



# Procesos de remoción en masa asociados a cuencas como base para la selección de alternativas de un camino de montaña. Caso de estudio: Ruta 150, Cuesta del Viento – Pachimoco, Argentina

Carla GINESTA TORCIVIA<sup>1</sup>, Raúl Emmanuel OCAÑA<sup>1,2</sup>, Natalia RIOS<sup>1</sup>, María Yanina ESPER ANGILLIERI<sup>1,3</sup>, Oscar Mario FERNÁNDEZ<sup>3</sup>, Carlos GONZÁLEZ ALLADIO<sup>3</sup>, Miguel PEREYRA<sup>3</sup> y Eugenia RUIZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CIGEOBIO. UNSJ-CONICET. Centro de Investigaciones de la Geosfera y la Biosfera, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de San Juan.

<sup>2</sup>Gabinete de Geología Ambiental (INGEO). Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.

<sup>3</sup>EICAM-UNSJ. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña. Facultad de Ingeniería.

Email: ginestageo@gmail.com

**Editor:** Francisco Córdoba

Recibido: 20 de noviembre de 2020

Aceptado: 10 de marzo de 2021

## RESUMEN

Los procesos de remoción en masa de origen climático, principalmente flujos, son los más frecuentes en el mundo. En el presente trabajo se analizan diversas características morfométricas de cuencas, se calculan los caudales máximos teóricos y se realiza un inventario de procesos de remoción en masa (Flujos de detritos/hiperconcentrados), con el objeto de evaluar su ocurrencia como base para la selección de alternativas para la construcción de un camino de montaña. El área seleccionada para este estudio corresponde a un sector precordillerano de la ruta N° 150 en su tramo Cuesta del Viento – Pachimoco, en el norte de la Provincia de San Juan. Los resultados indican que la ocurrencia de estos procesos, está determinada principalmente por las fuertes pendientes y por una alta torrencialidad, que ante la presencia de lluvias excepcionales, convierte al área citada en una zona potencialmente peligrosa con posibilidades de altos niveles de destrucción. Finalmente, el número de rugosidad de Melton es clave para discriminar cuencas susceptibles a la ocurrencia de diferentes tipos de flujos.

**Palabras clave:** flujos; cuencas; rutas; San Juan.

## ABSTRACT

*Landslides and basin analysis as basis for the alternatives trace selection of a mountain road. Case study: 150 route, Cuesta del Viento-Pachimoco. San Juan, Argentina.*

Landslides of climatic origin, mainly flows, are the most frequent processes in the world. In this work, some basin morphometric analysis, theoretical maximum peak discharge is calculated and an inventory of landslides (debris flow/ flood or hyperconcentrated) is carried out, in order to evaluate landslides occurrence for the selection of alternative trace of a mountain road. The chosen area includes a stretch of National Road No. 150 on a PreAndes sector between Cuesta del Viento – Pachimoco. The results show that the occurrence of these processes is mainly determined by the steep slopes and heavy seasonal rains and turns it into a potentially hazardous area with possibilities of high levels of destruction. Finally, the Melton ratio number has been a key morphometric index to

discriminate river basins susceptible to the occurrence of different types of flows.

**Keywords:** flows; basin; route; San Juan

## INTRODUCCIÓN

La infraestructura de transporte vial tiene un rol imprescindible en el funcionamiento de la sociedad. Los procesos de remoción en masa (PRM) afectan negativamente al flujo vehicular de las redes de transporte en todo el mundo, destruyendo y/o bloqueando rutas.

Según Costa (1988), los flujos que ocurren en pequeñas y escarpadas cuencas pueden ser divididos en flujos de corriente (*stream flow*), flujos hiperconcentrados (*debris flood o hyperconcentrated flows*) y flujos de detritos (*debris flows*). Particularmente un flujo de agua es un flujo cuya concentración media de volumen de sólidos es menor al 20 %, un flujo hiperconcentrado es aquél cuya concentración media de volumen de sólidos es entre el 20 al 60 %, mientras que un flujo de detrito es aquel cuya concentración media de volumen de sólidos es mayor al 60 % en volumen (Costa 1988, Hungr et al. 2014).

Las regiones caracterizadas por topografía abrupta son extremadamente susceptibles a la ocurrencia de PRM, y por lo general, en las zonas áridas con escasa vegetación, predominan los flujos de detritos y los hiperconcentrados, entre los PRM. Un flujo de detritos (*debris flow*) es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados (velocidades del orden de los 0.05 a 5m/s), de comportamiento no plástico, en un canal de gran pendiente (Hungr et al. 2001), ocurre periódicamente y posee un recorrido ya establecido (por lo general encauzado en quebradas y en cursos de primer y segundo orden) (Hungr et al. 2014).

Una vez iniciados, los flujos hiperconcentrados pueden seguir en movimiento en canales de relativa baja pendiente (10°) que la que necesitan los flujos de detritos, por lo tanto son frecuentes en cuencas de mayor superficie (Hungr et al. 2001).

Un aluvión o avenida rápida (*flash flood*) es un flujo particular de agua extremadamente veloz, cargado de detritos, que se corresponden con grandes episodios de descargas hidráulicas, consecuencia de precipitaciones extraordinarias (Hungr et al. 2014), y que según su comportamiento y concentración final de detritos puede ser clasificado dentro de los distintos tipos de flujos descritos anteriormente.

Aunque cada tipo de flujo posee características únicas que lo distinguen de los demás, es común que un tipo de

flujo evolucione a otro, según va adquiriendo o depositando el material transportado a lo largo de su recorrido (Hungr et al. 2014).

El área de estudio, un tramo precordillerano de la ruta N° 150, se caracteriza por registrar precipitaciones intensas de corta duración que actúan como desencadenantes de importantes flujos, que afectan la infraestructura de transporte. En los últimos 10 años, en el tramo de ruta analizado, se registraron numerosos PRM de gran magnitud, que ocasionaron cuantiosos daños, lamentablemente estos eventos raramente son registrados y documentados.

Entre los estudios de cuencas vinculados a la ocurrencia de flujos, pueden mencionarse los de (Esper Angillieri 2007, 2008, 2012, 2020, Esper Angillieri y Perucca, 2014a,b, Esper Angillieri y Fernandez, 2017, Esper Angillieri et al. 2016, 2017, 2020, Perucca y Esper Angillieri 2011).

Para el presente trabajo se propone el análisis morfométrico de cuencas, el cálculo de caudales máximos teóricos y un inventario de flujos de detritos/hiperconcentrados. El objetivo es evaluar su ocurrencia como base para la selección de alternativas de un camino de montaña. Los resultados obtenidos serán de gran utilidad en el campo de las ciencias aplicadas, aportando parámetros que permitan a través de organismos públicos y privados, prevenir y/o mitigar los efectos que estos procesos ocasionan sobre las construcciones civiles presentes y futuras. Además, asumen el rango de relevantes y prioritarios, debido a que el tramo de ruta considerado es el principal acceso al futuro túnel Internacional de Agua Negra (frontera Argentina - Chile).

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la porción centro norte de la provincia de San Juan, departamentos Jáchal e Iglesia, aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad capital de San Juan y comprende un sector de la Ruta Nacional N°150 en su tramo Pachimoco - Cuesta del Viento, dentro del ámbito de Precordillera Occidental y Central (Fig. 1). La Ruta Nacional N°150 es el eslabón limítrofe en la Argentina del "corredor bioceánico central" que une el océano Atlántico (Porto Alegre) con el Pacífico (Coquimbo), hecho que obliga a prever, en todo su recorrido, las mejoras técnicas que fueren necesari-

rias para que sus características satisfagan las demandas del futuro tránsito internacional. Este tránsito comercial, de largo recorrido, se hará presente a partir de la finalización del futuro Túnel Internacional de Agua Negra. El tránsito estimado (2018-2019) para este tramo de la ruta N° 150 es de 1000 a 4000 vehículos por día (SIG vial 2020).

### Clima

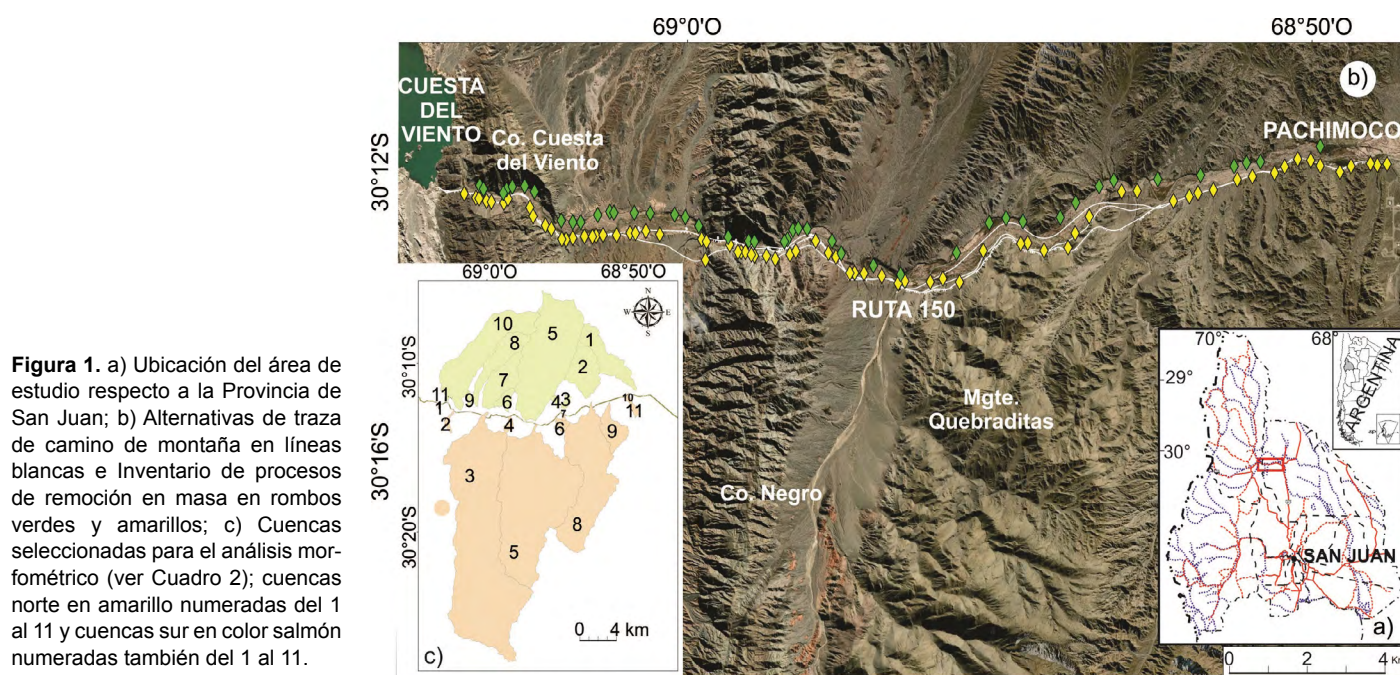
En el sector seleccionado, el clima es árido tipo desértico, entre los meses de enero y febrero las precipitaciones son de corta duración, pero de carácter torrencial, siendo las responsables de la generación de importantes y veloces flujos con gran capacidad de carga. Los datos estadísticos, de la estación hidrometeorológica Jáchal (30°18'S - 68°45'O), indican una precipitación media anual de 49.19 mm entre los años 1989 y 2018. Los valores máximos de precipitación se registran en Diciembre, Enero y Febrero, mientras los mínimos en Julio y Agosto. Las temperaturas medias oscilan entre los 28°C en enero y los 8°C en julio. Las temperaturas máximas, en la época estival, superan los 36°C alcanzando incluso los 44°C y las mínimas invernales se hallan por debajo de los -9°C. Mientras que el valle de Rodeo – Iglesia, según la estación hidrometeorológica Rodeo (30°11'S - 69°13'O) la precipitación media anual es de 46.86 mm entre los años 1952 y 1994, los veranos son moderados, condicionados por la altitud, e inviernos fríos acompañados de nevadas poco frecuentes. La temperatura mínima absoluta registrada fue de -14 °C y la máxima absoluta 36 °C, verificando mínimas por debajo de 0 °C de Marzo a Noviembre.

### Geografía

En el sector de estudio, el relieve es montañoso y abrupto, producto de los movimientos tectónicos que expusieron los afloramientos sobre la superficie y el accionar constante de la erosión, principalmente fluvial. Las elevaciones principales son el Cerro Cuesta del Viento (1945 m s.n.m.), Cerro Negro (2425 m s.n.m.) y Mogotes Quebraditas (2228 m s.n.m.).

El drenaje principal lo constituye el río Jáchal, que nace de la unión del río Blanco y el arroyo Iglesia, con un caudal medio de 9 m3/s, a la altura del dique Cuesta del Viento. Le siguen en importancia una serie de arroyos tributarios y quebradas que nacen de las sierras precordilleranas, con orientaciones predominantes sursuroeste-noreste, que en algunos casos siguen líneas de fracturas. Son cauces en su mayoría efímeros que drenan hacia el colector común, el río Jáchal.

Estos cauces aluviales experimentan incrementos episódicos de caudales en el curso de la estación veraniega vinculados al desarrollo de veranos húmedos en el centro-oeste argentino, debido al debilitamiento de la actividad del Anticiclón del Pacífico Sur y un fortalecimiento del Anticiclón del Atlántico Sur. Esto es debido al gradiente de presión e ingreso de humedad desde latitudes bajas y/o desde el Atlántico Sur (Agosta y Compagnucci 2006). Por otro lado, en el centro-oeste argentino, los Andes tienen una elevación media aproximada de 4000 m s.n.m., comportándose como una barrera frente a la de humedad que proviene del Pacífico Sur (Compagnucci et al. 2002). Estas condiciones climáticas favorecen los incrementos episódicos de caudales en los ríos durante la estación estival, producto de la humedad que llega



**Figura 1.** a) Ubicación del área de estudio respecto a la Provincia de San Juan; b) Alternativas de traza de camino de montaña en líneas blancas e Inventario de procesos de remoción en masa en rombos verdes y amarillos; c) Cuencas seleccionadas para el análisis morfométrico (ver Cuadro 2); cuencas norte en amarillo numeradas del 1 al 11 y cuencas sur en color salmón numeradas también del 1 al 11.

desde el Océano Atlántico Tropical-subtropical, transportada por los "Low Level Jets" desde el Amazonas hacia el centro de Argentina (Garreaud et al. 2009) y es la responsable de las precipitaciones.

Debido a la naturaleza de los terrenos y a las pendientes pronunciada, escurren rápidamente hacia los colectores en forma de flujos de detritos/hiperconcentrados que causan enormes perjuicios en la infraestructura vial e hidráulica.

## Geología y Geomorfología

El área donde se emplaza la Ruta Nacional N° 150 (tramo Pachimoco, Jáchal – Cuesta del Viento, Iglesia) pertenece al ámbito de la provincia geológica Precordillera (Bodenbender 1902). El tramo de ruta considerado atraviesa perpendicularmente a la Precordillera Central y Occidental, que desde el punto de vista estructural está representada por una faja plegada y corrida epidérmica de vergencia oriental (Braccini 1946, Roller 1969). Este sector está en el segmento de subducción subhorizontal (28°-32°S) de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana, característica que determina la migración del frente orogénico hacia el este, la ausencia de volcanismo, la intensa sismicidad de intraplaca y la notable actividad neotectónica ubicada principalmente en el frente orogénico (Ramos et al. 1986).

La Precordillera Central se corresponde con los depósitos de la plataforma calcárea ordovícica. Con excepción de algunos depósitos calcáreos cámbricos en la primera lámina oriental, la base de los corrimientos que caracterizan al sector central está formada por rocas carbonáticas de plataforma de edad ordovícica temprana. Delgados depósitos mayormente pelíticos del Silúrico y areniscas eodevónicas de ambiente marino somero se apoyan en este sector en discordancia sobre las unidades anteriores. Depósitos marinos turbidíticos correspondientes a la cuenca de antepaís del Devónico desarrollan un frente deltaico que progresa desde el este al oeste. En aparente concordancia se apoyan las sedimentitas neopaleozoicas correspondientes a depósitos continentales y marinos someros (Ramos 1999).

En el sector occidental de la Precordillera, las facies de plataforma están ausentes y son reemplazadas por facies clásticas de talud ordovícicas que contienen importantes olistolitos calcáreos procedentes de la plataforma con fósiles del Cámbrico medio a Ordovícico inferior. Las sedimentitas ordovícicas se intercalan con basaltos de naturaleza oceánica con típicas lavas en almohadilla en el sector norte y central y están interpuestas tectónicamente en el sector sur con una secuencia ofiolítica desmembrada con tectónitas basales ultrabásicas, gabros estratificados, piroxenitas, diques en diques

y lavas basálticas almohadilladas (Davis et al. 1995, Haller y Ramos 1984). Los depósitos neopaleozoicos se asientan en marcada discordancia angular sobre los eopaleozoicos. Están constituidos por facies marinas dominantes, en las que se registran frecuentemente depósitos glaciarios de edad carbonífera. Extensos conglomerados de edad pérmica constituyen los depósitos neopaleozoicos más jóvenes (Ramos 1999). Los depósitos cuaternarios más abundantes, están relacionados a ciclos aluviales constituidos por aglomerados, fanglomerados y conglomerados no consolidados de abanicos aluviales recientes producto de la redepositación de los sedimentos anteriores. Depósitos inconsolidados y de diferentes granulometrías rellenan los valles y las zonas interserranas, acarreados por el agua y el viento (Cardó et al. 2005).

Geomorfológicamente el área de estudio es el resultado de diversos procesos deposicionales y de estructuras compresivas pre-cenozoicas (von Gosen 1997), que ocasionan el ascenso relativo de las serranías de la región, que tienen una disposición submeridional, pertenecientes a Precordillera Central (en mayor proporción) y Occidental. Sin embargo, su modelado actual está vinculado, además, a diversos procesos geomorfológicos originados durante el Cenozoico. Las acciones fluviales, aluviales y eólicas producidas en general en condiciones de clima desértico, con grandes variaciones térmicas diarias y estacionales, son responsables del modelado de la fisonomía.

La geomorfología ha sido clasificada y descrita en grandes unidades: montañosa, lomadas, transición y planicie (Fig. 2). La unidad montañosa corresponde a relieves abruptos de alta pendiente, con perfil asimétrico y elevados por fallas inversas en sus flancos occidentales (Mardonez et al. 2020). Está representada principalmente por los cerros Cuesta del Viento y Divisadero, sierras de la Tranca, Caracol y Mogotes Quebraditas, entre otros. Las unidades del oeste son las que tienen mayor pendiente y rugosidad, en especial, los flancos orientales. La altura más elevada dentro de la cuenca de estudio, es de 3461 m s.n.m. y corresponde al sector norte de la sierra Caracol. El 55.3 % de las cuencas está ocupada por esta unidad, en donde el 15.3 % se ubica en las cuencas al norte del río Jáchal y 40 % en aquellas ubicadas hacia el sur. La unidad de lomadas corresponde a relieve de menor prominencia respecto a la unidad montañosa. La altura más alta es de 2870 m s.n.m. en el sector sur (cerro Cortadera) y la menor altura (1270 m s.n.m.) corresponde a lomas ubicadas al este, en las proximidades del río Jáchal. Esta unidad en algunos sectores está integrada principalmente por rocas neógenas y/o paleógenas, que presentan alta disección por erosión hídrica, aunque en ocasiones, pueden presentar una cubierta



cuaternaria que le otorga protección frente a la erosión.

La unidad de lomadas ocupa el 16.2 % del área total de las cuencas, correspondiendo el 6.9 % de la superficie a las cuencas al norte del río Jáchal y el 9.3 % de las cuencas del sector sur.

La unidad de transición se caracteriza por aquellas áreas que se encuentran entre las unidades montañosas y de planicie del río Jáchal. Las principales alturas máximas detectadas corresponden a las cabeceras de las cuencas australes de los valles de la Tranca (2770 m s.n.m.) y Caracol (2400 m s.n.m.). Respecto a las cuencas septentrionales, la altura

más alta corresponde al valle del Divisadero (2350 m s.n.m.). Por otro lado, la altura mínima es de 1270 m s.n.m. Esta unidad ocupa el 26.8 % del área total de las cuencas, con un 11.7 % de la superficie ubicada al norte del río Jáchal y 15.1 % correspondiente al sector sur.

Sobre la unidad de transición se encuentran geoformas de acumulación y/o erosión tales como: abanicos aluviales antiguos; sobreelevados, con alta disección por erosión fluvial, planizados en superficie y pavimentos bien desarrollados con barniz del desierto; abanicos aluviales modernos con disposición topográfica de menor elevación respecto a la red de

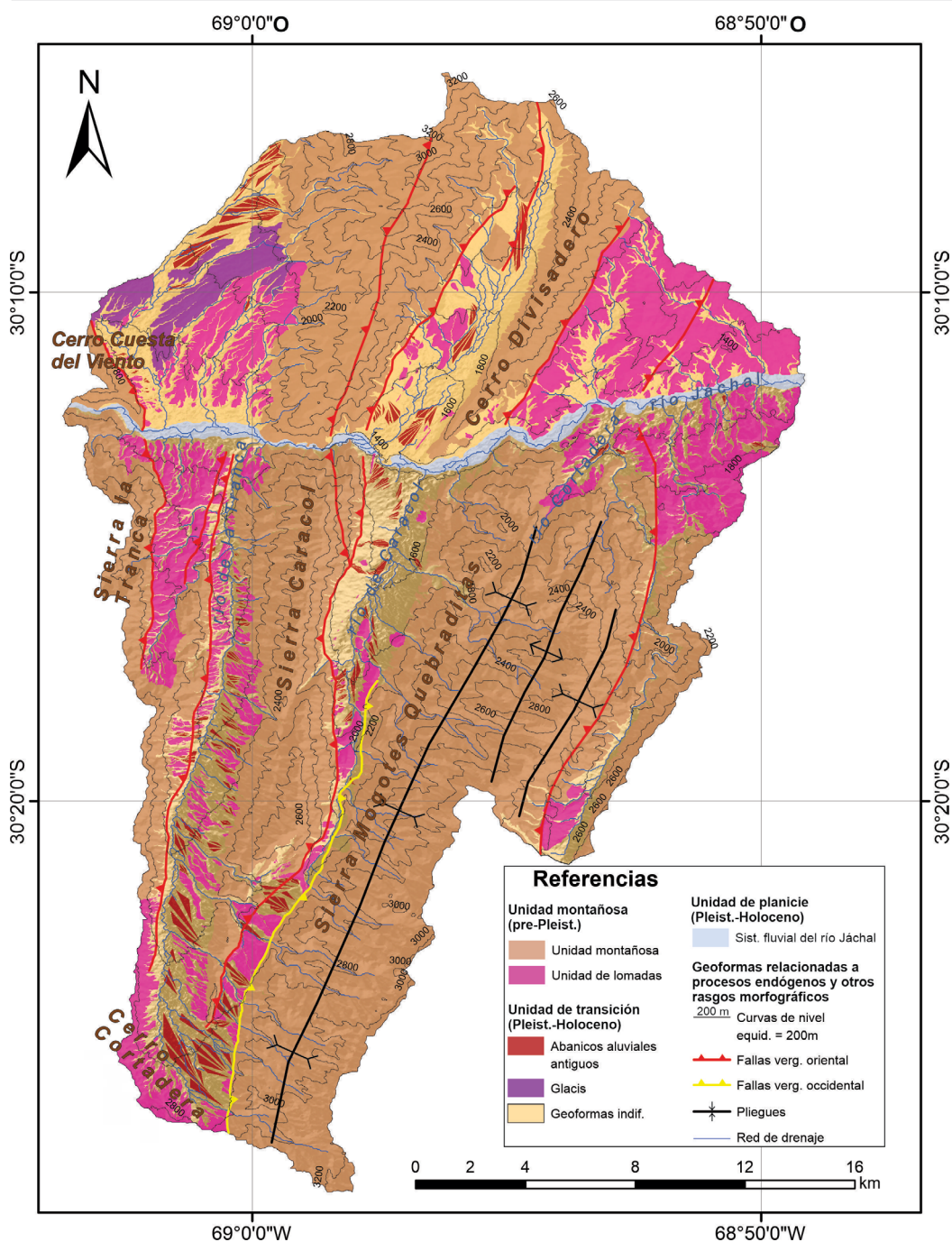


Figura 2. Mapa geomorfológico regional.

drenaje, débil desarrollo de pavimento y barniz; abanicos coluviales, que son de menor dimensión y mayor pendiente que los abanicos aluviales y son generados a partir de pequeños cauces; taludes generalmente son de alta pendiente y generalmente están adosados al frente montañoso. Sin considerar los abanicos antiguos, las demás geoformas pedemontanas no han sido discriminadas y se representan en la Fig. 2 como geoformas indiferenciadas. Por último, las geoformas de glacia, generalmente cubiertos por una capa que en ocasiones puede ser de varios metros de espesor de rodados cuaternarios, con la superficie planizada, inclinada suavemente hacia los valles.

Producto de la abundancia de material detrítico resultante de la meteorización de las rocas aflorantes, son frecuentes las pendientes verticales a subverticales donde domina la caída de rocas tanto de pequeños clastos como bloques de varios metros de diámetro.

Los flujos rápidos, en especial los hiperconcentrados y los de detritos constituyen uno de los procesos de remoción en masa más ampliamente distribuidos en la región, rellenando valles y quebradas y en la superficie de los abanicos aluviales. En general son depósitos de pocos metros de espesor, matriz sostén y mal seleccionados, predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques).

Dentro del área comprendida en este estudio, el sistema fluvial del río Jáchal ocupa el 1,7% del área total y las alturas máximas y mínimas son de 1485 y 1260 m s.n.m. respectivamente. La planicie aluvial del río Jáchal corresponde a extensiones de depósitos de gravas, arenas y materiales más finos, en general asociados a la red de drenaje actual y en su mayor parte depositados durante las épocas de crecientes. Son frecuentes las terrazas fluviales, que se presentan como superficies planas a ligeramente inclinadas y elongadas paralelamente a los cauces fluviales, compuestas por material limo arenoso a conglomerádicos y arenas finas a medianas, de poco espesor. Los niveles limoarcillosos son lenticulares y poco extendidos. Los ríos en la región precordillerana tienen valles en V, que hacia el oeste pierden su forma haciéndose más amplios con una mayor cantidad de sedimentos que tapizan sus quebradas. Estos ríos actualmente no poseen el caudal necesario para formar los abanicos aluviales extensos.

## METODOLOGÍA

La delimitación de las cuencas (Fig. 1c) se realizó automáticamente en ambiente SIG utilizando los algoritmos de dirección del flujo y acumulación de flujo con la ayuda de modelos

digitales de elevación con 30 m de resolución (ASTER GDEM V2-NASA 2011) (Tachikawa et al. 2011). Las direcciones de flujo se calcularon usando el modelo de flujo de dirección ocho (D8), que determina el flujo de cada celda de la cuadrícula a una de sus ocho celdas adyacentes, en la dirección con una pendiente descendente más empinada. El método D8 fue introducido primeramente por O'Callaghan y Mark (1984). La acumulación de flujo, en su forma más simple, es el número de células de ladera que desembocan en cada celda. Este método se basa en la suposición de que el flujo subsuperficial sigue la topografía. Además, su delimitación fue comprobada a partir de la interpretación de imágenes satelitales de alta resolución adquiridas a partir de Google Earth™ (SPOT 5 con 2.5 m de resolución espacial). Para cada una de las cuencas seleccionadas, se analizaron sus parámetros morfométricos (Cuadro 1). Los parámetros obtenidos fueron: área (A), perímetro (P), longitud (L), ancho (W), longitud de cauce principal (Lcp); y parámetros derivados: índice de compacidad (Kc), índice de circularidad (Rc), relación de elongación (Re), factor de forma (Ff). La longitud del cauce principal (Lcp) y la longitud de la cuenca (L), fueron obtenidas según Schumm (1956).

Para el análisis de caudales se utilizaron los antecedentes disponibles de los registros de precipitación máxima diaria anual de la Estación Meteorológica Jáchal N° 87305, entre los años 1967 y 1988, y la Estación Meteorológica Rodeo entre los años 1969 y 1994, y se determinaron los caudales de diseño mediante el Método Racional generalizado (Rühle 1966). La expresión genérica para calcular el caudal es:

$$Q = \alpha \times \beta \frac{A \cdot C \cdot Ri}{K}$$

donde Q es el caudal o descarga, en (m³/s),  $\alpha$  es un coeficiente, que tiene en cuenta la influencia sobre el derrame, de la menor intensidad de la precipitación sobre el área en condiciones medias varía entre 0.85 y 0.93, disminuye a medida que el área y la intensidad de la precipitación aumentan,  $\beta$  es un coeficiente, que tiene en cuenta la reducción del derrame por la retención del cauce que en condiciones medias se toma un valor de 0.90, A es el área de la cuenca (ha), C es el coeficiente medio de escorrentía, Ri es la intensidad de las precipitaciones y K es un coeficiente para uniformar unidades que toma un valor de 360.

Para producir el inventario de flujos indiferenciado se realizó un mapeo utilizando como base imágenes satelitales (SPOT 5 con 2.5 m de resolución espacial) de Google Earth™, trabajo de campo e imágenes satelitales ortorectificadas tomadas del basemap satellite imagery de ArcGIS online (Esri 2014) (Fig. 1b). La identificación de los procesos se realizó

identificando de manera primaria la zona de depositación, caracterizada por el desarrollo de abanicos aluviales de diferentes dimensiones y posteriormente siguiendo su recorrido por los canales fluviales aguas arriba hasta las zonas de arranque o de inicio. Estas fueron representadas mediante puntos en el centro de sus zonas de depositación o afectación a las trazas de rutas alternativas consideradas. Se realizó una etapa de validación en campaña, principalmente para verificar algunas geoformas no identificables directamente a partir de imágenes satelitales. Además en el trabajo de campo se observó que los eventos identificados se caracterizan por una superposición espacial de flujos hiperconcentrados y de detritos, relacionados a la disponibilidad de material susceptible a ser removido en cada evento temporal. Se realizó una recopilación de eventos históricos a partir de reportes periodísticos e informes de la Dirección Nacional de Vialidad y Departamento de Hidráulica.

Se delimitaron y clasificaron de modo sistemático según Van Zuidam (1977), las grandes unidades geomorfológicas que integran la zona de trabajo, entre ellas: unidades de montaña, lomadas, transición y planicie.

Con el objeto de analizar posibles diferencias y generar una base para la selección de alternativas de nuevas trazas, se elaboraron distintos mapas de variables condicionantes (Fig. 3), derivadas de modelos digitales del terreno (MDT) ALOS PALSAR Global Radar Imagery, <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/download-data/> y tecnología GIS (ESRI's ArcGIS 10.7; como Elevación (E), Pendiente (P), Orientación (O), Radiación solar (RS), Índice de humedad topográfico (TWI), Índice de poder de la corriente (SPI), Número de rugosidad de Melton (MRN), Sediment transport capacity index (LS) y Curvatura (C). El análisis se realizó para el área total en estudio, incluyendo el área hacia el norte del río Jáchal (donde las cuencas drenan de norte a sur) y el área hacia el sur del río Jáchal, donde las cuencas drenan de sur a norte.

El mapa de orientaciones fue reclasificado en 9 clases; plano (-1°), norte (337.5°-360°, 0°-22.5°), noroeste (22.5°-

67.5°), este (67.5°-112.5°), sureste (112.5°-157.5°), sur (157.5°-202.5°), suroeste (202.5°-247.5°), oeste (247.5°-292.5°) y noroeste (292.5°-337.5°). La radiación solar (Fu y Rich 2002, Rich et al. 1994, Rich y Fu 2000) fue estimada para Enero y Febrero de 2019. Los mapas de TWI (Moore et al. 1991), SPI (Wilson y Gallant 2000), MRN (Melton 1965), SL (Guisan et al. 1999) y C (Wilson y Gallant 2000) fueron calculados usando SAGA GIS (Conrad et al. 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 192 cuencas que cubren una superficie de 544.21 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 131.55 km que se constituye como el área total en estudio. Hacia el norte de la ruta 150 se identificaron 65 cuencas que drenan de norte a sur, estas cubren una superficie de 190.11 km<sup>2</sup>, delimitando un sector norte con un perímetro de 73.02 km. Hacia el Sur, se delimitaron 127 cuencas que drenan de sur a norte, estas cubren una superficie de 354.10 km<sup>2</sup>, delimitando un sector sur con un perímetro de 118.49 km. Con el objeto de reducir el volumen de datos morfométricos a representar y tabular, se agruparon las cuencas según sus características principales y del total de las mismas se seleccionaron 22, que se consideran representan a la población total (Cuadro 2), 11 cuencas hacia el norte y 11 hacia al sur (Fig. 1c).

La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial. Una cuenca muy alargada está menos sujeta a flujos, que una de la misma área y de forma más redondeada, o de un río principal corto y en consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa, formando fácilmente grandes flujos (Horton 1932). Además, el tamaño de una cuenca resulta una variable útil para diferenciar a aquellas susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos, debido a que estos se asocian generalmente a cuencas pequeñas (Jackson et al. 1987, Hungr et al. 2001, De Scally y Owens 2004, Wilford et al. 2004). Ciento ochenta y siete de las cuencas analizadas (97 %) poseen un área menor a 15 km<sup>2</sup>, ciento ochenta y uno (94.3 %) poseen un área menor a 5 km<sup>2</sup>, el 90 % de las cuencas del sector norte y el 96.06 % de las cuencas del sector sur.

Para las ciento noventa y dos cuencas, los índices relacionados a la forma (relación de elongación y factor de forma) indican cuencas ligeramente alargadas, con medias del factor de forma de 0.3 y 0.26 para los sectores norte y sur, respectivamente, lo que sugiere cuencas menos sujetas a flujos (Cuadro 2). Los valores de razón de relieve (Rr), que constituye la relación existente entre el desnivel de la cuenca y la

**Cuadro 1.** Índices morfométricos

Índice	Fórmula	Cita
Relación de elongación	$Re = (\sqrt{4A/\pi})/L$	(Schumm 1956)
Factor de forma	$Ff = A/L^2$	(Horton 1932)
Sinuosidad del cauce	$S = Lcp/L$	(Schumm 1977)
Ancho medio	$Wm = A/L$	
Desnivel de cuenca	$Hr = H/h$	(Hadley y Schumm 1961)
Razón de relieve	$Rr = Hr/L$	(Schumm 1956)
Relación de relieve	$R = Hr/P$	(Melton 1957)
Número de rugosidad de Melton	$MRN = Hr/A^{0.5}$	(Melton 1957)

**Cuadro 2.** Parámetros morfométricos de las cuencas seleccionadas.

	Cuenca	A [km <sup>2</sup> ]	P [km]	L [m]	Lcp [m]	Re	Ff	S	Wm [m]	Hr [m]	Rr	R	MRN	Q [m <sup>3</sup> /s]
NORTE	1	14.336	23.921	8417.977	9507.838	0.508	0.202	1.129	1703.023	1176	0.140	0.049	0.311	33.30
	2	14.491	17.060	6368.614	7005.284	0.674	0.357	1.100	2275.402	982	0.154	0.058	0.258	38.20
	3	0.968	4.486	1535.363	1811.920	0.723	0.411	1.180	630.766	135	0.088	0.030	0.137	3.59
	4	0.683	3.884	1393.304	1445.096	0.669	0.352	1.037	490.171	393	0.282	0.101	0.476	3.63
	5	61.402	39.712	14340.342	15296.145	0.617	0.299	1.067	4281.783	1842	0.128	0.046	0.235	121.59
	6	2.781	8.396	2562.347	3591.400	0.734	0.424	1.402	1085.488	774	0.302	0.092	0.464	10.08
	7	13.375	18.731	7225.559	8533.104	0.571	0.256	1.181	1851.063	1017	0.141	0.054	0.278	32.02
	8	13.611	23.999	9443.634	10746.075	0.441	0.153	1.138	1441.295	1244	0.132	0.052	0.337	30.02
	9	0.640	4.092	1783.483	1549.205	0.506	0.201	0.869	358.951	145	0.081	0.035	0.181	2.31
	10	37.679	38.085	13469.422	16291.659	0.514	0.208	1.210	2797.379	1551	0.115	0.041	0.253	59.97
	11	0.110	1.360	485.202	512.682	0.771	0.467	1.057	226.469	317	0.653	0.233	0.956	1.22
SUR	1	0.111	1.398	556.821	565.639	0.674	0.357	1.016	198.814	292	0.524	0.209	0.878	0.94
	2	0.825	6.265	2499.270	2837.280	0.410	0.132	1.135	329.919	813	0.325	0.130	0.895	4.16
	3	140.850	76.666	27236.126	32147.170	0.492	0.190	1.180	5171.425	1887	0.069	0.025	0.159	215.38
	4	1.111	4.753	1929.261	2176.336	0.616	0.298	1.128	575.785	898	0.465	0.189	0.852	8.55
	5	99.652	53.808	18021.752	21966.260	0.625	0.307	1.219	5529.542	1618	0.090	0.030	0.162	200.93
	6	1.640	5.982	1875.591	2311.126	0.770	0.466	1.232	874.231	549	0.293	0.092	0.429	8.39
	7	0.222	2.297	757.823	887.417	0.701	0.386	1.171	292.865	317	0.418	0.138	0.673	2.38
	8	54.550	48.159	16572.234	25104.580	0.503	0.199	1.515	3291.666	1207	0.073	0.025	0.163	93.03
	9	8.088	16.167	5719.418	5955.303	0.561	0.247	1.041	1414.175	602	0.105	0.037	0.212	21.39
	10	0.268	2.379	842.951	1012.936	0.693	0.377	1.202	318.201	126	0.149	0.053	0.243	1.77
	11	1.049	5.978	2126.286	2526.806	0.544	0.232	1.188	493.346	397	0.187	0.066	0.388	5.22

longitud máxima de la misma (Schumm 1956), varían entre 0.07 y 0.65 con valores medios de 0.20 para el sector norte y 0.22 para el sur. Este índice se relaciona con la pérdida de sedimento, por lo que valores altos (cercaos a 1) implican mayor capacidad erosiva (Sala y Gay 1981).

La relación de relieve (R), que se obtiene de la relación entre el desnivel absoluto y el perímetro de la cuenca (Melton 1957) complementa el análisis, y según Senciales (1999) este índice considera la presencia de importantes velocidades de flujos, debidas a la pendiente de las cuencas.

Los caudales obtenidos (Cuadro 2) para las diferentes cuencas, nos dan un indicio de cómo se comportarían ante las eventuales precipitaciones de carácter torrencial. En una comparación de los caudales obtenidos en el entre ambos sectores (Cuadro 2), puede verse que las cuencas del sector sur tienden a concentrar mayores caudales para la misma precipitación teórica. Aunque se considerará una validez de sólo el 50 %, estos valores señalan alta probabilidad de flujos con picos de caudales que superan, en algunos casos, los 100 m<sup>3</sup>/s. Es preciso aclarar que los caudales resultantes a partir de la aplicación de modelos matemáticos son sólo aproximaciones y su validez es controversial, ya que es muy difícil predecir la extensión espacial de las tormentas sin contar con

registros hidrometeorológicos continuos en las cabeceras de las cuencas (Esper Angillieri 2008). Sin embargo, en áreas como estas, donde se carecen de estos registros, la información brindada es fundamental. Además y considerando la sinuosidad, un canal rectilíneo debiera tener una sinuosidad igual a 1 y un canal meandriforme de 3 o más. Los cursos o quebradas aluviales seleccionados poseen valores desde 0.86 a 1.5, una sinuosidad de 1.5 es usualmente considerada la divisoria entre los canales meandriformes y rectilíneos, por lo que se puede decir que la mayoría de los canales son más rectilíneos que meandriformes, lo que sugiere una rápida evacuación del agua en caso de tormentas, que sumado a la gran disponibilidad de material sujeto a ser removido, los convierte en susceptibles de generar importantes flujos.

Si bien la recopilación de eventos históricos resultó escasa y limitada, se ha logrado obtener datos tomados de diarios digitales de la provincia, los cuales brindan información sobre el sector seleccionado, y reflejan daños y pérdidas socio-económicas importantes, ocasionadas por flujos que descienden de las áreas montañosas. Algunos de estos textos informativos corresponden a diarios locales, Dirección Nacional de Vialidad y Departamento de Hidráulica (Cuadro 3).

Por otro lado, se han identificado un total de ciento dieci-



**Cuadro 3.** Inventario histórico de daños e inconvenientes asociados a la ocurrencia de flujos en el tramo de ruta estudiado.

Fecha	Descripción daños e inconvenientes por lluvias torrenciales	Fuente
10/12/2007	Corte parciales en distintos sectores	Diario de Cuyo
16/11/2008	Tramo Jáchal-Iglesia totalmente inhabilitada	Diario de Cuyo
21/01/2009	Daños importante en calzada, corte total de la traza entre los kms 262-263	Vialidad
23/02/2011	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
04/03/2011	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
05/05/2011	Daños importante en calzada, corte total de la traza	Vialidad
18/01/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Tiempo de San Juan
19/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
23/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
24/02/2012	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
21/01/2013	Derrumbes y material de arrastre (traza intransitable por varios días)	Diario de Cuyo
08/02/2013	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
24/03/2013	Daños importante en calzada, corte total de la traza km 256	Vialidad
26/12/2013	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
01/12/2014	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
06/02/2015	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza. Obras de drenaje obstruidas	Vialidad
10/05/2016	Derrumbes a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
03/02/2017	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Vialidad
02/12/2017	Derrumbes, material de arrastre y obras de drenaje obstruidas y/o dañadas	La Séptima
28/02/2018	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Diario de Cuyo
26/01/2019	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	SanJuan8.com
02/04/2019	Derrumbes y material de arrastre a lo largo de la traza	Jáchal Magazine
17/03/2020	Derrumbes, corte total de la traza km 262	13 San Juan

séis (116) geoformas relacionadas a depósitos de flujos de detritos/hiperconcentrados de origen netamente climático, relacionado a fuertes precipitaciones estacionales de carácter torrencial. De estas 116 geoformas, 72 han sido identificadas en la margen sur del Río Jáchal indicando, en un análisis a priori, que las cuencas que drenan desde el sur presentan mayor susceptibilidad a la ocurrencia de estos procesos, alimentando los abanicos aluviales existentes. La recopilación de eventos históricos mediante diarios de la provincia, refleja

daños y pérdidas socio-económicas importantes; en la última década se han registrado 23 eventos históricos que afectaron la traza en mayor o menor medida (Cuadro 3).

El mapa de elevaciones (Fig. 3a) señala que las alturas en el área total de estudio van desde los 1284 m s.n.m. a los 3461 m s.n.m., con una media de 2132 m s.n.m., los mismos valores máximos y mínimos se obtuvieron para el sector norte pero con una media de 1955 m s.n.m., mientras que para el sector sur las elevaciones mínimas son de 1284 m s.n.m., las máximas de 3429 m s.n.m. y una media de 2227 m s.n.m. Estos resultados señalan que el sector sur presenta las mayores elevaciones.

El análisis de pendientes es esencial en el estudio de la ocurrencia de procesos de remoción en masa. En general, se puede decir, que pendientes suaves se relacionan con las zonas de deposición de material, mientras que las zonas de pendientes pronunciadas suelen asociarse a zonas de inicio de los flujos donde se favorecen el arranque y la movilización de material a las corrientes tributarias y de allí a la corriente principal. Las pendientes máximas (Fig. 3b), tanto para el área total como para el sector norte, son del orden de los 67°, con una media de 17.25°, mientras que para el sector sur las máximas no superan los 65° y poseen una media de 17.74°.

El mapa de orientaciones (Fig. 3c), que fue reclasificado en 9 clases, con una media de 183°, 184° y 182° para el área total, el sector norte y el sur respectivamente. Lo que señala que tanto para el área total como para las áreas norte y sur, las laderas están orientadas hacia el sur. Al analizar los porcentajes de cada clase respecto del área de cada sector, en el sector norte las laderas más frecuentes son las SE (21.3 %), S (19.8 %) y SO (18.7 %), mientras que en el sector sur son más frecuentes las laderas orientadas al NO (19.3 %), N (17.9 %) y NE (15.2 %).

El mapa de Radiación Solar (Fig. 3d) indica que durante Enero y Febrero de 2019 algunos sectores del área recibieron hasta 770 horas de sol directo, con mínimas de 396 horas y una media de 667 horas. Valores similares se obtuvieron en los sectores norte y sur. En líneas generales, en el hemisferio sur las laderas orientadas al norte son las que reciben mayor cantidad de horas de sol al día. En la zona de estudio, para el periodo calculado, el 95.55 % de las laderas del sector norte recibieron entre 600 y 770 horas, mientras que la misma cantidad de horas se registraron en el 90.87 % de las laderas del sector sur. Indicando que la ladera norte del río Jáchal posee una mayor insolación que la sur. En general las laderas que sufren mayor insolación, son más estables que aquellas más húmedas. Estos resultados señalan que el sector sur es más inestable.

Los mapas de TWI (Fig. 3e) señalan que tanto para el área

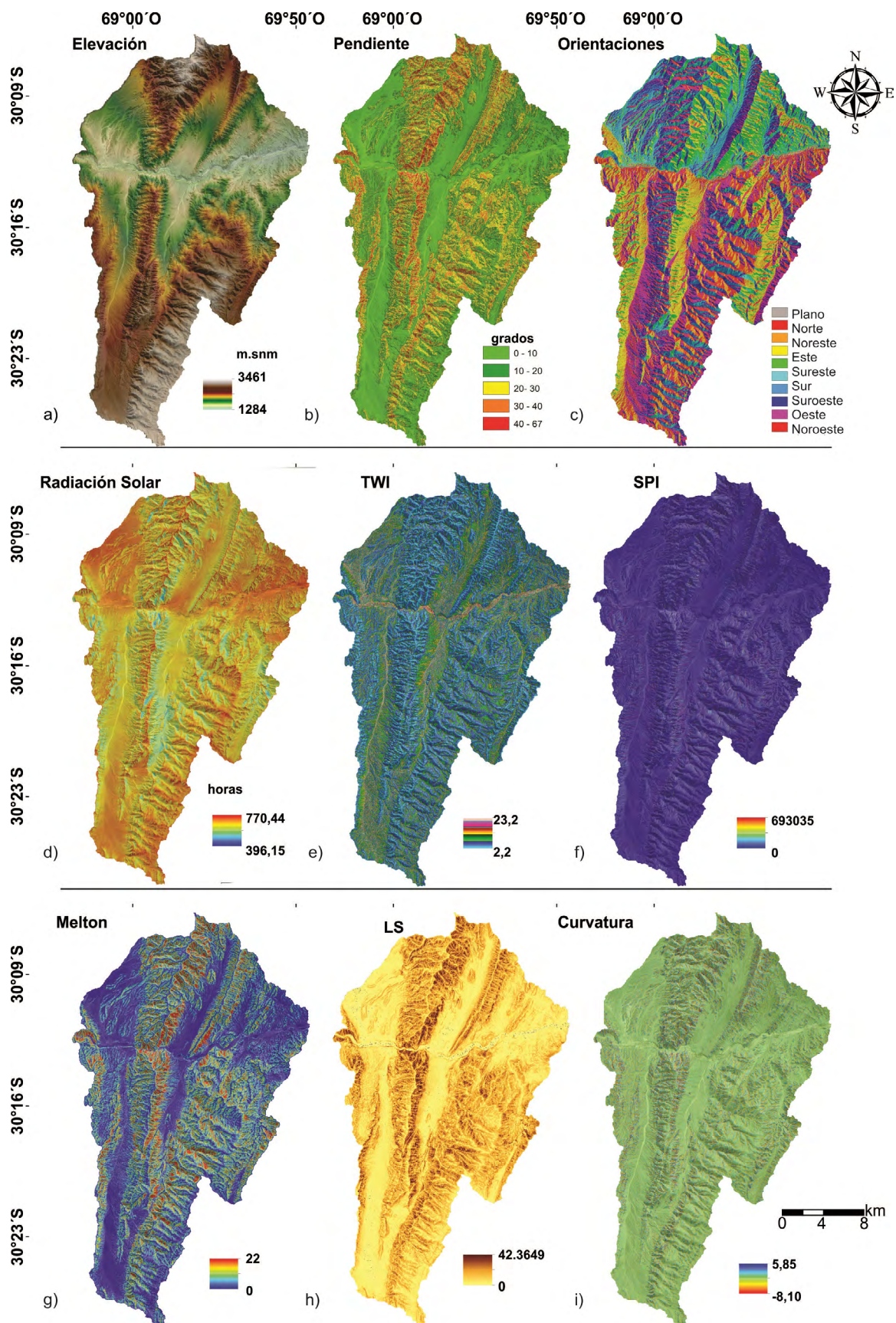


Figura 3. Variables de estudio.

total como para los sectores nortes y sur, los valores mínimos son de aproximadamente 2, los máximos de 23, con una media de 6. Además, en ambos sectores el 34.8 % representa los mayores valores, que pueden asociarse a la ocurrencia de flujos. El índice de humedad TWI es una variable que define la tendencia de una celda a acumular agua (Gruber y Peckham 2009). Está relacionada con la humedad del suelo y refleja la predisposición de este a generar escorrentía; relaciona la dirección y acumulación de flujo, representadas por el área de captación o área de acumulación. Por lo que considerando un análisis cuantitativo y también cualitativo de los mapas norte y sur, no se observa que este índice sea determinante para discriminar cual es más susceptible a la ocurrencia de flujos, ya que los valores obtenidos están repartidos de manera homogénea, excepto en el área del cauce del río Jáchal.

Los mapas de SPI (Fig. 3f) nos dan un indicio de la capacidad erosiva del flujo en el punto dado de la superficie topográfica (Moore et al. 1991). Las máximas, mínimas y medias estadísticas de los mapas no brindan mayor información. Sin embargo, los valores medios del sector sur (1454.4) son un poco mayor a los del sector norte (1345.4) y al considerar solo aquellos valores mayores que se esperan estén asociados a una mayor erosión, se observa una tendencia a mayor capacidad erosiva en el sector sur (0.57 % para el sur y 0.36 % para el norte). Resultado que infiere que los procesos provenientes de esas cuencas tienen una mayor capacidad erosiva y destructiva al incorporar mayor material en sus recorridos. Por otro lado, zonas con mayores porcentajes de valores bajos de SPI, como el sector norte, favorecen la deposición, favoreciendo la transición de flujos de detritos a flujos con menores concentraciones de sedimentos (Marchi y Dalla Fontana 2005).

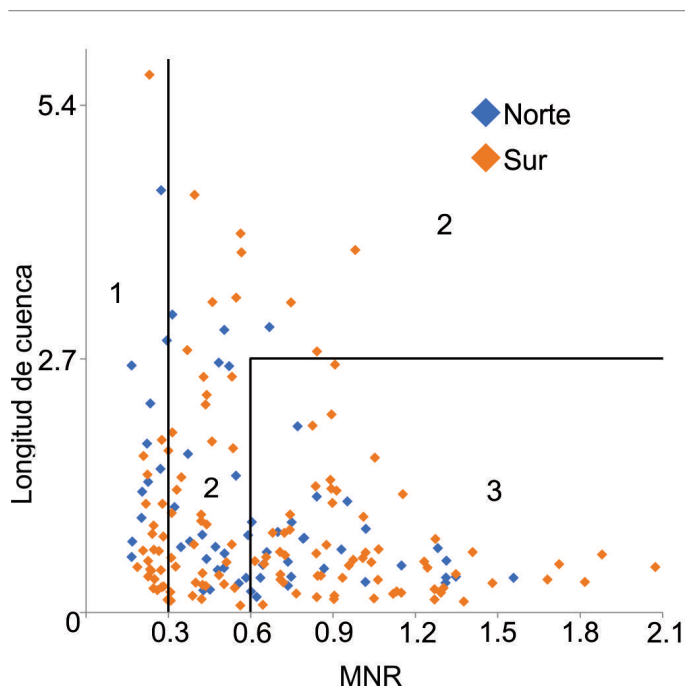
El índice de rugosidad de Melton (Fig. 3g) se utiliza para diferenciar las cuencas basándose en la dinámica de sedimentos, es decir ayuda a diferenciar cuencas capaces de producir flujos de detritos o flujos con menos contenido de material. La media del número de rugosidad de Melton (MRN), tanto para toda el área como para los sectores norte y sur, es de  $< 0.3$ , indicando cuencas más susceptibles a la ocurrencia de flujos con bajo contenido de material (Wilford et al. 2004). Esto se contrapone con las evidencias geológicas del área donde se observan importantes depósitos de flujos. Al analizar los valores de MRN obtenidos de la manera tradicional (la razón entre el desnivel de la cuenca y la raíz cuadrada del área) y categorizando el total de las 192 cuencas identificadas, según Wilford et al. (2004), se puede observar (Fig. 4) que el 47.7 % de las cuencas del sector norte y 44.88 % del sector sur corresponden a la categoría 1 de flujos de agua

(cuencas con  $MNR < 0,3$ ); el 10.77 % del norte y 7.09 % del sector sur corresponden a la categoría 2 de flujos hiperconcentrados (cuencas con MNR entre 0.3 – 0.6 y  $MNR > 0,6$ , y con longitud de cuenca  $> 2.7$  km) y el 41.53 % de las cuencas del sector norte y el 48.03 % de las cuencas del sur, corresponden a la categoría 3 de flujos de detritos (cuencas con  $MNR > 0,6$  y longitud de cuenca  $< 2.7$  km). Estos resultados corroboran las observaciones de campo que indican una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos en el sector sur.

Altos valores del índice de capacidad de transporte de sedimentos (LS), que es la distancia entre el punto donde se origina el flujo y el punto donde es depositado el material, indican mayor susceptibilidad del terreno a acumular mayor volumen de agua e incremento de la erosión. Este índice intenta registrar la capacidad erosiva de los arroyos en las distintas cuencas producto de la acción erosiva del agua, actividad tectónica, deslizamientos o cambios en el nivel de base (Keller y Pinter 2002). En el área total de estudio, LS toma valores de 0 a 42.3, además un poco más del 97 % del área posee valores menores a 12. Considerando solo los mayores valores (12 a 42.3), se puede observar que el sector norte ocupa el 16.6 % de su área total, mientras que el sector sur ocupa solo el 18.14 %. Estos resultados indican mayores valores en el sector sur, lo que señala que este sector es más susceptible a la ocurrencia de flujos con mayor carga de material que en el norte (Fig. 3h). Los altos valores de LS en sectores pedemontanos se deben a los contactos litológicos entre rocas con erodabilidad diferente que ocasionan saltos de agua, aumento de la potencia fluvial y posteriormente los procesos de erosión retrocedente y concentrada liberan material que es arrastrado por los flujos descendentes.

El mapa de curvatura indica la tasa de cambio de la pendiente (Wilson y Gallant 2000). Valores positivos describen la curvatura convexa, valores negativos la curvatura cóncava, valores cercanos a cero indican que la zona es plana o de pendiente rectilínea. En el terreno, la concavidad y convexidad pueden estar asociadas con acumulaciones de flujo y dispersión de materiales. El Plano de curvatura (Fig. 3i) es una medida de la convergencia o divergencia del flujo. Es un indicativo del patrón de distribución del agua superficial y de materiales sólidos a través de la dirección de la pendiente. Los valores negativos indican zonas donde el flujo tiende a acumularse (Blais-Stevens y Behnia 2016), condicionando la ocurrencia de flujos (Pradhan y Lee 2010). La media de los valores de curvatura tanto para el sector norte y sur es de  $-0.01$ , resultados que sugieren que esta variable no es significativa en esta zona para resaltar diferencias en la ocurrencia





**Figura 4.** Número de rugosidad de Melton (MRN) vs Longitud de cuencas. Categorización de Wilford et al. (2004): 1 flujos de agua (cuencas con MRN < 0.3); 2 flujos hiperconcentrados (cuencas con MRN 0.3 – 0.6 y MNR > 0.6 longitud de cuenca > 2.7 km) y 3 flujos de detritos (cuencas con MRN > 0.6 y longitud de cuenca < 2.7 km).

de flujos.

Según se observó en los trabajos de campo, los afloramientos que más influyen en proveer material para la ocurrencia de flujos, incluyen a los depósitos fluviales, coluviales y aluviales, que se corresponden con el 10.16 % y el 15.1 % del área total en los sectores norte y sur, respectivamente (Fig. 2). Fueron de gran utilidad para diferenciar las unidades los datos morfométricos obtenidos a partir del MDE como: alturas máximas y mínimas, pendiente, altura de barrancos, escarpes topográficos, etc. datos morfodinámicos vinculados a procesos erosivos y acumulativos, morfoestructurales y morfogenéticos.

A partir de los resultados obtenidos, se consideraron tres alternativas de traza de camino de montaña; #1 coincidente con el trazado actual de la ruta 150; #2 traza sobre barranca en la margen sur del río Jáchal y #3 traza con sectores sobre la llanura de inundación actual del río Jáchal (Fig. 1). Teniendo en cuenta estas trazas, de los 116 flujos inventariados (Fig. 1), la traza #1 es afectada por 72 flujos (62 %), la #2 por 65 (56 %) y la #3 por 48 (41 %). Por cuestiones operativas relacionadas con las distintas alternativas para la construcción de este camino de montaña, las mismas poseen tramos coincidentes. Por lo tanto, si solo se consideran los tramos de traza no coincidentes, la traza #1 y #2 son afectadas de igual modo por 32 flujos, mientras que la traza #3 solo por 8, repre-

sentando solo el 6,9 % de los procesos identificados.

Estos resultados sugieren que las cuencas que drenan desde el sur presentan mayor susceptibilidad a la ocurrencia de flujos y por consiguiente las alternativas #1 y #2, que se desarrollan asociadas a la ladera del sector sur, son las más susceptibles a la ocurrencia de estos procesos. Por el contrario, la alternativa #3 que está asociada a la dinámica de las cuencas que provienen del sector norte, está menos afectada por flujos y por lo tanto presenta menor susceptibilidad a su ocurrencia.

## CONCLUSIONES

El presente estudio muestra la aplicabilidad y la importancia del análisis morfométrico de cuencas, como herramienta para la selección de alternativas de caminos de montaña, mediante el uso de tecnologías de SIG y solo desde la perspectiva abordada en este trabajo. En este sentido, mediante la utilización principalmente del número de rugosidad de Melton y la longitud de la cuenca, se pudo discriminar aquellas cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos/hiperconcentrados.

Además ofrece importante información de base para posteriores estudios de susceptibilidad y/o peligrosidad a la ocurrencia de flujos destructivos. En este aspecto, los resultados indican que variables como la pendiente, el índice de humedad y la curvatura son poco significativas y no deberían ser tenidas en cuenta en análisis posteriores. El análisis morfométrico de las cuencas, el inventario de flujos, el cálculo de los caudales y algunas de las variables temáticas analizadas, sugieren una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de este tipo en el sector sur respecto del norte. Resultados que nos permiten concluir que cualquier alternativa de traza asociada al sector sur es más propensa a ser afectada por flujos que aquella asociada al sector norte. Finalmente, la metodología aplicada resulta fácil de reproducir y puede ser aplicada en otras regiones montañosas de similares características, principalmente aquellas regiones donde la información hidrometeorológica y climática es escasa o nula, y no es posible efectuar otro tipo de cálculos.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CIGEOBIO (CONICET-UNSJ) por los fondos aportados para la adquisición de la licencia del software ArcGIS. Este trabajo de investigación ha sido financiado por



el proyecto CICITCA 21/11275. Los autores agradecen a los revisores por sus invaluable comentarios que sin dudas contribuyeron a mejorar el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Agosta, E. y Compagnucci, R. 2006. Atmospheric conditions during wet and dry summer extremes in Central-West Argentina, 8 th ICSHMO, AMS, Foz do Iguazu, Brasil, Ses. 12: Understanding long-term climate variations in SH, 1439-1452.
- Blais-Stevens, A. y Behnia, P. 2016. Debris flow susceptibility mapping using a qualitative heuristic method and Flow-R along the Yukon Alaska Highway Corridor, Canada. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16: 449-462.
- Bodenbender, G. 1902. Contribución al conocimiento de la Precordillera y de las Sierras Centrales de la República Argentina. *Academia Nacional de Ciencias* 18: 203-264.
- Braccacini, O. 1946. Contribución al conocimiento geológico de la Precordillera Sanjuanino-Mendocina. *Boletín de Informaciones Petroleras* 258: 258-264.
- Compagnucci, R., Agosta, E. y Vargas, W. 2002. Climatic change and quasi-oscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern African region. *Climate Dynamics* 18: 421-435.
- Cardó, R., Díaz, I.N., Cegarra, N., Rodríguez-Fernández, R., Heredia, N. y Santamaría, G. 2005. Hoja Geológica 3169-I, Rodeo. Provincia de San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 272, 47 p. Buenos Aires.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. y Böhner, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8: 1991-2007.
- Costa, J.E. 1988. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. En: Baker VR, Kochel RC, P.P. (eds.), *Flood geomorphology*. John Wiley & Sons, 113-122. New York.
- Davis, J.S., Moores, E.M., Roeske, S.M., Kay, S.M., McClelland, W.C. y Snee, L.W. 1995. New data from the western margin of Precordillera Terrane, Argentina: constrain scenarios for the middle Paleozoic tectonics of western South America. *Laurentian-Gondwanan connections before Pangea Field Conference, Program with Abstracts*: 15-16.
- De Scally, F.A. y Owens, I.F. 2004. Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 311 -3 22.
- Esper Angillieri, M.Y. 2007. The flash flood of the 13th of February of 1944 in the Quebrada del Carrizal, Departamento Iglesia, province of San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62 (2).
- Esper Angillieri, M.Y. 2008. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology* 55 (1): 107-111.
- Esper Angillieri, M.Y. 2012. Morphometric characterization of the Carrizal basin applied to the evaluation of flash floods hazard, San Juan, Argentina. *Quaternary International* 253: 74-79.
- Esper Angillieri, M.Y. 2020. Debris flow susceptibility mapping using frequency ratio and seed cells, in a portion of a mountain international route, Dry Central Andes of Argentina. *Catena* 189.
- Esper Angillieri, M.Y. y Fernández, O.M. 2017. Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation of basins. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34 (2): 150-156.
- Esper Angillieri, M.Y. y Perucca, L.P. 2014a. Geomorphology and morphometry of the de La Flecha river basin, San Juan, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 72 (8): 3227-3237.
- Esper Angillieri, M.Y. y Perucca, L. 2014b. Morphometric characterization of the Rio Seco basin concerning strong rainfall in 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66 (2): 235-245.
- Esper Angillieri, M.Y., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L. y Rothlis, M. 2016. Basin morphometry as basis in assessing flash flood susceptibility/hazard, case study: Del agua river Basin, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (4): 513-519.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L. y Vargas, N. 2017. Catastrophic flash flood triggered by an extreme rainfall event in El Rodeo village, January 2014. Northwestern Pampean Ranges of Argentina. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 99 (1): 72-84.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L. y Vargas, N. 2020. Spatial and temporal analysis of debris flow occurrence in three adjacent basins of the western margin of Grande River: Quebrada de Humahuaca, Jujuy, Argentina. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*.
- Esri. 2014. ArcGIS Desktop: Release 10.3. Redlands.
- Fu, P. y Rich, P.M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture* 37 (1-3): 25-35.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. 2009. Present-day South American Climate. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 281: 10.032.
- Gruber, S. y Peckham, S. 2009. Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in Soil Science* 33:171-194.
- Guisan, A., Weiss, S.B. y Weiss, A.D. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107-122.
- Hadley, R.F. y Schumm, S.A. 1961. Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1531-B, 198 p.
- Haller, M. y Ramos, V. 1984. Las ofiolitas famatinianas (Eopaleozoico) de las provincias de San Juan y Mendoza. *Actas 9° Congreso Geológico Argentino* 2: 66-83.

- Horton, R.E. 1932. Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 13: 350-361.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. y Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7 (3): 221-238.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11: 167-194.
- Jackson, L.E., Kostaschuk, R.A. y MacDonald, G.M. 1987. Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. *GSA Reviews in Engineering Geology* 7: 115-124.
- Keller, E. y Pinter, N. 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. 2nd Revise (Pearson, editor). Books in the Prentice Hall Earth Science Series: 384 p.
- Mardonez, D., Suriano, J., Giambiagi, L., Mescua, J., Lossada, A., Creixell, C. y Murillo, I. 2020. The Jáchal river cross-section revisited (Andes of Argentina, 30°S): Constraints from the chronology and geometry of neogene synorogenic deposits. *Journal of South American Earth Sciences* 104: 102838.
- Marchi, L. y Dalla Fontana, G. 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology* 48 (2): 218-228.
- Melton, M.A. 1957. *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*, Office of Naval Research Technical Report No. 11. Dept. of Geology, Columbia University: 102 p. New York.
- Melton, M. 1965. The Geomorphic and Palaeoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. *Journal of Geology* 73: 1-38.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. y Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5 (1): 3-30.
- O'Callaghan, J.F. y Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28: 328-344.
- Perucca, L.P. y Esper Angillieri, M.Y. 2011. Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina. *Quaternary International* 233: 81-86.
- Pradhan, B. y Lee, S. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling and Software*: 747-759.
- Ramos, V.A. 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*. 29: 341-396.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Mpodozis, C., Kay, S.M., Cortés, J.M. y Palma, M. 1986. Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics* 5 (6): 855-880.
- Rich, P.M., Dubayah, R., Hetrick, W.A., Saving, S.C. y Dubayah, R.O. 1994. Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*: 524-529.
- Rich, P.M. y Fu, P. 2000. Topoclimatic Habitat Models. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs: 14.
- Rolleri, E. 1969. Rasgos tectónicos generales del valle de Matagusanos y de la zona entre San Juan y Jocolí, Provincia de San Juan, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 24 (4): 408-412.
- Rühle, F. 1966. Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas. *La Ingeniería*. Centro Argentino de Ingenieros 987.
- Sala, M. y Gay, R. 1981. Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. *Notes de Geografía Física* 4: 41-65.
- Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America* 67: 597-646.
- Schumm, S.A. 1977. *The fluvial system*. John Wiley & Sons. 338 p., New York.
- SIG vial. 2020. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/vialidad-nacional/sig-vial>
- Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D.B., Oimoen, M.J., Zhang, Z., Danielson, J.J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M. y Carabajal, C. 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - Summary of Validation Results. *Japan Space Systems*: 27 p.
- Van Zuidam, R. 1977. Terrain analysis and classification using aerial photographs. *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC)*. ITC text book 7.
- von Gosen, W. 1997. Early Paleozoic and Andean structural evolution in the Río Jáchal section of the Argentine Precordillera. *Journal of South American Earth Sciences* 10 (5-6): 361-388.
- Wilford, D.J., Sakals, M.E., Innes, J.L., Sidle, R.C. y Bergerud, W.A. 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides* 1 (1): 61-66.
- Wilson, J.P. y Gallant, J.C. 2000. *Primary topographic attributes. Terrain Analysis: Principles and Applications*.