

Evaluación de los efectos secundarios tras el sismo del 18 de enero de 2021 (Mw 6,5) en San Juan, Argentina: determinación de la intensidad sísmica a través de la escala ESI-2007

Silvia Beatriz Palacios¹, Alejandro Oro^{2,3}, *Laura Patricia Perucca^{1,2}

¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, INGEO, FCEFYN-UNSJ, Av. Ignacio de la Roza 590 Oeste, Complejo Universitario Islas Malvinas, Departamento Rivadavia, San Juan, Argentina.

silbea09@gmail.com, lperucca@unsj-cuim.edu.ar

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290, C1425FQB, CABA, Buenos Aires, Argentina. alejandro.seryn@gmail.com

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín Oeste 1109, San Juan, Argentina.

* Autora de correspondencia: lperucca@unsj-cuim.edu.ar

RESUMEN. Este estudio presenta una evaluación de los numerosos efectos secundarios, como la remoción en masa y la licuación de suelos, producidos por el terremoto de Mw 6,5 que tuvo lugar el 18 de enero de 2021 en la provincia de San Juan, Argentina. El epicentro se ubicó en el flanco oriental del cordón de Las Osamentas. Aunque el evento causó daños significativos en edificios y áreas cultivadas, no hubo víctimas fatales. El objetivo es identificar y describir estos efectos secundarios, así como determinar la intensidad sísmica utilizando la escala ESI (*Environmental Seismic Intensity*) 2007 del INQUA (*International Union for Quaternary Research*). Las evaluaciones de campo se realizaron poco después del sismo, y se documentaron las estructuras de licuación y remoción en masa a través de observaciones directas, fotografías digitales, localización con GPS (*Global Positioning System*) y confección de un inventario, entre otros métodos. Este procedimiento permite validar un protocolo para futuras aplicaciones en la estimación de intensidades sísmicas para áreas escasamente pobladas. Adicionalmente, se busca confirmar la importancia científica y cultural de estas efímeras estructuras como activos que podrían protegerse y así contribuir al desarrollo regional.

Palabras clave: Terremoto, Intensidad, Efectos secundarios, Procesos de remoción en masa, Estructuras de licuación.

ABSTRACT. Evaluation of secondary effects after the January 18, 2021, Mw 6.5 earthquake in San Juan, Argentina: determination of the seismic intensity through the ESI-2007 scale. This study focuses on evaluating the numerous secondary effects, such as mass wasting and soil liquefaction, caused by the Mw 6.5 earthquake that occurred on January 18, 2021, in the province of San Juan, Argentina. The epicenter was located on the eastern flank of the Las Osamentas range. Although it caused significant damage to buildings and cultivated areas, there were no fatalities. The aim is to identify and describe these secondary effects and determine the seismic intensity of the event using the INQUA's (International Union for Quaternary Research) 2007 ESI (Environmental Seismic Intensity) scale. Field assessments were conducted shortly after the earthquake, documenting liquefaction and mass wasting structures through direct observations, digital photographs, GPS (*Global Positioning System*) localization, and data inventory, among other methods. This procedure validates a protocol for future applications in estimating seismic intensities for sparsely populated areas. Additionally, the study seeks to confirm the scientific and cultural importance of these ephemeral structures as assets that could be protected, therefore contributing to regional development.

Keywords: Earthquake, Intensity, Secondary effects, Mass wasting processes, Liquefaction structures.

1. Introducción

Los procesos de licuación (o licuefacción) de suelos son el resultado de la acción repetida de una carga reversible, producida por un terremoto. El efecto general de ondas de cizalla inducidas por sismos en un estrato no cohesivo de arenas o limos es consecuencia de los movimientos repetidos en la horizontal, causados por la sacudida sísmica (e.g., Ambraseys, 1988; Audemard y de Santis, 1991; Andrus y Stokoe II, 2000; Youd e Idriss, 2001; Audemard, 2002). La frecuencia, amplitud y duración del movimiento varía con la magnitud del terremoto, distancia al epicentro y con las características y potencias de los estratos a través del cual viajan las ondas sísmicas (e.g., Allen, 1982). Los daños históricamente provocados por los procesos de licuación de suelos van desde pequeños hundimientos y desplazamientos laterales (*lateral spreadings*) hasta deslizamientos de grandes masas

de suelos. Además, pueden causar asentamientos o inclinaciones en fundaciones y estructuras de retención (Tinsley *et al.*, 1985; Obermeier *et al.*, 1990, 1993; Obermeier, 1994; Youd y Keefer, 1994; Kramer y Stewart, 2004; Audemard *et al.*, 2005; Perucca y Moreiras, 2006; Perucca *et al.*, 2006; Castilla y Audemard, 2007; Palacios *et al.*, 2017). Por otra parte, los procesos de remoción en masa generados por sismos de moderada a gran magnitud, tales como caídas de rocas y deslizamientos, son debido al aumento del esfuerzo cortante, a la disminución de resistencia de la roca por el aumento de la presión de poros y a la deformación del suelo asociado a la onda sísmica (Keefer, 1984, 2002; Rodríguez *et al.*, 1999; Meunier *et al.*, 2007; Laffaille *et al.*, 2010; Fan *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2023).

En la provincia de San Juan, los procesos de licuación de suelos se manifestaron en los terremotos de 1894, 1944, 1952 y 1977 (Fig. 1), donde los sectores con depósitos holocenos de llanura fluvial

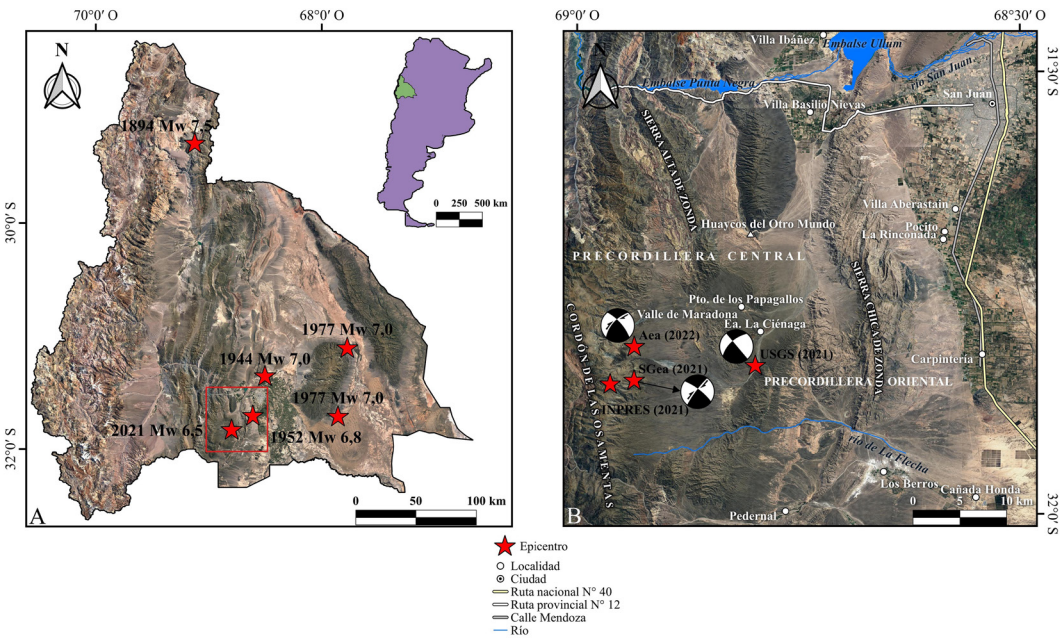


FIG. 1. **A.** Provincia de San Juan, Argentina. Las estrellas rojas señalan la localización de los principales terremotos históricos ocurridos en la región, el recuadro rojo indica la ubicación del área de estudio. **B.** Imagen satelital del área de estudio, donde se muestran las diferentes localizaciones y mecanismos focales del epicentro del sismo del 18 de enero de 2021, según Ammirati *et al.* (2022; abreviado Aea en el mapa), INPRES (2021), Sánchez Girino *et al.* (2021; abreviado SGea en el mapa) y USGS (2021¹).

¹ USGS. 2021. Earthquake Hazard Program, M 6.4-26 km SW of Pocito, Argentina. United States Geological Survey. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000d18q/executive> (Febrero 4, 2021).

y paleocanales fueron los más afectados. También se registraron durante esos eventos caídas de rocas y deslizamientos en los cordones montañosos de la precordillera (Perucca y Moreiras, 2006; Perucca *et al.* 2006; Palacios *et al.*, 2017, 2021; Ginesta Torcivia *et al.*, 2022; Oro *et al.*, 2023).

El 18 de enero de 2021, a las 23:46 hora local (2:46 GMT del 19 de enero), la provincia de San Juan fue sacudida nuevamente por un terremoto. El evento tuvo magnitud Mw 6,5 y su epicentro se localizó ~45 km al suroeste de la ciudad capital de San Juan, en el flanco oriental del cordón de Las Osamentas (Figs. 1 y 2). Afectó

cultivos, emprendimientos mineros (canteras de caliza) y áreas pobladas de la provincia. A pesar de la elevada magnitud, no hubo víctimas que lamentar de acuerdo con el Instituto Nacional de Prevención Sísmica de San Juan (INPRES, 2021²). La profundidad estimada del evento varió según los distintos autores entre 5,6 km (Sánchez Girino *et al.*, 2021), 8 km (INPRES, 2021) y 20-25 km (USGS, 2021; Ammirati *et al.*, 2022; Oro *et al.*, 2023), y se percibió a lo largo del centro-oeste de Argentina. La intensidad del evento en la escala MMI (Mercalli Modificada) fue de grado VII en la ciudad de San Juan y las localidades de Carpintería,

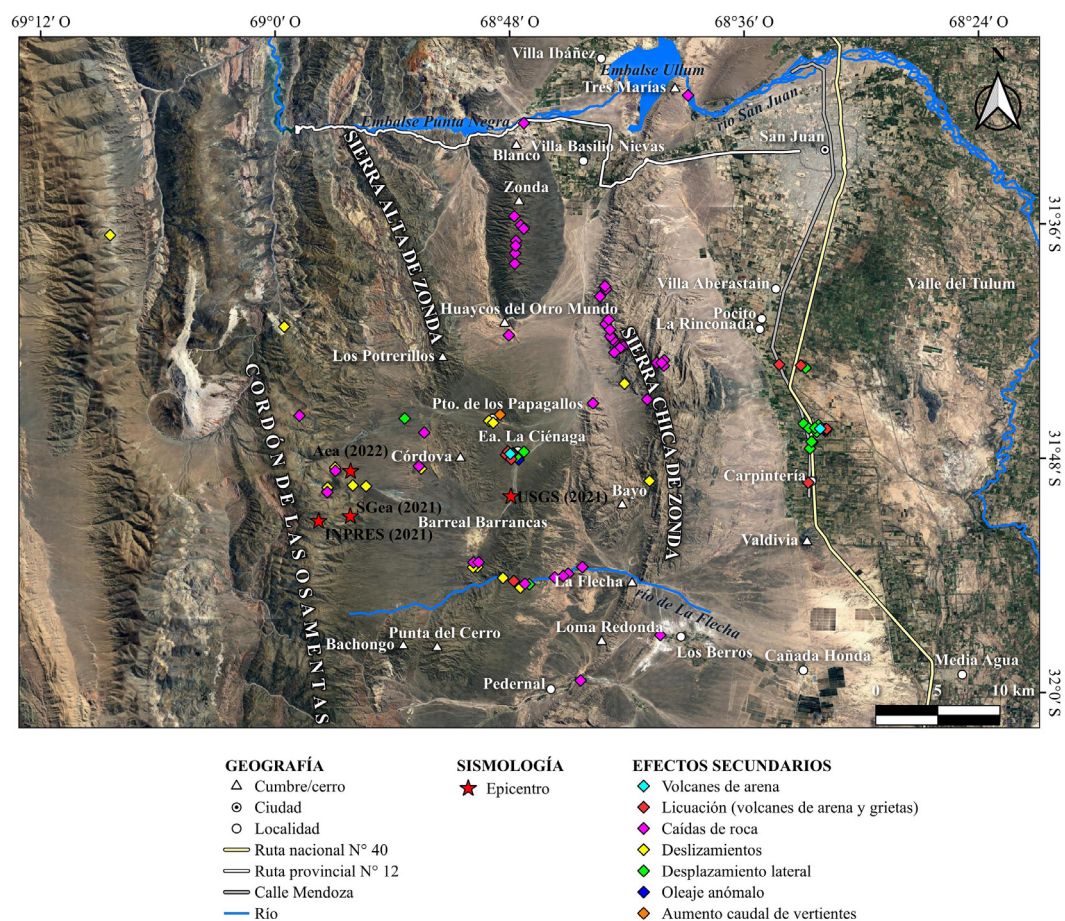


FIG. 2. Imagen satelital con la ubicación de los distintos efectos secundarios reportados e identificados dentro de la zona de estudio. Leyenda de los epicentros según figura 1B.

² INPRES. 2021. Sismo sentido con epicentro en San Juan. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. <https://www.inpres.gob.ar/desktop/epicentro1.php?s=20210119024622>

La Rinconada y Pocito (INPRES, 2021; USGS, 2021). Estudios posteriores al sismo identificaron procesos de remoción en masa (en especial caída de rocas) y estructuras generadas por licuación de suelos (Ginesta Torcivia *et al.*, 2022; Rothis *et al.*, 2021; Oro *et al.*, 2023). Los primeros se observaron en los cordones montañosos de la precordillera, principalmente hacia el norte y este del epicentro, mientras que los segundos se ubicaron en los valles intermontanos y en los depósitos de arenas o arenas limosas sueltas, aunque también en gravas y limos poco plásticos. La licuación de suelos fue uno de los principales procesos responsables de los daños en la zona de estudio (Rothis *et al.*, 2021; Oro *et al.*, 2023).

Durante el sismo, los medios de comunicación y la población en general reportaron eventos de caídas de rocas y licuación en diferentes cordones montañosos, como por ejemplo la sierra Chica de Zonda, los cerros Zonda y Blanco, igualmente en las localidades de Carpintería y La Rinconada, entre otras. Autores como Rothis *et al.* (2021) también describieron numerosos efectos secundarios cosísmicos, entre ellos caídas de rocas, deslizamientos y licuación en áreas cercanas al epicentro. Ginesta Torcivia *et al.* (2022) realizaron, mediante imágenes Landsat, un inventario preliminar de procesos de remoción en masa, identificando al menos 507 eventos de caídas de rocas entre nuevas y reactivadas, la mayoría concentrada en las laderas orientadas al este, particularmente 60 km al norte del epicentro. Oro *et al.* (2023), sin embargo, señalaron que la mayoría de las caídas de rocas y deslizamientos se concentraron al noroeste del epicentro, sin correlación con las principales unidades morfoestructurales y litológicas, abarcando tanto las laderas occidentales como orientales de la sierra Chica de Zonda, la ladera oriental del cerro Zonda, la ladera oriental de los Huaycos del Otro Mundo, la sierra Alta de Zonda, el flanco norte del cerro Blanco y los alrededores del embalse Punta Negra (Fig. 2).

Los efectos secundarios relacionados con la licuación de suelos, tales como asentamientos diferenciales, volcanes de arena, generación o reactivación de grietas, y aumentos en el caudal de las vertientes, se observaron en los valles intermontanos cercanos al epicentro en zonas caracterizadas por suelos de grano fino y niveles freáticos próximos

a la superficie. Algunas de las áreas afectadas fueron la estancia La Ciénaga, donde se observaron pequeños volcanes de arena y desplazamientos laterales (Fig. 2). Además, personal del puesto de los Papagallos señaló un aumento en el caudal de la vertiente de agua natural que alimenta dicho sector. En el valle del Tulum, al este de la zona de estudio, Oro *et al.* (2023) detectaron mediante sensores remotos una zona de deformación entre las localidades de Carpintería y La Rinconada, coincidente con las áreas más dañadas por licuación y/o asentamientos durante el terremoto del 18 de enero.

Para analizar cada uno de los tipos de efectos secundarios registrados, se utilizó la escala ESI-2007 (Michetti *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2010³; Audemard *et al.*, 2015), la cual describe las características diagnósticas en cuanto a dimensiones para cada intervalo de intensidad. La escala ESI-2007 ha sido desarrollada para ser consistente con la escala Macrosísmica Mercalli Modificada (MMI) que es la de mayor aplicación en el mundo e incluye referencias explícitas a los efectos ambientales de los terremotos. Esta escala, basada en los efectos medioambientales de un sismo (EEEs por sus siglas en inglés: *Earthquake Environmental Effects*) fue propuesta e intencionalmente desarrollada para evaluar la intensidad sísmica en zonas poco pobladas. Asimismo, evalúa los daños sobre el terreno, es decir, ruptura superficial de la falla, formación de grietas, movimientos de remoción en masa, licuación de suelos, cambios de caudales en vertientes, oleajes en cuerpos de agua, entre otros (Michetti *et al.*, 2004, 2007; Audemard *et al.*, 2015; Serva, 2019; Colón *et al.*, 2019), complementando de esta forma las otras escalas de intensidad conocidas, basadas mayormente en los efectos en la población y las construcciones.

En síntesis, sobre la base de la exhaustiva y detallada documentación recopilada y procesada sobre los efectos geológicos cosísmicos originados por el sismo de 2021, este estudio busca introducir por primera vez en Argentina (y también en los Andes Centrales de Sudamérica) la aplicación de la escala macrosísmica ESI-2007 (ESI: *Environmental Seismic Intensity*). El propósito es estimar las intensidades macrosísmicas desde los efectos secundarios producidos por el sismo en un área con escasa población e independientemente de la existencia o

³ Silva, P.; Pérez López, R.; Rodríguez Pascua, M.A. 2010. Escala medio-ambiental de intensidad sísmica ESI-2007 INQUA. Traducción del trabajo original por el Grupo de Trabajo Español de AQEUA. http://tierra.rediris.es/aequa/doc/ESI_07_v_Espanyol_2010_B0.pdf

no de edificaciones, ofreciendo así una perspectiva alternativa para determinar la intensidad máxima de un evento sísmico.

2. Fundamentos de la escala ESI

La escala ESI-2007 posee 12 grados. Entre las intensidades I y III no existen efectos ambientales cosísmicos importantes. Es a partir de la intensidad IV que estos empiezan a ser regularmente observados y se convierten en diagnósticos (*e.g.*, Ferrario *et al.*, 2022). La extensión areal típica del registro de los efectos secundarios (por ejemplo, licuación de suelos y deslizamientos) para cada uno de los grados de intensidad ESI-2007 varía entre 10 km² para una intensidad VII hasta más de 50.000 km² para una intensidad XII (Michetti *et al.*, 2007). Las diferentes intensidades y efectos secundarios producidos por un sismo de moderada magnitud son los que a continuación se describen para cada grado de intensidad, conforme a lo propuesto por Michetti *et al.* (2007), aunque solo se consideran hasta la intensidad VIII:

Intensidad IV: escasa evidencia de grietas muy finas, de pocos centímetros de longitud, y desarrolladas en lugares donde la litología y/o la morfología hace más propensa su ocurrencia. Leves variaciones en el nivel del agua en pozos y/o en la tasa de flujo de manantiales. Excepcionalmente, pueden caer rocas y (re)activarse deslizamientos a lo largo de pendientes inestables.

Intensidad V: registro de grietas en lugares donde la litología y/o la morfología (*e.g.*, pendientes o crestas de montañas) son favorables a su ocurrencia. Moderadas variaciones en el nivel del agua en pozos y/o en la tasa de flujo de manantiales. Registro de caídas de rocas. Muy raramente hay deslizamientos rotacionales. Casos extremadamente raros de licuación de suelos en áreas más acotadas y propensas (*e.g.*, depósitos aluviales recientes con niveles freáticos poco profundos).

Intensidad VI: ocasional desarrollo de fracturas delgadas, milimétricas, en depósitos aluviales sueltos y/o suelos saturados, las que a lo largo de pendientes empinadas o márgenes de ríos pueden tener 1-2 cm de ancho. Desarrollo de grietas menores (<cm de ancho) en carreteras pavimentadas. Moderadas variaciones en el nivel del agua en pozos y/o en la tasa de flujo de manantiales. Caídas de rocas y deslizamientos de <10³ m³, donde la zona afectada suele ser inferior a

1 km². Casos raros de licuación de suelos en áreas propensas. Ocasional registro de oleaje en aguas tranquilas, represas y piscinas.

Intensidad VII: generación de fracturas de hasta 5-10 cm de ancho en depósitos aluviales sueltos y/o suelos saturados, y de hasta 1 cm de ancho en material tipo arena seca, arcilla arenosa y suelos arcillosos. Grietas centimétricas comunes en carreteras pavimentadas. Ocasionales variaciones significativas en el nivel del agua en pozos y/o en la tasa de flujo de manantiales. Muy raramente, manantiales de reducida extensión pueden quedarse temporalmente secos o activarse. Ocurrencia de deslizamientos en áreas propensas y caídas de rocas de hasta ~10³ m³, que pueden afectar las márgenes de los ríos y terraplenes artificiales y excavaciones (*e.g.*, cortes de carreteras, canteras) en sedimentos sueltos o rocas meteorizadas y/o fracturadas. El área afectada suele ser inferior a 10 km². Casos raros de licuación, con volcanes de arena de hasta 50 cm de diámetro en áreas más propensas. Generación de oleaje en aguas tranquilas.

Intensidad VIII: común desarrollo de fracturas de hasta 25-50 cm de ancho en depósitos aluviales sueltos y/o suelos saturados, así como grietas decimétricas en rutas pavimentadas. Los manantiales o surgentes pueden cambiar, por lo general temporalmente, su caudal y/o elevación. Algunos pequeños manantiales pueden incluso secarse por algún tiempo. Se observan variaciones en el nivel del agua en pozos. Deslizamientos de volúmenes entre 10³ y 10⁵ m³. Rupturas, deslizamientos y caídas de rocas observadas en los márgenes de los ríos y terraplenes artificiales y excavaciones (*e.g.*, cortes de carreteras, canteras). El área afectada suele ser inferior a 100 km². La licuación puede ser frecuente en la zona epicentral, según las condiciones locales, con volcanes de arena de hasta 1 m de diámetro, propagación lateral localizada y hundimientos (hasta 30 cm), con fisuras paralelas a los márgenes de ríos, lagos y canales. Se producen olas anómalas de entre 1 y 2 m de altura y desbordamientos violentos en lagunas, piscinas y estanques.

3. Metodología

Para identificar las estructuras secundarias una vez ocurrido el evento sísmico de enero de 2021, se utilizó el protocolo establecido previamente y presentado en Palacios y Perucca (2020). Por otra

parte, la exhaustiva documentación obtenida del sismo permitió asociar estas estructuras a un intervalo de intensidades en relación con las sacudidas del terreno.

El epicentro considerado para el cálculo de distancia de los efectos secundarios fue el determinado por Ammirati *et al.* (2022). En ese estudio se analizó

la información de eventos y fases sísmicas locales y se produjo un modelo de velocidad calibrado para reestimar la ubicación del epicentro del sismo, reportándose diferencias en comparación con los epicentros estimados por Sánchez Girino *et al.* (2021) y USGS (2021) (Figs. 1 y 2; Tabla 1).

TABLA 1. EFECTOS SECUNDARIOS IDENTIFICADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO, DESGLOSADOS SEGÚN DISTANCIA EL EPICENTRO, UBICACIÓN, CARACTERÍSTICAS E INTENSIDADES ESI-2007 ESTIMADAS.

Distancia al epicentro (estimada según Ammirati <i>et al.</i> , 2022)	Ubicación	Características	Intensidad ESI-2007
(1) 30 km (2) 25 a 30 km (3) 15 a 20 km (4) 36 km (5) 1 a 5 km	(1) Flanco oriental del cerro Zonda. (2) Flanco occidental de la sierra Chica de Zonda. (3) Margen norte de la quebrada del río de La Flecha. (4) Flanco norte del cerro Blanco. (5) Flanco oriental del cordón de Las Osamentas.	Caída de rocas: se registraron 507 caídas, entre nuevas y reactivadas.* Factores condicionantes: laderas de orientación este u oeste, de pendientes altas a moderadas.	VI
(1) 5 km (2) ~13 km (3) ~16 km	(1) Barreal Barrancas. (2) Puesto de los Papagallos. (3) Margen sur de la quebrada del río de La Flecha.	Deslizamientos: (1) En depósitos aluviales en la margen sur de un cauce que llega al Barreal Barrancas. (2) Vega desplazada en el puesto de los Papagallos. (3) Deslizamiento rotacional en una terraza aluvial en la margen sur de la quebrada del río de La Flecha.	VII-VIII
(1) ~40 km (2) ~40 km (3) ~40 km (4) 40 km (5) 14 km	(1) Áreas de cultivos en Carpintería. (2) Este de la ruta Nacional N° 40 (Carpintería). (3) Al oeste y paralela a la ruta N° 40, sobre la calle Mendoza. (4) Canales de regadío en Carpintería. (5) Estancia La Ciénaga.	Grietas superficiales: Extensión: entre 200 y 400 m. Ancho: entre 10 y 40 cm. Profundidad: entre 10 y 20 cm. Orientación: paralelas entre sí. Grietas profundas: Extensión: 100 a 200 m. Profundidad: entre 1,20 y 1,50 m. Ancho: entre 13 y 20 cm.	VIII
(1) ~40 km (2) ~14 km	(1) Localidad de Carpintería. (2) Puesto de los Papagallos.	Asentamientos diferenciales: destrucción de viviendas y caída de muros en construcciones de adobe. Longitud de los desplazamientos entre 5 y 10 cm, otros entre 17 y 25 cm.	VIII
(1) 14 km (2) 41 km	(1) Estancia La Ciénaga. (2) Localidad de Carpintería.	Volcanes de arena: Diámetro variable, entre 25 y 40 cm. Altura: entre 5 y 15 cm. Observaciones: hasta 40 km al este del epicentro, algunos alineados a lo largo de fisuras del terreno. Formados en depósitos arenosos a limosos y zonas de vertientes. En el valle del Tulum, volcanes con y sin salida de agua al exterior.	VIII
(1) 14 km	(1) Estancia La Ciénaga.	Desplazamiento lateral: escalón de entre 8 y 12 cm de altura, con rumbo 70° SE, labio elevado al SE. Formado en depósitos arenosos en una zona de vegas con modificaciones antrópicas.	VIII
(1) 14 km (2) 14 km	(1) Estancia La Ciénaga. (2) Puesto de los Papagallos.	(1) Oleaje intenso: daños en ambas márgenes (NE y SO) de la represa para riego de los cultivos. (2) Cambio de caudal de la vertiente o manantial: aumento de caudal al día siguiente del sismo.	VIII

* Según Ginesta Torcivia *et al.* (2022).

Los efectos originados en el terreno por el evento sísmico se prolongaron sobre una zona relativamente extensa, por lo que se requirió un enfoque sistemático en la recopilación y análisis de los datos. Se efectuaron trabajos de campo, interpretación de imágenes satelitales y consultas a los escasos pobladores residentes en la zona epicentral (valle de Maradona) y en las zonas pobladas del valle del Tulum. El enfoque principal para la recopilación de datos fue la evaluación *in situ* de todos los efectos secundarios identificados. La documentación de desprendimientos de rocas, deslizamientos, cambios en el caudal de las vertientes naturales, oleajes en represas artificiales y licuación de suelos se realizó en los días posteriores al evento. Producto de esta compilación se preparó una base de datos.

Las tareas de reconocimiento en terreno se basaron en el protocolo propuesto por Palacios y Perucca (2020). Estas se resumen a continuación:

3.1. Compilación de los efectos secundarios después del sismo

El levantamiento de los efectos secundarios se efectuó inmediatamente después de ocurrido el evento y en días subsiguientes, debido a su naturaleza efímera. Los sectores elegidos en esta revisión preliminar fueron aquellos que, sobre la base de antecedentes históricos, bibliográficos y geológicos (*e.g.*, tipo de suelo, ubicación de los niveles freáticos), tenían una elevada susceptibilidad (Palacios *et al.*, 2017, 2021; Palacios y Perucca, 2020).

3.2. Selección y ubicación de los sectores por estudiar

A la mañana siguiente del sismo, así como en los días subsiguientes, se procedió a identificar y compilar las estructuras y otros efectos secundarios producidos por el sismo. Los sectores por estudiar se reconocieron mediante informes en la prensa local y redes sociales que aportaran datos sobre la severidad y distribución espacial de los daños. De estos, se seleccionaron aquellos lugares que mostraran las mejores evidencias para documentar todos los potenciales efectos del sismo y así obtener datos coherentes de los parámetros para medir.

3.3. Selección del instrumental de trabajo

En este trabajo se utilizaron GPS (*Global Positioning System*) portátiles, niveles de mano,

brújulas, cintas métricas, huinchas de medir largas (100 m), piquetas, cámaras fotográficas y vehículos aéreos no tripulados, estos últimos para evaluar aquellas áreas de difícil acceso.

3.4. Recopilación de datos

Se hizo la descripción general de la mayoría de los efectos secundarios reconocidos. En el caso de los procesos de remoción en masa, se incluyeron características de los tipos de remoción (*e.g.*, caídas, deslizamientos) y material involucrado (*e.g.*, rocas, material no consolidado). Respecto de los procesos de licuación de suelos, se midieron las dimensiones de los volcanes de arena. Las estructuras reconocidas y localizadas se ubicaron en imágenes satelitales (Fig. 2). Los efectos secundarios se reportan en la tabla 1.

3.5. Entrevistas a testigos

Las entrevistas a los pobladores de las zonas cultivadas y barrios afectados por el sismo permitieron conocer las condiciones previas y posteriores al evento. Se solicitó al entrevistado que relatará lo observado, poniendo particular énfasis en aspectos como la hora del evento, ruidos subterráneos, posibles desprendimientos de rocas y variaciones en el caudal de las vertientes. Estos relatos se compararon con los datos reportados en la prensa local. Tres testigos entrevistados en la localidad de Carpintería y dos en la estancia La Ciénaga, esta última cercana al epicentro, comentaron que inmediatamente después del sismo observaron volcanes de arena y salida de agua a la superficie (Fig. 2). Las caídas de rocas, por otra parte, fueron reportadas durante la noche del evento en los cordones montañosos ubicados al este y norte del epicentro, en particular en ambos flancos de la sierra Chica de Zonda, en los Huaycos del Otro Mundo y en el cerro Zonda (Fig. 2). Algunos de estos fueron mencionados en la prensa local (*e.g.*, Diario Tiempo de San Juan, Diario La Provincia), mientras que otros fueron descritos por los testigos durante las entrevistas.

4. Resultados

En la zona de estudio, las estructuras secundarias más comunes identificadas fueron grietas, desplazamientos laterales, hundimientos de terreno

y volcanes de arena (Fig. 2). La terminología usada fue establecida por Obermeier (1989) quien se basó en observaciones de Dutton (1889) para el terremoto de Charleston (Estados Unidos) del año 1886. En Sudamérica, estas estructuras fueron también descritas por de Santis *et al.* (1989) como efectos secundarios del terremoto de Caracas (Venezuela) en 1967. Debe notarse, sin embargo, que las áreas que sufrieron licuación durante el terremoto del 18 de enero de 2021 fueron notablemente más pequeñas que durante los otros terremotos históricos ocurridos en la provincia de San Juan (1894, 1944, 1977), probablemente por su menor magnitud y, además, como resultado de un nivel freático más profundo, relacionado con la década de sequía que comenzó en el año hidrológico 2010 (Departamento Hidráulica, 2021⁴) y continúa hasta el presente, tal como lo destacaron Oro *et al.* (2023).

Por otro lado, se registraron numerosos procesos de remoción en masa, particularmente en áreas montañosas y en los sectores con vegas.

Los efectos secundarios compilados y sus respectivas intensidades según la escala ESI-2007 se resumen en la tabla 1 y se explicitan a continuación.

4.1. Procesos de remoción en masa

Se observó caída de rocas en el flanco oriental del cerro Zonda (Fig. 3A), en el extremo occidental de la sierra Chica de Zonda (Fig. 3B), en el margen norte de la quebrada del río de La Flecha (Fig. 3C), en el flanco norte del cerro Blanco, sobre la ruta provincial N°12 (Fig. 3D y E), en el cerro Tres Marías al este del embalse Ullum, y en el flanco oriental del cordón de Las Osamentas. Estos procesos generaron importantes nubes de polvo que fueron registradas por los autores de este trabajo el día posterior al evento a lo largo del valle de Maradona, así como por los pobladores ubicados en el valle del Tulum.

Se registraron deslizamientos de rocas y suelos en el área del barreal Barrancas (Fig. 4A), en una vega ubicada en el puesto de los Papagallos, en un sector de suave pendiente (Fig. 4B), y en el margen sur de la quebrada del río de La Flecha (Fig. 4C). Oro *et al.* (2023) señalaron, a partir del análisis de imágenes Sentinel-2 en el campo visible, que la mayoría de los deslizamientos se concentraron

hacia el noroeste del epicentro y en un terreno geológicamente diverso.

Ginesta Torcivia *et al.* (2022) realizaron un inventario de caídas de rocas generadas producto del sismo de 2021, identificando 507 entre nuevas y reactivadas. Estas autoras sugirieron como factores condicionantes de ocurrencia de procesos de remoción en masa la pendiente, la litología, la orientación de laderas, las condiciones climáticas y neotectónicas. Señalaron también que la mayor concentración de desprendimientos se ubicó ~60 km al norte del epicentro, mayormente en laderas orientadas al este. En el presente trabajo, sin embargo, se observó que las caídas de rocas ocurrieron en todas las direcciones alrededor del epicentro, con una mayor concentración al noreste del área epicentral, en laderas orientadas al este o al oeste (Fig. 2). Por otro lado, Oro *et al.* (2023) efectuaron un inventario preliminar de los procesos de remoción en masa ocurridos a consecuencia del sismo utilizando técnicas de interferometría de radar de apertura sintética diferencial (DInSAR), en combinación con imágenes del campo visible e infrarrojo de Sentinel-2, señalando una importante concentración de estos procesos al noreste y este del epicentro.

4.2. Volcanes de arena

Inmediatamente ocurrido el sismo, se identificaron volcanes de arena en la estancia La Ciénaga, en el valle de Maradona (Fig. 5A y B), y en la localidad de Carpintería, en el valle del Tulum (Fig. 5C, D y E), este último con abundante salida de agua al exterior. Se reportaron para estos volcanes alturas entre 5 y 15 cm, así como diámetros entre 25 y 40 cm, alineados ocasionalmente con las fisuras del terreno.

4.3. Desplazamiento lateral

En la estancia La Ciénaga se observó un desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo hacia una represa artificial formada en una vertiente de agua (Fig. 6A y B). Estas estructuras también se reconocieron hacia sectores más deprimidos dentro de un campo cultivado en Carpintería (Fig. 6C). Es probable que las capas arenosas más profundas se hayan licuado y las capas

⁴ Departamento Hidráulica. 2021. Pronóstico hídrico elaborado por el equipo de Estudios Hidrológicos del Departamento de Hidráulica, para el período octubre 2021 a septiembre 2022 (Informe inédito). <https://sisanjuan.gob.ar/planificacion-e-infraestructura/2021-10-07/35853-presentaron-el-pronostico-hidrico>.

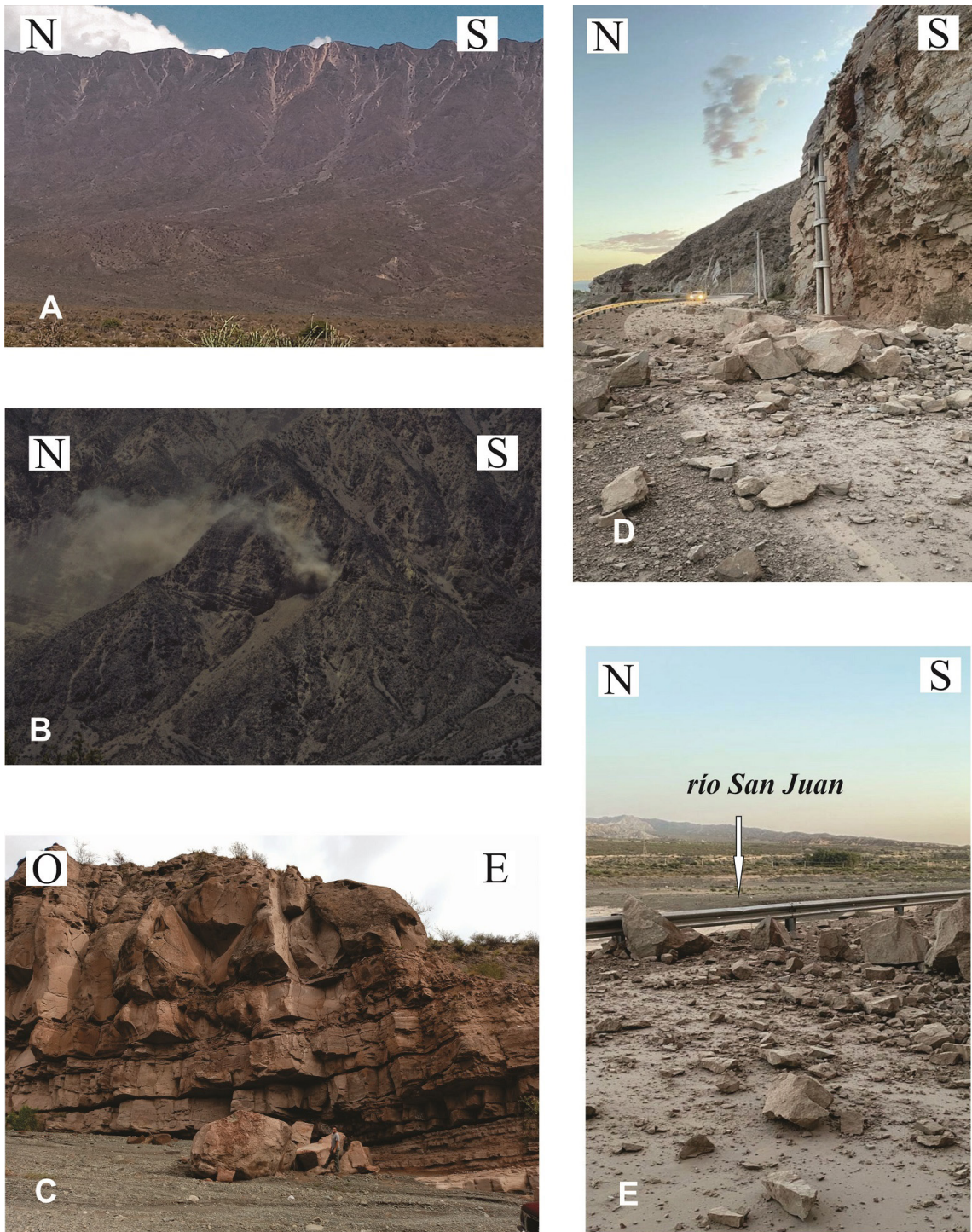


FIG. 3. Caída de rocas. **A.** Flanco oriental del cerro Zonda. **B.** Flanco occidental de la sierra Chica de Zonda. **C.** Margen norte de la quebrada del río de La Flecha. **D-E.** Flanco norte del cerro Blanco, donde se aprecia la obstrucción de la ruta provincial N° 12. Fotografías D y E extraídas del Diario 13 San Juan (<https://www.canal13sanjuan.com/san-juan/2022/1/18/en-imagenes-asi-quedo-san-juan-tras-el-terremoto-de-2021-175643.html>).



FIG. 4. Deslizamientos de suelos y rocas. **A.** Deslizamiento de roca en el área del barreal Barrancas. **B.** Deslizamiento de una vega en el puesto de los Papagallos. **C.** Deslizamiento rotacional en el margen sur de la quebrada del río de La Flecha (imagen obtenida con un vehículo aéreo no tripulado).

más superficiales se hayan movido en bloques, tanto durante como después del sismo, lo que provocó la deformación del suelo y las estructuras observadas. La magnitud de los desplazamientos registrados fue del orden de centímetros y las capas de suelos desplazados presentaron el desarrollo de fisuras, fracturas, escarpes y hundimientos.

4.4. Grietas y asentamientos diferenciales

Las grietas son las estructuras de licuación que con mayor frecuencia se manifestaron durante el sismo del 18 de enero de 2021. Estas estructuras se observaron en algunos sectores cultivados de la localidad de Carpintería, en el valle del Tulum y al

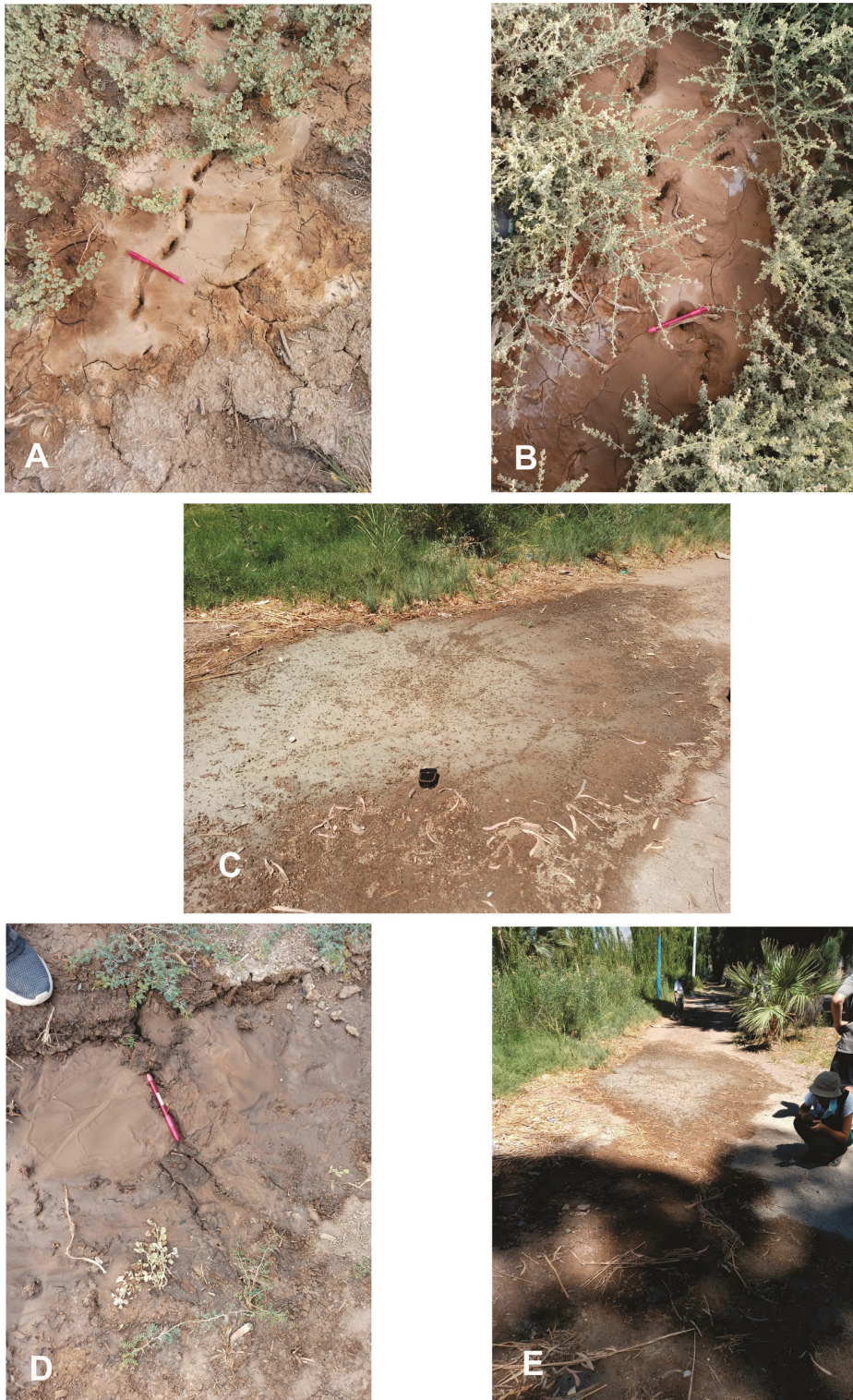


FIG. 5. A-B. Evidencia de volcanes de arena en la estancia La Ciénaga (valle de Maradona). C-E. Volcanes de arena y evidencia de salida de agua en la localidad de Carpintería, en el valle del Tulum.



FIG. 6. Desplazamientos laterales. **A-B**, Estancia La Ciénaga. **C**, Establecimiento agrícola en Carpintería.

este de la ruta nacional N°40 (Fig. 7A), a ~40 km del epicentro. También en el tramo sur de la calle Mendoza (sector no asfaltado), situada al oeste de la ruta 40 y paralela a ella (Fig. 7B), así como en terrazas en el margen sur de la quebrada del río de La Flecha, paralelas al cauce (Fig. 7C), y en canales de riego en Carpintería (Fig. 7D, E y F). Más cerca del epicentro, numerosas grietas paralelas entre sí se observaron en terrenos cultivados de la estancia La Ciénaga (Fig. 7G).

La extensión de las grietas se reportó entre 200 y 400 m, con un ancho variable entre 10 y 40 cm, originadas por la licuación de capas arenosas ubicadas entre 10 y 20 cm de profundidad. Las grietas superficiales se observaron en calles secundarias (no asfaltadas). Por otro lado, en algunos sectores cultivados (Fig. 7F), se identificaron grietas profundas, con longitudes entre 100 y 200 m, profundidades de 1,2 a 1,5 m y anchos variables entre 13 y 20 cm (Tabla 1).

En algunos tramos de la ruta 40, a unos 45 km al este del epicentro, se observaron también asentamientos diferenciales (Fig. 8), con un desplazamiento de las capas superficiales del suelo respecto de las capas subsuperficiales cubiertas de asfalto. Los desplazamientos fueron del orden de 5 a 10 cm. Estos procesos igualmente se observaron en el área epicentral, en el puesto de los Papagallos, aunque también se registraron en la localidad de Carpintería, ~40 km al este del epicentro. Se produjo, además, la destrucción de numerosas viviendas (en todos los casos construidas en adobe) por asentamiento y sacudida directa del sismo (Fig. 9A y B), lo que ocasionó una disminución de la capacidad de soporte de los cimientos y también por el debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. Este proceso se registró en la localidad de Carpintería e incluso afectó construcciones sismo-resistentes que se agrietaron y/o asentaron. En el puesto de los

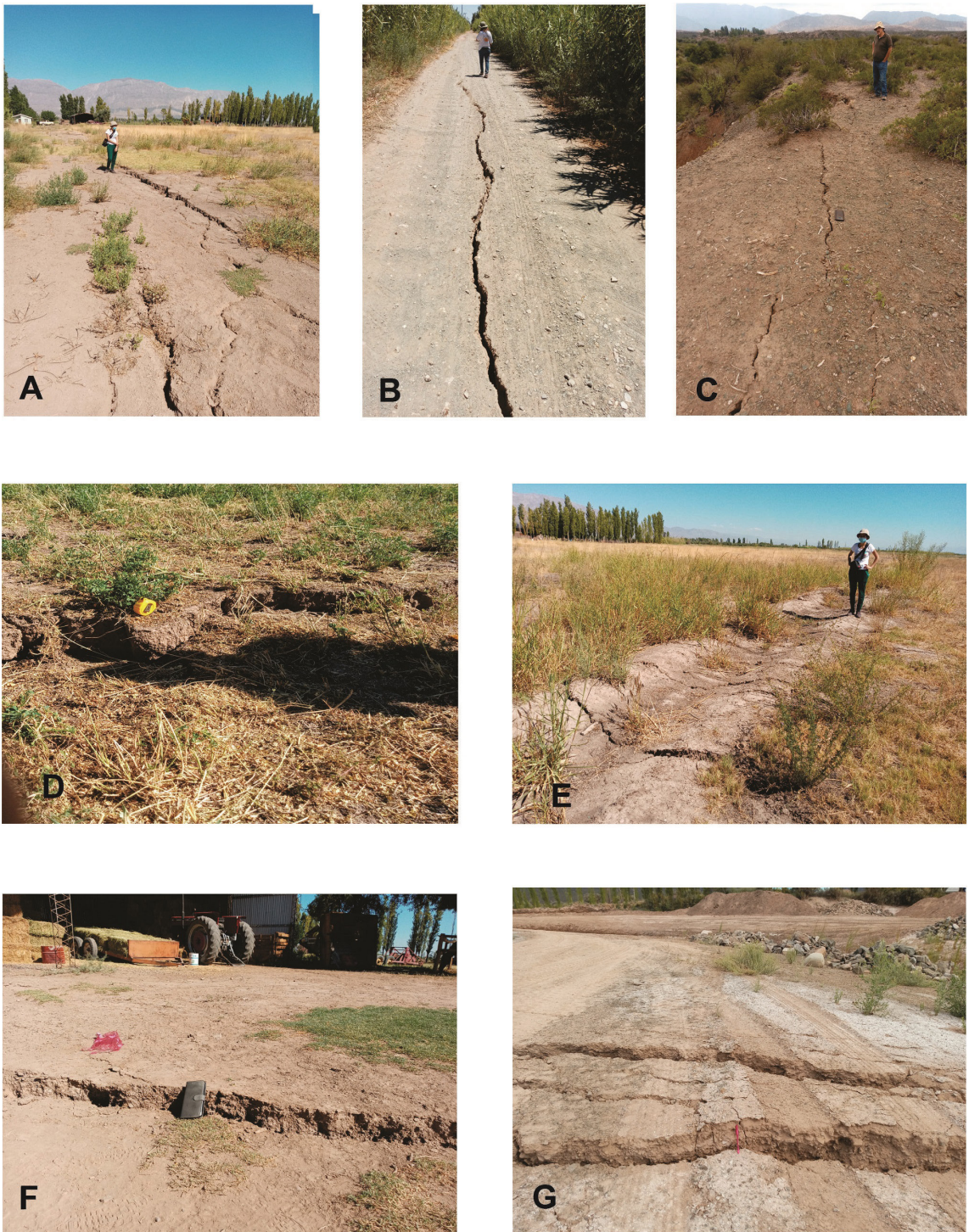


FIG. 7. Grietas observadas en terreno. **A.** Cultivos en la localidad de Carpintería, al este de la ruta nacional N° 40. **B.** Calle Mendoza, ubicada al oeste de la ruta 40 y paralela a ella. **C.** Terraza ubicada en el margen sur del río de La Flecha. **D-E.** Áreas de cultivos y canales en Carpintería. **F-G.** Calle en la estancia La Ciénaga.



FIG. 8. Formación de grietas y asentamientos diferenciales en un tramo de la ruta nacional N° 40, en la localidad de Carpintería. A. Foto de los autores. B. Foto extraída del Diario Tiempo de San Juan, <https://www.tiempodesanjuan.com/sanjuan/2021/1/19/fotos-videos-lo-que-dejo-el-terremoto-en-san-juan-304417.html>. C. Foto de los autores. D. Foto extraída del Diario La Provincia, <https://www.diariolaprovinciasj.com/sociedad/2021/1/19/terremoto-en-san-juan-las-consecuencias-departamento-por-departamento-146363.html>

Papagallos también se observó la caída de viviendas precarias, construidas en adobe (Fig. 9C).

4.5. Oleaje en embalses artificiales y aumentos de caudal en manantiales y vertientes

En las represas construidas para el riego en el establecimiento agrícola estancia La Ciénaga (cercana al área epicentral), el oleaje producido por el sismo generó daños en las orillas noreste y suroeste,

alcanzando una altura de <1 m (Fig. 10A, B). Además, el personal que habita el puesto de los Papagallos, un poco más al norte, señaló un notorio aumento en el caudal de la vertiente a la mañana siguiente de ocurrido el sismo (Fig. 10C).

5. Discusión

Los daños provocados por sismos de moderada a elevada magnitud se evalúan, en general, mediante

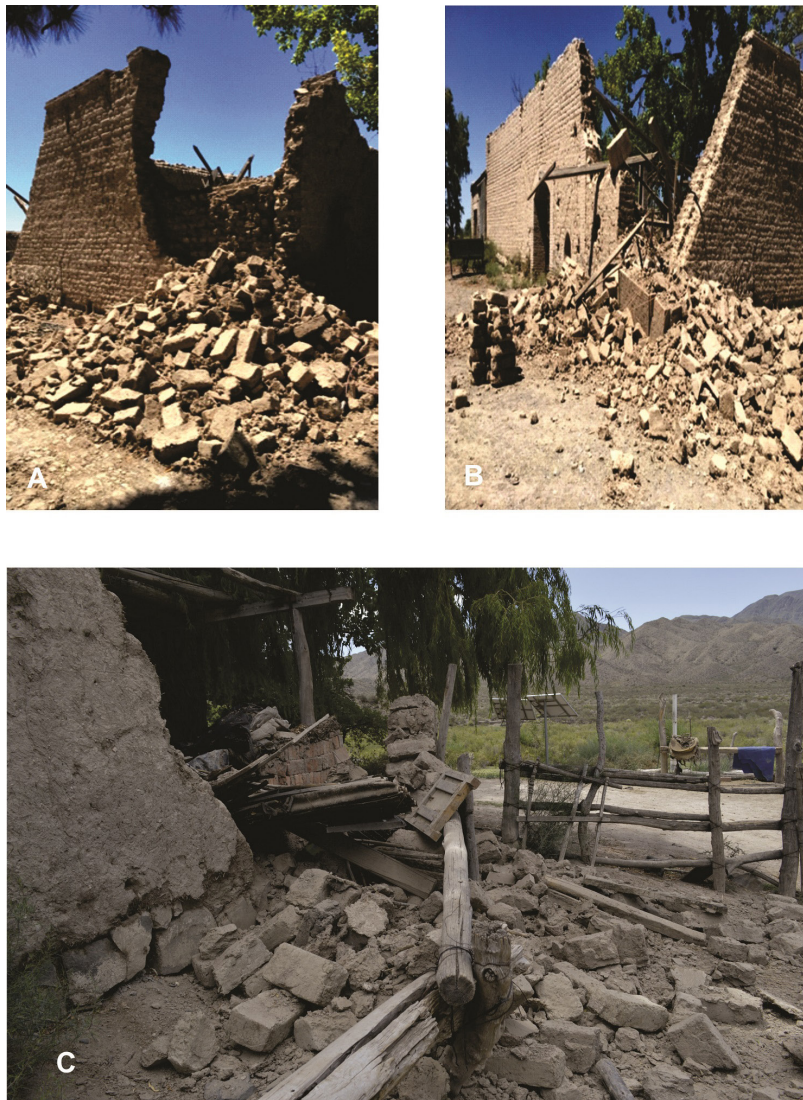


FIG. 9. Destrucción de viviendas por asentamientos y sacudida directa. **A-B.** Caída de muros en construcciones de adobe en la localidad de Carpintería. **C.** Caída de viviendas de adobe en el puesto de los Papagallos.

escalas de intensidad macrosísmica que miden los efectos en humanos y construcciones, como la escala Mercalli Modificada (MMI) (Cecic y Musson, 2004). La intensidad máxima determinada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2021) y el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, 2021) para las localidades de Media Agua, La Rinconada y Carpintería fue de VII (MMI), mientras que en la ciudad de San Juan alcanzó una intensidad VI (MMI) (Fig. 11A). Sin embargo, no existían hasta la fecha datos de intensidad para el área epicentral,

ya que la zona se encuentra escasamente poblada (menos de una decena de habitantes).

El estudio y reconocimiento de las estructuras de licuación y de procesos de remoción en masa se llevaron a cabo siguiendo el protocolo propuesto por Palacios y Perucca (2020). Este evento representó la primera oportunidad de aplicar dicho protocolo en un sismo de magnitud moderada a elevada en el país. El sismo de 2021 no produjo una ruptura superficial, pero sus efectos geológicos fueron registrados en variados sectores, con una mayor concentración al



FIG. 10. Daños producidos por el oleaje en la represa artificial de la estancia La Ciénaga. **A.** Margen noreste. **B.** Margen suroeste. **C.** Aumento de caudal registrado a la mañana siguiente del evento sísmico en una vertiente ubicada en el puesto de los Papagallos, la que inundó parcialmente la huella de acceso.

norte y noreste del epicentro (Ginesta Torcivia *et al.*, 2022; Oro *et al.*, 2023). El reconocimiento inmediato de los efectos secundarios, tales como caídas de rocas, grietas y licuación de suelos, posibilitó su localización geográfica y caracterización antes de que desaparecieran. Además, permitió asignar intensidades en la escala ESI-2007 en función de sus características (*e.g.*, dimensiones, tipo de efecto). Estas intensidades fueron interpoladas y graficadas en un mapa (Fig. 11B). El radio máximo de influencia del sismo se estimó en 90 km,

considerando la distancia desde el epicentro hasta los sitios más lejanos donde se identificaron las estructuras secundarias, principalmente caídas de rocas.

Los efectos secundarios reconocidos y descritos a pocas horas de ocurrido el sismo permitieron estimar las intensidades para cada uno de ellos, las que variaron entre VI y VIII (ver Tabla 1). De este modo, se sugiere una intensidad máxima de VIII en la escala ESI-2007 para la estancia La Ciénaga, el puesto de los Papagallos y el barreal Barrancas (Fig. 11B). Estas localidades

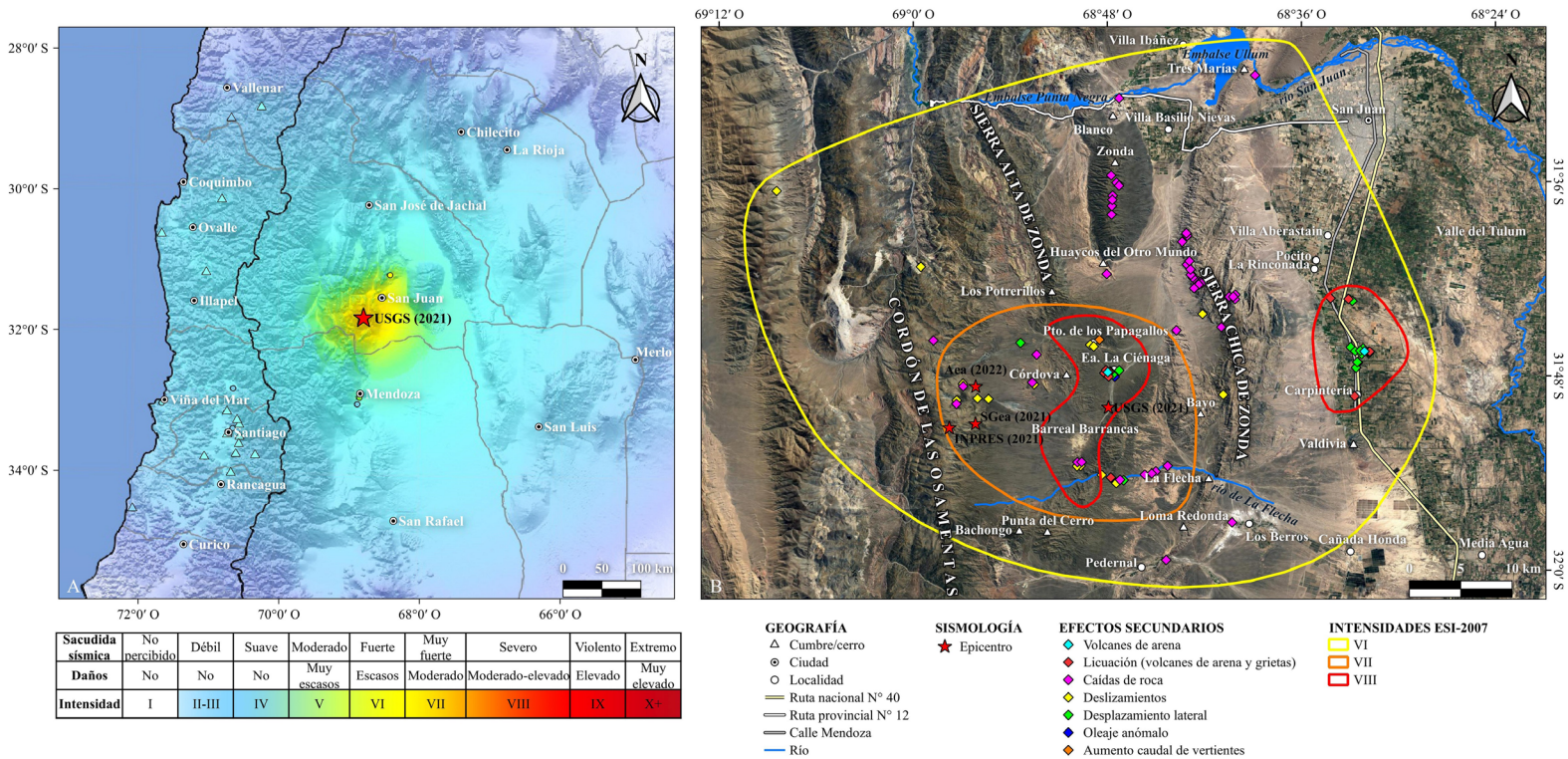


FIG. 11. A. Mapa de intensidades MMI modificado de USGS (2021) para el sismo del 18 de enero del año 2021. B. Mapa de intensidades ESI-2007 para la zona de estudio.

están ubicadas en el valle de Maradona, ~3 km al norte del epicentro determinado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2021) y ~14 km al noreste de los determinados por Sánchez Girino *et al.* (2021), Ammirati *et al.* (2022) y por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, 2021). La asignación de esta intensidad se basó en la ocurrencia de procesos de remoción en masa, oleaje anómalo en cuerpos de agua confinados, estructuras de licuación y desplazamientos laterales de los suelos en forma localizada, entre otros efectos secundarios. Asimismo, en la localidad de Carpintería y hacia el norte de este poblado, a más de 40 km al este del epicentro, se observaron fracturas, asentamientos diferenciales y grietas longitudinales y transversales, estas últimas de dimensiones centimétricas a métricas en rutas pavimentadas, caminos consolidados y canales de riego.

6. Conclusiones

En regiones escasamente pobladas, donde los impactos en las construcciones pueden ser mínimos o inexistentes, los efectos medioambientales o secundarios pueden constituir los únicos indicadores diagnósticos para determinar una intensidad sísmica. Su integración con escalas tradicionales como la Escala Mercalli Modificada (MMI) ofrece una mejor imagen del evento sísmico y sus consecuencias. Los valores de intensidad máxima obtenidos mediante la escala ESI-2007 resultan similares a los reportados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, lo cual representa una oportunidad para mejorar los criterios que se tendrán en cuenta en el cálculo de la intensidad macrosísmica en investigaciones futuras.

La escala ESI-2007, al evaluar en detalle los efectos primarios y secundarios de un sismo, tiene el potencial de correlacionar los registros históricos con los geológicos (paleoterremotos), y así efectuar estimaciones más precisas que servirán como insumos en estudios de riesgo y peligrosidad sísmica. Se sugiere replicar este estudio en otras zonas propensas a sismos que presenten características geológicas similares.

Agradecimientos

La presente contribución fue financiada con fondos del Programa Permanente del Gabinete de Neotectónica y Geomorfología del Instituto de Investigaciones Geológicas

de la Universidad Nacional de San Juan. Los autores agradecen a los revisores, Dr. F. Audemard y Dra. C. Ginesta Torcivia, por las acertadas sugerencias y correcciones que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

Referencias

- Allen, J.R. 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis, Volume I. Developments in Sedimentology 30A. Elsevier Publishing Co.: 593 p. Amsterdam.
- Ambraseys, N.N. 1988. Engineering seismology: Part II. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 17 (1): 51-105. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290170102>
- Ammirati, J.-B.; Mackaman-Lofland, C.; Zeckra, M.; Gobron, K. 2022. Stress transmission along mid-crustal faults highlighted by the 2021 Mw 6.5 San Juan (Argentina) earthquake. Scientific Reports 12: 17939. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22752-6>
- Andrus, R.D.; Stokoe II, K.H. 2000. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126 (11): 1015-1025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:11\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015))
- Audemard, F.A. 2002. Chapter 21: Soil liquefaction during the Caracas 1967 and Boca de Tocuyo 1989 earthquakes, Venezuela: its significance for human settlements on active alluvial areas and coastlands. In Caribbean Geology into the Third Millenium (Jackson, T.; editor). Transactions of the 15th Caribbean Geological Conference, Kingston, Jamaica, 1998, University of the West Indies: 229-234.
- Audemard, F.A.; de Santis, F. 1991. Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 44 (1): 5-16. <https://doi.org/10.1007/BF02602705>
- Audemard, F.A.; Gómez, J.C.; Tavera, H.; Orihuela, N. 2005. Soil liquefaction during the Arequipa Mw 8.4, June 23, 2001 earthquake, southern coastal Peru. Engineering Geology 78 (3-4): 237-255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.12.007>
- Audemard, F.A.; Azuma, T.; Baiocco, F.; Blaize, S.; Blumetti, A.M.; Brustia, E.; Clague, J.; Commerci, V.; Esposito, E.; Guerrieri, L.; Gürpınar, A.; Grützner, C.; Jin, K.; Kim, Y.S.; Kopsachilis, V.; Lucarini, M.; Mc Calpin, J.; Michetti, A.; Mohammadioun, B.; Mömer, N.A.; Okumura, K.; Ota, Y.; Papathanassiou, I.; Pavlides, S.; Pérez-López, R.; Porfido, S.; Reicherter, K.; Rodríguez-Pascua, M.A.; Rogozhin, E.; Scaramella, A.; Serva, L.; Silva, P.; Sintubin, M.; Tatevossian, R.

- Vittori, E. 2015. Earthquake Environmental Effect for seismic hazard assessment: the ESI intensity scale and the EEE Catalogue. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Servizio Geologico d'Italia, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia 97: 181 p.
- Castilla, R.A.; Audemard, F.A. 2007. Sand blows as tools for magnitude estimation of pre-instrumental earthquakes. *Journal of Seismology* 11 (4): 473-487. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9065-z>
- Cecić, I.; Musson, R. 2004. Macroseismic surveys in theory and practice. *Natural Hazards* 31: 39-61. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000020255.00986.37>
- Colón, S.; Leal, A.; Audemard, F.; Vásquez, R.; Rodríguez, J.A. 2019. Análisis macrosísmico del sismo Mw ~7,6 de San Narciso del 29 de octubre de 1900, aplicando la escala medio-ambiental de intensidad sísmica ESI 2007. *Universidad Central de Venezuela, Revista de la Facultad de Ingeniería* 34 (1): 17 p.
- de Santis, F.; Singer, A.; Audemard, F. 1989. Manifestaciones de "lateral spread" en el delta lacustre de Güigüe, costa sur del Lago de Valencia, durante el terremoto de Caracas del 29-07-1967. *In Congreso Geológico Venezolano*, No. 7, Actas 3: 1123-1136. Barquisimeto.
- Dutton, C.E. 1889. The Charleston earthquake of August 31, 1886. *United States Geological Survey, Ninth Annual Report 1887-1888*: 203-528.
- Fan, X.; Hsein Juang, C.; Wasowski, J.; Huang, R.; Xu, Q.; Scaringi, G.; van Westen, C.; Havenith, H.-B. 2018. What we have learned from the 2008 Wenchuan Earthquake and its aftermath: A decade of research and challenges. *Engineering Geology* 241: 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.004>
- Ferrario, M.F.; Livio, F.; Michetti, A.M. 2022. Fifteen years of Environmental Seismic Intensity (ESI-07) scale: Dataset compilation and insights from empirical regressions. *Quaternary International* 625: 107-199. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.04.011>
- Ginesta Torcivia, C.; Ríos, N.N.; Cortez Taillant, V.S.; Tejada Recabarren, F.E.; Esper Angillieri, M.Y. 2022. Estudio preliminar de caídas de rocas y factores condicionantes asociados al sismo 6.4 Mw de enero de 2021, San Juan Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 79 (3): 536-556.
- Keefer, D. 1984. Landslides caused by earthquakes. *GSA Bulletin* 95 (4): 406-421.
- Keefer, D. 2002. Investigating landslides caused by earthquakes-A historical review. *Surveys in Geophysics* 23 (6): 473-510. <https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>
- Kramer, S.; Stewart, J. 2004. Geotechnical aspects of seismic hazards. *In Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering* (Bozorgnia, Y.; Bertero, V.; editors). Taylor and Francis Group: 85 p. London.
- Laffaille, J.; Ferrer, C.; Laffaille, K. 2010. Venezuela: the construction of vulnerability and its relation to the high seismic risk. *Developments in Earth Surface Processes* 13: 99-114. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(08\)10005-0](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(08)10005-0)
- Meunier, P.; Hovius, N.; Haines, A.J. 2007. Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion. *Geophysical Research Letters* 34 (20): L20408. <https://doi.org/10.1029/2007GL031337>
- Michetti, A.M.; Esposito, E.; Gürpınar, A.; Mohammadioun, B.; Mohammadioun, J.; Porfido, S.; Rogozhin, E.; Serva, L.; Tatevos-Sian, R.; Vittori, E.; Audemard, F.A.; Comerci, V.; Marco, S.; McCalpin, J.; Mörner, N.A. 2004. The INQUA Scale: an innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per I Servizi Tecnici (APAT), Servizio Geologico d'Italia, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* 67: 113 p.
- Michetti, A.M.; Esposito, E.; Guerrieri, L.; Porfido, S.; Serva, L.; Tatevossian, R.; Vittori, E.; Audemard, F.; Azuma, T.; Clague, J.; Comerci, V.; Gürpınar, A.; McCalpin, J.; Mohammadioun, B.; Mörner, N.A.; Ota, Y.; Rogozhin, E. 2007. Intensity scale ESI 2007. *Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per I Servizi Tecnici (APAT), Servizio Geologico d'Italia, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* 74: 74 p.
- Obermeier, S.F. 1989. The New Madrid earthquakes: An engineering-geologic interpretation of relict liquefaction features. *United States Geological Survey, Professional Paper* 1336-B: 114 p. <https://doi.org/10.3133/pp1336B>
- Obermeier, S.F. 1994. Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. *In Using ground-failure features for paleoseismic analysis* (Obermeier, S.F.; Jibson, W.; editors). *United States Geological Survey, Open-File Report* 94-633: A1-A98. <https://doi.org/10.3133/ofr94663>
- Obermeier, S.F.; Jacobson, R.; Smoot, J.; Weems, R.; Gohn, G.; Monroe, J.J.; Powars, D. 1990. Earthquake-induced liquefaction features in the coastal setting of South Carolina and in the fluvial setting of the New Madrid seismic zone. *United States Geological Survey, Professional Paper* 1504: 44 p. <https://doi.org/10.3133/pp1504>
- Obermeier, S.F.; Martin, J.; Frankel, T.; Munson, P.; Munson, C.; Pond, E. 1993. Liquefaction evidence for one or more strong Holocene earthquakes in the Wabash Valley of southern Indiana and Illinois, with a preliminary estimate of magnitude. *United States*

- Geological Survey, Professional Paper 1536: 27 p. <https://doi.org/10.3133/pp1536>
- Oro, A.; Blanc, P.A.; Colavitto, B.; Rivas, C.; Martín Rothlis, L.; Vargas, N.; Perucca, L.P. 2023. Surface deformation and secondary effects of the January 18, 2021 (Mw 6.5) San Juan (Argentina) earthquake from remote sensing techniques. *International Journal of Earth Sciences* 112 (8): 2267-2291. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02354-x>
- Palacios, S.B.; Perucca, L.P. 2020. Patrimonio geológico efímero: Propuesta metodológica para el inventario y evaluación de las estructuras generadas por licuación de suelos durante sismos, San Juan-Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 72 (1): 1-14. <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a020919>
- Palacios S.B.; Perucca L.P.; Pantano, A.V.; Lara, G.C. 2017. Propuesta metodológica para el análisis de la licuefacción de suelos asociada a sismos destructivos. Pre-Andes centrales, Argentina (31°30' S y 68°25' O). *Anuário do Instituto de Geociências* 40 (1): 55-69. https://dx.doi.org/10.11137/2017_1_55_69
- Palacios, S.; Lara, G.; Perucca, L. 2021. Susceptibilidad a la licuación de suelos y sedimentos en el valle Ullum-Zonda (31°30' S-68°25' O), Precordillera, Andes Centrales, Argentina. *Andean Geology* 48 (2): 333-349. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3331>
- Perucca, L.P.; Moreiras, S.M. 2006. Liquefaction phenomena associated with historical earthquakes in San Juan and Mendoza provinces, Argentina. *Quaternary International* 158 (1): 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.023>
- Perucca, L.; Pérez, A.; Navarro, C. 2006. Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (4): 567-578.
- Rodríguez, C.; Bommer, J.; Chandler, R. 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18 (5): 325-346. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(99\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00012-3)
- Rothlis, L.M.; Perucca, L.P.; Lara, G.C. 2021. El terremoto del 18E en San Juan Argentina: A 44 años del terremoto de 1977 y a 77 años del terremoto de 1944. *Boletín Brackenbuschiano* 4: 14-23.
- Sánchez Girino, G.; Ortiz, G.; Sáez, M.; López, L.; Pérez, I.; Moreno, M.; Venerdini, A.; Fernández, M.; Alvarado, P. 2021. The shallow (Mw 6.4) earthquake on 18 January, 2021 in Cordón de Las Osamentas, Central Precordillera, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): 613-620.
- Serva, L. 2019. History of the Environmental Seismic Intensity Scale ESI-07. *Geosciences* 9 (5): 210. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050210>
- Tinsley, J.; Youd, T.; Perkins, D.; Chen, A. 1985. Evaluating Liquefaction Potential. *In* Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region, an Earth Science Perspective (Ziony, J.I., editor). United States Geological Survey, Professional Paper 1360: 263-316. <https://doi.org/10.3133/pp1360>
- Xu, Q.; Zhao, B.; Dai, K.; Dong, X.; Li, W.; Zhu, X.; Yang, Y.; Xiao, X.; Wang, X.; Huang, J.; Lu, H.; Deng, B.; Ge, D. 2023. Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China. *Engineering Geology* 321: 107156. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107156>
- Youd, T.L.; Keefer, D.K. 1994. Liquefaction during the 1977 San Juan Province, Argentina earthquake ($M_s=7.4$). *Engineering Geology* 37 (3-4): 211-233. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90057-4)
- Youd, T.L.; Idriss, I.M.; Andrus, R.D.; Arango, I.; Castro, G.; Christian, J.T.; Dobry, R.; Finn, W.D.L.; Harder, L.; Hynes, M.; Ishihara, K.; Koester, J.; Liao, S.S.C.; Marcuson, W.F.; Martin, G.R.; Mitchell, J.K.; Moriwaki, Y.; Power, M.S.; Robertson, P.K.; Seed, R.; Stokoe, K. 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127 (4): 297-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))