



Caracterización del terremoto del 29 de noviembre de 2020 del Noroeste Argentino (límite Salta-Jujuy)

Bruno COLAVITTO¹, Pablo A. BLANC¹, Julián OLIVAR², Juan Manuel ALCACER¹ y Laura PERUCCA¹

¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGENIO, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.

² Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN).

Email: bcolavitto@gl.fcen.uba.ar

Editor: María Paula Iglesia Llanos

Recibido: 4 de enero de 2021

Aceptado: 10 de marzo de 2021

RESUMEN

Un sismo de Mw 5.9 se registró 34 km al este de Humahuaca, cuyo mecanismo focal se asocia a una falla normal de orientación ENE. Registros audiovisuales mostraron numerosas caídas de rocas inducidas por el evento. Se discuten las principales características del sismo y la remoción en masa asociada.

Palabras clave: sismicidad, caída de rocas, falla normal.

ABSTRACT

Characterization of the 29th November Northwest Argentina earthquake.

A Mw 5.9 earthquake was recorded 34 km eastwards from Humahuaca (Argentina) associated with a ENE-trend normal fault type focal mechanism. Local videos showed several rockfalls produced by the event. The main characteristics of this earthquake and the related mass-wasting processes are discussed.

Keywords: seismicity, rockfalls, normal fault.

INTRODUCCIÓN

El domingo 29 de noviembre de 2020 a las 13:40 hora local, con epicentro localizado a 34 km al este de Humahuaca (-23,26°S - 65,03°O), tuvo lugar un sismo de Mw 5.8 y profundidad 8 ± 1.8 km según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS 2021) o Mw 5.9 y profundidad 17 km según el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES 2021) (Fig. 1). No se reportaron heridos ni pérdidas económicas considerables asociadas a este evento sin embargo cobró

relevancia dada las imágenes y videos que circularon en medios de comunicación y redes sociales mostrando distintos derrumbes en los cerros de la región, incluso a decenas de kilómetros del epicentro. La presente nota resume la historia sísmológica y la geología de la región y sistematiza las observaciones de este evento para discutir las implicancias de dos características del mismo: su mecanismo focal asociado a una falla del tipo normal de rumbo aproximado E y las caídas de rocas que se reportaron a través de redes sociales hasta 50 km de distancia del epicentro.

MARCO GEOLÓGICO

La región en la que se ubicó el epicentro del sismo del 29/11/2020 corresponde al borde este de la provincia geológica de Cordillera Oriental (Groeber 1938), en el Noroeste Argentino (NOA). La región está caracterizada por un basamento precámbrico (Formación Puncoviscana), sedimentitas paleozoicas cubiertas, en discordancia angular por unidades del rift del Grupo Salta que van desde el Cretácico al Eoceno y unidades plio-cuaternarias, entre las que destacan las del Grupo Humahuaca por su alta deformación (Rodríguez Fernández et al. 1999). Su estructura es el resultado de una compleja historia de deformación que se remonta a la orogenia pampeana (Precámbrico tardío) y que durante el Cenozoico se caracterizó por el desarrollo de fallas inversas de rumbo NNO y vergencia oriental que involucran al basamento (Kley y Monaldi 1999). El inicio del levantamiento de las distintas sierras que componen la Cordillera Oriental se remonta al Mioceno (Strecker et al. 2007, 2009), y continúa hasta la actualidad, controlado por corrimientos NNO y distintas estructuras invertidas del rift cretácico (Kley et al. 2005, Carrera y Muñoz 2008, Monaldi et al. 2008).

En la zona de estudio, una de estas estructuras invertida y reactivada durante el último pulso de deformación, corresponde a la falla Hornocal (Fig. 1), de rumbo NE y de alto ángulo, que monta unidades cretácicas del Grupo Salta sobre sedimentitas oligo-miocenas (Kley et al. 2005). Esta estructura actuó durante la formación del rift del Grupo Salta como una falla normal de primer orden limitando uno de los depocentros de esta cuenca por el norte (Salfity y Marquillas 1994). Según Kley et al. (2005), durante la compresión andina la falla Hornocal se reactivó como una falla oblicua de rumbo NE con una componente de rumbo dextral importante. Sin embargo, esto es discutido por Sikis y Horton (2011) quienes, basándose en descripciones de campo y relaciones de falla, postulan que la falla Hornocal acomodó principalmente desplazamiento del tipo inverso, formando un sistema cinemáticamente coordinado con una falla inversa de rumbo N, acomodando acortamiento y transpresión dextral (Fig. 1).

SISMICIDAD DEL ÁREA

La deformación cuaternaria y la sismicidad en el NOA se distribuye entre los flancos de la Puna, la Cordillera Oriental, las Sierras Subandinas y el Sistema de Santa Bárbara (García et al. 2017). En los alrededores del área de estudio se registraron numerosos terremotos históricos que causa-

ron importantes daños y pérdidas de vidas humanas (Fig. 1; <http://contenidos.inpres.gov.ar/sismologia/historicos>).

Particularmente, en el ámbito de las Sierras Subandinas, al este de la zona de estudio, destacan una serie de eventos cuyos epicentros se nuclean en torno a la localidad de Orán (Fig. 1). En casi todos estos casos se estimaron o midieron magnitudes superiores a 6 e intensidades (Mercalli Modificada) de entre VI y VIII (1871, 1874, 1925, 1959, 1974) y produjeron en forma reiterada daños de infraestructura en la localidad de Orán (INPRES 2021). En esta zona se registraron, en 2009 y 2015, dos eventos de Mw 5.6 y 6 respectivamente, cuyos mecanismos focales corresponden con estructuras de rumbo aproximado NNO y componente inversa (Fig. 1). Contrariamente, en la región donde ocurrió el evento del

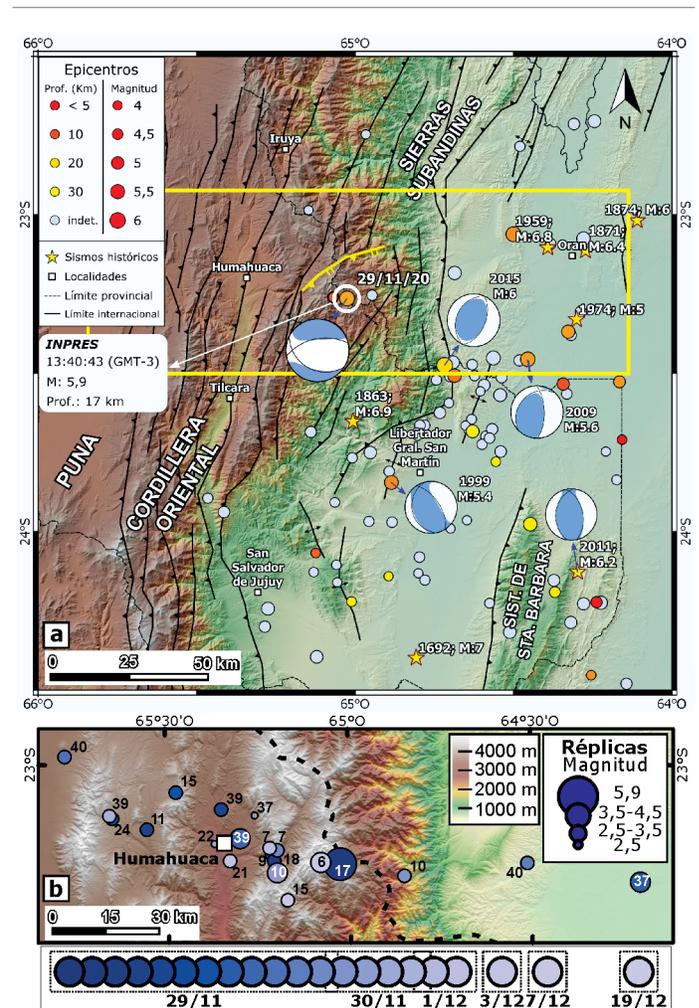


Figura 1: a) Modelo digital de elevación del sector estudiado con las principales estructuras de la región (modificadas de Ramos 1999, González et al. 2003). Los sismos históricos y la sismicidad instrumental tomados del INPRES (2021) y los mecanismos focales del catálogo Global del CMT. En trazo amarillo se indica la falla Hornocal. El recuadro corresponde a la figura 1b; b) Réplicas del sismo del 29/11/2020 tomadas del INPRES (2021). Se indica su profundidad en kilómetros y en escala de colores la distribución temporal de las mismas.

29/11/2020 el registro de sismicidad no parece ser muy elevado (Fig. 1).

En cuanto al evento en cuestión, según el reporte del INPRES, tuvo una profundidad de 17 km, mientras que el

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ubica al hipocentro a una profundidad de 8 ± 1.8 km. En cuanto a la magnitud, la misma oscila entre Mw 5.8/5.9. Tanto el Servicio Geológico de los Estados Unidos como el GeoForschungZen-

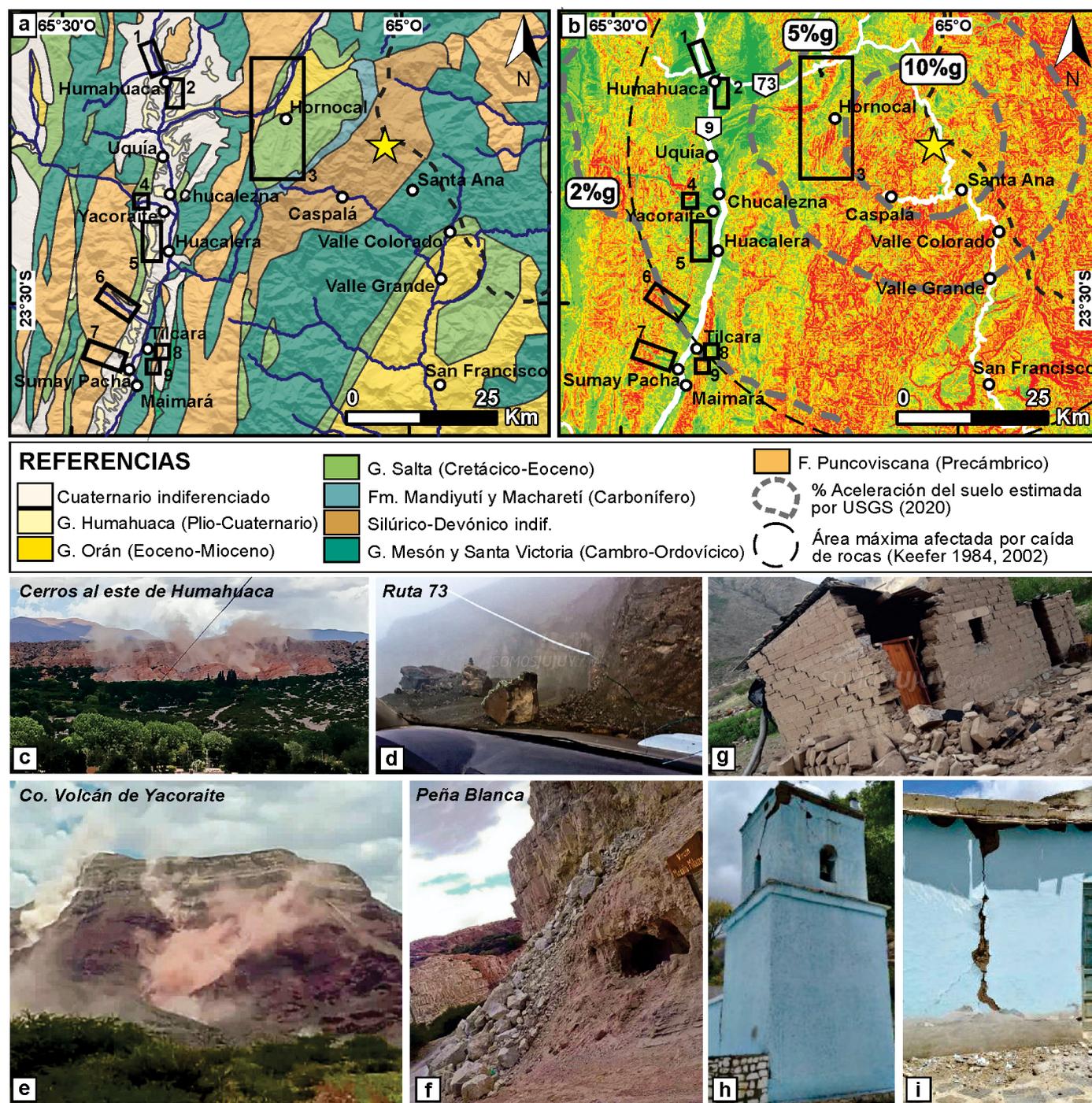


Figura 2: a) Mapa geológico simplificado de la zona de estudio (basado en Rodríguez Fernández et al. (1999); b) Mapa de pendientes obtenido del modelo digital de elevación SRTM 30m; en líneas punteadas grises las aceleraciones de suelo (% gravedad) (USGS 2021), en curva negra punteada el área teórica máxima que puede verse afectada por caída de rocas según Keefer (1984, 2002) y en blanco la traza de principales rutas y caminos; c) Serranías al este de Humahuaca; d) Caída de rocas en la ruta 73; e) Cerro Volcán de Yacoraite; f) Calle Salta, Peña Blanca, Humahuaca; g-i) Daños en la localidad de Caspalá. En a) y en b) los recuadros negros son las áreas donde se reportaron caída de rocas: 1: ruta 9 entre Chorrillos y Hornaditas, 2: Peña Blanca (fotos en figuras 2c, f), 3: serranías del Hornocal, 4: cerro Volcán de Yacoraite, 5: cerros de Huacalera, 6 y 7: quebradas Juella y Huichaira, 8 y 9: barrios La Falda y Sumalagua. Fuentes: Diario El Tribuno y TodoJujuy.com

trum de Potsdam (Geofon) presentaron una solución de mecanismo focal coincidente con un fallamiento normal con una pequeña componente de rumbo, de orientación E (Fig. 1a) y ángulos de falla de $37^{\circ}/61^{\circ}$. Se volcaron en un mapa (Fig. 1b) las réplicas de este evento, tomando todo sismo ocurrido en los alrededores hasta 3 meses después del 29/11/2020. Las mismas muestran una alineación en sentido transversal al rumbo de las estructuras predominantes (rumbo ~E), concentrándose en la zona del cerro Hornocal, muestran profundidades de entre 6 y 40 km y magnitudes inferiores a 4.5 (Fig. 1b).

REPORTE DE DAÑOS Y REMOCIÓN EN MASA

El evento registrado el 29/11/2020 a las 13:40 hora local fue, de acuerdo a los relatos registrados en distintos medios de comunicación (Diario El Tribuno y TodoJujuy.com), percibido en localidades del norte de Salta, en San Salvador de Jujuy y localidades de la quebrada de Humahuaca; así como en Tucumán. Los daños más importantes se registraron en Caspalá y Santa Ana, localidades muy próximas al epicentro, donde varias casas de adobe, escuelas y capillas sufrieron fracturas en mampostería y otros daños considerables (Fig. 2).

Además, se reportaron caídas de roca en varias localidades a lo largo de la quebrada de Humahuaca: Humahuaca (Peña Blanca), Chucalezna, Yacoraité, Huacalera, Uquía, Sumay Pacha y Tilcara (barrios La Falda y Sumalagua) (Fig. 2). Por último, los derrumbes interrumpieron temporalmente la ruta 73 que une Caspalá con Humahuaca y afectaron un tramo de la ruta nacional 9 al norte de Humahuaca (Fig. 2). Mayormente estos reportes se nuclearon en las sucesiones sedimentarias del Grupo Humahuaca, intensamente deformadas, aflorantes a lo largo del valle del río Grande; o en las metamorfitas de la Formación Puncoviscana, particularmente en las quebradas donde las pendientes son mayores (por ej. en las quebradas Juella o Huichaira) (Figs. 2a, b).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se resumieron y presentaron los principales datos relevantes al sismo ocurrido el 29/11/2020 en el NOA, ~30 km al este de Humahuaca (límite entre las provincias de Jujuy y Salta). El mapa de deformaciones cuaternarias provisto por el SEGEMAR (Casa et al. 2014) da cuenta de la existencia de numerosas fallas y pliegues con actividad cuaternaria, de rumbo predominante N, mayormente localizadas en el sur

de la Cordillera Oriental, el Sistema de Santa Bárbara y las Sierras Subandinas, mientras que, en el sector norte de la Cordillera Oriental, donde se enmarca el área analizada, las descripciones de fallas activas son limitadas (falla Uquía o falla Tilcara; Salfity et al. 1984).

Teniendo esto en cuenta, la solución del mecanismo focal y la distribución de las réplicas del evento del 29/11/2020 muestran algunos rasgos interesantes (Fig. 1). Por un lado, el sismo podría estar asociado a fallas de orientación ~E, oblicuas al rumbo dominante que, en la zona, no tienen expresión superficial clara. Más al sur, en las Quebradas del Toro o las Conchas, existe evidencia de deformación neotectónica oblicua con componente de rumbo ligada a estructuras transversales (Strecker y Marret 1999). Sin embargo, otra particularidad del evento estudiado es su cinemática, coincidente con una falla normal, sin componente de rumbo significativa (Fig. 1). Esto permite suponer que pudo haberse nucleado en estructuras heredadas del rift cretácico, coincidentes con la orientación ~ENE del brazo Lomas de Olmedo (desarrollado hacia el este del área de estudio; Starck 2011). Una de las estructuras candidatas como generadora del sismo es la falla Hornocal, de importancia regional, propuesta como una falla normal cretácica, reactivada con componente inverso (Fig. 1). Las características geométricas de las soluciones del mecanismo focal coinciden con una falla de alto ángulo y rumbo similar al de la falla Hornocal. La relación entre fallas normales y el estado de esfuerzos en el NOA fue estudiada por Marret et al. (1994) (en Rodríguez Fernández et al. 1999). Estos autores postulan que durante el último millón de años existió un régimen transtensivo en Cordillera Oriental, asociado a una reducción en la velocidad de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana (Gubbels et al. 1993). Este tipo de cambios cinemáticos, en un orógeno de subducción como los Andes pudo haber disparado reactivaciones normales en fallas de la subcuenca Lomas de Olmedo como sugieren Gianni et al. (2015), lo cual podría extenderse a la falla Hornocal, considerándola como el extremo occidental de dicha subcuenca. Otra alternativa que explicaría la componente normal observada podría vincularse a lo que ocurre en algunas regiones de los Andes del Perú, donde Sébrier et al. (1985, 1988) asocian fallamiento cuaternario normal con zonas donde el orógeno supera una altura media de 4000 m. Aunque de menor escala, tanto Schoenbohm y Strecker (2009) como Giambiagi et al. (2016), asocian también fallamiento extensional a este mecanismo para el margen sur y occidental del Altiplano/Puna, respectivamente. Dadas las alturas observadas en el segmento analizado de la Cordillera Oriental (>4000 m), la relativa baja sismicidad de la zona y la propagación de fallas

inversas activas hacia el antepaís (Fig. 1), es posible pensar en una hipótesis de colapso gravitacional para este segmento de la losa, lo cual merecería ser estudiado con mayor profundidad.

Tomar las características de un único sismo para extrapolar al mediano plazo el comportamiento de una falla o región no es del todo preciso. Aún así, el caso estudiado sugiere que en este sector del NOA las estructuras heredadas del basamento, transversales al rumbo estructural dominante, también pueden actuar como fallas sismogénicas con potencial destructivo, incluso con cinemáticas normales, siendo esto relevante para futuros estudios de peligro sísmico.

Por otra parte, este evento cobró relevancia por los reportes en tiempo real de caídas de rocas provocadas por el temblor. Su ubicación (Fig. 2a), da cuenta de su distribución cercana al epicentro. Siguiendo las estimaciones empíricas de Keefer (1984, 2002) se constata que ocurrieron en una región esperada para sismos de $4 < M_w < 6$ a distancias de hasta 50 km al epicentro. Comparando la ubicación de las caídas de roca y la litología aflorante, se observa que las unidades plio-cuaternarias del Grupo Humahuaca fueron las que reportaron más colapsos. Si bien los derrumbes fueron de poca magnitud, estas unidades afloran próximas a distintos centros urbanos, por lo que su control y estabilización debiera ser prioritaria. Por último, y teniendo en cuenta el clima de la región (Savi et al. 2016), es importante para el estudio del riesgo geológico cuantificar el material removido en sismos de $M < 4$ en zonas cercanas al epicentro, en particular en quebradas. Como se observa en la figura 2b, las quebradas Juella y Huichaira muestran altas pendientes y reportaron caídas de roca. En dichos escenarios, el aumento temporal de la disponibilidad de material a ser removido, combinado con una temporada de lluvia, puede aumentar la posibilidad de procesos en cadena tales como flujos de detritos o aludes de barro, como ocurrió el 12 de marzo de 2010 en la Quebrada del Toro cuando, tras los derrumbes provocados por el sismo de Salta del 27/2/2010 y las fuertes lluvias, un alud se cobró la vida de una persona (La Nación, 12/3/2010).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Guido Gianni, a la editora Paula Iglesia Llanos y las observaciones realizadas por el revisor Fernando Hongn y un revisor anónimo, que alimentaron las discusiones aquí presentadas.

REFERENCIAS

- Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2009. Structure and thrusting evolution of the southern Cordillera Oriental (N Argentine Andes). *Trabajos de geología* 29: 142-145.
- Casa, A., Yamin, M., Cegarra, M., Wright, E., Coppolecchia, M., Costa, C., Hongn, F., Amengual, R. y García, V. 2014. Actualización del SIG de las deformaciones cuaternarias de la República Argentina. XIX Congreso Geológico Argentino, Geología Estructural y Geotectónica, Actas T6: 7, Córdoba.
- García, V., Casa, A., Hongn, F., Figueroa, S., Aranda, G., Escalante, L., Montero, C., Yamin, M., Amengual, R. y Aramayo, A. 2017. Deformación cuaternaria. En: Muruaga, C., y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*, 624-664, San Miguel de Tucumán.
- Giambiagi, L., Alvarez, P. y Spagnotto, S. 2016. Temporal variation of the stress field during the construction of the central Andes: Constrains from the volcanic arc region (22–26 S), Western Cordillera, Chile, during the last 20 Ma. *Tectonics* 35: 2014-2033.
- Gianni, G.M., Navarrete, C.G. y Folguera, A. 2015. Synorogenic foreland rifts and transtensional basins: A review of Andean imprints on the evolution of the San Jorge Gulf, Salta Group and Taubaté Basins. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 288-306.
- González, M.A., Tchilinguirian, P., Pereyra, F.X., Ramallo, E.E. y González, O.E. 2003. Hoja Geológica 2366–IV Ciudad de Libertador General San Martín, provincias de Jujuy y Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Boletín Argentino Servicio Geológico Minero Argentino 274, 109 p.
- Groeber, P. 1938. *Mineralogía y Geología*. Espasa-Calpe Argentina, 1-492, Buenos Aires.
- Gubbels, T., Isacks, B. y Farrar, E. 1993. High level surfaces, plateau uplift and foreland development, Bolivian central Andes. *Geology* 21: 695-698.
- INPRES, Instituto Nacional de Prevención Sísmica. 2021. <http://contenidos.inpres.gov.ar/sismologia> (último acceso 1/3/2021)
- Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95: 406-421.
- Keefer, D.K. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review. *Surveys in Geophysics* 23: 473-510.
- Kley, J. y Monaldi, C.R. 1999. "Estructura de las Sierras Subandinas y del Sistema de Santa Bárbara". XIV Congreso Geológico Argentino, Actas T-I: 415-425, Salta.
- Kley, J., Rossello, E.A., Monaldi, C.R. y Habighorst, B. 2005. Seismic and field evidence for selective inversion of Cretaceous normal faults, Salta rift, northwest Argentina. *Tectonophysics* 399: 155-172.
- Marret, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N. y Drake, R.E. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth*

- Sciences 7: 179-208.
- Monaldi, C.R., Salfity, J.A. y Kley, J. 2008. Preserved extensional structures in an inverted Cretaceous rift basin, northwestern Argentina: Outcrop examples and implications for fault reactivation. *Tectonics* 27: TC1011.
- Ramos, V.A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29: 41-96, Buenos Aires.
- Rodríguez Fernández, L.R., Heredia, N., Seggiaro, R.E. y González, M.A. 1999. Estructura andina de la Cordillera Oriental en el área de la quebrada de Humahuaca, Provincia de Jujuy, NO de Argentina. *Trabajos de Geología* 21: 312-332.
- Roeder, D. 1988. Andean-age structure of eastern Cordillera (province of La Paz, Bolivia). *Tectonics* 7: 23-39.
- Salfity, J.A., Brandan, E.M., Monaldi, C.R. y Gallardo, E.F. 1984. Tectónica compresiva cuaternaria en la Cordillera Oriental Argentina, latitud de Tilcara (Jujuy). III Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 321-336.
- Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. En: Salfity, J.A. (ed.), *Cretaceous Tectonics of the Andes*. Vieweg-Teubner Verlag, 613-626, Wiesbaden.
- Savi, S., Schildgen, T.F., Tofelde, S., Wittmann, H., Scherler, D., Mey, J., Alonso, R.N. y Strecker, M.R. 2016. Climatic controls on debris-flow activity and sediment aggradation: The Del Medio fan, NW Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121: 2424-2445.
- Schoenbohm, L.M. y Strecker, M.R. 2009. Normal faulting along the southern margin of the Puna Plateau, northwest Argentina. *Tectonics* 28: TC5008.
- Sébrier, M., Mercier, J.L., Mégard, F., Laubacher, G. y Carey-Gailhardis, E. 1985. Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru. *Tectonics* 4: 739-780.
- Sébrier, M., Mercier, J.L., Macharé, J., Bonnot, D., Cabrera, J. y Blanc, J.L. 1988. The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab: The Andes of central Perú. *Tectonics* 7: 895-928.
- Siks, B.C. y Horton, B.K. 2011. Growth and fragmentation of the Andean foreland basin during eastward advance of fold-thrust deformation, Puna Plateau and Eastern Cordillera, Northern Argentina. *Tectonics* 30: 1-27.
- Starck, D. 2011. Cuenca cretácica-paleógena del noroeste argentino. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio Cuencas Argentinas: Visión Actual: 407-453, Mar del Plata.
- Strecker, M.R. y Marrett, R. 1999. Kinematic evolution of fault ramps and its role in development of landslides and lakes in the northwestern Argentine Andes. *Geology* 27: 307-310.
- Strecker, M.R., Alonso, R.N., Bookhagen, B., Carrapa, B., Hilley, G.E., Sobel, E.R. y Trauth, M.H. 2007. Tectonics and climate of the southern central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35: 747-787.
- Strecker, M.R., Alonso, R., Bookhagen, B., Carrapa, B., Coutand, I., Hain, M.P., Hilley, G.E., Mortimer, E., Schoenbohm, L.M. y Sobel, E.R. 2009. Does the topographic distribution of the central Andean Puna Plateau result from climatic or geodynamic processes? *Geology* 37: 643-646.
- USGS 2021: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000ckx5/technical> (último acceso 1/3/2021)