



# Evaluación de los efectos ambientales primarios y secundarios del sismo del 23 de noviembre de 1977 (Mw 7.4) en San Juan, Argentina, mediante la aplicación de la Escala Medio Ambiental de Intensidad Sísmica ESI-2007

**Silvia Beatriz Palacios<sup>1</sup>, Alejandro Oro<sup>2,3</sup> y Laura Patricia Perucca<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Gabinete de Neotectónica y Geomorfología. INGENEO. FCEFYN-UNSJ. Avda. Ignacio de la Roza 590 Oeste. Complejo Universitario Islas Malvinas. Departamento Rivadavia, San Juan, Argentina

<sup>2</sup> CONICET.

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

E-mail: silbea09@gmail.com, alejandro.seryn@gmail.com, lperucca@unsj-cuim.edu.ar

**Editor:** Ricardo A. Astini

Recibido: 28/11/2025

Aceptado: 26/02/2026

## RESUMEN

Este estudio analiza los efectos ambientales generados por el terremoto del 23 de noviembre de 1977 (Mw 7.4) con epicentro en la provincia de San Juan, con el objetivo de estimar su intensidad mediante la Escala de Intensidad Ambiental ESI-2007. Se integró información proveniente de diarios, informes técnicos y publicaciones científicas para construir una base de datos detallada de los efectos primarios y secundarios asociados al evento. La metodología ESI-2007 permitió delimitar las zonas más afectadas y caracterizar la distribución y magnitud de los procesos observados. Se registraron numerosos efectos ambientales con intensidades que oscilaron entre VI y X, incluyendo la ruptura superficial de la falla Niquizanga, licuación de suelos, grietas, propagación lateral, subsidencias, deslizamientos, caída de rocas y anomalías hidrológicas. Los efectos primarios se concentraron en el borde suroriental de la sierra de Pie de Palo, mientras que los secundarios se extendieron ampliamente por el valle del Tulum, el valle del Bermejo y sectores del norte de Mendoza. Este trabajo reafirma la correspondencia o variaciones de la ESI-2007 con las escalas tradicionales utilizadas en la evaluación de eventos sísmicos prehistóricos, históricos y recientes en regiones de baja densidad poblacional y aporta información relevante para la planificación territorial y la mitigación del peligro sísmico.

**Palabras clave:** terremoto, intensidad, efectos cosísmicos, ruptura superficial, licuación.

## ABSTRACT

*Assessment of Primary and Secondary Environmental Effects of the 23 November 1977 San Juan Earthquake (Mw 7.4), Argentina, Using the Environmental Seismic Intensity Scale (ESI-2007).* This study evaluates the environmental effects associated with the 23 November 1977 earthquake (Mw 7.4), which struck San Juan Province, Argentina, with the aim of estimating its intensity using the Environmental Seismic Intensity Scale (ESI-2007). Information from newspapers, technical reports, and scientific publications was compiled to construct a comprehensive database of primary and secondary environmental effects related to the event. Application of the ESI-2007 methodology enabled the delineation of the most affected areas and the characterization of the spatial distribution and magnitude of the observed processes. Numerous environmental effects were identified, with assigned intensities ranging from VI to X. These include surface rupture along the Niquizanga Fault, soil liquefaction, ground cracking, lateral spreading, subsidence, landslides, rockfalls, and hydrological anomalies. Primary effects were concentrated along the southeastern margin of the Pie de Palo range,

whereas secondary effects were widely distributed across the Tulum Valley, the Bermejo Valley, and parts of northern Mendoza. The results support the applicability of the ESI-2007 scale and allow comparison with traditional intensity scales used in the assessment of prehistoric, historical, and recent seismic events, particularly in regions of low population density. This study provides relevant insights for land-use planning and seismic hazard mitigation.

**Keywords:** earthquake; intensity; coseismic effects; surface rupture; liquefaction.

## INTRODUCCIÓN

El 23 de noviembre de 1977 se registraron en el sureste de la provincia de San Juan dos sismos encadenados: un primer evento precursor de Mw 6.8 con epicentro en el borde nororiental de la Sierra de Pie de Palo, seguido 20 segundos por un segundo terremoto de Mw 7.4, localizado unos 65 km al sur (Fig. 1). Este último, el principal, presentó un mecanismo focal de falla inversa con rumbo N-S, un hipocentro estimado entre 13 y 35 km de profundidad y se asoció al Sistema de falla Ampacama-Niquizanga, una estructura inversa con vergencia occidental que generó una ruptura superficial de alrededor de 10 km, con un desplazamiento vertical promedio de 30 cm y deformaciones (levantamiento del terreno) del orden de 1.20 m (Volponi y Sisterna, 1980; Bastías, 1986a, b; INPRES, 1993). Por otro lado, Kadinsky-Cade et al. (1985) sugirieron que la mayor parte del desplazamiento cosísmico asociado al terremoto de Caucete de 1977 ocurrió en una falla no aflorante con buzamiento hacia el oeste, también ubicada en el flanco oriental de la sierra, y que el terremoto produjo una ruptura cosísmica superficial limitada. Sin embargo, cabe destacar que ni el estudio de las réplicas (Kadinsky-Cade et al., 1985), ni el modelado de la deformación cosísmica (Langer y Bollinger, 1988) determinaron fehacientemente si el evento ocurrió sobre un plano con buzamiento hacia el este o hacia el oeste.

El sismo principal produjo movimiento del suelo durante aproximadamente 55 segundos, con aceleraciones iguales o mayores al 5% de la gravedad, ocasionando 65 víctimas fatales y daños significativos en edificaciones, infraestructura y áreas cultivadas. Las características litológicas y geotécnicas del terreno (suelos arenosos y limosos poco consolidados) junto con niveles freáticos muy cerca de la superficie, favorecieron la ocurrencia de numerosos procesos de licuación que se extendieron hasta más de 200 km del epicentro (Fig. 2). En el valle de Tulum, estos efectos abarcaron una zona discontinua de casi 2,000 km<sup>2</sup>, con manifestaciones aisladas en un área mayor de aproximadamente 4,000 km<sup>2</sup>, registrándose incluso volcanes de arena a distancias superiores a 250 km desde el epicentro.

A casi cinco décadas de su ocurrencia, el terremoto de 1977 continúa siendo uno de los eventos más destructivos y menos comprendidos en términos de su impacto ambiental en la historia sísmica reciente de Argentina. Si bien los daños fueron evaluados principalmente mediante escalas macrosísmicas centradas en edificaciones y población, como la Escala Mercalli Modificada (MMI), los efectos ambientales primarios y secundarios asociados al sismo no habían sido analizados, pese a la abundante documentación disponible, de manera integrada y sistemática bajo criterios de la Escala de Intensidad Ambiental ESI-2007 (Michetti et al., 2007; Audemard et al., 2015). Esta escala incorpora los denominados *Earthquake Environmental Effects* (EEE), permitiendo estimar la intensidad sísmica en áreas con baja densidad poblacional, como el sureste de San Juan, donde los indicadores ambientales constituyen la principal evidencia para reconstruir la severidad del evento. La escala ESI-2007 mide los daños directos sobre el entorno natural, tales como rupturas superficiales de falla, formación de grietas, deslizamientos, licuación, alteraciones en manantiales o cauces de agua, y oleajes en cuerpos acuáticos (Michetti et al., 2004, 2007; Audemard et al., 2015; Serva, 2019; Colón et al., 2019; Palacios et al., 2024). El objetivo principal de este estudio es la aplicación de la escala ESI-2007 al terremoto del 23 de noviembre de 1977 para de este modo reconstruir la distribución espacial de las intensidades macrosísmicas a partir de efectos ambientales primarios y secundarios. Este análisis resulta de gran importancia en aquellas regiones con baja densidad poblacional y escasa infraestructura.

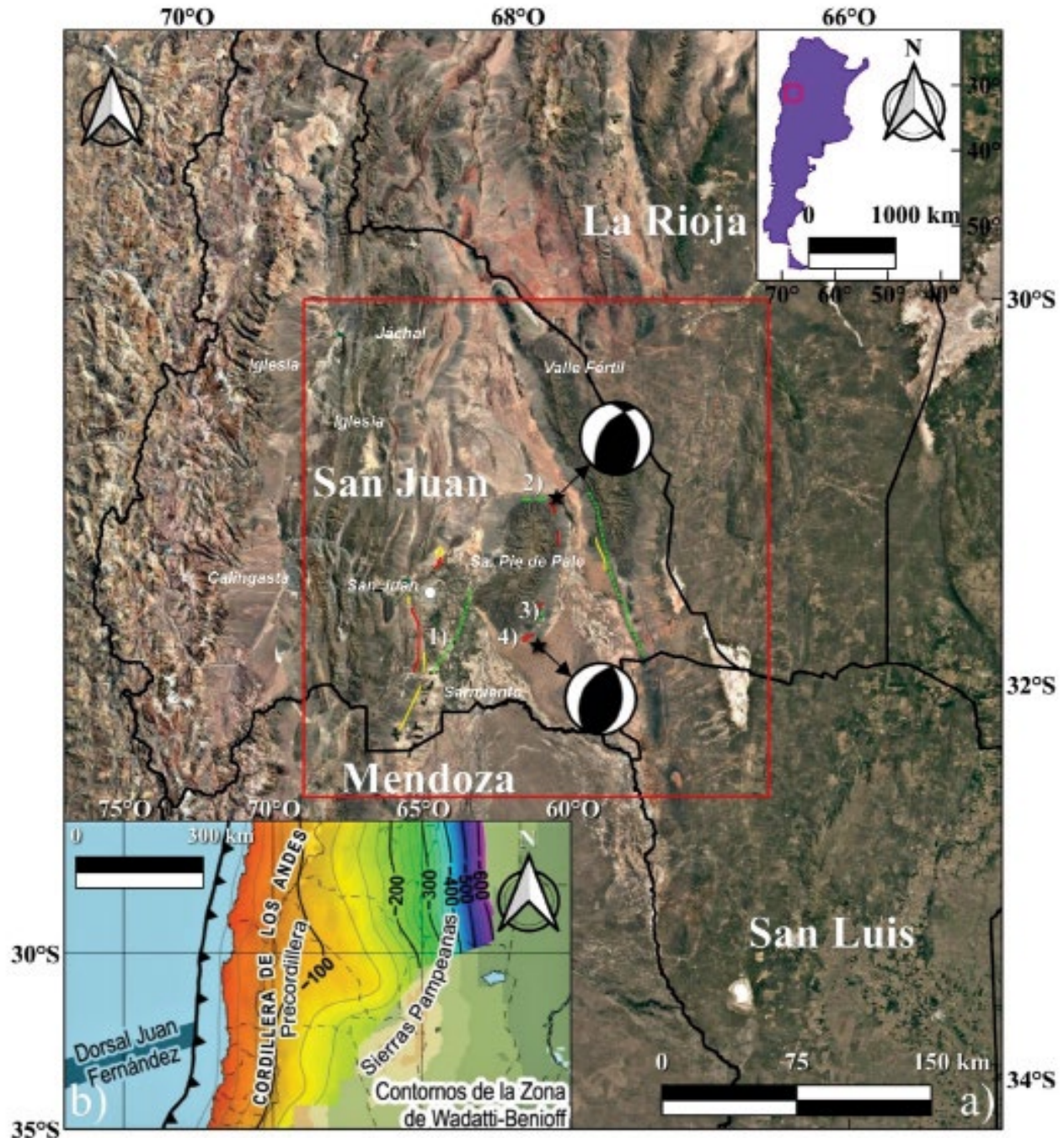
Los resultados obtenidos constituyen la primera evaluación integral del terremoto de 1977 basada en criterios ambientales, aportando una perspectiva complementaria a las escalas macrosísmicas tradicionales y modelos instrumentales y ofreciendo información relevante para la planificación territorial en zonas de elevado peligro sísmico.

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se ubica en el centro oeste de Argentina, aproximadamente, entre los 30° y 32° de latitud Sur y los

67° y 69° de longitud Oeste (Fig. 1a), en la región suroriental de la provincia de San Juan. La intensa actividad sísmica en el trasarco andino a esta latitud, se debe a la convergencia entre las placas oceánica de Nazca y continental Sudamericana, a una velocidad de ~ 6.3 cm/año en dirección N80°E (Kendrick et al., 2003). En esta zona, la placa de Nazca se subduce hasta profundidades cercanas a los 100 km, extendiéndose

lateralmente por varios cientos de kilómetros hacia el este antes de continuar su descenso en el manto (Fig. 1b). El proceso de horizontalización de la placa subducida comenzó hace aproximadamente 8 a 10 millones de años y se ha relacionado con la migración hacia el este del arco volcánico, la intensa deformación de piel fina en la Precordillera y el levantamiento de los bloques de basamento de las Sierras Pampeanas en



**Figura 1.** a) Ubicación del área de estudio (en recuadro rojo) en el contexto regional. Las estrellas negras sitúan el sismo precursor (Mw 6.8) al noreste de Pie de Palo y el sismo principal (al sureste) del 23 de noviembre de 1977 (Mw = 7,4) con las soluciones de mecanismos focales según Langer y Hartzell (1996). También se indican las principales fallas activas del valle del Tulum y sierra de Pie de Palo. En verde las estructuras con actividad tectónica durante el Pleistoceno, en amarillo aquellas con evidencia de actividad tectónica holocena y en rojo aquellas rupturas históricas 1) Sistema de falla Tulum, 2) Falla Pajaritos, 3) Falla La Posta y 4) Sistema de falla Ampacama-Niquizanga, b) Esquema de la región de subducción horizontal con los contornos de la Zona de Wadaty-Benioff. En rojo se indica el área de estudio.

la región andina del trasarco (Kay et al., 1991). Actualmente, la ubicación horizontal de la placa subducida en Argentina, cercana a los 31°S, puede definirse a partir del registro de numerosos sismos a profundidades cercanas a 100 km, mostrando una notable coincidencia con la proyección hacia el continente de la dorsal oceánica de Juan Fernández (Fig. 1b). Esta configuración refleja la interacción entre la subducción y la deformación cortical superficial, favoreciendo la ocurrencia de terremotos corticales en la región, cuyos efectos se manifiestan en la activación de estructuras locales.

Entre los 29° y 33° S se ubican numerosas evidencias de deformación cuaternaria. Bastías (1986a) organizó estas estructuras en distintos sistemas de fallas, vinculados con los límites de las principales unidades geológicas. Costa et al. (2000) y Casa et al. (2011, 2014) recopilaron las principales trazas con actividad cuaternaria identificadas en la Argentina, mientras que Perucca y Vargas (2014) realizaron una descripción detallada de las fallas activas de la provincia de San Juan. Rocca (1970) describió una estructura no aflorante, con rumbo NNE–SSO y una longitud aproximada de 84 km, que atraviesa el valle del Tulum, señalando que el bloque suroccidental corresponde al bloque elevado, a la que denominó falla Tulum. Zambrano y Suvires (2008) identificaron una serie de fallas de igual orientación, definida a partir de sondeos eléctricos verticales, perforaciones y fotointerpretación de lineamientos superficiales, a la que denominaron Sistema de falla Tulum (Fig. 1). En la sierra de Pie de Palo se reconocen varias estructuras con evidencias claras de actividad tectónica cuaternaria. Entre ellas, la falla Pajaritos, ubicada en el piedemonte septentrional de la sierra, la cual presenta rumbo E–O y desplazamiento sinistral, afectando los abanicos aluviales procedentes del sector montañoso (Bastías, 1986a, b). En el extremo sureste de la sierra se encuentra la falla La Posta, que eleva el basamento proterozoico sobre rocas neógenas y bascula niveles aluviales y el Sistema de falla Ampacama–Niquizanga, cuya escarpa presenta cara libre hacia el oeste, con alturas que varían entre 3 y 7 m, afectando niveles de terraza y abanicos aluviales (Fig. 1). Por otra parte, los suelos del valle del Tulum se han formado a partir de los materiales aluviales y coluviales depositados por el río San Juan y arroyos circundantes durante el Cuaternario tardío (Liotta, 2001). En general, se trata de suelos jóvenes, con escaso grado de evolución y una pobre diferenciación de horizontes pedogenéticos. Estas características son coherentes con las condiciones ambientales de la región, dominada por un clima árido y por una dinámica aluvial y tectónica activas que limitan los procesos de edafogénesis. La distribución y las propiedades de los suelos responden al marco geomorfológico en el que se ubican, ya sea en los cauces fluviales, llanuras de inunda-

ción y piedemontes, por lo que pueden presentar variaciones de acuerdo al sector analizado.

## Fundamentos de la Escala ESI-2007

La Escala de Intensidad Ambiental ESI-2007 (Michetti et al., 2007) se aplica a partir de la intensidad IV, nivel en el cual los efectos ambientales cosísmicos comienzan a observarse regularmente bajo condiciones favorables, dependiendo fuertemente de las condiciones geomorfológicas y geológicas locales. Estos efectos se dividen en dos grupos principales: primarios, vinculados directamente con la ruptura de la fuente sismogénica, y secundarios, derivados de la propagación de las ondas sísmicas y las condiciones locales del terreno. Los efectos primarios incluyen las rupturas superficiales de falla, de morfología lineal y extensión de hasta varios kilómetros, así como la deformación tectónica del terreno (levantamiento tectónico regional, o subsidencia tectónica regional). Los efectos secundarios, generalmente más abundantes, comprenden tanto manifestaciones permanentes tales como deslizamientos, licuación de suelos y formación de grietas, como fenómenos transitorios que no dejan registro duradero, tales como caídas de rocas, anomalías hidrológicas (fluctuaciones en pozos, surgencias, desaparición de manantiales, variaciones fisicoquímicas o de temperatura del agua), oleajes en embalses, vibraciones en la vegetación y generación de nubes de polvo.

Los efectos primarios reflejan la energía liberada durante el sismo y se cuantifican principalmente mediante la longitud total de la ruptura y el desplazamiento máximo registrado, los cuales suelen corresponder a intensidades iguales o superiores a VIII. La escala considera también las deformaciones superficiales observables, como elevaciones o hundimientos del terreno. Por ejemplo, longitudes de ruptura de 1 a 10 km y desplazamientos verticales de 5 a 40 cm se asocian con intensidades cercanas a IX y áreas afectadas del orden de 1,000 km<sup>2</sup>. En cambio, la extensión típica de los efectos secundarios, como licuación o deslizamientos, varía entre unos 10 km<sup>2</sup> para una intensidad VII y más de 50,000 km<sup>2</sup> para una intensidad XII.

Finalmente, la escala ESI-2007, al centrarse en la evaluación sistemática de los efectos primarios y secundarios, permite correlacionar eventos sísmicos históricos, prehistóricos y geológicos (paleoterremotos), constituyendo así una herramienta valiosa para la estimación más precisa de la peligrosidad sísmica regional. Estos criterios constituyen la base para la evaluación sistemática de los efectos generados en el ambiente natural por el sismo de San Juan en 1977.

## METODOLOGÍA

Los efectos ambientales asociados al terremoto del 23 de noviembre de 1977 se extendieron sobre una zona relativamente extensa, abarcando varias provincias del país. Para evaluar la intensidad asociada al sismo por medio de la aplicación de la escala ESI-2007, se siguió en parte el protocolo propuesto por Palacios y Perucca (2020), que incluye la recopilación de los efectos descritos por diversos autores, organismos y diarios de la época y entrevistas a los testigos del evento y aquellas fuentes que hasta la fecha no habían sido tomadas en cuenta.

Se revisaron artículos científicos publicados en actas de congresos nacionales e internacionales y en revistas científicas internacionales, que contienen descripciones sobre los efectos ambientales producto del terremoto de 1977. También se analizaron informes de organismos oficiales (INPRES, Instituto Geofísico Volponi) de sus estudios de campo y reconocimiento durante los días posteriores al evento. Se recopiló además testimonios principalmente sobre efectos ambientales secundarios, procedentes de diarios y revistas de circulación local y nacional.

En cada localidad se documentaron los efectos primarios (ruptura superficial, deformación del terreno) y los efectos secundarios (licuación, deslizamientos, caída de rocas, cambios hidrológicos, etc.). Toda la información fue recopilada, evaluada y representada cartográficamente con el objetivo de presentar el impacto ambiental total del terremoto de 1977. Además, la información fue resumida en una tabla que identifica los daños en cada departamento y localidad. Se asoció a cada proceso un grado de intensidad de acuerdo a la Escala ESI-2007 (Michetti et al., 2007). Se trazaron las isosistas uniendo efectos de igual intensidad mediante curvas suaves, a través de un SIG y siguiendo los criterios de la escala ESI-2007. Finalmente, el mapa generado se comparó con los mapas macrosísmicos tradicionales utilizando la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98; European Macroseismic Scale, 1998) y con los modelos de intensidad instrumental del Servicio Geológico americano (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000rp1/shakemap/intensity>) para verificar la coherencia del resultado.

## RESULTADOS

El terremoto del 1977 fue de larga duración, aproximadamente 120 segundos (INPRES, 1977), afectó la región cen-

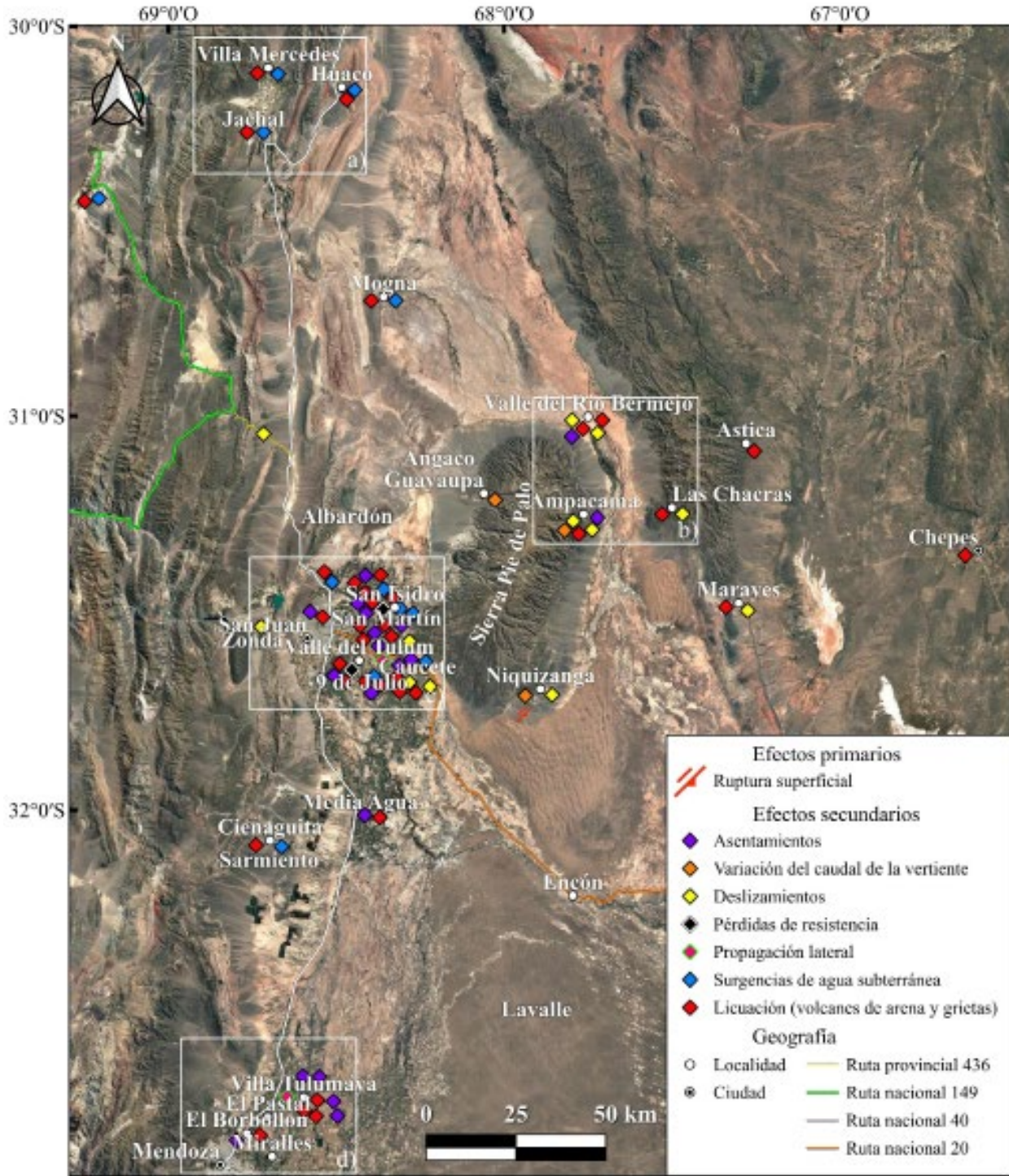
tro-oeste de la Argentina y se percibió en gran parte del territorio, en el centro de Chile y hasta en el sur de Brasil.

El sismo produjo una amplia variedad de efectos ambientales que permiten asignar intensidades elevadas según la escala ESI 2007 (Fig. 2). Los efectos se concentraron principalmente en el sector oriental de la sierra Pie de Palo y en el valle del Tulum y áreas adyacentes, afectando un área de aproximadamente 3,500 km<sup>2</sup>. También se registraron evidencias de deformación superficial y licuación hacia el norte, hasta el valle del Bermejo y Jáchal, y hacia el sur, hasta la provincia de Mendoza (Fig. 2). El evento fue perceptible en una superficie estimada de 1,800,000 km<sup>2</sup>. Estos efectos se resumen en la Tabla 1, indicando en ella además la localización y distancia al epicentro.

La falla Niquizanga, ubicada en el piedemonte suroriental de la sierra de Pie de Palo (Figs. 1 y 2), habría sido la fuente generadora de dicho evento sísmico, generando una escarpa de escasos centímetros y un suave plegamiento en superficie (INPRES, 1977, 1993; Bastías, 1986b; Perucca y Vargas, 2014, entre otros).

Esta estructura, junto con las numerosas grietas formadas en el terreno, las cuales alcanzaron centenares de metros de longitud y la deformación del terreno registrada durante los meses subsiguientes, constituyen los principales efectos primarios registrados en el área. Los valores de longitud de ruptura y desplazamiento de esta falla (ruptura superficial de 10 km y desplazamiento vertical de 30 cm) permiten asignar una intensidad IX para el sector epicentral (Figs. 3 a-d).

Entre los sectores donde se registraron efectos ambientales secundarios se destaca el valle de Jáchal, en el norte de la provincia de San Juan, donde se registró licuación de suelos y surgencia de aguas subsuperficiales (Fig. 4a). En el borde oriental de la sierra de Pie de Palo se registraron deslizamientos de vegas, dejando en descubierto la roca firme (INPRES, 1977) (Fig. 4b). En la Pampa de Ampacama se reconocieron grietas con rumbo N-S, NNE-SSO y NNO-SSE, con anchos de hasta 60 cm. También se mencionaron grietas circulares con hundimientos de hasta 1.50 m (INPRES, 1977). En el flanco noreste de la sierra de Pie de Palo, unos 500 m aguas arriba del Puesto de Ampacama, y sobre el flanco oriental de la quebrada, existía una vertiente, que formó una vega de casi 1 ha. Por efectos del sismo la vega perdió adherencia y se deslizó unos 50 m ladera abajo. Esto originó un aumento del caudal del arroyo, formado en ese momento (INPRES, 1977). En ese lugar también se produjeron desprendimientos y caída de rocas, dejando en el cerro, expuesta la roca firme (INPRES, 1977).



**Figura 2.** Ubicación de los principales efectos ambientales relevados durante el terremoto de 1977. Los recuadros blancos señalan los sectores más afectados (Ver figura 4).

En la localidad de Las Chacras se identificaron deslizamientos en las laderas montañosas y licuación de suelos en los sectores cultivados (Fig. 4b).

Los procesos de licuación fueron los efectos más extendidos y representativos de intensidades elevadas. En el departamento Caucete, se documentaron conos y volcanes de arena de hasta 0.8 m de diámetro y 0.5 m de altura, hundi-

mientos diferenciales del terreno y roturas de canales de riego y rutas pavimentadas. En algunas viviendas se formaron volcanes de arena en el interior, acumulándose hasta 12 m<sup>3</sup> de sedimentos y agua (INPRES, 1993; Youd y Keefer, 1994; Perucca y Moreiras, 2006; Perucca et al., 2006) (Figs. 4c, 5 a-d). Emergió abundante agua, generándose numerosos conos de arena y limo, de distintos tamaños y alineados gene-

**Tabla 1.** Efectos Ambientales Primarios y Secundarios identificados en la zona de estudio, desglosados según Distancia al Epicentro, Localidad, Características e Intensidad ESI-2007

Distancia al epicentro	Ubicación	Características	Intensidad Escala ESI-2007	Distancia al epicentro	Ubicación	Características	Intensidad Escala ESI-2007
Efectos ambientales primarios							
0.5 km	SE Sierra Pie de Palo (Falla Niquizanga)	Longitud de ruptura de la falla: ~10 km Rechazo vertical: 0.30 m	IX	51 km	Aeropuerto Las Chacritas	Grietas en la pista principal del aeropuerto, de un ancho máximo de 3cm. Grietas transversales de 50 cm de ancho.	VIII
Efectos ambientales secundarios							
20-30 km	Departamento Cauce	Asentamientos diferenciales: Se originaron grietas y hundimientos, con profundidades de hasta 1.50m. Conos de arena alineados en grietas hasta 400 m de extensión Desplazamientos laterales	IX	140-150 km	Lavalle El Pastal (Provincia de Mendoza)	Licuación hundimiento y levantamientos diferenciales, acompañados por grandes grietas de hasta 1.70 m de ancho. Movimientos verticales diferenciales, provocaron en las construcciones, inclinaciones de hasta 8°. Conos de arena de hasta 1 m de diámetro.	VIII-IX
40 km	San Martín	Conos de arena alineados con diámetros desde pocos cm hasta 4 m Hundimientos de hasta 1.50 m. en rutas y canales	IX	26 km	Valle del Bermejo	Desmoronamiento del terraplén, sobre donde se extienden las vías del tren. Descarrilamiento de un tren de carga, a pocos km de Bermejo. Grieta y asentamiento diferencial	VIII
40 a 45 km	Departamento Sarmiento-Media Agua	Hundimientos y asentamientos de hasta 1.50 m. Licuación: volcanes de arena	IX	65 km y 48 km respectivamente	Albardón y Angaco	Grietas de 50 cm hasta a 1 a 2 m de ancho. Hundimiento del terreno de 25 cm. Grietas con emanación de agua y arena.	VIII
40 a 45 km	Pampa de Ampacama	Grietas y hundimientos circulares de hasta 1,50 m.	VIII-IX	39 km	9 de Julio	Grietas de 50 cm de ancho, la freática muy superficial, conos de arena	VIII
45 a 47 km	Flanco NE de la sierra Pie de Palo (Puesto de Ampacama)	Remoción en masa, sobre la falda este de la quebrada, una vega se deslizo 50 m hacia abajo. Desprendimientos y caída de rocas, dejando zonas del cerro con la roca firme al descubierto Grietas y hundimientos con rumbo N-S, NNE y NNO con ancho de hasta 60 cm. Aumento del caudal de un arroyo formado por una serie de vertientes y vegas	VIII-IX	106 y 132 km	Astica y Chepes (La Rioja)	Grietas y daños en canales de irrigación	VII
78 km	Extremo norte de la sierra Pie de Palo.	Conos de arena alineados de gran diámetro, arrojaron aguas y sales al exterior.	VIII-IX	88 km	Dpto. Zonda	Caída de grandes rocas en el acceso al departamento	VII
39 km	El Bosque (Norte de San Martín)	Conos de arena alineados, con diámetros desde escaso cm hasta 0.80 m Hundimientos y levantamientos diferenciales, en bodegas de hasta 0.70 m. Pérdida de la verticalidad: en las construcciones e instalaciones.	VIII	150-200 km	Jáchal, Mogna, Iglesia	Grietas con emanación de agua	VI
				90 a 100 km	Ruta hacia el Dpto. Calingasta	Caída de rocas en la zona montañosa	VI
				58 km	Las Chacras y Marayes	Caída de rocas en la zona montañosa Grietas de algunos centímetros	VI

ralmente en fisuras de hasta 500 m de extensión. Además, los asentamientos diferenciales provocaron grietas y zanjas con profundidades de hasta 1.50 m y se produjeron desplo-

mes discontinuos en la carpeta asfáltica por tramos de 50 a 100 m (Fig. 6), (INPRES, 1977, 1993; Volponi et al., 1978). El proceso se manifestó en suelos de textura arenosa o arenas



**Figura 3.** a) Vista aérea oblicua de la Falla Niquizanga, con escarpa al noroeste en el sector norte de su traza. No se apreció acá evidencia de ruptura durante el sismo. b) Ruptura superficial observada durante el sismo de 1977. c) Vista a sur de la escarpa de falla (línea blanca de trazos discontinuos). Las flechas señalan la ruptura superficial. Fuente: Bastías (1986a, b). d) Vista de las vías del tren desplazadas por la falla, tanto verticalmente como en forma horizontal. Fuente: Grupo Sismotectónica (CIGEOBIO).

limosas sueltas, saturadas y limpias, aunque también fue observado en gravas y limos poco plásticos. Otros daños ocurridos durante el sismo de 1977 van desde pequeños hundimientos y desplazamientos laterales (*lateral spreading*) hasta deslizamientos de grandes masas de suelo, asentamientos con inclinaciones en fundaciones y estructuras de retención (Fig. 7), (INPRES, 1977; Volponi et al., 1978).

En la localidad de San Isidro, la licuación originó hundimientos y levantamientos diferenciales de hasta 0.7 m, con daños severos en instalaciones industriales. En grandes extensiones del departamento San Martín se produjeron grietas de rumbo N-S y NO-SE de tipo tensional con licuación de suelos, formándose alineaciones de conos de arena de diámetros de pocos cm hasta 4 m. En las rutas y canales se produjeron hundimientos de hasta 1.50 m (INPRES, 1977). En la zona norte de San Martín, se observaron conos de arena, alineados a lo largo de 300 m y 500 m, con diámetros de pocos cm hasta 0.80 m, con alturas de hasta 0.50 m. Los rumbos predominantes de las alineaciones son N-S, NNE, SSO, NNO (INPRES, 1977, 1993; Volponi et al., 1978) (Fig. 4c).

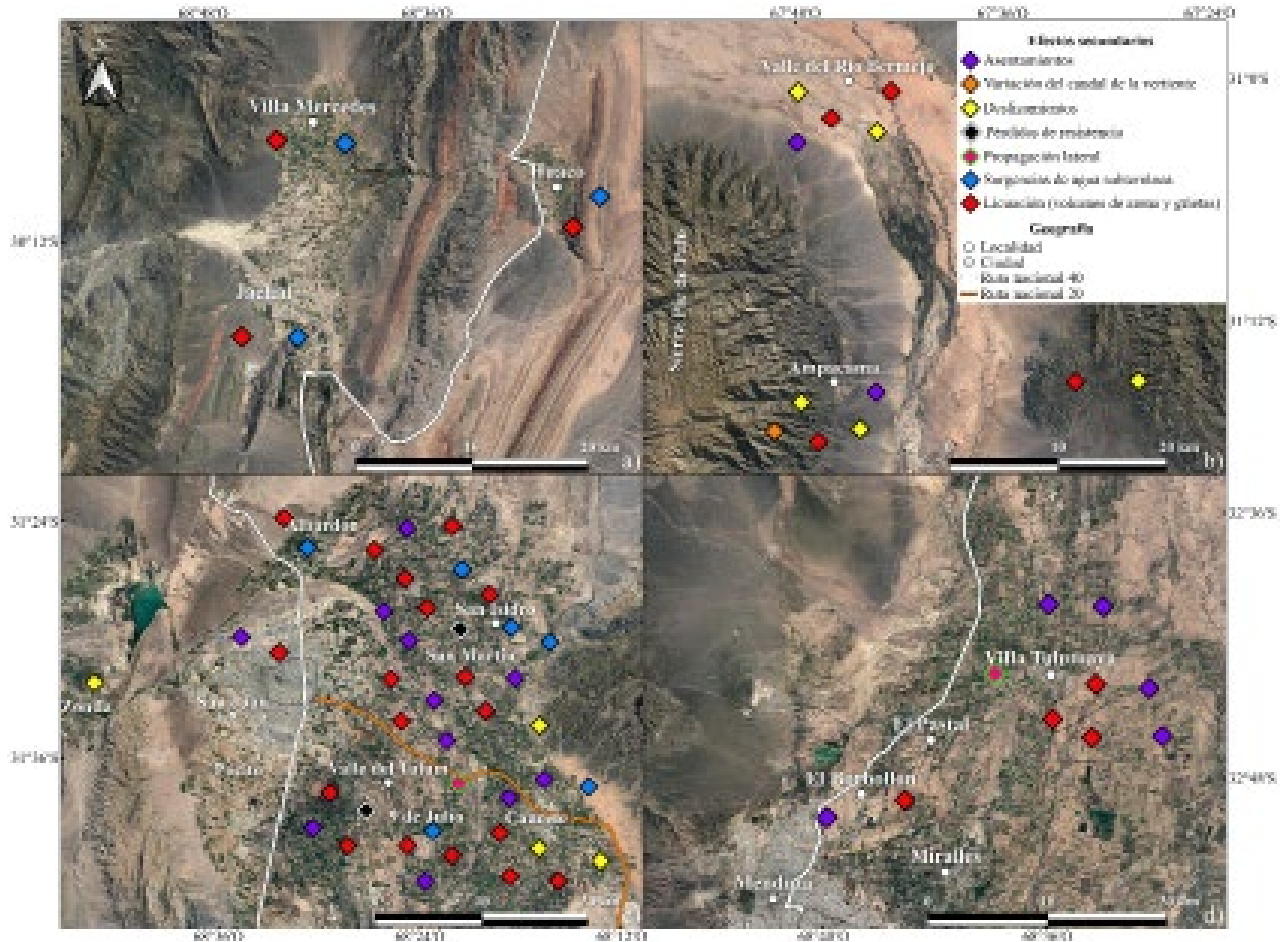
Al sur de la provincia, en Media Agua se identificó también la licuación de suelos y hundimientos con diámetros de hasta

10 m y profundidades de 1.50 m (INPRES, 1977, 1993; Volponi et al., 1978).

En El Pastal (Lavalle-Mendoza) fueron muy notables los procesos de licuación, el suelo se comportó plásticamente, produciendo levantamientos y hundimientos diferenciales, acompañados por grandes grietas, con desplazamientos de hasta 1.70 m (INPRES, 1977) (Fig. 4d).

Un asentamiento del terreno, de 4 m de ancho y 50 m de largo, delimitado por escarpes de 0.1 m de altura, interrumpió el pavimento de la ruta nacional 40 en el kilómetro 22. Lo más probable es que este asentamiento fuera causado por la compactación, intensificada por la licuación de los depósitos arenosos subyacentes que rellenaban un canal enterrado (Youd y Keefer, 1994).

La magnitud de los efectos secundarios se reflejó en los daños a las obras civiles y estructuras con la formación de grietas en caminos, puentes, canales de riego y pistas de aterrizaje (Figs. 6 y 7). En el aeropuerto Las Chacritas (Departamento 9 de Julio) se produjeron grietas longitudinales y transversales de hasta 50 cm de ancho, hundimientos del pavimento y daños en la torre de control y la plataforma de maniobras, lo que dejó fuera de servicio al aeropuerto. Unos 8



**Figura 4.** Principales efectos ambientales secundarios registrados en la provincia de San Juan y norte de Mendoza. a) Valle de Jáchal y Mogna. b) Borde oriental de la sierra de Pie de Palo y localidad de Las Chacras. c) Valle del Tulum. d) Sector norte de la provincia de Mendoza.



**Figura 5.** a y b) Cráteres y volcanes de arena en el interior de algunas viviendas de un barrio en Caucete. Las manchas en la pared muestran la altura que alcanzó el agua. Fuente: Youd y Keefer (1994). c) Licuación de suelos en distintos edificios y viviendas del departamento Caucete. Fuente: INPRES (1993).



**Figura 6.** a) Grietas longitudinales en el extremo sur de la pista de aterrizaje del Aeropuerto La Chacritas. b y c) Grietas transversales en calles de Caucete, con un ancho y profundidad considerable (aproximadamente 1-1.50 m). Fuente: Instituto Sismológico Zonda. [https://www.cadena3.com/noticia/sociedad/se-cumplen-40-anos-del-sismo-de-caucete-de-1977\\_196683](https://www.cadena3.com/noticia/sociedad/se-cumplen-40-anos-del-sismo-de-caucete-de-1977_196683).



**Figura 7.** a y b) Vías del ferrocarril afectadas por el sismo y descarrilamiento de vagones producido por el evento (Fuentes: INPRES, 1977; Instituto de Investigaciones Antisísmicas). c-f) Daños en canales de regadío, pozos de agua, monumentos y áreas de cultivos por licuación de suelos, asentamientos diferenciales, entre otros (Fuentes: Instituto Geofísico Volponi, INPRES, 1977, 1993).

km antes de llegar al valle del Bermejo, se produjo el descarrilamiento de un tren de carga, como consecuencia del sismo (Volponi et al., 1978). También se produjeron daños en la cabecera este del puente sobre el río San Juan (Volponi et al., 1978).

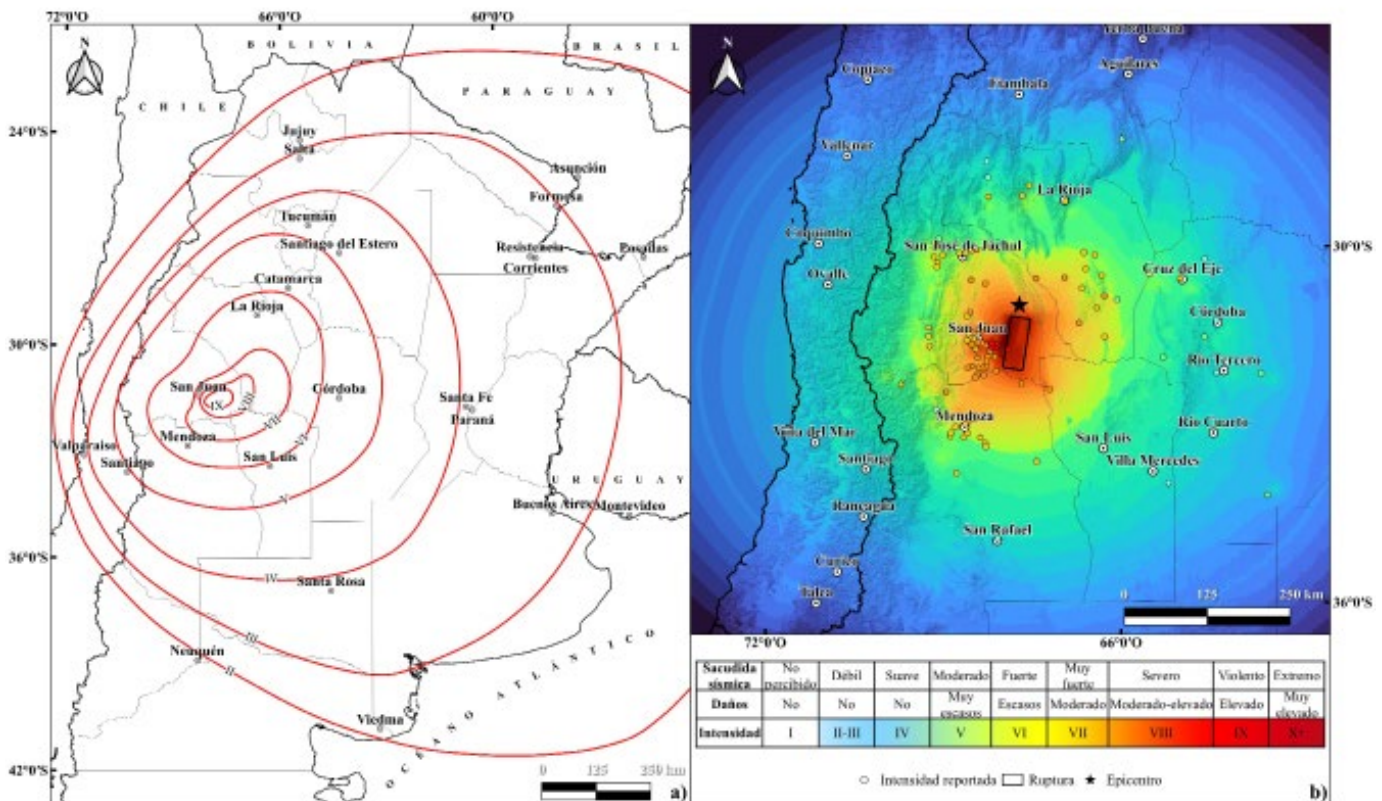
## DISCUSIÓN

Los daños ocasionados por el terremoto de 1977 han sido evaluados históricamente mediante escalas de intensidad macrosísmica centradas en los efectos sobre la población y las construcciones, como la Escala Mercalli Modificada (MMI; Cencić y Musson, 2004). El INPRES (1977) elaboró un mapa de isosistas de carácter regional que incluso abarcó sectores de países limítrofes como Uruguay, Chile y Brasil, con intensidades de hasta III, y sugirió para el área epicentral una intensidad IX, sin delimitar con mayor precisión las zonas más afectadas en la provincia de San Juan (Fig. 8 a). Por su parte, las intensidades estimadas por el USGS (2021) mediante *ShakeMap* indican un máximo de grado IX-X en Caucete, disminuyendo hacia las localidades vecinas al epicentro y hacia la ciudad de San Juan (Fig. 8b). A pesar de la naturaleza ins-

trumental y modelada de *ShakeMap*, estos valores muestran buena correspondencia con las intensidades derivadas en este estudio mediante la Escala ESI-2007, lo que valida la consistencia general entre ambos enfoques (Fig. 9).

La aplicación de la ESI-2007 permitió identificar un amplio espectro de efectos ambientales primarios y secundarios, cuya distribución espacial refleja con mayor detalle la variabilidad de intensidades producidas por el sismo. Los procesos secundarios (licuación, hundimientos, propagación lateral, grietas y deslizamientos) se concentraron principalmente en los depósitos aluviales recientes del valle del Tulum y planicies sedimentarias de San Juan y del norte de Mendoza, donde el nivel freático somero y la granulometría fina de los limos y arenas favorecieron la amplificación de las ondas sísmicas y la pérdida de resistencia del terreno (Alvarado et al., 2020). En estas áreas, los indicadores reunidos permiten asignar intensidades entre VI y IX según la escala ESI-2007 (Fig. 9), lo que coincide con la distribución de daños estructurales descrita en estudios previos (INPRES, 1993; Youd y Keefe, 1978, 1994; Volponi et al., 1978).

Las intensidades más elevadas (IX) se registraron en Caucete y zonas adyacentes, donde la licuación fue generalizada y produjo deformaciones significativas en terrenos agrícolas,



**Figura 8.** a) Mapa de isosistas según INPRES (1977). b) Mapa de intensidades MMI según USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/usp0000rp1/shakemap/intensity>).



Bollinger, 1988; Langer y Hartzell, 1996), no se descarta respuesta a una partición de la deformación del retroarco entre fallas basamentales heredadas y estructuras corticales superiores, consistente con lo sugerido por Ammirati et al. (2022) para el terremoto en San Juan del 2021 y como respuesta a la convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamericana.

La ocurrencia simultánea de intensidades altas en áreas de ruptura y en sectores distales afectados por licuación demuestra la compleja interacción entre la fuente sismogénica y los efectos modulados por condiciones locales del terreno.

En conjunto, la comparación entre las intensidades ESI-2007 obtenidas y los valores reportados previamente por MMI y ShakeMap sugiere una correspondencia general, pero también pone de manifiesto la mayor capacidad de la ESI-2007 para capturar variaciones espaciales finas, especialmente en zonas rurales donde los efectos ambientales constituyen la principal evidencia del impacto sísmico. En el caso del sismo de noviembre de 1977, la aplicación de la escala de Intensidad sísmica a partir de los efectos ambientales, sugiere que el epicentro del mismo se ubicó en el borde suroriental de la sierra de Pie de Palo, posiblemente asociada a la falla Niquizanga, tal como lo evidencia la ruptura superficial señalada por Volponi et al. (1978) y Bastías (1986a), entre otros autores. Esto demuestra el valor de la escala ESI-2007 como herramienta para reconstruir eventos históricos y prehistóricos en regiones de baja densidad poblacional y con incertidumbres en la determinación de la fuente sismogénica y resalta la importancia de incorporar estos criterios ambientales en las evaluaciones de peligrosidad sísmica regional.

## CONCLUSIONES

Esta contribución representa la primera evaluación sistemática del terremoto de 1977 basada en los efectos ambientales y destaca el potencial de la escala ESI-2007 como herramienta para mejorar la caracterización de intensidades, contribuir a la reconstrucción de terremotos históricos y paleosísmicos, y fortalecer estudios orientados a la planificación territorial y mitigación del peligro sísmico en áreas tectónicamente activas escasamente pobladas.

Los resultados obtenidos muestran una buena correspondencia general entre las intensidades derivadas mediante la escala ESI-2007 y las estimaciones previas basadas en la escala MMI y los modelos instrumentales (ShakeMap). Sin embargo, la aplicación de la escala ESI-2007 permitió identificar con mayor detalle las variaciones espaciales asociadas a la interacción entre la fuente sismogénica y las condiciones

locales del terreno. En este sentido, se destaca la importancia de incorporar indicadores ambientales en evaluaciones de eventos históricos, particularmente en regiones áridas con depósitos cuaternarios susceptibles a licuación y deformación superficial. De este modo, este enfoque constituye una herramienta complementaria a las escalas macrosísmicas tradicionales, aportando información especialmente valiosa en áreas donde los efectos ambientales representan el principal indicador de la severidad sísmica.

## AGRADECIMIENTOS

La presente contribución fue financiada con fondos del Programa Permanente "Tectónica Cuaternaria Argentina" del Gabinete de Neotectónica y Geomorfología del Instituto de Investigaciones Geológicas (UNSJ). Los autores agradecen a los revisores y al Editor de Sección, Dr. Fernando Hongn, por las acertadas sugerencias y correcciones que contribuyeron a la mejora de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Alvarado, P.M., Christiansen, R.O., Gregori, S.D. y Saez, M. 2020. Evidence of site amplification from ground motion of the last two large crustal earthquakes in central-western Argentina. *Natural Hazards*, 104, 2081–2102. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04203-0>
- Ammirati, J., Mackaman-Lofland, C., Zeckra, M. y Gobron, K. 2022. Stress transmission along mid-crustal faults highlighted by the 2021 Mw 6.5 San Juan (Argentina) earthquake. *Science Report* 12: 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22752-6>
- Audemard, F., Azuma, T., Baiocco, F., Blaize, S., Blumetti, A.M., Brustia, E., Clague, J., Comerci, V., Esposito, E., Guerrieri, L., Gürpınar, A., Grützner, C., Jin, K., Kim, Y.S., Kopsachilis, V., Lucarini, M., McCalpin, J., Michetti, A., Mohammadioun, B., Mörner, 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. y Vittori, E. 2015. Earthquake environmental effect for seismic hazard assessment: the ESI intensity scale and the EEE Catalogue. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia* 97: 1–181.
- Bastías, H. 1986a. Fallamiento cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan, 147 p.
- Bastías, H. 1986b. Reconocimiento de las principales fallas de la región de Precordillera. Guía de viaje, Reunión Conjunta IGCP 202-206. Universidad Nacional de San Juan, 36 p.
- Casa, A., Yamín, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M. y Cegarra, M. 2011. Deformaciones cuaternarias de la República Argentina. *Sis-*

- tema de Información Geográfica. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Publicación 171, DVD.
- Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., Cegarra y M., Hongn, F. (Eds.) 2014. Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, v2.0 en formato DVD.
- Cecic, I. y Musson, R. 2004. Macroseismic surveys in theory and practice. *Natural Hazards* 31: 39–61.
- Colón, S., Leal, A., Audemard, F., Vásquez, R. y Rodríguez, J.A. 2019. Análisis macrosísmico del sismo Mw ~7,6 de San Narciso del 29 de octubre de 1900, aplicando la escala medioambiental ESI-2007. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela* 34(1): 1–17.
- Costa, C., Machette, M., Dart, R., Bastías, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. 2000. Map and database of Quaternary faults and folds in Argentina. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-0108, 75 p.
- INPRES. 1977. El terremoto de San Juan del 23 de noviembre de 1977. Informe preliminar. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, San Juan, 103 p.
- INPRES. 1993. La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan. Publicación Técnica 18, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, San Juan, 46 p.
- Kadinsky-Cade, K., Reilinger, R. e Isacks, B. 1985. Surface deformation associated with the November 23, 1977, Cauçete, Argentina, earthquake sequence, *Journal of Geophysical Research* 90(B14): 12,691–12,700, doi: 10.1029/JB090iB14p12691.
- Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. y Munizaga, F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone in the Central Andes (28°–33°S). En: Harmon RS, Rapela CW (eds.), *Andean Magmatism and Its Tectonic Setting*. Geological Society of America Special Paper 265: 113–137.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Barriga, R., Laur, E. y Souto, L. 2003. The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 125–131.
- Langer, C. y Bollinger, G. 1988. Aftershocks of the western Argentina (Cauçete) earthquake of 23 November 1977: Some tectonic implications. *Tectonophysics* 148: 233–247.
- Langer, C. y Hartzell, S. 1996. Rupture distribution of the 1977 western Argentina earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 94(1-2): 121–132.
- Liotta, M. 2001. Los suelos en los Valles de Tulúm y Ullúm-Zonda. EEA INTA San Juan: 7-9.
- Michetti, A.M., Esposito, E., Gürpınar, A., Mohammadioun, B., Mohammadioun, J., Porfido, S., Rogozhin, E., Serva, L., Tatevos-Sian, R., Vittori, E., Audemard, F., 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., Tatevosian, R., Vittori, E., Audemard, F., Azuma, T., Clague, J., Comerci, V., Gürpınar, A., McCalpin, J., Mohammadioun, B., Mörner, N., Ota, Y. y Rogozhin, E. 2007. Environmental Seismic Intensity Scale (ESI-2007). Memorie Descrittive della Carta Geologica d’Italia 74: 1–53.
- Palacios, S.B. y Perucca, L.P. 2020. Protocolo para la aplicación de la Escala de Intensidad Ambiental ESI-2007 en Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Argentina* 75(2): 356–370.
- Palacios, S.; Oro, A.; Perucca, L. 2024, 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. *Andean Geology* 51 (3): 518-537. Doi: <https://dx.doi.org/10.5027/and-geoV51n3-3704>.
- Perucca, L.P. y 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.P. y Vargas, N. 2014. Neotectónica de la provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2): 291-304.
- Perucca, L.P., Pérez, A. y 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.
- Rocca, J.A. 1970. Geología de los valles de Tulum y Ullum-Zonda, provincia de San Juan. Plan Agua Subterránea. Informe Técnico P-031(inédito) 1: 1-112, San Juan.
- Serva, L. 2019. Earthquake environmental effects: a review of the ESI-2007 scale and its applications. *Quaternary International* 510: 12–25.
- USGS. 2021. ShakeMap for the 23 November 1977 San Juan (Cauçete) earthquake. United States Geological Survey. Disponible en:<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000rp1/shakemap/intensity> (Accedido en octubre 2024).
- Volponi, F. y Sisterna, J. 1980. Informe de la renivelación de la línea N23 de IGM entre los PF 29 y PF 39. Instituto Sismológico Zonda, Universidad Nacional de San Juan, 7 p.
- Volponi, F., Quiroga, M. y Robles A. 1978. El terremoto de Cauçete del 23 de noviembre de 1977. Instituto Sismológico Zonda, Universidad Nacional de San Juan, 81 p.
- Youd, T.L. y Keefer, D.K. 1978. Liquefaction and landslides in the November 23, 1977 earthquake in San Juan, Argentina. *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 10(7): 521.
- Youd, T.L. y Keefer, D.K. 1994. Liquefaction during the 1977 San Juan Province, Argentina earthquake (Ms=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)

Zambrano, J.J., y Suvires, G.M. 2008. Actualización en el límite entre Sierras Pampeanas Occidentales y Precordillera Oriental, en la Provincia de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (1): 110-111.