

# Evolución y dinámica geomorfológica de la cuenca del río Amarillo, en el Sistema del Famatina (La Rioja, Argentina)

Oscar Juárez<sup>1,\*</sup>, María Cecilia Corbat<sup>1,2,3</sup>, y Enrique Fucks<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ambientes de Montañas y Regiones Áridas (IAMRA), Universidad Nacional de Chilecito, Julián Amatte 22, Chilecito, La Rioja, Argentina.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

<sup>3</sup> Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Universidad Nacional de La Plata, 64 nro. 3, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

\* ojuarez@undec.edu.ar

## RESUMEN

El análisis de los diferentes rasgos que caracterizan un paisaje, constituye un requisito esencial para conocer la evolución geomorfológica, repercutiendo en gran medida en el desarrollo productivo de una región, conociendo los aspectos positivos y negativos que pueden afectarlos o potenciarlos. Para ello, es necesario reconocer, caracterizar y clasificar las morfologías presentes, que dan cuenta de los factores y procesos que actuaron en su formación, y contribuyen en la interpretación y reconstrucción de la evolución del relieve a diversas escalas. La cuenca del río Amarillo se encuentra en la Sierra de Famatina, la cual está ubicada en el centro-norte de la provincia de La Rioja, en el noroeste de la Argentina. Se llevaron a cabo tareas de gabinete y de campo con el fin de analizar, reconocer e identificar los principales rasgos geomorfológicos presentes, y establecer su disposición espacial. En los sectores más elevados de la cuenca se destacan geoformas asociadas a procesos glaciales, periglaciales y gravitacionales, propiciados por las bajas temperaturas, fuertes pendientes y falta de vegetación. Las formas fluviales, tanto de acumulación como de erosión, fueron identificados en toda el área analizada, mientras que se describen depósitos lacustres en donde se interpreta que su formación estuvo asociado al evento árido a nivel global definido como Meghalayan Stage. Esta distribución y tipología de geoformas, condicionadas por la tectónica y los procesos exógenos, propiciaron una compleja evolución geomorfológica en el Cuaternario de la cuenca del río Amarillo.

Palabras clave: geoformas; drenaje ácido natural; Cuaternario; Sierra de Famatina; río Amarillo; Argentina.

## ABSTRACT

*The analysis of the different features that characterize a landscape is an essential requirement to know the geomorphological evolution, having a great impact on the productive development of a region, knowing the positive and negative aspects that can affect or enhance them. For this, it is*

*necessary to recognize, characterize and classify the morphologies present, which account for the factors and processes that acted in their formation, and contribute to the interpretation and reconstruction of the evolution of the relief at various scales. The Amarillo river basin is located in the Sierra de Famatina, which is located in the center-north of the province of La Rioja, in northwestern Argentina. Office and field tasks were carried out in order to analyze, recognize and identify the main geomorphological features present, and establish their spatial arrangement. In the highest sectors of the basin, geomorphs associated with glacial, periglacial and gravitational processes stand out, caused by low temperatures, steep slopes and lack of vegetation. Fluvial forms, both accumulation and erosion, were identified throughout the analysed area, while lacustrine deposits are described where it is interpreted that their formation was associated with the global arid event defined as the Meghalayan Stage. This distribution and typology of geomorphs, conditioned by tectonics and exogenous processes, led to a complex geomorphological evolution in the Quaternary of the Amarillo river basin.*

Keywords: geoforms; natural acid drainage; Quaternary; Sierra de Famatina; Amarillo river; Argentina.

## INTRODUCCIÓN

El análisis de los rasgos geomorfológicos y secuencias estratigráficas cuaternarias es una poderosa herramienta utilizada en la reconstrucción paleoambiental, principalmente en lo referente a dilucidar aspectos paleoclimáticos a escala regional, aunque muchas veces la fuerte actividad tectónica, puede generar inconvenientes en la interpretación de los datos.

En tal sentido, numerosos estudios se han referido a las características sedimentológicas vinculadas a las oscilaciones climáticas, demostrando un complejo patrón paleoambiental a lo largo del Pleistoceno tardío y Holoceno de Sudamérica (Iriondo y García, 1993; Zárate, 2003; Zárate y Tripaldi, 2012; Fucks *et al.*, 2018, entre otros). Sin embargo, la magnitud de las variaciones climáticas es aún materia de

debate (Piovano *et al.*, 2009), en especial cuando la región en estudio se encuentra en ambientes áridos, por lo que las variaciones en términos cuantitativos (temperatura y precipitación) no sería demasiada, pero sí en cuanto a los contrastantes procesos geomorfológicos que han tenido lugar. Si bien el Sistema de Famatina es considerado una región donde se han realizado investigaciones desde fines del siglo XIX y principios XX, fundamentalmente debido a su gran potencial minero, los estudios del Cuaternario han sido poco explorados (Garleff y Stingl, 1996; Fucks *et al.*, 2014, 2018), la mayoría de las veces como complemento de estudios de escala regional (Turner, 1971; De Alba, 1979; Fauqué y Caminos, 2006; Candiani *et al.*, 2011). Por lo tanto, resulta importante reconocer, caracterizar, clasificar las morfologías presentes, que dan cuenta de los factores y procesos que actuaron en su formación, y contribuyen en la interpretación y reconstrucción de la evolución del relieve a diversas escalas.

Este trabajo pretende avanzar en la descripción y caracterización geomorfológica de la cuenca del río Amarillo, considerando fundamentalmente los procesos exógenos y endógenos intervinientes, asociados a los cambios paleoclimáticos y a la neotectónica como factores determinantes respectivamente.

## MARCO REGIONAL

### Área de estudio

El área de estudio, la cuenca del río Amarillo, se ubica en el cinturón del Famatina, en la Sierra de Famatina entre los 28°–29° de latitud Sur, y entre los 67°–68° de longitud Oeste, dentro del Departamento Famatina de la provincia de La Rioja, en el noroeste de la República Argentina (Figura 1).

El Departamento de Famatina cuenta con una población de 5800 habitantes y con una densidad poblacional que no supera los 1.3 hab/km<sup>2</sup> (INDEC, 2010). En la localidad de Famatina, la principal actividad productiva es la agricultura, con predominio de explotaciones agropecuarias familiares, de pequeña extensión que no exceden las 10 ha. Las fincas medianas que se encuentran entre 10.1 y 100 ha. pueden encontrarse en menor medida. Los principales cultivos son la nuez de nogal y la vid, y en menor medida el olivo y otros frutales como durazno, membrillo y producción de huerta (Montilla *et al.*, 2016; Hadad y Palmisano, 2017). El riego implementado es predominantemente superficial, por manto, sin embargo, en los últimos años ha comenzado un fuerte flujo en el uso de agua subterránea mediante perforaciones (Montilla *et al.*, 2018). Una de las principales fuentes de agua para las explotaciones agrícolas de la localidad de Famatina depende, en gran parte, del recurso que suministra la cuenca de estudio.

En la cuenca de estudio se explotaron un grupo de minas subterráneas conocidas como mina La Mejicana (4200 m s.n.m.), en el Distrito Minero Nevados del Famatina. Estas minas están dispuestas sobre yacimientos metalíferos de cobre aurífero y argentífero. Las explotaciones se llevaron a cabo de manera aislada hasta principios de siglo XX, en donde con la llegada del Ferrocarril a la ciudad de Chilecito, se construyó un cable carril desde Chilecito a la mina La Mejicana que prestó servicios, entre 1905 y 1927, extrayendo minerales de manera continua durante este periodo de tiempo (Vaca, 2016).

### Geología

Dada la antigüedad del Sistema de Famatina, la evolución del mismo comprende el ciclo Pampeano (Cámbrico), que representa el basamento de la región, el ciclo Famatiniano (Ordovícico), caracterizado por una tectónica de acreción de terrenos paleozoicos (Mpodozis y Ramos, 1989), el Ciclo Gondwánico (Pérmico–Carbonífero), con acortamientos regionales en respuesta a la convergencia continua de placas en sentido

oeste–este, y el Ciclo Andino (Mesozoico–Cenozoico), durante el cual se genera un tectonismo muy activo (Jordan *et al.*, 1983) que lleva a su configuración actual.

El basamento de la región está conformado por rocas metamórficas asignadas a las formaciones Negro Peinado representado por filitas verdinegras (Turner, 1960) y Achavil, que es una pizarra verde clara (Collo *et al.*, 2006), de edad cámbrica (Figura 2). El “Ciclo Famatiniano” está representado por una alternancia volcanosedimentaria, evidenciada por la Formación (Fm.) Volcancito (Harrington y Leanza, 1957) del Ordovícico inferior y el magmatismo calcoalcalino de edad ordovícica media (468±3 y 481±4 Ma, Pankhurst *et al.*, 1998; Rapela *et al.*, 2001), que aparece representado por los complejos magmáticos Cerro Toro (Tonalitas, granodioritas, gabros y monzogranitos) y Nuñorco (Granodioritas y monzogranitos) (Figura 2).

El Ciclo Gondwánico está asociado a la tectónica extensional que favoreció la intrusión de los leucogranitos de Cerro La Gloria y Loma Colorada (Dahlquist *et al.*, 2010; Alasino *et al.*, 2012; Dahlquist *et al.*, 2013), y el desarrollo de cuencas donde se depositaron las sedimentitas continentales del Grupo Paganzo, en donde se dividen en la Fm. Agua Colorada, representada por conglomerados, arcosas, areniscas de grano grueso a fino y lutitas carbonosas blancas-amarillentas y Fm. De la Cuesta representada por Conglomerados, areniscas y pelitas rojizas, localmente intercaladas con horizontes de yesos (Candiani *et al.*, 2011, fig. 2).

La actividad magmática del ciclo Andino está representada por la Fm. Mogotes, que constituye un conjunto de domos dacítico-andesíticos portadores de pirita, sulfuros de cobre y oro, de edad miocena superior–pliocena inferior (5.0±0.3 Ma, Losada-Calderón *et al.*, 1994) y que presenta un proceso hidrotermal relacionado con el evento magmático que finalizaría con los depósitos de tipo cobre porfídico (diseminados de Mo, Cu, Au) y filones epitermales de alta sulfuración de Cu–Au (Ag–As–Sb–Te), que alcanzan edades de 3.8±0.2 Ma (Losada-Calderón *et al.*, 1994). Se registran depósitos sinorogénicos Neógenos, que en la cuenca están representados por la Fm. El Crestón representada por conglomerados volcanogénicos, pelitas, areniscas y evaporitas, con un espesor promedio de 1700 m. (Turner, 1960) y el Grupo Angulo, en donde se divide en Fm. del Abra (conglomerados muy gruesos con intercalaciones de areniscas de grano grueso), Fm. del Buey (lutitas y areniscas pardo moradas, calizas), Fm. Santo Domingo (areniscas eólicas) y Fm. El Durazno (conglomerados y areniscas, tobas, areniscas tobáceas) (Dávila y Astini, 2003; Martina *et al.*, 2003). Los depósitos Cuaternarios, principalmente gravosos, presentan amplia distribución conformando diversos niveles pedemontanos, representados en parte por las formaciones Santa Florentina, que es un conglomerado matriz soportados (Turner, 1962; Fidalgo, 1968), Cueva de Pérez, representada por un conglomerados polimícticos (Marcos y Zanettini, 1982) y Corral Amarillo, que es una potente secuencia de sedimentos lacustres (Limarino *et al.*, 1994, fig. 2).

### Estructura

Estructuralmente el Sistema de Famatina ha sido definido como una faja plegada y corrida que involucra al basamento y la cubierta en su deformación (Astini, 1998; Dávila y Astini, 2003). Esta faja está caracterizada por presentar estructuras plegadas con núcleos y flancos fallados del Paleozoico superior e inferior, sobrecorridos por láminas de basamento. Esta región comenzó a experimentar levantamientos como consecuencia del orógeno andino desde el Mioceno temprano (Dávila y Astini, 2007), que involucran a la columna sedimentaria suprayacente.

La región de estudio se encuentra en la zona sur de la faja plegada y corrida, donde el estilo estructural está dominado por bloques de basamento que sobrecorren angostas fajas sedimentarias fuertemente

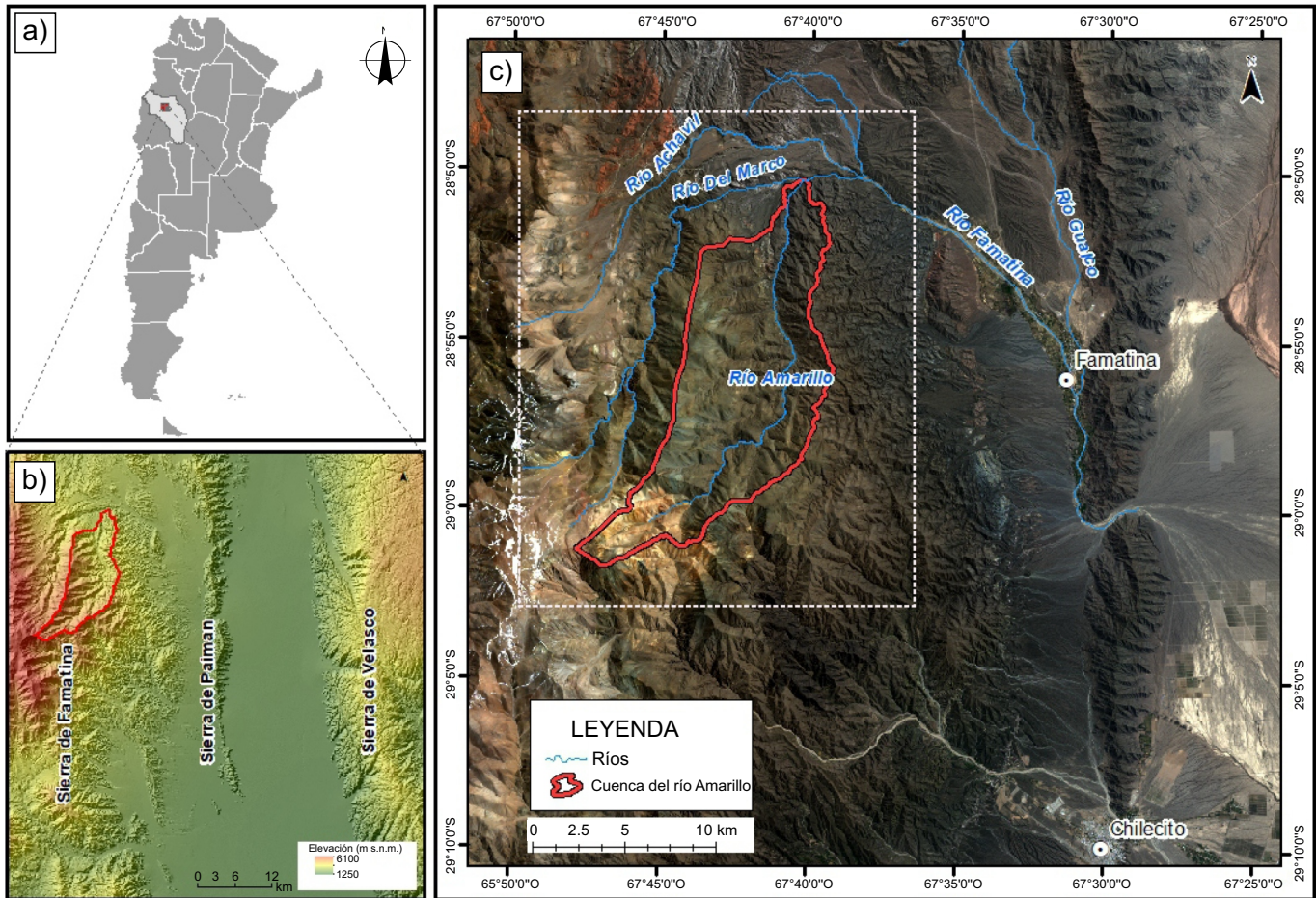


Figura 1. Imágenes de la zona de estudio. A) Mapa de la República Argentina con la ubicación de la Provincia de La Rioja. B) Modelo de elevación digital donde se observan las principales elevaciones de la zona. C) Imagen satelital tomada de Google Earth, bajo la Tecnología Image 2021 CNES/Airbus, en la cual se indica la delimitación de la cuenca del río Amarillo, los principales ríos y las ciudades cercanas a la zona de estudio, en donde, el recuadro punteado blanco representa la superficie del mapa geológico de la Figura 2.

deformadas, y que se pueden dividir en tres zonas estructurales que expresan distinto comportamiento mecánico. La zona oeste, está delimitada por los corrimientos de zócalo del cordón de la Cumbre y del cordón de Los Nevados, con doble vergencia y limitada por fallas inversas con alto ángulo; la zona central, por la faja plegada y corrida, limitada por los corrimientos vergentes al este; y la zona este, limitada por el corrimiento de zócalo de las sierras de Paimán/Ramblones, con alto ángulo y vergencia al oeste, opuesta a los anteriores (Dávila, 2003, fig. 2).

### Clima

La provincia de La Rioja pertenece a la diagonal árida de América del Sur, caracterizada por un clima que ha sido calificado como templado y árido, con veranos muy prologados y un déficit hídrico permanente. El clima árido-semiárido de la región proporciona precipitaciones de alrededor de los 200 mm anuales. Durante el verano y comienzos de otoño, las masas de aire provenientes del Atlántico son las causantes de las precipitaciones (Bianchi *et al.*, 2005), que se concentran especialmente durante los meses de enero y febrero. Estas masas de aire ingresan a la región por el norte atravesando numerosos sistemas montañosos, con lo cual van perdiendo paulatinamente su humedad. En el invierno se dificulta la entrada de la masa de aire atlántica y predominan las masas de aire polares, con nevadas en forma discontinua.

A su vez, la zona presenta grandes amplitudes térmicas, con temperaturas medias que en el mes de enero oscilan entre los 17 °C y 20 °C, mientras que las del mes julio poseen valores de entre 9 °C y 12 °C. Las temperaturas máximas absolutas son superiores a los 45 °C en verano y en los inviernos se registran mínimas absolutas de -8 °C. En invierno son comunes las nevadas, fundamentalmente en las partes más altas de los sistemas serranos, donde la nieve puede permanecer durante gran parte del año (SMN, 1958, 1965, 1985).

La región se caracteriza en general por una fuerte continentalidad, una débil humedad, una fuerte insolación diaria, limpidez atmosférica, lluvias estacionales (violentas y torrenciales) y una fuerte evaporación, así como por vientos cálidos y secos. Localmente, y si bien los diversos sistemas montañosos producen cambios importantes en las condiciones climáticas de la región, según la clasificación de Köppen (Peel, *et al.*, 2007), le corresponde un clima BWw, es decir un clima árido con concentraciones estivales de las precipitaciones menores a 250 mm/año.

### Hidrología

El río Amarillo nace a los 4300 m s.n.m. y tiene un recorrido de 35 km, presentando un caudal promedio, en la cuenca inferior, para las épocas estivales de ~1000 l/s, mientras que para las épocas invernales disminuye a 400 l/s, alcanzando su mínimo durante los

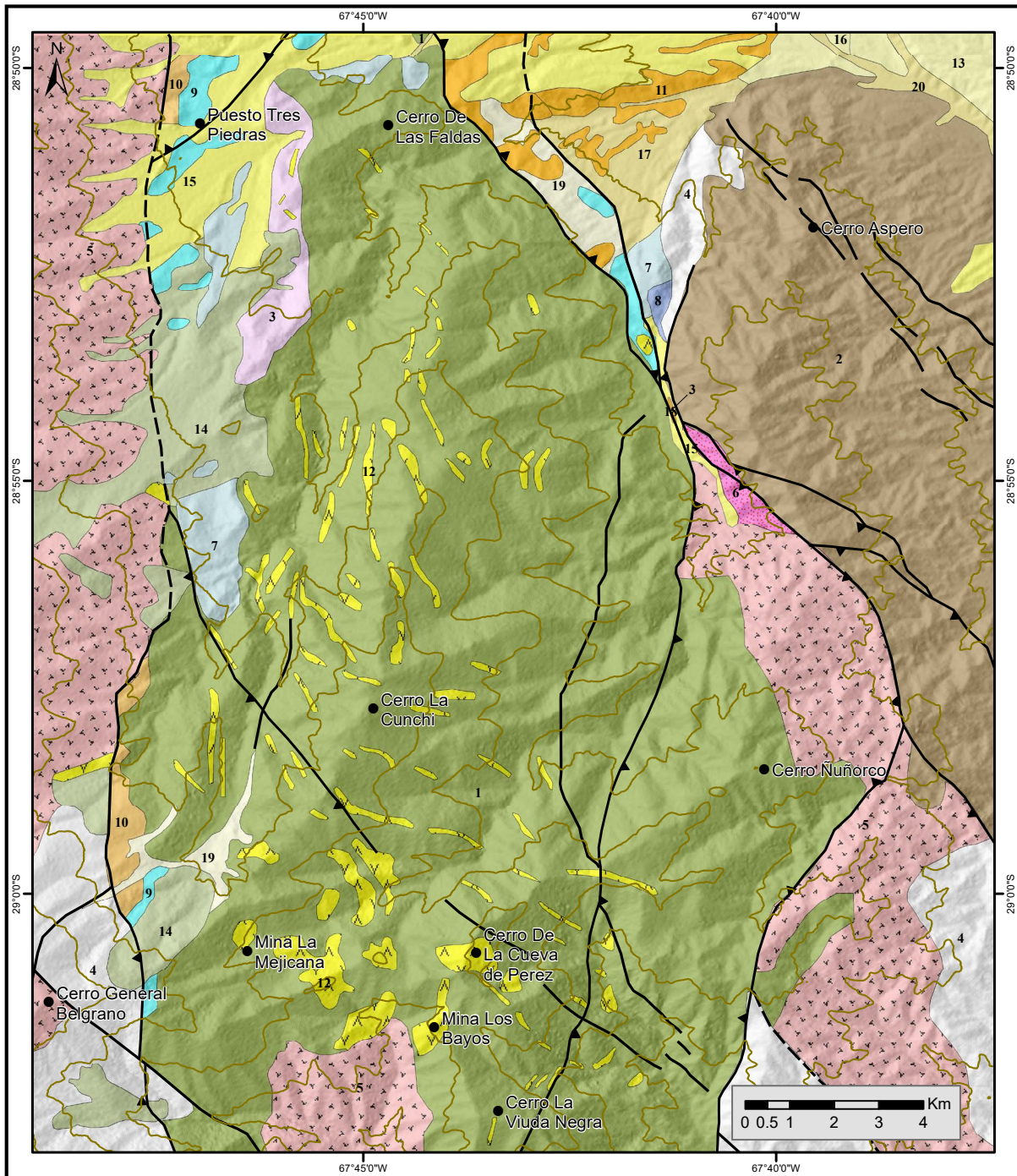


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio, con la delimitación de las principales unidades involucradas (modificado de Candiani *et al.*, 2011 y Fauqué y Caminos, 2006).

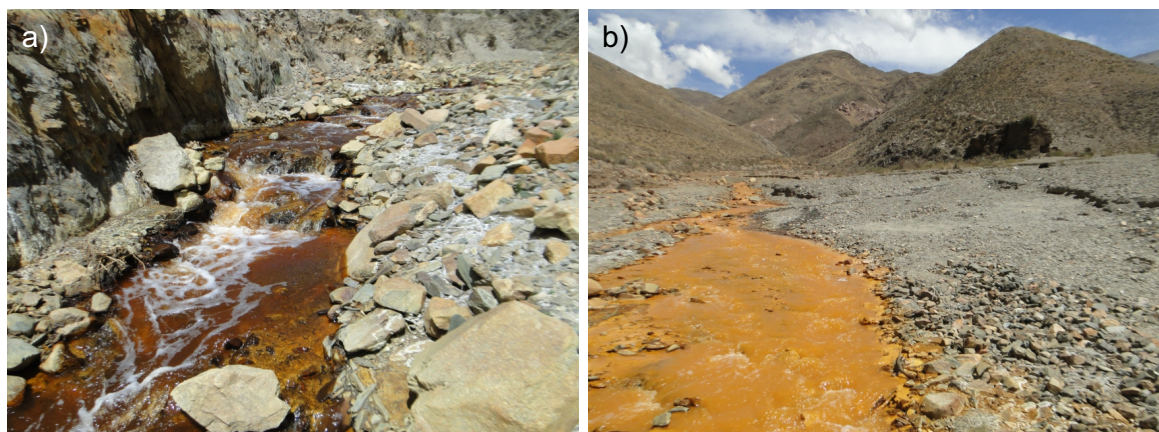


Figura 3. Imágenes del río Amarillo. a) Fotografía del río Amarillo en la Cuenca alta, que ya presenta coloraciones rojizas. b) Fotografía del río Amarillo en la Cuenca media-baja, donde ya se pueden observar las coloraciones anaranjadas y la presencia de un arroyo produciendo una de las maneras de atenuación del pH por la precipitación de minerales de  $\text{Fe}^{3+}$ .

meses de octubre-noviembre (Maza, 2015). Informes técnicos más recientes registran aforos ( $28^{\circ}50'57.2''$  latitud Sur;  $67^{\circ}37'9.41''$  longitud Oeste) de unos 502 l/s para septiembre del 2019 (Miguel y Brizuela, 2019) y para febrero del 2020 unos 1490 l/s (Miguel y Brizuela, 2020).

En su trayectoria, el río Amarillo se une al río del Marco y al río Achavil (Figura 1c), toma el nombre de río Famatina que luego cambia de nombre por el de Capayan, de carácter efímero, y que forma el abanico aluvial de mismo nombre en la depresión tectónica de Antinaco-Los Colorados. El río de alta montaña se caracteriza por aguas ácidas sulfatadas de carácter turbulento, de color rojizo a amarillento, que transportan importantes concentraciones de metales y fases minerales precipitadas de  $\text{Fe}^{3+}$ . Por su parte, el acarreo de material detrítico transportado como carga de fondo tiene lugar hacia la cuenca baja y durante las precipitaciones de verano (Figura 3).

El drenaje de la zona mineralizada, produce en las nacientes del río Amarillo un pH de 2.6. En esta zona se reconocieron surgencias de aguas ácidas asociadas al drenaje ácido de rocas y drenaje ácido de minas en las galerías de explotación (Maza, 2015). En el curso del río Amarillo se genera una fuerte atenuación de los metales, donde el resultado general de los procesos que interactúan es una disminución significativa de la concentración en la dirección del flujo (Leconte *et al.*, 2016), reduciendo sus concentraciones en un 90 % en la cuenca baja, tanto en los periodos estivales (pH ~5) como invernales (pH ~4). Esta importante atenuación se relaciona con la precipitación de minerales de  $\text{Fe}^{3+}$ , la confluencia con arroyos y ríos de aguas neutras y en menor medida la interacción con la roca de caja (Maza *et al.*, 2011). También la atenuación puede estar dada por la precipitación de minerales neoformados, por dilución y por la litología que atraviesa el cauce (Leconte *et al.*, 2016). Los minerales precipitados de  $\text{Fe}^{3+}$  en el cauce del río corresponden: en la cuenca superior a jarosita ( $\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), en condiciones de pH ~2.6 y sulfatos en general  $>3000$  mg/l, y schwertmannita ( $\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) en la cuenca media e inferior en condiciones de pH  $>2.6$  y sulfatos  $<3000$  mg/l (Maza *et al.*, 2014). Estos minerales juegan un rol principal en la movilidad de metales, reteniendo importantes concentraciones de metales como As, Mo, Cu y Zn, asociada con procesos de adsorción y co-precipitación mineral. Además, en la cuenca superior y asociadas a los márgenes del río se generan eflorescencias salinas como epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), melanterita ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), pickeringita-halotrichita ( $\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O} - \text{Fe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ ), asociadas a procesos de evaporación (Maza, 2015).

## METODOLOGÍA

La metodología del trabajo consistió en tareas de gabinete con la recopilación y análisis de bibliografía, trabajos científicos e informes técnicos, material cartográfico (cartas topográficas y geológicas), fotográfico, imágenes satelitales de las plataformas Landsat 8 y Sentinel, como así también imágenes QuickBird, Image 2021 CNES/Airbus y Maxar Image, suministradas por Google Earth. A su vez, se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (MDE) del Instituto Geográfico Nacional Argentino (IGN) con una resolución espacial de 30 metros (m) y MDE ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, con una resolución espacial de 12.5 m, con el fin de poder identificar, reconocer y analizar los principales rasgos geomorfológicos presentes. Luego continuaron los trabajos de campo que consistieron en la descripción e interpretación de los diferentes depósitos y geoformas, a fin de completar la información obtenida en los trabajos de gabinete. En los afloramientos o geoformas de interés, se describieron sus características sedimentológicas y geomorfológicas, georreferenciándolas a fin de que exista una relación precisa entre la información obtenida en gabinete y en el campo, como así también caracterizar las unidades litológicas involucradas, a través del color, textura, estructuras, entre otras particularidades.

Luego, se realizó la integración de los datos obtenidos mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica, en donde se utilizó el programa de código abierto QGIS en su versión 3.14.

## RESULTADOS

La cuenca del río Amarillo abarca una superficie de  $144.7 \text{ km}^2$ , que se extiende predominantemente en sentido sudoeste-noreste (Figura 1), con una pendiente media de alrededor del 12 % y con un orden de Strahler de 4. Sus cabeceras superan los 5400 m s.n.m. de altura y descienden hasta los 2100 m s.n.m., en donde, la conjunción del curso principal con el río del Marco, definen el punto de cierre de la cuenca hidrográfica analizada (Figura 1). Los cerros más importantes de la zona de estudio son La Cunchi (4935 m s.n.m.), Cueva de Pérez (4692 m s.n.m.), Ñuñorco (3974 m s.n.m.) y De las Faldas (3000 m s.n.m.) (Figura 2).

### Rasgos fluviales

El río Amarillo presenta sus cabeceras en cercanías del Cerro

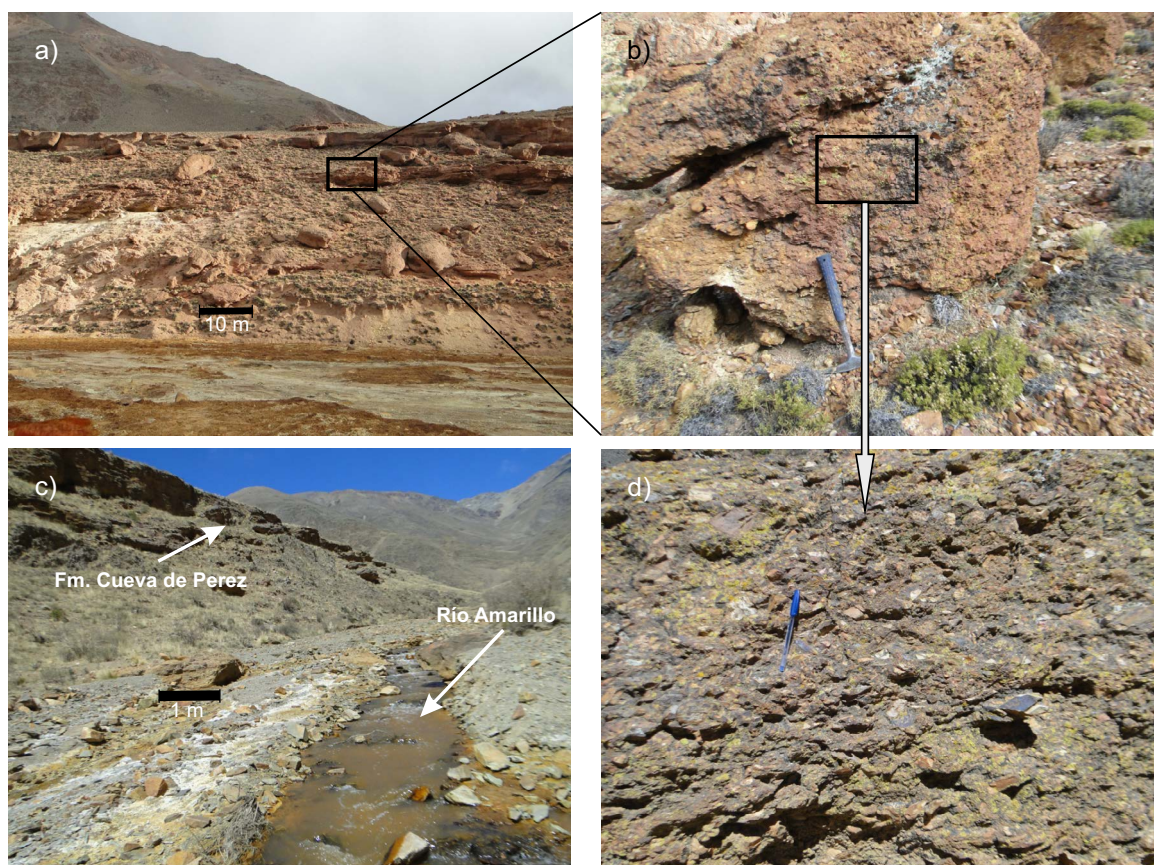


Figura 4. Imágenes de la Fm. Cueva de Pérez. a) Afloramiento de la Fm. Cueva de Pérez a la altura del destacamento homónimo, en donde se puede observar los bancos discontinuos. b) Estrato de la Formación donde se puede observar la coloración rojiza producto de los cementos de minerales de Fe (III). c) Fotografía del río Amarillo y de la Fm. Cueva de Pérez, donde se puede observar la incisión del río y las terrazas. d) Detalle de la Fm. Cueva de Pérez, en el cual se observa que se trata de una brecha clasto soportada.

General Belgrano (Figura 2), escurriendo en sentido SO-NE los primeros 7.5 km hasta las inmediaciones del destacamento Cueva de Pérez, para a partir de allí, escurrir con sentido SSO-NNE a lo largo de unos 18 km y confluir con el río del Marco. Las nacientes del curso principal son a partir de un pequeño cuerpo de hielo, que junto a la precipitación nival y pluvial le dan al curso un carácter transitorio, con diseño *braided* o trenzado de unos 150 m de ancho aproximadamente en su primer tramo, con flancos de valle muy abruptos y tapizados de gelifractos, donde es común observar procesos gravitacionales. Luego el cauce se infiltra y toma un carácter subterráneo por unos 5 km, para aflorar en las inmediaciones del Destacamento Cueva de Pérez. En esta zona el río presenta un estrechamiento, cambio de rumbo y carácter, ya que se transforma en permanente, desarrollando su talweg sobre rocas de las Fms. Negro Peinado y Mogotes, con un ancho que no supera los 20 m (Figura 4a y Figura 5). Los depósitos actuales del río Amarillo, en la llanura de inundación, están compuestos por conglomerados y brechas, con intercalaciones areno- fangosas, con espesores que van desde 0.50 a 3 m, cementados con sulfatos de hierro (jarosita y schwermanita) (Maza, 2015), embutidos en un valle de paredes muy abruptas a verticales (Figura 4).

#### Terrazas de la Fm. Cueva de Pérez

La Fm. Cueva de Pérez corresponde a depósitos aterrazados de conglomerados polimícticos (Marcos y Zanettini, 1982) que afloran en la zona del distrito minero Nevados de Famatina (Figura 4 y Figura 5) y a lo largo de la cuenca del río Amarillo por más de 20 km. Se trata de

una secuencia discontinua de conglomerados y brechas clasto a matriz soportados, tabulares, con matriz arenosa y fuertemente cementados con minerales de Fe (III) (Juárez *et al.*, 2014). Estos niveles suelen aparecer intercalados con niveles arenosos decimétricos. Presentan una estratificación grosera y los clastos se componen de pizarras (Fm. Achavil), pizarras alteradas (Fm. Achavil), areniscas rojizas y blanquecinas (Fm. Agua Colorada y Fm. de la Cuesta), granitos (Complejos magmáticos Cerro Toro y Ñuñorco) y pórfidos dacíticos de la Fm. Mogotes. Los cementos ferruginosos de los conglomerados de la Fm. Cueva de Pérez presentan diferentes tonalidades, dominados por niveles rojizos, acompañados por niveles de amarillentos y patinas de color oscuro recubriendo los cementos rojos (Juárez, 2015, fig. 4).

Estos depósitos, que composicionalmente presentan distinto grado de madurez (conglomerados y brechas), representan terrazas fluviales escalonadas en diferentes niveles, cuya cronología relativa ubica en los niveles superiores a los más antiguos. Esto se encuentra asociado a la incisión del río y a la exhumación de la sierra producto de los movimientos Andinos, y evidencian la existencia de un paleodrenaje ácido que se vincula a procesos de meteorización similares a los actuales en el DMNF (Maza, 2015, fig. 4 C). Muy probablemente, la altura que alcanzan estos depósitos en el tramo inicial de la cuenca se debe a la cercanía con el área de aporte, a los procesos glaciales y periglaciales próximos, y al embudo que se forma en el valle en las inmediaciones del Destacamento Cueva de Pérez, propiciándose el taponamiento del valle, hasta la profundización del curso por movimientos neotectónicos.

### Formas glaciales y periglaciales

Sobre las divisorias de agua que rodean las cabeceras de la cuenca (inmediaciones del Cerro General Belgrano), hasta los 3800 m s.n.m., se pueden observar rasgos geomorfológicos que responden a una génesis glacial (circos, crestas dentadas, morenas) y periglaciales (Bodenbender, 1916; Fauqué y Caminos, 2006; Fucks *et al.*, 2018, fig. 5A), estando en la actualidad estos últimos procesos en permanente actividad. Por encima del límite superior de la cuenca (5750 m s.n.m.), se observa un suave relieve local considerado una pampa de altura (Candiani *et al.*, 2011; Fucks *et al.*, 2018), *glattrelief* (Garleff y Stingl,

1996), o una superficie de aplanamiento relictica (Gutierrez Elorza, 2001), donde las laderas se caracterizan por un perfil convexo-cóncavo sin interrupciones netas y están cubiertas por un depósito continuo de gelifractos, acompañada por lavado superficial (Figura 6a y 6d). De esta pampa surgen de manera abrupta las cabeceras de las distintas cuencas (entre ellas la cuenca en estudio), desencadenando procesos gravitacionales favorecidos por las anisotropías de las rocas expuestas (principalmente en pizarras y filitas), por las pendientes pronunciadas y por la exposición a la intemperie, mayoritariamente asociados a caída y deslizamiento de rocas y escombros. En el fondo de los valles

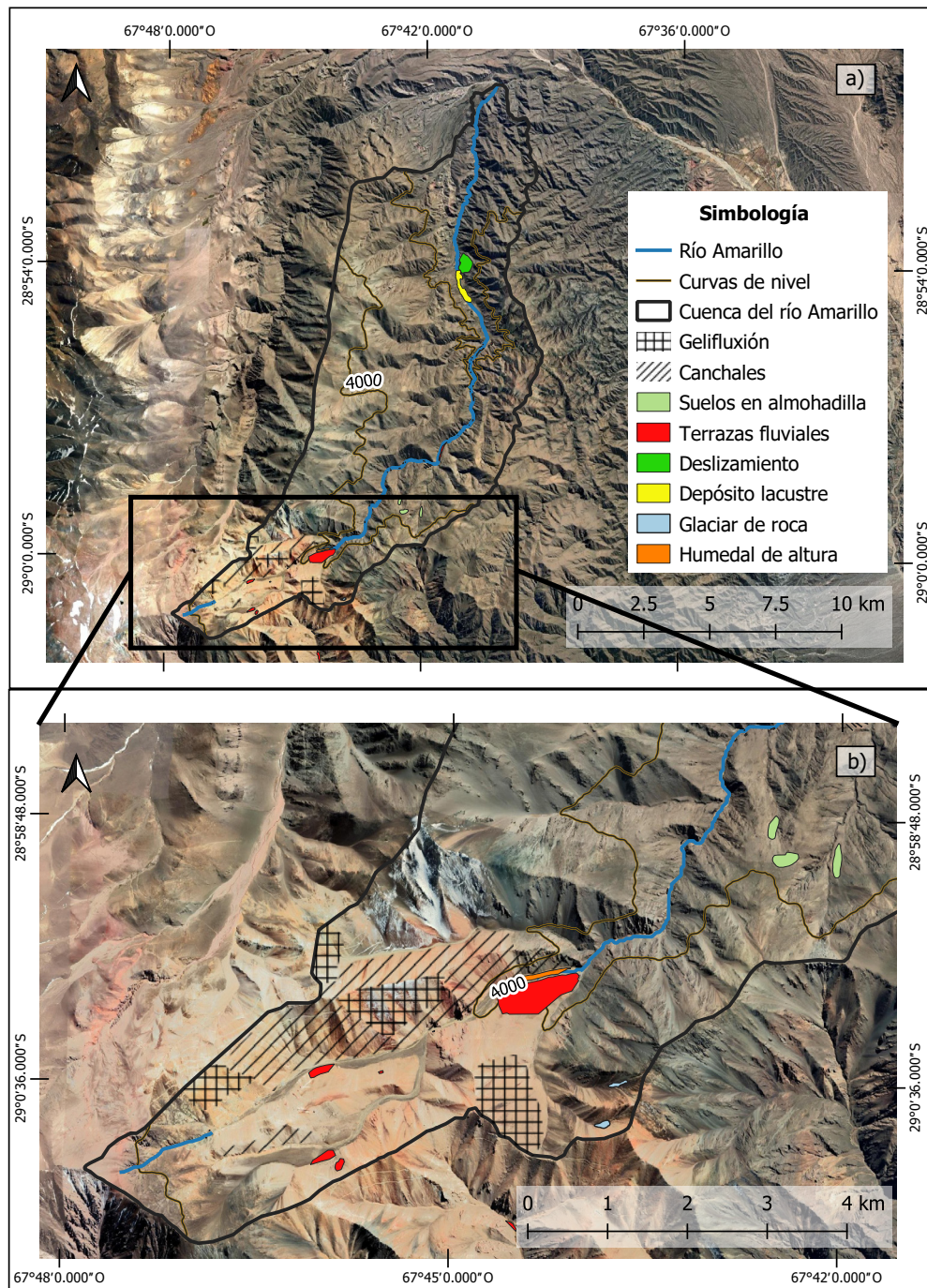


Figura 5. a) Principales depósitos, procesos y geoformas identificadas en la cuenca del río Amarillo, delimitadas sobre imagen satelital tomada de Google Earth. b) Detalle de la figura previa, para la parte superior de la cuenca.

comúnmente se encuentran grandes bloques de roca, mientras que las laderas, dominadas por afloramientos rocosos, pueden verse parcialmente cubiertas por detritos, formando taludes y, en algunos casos, conos aluviales individuales o coalescentes (Corbat *et al.*, 2020). Las nacientes del río Amarillo se establecen a partir de una pequeña masa de hielo bandeado, con una longitud de 100 m y un ancho de 20 m. Si bien actualmente exhibe bajo movimientos asociado a la estación del año, en épocas pasadas con un clima más extremo debe haber actuado como una masa de hielo más importante (Figura 6a, 6c y

6e). El mismo se encuentra encajonado entre las laderas escarpadas del valle y dominado en la actualidad por procesos fluviales que dan nacimiento al río Amarillo.

#### Formas y depósitos periglaciales

El término “periglacial” fue utilizado para describir las condiciones climáticas y geomorfológicas de áreas periféricas al hielo y glaciares del Pleistoceno (Losinski, 1912). Actualmente, este término se refiere a un ambiente de clima frío, con ciclos de congelamiento y descongelamiento



Figura 6. a) Imagen satelital tomada de Google Earth, bajo la Tecnología Image 2021 CNES/Airbus, del sector superior de la cuenca y partes alledañas, con la ubicación de las principales geoformas. b) Cicatriz de un deslizamiento y crestas del glaciar de escombros en las cabeceras del río Achavil (Fucks *et al.*, 2018). c) Cuerpo de hielo en las cabeceras del río Amarillo. d) Pampa de altura, glattrelief o superficie de aplanamiento relictas en la parte alta de la Sierra de Famatina. e) Fotografía de detalle del cuerpo de hielo, en donde se evidencian las bandas de acumulación.



que involucran tanto al material rocoso como a la porción del suelo próxima a la superficie, que permanece por debajo de 0 °C al menos dos años consecutivos (Umerez *et al.*, 2015; Tapia Baldis, 2020 y Trombotto Liaudat, 2020), aspecto considerado esencial como condición definitoria del mismo para Cordillera de Los Andes (Trombotto Liaudat, 2008). El término “glaciar de escombros” (Corte y Buk, 1976), también denominado “glaciar de roca” o “glaciar rocoso”, corresponde a mesoformas de acumulación sedimentaria constituidas por rocas y detrito congelado que se mueven pendiente abajo por deformación plástica y reptación del permafrost (Corte, 1976; Giardino *et al.*, 1987). Los glaciares de escombros presentan generalmente una forma de lengua o lobulada en planta y una superficie de topografía irregular caracterizada por una sucesión de crestas y surcos, transportando fundamentalmente fragmentos rocosos generados por craquelamiento térmico o bien por till glaciar (Barsch 1987, 1992; French, 2007). En la cuenca de estudio, se relevaron dos glaciares de escombros entre los 3900 m.s.n.m. hasta los 5360 m.s.n.m., ambos en las laderas Oeste. Cabe mencionar que uno de los cuerpos está presente en el informe de IANIGLA (2017) ubicado a la latitud 29° 0'52.79"S y longitud 67°43'48.76"O, y el otro debido a su tamaño no ingresa en dicho informe, por ser menor a 0.01 km<sup>2</sup>, el cual se encuentra ubicado a la latitud 29° 0'36.13"S y longitud 67°43'45.65"O (Figura 5).

En algunas de las laderas que están desprovistas de vegetación y asociadas al DMNF, pueden observarse rasgos asociados a procesos de geliflujión, que es un tipo de soliflujión implicando la presencia de congelamiento estacional o permafrost (Van Everdingen, 2005). Éstos se presentan con forma de pequeñas lomadas alargadas perpendiculares

a la pendiente del terreno, en pequeñas terrazas (Figura 7b). Los escalones son de pequeña altura, llegando a alcanzar unos 20 cm, y presentan una separación de algunos metros entre ellos. El material involucrado corresponde a las Fm. Mogotes y Fm Achavil, con clastos angulosos y de diferentes tamaños. También se observan flujos canalizados (flujo de escombros o *debris flow*) en sentido de la pendiente, caracterizados cada uno de ellos por un surco central y por elevaciones en los márgenes, en donde la granulometría del material es fina. El flujo puede terminar a mitad de la ladera formando un lóbulo en el mismo sentido de la pendiente (Figura 7c), o puede llegar a la base de la misma, donde produce un lóbulo alargado en sentido transversal a la pendiente, posiblemente debido a la pérdida de la capacidad de transporte del material (Figura 7d). Este proceso se vincula a precipitaciones intensas, relacionándose a una transición entre el escurrimiento fluvial encauzado y la remoción en masa de tipo flujo (Fucks *et al.*, 2018). También en algunas laderas se pueden observar suelos almohadillados, que son formas alomadas provistas de vegetación, con diámetros máximos de 1–2 m y alturas en torno a los 50 cm, con crioturbacones en su interior. Se desarrollan por encima del límite de crecimiento de los árboles y su origen parece estar en relación con el desplazamiento de masas (Schunke y Zoltai, 1988). Los suelos almohadillados se encuentran dispersos en las laderas, asociados con los afloramientos de aguas superficiales. Están representados superficialmente por parches de vegetación en pendientes bajas a moderadas, saturados de agua, compuestos por materiales fango-arenosos a gravillosos, muy oscuros, con clastos en su interior (Fucks *et al.*, 2018). Debido a la gran amplitud térmica son

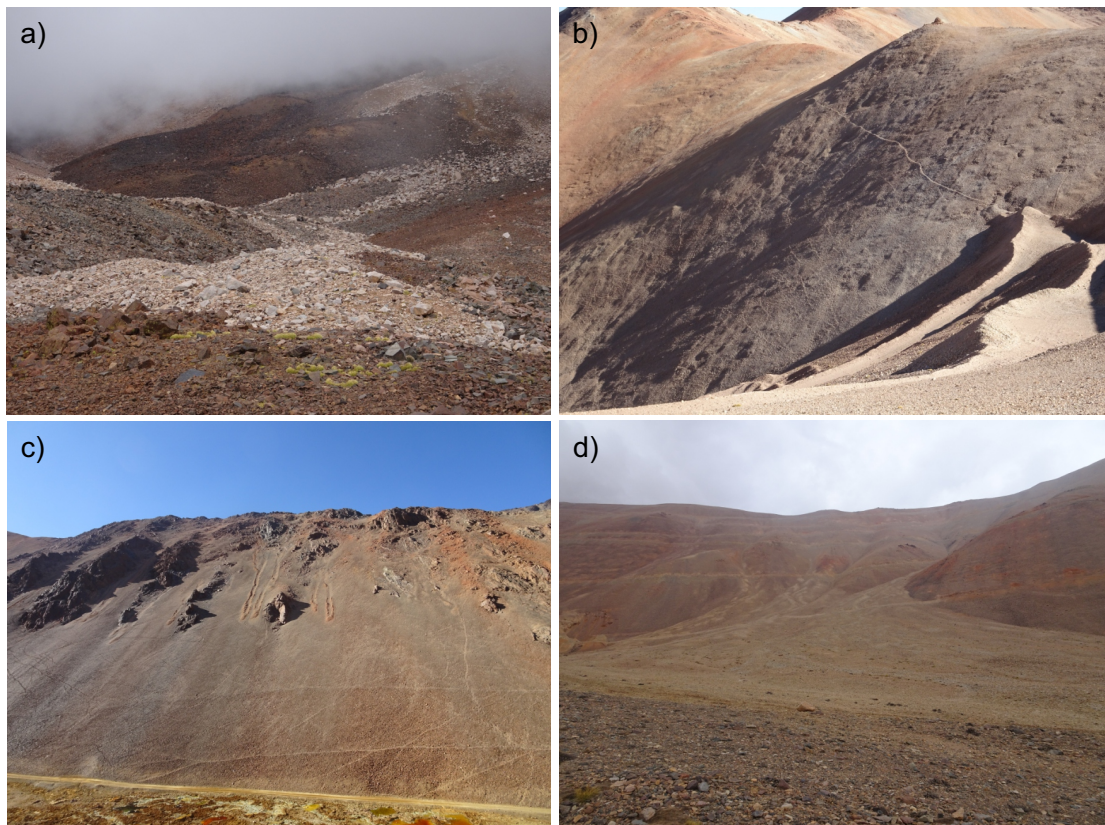


Figura 7. a) Glaciar de roca presente en la cuenca de estudio, a una altitud de 4390 m s.n.m. b) Geliflujión en pequeñas terrazas o lomadas alargadas perpendiculares a la pendiente del terreno, que se encuentran alrededor de los 4470 m s.n.m. c) Flujos canalizados en el sentido de la pendiente, que terminan sobre la ladera del valle, localizados a 4400 m s.n.m aproximadamente. d) Flujos canalizados en el sentido de la pendiente, que al alcanzar la base de la ladera se esparcen. Estos se observan a los 4420 m s.n.m.

lugares propicios para ciclos de hielo-deshielo tanto del agua aflorante como también de la intersticial, donde la presión que se ejerce al horizonte superficial helado produce el incremento de su volumen, generándose hinchamientos del suelo almohadillado (Figura 8a y 8b). Estas morfologías se pueden observar en las laderas de algunos valles que no están asociados al DMNF, ya que las aguas neutras son propicias para el crecimiento de la vegetación (Figura 5), y también se pueden observar algunas relictas producto de la disminución del agua, por lo general asociado a cambios en el sentido de escurrimiento, los cuales son producto de variaciones locales, siguiendo la pendiente hasta alcanzar su nivel de base.

Por otro lado, se pueden observar suelos ordenados que son controlados por la vegetación, y que presentan forma en polígonos, círculos y escalones; estos últimos, forman bancos en laderas de 3–20° de inclinación. Los polígonos y los círculos tienen una parte central con clastos de pequeños tamaños, y desprovista de vegetación. La vegetación presente se trataría de *Festuca nardifolia*, una especie típica de alta montaña, que crece en forma circular. El origen de este proceso estaría relacionado fundamentalmente con el movimiento diferencial de masas, muy acotado, tanto en superficie como en profundidad (Fucks *et al.*, 2018, fig. 7C y 7D). Los procesos de gelifración se encuentran asociados a las laderas sur, ya que son las laderas de umbría, que poseen menor insolación y por consiguiente se concentran los procesos hielo- deshielo.

**Humedal de altura.** en el piso del valle del río Amarillo frente a Cueva de Pérez, a los 3900 m s.n.m., se presenta un tramo de unos 600 m de largo por 60 m de ancho aproximadamente caracterizado

por una mezcla de sedimentos heterométricos, con sedimentos finos dominantes y saturados en agua (Figura 9 y Figura 5). Representa un humedal con pequeñas lagunas de tamaños métricos y niveles variables, cuyos rebordes elevados están compuestos por bloques angulosos. En los abundantes cuerpos de agua se observa la presencia de algas clorófitas del género *Cladophora sp.*, cianobacterias del género *Anabaena sp.* y bacterias de la especie *Acidithiobacillus ferrivorans* y *Leptospirillum ferrooxidans* (Pozo, 2019). Por otro lado, la presencia de microorganismos oxidantes de hierro y azufre y bacterias (*Acidithiobacillus ferrivorans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Ferrimicrobium acidophilum*, *Alicyclobacillus cycloheptanicus* y *Acidiphilium iwatense*) y hongos heterótrofos (*Coniochaeta fodinicola strain YoF*, *Fodinomyces uranophilus*, *Acidea extrema*), algunos de los cuales tienen comportamiento psicrófilo (Bernardelli *et al.*, 2021)

Todo este sector se caracteriza por una superficie muy irregular con tenues indicadores de movimiento, limitado en su margen derecha y aguas abajo por el curso de agua, hacia donde drena el agua intersticial, y representado por un metro de barrancas (Figura 9). El agua que contiene esta geoforma proviene de las precipitaciones ocurridas aguas arriba, aunque la fusión de hielo en las nacientes viene escurriendo de forma subterránea y aflora en este sitio, presentando esta localidad el pH más bajo de todo el sistema con valores del orden de los 2.16 (Maza, 2015). Si bien en verano las lagunas están presentes en estado líquido durante el día, durante la noche y en el invierno, donde las temperaturas son más extremas, sufren congelamiento. La presencia de un borde neto y de sedimentos gruesos en cada cuerpo métrico de agua, ubicados a diferentes alturas, indica una desconexión

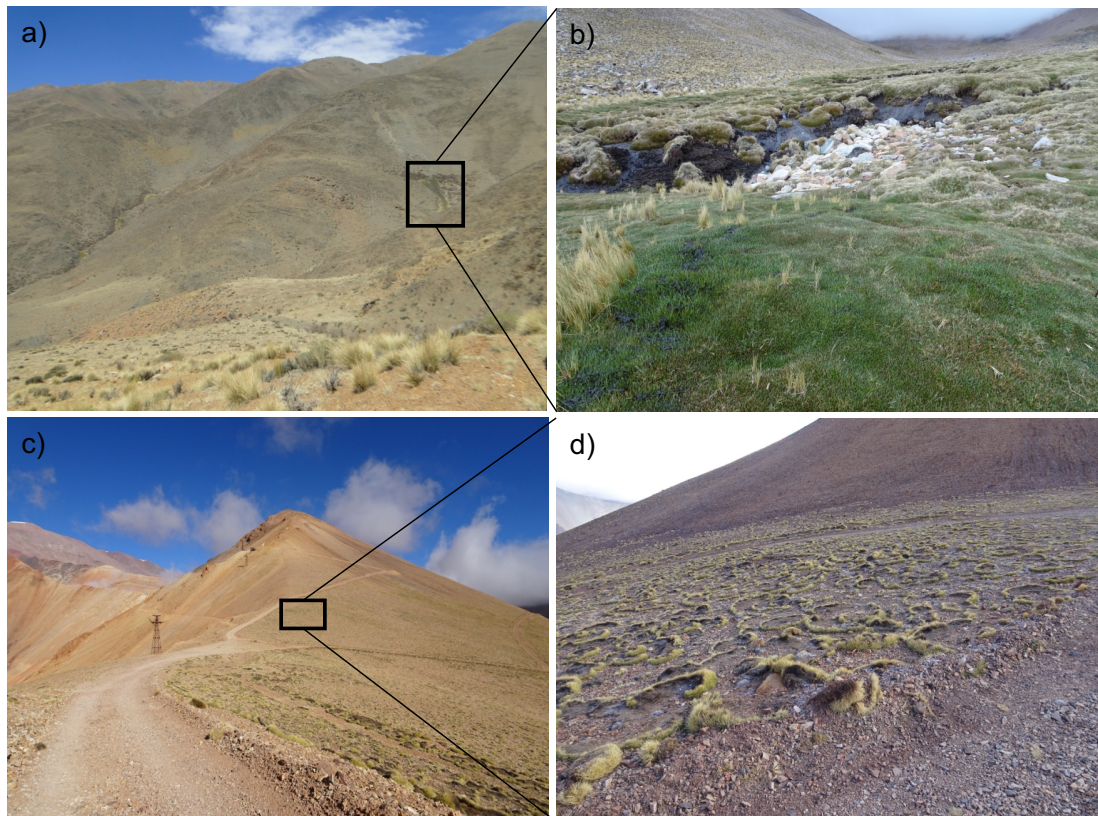


Figura 8. a) Fotografía en la parte media de la cuenca del río Amarillo, en las cercanías del Cerro La Cunchi, en donde se puede observar suelos en almohadillas. b) Detalle de los suelos en almohadillas observados a 3800 m s.n.m. c) Fotografía de las laderas en la cuenca alta del río Amarillo, donde se puede ver los suelos ordenados. d) Detalle de los suelos ordenados, conformas poligonales, circulares y en escalones, controlados por la vegetación en los bordes. Los mismos se encuentran a 4250 m s.n.m.

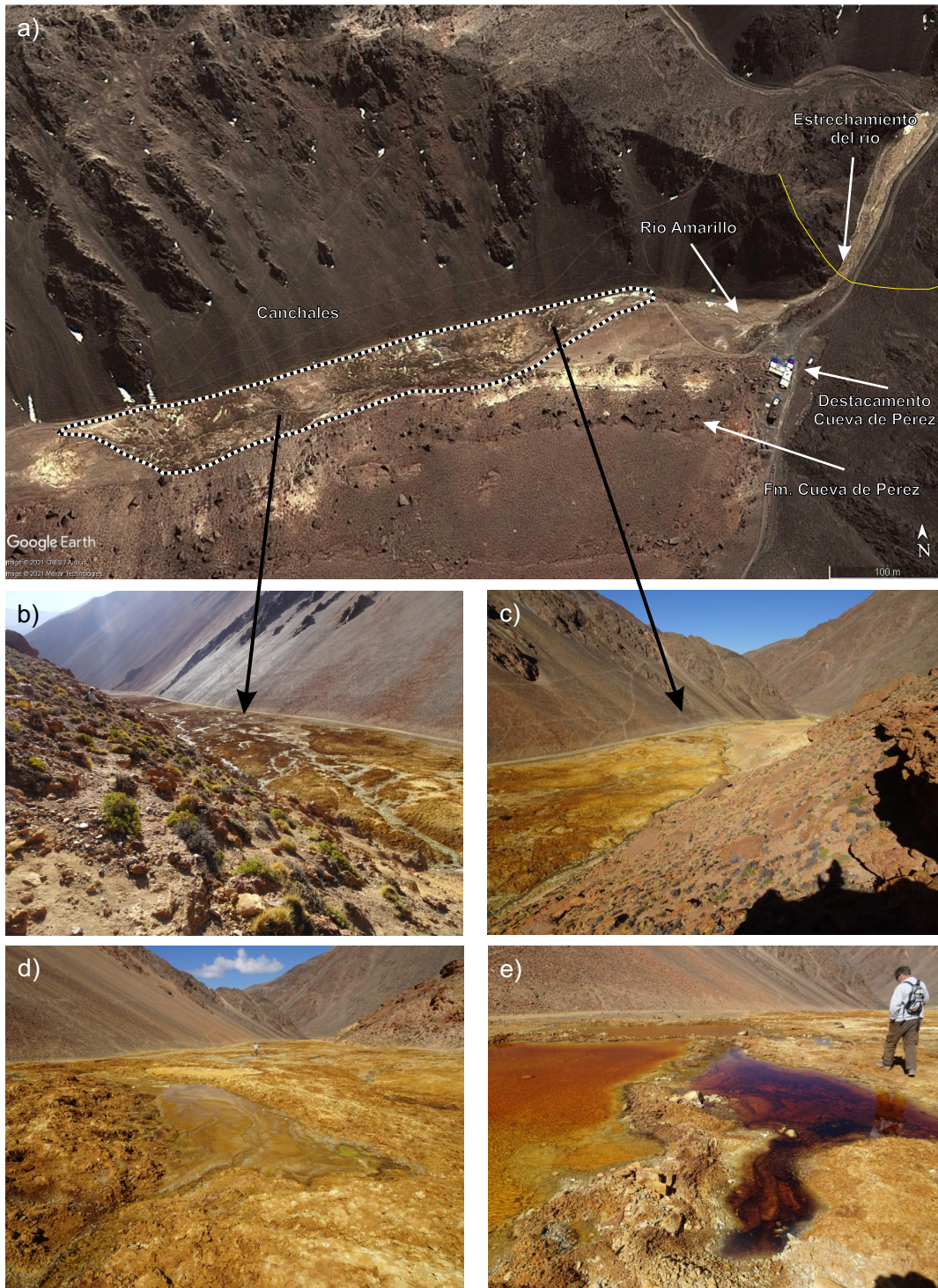


Figura 9. a) Imagen satelital tomada del Google Earth, bajo la Tecnología Maxar Image, del sector Cueva de Pérez (3900 m s.n.m.). b) Fotografía de la parte aguas arriba del humedal de altura y de los canchales en la parte posterior de la fotografía. c) Fotografía de la parte aguas abajo del humedal de altura, el comienzo del río Amarillo y el posterior estrechamiento del valle. d) Fotografía del humedal de altura en donde se puede observar su extensión, su coloración amarilla-anaranjada y las lagunas que se forman por el afloramiento de aguas del río Amarillo. e) Fotografía de detalle de las lagunas y de las diferentes tonalidades que presentan.

entre ellos. Su generación y mantenimiento estarían relacionados al congelamiento y fusión del agua. La saturación del sedimento de agua, las condiciones de congelamiento y fusión, los detritos abundantes, hacen que tenga pequeños movimientos hacia abajo a modo de un proceso de solifluxión.

#### Depósitos lacustres

A los 2500 m s.n.m., se encuentra la Fm. Corral Amarillo (Limarino *et al.*, 1994) representada por un depósito lacustre, producto del endicamiento temporario del cauce del río Amarillo por procesos gravitacionales y fluviales (Figura 10a y Figura 5). Se trata de un

depósito rítmico, actualmente expuesto por acción fluvial, que presenta un espesor máximo de 70 m, unos 1.3 km de largo y 0.3 km de ancho en término medio. En las cabeceras del paleolago se observan depósitos con granulometría gruesa y un marcado ángulo en las cliniformas asociados a cursos entrelazados que construyeron una planicie gravosa y un delta de tipo Gilbert (Limarino *et al.*, 1994; Maza 2015, fig. 9 B);

en la parte media se encuentran depósitos de flujos gravitacionales y deformación sinsedimentaria asociada con paleopendientes (Figura 10c); y en la parte distal, los depósitos lacustres están representados por una alternancia de capas limo-arenosas y ocreos ricos en hierro (Figura 9d 10d). El tapón detrítico, en su parte basal y más próxima al depósito lacustre está comprendido por una brecha matriz sostén,

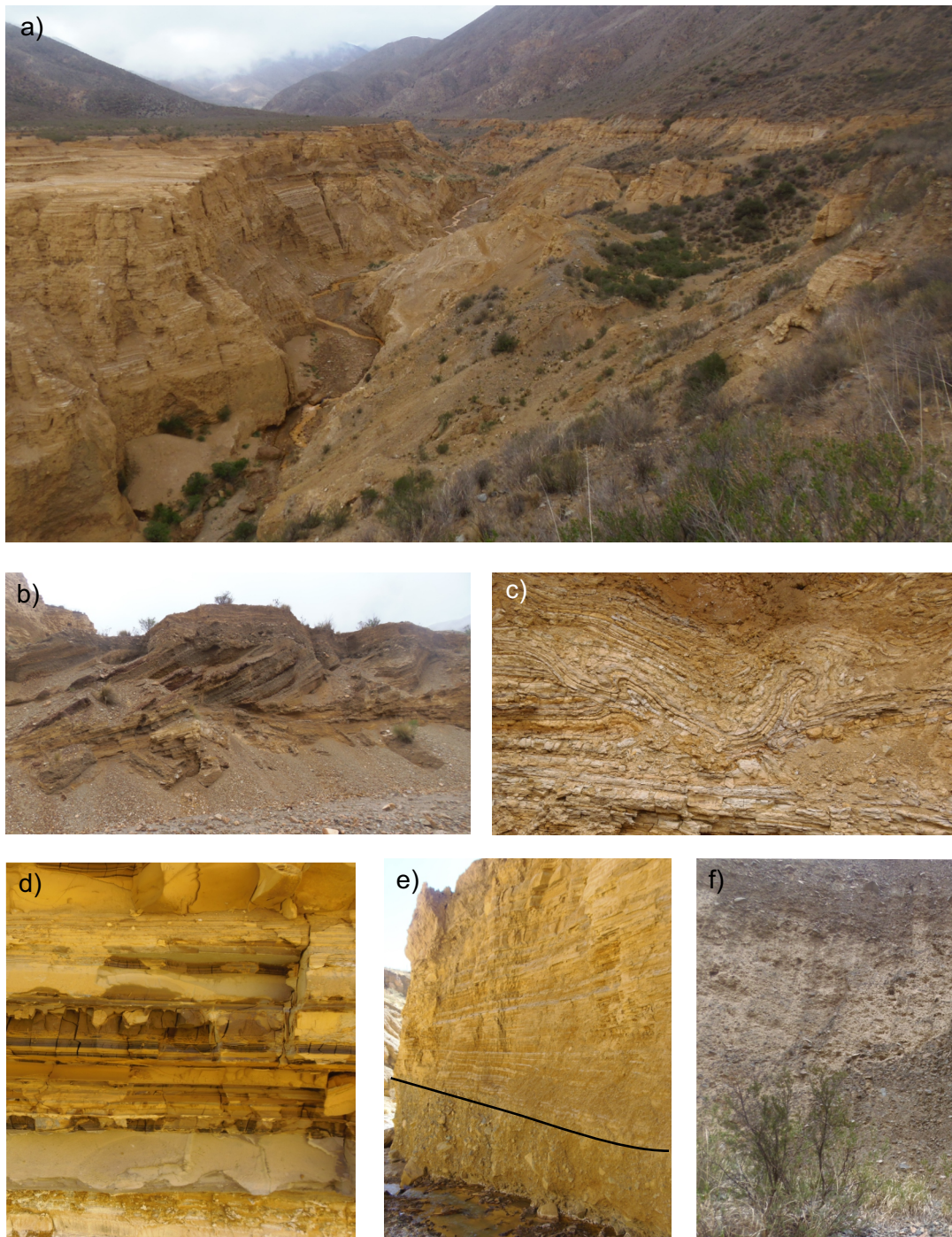


Figura 10. a) Fotografía de depósito lacustre correspondiente a la Fm. Corral Amarillo, ubicado a los 2700 m s.n.m. (latitud 28°54'21.73"S y longitud 67°41'12.47"O). b) Fotografía de los depósitos asociados a las cabeceras del paleolago. c) Fotografía de detalle de la deformación sinsedimentaria, en la parte media del depósito lacustre. d) Fotografía de detalle de la alternancia sedimentaria que presenta la Fm. Corral Amarillo en discordancia. e) Fotografía de la brecha matriz sostén en la parte basal del tapón detrítico, y los depósitos de la Fm. Corral Amarillo en discordancia. f) Fotografía de los sedimentos arenosos de colores castaños claros, consolidados y estratificados, desarrollados en el tapón detrítico.

dispuesta en bancos gruesos y muy gruesos con estratificación grosera, teñida de colores ocres (Figura 10e). Por encima se desarrollan entre 30 y 40 m de espesor de sedimento arenoso de colores castaños claros, consolidado y estratificado, con clastos de tamaño máximo entre 20 y 30 cm, donde se observa una laminación paralela y en algunos lugares con clastos imbricados (Figura 10f). También se observan pequeñas láminas de algunos centímetros de espesor de material limo arcilloso de color castaño oscuro y, por último, se pueden observar algunos lentes arenos limosos.

El depósito basal con un espesor entre 2 a 3 m, sería producto de una avalancha proveniente de la margen izquierda del valle, ya que dicha zona se encuentra en una zona de unión de corrimientos de alto ángulo, separando la Escama estructural Los Damascos de la Escama estructural Las Trancas (Figura 11). La presencia de estratos gradados por encima del tapón detrítico sugiere etapas sucesivas de acarreo de materiales desde las laderas, que fueron trasladados por corrientes fluviales de manera paulatina.

Se infiere para el cuerpo de agua que dio lugar a estas acumulaciones detríticas, una paleo-profundidad >5 m con etapas de somerización y exposición subáerea (Maza, 2015), observándose fundamentalmente en la parte superior de la secuencia laminas compuestas en gran medida por materia orgánica. Dataciones radiocarbónicas de restos vegetales, dos en la base ( $4120 \pm 30$  años (Maza, 2015) y  $3971 \pm 33$  años) y una en el techo de  $2540 \pm 30$  años (Maza, 2015), sugieren que el sistema lacustre funcionó alrededor de 1500 años.

**Depósitos y formas gravitacionales**

Entre los rasgos identificados que sugieren procesos gravitacionales en sus orígenes, se encuentran los canchales, que son mantos

de derrubios que recubren las laderas, principalmente en sus partes medias y bajas, los cuales proceden de las áreas escarpadas superiores constituidas por rocas resistentes (Brunner y Scheidegger, 1974). Los perfiles de estas acumulaciones son por lo general cóncavos y tienen una mayor inclinación en la parte superior. La pendiente del canchal corresponde a la del ángulo de reposo del material más grueso depositado y oscila entre 25° y 40° (French, 1996). Los materiales que son movilizados por remoción en masa, se presentan en afloramientos muy meteorizados y fracturados, como las filitas de la Fm. Achavil y la alteración hidrotermal del pórfido de cobre de Fm. Mogotes (Figura 12 a y Figura 5). También en algunos sectores se va produciendo su transporte por hendiduras en el sustrato, y el material movilizado se deposita finalmente dando origen a conos de derrubios de perfil recto, con una inclinación media de 30°–32° (Figura 12a). Además, se produce la caída libre de detritos o rocas pendiente abajo, por acción de la gravedad (Clark, 1988). Los tamaños de roca encontrados en el terreno como consecuencia de este proceso, son muy variados, desde centímetros hasta de metros, distribuidos aleatoriamente (Figura 12b). Si bien estas morfologías tienen un accionar referido a la gravedad, también presentan componentes de acción periglacial (geliflujión).

Por otro lado, en la parte baja de la cuenca, en las cercanías de la Fm. Corral Amarillo, se observa un deslizamiento rotacional, con un escarpe pronunciado (cicatriz del deslizamiento) y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal, en donde sedimentos cuaternarios, pocos competentes y consolidados se deslizaron sobre el basamento. Sobre el material desplazado se encuentran crestas transversales, que evidencian el movimiento (Figura 12c y Figura 5).

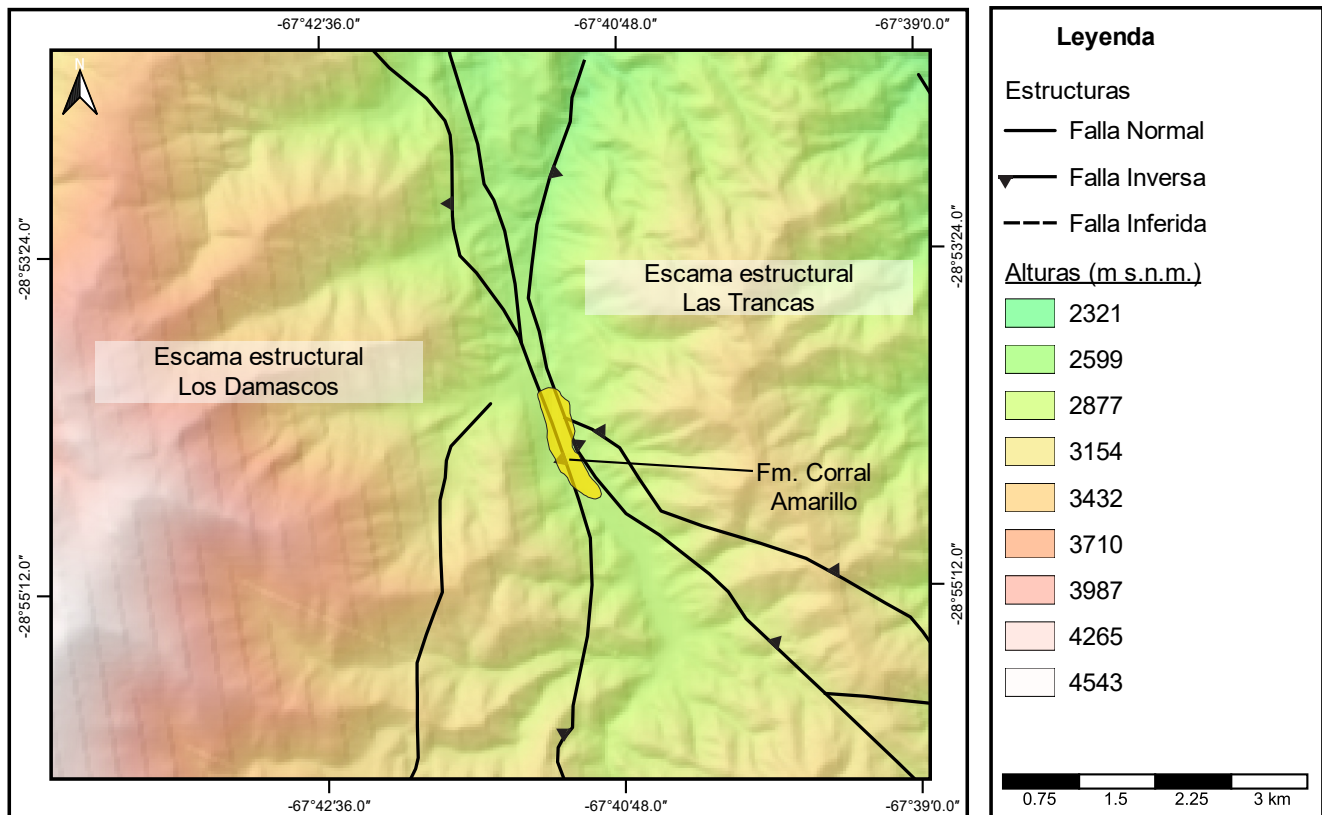


Figura 11. Mapa realizado con MDE del IGM, en donde se puede observar la zona de unión de corrimientos de alto ángulo, separando las escamas estructurales Los Damascos y Las Trancas.

## DISCUSIÓN

En función de los diferentes rasgos y procesos geomorfológicos identificados en la región, puede establecerse una evolución compleja para la cuenca del río Amarillo, donde los cambios climáticos y la tectónica se conjugaron para establecerse como los factores más importantes, accionando de manera individual o en conjunto.

Los depósitos fluviales de la Formación Cueva de Pérez ubicados a diferentes niveles sobre el río Amarillo corresponden a terrazas fluviales, cuya cementación evidencia la existencia de un paleodrenaje ácido asociado a procesos supergénicos provenientes del distrito minero Nevados de Famatina (Maza, 2015), como así también a las periódicas incisiones del río Amarillo debido a la exhumación de la

sierra de Famatina producto de los movimientos Ándicos. Debido a su posición estratigráfica y a la ausencia de deformación, son asignados al Pleistoceno (Candiani *et al.*, 2011). El piso de los cursos de agua están representados por roca de basamento, en valles de paredes verticales, lo que asociado a su rectitud, indica la supremacía de los procesos erosivos verticales sobre los horizontales o de acumulación, indicativos del rejuvenecimiento que los mismos están soportando.

En el sistema del Famatina, los procesos glaciales han sido mencionados por varios autores (Fauqué y Caminos, 2006; Candiani *et al.*, 2011; Fucks *et al.*, 2018), aunque ninguno de ellos expresan una cronología numérica que permita asociarlos a los diferentes eventos fríos producidos, ya sea a escala regional o global, aunque si fueron reconocidos por lo menos tres eventos glaciales independientes,



Figura 12. a) Fotografía en la zona del destacamento Cueva de Pérez. En la ladera derecha se pueden observar canchales y conos de derrubios. b) Caída de rocas de diferentes tamaños, en la zona del DMNF. c) Imagen satelital tomada de Google Earth, bajo la Tecnología Image 2021 CNES/Airbus, en donde se puede observar un deslizamiento rotacional, su escarpe principal (cicatriz del deslizamiento), como así también crestas transversales al movimiento del deslizamiento.

representados en la actualidad por algunos cuerpos de hielo prácticamente inmovilizados (manchones de nieve, glaciaretos). Los rasgos de acumulación glacial de la cuenca en estudio, se presentan generalmente con materiales sueltos y frescos, lo que indicaría una cronología reciente y que podría asociarse con la última glaciación (22–18 ka). Las evidencias de procesos periglaciales son también observadas a altitudes menores y por encima de los 3800 m s.n.m., en forma localizada como los glaciares de escombros o involucrando toda la pendiente, representados por rasgos de geliflujión, suelos almohadillados y suelos ordenados.

La superficie del cuerpo lacustre donde fue depositada la Fm. Corral Amarillo se estima en el orden de los 400000 m<sup>2</sup> y de un volumen de 13500000 m<sup>3</sup> aproximadamente. En la actualidad, el río Amarillo tiene un caudal contrastante entre el invierno y verano, fluctuando entre los 200 l/s y 1000 l/s respectivamente. De acuerdo con estos valores, el tiempo de llenado del vaso estaría en el orden de los 2.2 y 0.4 años, contrastando notablemente en uno y otro caso, por otro lado, las dataciones radiocarbónicas de restos vegetales, sugieren que el sistema lacustre funcionó alrededor de 1500 años. Dado el carácter friable de los sedimentos del sustrato, el nivel de impregnación con Fe<sup>3+</sup> de los mismos y el carácter rítmico de los sedimentos lacustres, indicativos de depositación subácuea y de baja energía en la parte más profunda, y si bien el origen del lago se ha asignado a condiciones húmedas de la región (Maza *et al.*, 2011), se concluye que grandes caudales no hubiesen permitido la formación del cuerpo lacustre, generándose la rotura del dique en forma inmediata e impidiendo la formación de los depósitos. Por el contrario, deben haber imperado condiciones de baja precipitación, produciendo esa situación la obstrucción del río por caída de roca y otros procesos gravitacionales y fluviales, ya que se observan cicatrices de deslizamientos y crestas transversales sobre la margen derecha, propiciando la generación del mismo. En este sentido, y en coincidencia con el comienzo de la depositación sedimentaria, a los 4.2 ka se distingue el inicio de un evento árido a nivel global definido como Meghalayan Stage debido a un debilitamiento del monzón en la India y sudeste asiático, iniciándose una reorganización significativa de los sistemas oceánicos y atmosféricos (Paasche *et al.*, 2004; Paasche y Bakke, 2009). Para el mismo periodo en que se produce la rotura del dique propiciado por un aumento de las precipitaciones y con ello la finalización de la sedimentación en el lago, en la depresión del Zonda (San Juan) han sido identificadas facies lacustres con edades de 2.7 ka (Suvires y Gamboa, 2011); en Tucumán, el desarrollo de vegetación de mayor humedad también se observa alrededor de los 2000–2500 años A.P. (Garralla, 2003; Sayago, 1999) a partir de estudios geomorfológicos y estratigráficos indica que el clima Pre-puneño en el noroeste argentino fue húmedo y moderadamente cálido a partir de los 2500 años A.P., y para el norte de Chile, a partir de los 2500 años A.P., también se describen condiciones más húmedas (Graf, 1992). Por estas razones, se interpreta que la Fm. Corral Amarillo corresponde a una etapa de bajas precipitaciones, representando un periodo más seco que el actual.

En las zonas desprovistas de vegetación, en donde la roca queda expuesta y mayormente asociada al DMNF, distinguen evidencias de procesos gravitacionales que involucran toda la ladera, como canchales o caída de detritos, en donde estos procesos si bien tienen un desencadenante referido a la acción de la gravedad, tienen una fuerte componente de procesos periglaciales, destacándose la crioclastia, lo cual le confiere un efecto combinado.

## CONCLUSIONES

En la cuenca del río Amarillo se identificaron y describieron numerosos rasgos morfológicos, evidenciando la actuación de procesos

fluviales, glaciares, periglaciares, lacustres y gravitacionales.

Al ser una cuenca que está restringida al ambiente de montaña, con mayores precipitaciones en verano, y sumado al derretimiento de nieve y hielo en la parte alta, se producen crecidas repentinas de gran intensidad que ocasionan erosión y transporte de materiales hacia las partes distales, favorecidas por la escasa vegetación.

La gran variación topográfica y climática y la tectónica involucrada, están directamente relacionadas con los procesos que tuvieron y tienen lugar en la cuenca del río Amarillo que condicionan los rasgos y procesos geomorfológicos pasados y presentes, determinantes en la evolución del paisaje.

El río Amarillo es sus cabeceras presenta un diseño tipo braided o trenzado, para luego encajonarse en un valle de paredes abruptas y piso rocoso. Las condiciones químicas de las aguas son ácidas, producto de la meteorización de sulfuros aportados por las mineralizaciones en el área del Distrito Minero Nevados del Famatina, que se van atenuando a medida que descienden por la cuenca, ya sea por aportes hídricos de arroyos menores o por la interacción con la roca de caja, lo cual produce la precipitación de minerales metaestable como la jarosita y schwermanita.

En los sectores más elevados de la cuenca, se distinguen morfologías glaciares (morenas, crestas dentadas, circos) que atestiguan el englazamiento de estos sectores en los periodos fríos anteriores. Asimismo, se destacan rasgos periglaciares, en un ambiente de gelifrac-tos producto de la intensa meteorización física. Los glaciares de roca se encuentran con pendientes con orientaciones oeste, por encima de los 4000 m s.n.m. También se identificaron suelos almohadillados vinculados a cauces menores con aguas neutras, que, dadas las condiciones climáticas áridas de la zona, representan excelentes reservorios de agua.

El humedal de altura representa un conjunto de morfologías que indica no solo las condiciones glaciares pasadas, sino también las extremas que en la actualidad tienen existencia, restringidas por las condiciones climáticas, químicas y bioquímicas del agua.

En cuanto a los depósitos lacustres (Fm. Corral Amarillo), se interpreta que su formación estuvo asociada al evento árido a nivel global definido como Meghalayan Stage, con bajas precipitaciones, representando un periodo más seco que el actual. Las condiciones climáticas más húmedas posteriores habrían provocado el cese de sedimentación dado por la ruptura del endicamiento temporario del río Amarillo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Chilecito por el aporte económico, logístico y científico para los trabajos de campo, así como a los revisores por las sugerencias y comentarios, que enriquecieron y mejoraron sustancialmente este trabajo.

## REFERENCIAS

- Alasino, P.H., Dahlquist, J.A., Pankhurst, R.J., Galindo, C., Casquet, C., Rapela, C.W., Larrovere, M., Fanning, C.M., 2012, Early Carboniferous sub- to mid-alkaline magmatism in the Eastern Sierras Pampeanas. NW Argentina: a record of crustal growth by the incorporation of mantle-derived material in an extensional setting: *Gondwana Research*, 22, 992-1008.
- Astini, R.A., 1998, El Ordovícico de la región central del Famatina (provincia de La Rioja, Argentina): aspectos estratigráficos, geológicos y geotectónicos: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53(4), 445-460.
- Barsch, D., 1987, The problem of the ice-cored rock glacier, *en* Giardino, J.R., Shroeder, J.F., Vitek, J.D. (eds.), *Rock Glaciers*: London, Allen & Unwin, 45-53.
- Barsch, D., 1992, Permafrost creep and rockglaciers. *Perma fr. Periglac: Process*, 3, 175-188.

- Bernardelli, C.E., Maza, S.N., Leconte, K.L., Collo, G., Astini, R.A., Donati, E.R., 2021, Acidophilic microorganisms enhancing geochemical dynamics in an acidic drainage system, Amarillo river in La Rioja, Argentina: *Chemosphere*, 263, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128098>
- Bianchi, A.R., Yáñez, C.E., Acuña, L.R., 2005, Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste argentino: Proyecto Riesgo Agropecuario N° 141 INTA-SAGPYA, 41.
- Bodenbender, G., 1916, El Nevado de Famatina: Boletín de la Real Academia Córdoba, 21, 100-182.
- Brunner, F.K., Scheidegger, A.E., 1974, Kinematics of a scree slope: *Revista Italiana di Geofisica*, 23, 89-94.
- Candiani, J.C., Astini, R.A., Dávila, F., Collo, G., Ezpeleta, M., Alasino, P., Dahlquist J., Carrizo R., 2011, Hojas geológicas 2969-18 Famatina y 2969-24 Sañogasta, 1:100000, Boletín 379: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, 163 pp.
- Clark, J.M., 1988, *Advances in Periglacial Geomorphology*: UK, University of Southampton, 69-90.
- Collo, G., Dávila, F.M., Candiani, J.C., Astini, R.A., 2006, Plegamiento transversal a la deformación oclóyica en rocas pre-ordovícicas del Sistema de Famatina: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(1), 112-117.
- Corbat, M.C., Juárez, O., Fucks, E., 2020, Hydrologic and geomorphologic features of the Río del Oro basin, La Rioja province, Argentina: *Journal of South American Earth Sciences*, 104, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102896>
- Corte, A., 1976, Rock glaciers. *Biul. Peryglac*, 26, 175-197.
- Corte, A.E., Buk, E., 1976, Hidrología glacionival del sector oriental de la Cordillera Frontal Cordón del Plata, Memoria Anual 1976: Mendoza, Argentina, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), 63-72.
- Dahlquist, J.A., Alasino, P.H., Eby, G.N., Galindo, C., Casquet, C. 2010, Fault controlled Carboniferous A-type magmatism in the proto-Andean foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): geochemical constraints and petrogenesis: *Lithos*, 115, 65-81.
- Dahlquist, J.A., Pankhurst, R.J., Gaschnig, R.M., Rapela, C.W., Casquet, C., Alasino, P.H., Galindo C., Baldo, E.G., 2013, Hf and Nd isotopes in Early Ordovician to Early Carboniferous granites as monitors of crustal growth in the Proto-Andean margin of Gondwana: *Gondwana Research*, 23, 1617-1630.
- Dávila, F.M., 2003, Transecta Estratigráfica-Estructural a los 28°30'-28°45' de Latitud sur, sierra de Famatina, Provincia de La Rioja Argentina: Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba, tesis doctoral, inédita, 516 pp.
- Dávila, F.M., Astini, R.A., 2003, Las eolianitas de la sierra de Famatina (Argentina): Interacción paleoclima-tectónica en el antepais fragmentado andino central durante el Mioceno Medio?: *Revista Geológica de Chile*, 30(2), 187-204.
- Dávila, F.M., Astini, R.A., 2007, Cenozoic provenance history of synorogenic conglomerates in western Argentina (Famatina Belt): Implications for Central Andean foreland development: *Geological Society of America Bulletin*, 119 (5/6), 609-622.
- De Alba, E., 1979, Descripción geológica de la Hoja 16d, Chilecito, Provincia de La Rioja: Servicio Geológico Nacional, Boletín 163, 91 pp.
- Fauqué, L., Caminos R., 2006, Hoja geológica 2969-II, Tinogasta, Provincias de La Rioja, Catamarca y San Juan: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minera Argentino, Boletín 276, 139 pp.
- Fidalgo, F., 1968, Descripción geológica de la Hoja 17d, Catinzaco, provincia de La Rioja: Dirección Nacional de Geología y Minería (inédito), 45 pp.
- French, H.M., 1996, *The Periglacial Environment*: Essex, Longman, 341 pp.
- French, H.M., 2007, *The Periglacial Environment*: West Sussex, England, J. Wiley & Sons, 458 pp.
- Fucks, E., Schnack, A., Scalise, E., Gallardo G., Cajal J., 2014, Aspectos Geomorfológicos Del Valle De Antinaco-Los Colorados, Sierras Pampeanas y Sierra De Famatina, Provincia de La Rioja, en XIX Congreso Geológico Argentino, Geología del Cuaternario, Geomorfología y Cambio Climático: Córdoba, Argentina, Asociación Geológica Argentina, S13-18.
- Fucks, E., Corbat, M.C., Juárez, O., 2018, Geomorphological features and processes in the Sierra de Famatina, La Rioja: *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 160-167.
- Garleff, K., Stingl, H., 1996, Desarrollo del relieve durante el Cuaternario tardío en la región subtropical árida/semiárida de la alta cordillera Argentina. El Ejemplo de la Sierra de Famatina en Aceñolaza, F.G., Miller, H., Toselli, A. (eds.), *Geología del Sistema de Famatina: Münchner Geologische Hefte*, vol. 19 (Reihe A), 403-410.
- Garralla, S. 2002, Análisis Polínico de una secuencia sedimentaria del Holoceno tardío en el Abra del Infiernillo, Tucumán, Argentina: *Polen*, 12, 1-11.
- Garralla, S., 2003, Análisis Polínico de una Secuencia Sedimentaria del Holoceno Tardío en el Abra del Infiernillo, Tucumán, Argentina: *Pole*, 11, 53-63.
- Giardino, J., Shroeder Jr.J., Vitek, L., 1987, *Rock Glaciers*: Winchester, Mass. EE.UU., Allen and Unwin, 355 pp.
- Graf, K., 1992, *Pollendia grammeaus den Anden: Eine Synthesezur Klimageschichte und Vegetation sentwicklungseit der letzten Eiszeit: Physische Geographie*, 34.
- Gutiérrez Elorza, M., 2001, *Geomorfología Climática*: Barcelona, España, Ediciones Omega, S.A., 641 pp.
- Hadad M.G., Palmisano T., 2017, Cuando las territorialidades se superponen: producciones tradicionales, agronegocios y proyectos mineros en el Valle de Famatina (La Rioja, Argentina): *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad*, 3(10), 5-24.
- Harrington, H.J., Leanza, A.F., 1957, Ordovician trilobites of Argentina: Kansas, USA, University of Kansas, Special Publication, 259 pp.
- IANIGLA (Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales), 2017, Inventario Nacional de Glaciares, Informe de la cuenca Varias de Velasco, provincia de La Rioja – Nivel 1: La Rioja, Argentina, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 40 pp.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo, Argentina), 2010, Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, Instituto Nacional de Estadística y Censo, Argentina, disponible en: <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>, consultado el 24-11-2021.
- Iriondo, M., García, N., 1993, Climatic variations in the Argentine plains during the last 18,000 years: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 101, 209-220.
- Jordan, T.E., Isack, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., Ando, J.A., 1983, Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate: *Geological Society of America Bulletin*, 94, 341-361.
- Juárez, O., 2015, Mecanismos de transformación superficial en minerales de hierro en cementos conglomerádicos asociados a drenaje ácido natural (Famatina, La Rioja): Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba, tesis de licenciatura en Geología, inédito, 66 pp.
- Juárez, O., Maza, S., Collo, G., 2014, Caracterización de cementos en conglomerados de la Fm Cueva de Pérez: factores condicionantes en los procesos de transformación de goethita a hematita, en Simposio de Geología del Cuaternario, Geomorfología y Cambio Climático (S-13-47): Córdoba, Actas del XIX Congreso Geológico Argentino, Asociación Geológica Argentina, 1161-1162.
- Leconte, K.L., Maza, S.N., Collo, G., Sarmiento, A.M., Depetris, P.J., 2016, Geochemical dynamics of an acid drainage system: the case of the Amarillo River, Famatina (La Rioja, Argentina): *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 1630-1647, <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7940-2>
- Limarino, C.O., Morelli, J.R., Gaidano, D., 1994, Sedimentología y origen del yacimiento Corral Amarillo (Cuaternario), Sistema del Famatina, Provincia de La Rioja: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49(1-2), 143-153.
- Losada-Calderón, A.J., McBride, S.L., Bloom, M.S., 1994, The geology and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of magmatic activity and related mineralization in the Nevados del Famatina mining district, La Rioja province, Argentina: *Journal of South American Earth Sciences*, 7 (1), 9-24.
- Losinski, W., 1912, Die periglaziale fazies der mechanischen Verwitterung. *Comptes Rendus, en XI Congrès Internationale Géologie*: Estocolmo, Suecia, 1910, Norstedt & Söner, 1039-1053.
- Marcos, O.R., Zanettini, J.C., 1982, Geología y exploración del Proyecto Nevados del Famatina: Provincia de La Rioja, Argentina, Servicio Geológico, Secretaría de Minería de la Nación, Informe Inédito, 325 pp.
- Martina, F., Dávila, F.M., Petrinovic, I.A., Astini, R.A., 2003, Sedimentary features and paleoenvironments of the Late Miocene volcanic setting in the Famatina Ranges, Central Andes, en Third Latin-American Congress of Sedimentology: Belém, Brasil, Universidad Federal de Pará, 127-128.
- Maza, S.N., 2015, Estudio de unidades asociadas a paleo-drenaje ácido en la región central de Famatina y su comparación con el actual drenaje ácido de minas: Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba, tesis



- doctoral inédita, 205 págs.
- Maza, S.N., Leconte, K.L., Collo, G., 2011, Atenuación natural en un sistema con drenaje ácido asociado a la mina La Mejicana, Famatina, La Rioja, San Salvador de Jujuy, en XVIII Congreso Geológico Argentino, Actas: Neuquén, Argentina, Asociación Geológica Argentina, 1398-1399.
- Maza, S.N., Collo, G., Astini, R.A., Nieto, F., Nieto, J.M., 2014, Holocene ochraceous lacustrine sediments within the Famatina Belt, NW Argentina: A natural case for fossil damming of an acid drainage system: *Journal of South American Earth Sciences*, 52, 149-165.
- Miguel, R.E., Brizuela, A., 2019, Informe de Caudales del Valle Antinaco-Los Colorados Convenio de Cooperación Técnica INTA - Coop. La Riojana 26813. Informe N° 9 – septiembre de 2019, Informe Técnico, 13 de septiembre de 2019, 1 pp.
- Miguel, R.E., Brizuela, A., 2020, Informe de Caudales del Valle Antinaco-Los Colorados Convenio de Cooperación Técnica INTA - Coop. La Riojana 26.813. Informe N° 14 – febrero de 2020: Informe Técnico, 20 de febrero de 2020. 1 pp.
- Montilla, P.J., Gareis, M.C., Bárbaro, N.O., Ferraro, R.F., 2016, Importancia del diagnóstico en la caracterización socio-ecológica de las cuencas del Río Amarillo y Los Sarmientos, La Rioja (Argentina), en ESPACIO Y DESARROLLO REGIONAL. Geografías en diálogo, aportes para la reflexión. IV Jornadas Nacionales de Investigación en Geografía Argentina. X Jornadas de Investigación y Extensión del Centro de Investigaciones Geográficas, Tandil: Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 775-782.
- Montilla, P., Gareis, C., Juárez, O., 2018, Elementos para el análisis de la sostenibilidad, a nivel de cuenca, de una fracción menor de territorio: DOSSIER - Experiencias, instrumentos y métodos en el proceso de planificación, 23, 12, 27-47.
- Mpodozis, C., Ramos, V.A., 1989, The Andes of Chile and Argentina, en Ericksen, G.E.; Cañas, M.T.; Reinemund, J. (eds.), *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series*, 11, 59-90.
- Paasche, Ø., Løvlie, R., Dahl, S.O., Bakke, J., Nesje, A., 2004, Bacterial magnetite in lake sediments: late glacial to Holocene climate and sedimentary changes in northern Norway: *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 319-333.
- Paasche, Ø., Bakke, J., 2009, The Holocene Turnover – a global climate shift at ~4 ka, en *Proceedings of the EGU General Assembly 2009 (Geophysical Research Abstracts)*: Vienna, Apr. 19-24, European Geophysical Union, 11, EGU2009-14017.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Saavedra, J., Baldo, E., Dahlquist, J.A., Pascua, I., Fanning, C.M., 1998, The Famatinian magmatic arc in the central Sierras Pampeanas: an Early to Mid-Ordovician continental arc on the Gondwana margin, en Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., (eds.) *The ProtoAndean margin of Gondwana: Geological Society of London, Special Publications*, 142, 343-367.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification: *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Piovano, E.L., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M., Sylvestre, F., 2009, Hydrological Variability in South America Below the Tropic of Capricorn (Pampas and Patagonia, Argentina) During the Last 13.0 Ka, en Vimeux F., Sylvestre F., Khodri M. (eds) *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions: Paleoenvironmental Research*, 14, [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_14)
- Pozo, I., 2019, Aislamiento e identificación de microorganismos extremófilos de La Sierra de Famatina, provincia de La Rioja, para su aprovechamiento en biolixiviación: Chilecito, Universidad Nacional de Chilecito, tesis de grado de Licenciatura en Ciencias Biológicas, inédito, 35 pp.
- Rapela, C.W., Pankhurst R. J., Baldo, Casquet, C., Galindo, C., Fanning, C. M., Saavedra, J., 2001, Ordovician metamorphism in the Sierras Pampeanas: New U-Pb shrimp ages in central east Valle Fértil and the Velasco batholith, en *Third South American Symposium on Isotope Geology (III SSAGI)*:Pucón, Chile, Artículo 616, 1-4, en CD-ROM.
- Sayago, J.M., 1999, El Cuaternario de la Región Pre-Puneña del Noroeste Argentino, en Caminos, R., (ed.) *Geología Argentina: Buenos Aires, Argentina, Servicio Geológico Minero Argentino*, 688-690.
- Schunke, E., Zoltai, S.C., 1988, Earth hummocks (thufur), en Clark, M.J. (ed.), *Advances in Periglacial: Geomorphology*, 23, 1-245.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1958, *Estadísticas climatológicas 1941-1950*, Buenos Aires, Argentina, 161 pp.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1965, *Estadísticas climatológicas 1951-1960*, Buenos Aires, Argentina, 155 pp.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), 1985, *Estadística climatológica 1961-1970*, Buenos Aires, Argentina, 188 pp.
- Suvires, G.M., Gamboa, L.A., 2011, Primeras dataciones del lago holoceno tardío de Zonda, San Juan: *Revista Asociación Geológica Argentina*, 68(2), 290-294.
- Tapia Baldis, C., Trombotto Liaudat, D., 2020, Permafrost model in coarse-blocky deposits for the dry Andes, Argentina (28°-33° S): *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(1), 33-58.
- Trombotto Liaudat, D., 2008, Geocryology of southern south America, en Rabassa, J. (ed.), *Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego: Developments in Quaternary Sciences*, 11, 255-268.
- Turner, J.C., 1960, Estratigrafía del tramo medio de la sierra de Famatina y Adyacencias. La Rioja: *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias*, 42 (1), 77-126.
- Turner, J.C., 1962, Estratigrafía del tramo medio de la sierra de Velasco y región oeste (La Rioja): *Boletín Academia Nacional de Ciencias Córdoba*, 42, 77-126.
- Turner, J.C., 1971, Descripción geológica de la Hoja 15d, Famatina. Provincia de La Rioja: *Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín* 126, 106 pp.
- Umerez, J.A., Wainstein, P.A., Arenson, L.U., 2015, Los glaciares de escombros (o rocosos) no son un caso especial de glaciares, en XIV Congreso Geológico Chileno "Geología para el Siglo XXI": La Serena, Chile, ACTAS, 4 pp.
- Vaca, A., Orche, E., Vaca, M., 2016, Cable aéreo, Chilecito – La Mejicana: venas de acero en las entrañas del Famatina: Chilecito, La Rioja, Argentina, Editorial Galeón, 112 pp.
- Van Everdingen, R.O., (ed.), 2005, Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms, in Chinese, English, French, German, Icelandic, Italian, Norwegian, Polish, Romanian, Russian, Spanish, and Swedish: Calgary, Alberta, Canada, International Permafrost Association, Terminology Working Group, 159 pp.
- Washburn, A.L., 1979, *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*: London Edward Arnold, 117(5), 406 pp.
- Zárate, M.A., 2003, Loess of southern south America: *Quaternary Science Reviews*, 22(18-19), 1987-2006.
- Zárate, M.A., Tripaldi, A., 2012, The aeolian system of central Argentina: *Aeolian Research*, 3(4), 401-417.

Manuscrito recibido: mayo 31, 2021

Manuscrito corregido recibido: febrero 11, 2022

Manuscrito aceptado: marzo 1, 2022