



Análisis de crecimiento de abanicos aluviales mediante métodos topográficos y empíricos, ruta nacional n° 150, San Juan, Argentina

María Yanina ESPER ANGILLIERI^{1,2}, Carlos Guillermo GONZÁLEZ², Daniel FLORES¹, Oscar Mario FERNÁNDEZ², María Eugenia RUIZ², Carla GINESTA TORCIVIA¹, Natalia RIOS¹

¹CIGEOBIO. UNSJ-CONICET. Centro de Investigaciones de la Geosfera y la Biosfera, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de San Juan. E-mail: yaninaesper@gmail.com

²EICAM. Facultad de Ingeniería, UNSJ. Av. Libertador 1109 (O). Capital. San Juan, Argentina. CPA: J5400ARL. E-mail: cgonzalez@eicam.unsj.edu.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 21 de Junio de 2023

Aceptado: 05 de Octubre de 2024

RESUMEN

El presente estudio pretende estimar la tasa de crecimiento de cuatro abanicos aluviales a partir de información topográfica, mediante la comparación temporal de sus superficies y estimar la producción de sedimentos de sus cuencas de aporte aplicando el método empírico de Gavrilovic. El sector seleccionado comprende un tramo de la ruta Nacional N°150 en el departamento de Iglesia, aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad capital de San Juan. Este sector se caracteriza por registrar precipitaciones intensas de corta duración que actúan como desencadenantes de importantes flujos que transportan significativos volúmenes de material sólido (sedimentos de diferentes granulometrías, restos de vegetación y materiales de desecho). Este material se acumula en las porciones de menor pendiente, por lo general formando abanicos aluviales o alimentando los ya existentes, que pueden destruir y/u obstruir rutas, afectando negativamente al normal flujo vehicular. Los resultados preliminares, de los métodos topográficos, de cuatro de las geoformas relevadas que se exponen en el presente trabajo, señalan para el periodo de análisis (2015-2021) un incremento en sus volúmenes. Mientras que los resultados de Gavrilovic señalan una la producción obtenida para cuencas del orden de los 1000 m³/año para aquellas cuencas <1 km², de 2000 m³/año para la de ~2 km² y de 14000 m³/año para la de 140 km², indicando una marcada influencia de la superficie de las cuencas en su cálculo.

Palabras clave: abanico aluvial, LIDAR, VANT, Gavrilovic.

ABSTRACT

Analysis of alluvial fan growth using topographic and empirical methods, National Route 150, San Juan, Argentina.

The present study aims to estimate the growth rate of four alluvial fans from topographic information, through the temporal comparison of their surfaces and to estimate the sediment production of their contribution basins by applying Gavrilovic's empirical method. The selected sector comprises a section of National Route 150 in the department of Iglesia, approximately 145 km north of the capital city of San Juan. This area is characterized by short-term heavy rainfall which triggers significant flows that transport large volumes of solid material (sediments of different granulometries, remains of vegetation and debris). This material accumulates on the lower slopes usually creating alluvial fans or supplying the already existing ones, that can destroy and/or obstruct roads, negatively affecting the normal flow of vehicles.

Preliminary results, from topographic methods, of four of the surveyed geoforms presented in this work, indicate for the period of analysis (2015-2021) an increase in their volumes. While Gavrilovic's results indicate a production obtained for basins in the order of 1000 m³/year for those basins <1 km², 2000 m³/year for ~2 km² and 14000 m³/year for 140 km², indicating a marked influence of the surface of the basins in its calculation.

Keywords: alluvial fan, LIDAR, UAV, Gavrilovic.

INTRODUCCIÓN

La red vial de un país es fundamental para su desarrollo y crecimiento. Asegurar una buena red vial permite mejorar la competitividad de los productos y servicios que pueden ofrecerse en los mercados. Otros beneficios, son facilitar la integración social y política de un país y mejorar la calidad de vida de los individuos, al favorecer el acceso a servicios básicos como salud y educación (Calderón Mosquera y Rojas Campos 2008). En Latinoamérica existe un problema serio en cuanto a infraestructuras en vías de comunicación y esto representa una seria desventaja competitiva. Pese a la evidencia de su importancia para el desarrollo económico, se ha generado un deterioro continuo de la infraestructura. Estos problemas han ido en detrimento del nivel de vida de las comunidades y afectan negativamente la economía y productividad de un país (Calderón Mosquera y Rojas Campos 2008).

Los ríos, quebradas y arroyos, de regiones montañosas, constituyen grandes vías de evacuación de agua y sedimentos en regiones geomorfológicamente activas, generando procesos de remoción en masa (PRM) que pueden destruir y/u obstruir rutas, afectando negativamente al normal flujo vehicular.

En el sector seleccionado para el presente estudio, los abanicos aluviales morfodinámicamente activos, han sido construidos primordialmente por depósitos de eventos fluvio-torrenciales (flujos de detritos) y representan áreas altamente inestables, dado su carácter de receptoras de los materiales. Estos materiales son transportados por las crecientes de los cursos de agua de ambientes montañosos, que descargan en los sectores de piedemonte (Méndez et al. 2016). Estas condiciones definen escenarios de peligrosidad y consecuente vulnerabilidad y riesgo para las infraestructuras asentadas o próximas a abanicos aluviales, como es el caso de una gran parte de la ruta N° 150, donde en los últimos años, la destrucción y deterioro en la infraestructura vial ha sido de particular importancia.

El sector seleccionado, pertenece a una zona sísmicamente activa y se caracteriza por registrar precipitaciones intensas, de corta duración, que actúan como desencadenantes de importantes flujos que transportan significativos volúmenes de material sólido (sedimentos de diferentes granulometrías, restos de vegetación y materiales de desecho) que se acumulan en las porciones de menor pendiente, por lo general formando abanicos aluviales o alimentando los ya existentes. En los últimos 10 años, en el tramo de ruta analizado, se registraron numerosos PRM de gran magnitud, que ocasionaron cuantiosos daños; lamentablemente estos

procesos raramente son registrados y/o documentados (Ginesta Torcivia et al. 2021). Entre los distintos tipos de PRM, predominan flujos de detritos, que se definen como flujos muy rápidos a extremadamente rápidos de detritos saturados y de comportamiento no plástico, encausados en un canal de gran pendiente (Hungry et al. 2001), estos procesos, ocurren periódicamente y poseen un recorrido ya establecido (Hungry et al. 2014).

Tradicionalmente, las alcantarillas instaladas en las vías de comunicación, son diseñadas mediante el cálculo de caudal utilizando el método racional para una intensidad de lluvia determinada y con un periodo de recurrencia de 50 años, sin embargo, poco se consideran en su diseño los procesos de transporte de sedimentos (Wolman 1967; Rowley y Hotchkis 2014). Por ello que resulta de vital importancia, al momento de diseñar o decidir sus características mínimas, conocer o aproximar los procesos de sedimentación o el porcentaje probable de volumen sólido que puede transitar finalmente por cada alcantarilla, principalmente para mantener su operación durante flujos extremos, entendiendo que la estructura vial es esencial para las comunidades. Además, la falta de mantenimiento de las alcantarillas puede aumentar la acumulación de material en las mismas, reduciendo su eficiencia, que suele ser de un 80-90 % (Jacob et al. 2019), incluso bloqueándola completamente y aumentando la susceptibilidad de la obra vial de ser afectada por los flujos. Por lo tanto, para definir propuestas de manejo de cuencas fluviales ya sean de intervenciones directas en los cursos y/o la implementación de obras (alcantarillas, puentes, badenes, entre otros) para mitigar sus efectos en las obras viales, resulta imprescindible conocer el volumen del material sólido generado en una cuenca, que es transportado luego por el sistema fluvial.

La producción de sedimentos, en una cuenca determinada, sintetiza la compleja interrelación entre los aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos y de uso del territorio de la misma y a su vez es una de las variables principales que definen la morfodinámica de los cursos colectores. Su conocimiento adquiere alto valor, en tanto permite efectuar diagnósticos y pronósticos del funcionamiento de los sistemas fluviales, tanto en condiciones naturales como intervenidas; sin embargo, su cuantificación es compleja (Andreazzini et al. 2014).

Entre las diversas metodologías existentes para la estimación de aporte de sedimentos en cuencas, el modelo empírico de Gavrilovic (Gavrilovic 1959, 1988; Zemljic 1971), es uno de los más aplicados por su simplicidad, especialmente en regiones como las del presente estudio, donde son inexistentes las estaciones de aforos de sedimentos y donde los registros climáticos son discontinuos, alejados y escasos (Dragičević et

al. 2016, 2017; Tadić y Štjuka 2018; Ennaji et al. 2022). Este método ha sido utilizado por el Instituto Nacional del Agua (INA) en el marco de trabajo para la Formulación del Programa Estratégico de Acción de la Cuenca del Río Bermejo (Brea et al. 1999; Brea y Spalletti 2010), financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial, como así también para el Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Entre los estudios recientes de cuencas vinculados a la ocurrencia de flujos, pueden mencionarse los de Esper Angillieri (2007, 2008, 2012, 2014, 2020); Perucca y Esper Angillieri (2011); Esper Angillieri y Perucca (2014b; a); Esper Angillieri et al. (2016, 2017, 2020); Esper Angillieri y Fernandez (2017); Alam et al. (2021); Ginesta Torcivia et al. (2021); Singh y Pandey (2021); Víg et al. (2022).

El principal objetivo de este trabajo es estimar la tasa de crecimiento de cuatro abanicos aluviales a partir de la comparación temporal de sus superficies aplicando métodos topográficos y mediante el cálculo empírico de producción de sedimentos de sus cuencas de aporte. Para el análisis topográfico se utiliza información LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) registrada durante el año 2015 y VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) registrada en 2021.

Varios autores han optado por la utilización de VANT para estimación de volumen, mediciones de la tasa de erosión y análisis morfológicos (Marzoff y Poesen 2009; Oleire-Oltmanns et al. 2012; Peter et al. 2014; Stöcker et al. 2015; Imaizumi et al. 2019; Dai et al. 2022; Al-Mamari et al. 2023), entre otras aplicaciones.

Se espera contribuir al conocimiento de la vulnerabilidad de la región y generar información que resulte de base para los ingenieros y/u otros profesionales a la hora de planificar la inserción de nuevas infraestructuras. Además, es posible conocer la ocurrencia de flujos rápidos y/o aluviones que pueden constituir un peligro geológico de origen natural, de importancia prioritaria en cualquier actividad vinculada con la planificación del espacio y el ordenamiento territorial, particularmente en áreas de montaña, que permitan a través de organismos públicos y privados, prevenir y/o mitigar los efectos que estos peligros puedan ocasionar sobre la población y construcciones civiles presentes y futuras.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el departamento Iglesia, aproximadamente a 145 km al norte de la ciudad capital de la provincia de San Juan y comprende un sector de la Ruta

Nacional N°150 (Figura 1). Se seleccionaron cuatro abanicos aluviales (Coordenadas centrales. aba1. 30°12'50.48"S, 69° 0'53.84"O; aba2. 30°12'48.86"S, 69° 0'43.18"O; aba3. 30°12'55.52"S, 68°59'49.58"O; aba4. 30°12'57.76"S, 68°59'45.21"O) que coincidían geográficamente con un relevamiento topográfico Lidar efectuado en el año 2015, con el objeto de poder llevar a cabo la comparación buscada.

El clima es árido tipo desértico, la precipitación media anual es de 46.86 mm (periodo 1952 – 1994), 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 (estación hidrometeorológica Rodeo 30°11'S - 69°13'O - Departamento de Hidráulica).

El río principal de la región es el río Jáchal, se trata de un río permanente con un caudal medio anual de 9 m³/s. Drenan hacia él, una serie de arroyos tributarios y quebradas de régimen efímero, que nacen de las sierras precordilleranas, con orientaciones predominantes sursuroeste-nornoreste, que en algunos casos siguen líneas de fracturas. Los flujos rápidos constituyen uno de los procesos de remoción en masa más ampliamente distribuidos en la región, rellenando valles, quebradas y aportando a la superficie de los abanicos aluviales. En general son depósitos de pocos metros de espesor, matriz sostén y mal seleccionados, en los cuales predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques).

Este sector pertenece a la región desértica del Monte que recorre el oeste de Argentina. Este bioma se extiende desde la latitud de 24°35'S en la provincia de Salta hasta los 44°20'S en la provincia de Chubut, y se sitúa en las cuencas internas de los Andes de Catamarca, La Rioja y en la Precordillera de San Juan (Abraham et al. 2009). El Monte es una región climáticamente árida en la porción septentrional (Morello 1958) y fresca en la meridional (Cabrera 1994). La vegetación se caracteriza por una estepa arbustiva con predominio de especies de la familia Zygophyllaceae (*Larrea divaricata*, *L. cuneifolia* y *Bulnesia retama*), las estepas edáficas de arbustos halófitos como *Suaeda divaricata*, *Atriplex spp.*, *Allenrolfea vaginata* y el bosque dominado por especies del género *Neltuma* (ex *Prosopis*) (Morello 1958; Cabrera 1994; Alvarez et al. 2006).

Geología Regional

El sector seleccionado de la Ruta Nacional N°150 pertenece al ámbito de la provincia geológica Precordillera (Bodenbender 1902). Las principales unidades aflorantes se describen en la Figura 2. Las más antiguas se corresponden con la *Formación Yerba Loca* (Astini 1994) y *Formación Alicaparroza* (Harrington y Leanza 1957), ambas de edad ordovícica. La primera está compuesta principalmente por gravacas de grano mediano a grueso color gris a verde claro y

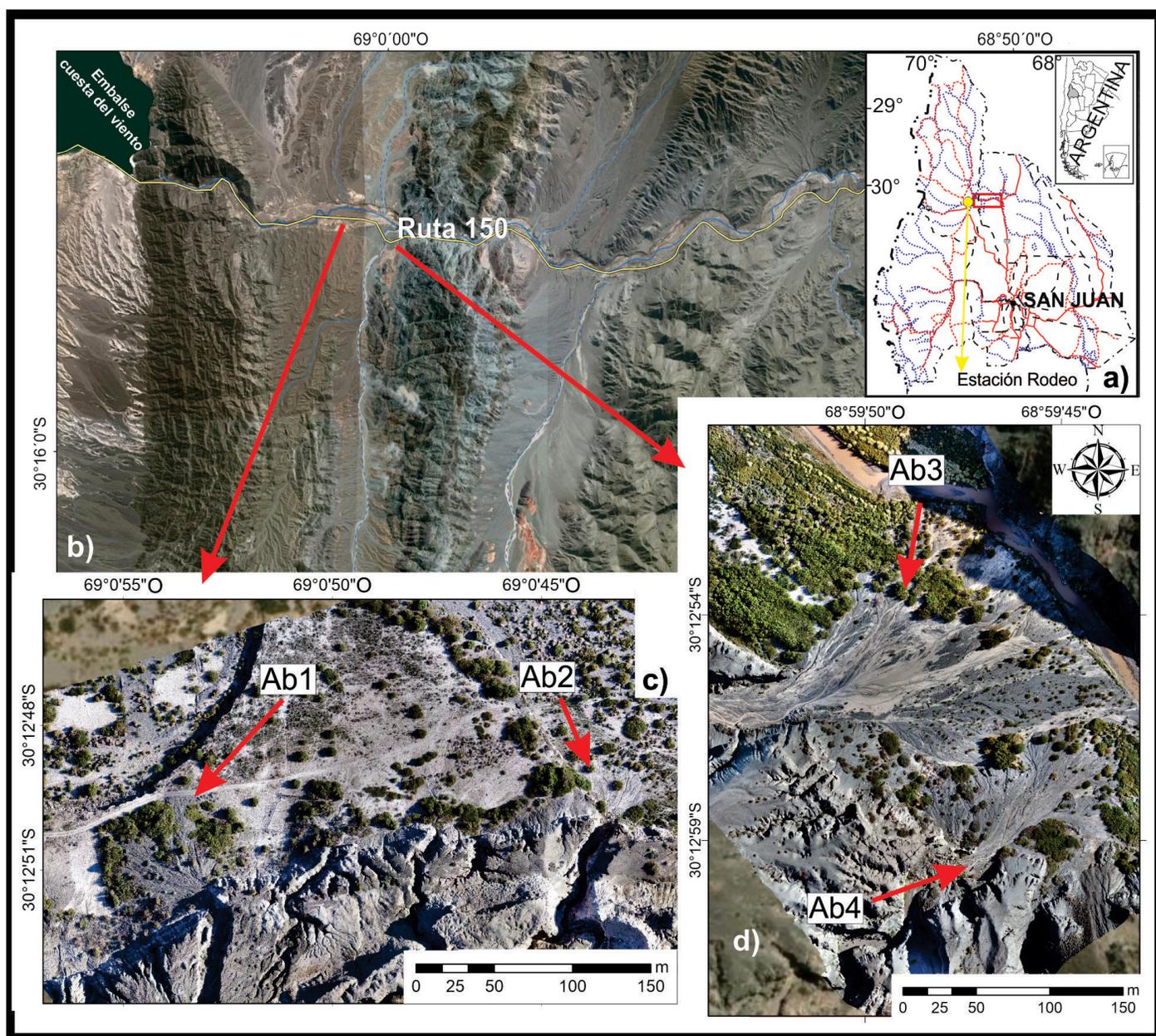


Figura 1: a) ubicación del área dentro de la provincia de San Juan, en líneas de puntos azules cursos fluviales principales, en líneas rojas vías de acceso (trazo discontinuo huellas, trazo continuo rutas provinciales y nacionales), punto amarillo ubicación de la estación hidrometeorológica Rodeo. b) Ubicación de los abanicos relevados topográficamente. c) abanicos 1 y 2. d) abanicos 3 y 4.

lutitas grises. La otra, por lavas almohadilladas que afloran como ofiolitas. Sobre las unidades Ordovícicas se registran de forma discordante unidades del Neógeno y corresponden a la *Formación Las Flores* (Wetten 1975) constituida por flujos y lluvias de cenizas intercaladas con areniscas y areniscas piroclásticas (Bercowski 1993); la *Formación Puesto La Flecha* (Caselli et al. 2002), con pelitas laminadas y masivas de un característico color rojo, con intercalaciones de yeso y niveles de conglomerados clasto-soportados; la *Formación Cuesta del Viento* (Suriano et al. 2011), formada por brechas gris verdosas con dos importantes intercalaciones pelíticas

y la *Formación Rodeo* (Heim 1952), redefinida por Suriano et al. (2011) compuesta por conglomerados, areniscas finas, potentes bancos de tobas blancas con arcilias y limonitas intercaladas. Finalmente, afloran los *Depósitos recientes*, cuaternarios, constituidos por aglomerados, fanglomerados y conglomerados no consolidados. Son depósitos mal seleccionados, con abundante matriz areno-limosa y clastos de diferentes formas y tamaños de metamorfitas, granitoides, sedimentitas, etc. En distintos sectores comprenden a todos los depósitos inconsolidados y de diferentes granulometrías que rellenan los valles y las zonas interserranas.

METODOLOGÍA

Utilizando modelos digitales de elevación con 30 m de resolución (ASTER GDEM V3-NASA 2019), se delimitaron automáticamente las cuencas asociadas a los cuatro abanicos aluviales, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando los algoritmos de dirección del flujo y acumulación de flujo. Las direcciones de flujo se calcularon usando el modelo de flujo de dirección ocho (D8) (O'Callaghan y Mark 1984). Se utilizó el mismo modelo digital de elevaciones para la determinación de la diferencia de nivel media y la pendiente de cada cuenca, además se calculó área (A), perímetro (P), longitud de la cuenca (L) y longitud de cauce principal (Lcp).

Para la comparación de volúmenes de material depositado, se realizó el procesamiento de información topográfica LIDAR obtenida en 2015 y se realizaron campañas de campo con el objeto de analizar la actividad de las geoformas seleccionadas y realizar nuevos relevamientos topográficos con VANT. Para ello se determinaron las diferencias de volumen, mediante el software ArcMap Pro. Entendiendo que ese valor de volumen obtenido corresponde a un periodo de 6 años, éste dividido por el área promedio del abanico para obtener la tasa de crecimiento (m/6 años). La información LIDAR está georreferenciada en el Marco de Referencia Geodésico POS-GAR07, proyección Gauss - Krüger Faja 2 y el modelo digital del terreno (MDT), se almacena en formato de nube de puntos ".las" y posee un error calculado promedio de -0.09m. Para el relevamiento topográfico con VANT se utilizó un Dron Multirrotor, modelo DJI M210. Este equipo posee una cámara de 20,4 megapíxeles la cual permite obtener imágenes de alta calidad. Para generar el Modelo Digital del Terreno, se utilizó el Software Pix4D, con un error promedio de 0.05 m.

Finalmente, se aplicó un método empírico para la estimación de aporte de sedimentos en las cuencas. Se seleccionó la metodología de Gavrilovic (Gavrilovic 1959, 1988; Zemljic 1971), que estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca y fue aplicada con buenos resultados en diversas zonas de montaña de Sudamérica, y en particular en Argentina, en la región del noroeste y en la Patagonia (Brea y Spalletti 2010). Ésta, estima la descarga media anual de material erosionado, a través del producto de la producción media anual de sedimentos por erosión superficial (W) y el coeficiente de retención de sedimentos (R).

Ambos parámetros se calculan separadamente.

$$G = W \times R \text{ (m}^3\text{/año)}$$

G: descarga media anual de material erosionado

W: producción de sedimentos

R: coeficiente de retención de sedimentos

$$W = T \times h \times \pi \times Z^{3/2} \times F \text{ (m}^3\text{/año)}$$

W: producción media anual de sedimento por erosión superficial

T: coeficiente de temperatura (°C).

h: precipitación media anual (mm/año). Fuente de datos Estación meteorológica Rodeo

F: superficie de la cuenca en estudio (km²)

Z: coeficiente de erosión, tabulado (Spalletti y Brea 1998; Brea et al. 1999).

$T = [(t / 10) + 0.1]^{1/2}$ coeficiente de temperatura (°C).

t: temperatura promedio anual. Fuente de datos Estación meteorológica Rodeo

$Z = X Y (\phi + 1)^{1/2}$ coeficiente de erosión

X: coeficiente de uso del suelo, tabulado (Spalletti y Brea 1998; Brea et al. 1999) y estimado según las características geológicas de la cuenca (Figura 2).

Y: coeficiente de resistencia del suelo a la erosión, tabulado (Spalletti y Brea 1998; Brea et al. 1999) y estimado según las características geológicas de la cuenca (Figura 2).

ϕ : coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado, tabulado (Spalletti y Brea 1998; Brea et al. 1999) y estimado según las características geológicas de la cuenca (Figura 2).

I: pendiente superficial del terreno (%), estimada mediante la obtención de un mapa de pendientes a partir de modelos digitales de elevación con 30 m de resolución (ASTER GDEM V3-NASA 2019).

$R = [(OD)^{1/2} (Lc + Li)] / [(Lc + 10) F]$ coeficiente de retención de sedimentos

O: perímetro de la cuenca (km)

D: diferencia de nivel media en la cuenca (km)

Lc: longitud máxima del cauce principal (km)

Li: longitud total de los afluentes fluviales laterales (km), obtenido a partir de la interpretación de imágenes satelitales.

F: superficie de la cuenca (km²)

Finalmente, en búsqueda de resolver algunas incongruencias, se aplicó otro método empírico (Vanoni 2006) para el cálculo de R, solamente en función de la superficie de la cuenca (F), cuya expresión es:

$$R = 0.4724F - 0.125$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cuencas relacionadas a los abanicos 1 y 2 poseen un área inferior a 1 km², la del abanico 3 es la más extensa con una superficie que supera 140 km², mientras que la del abanico 4 posee una superficie de 2.5 km². Todas las cuen-

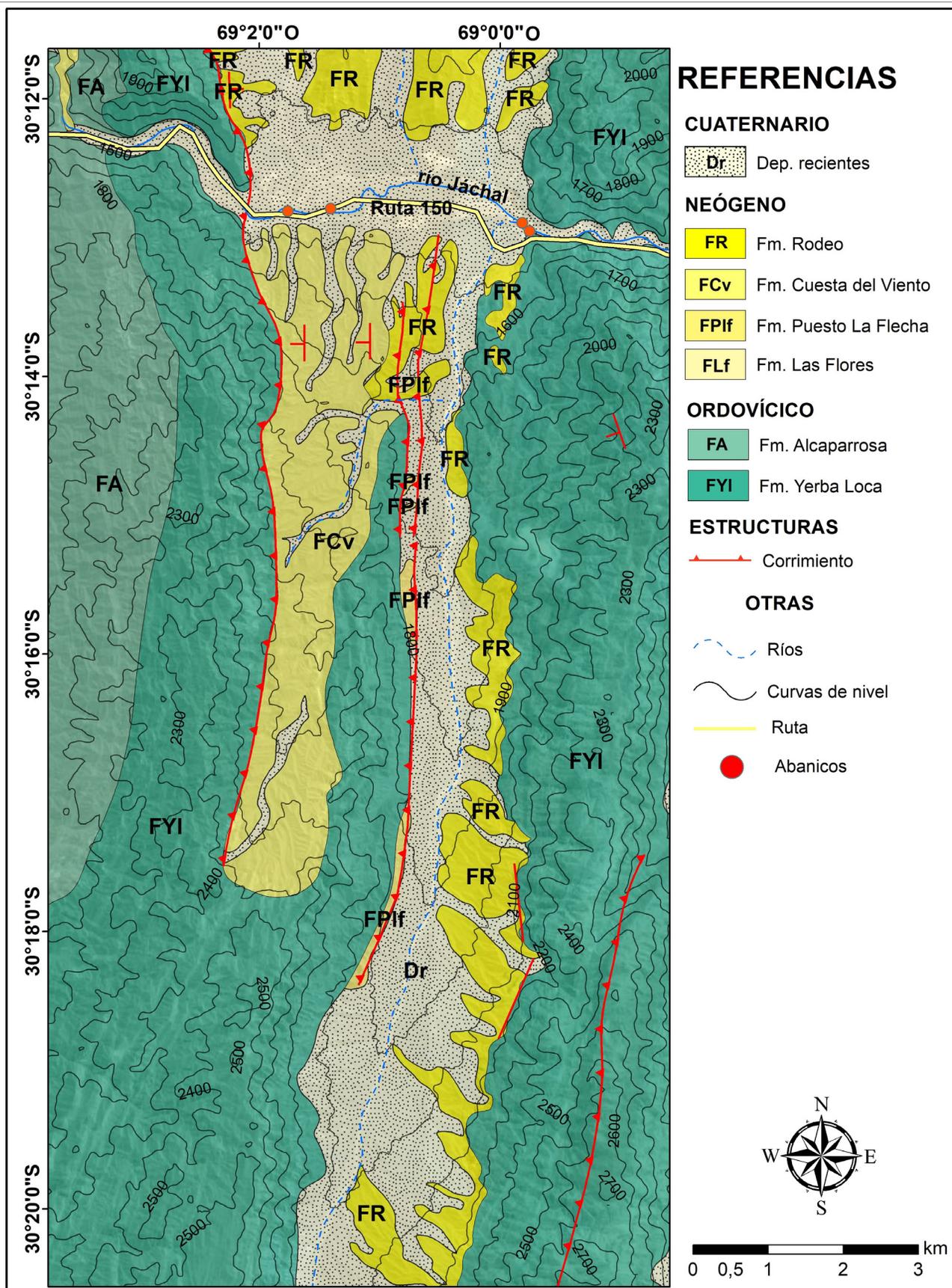


Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio.

cas poseen desniveles verticales considerablemente altos en relación al cauce principal, potenciando la energía erosiva de los arroyos, ante la presencia de precipitaciones, movilizándolo y transportando todo aquel material disponible. Los parámetros morfométricos de cada cuenca, se resumen en la Tabla 1.

Los parámetros morfométricos de las cuencas guardan estrecha relación con la ocurrencia de flujos de detritos y la consiguiente formación de los abanicos aluviales. De estos, en general, el área de la cuenca es el factor que más se relaciona con el aporte de sedimentos (De Scally y Owens 2004). Existe una correlación positiva entre las superficies de la cuenca y del abanico aluvial (Giles 2010; Benvenuti et al. 2016). Sin embargo, estas generalidades no siempre se cumplen y están extremadamente relacionadas a las condiciones particulares de cada abanico en lo referente a la disponibilidad de material, en cada cuenca, de ser removido, transportado y efectivamente depositado; también en lo referente a la posibilidad de erosión de los mismos, como el caso de las zonas distales de los abanicos 3 y 4, que están constantemente siendo erosionados por la acción del río Jáchal.

La transferencia de material sólido dentro de la cuenca y hacia la zona de depositación es principalmente un proceso netamente fluvial. Sin embargo, para los sistemas como las cuencas estudiadas, es decir, cuencas que se caracterizan por corrientes efímeras pero súbitas, los procesos involucrados son más complejos y están relacionados con la ocurrencia principalmente de flujos de detritos que alcanzan rápidamente su caudal de punta e incorporan abundante carga sólida (siempre que exista disponibilidad de material susceptible de ser removido) que luego depositan también bruscamente, generalmente constituyendo un abanico.

Por otro lado, para la aplicación del método empírico de Gavrilovic, los valores asignados al coeficiente de uso del suelo (x) y el coeficiente de resistencia del suelo a la erosión (y), surgen de analizar la litología aflorante (Figura 2) en las cuatro cuencas estudiadas. En su mayoría con gran participación de rocas sedimentarias del tipo areniscas y pelitas muy meteorizadas en las cabeceras de las cuencas y depósitos recientes no consolidados, que actúan como material perma-

nentemente disponible para alimentar los abanicos. Para la cuenca 1 existe un predominio de brechas de la *Formación Cuesta del Viento* y depósitos recientes (cauces y procesos de remoción en masa en laderas y taludes). Para la cuenca 2, predominan los depósitos recientes y la *Formación Rodeo* (conglomerados, areniscas y limonitas intercaladas). Para la cuencas 3 y 4 existe una participación predominante de gravacas y de lutitas de la *Formación Yerba Loca* y depósitos recientes, en la cuenca 3 afloran, además, las unidades de la *Formación Rodeo*.

Por su parte, la cobertura de la vegetación es escasa (<28%), dominada por arbustos y, en menor medida, árboles y herbáceas. Las poblaciones de arbustos se ubican en sectores distintos al cauce activo de cada cuenca, más específicamente en zonas topográficamente más elevadas como pequeñas terrazas fluviales o barras estables. Este patrón de distribución ha sido documentado para ambientes aluviales similares en el Desierto del Monte (Flores et al., 2019; 2024)..

Tasas de crecimiento mediante VANT

Mediante interpretación de imágenes satelitales se determinó que para el año 2015 el abanico 1 tenía una superficie medible de 6500.20 m² y de 6595.02 m² para el 2021, la comparación de sus volúmenes (Tabla 2) resultó de +2915 m³. En lo que respecta al abanico 2, con una superficie de 2525.44 m², no se observaron diferencias mapeables en superficie, sin embargo sus volúmenes calculados arrojan diferencia de +870.28 m³. Para los abanicos 3 y 4, se observó una disminución en sus superficies mapeables, de 28116.26 m² para el 2015 y de 26309.32 m² para el 2021; y de 4669.46 m² para el 2015 y 4445.47 m² para el 2021, respectivamente, debido al accionar del río Jáchal en el sector distal de los mismos. A pesar de la disminución en sus superficies, los volúmenes calculados arrojan diferencias de +11387.95 m³ para el abanico 3 y de +2037.62 m³ para el abanico 4.

Estos valores resultantes, indican un incremento en los volúmenes depositados de cada abanico relevado en 6 años (entre 2015 y 2021), ver Tabla 2. Conociendo la dinámica de cada cuenca, es decir, cuencas altamente activas alimentadas por flujos de detritos con frecuencia anual y con material permanentemente disponible de ser removido, transportado y depositado, comparando los valores obtenidos de material depositado, estos arrojan valores lógicos y similares de crecimiento (Figura 3 y 4). Además, debido a la cercanía de las cuencas estudiadas (2 km de distancia máxima), sus características morfométricas, de orientación y disposición, con litologías aflorantes de características similares, estarían afectadas por los mismos sistemas de precipitaciones torrenciales

Tabla 1: Parámetros morfométricos de cuencas. Área (A), perímetro (P), longitud de la cuenca (L), altura máxima (H), altura mínima (h) y longitud de cauce principal (Lcp).

Cuenca	A [km ²]	P[km]	L [m]	H [msnm]	h [msnm]	Lcp [m]
1	0.437	4.836	2187.200	1735	1456	2491.680
2	0.907	4.557	1841.090	1706	1450	2020.460
3	140.80	77.12	27433.76	3584	1430	32674.63
4	2.5	7.18	2575.62	2267	1450	3490.20

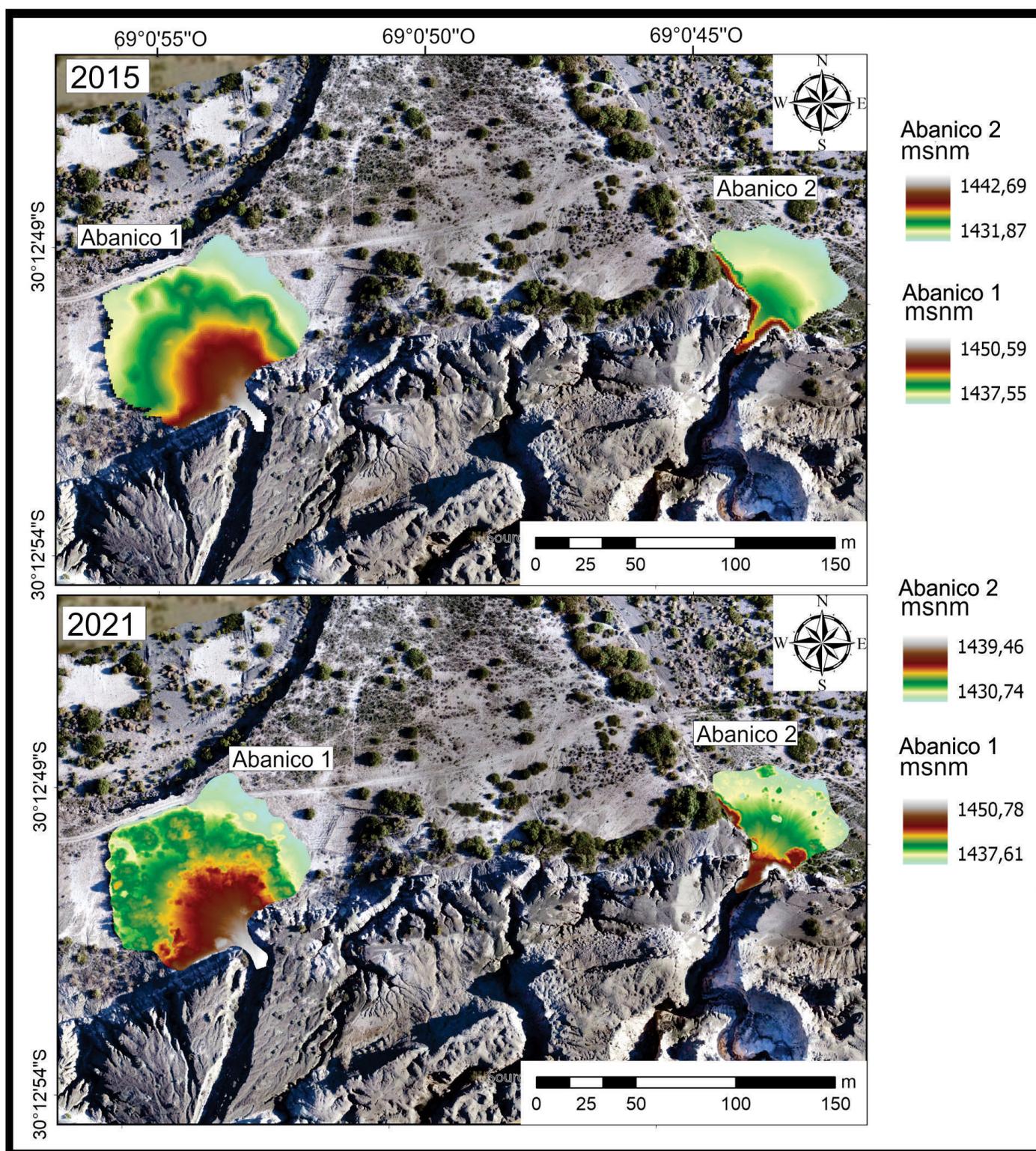


Figura 3: Modelos digitales de elevación de los abanicos 1 y 2 calculados para el año 2015 y 2021.

y por lo tanto es de esperar que el mismo volumen de agua precipitada, en cuencas de similares características, movilice y deposite similares volúmenes de material.

Los relevamientos de campaña permitieron analizar los distintos depósitos asociados a cada cuenca. En la Figura 5,

se pueden observar depósitos con importante participación de detritos cuyos tamaños varían de menos de 1 cm a 8 cm, consistentes con depósitos del tipo flujo de detritos. Las figura 5b y 5c muestran que los depósitos asociados al abanico 2 tienen más participación de finos. Además, existe una alcan-

Tabla 2: Valores resultantes de los cálculos 2015 y 2021 y sus comparaciones.

Abanico	Área 2015 [m ²]	Área 2021 [m ²]	Área promedio [m ²]	Volumen 2015 [m ³]	Volumen 2021 [m ³]	Diferencia Volumen [m ³]	Crecimiento [m/6años]	Crecimiento estimado [m/año]
1	6500.20	6595.02	6547.61	24397.22	27312.22	2915	0.44	0.074
2	2525.44	2525.44	2525.44	3552.1	4422.38	870.28	0.34	0.0574
3	28116.26	26309.32	27425.58	163603.51	174991.46	11387.95	0.41	0.069
4	4669.46	4445.47	4557.46	19816.44	21854.06	2037.62	0.44	0.074

tarilla, asociada a esta cuenca, que continuamente permanece parcialmente obstruida por la ocurrencia de flujos y el arrastre de vegetación y basura (Figura 5d).

Si bien los distintos relevamientos de campo permiten concluir que las alcantarillas, en el sector de estudio, no son capaces de drenar todo el sedimento producido en las cuencas, no hay evidencia sustancial que sugiera que las fallas de las alcantarillas están relacionadas con la capacidad limitada para transmitir las descargas de diseño (Cafferata et al. 2004). Una causa más frecuente de falla de la alcantarilla, es la acumulación de sedimentos y/o material en la entrada de

la misma, bloqueándolas parcialmente (Foltz et al. 2008). Las alcantarillas son efectivas para eventos de precipitaciones frecuentes y limitados en intensidad, sin embargo, para el tipo de sistema asociado al área seleccionada, las alcantarillas incrementan la susceptibilidad de las infraestructuras de ser afectadas considerablemente (Mourad et al. 2022).

Producción de sedimentos de las cuencas de aporte

Los valores asignados y obtenidos para cada uno de los parámetros intervinientes en el cálculo empírico de produc-

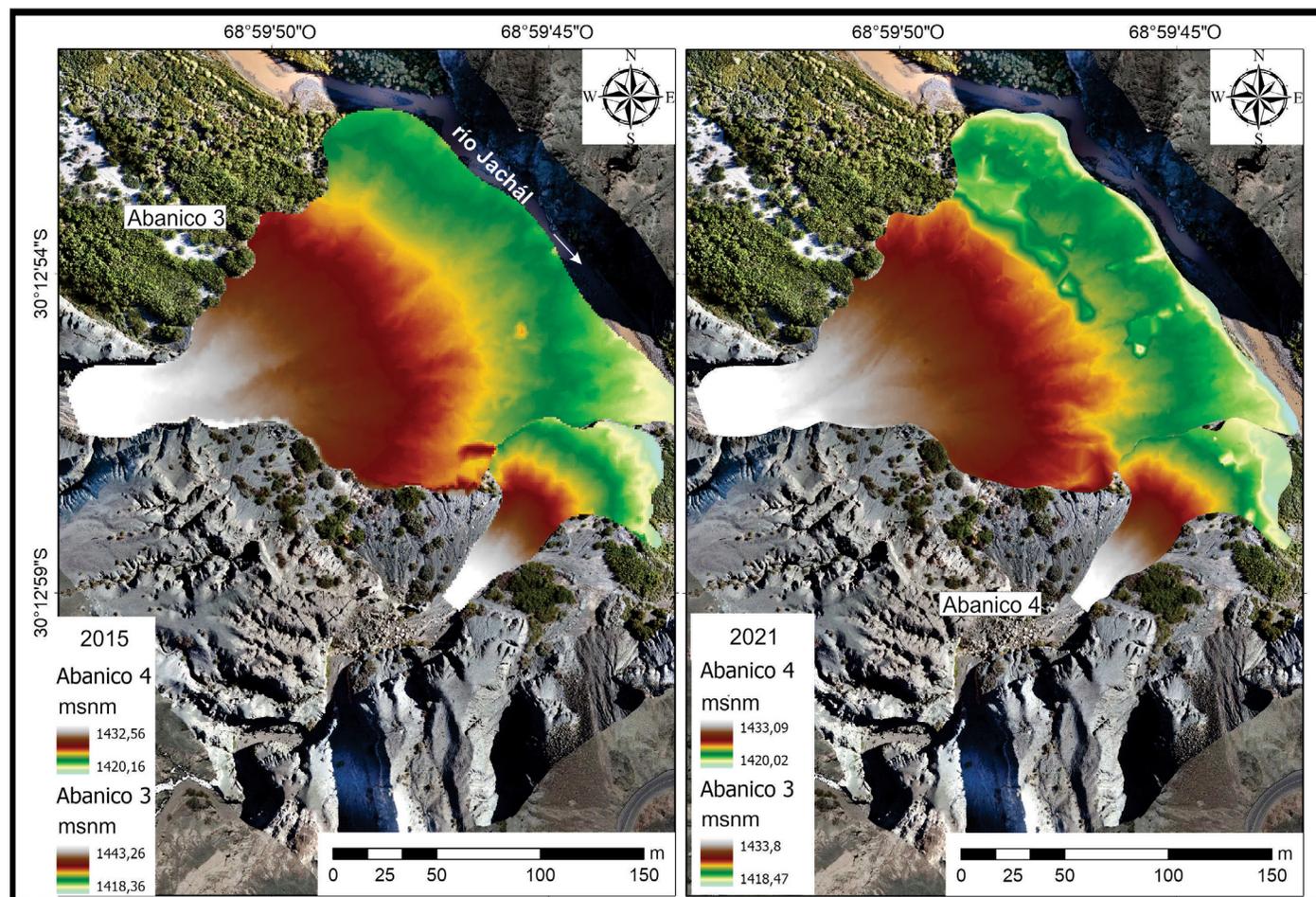


Figura 4: Modelos digitales de elevación de los abanicos 3 y 4 calculados para el año 2015 y 2021.

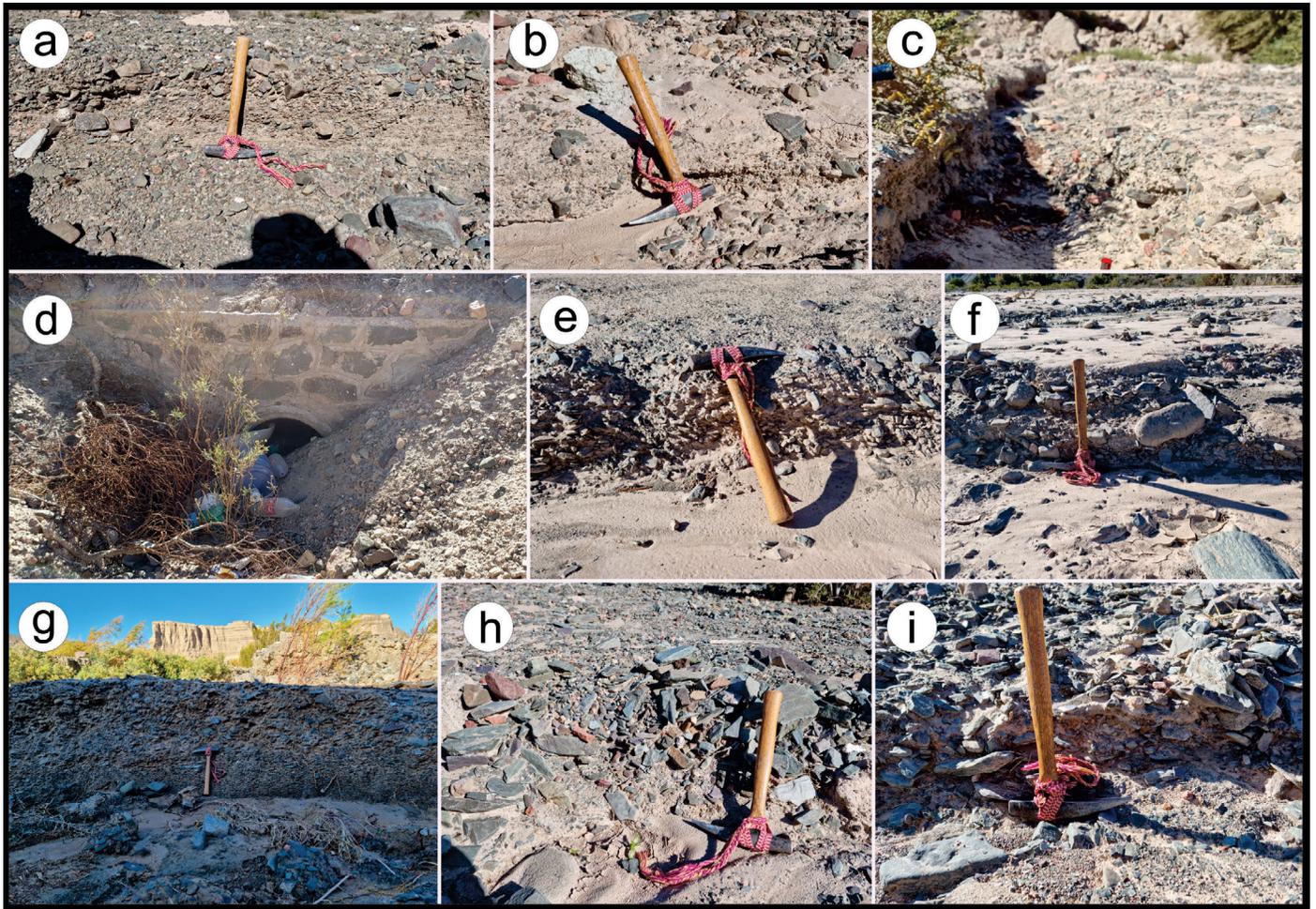


Figura 5: Depósitos de flujos asociados a los abanicos relevados. a) depósitos abanico 1; b,c) depósitos abanico 2; d) alcantarilla obstruida asociada a la cuenca 2; e, f y g) depósitos abanico 3; h e i) depósitos asociados al abanico 4.

ción de sedimentos pueden observarse en la Tabla 3.

Los resultados obtenidos por el método Gavrilovic (método empírico) versus los volúmenes calculados por relevamiento topográfico arrojan valores distintos, en algunos casos superiores (cuencas 3 y 4) y en otros inferiores (cuencas 1 y 2). Principalmente puede observarse una gran discrepancia para la cuenca de mayor superficie (cuenca 3). Las diferencias observadas se deben principalmente al carácter empírico del método empleado, a la asignación de los coeficientes, donde no necesariamente se consideran para su obtención todas las variables, factores o parámetros que intervienen en los procesos estudiados. Por ejemplo, parámetros como la actividad tectónica, que controla la red de drenaje y contribuye a la degradación de las rocas, y la lluvia antecedente, que reduce la infiltración y favorece el escurrimiento, no son tenidos en cuenta. Además, existe un grado de incertidumbre por la falta de estaciones meteorológicas, con registros de precipitación y temperatura continuos, próximas a las cuencas estudiadas (es necesaria información más puntual y precisa

sobre las tormentas) y/o pérdidas por erosión hídrica y eólica que no se consideran en el método empírico. Sin embargo, Tazioli (2009), realizó una comparación entre el método de Gavrilovic y mediciones directas de sedimentación en distintas cuencas de Italia y África, concluyendo que este método es particularmente útil para cuencas pequeñas y medianas. Además, Jaime y Spalletti (2007) aplicaron este método, con muy buenos resultados, para estimar la producción de sedimentos por erosión superficial en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo. Farias et al. (2003) realizaron estimaciones para la producción de sedimentos en cuencas en la Región NOA y concluyeron que, la metodología empleada es recomendada para una primera aproximación como un valor de cálculo para la predicción de las potenciales tasas de sedimentación en el embalse a proyectar. Andreazzini et al. (2014) concluyeron, aplicando la metodología en las sierras de Córdoba, que a pesar del carácter estimativo de la metodología empleada, los resultados obtenidos son consistentes y que ese análisis podría ser extendido a otras cuencas de características simi-

Tabla 3: Valores y cálculos para la determinación de la tasa de producción de sedimentos de cada cuenca mediante el método de Gavrilovic. I: pendiente media superficial del terreno, ϕ : coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado, X: coeficiente de uso del suelo, Y: coeficiente de resistencia del suelo a la erosión, O: perímetro de la cuenca, D: diferencia de nivel media en la cuenca, Lc: longitud máxima del cauce principal, Li: longitud total de los afluentes fluviales laterales, t: temperatura promedio anual, F: superficie de la cuenca, h: precipitación media anual, R: Coeficiente de retención de sedimentos, T: Coeficiente de temperatura, Z: coeficiente de erosión, W: Producción media anual de sedimento por erosión superficial, G: Descarga media anual de material erosionado, V: volumen calculado por diferencia de superficies.

Cuenca	I [%]	ϕ	Y	X	O [km]	D [km]	Lc [km]	Li [km]	t [°C]	F [km ²]	h [mm/año]
1	20.51	0.3	1.1	1	4.84	0.169	2.44	6.44	14.41	0.44	46.87
2	16.37	0.3	0.9	1	4.56	0.101	2.12	8.18	14.41	0.91	46.87
3	26.41	0.3	0.9	0.8	77.12	0.974	32.78	466.65	14.41	140.8	46.87
4	40	0.2	0.9	0.8	7.18	0.31	3.49	16.14	14.41	2.5	46.87
		R			T [°C]		Z		W [m ³ /año]	G [m ³ /año]	V [m ³]
1		1.47			1.24		5.31		984.070	1443.89	2915.00
2		0.63			1.24		3.91		1286.07	815.08	870.28
3		0.72			1.24		3.91		199348.89	143254.41	11387.95
4		0.87			1.24		4.70		4650.41	4038.34	2037.62

lares en Sierras Pampeanas.

Como es lógico, la superficie, morfología y extensión de estos tipos de abanicos aluviales, es decir, abanicos muy activos y alimentados frecuentemente por flujos de detritos, están controladas, en principio, por los procesos deposicionales y, posteriormente, por los procesos que modifican la morfología deposicional original, el balance entre ambos procesos determinará la morfología y extensión resultante (De Haas et al. 2014).

Por otro lado, se observaron incongruencias en el cálculo del parámetro R (Tabla 2) que representa la cantidad de material que es retenido en la cuenca, principalmente para la cuenca 1 donde el valor obtenido es mayor a 1. Incongruencias en el cálculo de R, obtuvieron (Brea y Spalletti 2010), que concluyen que la valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos de una cuenca resulta, pues, improbable en la práctica, a excepción de aquellos sitios en que se disponga de información fidedigna para proceder al ajuste de la metodología, debido a la complejidad del proceso erosivo, al número de factores y procesos que influyen en el mismo, como la temperatura o las precipitaciones en las cuencas. No obstante, señalan los autores, los métodos empíricos constituyen una herramienta eficaz a la hora de evaluar alternativas de manejo de las cuencas de aporte.

Analizando los parámetros empíricos que se consideran para el cálculo del coeficiente de retención de sedimentos (perímetro y superficie de la cuenca, desnivel, longitud de cauce principal y de los afluentes laterales) se puede observar que la variable subjetiva es la determinación de la longitud total de los afluentes fluviales laterales que es directamente proporcional a R, la cual para el presente trabajo se obtuvo por interpretación de imágenes satelitales, distinguiendo cauces activos o de reciente actividad de aquellos en los que

la evidencia geomorfológica y la colonización de vegetación pudieran indicar la no actividad, no obstante su cuantificación es subjetiva y directamente relacionada con la experticia del profesional que la cuantifica y la disponibilidad de imágenes satelitales actuales y de buena resolución.

Finalmente, en búsqueda de resolver algunas incongruencias, se aplicó otro método empírico (Vanoni 2006) para el cálculo de R, solamente en función de la superficie de la cuenca (F), cuya expresión es $R = 0,4724F^{-0.125}$.

Aplicando este cálculo, los valores de R resultan en 0.523, 0.478, 0.2545 y 0.4212, para las cuencas 1 a 4, respectivamente, lo que implicaría una retención de prácticamente el 50% para cada cuenca, excepto para la cuenca 3 (área 140 km²), valores aparentemente más esperados y consecuentes para el tipo de cuencas estudiadas, resultando así en volúmenes más cercanos a los relevados topográficamente, de 514.67 m³, 614.74 m³, 50734.29 m³ y 1958.75 m³ para las cuencas 1 a 4, respectivamente. Estos volúmenes calculados mediante la fórmula de Vanoni, aparentemente corrigen el valor de R de la cuenca 1 y brindan valores de retención más adecuados para el resto de las cuencas y aunque resultan en volúmenes más cercanos a los relevados topográficamente para las cuencas 1, 3 y 4, el valor de la cuenca 2, con Gavrilovic, obtuvo mejores resultados. Finalmente, estos datos, resultan como primeras aproximaciones en el cálculo de aporte de sedimentos en cuencas efímeras sujetadas al accionar constante de procesos de remoción en masa y nos brindan las bases para futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares alcanzados, mediante la com-

paración de los modelos digitales de elevaciones obtenidos para cada una de las geoformas asociadas a la dinámica de cada cuenca (abanicos aluviales), señalan un crecimiento positivo en los volúmenes de material o sedimentos calculados en los cuatro abanicos, para el periodo estudiado (2015 - 2021).

Son de importancia las incertidumbres respecto a ambas metodologías empleadas. Reemplazando el cálculo del coeficiente de retención de sedimentos se logra una mayor aproximación de resultados por ambas metodologías. Independientemente de las inconsistencias, se contribuye al conocimiento general de la problemática en el área seleccionada, entendiendo además que los presentes son resultados preliminares; se espera poder seguir con el relevamiento topográfico, con una frecuencia anual, de los abanicos seleccionados y complementar con otros estudios como la implementación de varillas de sedimentación. Estudios como el efectuado en este trabajo ofrecen importante información de base para posteriores estudios de organización y explotación de recursos hídricos como también de análisis de susceptibilidad y/o peligrosidad a la ocurrencia de flujos destructivos en vías de comunicación. Sin una correcta planificación, estas obras de infraestructura son vulnerables al impacto de estos procesos. Uno de los factores influyentes más evidentes es el de alterar los canales y/o la implementación de puentes y alcantarillas. En muchos de los casos registrados y por diversos motivos, las obras diseñadas para mitigar los efectos de las crecidas empeoraron la situación, lo que expone lo vulnerable de su diseño e implementación sobre los cauces de los ríos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CIGEOBIO (CONICET-UNSJ) por los fondos aportados para la adquisición de la licencia del software ArcGISPro. Este trabajo de investigación ha sido financiado por el proyecto CICITCA 21/I1392. Los autores agradecen a los revisores y al editor por sus invaluable comentarios que sin dudas contribuyeron a mejorar el presente trabajo.

Trabajos citados en el texto

Abraham, E., del Valle, H.F., Roig, F., Torres, L., Ares, J.O., Coronato, F., Godagnone, R. 2009. Overview of the geography of the Monte Desert biome (Argentina). *Journal of Arid Environments* 73: 144-153.

Al-Mamari, M.M., Kantoush, S.A., Al-Harrasi, T.M., Al-Maktoumi, A., Abdarbo, K.I., Saber, M., Sumi, T. 2023. Assessment of sediment yield and deposition in a dry reservoir using field observations, RUSLE and remote sensing: Wadi Assarin, Oman. *Journal of Hydrology* 617: 128982.

Alam, A., Ahmed, B., Sammonds, P. 2021. Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International* 575-576: 295-307.

Alvarez, J., Villagra, P., Cony, M., Cesca, E., Boninsegna, J. 2006. Estructura y estado de conservación de los bosques de *Prosopis flexuosa* D.C. (Fabaceae, subfamilia: Mimosoideae) en el noreste de Mendoza (Argentina). *Revista Chilena De Historia Natural* 79 (1): 75-87.

Andreazzini, M.J., Degiovanni, S., Spalletti, P.D., Irigoyen, M. 2014. Producción de sedimentos en una cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: estimación para distintos escenarios. Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe. Programa Hidrológico Internacional; Aqua-LAC; 6: 38-49.

Astini, R. 1994. Sucesiones calcáreo silicoclásticas coetáneas del Ordovícico inferior de la Precordillera y su significado en la evolución de la cuenca. 5a Reunión Argentina de Sedimentología 1: 113-118.

Benvenuti, M., Bonini, M., Moroni, A. 2016. Tectonic control on the Late Quaternary hydrography of the Upper Tiber Basin (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology* 269: 85-103.

Bercowski, F. 1993. Facies piroclásticas en el Terciario del valle de Iglesia, provincia de San Juan, Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos 4: 206-215. Mendoza.

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.

Brea, D., Busquets, M., Spalletti, P. 1999. Generación y Transporte de Sedimentos en la Alta Cuenca del Río Bermejo. Impacto en la Hidrovía, Delta del Paraná y Río de la Plata. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente. PEA Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo.

Brea, J.D., Spalletti, P.D. 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. COBINABE, Buenos Aires, 230p.

Cabrera, A.L. 1994. Regiones fitogeográficas argentinas. En Kugler, W. (ed.), *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*, t 2, pp. 57 p. Buenos Aires.

Cafferata, P., Spittler, T., Wopat, M., Bundros, G., Flanagan, S., 2004. Designing Watercourse Crossings for Passage of 100-year Flood Flows, Wood, and Sediment, California Forestry Report 1, 39 p.

Calderón Mosquera, E.C., Rojas Campos, G. V. 2008. Intervención de trabajo social en obras de infraestructura vial Transmilenio, proyectos Instituto de Desarrollo Urbano IDU Bogotá.

Caselli, A.T., Marensi, S., Tripaldi, A., Limarino, C.O., Gagliardo, M. 2002. Analisis paleoambiental y correlacion estratigrafica de la Formacion Puesto La Flecha (Terciario), Provincia de La Rioja. 15° Congreso Geologico Argentino, Actas 1: 679-683, El Calafate.

Dai, W., Qian, W., Liu, A., Wang, C., Yang, X., Hu, G., Tang, G. 2022. Monitoring and modeling sediment transport in space in small loess

- catchments using UAV-SfM photogrammetry. *CATENA* 214: 106244.
- De Haas, T., Ventra, D., Carbonneau, P.E., Kleinhans, M.G. 2014. Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering. *Geomorphology* 217: 165-181.
- Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N. 2016. A review of the Gavrilović method (erosion potential method) application. *Gradjevinar* 68: 715-725.
- Dragičević, N., Karleuša, B., Ožanić, N. 2017. Erosion Potential Method (Gavrilovic method) sensitivity analysis. *Soil and Water Research* 12: 51-59.
- Ennaji, N., Ouakhir, H., Halouan, S., Abahrour, M. 2022. Assessment of soil erosion rate using the EPM model : case of Ououmana basin, Middle Atlas, Morocco. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1090: 12004.
- 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: 104504.
- Esper Angillieri, M.Y. 2014. Debris flows susceptibility mapping in a portion of the Iglesia Department, San Juan, using GIS. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 267-274.
- Esper Angillieri, M.Y. 2007. El aluvión del 13 de Febrero de 1944 en la Quebrada del Carrizal, departamento Iglesia, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 283-288.
- Esper Angillieri, M.Y. 2008. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology* 55: 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., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L., Rother, 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: 513-519.
- Esper Angillieri, M.Y., Fernandez, 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: 150-156.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L., 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: 72-84.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L., 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* 102: 2(4): 1-21.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L.P. 2014a. Geomorphology and morphology of the de La Flecha river basin, San Juan, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 72: 3227-3237.
- Esper Angillieri, M.Y., Perucca, L.P. 2014b. Morphometric characterization of the Río Seco basin concerning strong rainfall in 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66: 235-245.
- Farias, H., Borsellino, M., Pilán, M. 2003. Técnicas para la Estimación de la Producción de Sedimentos en Cuencas con Escasos Datos Hidrológicos. Aplicaciones en la Región NOA. 1º Congreso Regional de Ciencia y Tecnología NOA. Catamarca.
- Flores, D., Ocaña, E., Rodríguez, A. I. 2019. Relationships between landform properties and vegetation patterns in the Cerro Zonda Mt., Central Precordillera of San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102359.
- Flores D., Ocaña E., Melián, E., Ortega A., Esper Angillieri M.Y., Pittaluga M.A., Vegetation response to soil and morphological properties in an arid region alluvial fan landscape. Pre-andes of San Juan, Argentina. *Journal of Earth Science*. Article in press.
- Foltz, R., Yanosek, K., Brown, T. 2008. Sediment concentration and turbidity changes during culvert removals, *Journal of Environmental Management* 87 (3): 329-340.
- Gavrilovic, S. 1959. Methode de la classification des bassins torrentiels et equations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide. *Vadoprivreda*, Belgrado.
- Gavrilovic, S. 1988. The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. Wallingford, England.
- Giles, P.T. 2010. Investigating the use of alluvial fan volume to represent fan size in morphometric studies. *Geomorphology* 121: 317-328.
- Ginesta Torcivia, C.E., Ocaña, R.E., Rios, N.N., Esper Angillieri, M.Y., Pereyra, M., Fernández, O.M., Gonzalez Alladio, C.G., Ruiz, E. 2021. 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. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78: 1-31.
- Harrington, H.J., Leanza, A.F. 1957. Ordovician Trilobites of Argentina. Department of Geology, University of Kansas Special Publication 1, 276p. Lawrence.
- Heim, A. (1952). Estudios tectónicos en la Precordillera de San Juan. Los ríos San Juan, Jachal y Huaco. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 7(1), 11-70.
- Heydt, G., Ortega-Becerril, J., Garrote, J. 2009. Las avenidas torrenciales en cauces efimeros: ramblas y abanicos aluviales. *Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 17(3): 264-276
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7: 221-238.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11: 167-194.
- Imaizumi, F., Masui, T., Yokota, Y., Tsunetaka, H., Hayakawa, Y.S., Hotta,

- N. 2019. Initiation and runout characteristics of debris flow surges in Ohya landslide scar, Japan. *Geomorphology* 339: 58-69.
- Jacob, A.C.P., Rezende, O.M., de Sousa, M.M., de França Ribeiro, L.B., de Oliveira, A.K.B., Arrais, C.M., Miguez, M.G. 2019. Use of detention basin for flood mitigation and urban requalification in Mesquita, Brazil. *Water Science and Technology* 79: 2135-2144.
- Jaime, P., Spalletti, P. 2007. Determinación de la producción de sedimentos por erosión superficial en La Cuenca Alta del Río Pilcomayo. En Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 69 p. Ezeiza, Buenos Aires.
- Marzloff, I., Poesen, J. 2009. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology* 111: 48-60.
- Méndez, W., González, Z., Suárez, J., Arauno, M., Vielma, M., Maiz, H. 2016. Geomorfología de los abanicos aluviales del piedemonte norte del macizo El Ávila, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación* 40: 95-128.
- Morello, J. 1958. La provincia fitogeográfica del Monte. Universidad Nacional del Tucumán, Instituto Miguel Lillo, 155 p. Tucumán.
- Mourad, K.A., Nordin, L., Andersson-Sköld, Y. 2022. Assessing flooding and possible adaptation measures using remote sensing data and hydrological modeling in Sweden. *Climate Risk Management* 38: 100464.
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team. ASTER Global 518 Digital Elevation Model V003. 2019, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 519 <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>. Accessed 2022-12-26.
- O'Callaghan, J.F., Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28: 328 – 344.
- Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K.D., Ries, J.B. 2012. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing* 4: 3390-3416.
- Perucca, L.P., 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.
- Peter, K.D., d'Oleire-Oltmanns, S., Ries, J.B., Marzloff, I., Ait Hssaine, A. 2014. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. *CATENA* 113: 24-40.
- Rowley, K., Hotchkis, R. 2014. Sediment transport conditions near culverts. En Huber, W. C. (ed.), *World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 141. American Society of Civil Engineers, Portland, Oregon, Estados Unidos.
- De Scally, F.A., 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.
- Singh, G., Pandey, A. 2021. Flash flood vulnerability assessment and zonation through an integrated approach in the Upper Ganga Basin of the Northwest Himalayan region in Uttarakhand. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 66: 102573.
- Spalletti, P., Brea, J. D. 1998. Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. 18 Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.
- Stöcker, C., Eltner, A., Karrasch, P. 2015. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry — A case study from Andalusia, Spain. *CATENA* 132: 1-11.
- Suriano, J., Alonso, M. S., Limarino, C. O., Tedesco, A. M. 2011. La Formación Cuesta del Viento (nov. nom.): una nueva unidad litoestratigráfica en la evolución del orógeno precordillerano. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 68(2), 246-260.
- Tadić, E., Šljuka, A. 2018. Erosion intensity assessment using erosion potential method and geographic information systems: A case study of Beočin municipality, Serbia. *Zbornik radova Departmana za geografiju, turizam i hotelijerstvo* 2018: 32-43.
- Tazioli, A. 2009. Evaluation of erosion in equipped basins: preliminary results of a comparison between the Gavrilovic model and direct measurements of sediment transport. *Environmental Geology* 56: 825-831.
- Vanoni, V.A. 2006. Sedimentation engineering. En *Sedimentation Engineering*, pp. 1-418.
- Víg, B., Fábian, S.Á., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Halmay, Á., Kovács, I.P., Varga, G. et al. 2022. Morphometric analysis of low mountains for mapping flash flood susceptibility in headwaters. *Natural Hazards* 114: 3235-3254.
- Wetten, C. 1975. Estudio geológico de un yacimiento de diatomitas y análisis de mercado. 2do Congreso Iberoamericano de Geología Económica 5: 513-529.
- Wolman, M.G. 1967. A Cycle of Sedimentation and Erosion in Urban River Channels. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 49: 385-395.
- Zemljic, M. 1971. Calcul du debit solide. Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. *International Symposium Interpretent, Villach, Austria*.