

Irrigación de largo plazo como desencadenante de flujos de tierra en Chenque Malal, Norpatagonia argentina

*Damián Groch^{1,2}, Verónica Gil², Marisa Gloria Cogliati¹, Micaela Virginia Medina¹, Michel Jaboyedoff³

¹ Departamento de Geografía, Universidad Nacional del Comahue, Avenida Argentina 1400, (8300) Ciudad de Neuquén, Argentina.
damiangroch@gmail.com, marisa.cogliati@fahu.uncoma.edu.ar, mvmedina24@gmail.com

² Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur-CONICET, 12 de Octubre 1198, (8000) Bahía Blanca, Argentina.
verogil@uns.edu.ar

³ Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Géopolis 3793, (1015) Lausanne, Switzerland.
michel.jaboyedoff@unil.ch

* Autor de correspondencia: damiangroch@gmail.com

RESUMEN. Los deslizamientos representan un motivo de preocupación global debido a sus impactos sociales, ecológicos y económicos. Episodios alrededor del mundo han sido asociados a causas naturales y antrópicas, sin embargo, estas últimas se encuentran poco exploradas. A pesar del desarrollo científico en los últimos años con respecto a causas vinculadas a la irrigación intensiva, los estudios sobre este tema aún son escasos. Este trabajo se focaliza en determinar la influencia antrópica en la generación de flujos de tierra por riego intensivo de largo plazo, mediante el uso de información temporal y geoespacial. El análisis se llevó a cabo en un sector de la Norpatagonia argentina donde se desarrolla actividad ganadera trashumante. Los resultados muestran que los aportes desmedidos de agua brindan condiciones favorables para la generación y evolución de flujos de tierra, inclusive en condiciones de déficit hídrico. Producto de ello, el 22 de septiembre de 2020 se registró un colapso que movilizó ~19.000 m³ de tierra a lo largo de 360 m, el cual produjo pérdidas económicas estimadas en 168.000 USD. Es factible que otros deslizamientos se produzcan en el área ante el mantenimiento de estos aportes de agua.

Palabras clave: Colapso, Deslizamiento, Huinganco, Manejo del agua, Neuquén.

ABSTRACT. Long-term irrigation as an earthflow trigger in Chenque Malal, Northern Patagonia, Argentina. Because of their social, ecological, and economic impacts, landslides are an issue of global concern. Episodes occurring worldwide have been associated with natural and human causes, although the latter have been poorly explored. Despite recent scientific insight into intensive irrigation as a cause, research remains scarce. This paper focuses on determining the anthropogenic influence on the triggering of earth flows by long-term intensive irrigation, based on temporal and geospatial information. This analysis covers a sector of Northern Patagonia in Argentina, an area of transhumant pastoralism. Our results show that excessive water input creates favorable conditions for the triggering and evolution of earth flows in the region, even under water deficit conditions. As a result, on 22 September 2020, a collapse was recorded which mobilized ~19,000 m³ of earth debris along 360 m and produced economic losses estimated at 168,000 USD. Other landslides are expected to occur in the area if irrigation amounts remain at the same level.

Keywords: Collapse, Landslide, Huinganco, Water management, Neuquén.

1. Introducción

Los deslizamientos, también conocidos como procesos de remoción en masa, son una de las mayores amenazas naturales alrededor del mundo, provocando anualmente pérdidas significativas de vidas y grandes daños económicos (Haque *et al.*, 2019). La ocurrencia de estos fenómenos ha sido vinculada tanto con causas naturales (*e.g.*, lluvias, sismos, deshielos, actividad volcánica), como humanas (*e.g.*, urbanización, deforestación, irrigación, excavación de taludes) (Highland y Bobrowsky, 2008). Los efectos del cambio climático y el cambio de uso y cobertura de la tierra actuarían incrementando la intensidad y frecuencia de este tipo de eventos (Gariano *et al.*, 2018; IPCC, 2021). Los estudios existentes en la literatura están mayormente vinculados con causas naturales, mientras que la cantidad de trabajos relacionados con forzantes antrópicos es notoriamente inferior.

Las investigaciones de deslizamientos inducidos por irrigación presentan una baja distribución espacial global, y se concentran mayormente en países como China y Perú (Lacroix *et al.*, 2020; García-Chevesich *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021); sin embargo, los estudios en años recientes han ido en franco crecimiento (García-Chevesich *et al.*, 2021). La ocurrencia de episodios durante las últimas décadas ha sido atribuida al aporte constante de agua para la agricultura (Peng *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2019), lo que produce una modificación de la estabilidad natural de las laderas mediante la elevación del nivel freático, el humedecimiento y aumento del peso de capas superficiales del suelo y la reducción de la resistencia basal, entre otros hechos, lo cual puede durar años (Xu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2019; Lian *et al.*, 2020). Los impactos sociales, ecológicos y económicos a partir de estos casos son un motivo creciente de preocupación en la comunidad global, por lo que la temática debe estudiarse exhaustivamente.

En Argentina, el impacto de actividades antrópicas a partir del uso y/o gestión del agua fue estudiado en Vista Alegre (Neuquén, Argentina), donde el riego excesivo por actividades agrícolas ha provocado deslizamientos complejos (Moreiras y Coronato, 2009; Jurio *et al.*, 2014). La literatura no presenta otros casos de deslizamientos vinculados al manejo del agua en Argentina, aunque, la prensa de la Norpatagonia (*i.e.*, provincias de Neuquén y Río

Negro) ha reportado múltiples episodios en los últimos años. Se destacan deslizamientos de tipo desprendimientos y flujos en Villa La Angostura (agosto 2021, diario La Mañana de Neuquén), Las Grutas (enero 2022, diario Informativo Hoy), Mari Menuco (febrero 2022, diario Río Negro) y Bariloche (junio 2022, diario Río Negro), que se relacionaron con agua de riego, desagotes pluviales y de piscinas, efluentes domésticos y proyectos hidroeléctricos. La presencia de víctimas fatales y las considerables pérdidas económicas durante estos episodios, hace imperiosa la necesidad de estudiar la relación entre el manejo del agua y la potencial generación de deslizamientos.

Los deslizamientos de tipo flujos de tierra (*earth flows*) ocurridos en la Norpatagonia argentina han sido atribuidos a causas naturales y abordados principalmente desde el punto de vista regional mediante imágenes satelitales, fotografías aéreas, cartografía y trabajos de campo. En cercanías del paraje Ailenco (36°37' S, 70°36' O) y de los ríos Limay y Negro (38°59' S, 67°59' O), se han reportado numerosos eventos en relación con otros tipos de deslizamientos (González Díaz *et al.*, 2003; Moreiras y Coronato, 2009). Al norte de la localidad de Tricao Malal (37°01' S, 70°20' O) y en las proximidades de las comarcas Aluminé, Chapelco y Arroyo Limay Chico (39°14' S, 70°55' O) se describieron deslizamientos de tipo asentamiento rotacional, flujo de detritos y flujos de tierra, que se atribuyeron a colapsos de aparatos volcánicos y/o precipitación intensa o de larga duración (González Díaz, 2009; González Díaz y Folguera, 2009). Otros eventos de remoción en masa fueron descritos y estudiados en cuencas tributarias del río Barrancas (36°28' S, 70°11' O), entre los que se incluyeron flujos de tierra, adjudicados a lluvias torrenciales (González Díaz y Di Tommaso, 2012). A pesar de que estos deslizamientos no fueron asociados con actividades humanas, la ocurrencia reciente de flujos de tierra exige nuevos análisis.

El objetivo de este estudio fue determinar la influencia antrópica directa en la generación de flujos de tierra debido al riego intensivo de largo plazo (*i.e.*, años a décadas). Se seleccionó el área de Chenque Malal en Huinanco (Norpatagonia argentina; Fig. 1) para un análisis más detallado, debido a un colapso registrado el 22 de septiembre de 2020 que produjo cuantiosas pérdidas económicas. Los principales resultados obtenidos en este trabajo

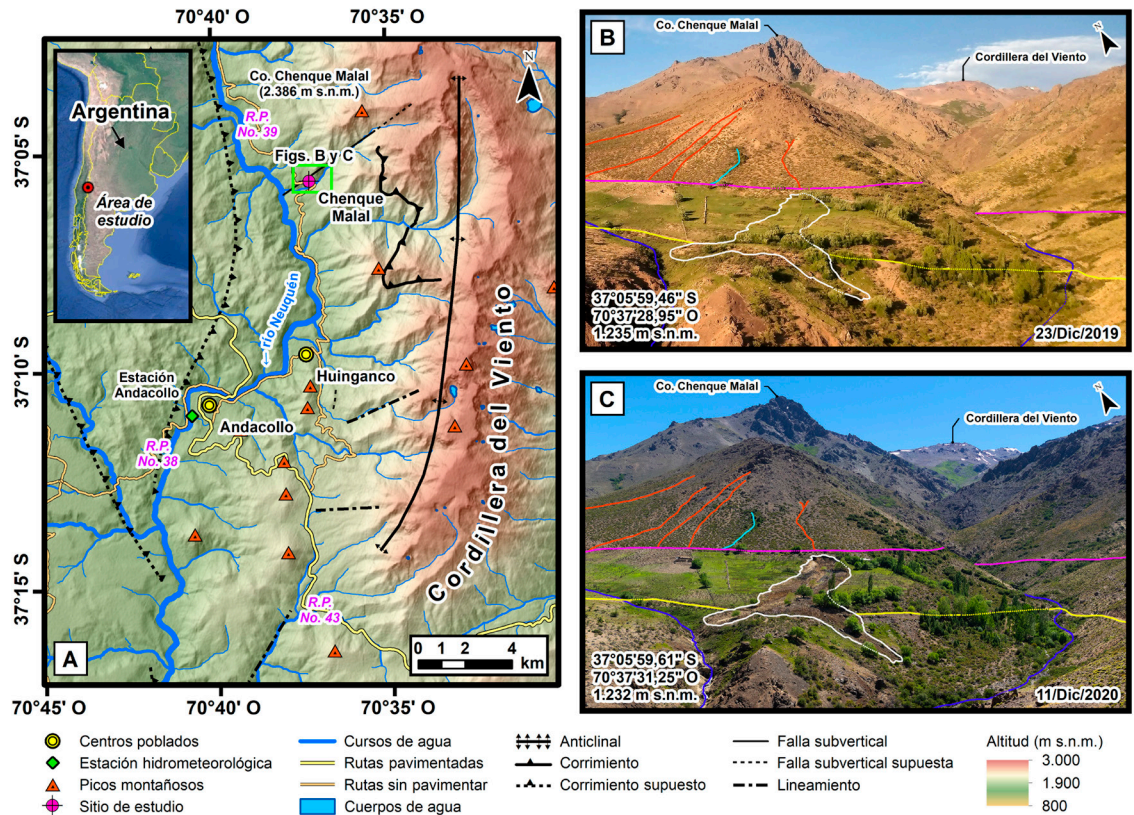


FIG. 1. Área de estudio en el suroeste de la cordillera del Viento (Norpatagonia argentina) (A) y vista general del área de colapso del flujo de tierra en Chenque Malal para 2019 (B) (fotografía: Silvana Escobar) y 2020 (C) (fotografía: Damián Groch). (B-C) presentan: perímetro del colapso ocurrido el 22 de septiembre de 2020 (polígono blanco), cursos de agua (líneas moradas), Ruta Provincial No. 39 (líneas amarillas), canales de riego (líneas fucsias), cursos de vertientes (líneas celestes) y cárcavas naturales (líneas naranjas). La ubicación de este sector se muestra en (A) (recuadro verde). Información de base: MDT SRTM de USGS y características estructurales de Zöllner y Amos (1973), Rovere *et al.* (2004), y Coppolecchia *et al.* (2011).

pueden contribuir a identificar tempranamente otros sitios de riesgo en la región. Este estudio es uno de los primeros donde se expone la generación de deslizamientos por irrigación de largo plazo en un área destinada al uso ganadero, contrariamente al uso agrícola intensivo de los estudios existentes.

2. Área de estudio

Chenque Malal se localiza a 11,1 km al norte de Huinganco ($37^{\circ}05'41,55''$ S, $70^{\circ}37'15,02''$ O, 1.266 m s.n.m.), en el suroeste de la cordillera del Viento, Norpatagonia argentina (Fig. 1A). En este sector predominan las rocas pertenecientes al Grupo Choiyoi, principalmente brechas, tobas ignimbríticas, andesitas y riolitas de edad pérmica tardía a triásica media (Coppolecchia *et al.*, 2011) y geformas

poligénicas tales como laderas disectadas, cárcavas y pendientes rocosas con erosión (Tchilinguirrián, 2011). La actividad sísmica es moderada (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 2022), como resultado de la actividad tectónica y volcánica regional. Las características estructurales predominantes se vinculan con fallas geológicas, corrimientos, lineamientos y anticlinales (Coppolecchia *et al.*, 2011; Fig. 1A), y es la falla de sentido suroeste-noreste a lo largo del arroyo del Chenque Malal la de mayor trascendencia por su proximidad al sitio de estudio (Zöllner y Amos, 1973).

En la región se han observado numerosos deslizamientos (*e.g.*, González Díaz y Folguera, 2005; González Díaz *et al.*, 2006; Costa y González Díaz, 2007; Penna *et al.*, 2011), con episodios recientes a lo largo de la cordillera que incluyeron: flujos

de tierra, flujos de detritos, desprendimientos de rocas y avalanchas de rocas (González Díaz *et al.*, 2003; Garrido, 2013¹; Tejado y Gomá, 2016; Groch, 2019; Hurley *et al.*, 2020; Groch *et al.*, 2021a, b). Además, en esta área se han reconocido más de cuarenta paleodeslizamientos (Tchilinguirían, 2011) e inclusive se han observado movimientos criogénicos e inclusive se han observado movimientos criogénicos como avalanchas de nieve. Particularmente en Chenque Malal (Fig. 1B y C), la susceptibilidad de deslizamientos fue definida en estudios previos como de grado medio, debido a la presencia de laderas con pendientes moderadas y altas (*i.e.*, 15-50°) y rocas con propiedades geotécnicas diversas, estudiadas a partir de la densidad de diaclasamiento, resistencia y heterogeneidad (Elisondo *et al.*, 2011).

Los centros poblados próximos a Chenque Malal, en particular Huinganco y Andacollo, cuentan con una población total de 3.916 habitantes (Dirección Provincial de Estadística y Censos, 2020). La urbanización rápida sin planificar debido al crecimiento poblacional que están experimentando estas localidades, especialmente en áreas susceptibles de deslizamientos, constituye un factor importante de riesgo (IPCC, 2022). Si se considera, además, la movilización de personas a escala regional debido a las actividades forestales, mineras, ganaderas y turísticas (Rivas, 2011), los estudios específicos de deslizamientos adquieren aun mayor relevancia.

3. Metodología

La metodología de este trabajo involucró, en primer lugar, la determinación de algunas características naturales del área de estudio mediante la interpretación de la cartografía geológica (Zöllner y Amos, 1973; Rovere *et al.*, 2004; Coppolecchia *et al.*, 2011), geomorfológica (Tchilinguirían, 2011), y de susceptibilidad a deslizamientos y caídas de rocas (Elisondo *et al.*, 2011), a escalas desde 1:35.000 hasta 1:250.000. Este diagnóstico fue complementado con fotografías aéreas históricas pancromáticas obtenidas durante el Plan de Vuelo Cordillerano de 1963 por el Instituto Geográfico Militar (actual Instituto Geográfico Nacional) a una escala de ~1:50.000, así como también con imágenes satelitales ópticas de alta resolución obtenidas de Google Earth Pro ©

y Airbus © entre los años 2006 y 2021 con una resolución espacial de ~0,5 m. Junto con lo anterior, se analizaron imágenes satelitales multispectrales de las misiones Landsat 1-9 (1972-2022) y Sentinel 2A y 2B (2016-2022), con resoluciones de 10 a 60 m, las cuales fueron provistas por el United States Geological Survey (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) y la European Space Agency (ESA, <https://scihub.copernicus.eu/>), respectivamente. Esta información remota fue procesada con los softwares SNAP 8,0 y ENVI 5,0.

La precipitación fue analizada con los datos de precipitación acumulada diaria, conseguida mediante el Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) 2,0 del Climate Hazards Center (CHC, <https://data.chc.ucsb.edu/>), con una cobertura espacial casi-global diaria de 0,05° para el período 1981-2020. El estudio de eventos extremos se realizó según las recomendaciones de la World Meteorological Organization (WMO, <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>), calculando la cantidad anual de días con precipitación mayor o igual a 10, 20 y 50 mm, que pudiesen incidir en la ocurrencia de deslizamientos. Se calculó el Índice Estandarizado de Precipitación (*Standardized Precipitation Index, SPI*) cada 12 meses con la herramienta *SPI Generator* del National Drought Mitigation Center (NDMC, <https://drought.unl.edu/>) para determinar la existencia de períodos secos y húmedos, y se estudió la precipitación a escala diaria y diaria acumulada para el año 2020 previo al colapso. Los datos remotos fueron validados con información de la estación hidrometeorológica Andacollo (Fig. 1A) para el período 1981-2018, disponible en la Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH, <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>); a partir de ello se obtuvieron correlaciones de $r=0,31$ (débiles) para los datos diarios, $r=0,65$ (fuertes) para los datos mensuales y $r=0,60$ (moderadas) para los datos anuales, todas significativas al 99% de acuerdo con el test de Spearman.

Entre 2020 y 2022 se llevaron a cabo actividades y experimentos de campo en el área de estudio, por ejemplo: realización de entrevistas, estudios de morfometría, estimación de caudales, ejecución de pruebas de infiltración, cálculo de tasas de erosión superficial y determinación de propiedades geotécnicas. Todo ello proveyó información para

¹ Garrido, A.C. 2013. Características geológico-sedimentarias de la avenida aluvial de los arroyos Huaraco y Huinganco. Cordillera del Viento. Provincia del Neuquén. Evento sucedido el 8 de febrero de 2013. Informe. Dirección Provincial de Minería de la provincia del Neuquén: 27 p. Zapala.

supervisar el análisis remoto y así reconstruir el escenario previo y posterior al colapso del flujo de tierra. En las entrevistas a pobladores locales se obtuvo información cualitativa vinculada a los deslizamientos, el manejo del agua de riego en las laderas de montaña y a eventos históricos comunicados oralmente sin registro previo. Se estimaron los parámetros morfométricos área, ancho, longitud, pendiente y volumen del flujo de tierra, a partir de datos geoespaciales de los receptores GNSS de simple frecuencia eTrex 20 y GPSMap 64s de Garmin ©, que fueron procesados y corregidos a la altura del terreno en QGIS 3,10. El área, ancho y longitud se consiguieron mediante la delimitación del perímetro del colapso, mientras que la pendiente y el volumen se calcularon a partir de recorridos transversales y longitudinales simultáneos en el área afectada, parámetros que sirvieron para la construcción de Modelos Digitales del Terreno (MDT) tanto para el escenario previo como el posterior. Los modelos se generaron con un máximo de ~43.000 datos a través de los métodos de interpolación *Natural Neighbor* (precolapso) e *IDW* (poscolapso) en ArcGIS 10,1, definidos arbitrariamente por sus condiciones óptimas de representación tridimensional con un tamaño de píxel de 1 m. El MDT actual se logró de forma directa, mientras que la topografía original se asumió de forma regular en un plano ligeramente inclinado mediante datos altimétricos inalterados del perímetro de colapso, apoyado por fotografías terrestres. La diferencia entre los modelos definió el volumen y la variación topográfica, al igual que la pendiente media y máxima. Este procedimiento de reconstrucción altimétrica fue seleccionado por sus bajos costos de implementación y las dificultades técnicas y económicas para la obtención de datos mediante aviones fotogramétricos, vehículos aéreos no tripulados y/o *Laser Imaging Detection and Ranging* (LIDAR).

El estudio de la influencia antrópica y los condicionantes naturales involucrados en la generación del flujo de tierra requirieron, durante los trabajos de campo, estimaciones de caudal de vertientes naturales próximas y canales de riego, así como también pruebas de infiltración con trazadores naturales para determinar el origen y velocidad del agua subterránea que aflora en la cabecera del colapso. Se hicieron mediciones comparativas para evaluar las tasas diarias de erosión hídrica superficial y se determinaron las propiedades geotécnicas de los

suelos. Precisamente, durante el trabajo de campo se realizaron perfiles edáficos para definir litologías, profundidades de las capas existentes y densidad volumétrica, mientras que en el laboratorio se calcularon mediante ensayos los límites de Atterberg, el contenido natural de agua, el índice de plasticidad y la distribución granulométrica.

En este trabajo se discute, además, la acción de la precipitación, los sismos y las vertientes como mecanismos alternativos detonantes de deslizamientos. Los datos de precipitación se estudiaron a escala diaria y acumulada durante 2020, utilizando la base de datos CHIRPS. La información sísmica de magnitud, fecha y geolocalización de eventos se extrajo del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, http://contenidos.inpres.gob.ar/buscar_sismo), del Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS, <http://ds.iris.edu/ieb/>) y del USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>), para el período 1914 a 2020. Las vertientes se analizaron con datos de campo, a partir de mediciones directas de caudal dentro del área de colapso y su interrelación con información obtenida de una vertiente natural cercana y del canal de riego.

4. Resultados

4.1. Escenario precolapso y desarrollo del flujo de tierra

Inicialmente en ~1930, en el área de Chenque Malal se desarrollaba actividad ganadera trashumante aprovechando las condiciones naturales favorables del terreno y la presencia cercana de cursos de agua. En 1960, se construyó un canal de riego que permitió inundar las laderas, a fin de generar pasturas para la subsistencia de los animales durante el período invernal. En el mismo sitio donde posteriormente se generaría el flujo de tierra, en 1963, las fotografías aéreas pancromáticas permitieron confirmar la presencia de ~61.500 m² de abundante cobertura vegetal debido al riego asistido. La persistencia temporal de las condiciones hídricas, verificada mediante imágenes Landsat, permite sugerir que el flujo de tierra comenzó a desarrollarse paulatina y subsuperficialmente en algún momento de las décadas posteriores. En 2010, en las imágenes satelitales de alta resolución se observan ligeras deformaciones e irregularidades superficiales vinculadas a surcos de riego y sectores inundados (Fig. 2A). En los años siguientes comenzó a desarrollarse en superficie una grieta transversal que,

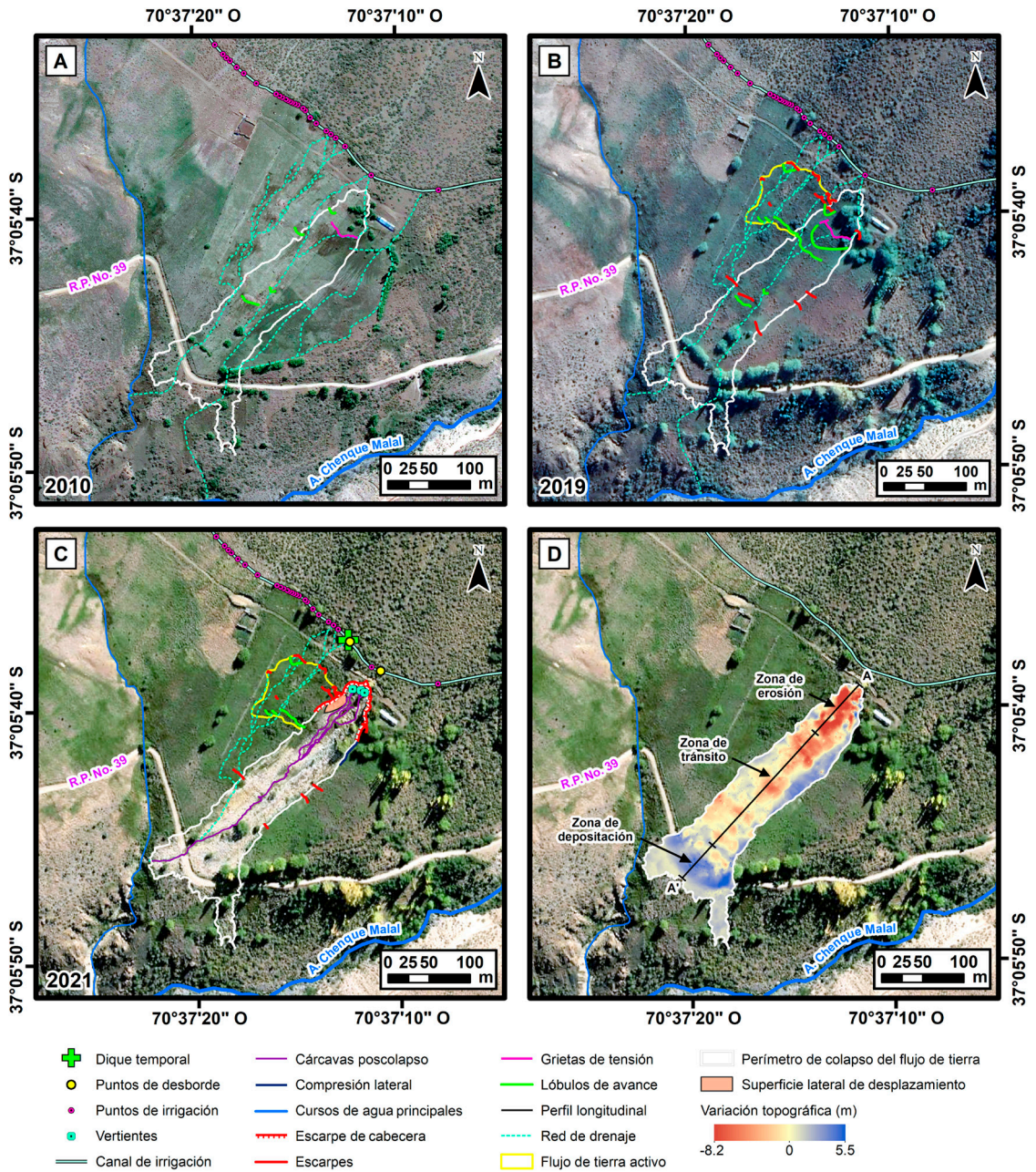


FIG. 2. Evolución del flujo de tierra y principales características morfológicas en Chenque Malal para (A) 2010, (B) 2019 y (C) 2021. Los cambios topográficos debido al colapso del 22 de septiembre de 2020 son presentados en (D), junto con las zonas identificadas a lo largo del perfil longitudinal A-A'. El perímetro de colapso es exhibido en (A-D) con propósitos de interpretación. Imágenes satelitales de base: (A) WorldView-2 (26 de octubre de 2010) y (B) Pléiades (12 de abril de 2019) de Google Earth Pro ©; y (C-D) Pléiades (17 de febrero de 2021) de Airbus ©.

de acuerdo con los habitantes del área, alcanzó los 0,5 m de ancho, lo cual permite inferir una velocidad de desplazamiento del suelo extremadamente lenta a

muy lenta, *i.e.*, milímetros a centímetros por año según Hungr *et al.* (2014). Para 2019, las variaciones del terreno se habían acentuado considerablemente, era

evidente entonces el flujo de tierra por la presencia de escarpes, lóbulos de avance, grietas de tensión y la superficie irregular (Figs. 1B y 2B).

En el período de 1981-2020, el área de estudio experimentó una precipitación media anual de 815,7 mm (Fig. 3A), 78,5% de ella concentrada entre los meses de otoño e invierno (abril a septiembre) durante los cuales se presentaron el 79,3, 86,1 y 91,4% de los episodios diarios extremos mayores a 10, 20 y 50 mm, respectivamente. El máximo absoluto de precipitación se registró el 18 de mayo de 1986 con 91,0 mm/día. En líneas generales, se destaca que la precipitación y cantidad de episodios diarios extremos entre 2007 y 2020 fue menor a la media del período (Figs. 3A y B), lo que coincide con un SPI de 12 meses que se caracterizó por un período moderadamente seco a muy seco (Fig. 3C). El análisis entrecruzado de los datos denota que a pesar de los períodos húmedos y extremadamente húmedos y la gran cantidad de eventos extremos que tuvieron lugar con anterioridad a 2007, el flujo de

tierra no evolucionó superficialmente de forma notoria ni se registraron colapsos evidentes. Contrariamente a lo esperado, el flujo presentó el mayor grado de desarrollo durante el período seco. Esto sugiere que no respondería a variaciones en la precipitación, sino a causas antrópicas, *e.g.*, un incremento del riego justificado por el déficit hídrico. Debe señalarse que la década de 2011-2020 presentó el menor registro de precipitación de las últimas cuatro (media anual de 732,0 mm) y el quinquenio de 2016-2020 exhibió el registro más seco durante el mismo período (media anual de 711,1 mm).

4.2. Colapso del flujo de tierra y situación actual

El 22 de septiembre de 2020 a las ~20:00 h (hora local) se produjo un colapso del flujo de tierra en Chenque Malal, debido a la sobrecarga accidental de la ladera de montaña con agua proveniente del canal de riego localizado en niveles superiores (Figs. 1C y 2C). El mecanismo detonante se atribuyó a la descarga

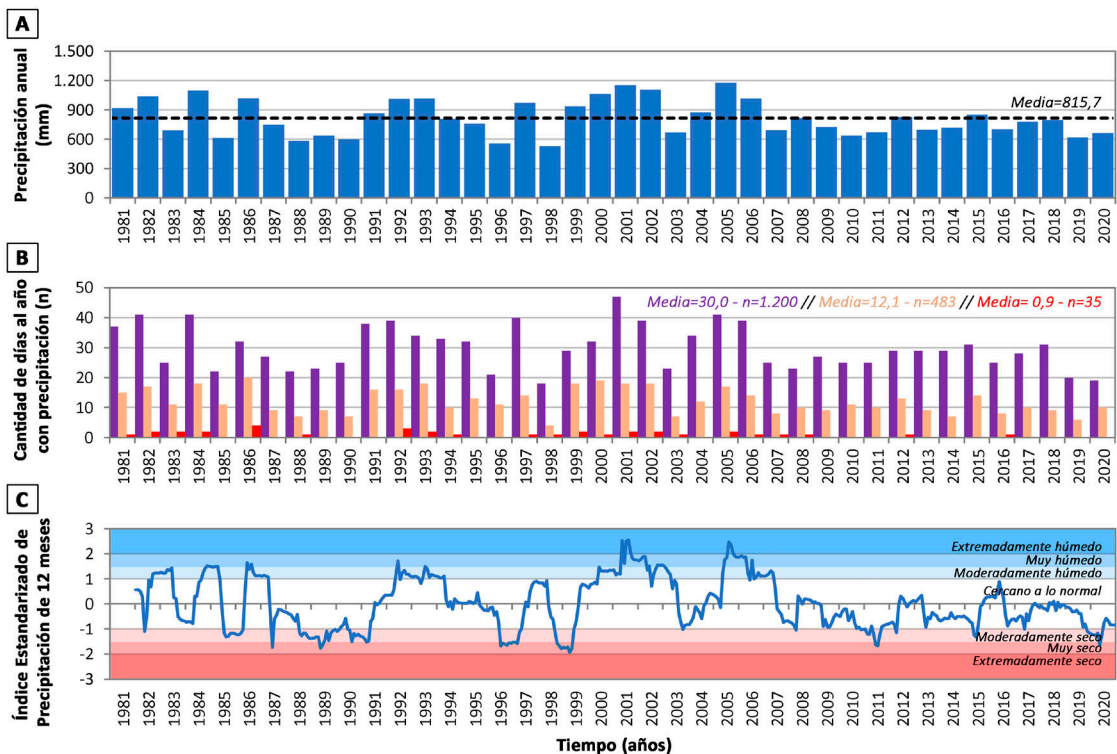


FIG. 3. Variación de la precipitación en el área de Chenque Malal para el período 1981-2020. **A.** Precipitación anual. **B.** Cantidad de días al año con precipitación mayor o igual que 10 mm (barras violetas), 20 mm (barras naranjas) y 50 mm (barras rojas). **C.** Índice Estandarizado de Precipitación de 12 meses.

parcial de $\sim 38.830 \text{ m}^3$ de agua (equivalente al volumen de 15 piletas olímpicas) durante ~ 28 horas en dos puntos ubicados directamente ladera arriba del flujo de tierra (Fig. 2C), lo anterior producto del represamiento que generó el cuerpo de un vacuno en el canal de riego. La información disponible sugiere que la circulación de agua en el canal se normalizó el día previo al colapso, sin embargo, el peso del agua infiltrada en la ladera terminó superando la resistencia basal y provocó un descenso abrupto del material por efecto de la gravedad. En consecuencia, se generaron cambios notables en el paisaje del área y se manifestaron múltiples morfoestructuras que permitieron estudiar el flujo de tierra en profundidad (Figs. 2C y 4). Si bien no se registraron pérdidas humanas a causa de ello, los perjuicios económicos se estimaron en 168.000 USD. Además, la circulación vehicular y peatonal resultó afectada durante casi dos días a causa del bloqueo que ocasionó la acumulación de tierra sobre la Ruta Provincial No. 39 y el tiempo de retardo en su limpieza.

El colapso del flujo de tierra tuvo una longitud de 364 m y un ancho de ~ 70 m (151 m en el sector distal), lo que afectó un área de 22.631 m^2 . El volumen de tierra removilizado se estimó en 19.089 m^3 , proveniente principalmente del sector de inicio del colapso (Fig. 4A), de los cuales 13.445 m^3 se acumularon en la zona de deposición (Figs. 2D y 4B). Este

déficit del 29,6% en el balance de volúmenes (*i.e.*, diferencia de volúmenes de erosión y acumulación) se atribuyó al desagote en un cauce secundario durante el colapso (Fig. 4C) y, en menor medida, a procesos superficiales de erosión por carcavamiento (hasta $4,3 \text{ mm/día}$) y erosión por precipitación ($54,4 \text{ mm}$ acumulados previo a las mediciones volumétricas), así como también a posibles imprecisiones en los MDT. Esta estimación concuerda con balances de volúmenes negativos de flujos de tierra del 44,2% reportados en la bibliografía (Conforti *et al.*, 2021), los cuales son explicados por la susceptibilidad del material expuesto a la intemperie a diferentes procesos erosivos luego de los colapsos e inclusive por el tratamiento digital de los datos altimétricos.

El desplazamiento del material involucrado en el colapso se realizó en forma caótica entre las cotas 1.284 y 1.226 m s.n.m. (Fig. 5) (1.190 m s.n.m. para el lóbulo izquierdo), con velocidades posiblemente rápidas a extremadamente rápidas. Al considerar la topografía previa y posterior al colapso a lo largo de la transecta A-A' (Fig. 2D), se calcula una oscilación altimétrica entre $-5,65$ y $3,75$ m (Fig. 5), cuyos valores extremos alcanzaron los $-8,2$ y $5,5$ m en sectores de cabecera y pie del colapso respectivamente (Fig. 2D). De esta manera, la ladera presentó un cambio de una superficie regular a una de mayor rugosidad y escarpe. Al mismo tiempo, su pendiente media disminuyó

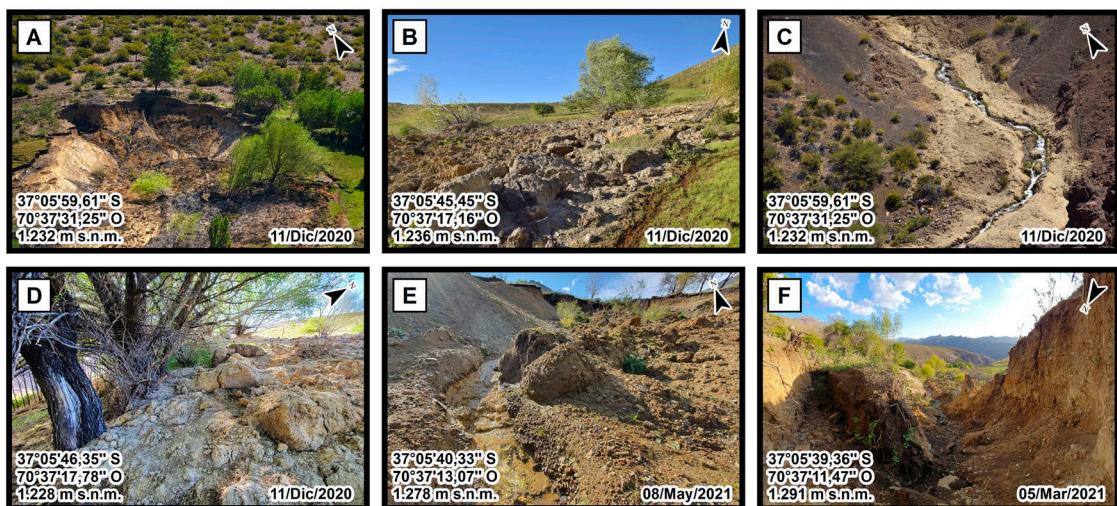


FIG. 4. Vista de detalle de algunas características morfológicas del flujo de tierra ocurrido en Chenque Malal el 22 de septiembre de 2020. A. Zona de erosión. B. Zona de deposición. C. Acumulación y transporte de sedimentos en cauce secundario. D. Material del colapso detenido sobre la margen izquierda por acción del arbolado. E. Agua de vertiente del sector de cabecera. F. Asentamiento rotacional en contacto con el escarpe de cabecera. Fotografías: Damián Groch.

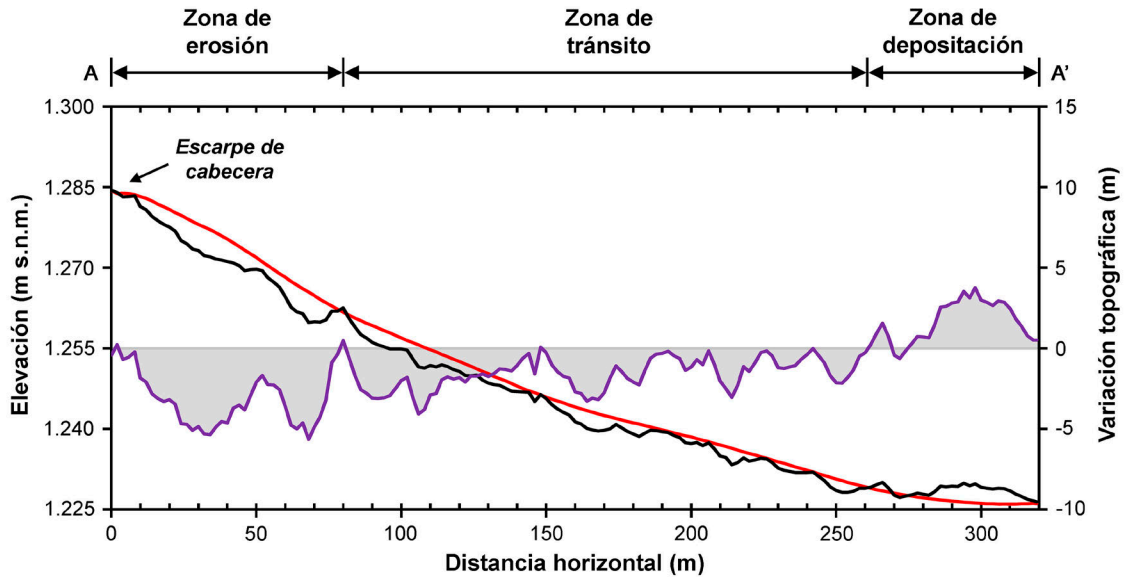


FIG. 5. Perfil topográfico longitudinal de los escenarios pre- (línea roja) y pos- (línea negra) colapso del flujo de tierra en Chenque Malal a lo largo de A-A' (exhibido en Fig. 2D), obtenido de la topografía reconstruida. Se presenta, además, la variación topográfica (línea violeta) para las diferentes zonas del flujo.

de 10,2 a 9,9° e incrementó la máxima para las tres zonas: erosión de 20,1 a 27,5°, tránsito de 13,7 a 32,5° y acumulación de 6,5 a 12,5°. En el caso de las primeras dos zonas, el cambio de pendiente se debió a la erosión del material, mientras que en la última el aumento se produjo por la acumulación de este. La pendiente media preexistente de 3,0° en la zona baja, en conjunto con la barrera natural dada por vegetación arbórea naturalizada sobre la margen izquierda distal, favorecieron el detenimiento del material (Fig. 4D). Cabe destacar, además, que durante el episodio árboles de hasta 6,3 m de altura fueron movilizados unos 150 m ladera abajo. La interpretación física del terreno y la consulta a habitantes locales indicaron la inexistencia de otros deslizamientos sobre la ladera desde principios del siglo XX.

Las mediciones directas de caudal realizadas en vertientes de la cabecera del colapso (Fig. 4E) permitieron vincular la infiltración de agua del canal de riego con el desarrollo del flujo de tierra. A pesar de la suspensión del riego directo por inundación inmediatamente después del evento, el caudal total de las vertientes ascendió hasta 3,6 l/s. La irrigación intensiva que persiste actualmente (2023) en las áreas aledañas y la existencia de afloramientos hídricos sugieren que los aportes excesivos de agua vienen

actuando sobre los suelos de Chenque Malal desde hace varias décadas.

Los análisis geotécnicos y geológicos identificaron seis unidades litológicas involucradas en el flujo de tierra, las que exhiben una distribución vertical heterogénea de sus propiedades en un plano inclinado (Tabla 1). Las unidades presentan una composición volcánica, con la única excepción del estrato orgánico superficial, y granulometrías variables desde arcillas/limos hasta gravas gruesas. En función de los datos obtenidos, se interpreta que las unidades superiores (U1-2) favorecen la infiltración rápida de agua a causa de su alto contenido de gravas y arenas, comprobable en el bajo contenido natural de agua (inferior a 6%). En las cuatro unidades subyacentes (U3-6), la infiltración se dificulta debido a las granulometrías más pequeñas (arenas y limos/arcillas) y la presencia de un mayor contenido de humedad (con un máximo de 40%). Precisamente, el flujo de tierra se iniciaría entre las dos unidades más profundas (U5-6), dado que se presenta un cambio de granulometría de arena limosa (U5) a arena arcillosa (U6), se incrementa el índice de plasticidad (13,7 a 26,6) y disminuye tanto la capacidad de contención de agua (31,0 a 25,0%) como del peso de bulo (1.813 a 1.479 kg/m³). El peso otorgado por la concentración de agua en las unidades suprayacentes y la dificultad para continuar

TABLA 1. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS MEDIAS ESTIMADAS PARA LOS SUELOS OBSERVADOS EN LA CABECERA DEL FLUJO DE TIERRA Y EN LA SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO.

U	Litología	Rango de profundidad (m)	Límites de Atterberg (%)		Clasificación USCS	C _{na} (%)	I _p	D _v (kg/m ³)
			L _p	L _l				
1	Capa orgánica superficial	0,00-0,60	-	42,1	SM-SC	1,0	-	1.332
2	Grava arenosa (naranja)	0,60-2,20	-	57,8	GP	6,0	-	1.728
3	Arena fina limosa (roja)	2,20-2,35	52,1	55,2	MH	40,0	3,1	1.548
4	Arena fina (blanca)	2,20-4,00	39,5	63,6	MH	11,0	24,1	1.610
5	Arena fina limosa (amarilla)	4,00-5,75	34,5	48,2	ML	31,0	13,7	1.813
6	Arena arcillosa (verde)	5,75-¿?	19,7	46,3	CL	25,0	26,6	1.479

U: unidad; L_p: límite plástico; L_l: límite líquido; C_{na}: contenido natural de agua; I_p: índice de plasticidad; D_v: densidad volumétrica (bulk density).

Símbolos del *United Soils Classification System* (USCS): **SM**: arena limosa; **SC**: arena arcillosa; **GP**: grava mal graduada; **MH**: limo inorgánico de alta plasticidad; **ML**: limo inorgánico de baja plasticidad; **CL**: arcilla inorgánica de baja plasticidad. La litología se basó en la clasificación granulométrica.

infiltrando generó un plano de deslizamiento en torno a los 5,75 m de profundidad donde el agua pudo escurrir a favor de la pendiente. Los aportes hídricos excesivos de septiembre de 2020 produjeron un desequilibrio repentino en la distribución vertical del peso de la ladera y conllevaron al colapso del flujo de tierra.

En la actualidad (2023), la cabecera del área de colapso se encuentra experimentando un proceso de erosión remontante por causa de la acción combinada de erosión hídrica superficial, desprendimientos, volcaduras y asentamientos rotacionales (Fig. 4F). Mediciones puntuales de estos movimientos de suelo permitieron identificar retrocesos de hasta 2 m durante el período estival de 2021. Además de ello, cabe destacar que sobre la margen derecha del área de colapso se observa un flujo de tierra activo de 5.480 m² (Figs. 2B y C). Dada la irrigación persistente sobre este sector, es de esperar que el agua infiltrada afecte la estabilidad de la ladera y ello, consecuentemente, incremente de forma continua el grado de amenaza de colapso. Considerando la exposición y vulnerabilidad de los elementos en riesgo (*i.e.*, personas, animales, pastizales, red vial e infraestructura) que se localizan y/o movilizan en el área, es posible en este estudio afirmar que existe un riesgo latente de colapso que podría tener efectos

sociales y económicos significativos si las condiciones actuales no sufren modificaciones.

5. Discusión

La identificación de los posibles mecanismos detonantes es de suma importancia dentro de los estudios de flujos de tierra, especialmente durante evaluaciones de amenaza y análisis de susceptibilidad (Corominas *et al.*, 2014). En este trabajo se profundizó en las causas que produjeron el colapso del flujo de tierra el 22 de septiembre de 2020. Si bien el episodio se atribuyó a la descarga repentina de agua proveniente del canal de riego producto de un bloqueo temporal, dadas las características físicas donde se emplaza el área de estudio, variables como la sismicidad, la precipitación y las vertientes ameritan mayor discusión como mecanismos alternativos detonantes que podrían haber actuado previamente al episodio.

La precipitación es el mayor responsable de deslizamientos a escala global (Wieczorek, 1996), se vincula directamente en Argentina (*e.g.*, Moreiras, 2005; Lauro *et al.*, 2017; Fernández *et al.*, 2021; Moreiras *et al.*, 2021) y específicamente en la Norpatagonia (*e.g.*, González Díaz, 2009; González Díaz y Di Tommaso, 2012; Hurley *et al.*, 2020).

En particular para el área de estudio, la precipitación acumulada durante 2020 estuvo por debajo de la media histórica durante la mayor parte del año. Este registro fue el noveno más bajo en los cuarenta años considerados (1981-2020) con 663,7 mm. Asimismo, la situación de escasez hídrica a escala mensual se mantuvo durante septiembre de 2020, con un 57,3% menor que la media para este mes. Precisamente de forma previa al colapso del flujo de tierra se habían registrado 32,6 mm durante septiembre, concentrados casi totalmente entre los días 4-5 (18,0 mm) y 16 (13,6 mm), en eventos atmosféricos típicos para la región y la estación del año. La influencia directa de la precipitación en el colapso fue descartada en este estudio, porque el tiempo de retardo (4 a 15 días) es más prolongado que el transcurrido desde el derrame accidental del canal de riego (*i.e.*, un día), así como también por los aportes hídricos considerablemente menores en el caso de la precipitación. Sin embargo, cabe señalar que la persistencia de la sequía durante 2020 se podría considerar como un agravante para el evento puesto que las condiciones cohesivas y freáticas preexistentes del suelo fueron modificadas ante el incremento anómalo y súbito de agua proveniente del canal de riego, lo que provocó un aumento de la presión de poro y una disminución de la resistencia de la ladera que condujeron a su colapso.

En segundo lugar, los sismos han demostrado una influencia remarcable en la generación de deslizamientos en diferentes regiones del país (*e.g.*, González Díaz *et al.*, 2006; Carignano *et al.*, 2014; Colavitto *et al.*, 2021; Palacios *et al.*, 2021; Ginesta Torcivia *et al.*, 2022). En Chenque Malal, de acuerdo con las bases de datos sísmicos nacionales e internacionales consultadas (*i.e.*, INPRES, IRIS y USGS), se registraron entre los años 1914 y 2020 cerca de seis mil sismos en un radio de 300 km, previo al colapso, lo que incluye el evento M_W 9,5 ocurrido en Valdivia, Chile. A pesar de ello, del análisis de eventos históricos se desprende que la falla geológica de Chenque Malal, identificada en la literatura (Zöllner y Amos, 1973), pareciera no tener actividad contemporánea que haya potencialmente intervenido en el colapso, dado que no se han registrado sismos que se asocien directamente a la misma. Adicionalmente, durante las semanas previas al episodio del 22 de septiembre de 2020 no se detectaron movimientos relevantes en el suelo a escala regional, siendo dos sismos de magnitud 2,9

y 3,0 los más cercanos temporalmente, ocurridos el 7 y 8 de septiembre, respectivamente, a más de 200 km al norte del área de estudio. A pesar de la inactividad sísmica previa a este evento de colapso en particular, la sismicidad regional moderada (Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 2022) sea por tectonismo o vulcanismo, tal como la existente en el volcán Domuyo (Astort *et al.*, 2019), podría conducir a nuevos colapsos tanto en Chenque Malal como en otros sectores a lo largo de la cordillera del Viento.

Por último, considerando que las vertientes pueden afectar las condiciones de estabilidad de las laderas al incrementar localmente la presión de poro (Cascini *et al.*, 2008), es razonable esperar que esto conduzca ocasionalmente a deslizamientos. A pesar de la existencia de más de 500 vertientes naturales en el suroeste de la cordillera del Viento (Coppolecchia *et al.*, 2011), no se observaron evidencias claras de su vinculación con flujos de tierra, lo cual sugiere que los deslizamientos en la región no se producirían naturalmente dadas las condiciones de aridez del área. La vertiente natural en Chenque Malal, en función de mediciones de campo, posee un caudal constante de 0,2 l/s y un sistema de captación y redireccionamiento implementado que solo permite el derrame de una cantidad ínfima de agua a 110 m de distancia de la cabecera del flujo de tierra y en niveles altitudinales más bajos. Por el contrario, el canal de riego se encuentra a 20,4 m ladera arriba del flujo de tierra y tiene la capacidad de transportar hasta 385 l/s de agua, *i.e.*, 107 veces el caudal medido en la cabecera del colapso. Si bien las pruebas de infiltración con trazadores naturales no permitieron confirmar la relación entre el canal de riego y el agua de vertiente en la cabecera para un lapso de 6 horas, es posible que el agua subterránea requiera de un tiempo mayor al estudiado hasta alcanzar la cabecera e inclusive que la concentración o tiempo de permanencia del colorante en el canal haya sido insuficiente (aproximadamente 13 minutos sobre el área de colapso), entre otras posibilidades. La primera de ellas es la más factible si se considera la presencia de agua en la cabecera del flujo al secarse el canal durante algunos días de verano. Dada la información disponible, el evento de colapso no podría explicarse por la infiltración de agua proveniente de la vertiente, sino por el agua proveniente del canal de riego. Esto enfatiza la influencia antrópica en la generación del deslizamiento estudiado.

El análisis de los mecanismos alternativos mencionados sugiere que no habrían sido causantes directos del colapso del flujo de tierra de septiembre de 2020. Sin embargo, no se descarta que otros flujos de tierra puedan ser detonados debido a la influencia de precipitación, sismos, vertientes, u otros mecanismos naturales, e inclusive en combinación con la actividad antrópica, por lo que es importante mantener el monitoreo de ellos a causa de que existen condiciones favorables para la generación de nuevos deslizamientos en varios sectores al suroeste de la Cordillera del Viento.

6. Conclusiones

La influencia directa del riego intensivo de largo plazo en la generación de flujos de tierra fue estudiada mediante la combinación de información satelital, climática, geológica, topográfica, geotécnica e histórica. Este análisis integral permitió confirmar la vinculación de los aportes hídricos continuos con la generación, desarrollo y colapso de un flujo de tierra en un sector de la Norpatagonia argentina. Los datos disponibles sugieren que la estabilidad natural preexistente de ladera sufre perturbaciones considerables como consecuencia de los aportes hídricos continuos a lo largo de décadas para el desarrollo de la actividad ganadera trashumante. Particularmente en los sectores irrigados, se pudo comprobar también que los flujos de tierra evolucionan independientemente de las condiciones climáticas.

El estudio de detalle del colapso ocurrido el 22 de septiembre de 2020 permitió cuantificar la movilización caótica de más de 19.000 m³ de tierra luego de seis décadas de irrigación desmedida. Se determinó que el exceso de los aportes hídricos directos (riego por inundación) e indirectos (filtraciones del canal) indujeron alteraciones superficiales y subsuperficiales durante períodos moderadamente secos a muy secos que provocaron el colapso de la ladera.

Esta investigación ejemplifica el poder destructivo que poseen los deslizamientos ocasionados por el riego intensivo si no son considerados apropiadamente. La persistencia actual del riego y la presencia de flujos de tierra activos podrían conducir a nuevos deslizamientos, no solo en el área de estudio sino también en otros sectores de la región, por lo que es necesaria la implementación de medidas de mitigación en el corto y mediano plazo. Los esfuerzos en este sentido deben dirigirse principalmente hacia

el establecimiento de regulaciones que favorezcan un manejo adecuado del riego, así como también la implementación de un sistema de impermeabilización y protección lateral en los canales, a fin de evitar nuevas filtraciones, rupturas parciales y/o colapsos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los habitantes de Andacollo y Huinganco por su colaboración con la investigación, en especial a C. Contreras, G. Ortega, M. San Martín, M. Chaves y R. Escobar. También se valora el apoyo durante los trabajos de campo de C. Escobar, J. Sandoval, M. García, M. Valenzuela Pino, O. Escobar, R. Gutiérrez y S. Pino, al igual que las observaciones tempranas del manuscrito de B. Colavitto y las correcciones de S. Salvo y un revisor anónimo. Este trabajo es parte de la tesis de doctorado en curso de D. Groch, financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina).

Referencias

- Astort, A.; Walter, T.R.; Ruiz, F.; Sagripanti, L.; Nacif, A.; Acosta, G.; Folguera, A. 2019. Unrest at Domuyo Volcano, Argentina, detected by geophysical and geodetic data and morphometric analysis. *Remote Sensing* 11 (18): 2175. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11182175>
- Carignano, C.A.; Cioccale, M.A.; Martino, R.D. 2014. El megadeslizamiento del cerro Uritorco, ladera occidental de la Sierra Chica de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (1): 21-32.
- Cascini, L.; Cuomo, S.; Guida, D. 2008. Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy. *Engineering Geology* 96: 107-125. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.10.003>
- Colavitto, B.; Blanc, P.A.; Olivar, J.; Alcacer, J.M.; Perucca, L. 2021. Caracterización del terremoto del 29 de noviembre de 2020 del Noroeste Argentino (límite Salta-Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (2): 338-343.
- Conforti, M.; Mercuri, M.; Borrelli, L. 2021. Morphological changes detection of a large earthflow using archives images, LiDAR-derived DTM, and UAV-based. *Remote Sensing* 13: 120. <https://doi.org/10.3390/rs13010120>
- Coppolecchia, M.; Elissondo, M.; Danieli, J.C.; Colombino, J. 2011. Mapa Geológico: Andacollo y Huinganco, escala 1:35.000. *In* Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial: Andacollo y Huinganco, provincia del Neuquén, República

- Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino: 340 p. Buenos Aires.
- Corominas, J.; van Westen, C.; Frattini, P.; Cascini, L.; Malet, J.-P.; Fotopoulou, S.; Catani, F.; Van Den Eeckhaut, M.; Mavrouli, O.; Agliardi, F.; Pitolakis, K.; Winter, M.G.; Pastor, M.; Ferlisi, S.; Tofani, V.; Hervás, J.; Smith, J.T. 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Analysis and the Environment* 73: 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Costa, C.H.; González Díaz, E.F. 2007. Age constraints and paleoseismic implication of rock avalanches in the northern Patagonian Andes, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 24: 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.001>
- Dirección Provincial de Estadística y Censos. 2020. Estimación de población para el año 2020 (Neuquén, Argentina). URL: https://www.estadisticaneuquen.gob.ar/#proyecciones_app (Última visita 12/06/22).
- Elissondo, M.; Coppolecchia, M.; Tchilinguirián, P. 2011. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos y caídas de rocas: Andacollo y Huinganco, escala 1:35.000. *In* Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial: Andacollo y Huinganco, provincia del Neuquén, República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino: 340 p. Buenos Aires.
- Fernández, D.S.; Baumann, V.; Carrizo, N. 2021. The twin catastrophic flows occurred in 2014 at Ambato Range (28°09'-28°20'S), Catamarca Province, Northwest Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 106: 103086. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103086>
- García-Chevesich, P.; Wei, X.; Ticona, J.; Martínez, G.; Zea, J.; García, V.; Alejo, F.; Zhang, Y.; Flamme, H.; Graber, A.; Santi, P.; McCray, J.; Gonzáles, E.; Krahenbuhl, R. 2021. The impact of agricultural irrigation on landslide triggering: a review from Chinese, English, and Spanish literature. *Water* 13: 10. <https://dx.doi.org/10.3390/w13010010>
- Gariano, S.L.; Petrucci, O.; Riann, G.; Santini, M.; Guzzetti, F. 2018. Impacts of past and future land changes on landslides in southern Italy. *Regional Environmental Change* 18: 437-449. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1210-9>
- Ginesta Torcivia, C.E.; Rios, N.N.; Cortez Taillant, V.; Tejada Recabarren, F.; 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.
- González Díaz, E.F. 2009. Deslizamientos al norte de la población de tricao Malal, noroeste del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (3): 545-550.
- González Díaz, E.F.; Di Tommaso, I. 2012. Grandes deslizamientos en las cuencas tributarias neuquinas del curso medio del río Barrancas (norte del Neuquén). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (3): 466-474.
- González Díaz, E.F.; Folguera, A. 2005. El reconocimiento de avalanchas de rocas y deslizamientos de bloques rocosos prehistoricos en el área andina de Neuquén (37°15'- 37°30'S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (3): 446-460.
- González Díaz, E.F.; Folguera, A. 2009. Los deslizamientos de la cordillera neuquina al sur de los 38° S: su inducción. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 569-585.
- González Díaz, E.F.; Costa, C.H.; Giaccardi, A.D. 2003. El complejo deslizamiento de Ailincó-Cerro Papas-Las Olletas (Departamento Minas, norte del Neuquén, Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58 (2): 194-200.
- González Díaz, E.F.; Folguera, A.; Costa, C.H.; Wright, E.; Elissondo, M. 2006. Los grandes deslizamientos de la región septentrional neuquina entre los 36°-38°S: una propuesta de inducción sísmica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (2): 197-217.
- Groch, D. 2019. El accionar político frente a los flujos de detritos del norte neuquino. *Entrevista a la Dra. Ana M. Pechen. Revista Universitaria de Geografía* 28 (2): 155-160.
- Groch, D.; Gil, V.; Cogliati, M.G. 2021a. Procesos de remoción en masa recientes en el norte neuquino: avances en el conocimiento. *In* Jornadas del Programa de Posgrado del Departamento de Geografía y Turismo, No. 7, Actas (Casado, A.; Zapperi, P.A.; editors). Libro de resúmenes: p. 6. Bahía Blanca.
- Groch, D.; Gil, V.; Cogliati, M.G. 2021b. Rockfalls: What do we know about their occurrence in northernmost Patagonia? *In* British Society for Geomorphology Annual General Meeting and Conference: Abstracts: p. 17. Kensington.
- Haque, U.; da Silva, P.F.; Devoli, G.; Pilz, J.; Zhao, B.; Khaloua, A.; Wilopo, W.; Andersen, P.; Lu, P.; Lee, J.; Yamamoto, T.; Keellings, D.; Wu, J.-H.; Glass, G.E. 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of the Total Environment* 682: 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415>

- Highland, L.M.; Bobrowsky, P. 2008. The landslide handbook-A guide to understanding landslides. Circular 1325. United States Geological Survey: 129 p. Reston.
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11: 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hurley, M.; Colavitto, B.; Astort, A.; Sagripanti, L.; Rosselot, E.A.; Folguera, A. 2020. Mass-wasting deposits in the Domuyo Volcanic Center, northern Neuquén Andes (Argentina): An analysis of the controlling factors. *Journal of South American Earth Sciences* 103: 102760. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102760>
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica. 2022. Zonificación sísmica para el año 2022. URL: <http://contenidos.inpres.gob.ar/zonas>. Acceso: 12 junio 2022.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J.B.R.; Maycock, T.K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; Zhou, B.; editors). Cambridge University Press: 2391 p. Cambridge and New York. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Pörtner, H.-O.; Roberts, D.C.; Tignor, M.; Poloczanska, E.S.; Mintenbeck, K.; Alegría, A.; Craig, M.; Langsdorf, S.; Löschke, S.; Möller, V.; Okem, A.; Rama, B.; editors). Cambridge University Press: 3056 p. Cambridge and New York. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jurjo, E.M.; Chimenton, M.E.; Mare, M.D. 2014. Desestabilización del sistema natural a partir de cambios en el uso del suelo: el caso de los deslizamientos de vista Alegre, provincia del Neuquén. *Boletín Geográfico* 36: 11-26.
- Lacroix, P.; Dehecq, A.; Taïpe, E. 2020. Irrigation-triggered landslides in a Peruvian desert caused by modern intensive farming. *Nature Geoscience* 13: 56-60. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0500-x>
- Lauro, C.; Moreiras, S.M.; Junquera, S.; Vergara, I.; Toural, R.; Wolf, J.; Tutzer, R. 2017. Summer rainstorm associated with a debris flow in the Amarilla gully affecting the international Agua Negra Pass (30°20'S), Argentina. *Environmental Earth Sciences* 76: 213. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6530-z>
- Lian, B.; Peng, J.; Zhan, H.; Huang, Q.; Wang, X.; Hu, S. 2020. Formation mechanism analysis of irrigation-induced retrogressive loess landslides. *Catena* 195: 104441. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104441>
- Moreiras, S.M. 2005. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides* 2: 53-59. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0046-4>
- Moreiras, S.M.; Coronato, A. 2009. Landslide Processes in Argentina. *In* *Developments in Earth Surface Processes* (Latrubesse, E.M.; editor). Elsevier 13: 301-332. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(08\)10015-3](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(08)10015-3)
- Moreiras, S.M.; Sepúlveda, S.A.; Correas-González, M.; Lauro, C.; Vergara, I.; Jeanneret, P.; Junquera-Torrado, S.; Cuevas, J.G.; Maldonado, A.; Antinao, J.L.; Lara, M. 2021. Debris flows occurrence in the semiarid Central Andes under climate change scenario. *Geosciences* 11 (2): 43. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020043>
- 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. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3331>
- Peng, D.; Xu, Q.; Liu, F.; He, Y.; Zhang, S.; Qi, X.; Zhao, K.; Zhang, X. 2018. Distribution and failure modes of the landslides in Heitai terrace, China. *Engineering Geology* 236: 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.016>
- Penna, I.M.; Hermanns, R.L.; Niedermann, S.; Folguera, A. 2011. Multiple slope failures associated with neotectonic activity in the Southern Central Andes (37°-37°30'S), Patagonia, Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 123 (9-10): 1880-1895. <https://doi.org/10.1130/B30399.1>
- Rivas, I. 2011. Uso del suelo y población. *In* *Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial: Andacollo y Huinganco, provincia del Neuquén, República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino: 7-32. Buenos Aires.*
- Rovere, E.I.; Caselli, A.; Tourn, S.; Leanza, H.A.; Hugo, C.A.; Folguera, A.; Escosteguy, L.; Geuna, S.; González, R.; Colombino, J.; Danieli, J.C. 2004. Hoja Geológica 3772-IV Andacollo, escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, 104 p. Buenos Aires.
- Shi, X.; Xu, Q.; Zhang, L.; Zhao, K.; Dong, J.; Jiang, H.; Liao, M. 2019. Surface displacements of the Heifangtai terrace in Northwest China measured by X and C-band

- InSAR observations. *Engineering Geology* 259: 105181. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105181>
- Tchilinguirrián, P. 2011. Mapa geomorfológico: Andacollo y Huinganco, escala 1:35.000. *In* Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial: Andacollo y Huinganco, provincia del Neuquén, República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino: 340 p. Buenos Aires.
- Tejedo, A.; Gomá, E. 2016. Flujo de detritos en las cuencas de los arroyos Huaraco y Huinganco. Provincia de Neuquén-Argentina, Serie Contribuciones Técnicas, Peligrosidad Geológica 19. Servicio Geológico Minero Argentino: 27 p. Buenos Aires.
- Wieczorek, G.F. 1996. Landslides: investigation and mitigation. *In* Landslide triggering mechanisms. Chapter 4. Transportation Research Board Special Report 247: 76-90. Washington DC.
- Xu, L.; Dai, F.C.; Tu, X.B.; Javed, I.; Woodard, M.J.; Jin, Y.L.; Tham, L.G. 2013. Occurrence of landsliding on slopes where flowsliding had previously occurred: An investigation in a loess platform, North-west China. *Catena* 104: 195-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.010>
- Yang, D.; Qiu, H.; Hu, S.; Zhu, Y.; Cui, Y.; Du, C.; Liu, Z.; Pei, Y.; Cao, M. 2021. Spatiotemporal distribution and evolution characteristics of successive landslides on the Heifangtai tableland of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* 378: 107619. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107619>
- Zhang, S.; Pei, X.; Wang, S.; Huang, R.; Zhang, X.; Chang, Z. 2019. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in Northwest China. *Engineering Geology* 259: 105170. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105170>
- Zöllner, W.; Amos, A.J. 1973. Carta Geológico-Económica de la República Argentina, Hoja 32b, Chos Malal, Provincia del Neuquén, escala 1:200.000. Servicio Nacional Minero Geológico. Buenos Aires.