon, R. y Argus, D. 2010. Geological current plate motions. *Geophysical Journal International* 181: 1-80.
- Espurt, N., Funicello, F., Martinod, J., Guillaume, B., Regard, V., Faccenna, C. y Brusset, S. 2008. Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. *Tectonics* 27(3): TC3011.
- Gans, C., Beck, S., Zandt, G., Gilbert, H., Alvarado, P., Anderson, M. y Linkimer, L. 2011. Continental and oceanic crustal structure of the Pampean flat slab region, western Argentina, using receiver function analysis: new high-resolution results. *Geophysical Journal International*. 186: 45-58.
- Gutscher, M.A., Maury, R., Eissen, J. P. y Bourdon, E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology* 28: 535-538.
- Heim, A. 1952. Estudios tectónicos en la Precordillera de San Juan, Los ríos San Juan, Jáchal y Huaco. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 7(1): 11-70.
- INPRES 2021a: <https://www.inpres.gob.ar>
- INPRES 2021b: Imágenes de terremotos históricos. Terremoto de Cauce del 23 de noviembre de 1977. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. http://contenidos.inpres.gob.ar/alumnos/terrem_cauce-77.
- Kay, S.M., Orrell, S. y Abruzzi, J.M. 1996. Zircon and whole rock Nd-Pb isotopic evidence for a Grenville age and Laurentia origin for the basement of the Precordilleran terrane in Argentina. *Geological Society of America South-Central Section, Abstracts with Programs* 28(1): 21-22, Austin
- Kay, S.M., y Abbruzzi, J.M. 1996. Magmatic evidence for Neogene lithospheric evolution of the central Andean "flat-slab" between 30 S and 32 S. *Tectonophysics* 259(1-3): 15-28.
- Kennett, B.L.N. y Engdahl, E.R. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International* 105(2): 429-465.
- Lara, G., Perucca, L., Rothis, M., Pantano, A., y Sáez, M. 2018. Actividad tectónica cuaternaria del Sistema de Falla Maradona, Precordillera

- Central, Argentina. *Andean Geology* 45(2): 145-160.
- Leveratto, M.A. 1976. Edad de intrusivos cenozoicos en la Precordillera de San Juan y su implicancia estratigráfica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31(1): 53-58.
- Levina, M., Horton, B.K., Fuentes, F. y Stockli, D.F. 2014. Cenozoic sedimentation and exhumation of the foreland basin system preserved in the Precordillera thrust belt (31–32° S), southern central Andes, Argentina. *Tectonics* 33(9): 1659-1680.
- Linkimer, L., Beck, S., Zandt, G., Alvarado, P., Anderson, M., Gilbert, H. y Zhang, H. 2020. Lithospheric structure of the Pampean flat slab region from double-difference tomography. *Journal of South American Earth Sciences* 97: 102417.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. 1981. La provincia geológica de Precordillera Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Ottmöller, L., Voss, L., y Havskov, J. 2018. Seisan earthquake analysis software for windows, solaris, linux and macosx. <http://seisan.info>.
- Pardo, M., Comte, D. y Monfret, T. 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences* 15(1): 11-22.
- Pardo, M., Monfret, T., Vera, E., Yañez, G. y Eisenberg, A. 2004. Flat-slab to steep subduction transition zone in central Chile-western Argentina: body waves tomography and state of stress. *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, series 85(47), Fall Meeting supplement, abstract S51B-0164.
- Perucca, L.P., Audemard, F., Pantano, A., Vargas, H., Avila, C., Onorato, M.R. y Esper, M.Y. 2013. Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre precordillera central y oriental, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70(2): 291-302.
- Portner, D.E., Rodríguez, E.E., Beck, S., Zandt, G., Scire, A., Rocha, M.P. y Alvarado, P. 2020. Detailed structure of the subducted Nazca slab into the lower mantle derived from continent-scale teleseismic P wave tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125(5): e2019JB017884.
- Ramos, V.A. 1988. The tectonics of the Central Andes; 30° to 33° S latitude. *Geological Society of America, Special Paper* 218: 31- 54.
- Ramos, V., Cristallini, E. y Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Rivas, C., Ortiz, G., Alvarado, P., Podesta, M. y Martin, A. 2019. Modern crustal seismicity in the northern Andean Precordillera, Argentina. *Tectonophysics*. 762: 144-158.
- Sánchez, G., Recio, R., Marcuzzi, O., Moreno, M., Araujo, M., Navarro, C., Suárez, C., Havskov, J. y Ottemöller, L. 2013. The Argentinean national network of seismic and strong-motion stations. *Seismological Research Letters* 84 (5): 729-736.
- Snoke, J.A. 2003. FOCMEC: FOCal MECHANism Determinations. Virginia Tech, 1629-1630, Blacksburg.
- Suvires, G.M. 2004. Distribución de los suelos en función del relieve y de la neotectónica en la región sureste de la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(3): 376-384.
- Venerdini, A., Sánchez, G., Alvarado, P., Bilbao, I. y Ammirati, J.B. 2016. Nuevas determinaciones de velocidades de ondas P y ondas S para la corteza sísmica del terreno Cuyania en el retroarco andino. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(1): 59-71.
- Venerdini, A., López, L., Orozco, P., Sánchez, G., Alvarado, P., Perucca, L. y Galván, R. 2019. Parametrización sismológica del sismo del 30 de noviembre de 2018, Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76(3): 173-182.
- Venerdini, A., Alvarado, P., Ammirati, J.B., Podesta, M., López, L., Fuentes, F., Linkimer, L. y Beck, S. 2020. Crustal seismicity in the Andean Precordillera of Argentina using seismic broadband data. *Tectonophysics*: 228450.
- Zapata, T.R., y Allmendinger, R.W. 1996. Thrust-front zone of the Precordillera, Argentina: a thick-skinned triangle zone. *AAPG Bulletin* 80(3): 359-381.
- Zapata, T.R. 1998. Crustal structure of the Andean thrust front at 30° S latitude from shallow and deep seismic reflection profiles, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 11(2): 131-151.