

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LOS INICIOS DE CAUCE EN LA CUENCA ALTA DEL ARROYO LA VENTANA (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF CHANNEL HEADS FROM THE LA VENTANA UPPER BASIN (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

González, Marilina Ayelén¹; Gentili, Jorge²; Gil, Verónica³
Resumen

Conocer la localización de los inicios de las redes fluviales y cuáles son los factores que intervienen en su formación es un tema de importancia en el estudio de las cuencas hidrográficas debido a que esta ubicación incide en la longitud de los canales, la densidad del drenaje o los tiempos de retardo de la cuenca. Estos son factores que repercuten en las inundaciones repentinas que caracterizan el área de estudio y representan un peligro para las poblaciones que allí se localizan. Por ello, el objetivo de esta investigación es identificar y caracterizar los inicios de cauces en un sector de la cuenca alta del arroyo La Ventana (provincia de Buenos Aires, Argentina) y su relación con las variables geomorfológicas que influyen en su localización (altitud, litología, área, pendiente y longitud) así como otros factores locales. Para este análisis se utilizó el Modelo Digital de Superficie ALOS PALSAR (resolución 12,5x12,5m), imágenes satelitales de Google Earth Pro®, cartas geológicas y trabajo de campo. Este análisis ha permitido hallar diferencias físicas significativas entre los inicios de cauces y las áreas de captación de las laderas norte y sur de la cuenca. La interpretación de los resultados sugiere que las variables físicas (pendiente, altitud, litología) independientemente no son determinantes en la formación del inicio de un canal, sino que son las interacciones que se desarrollan entre ellas y otros factores locales los que dan origen a la formación de los cursos fluviales.

Palabras clave: áreas de captación de flujo; morfometría fluvial; geomorfología fluvial; ambientes fluviales efímeros

Abstract

Knowing the location of channels heads and the factors that interfere with their formation are of great importance because they affect the length of the channels, drainage density, or delay times of the basin. These factors affect the flash floods that characterize the study area and represent a danger to the local population. Therefore, the objective of this research is to identify and characterize the river heads in a sector of the upper basin of the La Ventana stream (Buenos Aires Province, Argentina) and their relationship with the geomorphological variables that influence their location (height, lithology, area, slope, and length), as well as other local factors. For this analysis, the Digital Surface Model (resolution ALOS PALSAR 12,5x12,5m) Google Earth Pro® satellite images, geological charts, and fieldwork were used. This analysis made it possible to find significant physical differences between the streams and catchment areas of the northern and southern slopes of the basin. The interpretation of the results suggests that the physical variables (slope, height, and lithology) independently are not determinants in the formation of the beginning of a channel; rather, they are the interactions that develop between them and other local factors that give rise to the formation of river courses.

Key words: flow catchment areas; drainage network; fluvial morphometry; fluvial geomorphology; ephemeral fluvial environments.

¹ Licenciada en Geografía - Becaria Interna Doctoral (CONICET) - Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur

² Doctor en Geografía - Profesor Adjunto (UNS) e Investigador Adjunto (CONICET) - Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur

³ Doctora en Geografía - Profesora Adjunta (UNS) e Investigadora Independiente (CONICET) - Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur.

INTRODUCCIÓN

El análisis hidrogeomorfológico de una cuenca parte de identificar de manera exacta su red de drenaje y para esto es importante reconocer los inicios del cauce. Identificar y establecer los factores que intervienen en su formación es una tarea importante ya que esta localización afecta a la longitud de los canales de orden 1 y, por lo tanto, a la densidad de drenaje, lo que eventualmente influye en las tasas de transporte de agua y sedimentos y en los tiempos de retardo de la cuenca (Willgoose et al., 2003; Hancock y Evans, 2006; Henkle et al., 2011; Burak, 2015; Wohl, 2018; Shavers y Stanislawski, 2020; Płaczkowska et al., 2021).

Su estudio constituye, además, un aporte al conocimiento sobre la dinámica hidrogeomorfológica de los sistemas fluviales, siendo ello parte esencial en la toma de medidas vinculadas a la gestión de cuencas (Shavers y Stanislawski, 2020). En este sentido, Wohl (2018) afirma que, la extensión y la densidad de la red de drenaje afecta a la respuesta hidrológica de la cuenca y, por ello, reconocer el inicio de las redes hídricas es importante para comprender qué variables, relaciones y procesos intervienen y controlan su formación.

El área de captación, que eventualmente determinará un inicio de cauce, es definida como una zona de transición donde culmina la escorrentía difusa y comienza la escorrentía de flujo concentrada (Montgomery y Dietrich, 1992). Utilizando criterios geomorfológicos sería relativamente sencillo identificar las zonas de transición a través de una cartografía directa en el campo. Sin embargo, ello representaría en algunos casos una tarea lenta y subjetiva en relación con la diversidad de definiciones acerca de donde se inician los cauces (Senciales González, 1999; Clubb et al., 2014; Burak, 2015). Actualmente, a este tipo de análisis se suman distintos métodos y técnicas complementarias basadas en fuentes de datos como, por ejemplo, los Modelos Digitales de Superficie (MDS), que se han convertido en una herramienta esencial en geomorfología debido a la alta resolución temporal y espacial y su disponibilidad a escala global (Garrett y Wohl, 2017; Wohl, 2018; Walker et al., 2020; Li et al., 2020; Płaczkowska et al., 2021; Hancock y Willgoose, 2021).

Algunos de los principales precursores de la temática fueron Montgomery y Dietrich (1988, 1989, 1992), Dietrich et al. (1992), Willgoose et al. (1991, 1992), Bischetti et al. (1998), entre otros. Montgomery y Dietrich (1988, 1992) establecieron algunas fórmulas y teorías referentes al inicio de los cauces. Entre ellas afirman que, cuanto más cerca comienzan los canales de la línea divisoria de aguas, mayor será el número y la extensión de los canales de orden 1 y más fragmentado estará el paisaje. En sus aproximaciones metodológicas establecieron fórmulas referentes a la determinación del umbral de erosión para la iniciación de canales en las cuales relacionan factores cuantitativos como la pendiente, área y longitud. Otros autores no encontraron en sus áreas de trabajo una relación clara entre estas variables por lo que propusieron la incorporación de nuevos factores dinámicos a analizar como por ejemplo el clima del área, el grado de infiltración, la cubierta vegetal, los usos del suelo, los incendios, entre otros (Adams y Spotila, 2005; Colson, 2006; Clubb et al., 2014; Burak, 2015; Shavers y Stanislawski, 2020; Jarefjäll, 2021).

En Latinoamérica y en especial en Argentina, si bien existen numerosas investigaciones relacionadas al análisis, dinámica y características de las redes fluviales, en particular, la temática referente a los inicios de cauces presenta escaso desarrollo (Gil y Campo, 2011; Anderson et al., 2016; Quesada-Román y Zamorano Orozco, 2019).

Las cuencas que drenan por el Sistema de Ventania, donde se localiza el área de estudio, han sido ampliamente estudiadas desde el punto de vista hidrogeomorfológico con la finalidad de lograr una adecuada gestión del riesgo de inundaciones, una de las problemáticas más relevantes en la región (Gil et al., 2009; Gil, 2010; Gentili, 2012; Gil y Campo, 2012; Volonté, 2017; Moretto et al., 2019). Estas investigaciones, si bien presentan un amplio desarrollo en cuanto a la utilización de herramientas, metodologías y técnicas en el análisis hidrogeomorfológico, no abordan en particular el estudio de los inicios de cauces como un elemento a considerar en el análisis de red hidrográfica de las cuencas.

En la cuenca alta del arroyo La Ventana, los cauces permanecen secos la mayor parte del año por lo que el agua superficial solo fluye de forma esporádica durante episodios de tormenta. Este comportamiento efímero, sumado a otros factores

físicos de la cuenca como son su forma redondeada, su tamaño relativamente pequeño y sus elevados gradientes de pendientes, potencian los picos de crecidas lo que ocasiona inundaciones repentinas. Este tipo de funcionamiento repentino y esporádico, muchas veces impredecible, plantea desafíos al momento de abordar su estudio y gestión (Ollero *et al.*, 2021). El objetivo de esta investigación es identificar y caracterizar los inicios de cauces en un sector de la cuenca alta del arroyo

La Ventana (provincia de Buenos Aires, Argentina) y su relación con las variables geomorfológicas que influyen en su localización (altitud, litología, área, pendiente y longitud) así como otros factores locales como el uso del suelo y la vegetación. De esta manera se obtienen datos precisos para

conocer la dinámica geomorfológica e hidrológica de la cuenca, contribuyendo así a profundizar el análisis del peligro que representan las crecidas para las poblaciones que allí se localizan.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo La Ventana nace en el cordón denominado Sierras de la Ventana y junto con la cuenca del arroyo San Teófilo conforman la cabecera del río Sauce Chico (Figura 1). El área de estudio corresponde a la cuenca alta del arroyo La Ventana y posee una superficie total de 35 km². Su forma es redondeada y sus pendientes se encuentran en un rango que varía entre ~70° y zonas planas.

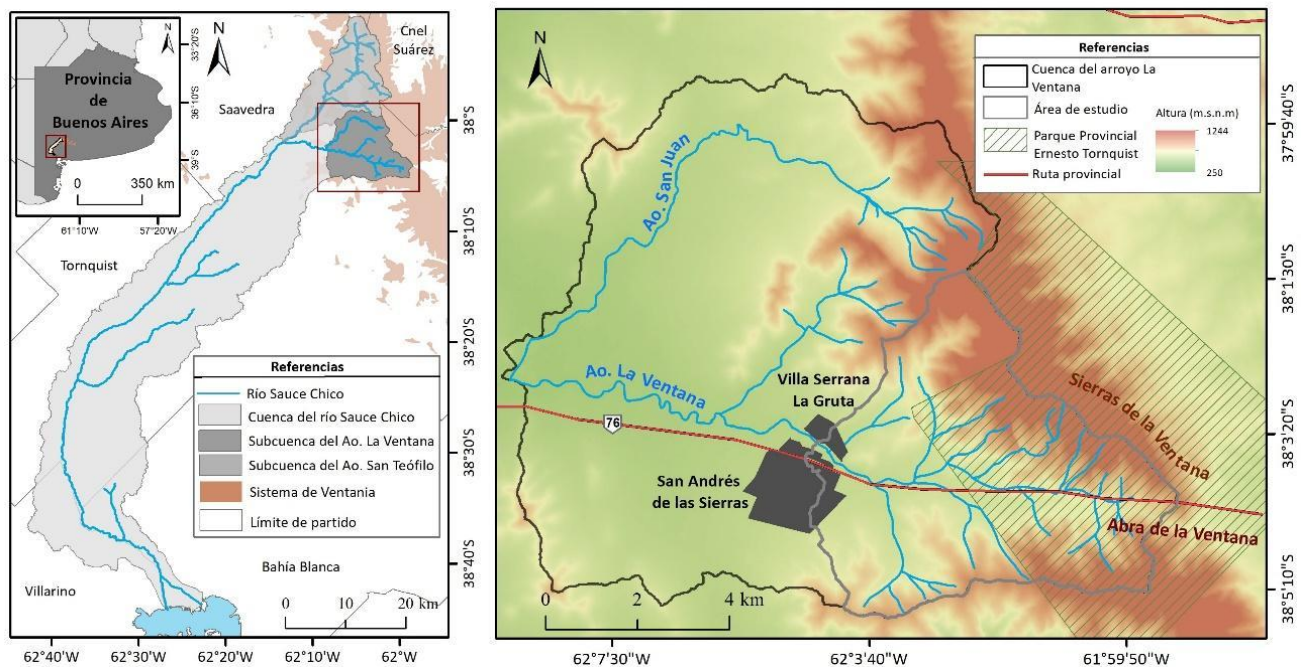


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

El clima de la región es templado con marcados contrastes térmicos estacionales y las precipitaciones se caracterizan por su variabilidad temporal y espacial (Campo de Ferreras *et al.*, 2004;) (Gil, 2010; Gentili, 2012; Casado y Campo, 2019; Volonté y Gil, 2019). La media anual de las precipitaciones para la zona es de 740 mm, registrándose años con valores de hasta 1.000 mm y otros por debajo de los 300 mm (García Martínez *et al.*, 2016). En particular para la cuenca del área de estudio, precipitaciones mayores a los 80 mm en el rango de un día suelen generar crecidas

repentinas. Localmente, Berón de la Puente *et al.* (2022) observaron que el sistema serrano modifica el comportamiento y los montos de las lluvias lo que reafirma la variabilidad espacial y altitudinal de las lluvias.

El 75% del área de estudio corresponde al ambiente serrano, en el cual predominan afloramientos rocosos con baja capacidad de infiltración y alto potencial de escurrimiento (Cappannini *et al.*, 1971; INTA, 2015). El relieve es abrupto y las laderas forman valles en “v” de

desniveles considerables. En esta área las sierras están representadas por cordones lineales bien definidos de rocas cuarcíticas plegadas correspondientes al grupo Ventana, de las formaciones Bravard -hacia el norte- y Napostá -hacia el sur- (Harrington, 1947; Sellés-Martínez, 2001). El cordón serrano se separa en sentido norte - sur por el Abra de la Ventana y en sentido este - oeste continúa seguido por una ruptura en las pendientes. En el piedemonte, zona de transición entre las sierras y la llanura, las pendientes oscilan entre los 10 y los 25° y se comporta como una zona de infiltración (Cappannini et al., 1971; Albouy y Bonorino, 1997). La llanura está conformada por materiales pleistocenos del Cuaternario (sedimentos loésicos) que cubrieron los bordes de las sierras.

El curso principal del arroyo La Ventana tiene 15 km de longitud y a lo largo del recorrido sus características físicas son variadas y están asociadas principalmente a la litología y el control estructural, a las diferentes permeabilidades de las capas sedimentarias, a los gradientes de las pendientes y las características edáficas del lugar. Esto determina que en algunos sectores existan formas de encajamiento acentuado y en otros amplios valles, algunos de ellos aterrizados (García Martínez et al., 2016). Los cursos de agua permanecen secos la mayor parte del año y presentan un lecho rocoso compuesto por arenas, gravas y bloques.

En términos productivos, el ambiente del piedemonte y la llanura se destinan principalmente a la ganadería pastoril. Hacia el sector medio de la cuenca se encuentran las localidades de Villa Serrana La Gruta y San Andrés de las Sierras. La primera de ellas es la más urbanizada, mientras que en la última se desarrolla una urbanización incipiente que en los últimos años se ha densificado. El sector noreste de la cuenca (aproximadamente un 46%) pertenece al Parque Provincial Ernesto Tornquist, creado en el año 1937 con el objetivo de conservar el último reducto del pastizal pampeano serrano, así como sus numerosas especies endémicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de la red de drenaje de la cuenca y las características físicas y morfométricas de los inicios de cauce y sus áreas de captación se utilizó el MDS ALOS PALSAR de 12,5x12,5m de

resolución espacial, obtenido del portal de Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) (JAXA, 2008). Utilizando esta fuente de datos se digitalizó una capa de puntos de los inicios de cauce obtenidos mediante este modelo. Para constatar la veracidad de estos inicios de cauce se emplearon imágenes satelitales de Google Earth Pro® del año 2022 (escala 1:2.000), y a través de fotointerpretación se desestimaron aquellos que no tuvieron coincidencia. Es decir, se consideraron como inicios de cauces aquellos puntos que coincidieron en ambas fuentes de datos y que fueron constatados en el terreno. El trabajo de campo consistió en el reconocimiento e identificación de cada uno de los inicios de cauces de ambas laderas. Se midieron y registraron características que se utilizaron luego para corroborar la información obtenida a través del MDS. La medición de los puntos de control se realizó con equipos GPS geodésicos Trimble 4800 de doble frecuencia. A través de este MDS y mediante funciones de ArcGIS®, se obtuvieron los atributos de altitud, área, pendiente y orientación de las laderas.

Con la función *point delineation* se obtuvieron los polígonos de las áreas de captación del flujo al punto identificado como el inicio del canal de orden 1. El umbral considerado para esta delimitación fue de 500 píxeles (González, Gil y Gentili, 2023). El criterio utilizado para definir las áreas de captación y los inicios de cauces es el propuesto por Munro (2010), quien explica que las aguas precipitadas en altura descienden por las áreas de captación hasta converger en pequeñas depresiones topográficas. Aquí es donde el agua se acumula y/o emerge para hacer un flujo superficial de saturación, a partir del cual nace un canal fluvial. Estos puntos de origen son los inicios de cauces (Dietrich y Dunne, 1993; Munro, 2010).

Una vez definidas y delimitadas las áreas de captación del flujo hacia los órdenes 1 se procedió a extraer y cuantificar los parámetros geométricos (área - perímetro - longitud) y características físicas (altitud - pendiente - orientación - litología) de cada área para caracterizar cuantitativa y cualitativamente las zonas (Figura 2). La longitud del eje máximo fue definida como la distancia entre el punto identificado como el inicio del cauce y la divisoria de la cuenca. La función *Add Surface Information* permitió interpolar los valores de altitud del MDS y así obtener la pendiente y la orientación de las pendientes de cada área de captación (*Slope*

y *Aspect*). Finalmente, se llevó a cabo la digitalización de las formaciones geológicas sobre la base de las cartas geológicas Sierra de Curamalal (33 m) y Sierra de la Ventana (34 m) a escala 1:200.000 del Servicio Geológico Minero

Argentino (SEGEMAR). Respecto a la diversidad de fuentes de datos utilizadas para este trabajo, cabe destacar que, se utilizaron aquellas fuentes de datos espaciales de mayor resolución espacial disponibles para el área de estudio.

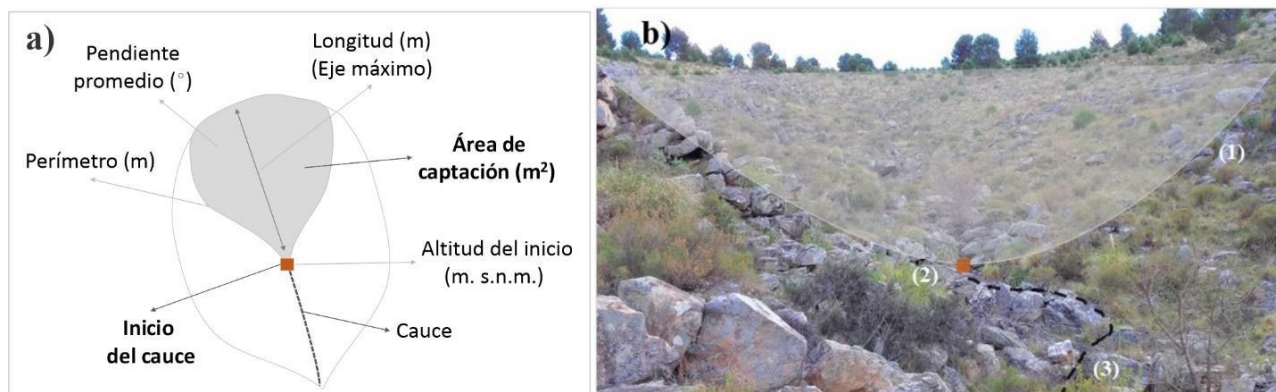


Figura 2. a. Esquema de parámetros de medición de inicio de cauces y áreas de captación; b. Fotografía tomada en campo. Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de establecer un análisis comparativo entre los datos obtenidos para cada ladera de la cuenca (norte y sur), se calcularon estadísticos de centralidad y dispersión para cada uno de los parámetros geométricos de las áreas de captación que, posteriormente, fueron luego representados en tablas y gráficos. También se realizaron gráficos de dispersión para visibilizar la relación altitud - pendiente y el área de captación - pendiente de las áreas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MARCO HIDROMORFOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.

La cuenca alta del arroyo La Ventana tiene 35 km² de superficie y sus altitudes oscilan en un rango que varía entre los 1.134 y los 407 m s.n.m (Figura 3 - a). El 55 % del área comprendida por la cuenca se encuentra en el rango entre los 407 y los 600 m s.n.m., un 30 % entre los 600 y los 800 m s.n.m. y el restante 15 % queda comprendido entre los 800 y los 1.134 m s.n.m. La litología del área está compuesta por afloramientos rocosos cuarcíticos (Grupo Ventana de edad Devónica) de los cuales 52,9 % corresponden a la formación Napostá y el 16,24 % a la formación Bravard. El material restante corresponde a la edad pleistocena y está formado por una secuencia de sedimentos areno-

arcillosos del pampeano alternados con capas de conglomerados poco coherentes, arcillas y sedimentos arcillo-arenosos, suelos modernos y el acarreo fluvial actual (Sellés Martínez, 2001). Los flancos de los plegamientos originan laderas pronunciadas con máximos de hasta 71 ° de pendiente (Figura 3 - b). La orientación de las laderas corresponde mayormente a la dirección sur-sureste y norte-noreste (Figura 3 - c).

En general, se observan las mayores altitudes y valores de pendiente en el sector norte de la cuenca (Figura 3 - 1). En esta ladera, la red de drenaje está fuertemente influenciada por la estructura y el tipo de roca lo que da lugar a trazados rectos, afluentes en forma angulosa, saltos y pequeñas cascadas. Las pendientes y altitud de la vertiente sur de la cuenca se caracterizan por ser significativamente menores que en la vertiente norte (Figura 3 - 2). El área posee una menor densidad de drenaje y los cauces se caracterizan por ser relativamente más amplios que en la vertiente norte. La totalidad de la ladera corresponde a la formación Napostá. Las diferencias en el relieve y las pendientes en ambas laderas responden principalmente al control de índole estructural que dominan en ambos sectores (Harrington, 1947) (Figura 3 - d).

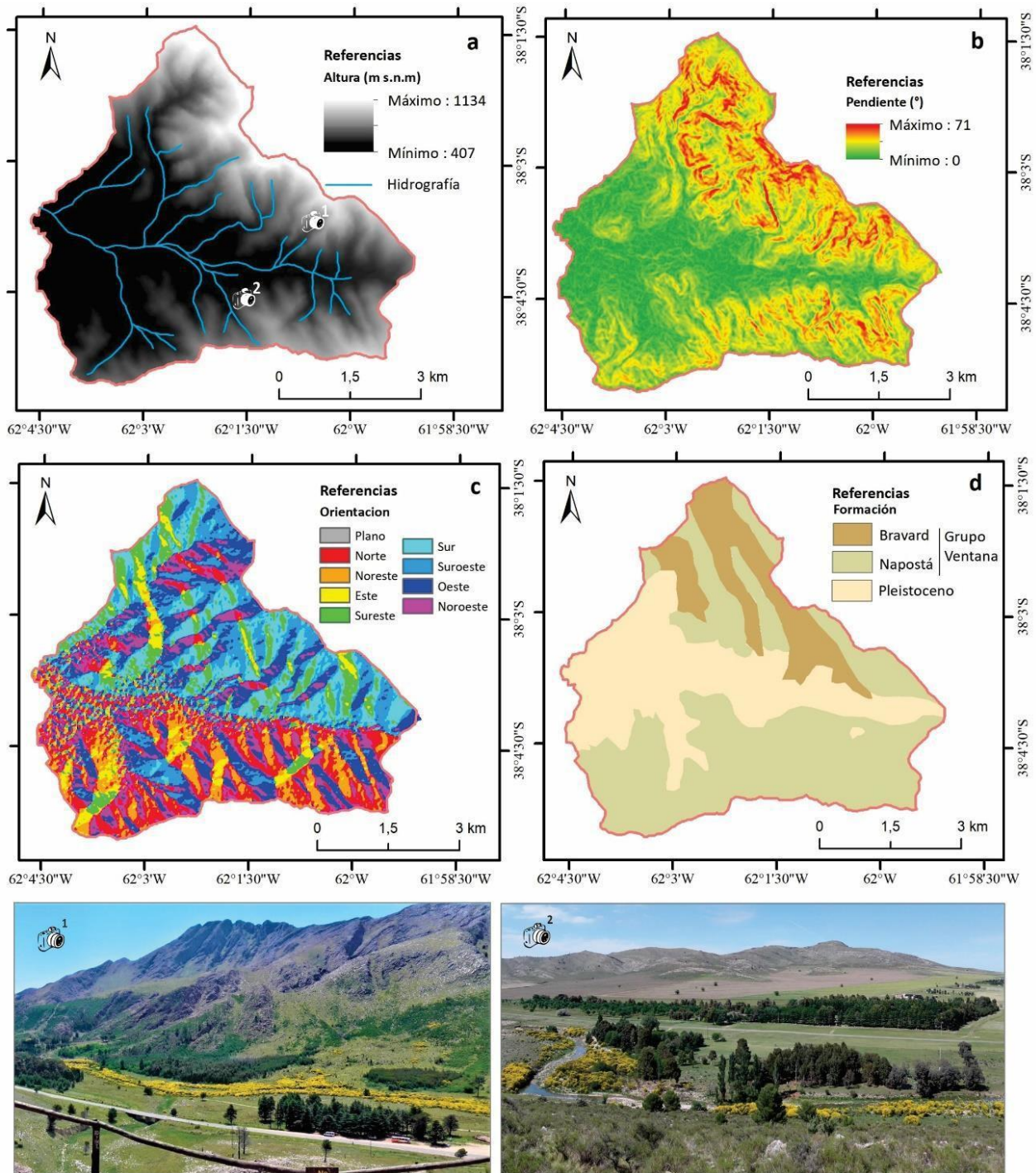


Figura 3. Principales características físicas utilizadas para la obtención de: a. Altitud y red hidrográfica; b. Pendientes; c. Orientación de las pendientes; d. Unidades litológicas; 1. Vertiente norte -las retamas (*Spartium junceum*) indican la ubicación del cauce-; 2. Vertiente sur. Fuente: elaboración propia.

Respecto a las características morfológicas generales de la red hidrográfica, se observa una marcada diferencia entre los patrones de drenaje entre el sector norte y sur. En el primero, si bien las líneas de escurrimiento siguen un patrón dendrítico, según la clasificación de Howard (1967) en algunos sectores los tramos presentan formas rectilíneas asociadas al alto control estructural producto del plegamiento característico de esta vertiente. Las fracturas que atraviesan los plegamientos obligan al agua a realizar cambios bruscos de dirección (Figura 4 -

a). Este tipo de patrón fue hallado por diferentes autores en otras cuencas del sistema serrano (Gil, 2010; Gentili, 2012; Volonté, 2017). García Martínez *et al.* (2016) caracterizaron este sector como un área con intenso diaclasamiento (sistemas transversales, longitudinales, de cizalla y de alivio de carga). Por el contrario, en el sector sur de la cuenca, los cauces de orden 1 así como la red en general, presentan un patrón de drenaje subdendrítico con tendencia al paralelismo (Figura 4 - b).

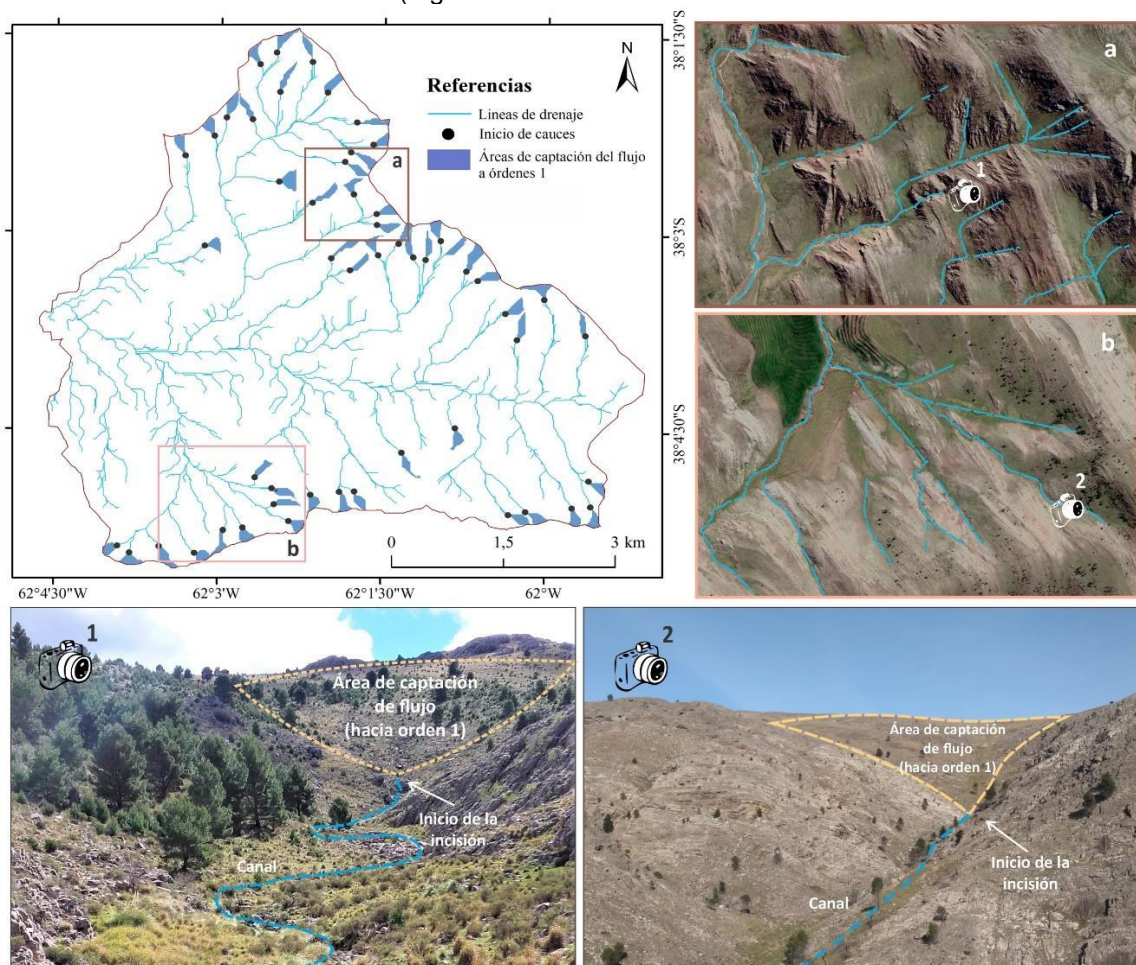


Figura 4. Localización de áreas de captación del flujo hacia los órdenes 1 extraídos a partir del MDS; 1 -vertiente norte, 2 -vertiente sur; a y b -fotografías tomadas en campo. Fuente: elaboración propia.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS ÁREAS DE CAPTACIÓN.

Se identifican 52 inicios de cauce, de los cuales 32 corresponden a la vertiente norte de la cuenca y 20 a la vertiente sur (Figura 4). La altitud máxima en la cual se localizó un inicio es de 1.003 m s.n.m., mientras que el más bajo se identificó a 488 m s.n.m. El área promedio de las

captaciones es de 27,7 m², siendo 45,6 m² el área mayor y 23,7 m² la menor. Respecto a las longitudes, la mayor presenta 486 metros mientras que el área de captación de menor longitud posee 173 metros. Las pendientes de las áreas oscilan entre los 62° y los 11° siendo 26° el valor promedio. Las variables que poseen mayor variación respecto a la media son la altitud de los inicios de cauces (σ : 132,4) y los perímetros de las áreas de captación (σ : 155). Las áreas se

distribuyen en un rango de aproximadamente 22 m², la longitud tiene un rango de 313 metros y la pendiente un rango de 51 ° (Tabla 1- a).

Con la finalidad de establecer diferencias o similitudes entre las características de los inicios de cauces y áreas de captación de ambas vertientes, y determinar qué variables poseen influencia en su formación, los datos fueron divididos según vertiente norte y sur (Vn y Vs respectivamente) (Tabla 1 - b). Teniendo en cuenta los promedios de las variables, se observa que las captaciones del flujo hacia los órdenes 1 de la vertiente norte presentan los datos máximos en todas las variables medidas y, a su vez, estos presentan mayor variabilidad que los datos correspondientes a la vertiente sur. La altitud mínima en la cual se identificó un inicio de cauce, así como el área de captación de menor pendiente se registran en la vertiente norte; el área mínima de captación para ambas pendientes es similar (23,8 m²), sin embargo, la longitud mínima, se registra en un área de captación localizada en la vertiente sur. Pese a que, en general, las áreas de captación presentan un promedio de superficie similar (27 m²), sus formas difieren dado que la longitud promedio del eje mayor de las áreas varía entre 354 y 272 metros para la Vn y la Vs respectivamente, lo que indicaría que las áreas de captación de los cauces en la primera son más elongadas que en la segunda.

En la tabla 2 se muestran los rangos de altitudes de los inicios de cauces discriminados según vertientes y formación geológica. Se observa que el 80 % de los inicios de cauces de la cuenca se encuentran entre los 600 y los 1000 m s.n.m. siendo entre los 600 y 800 donde se localizan la mayor parte. Se registraron 33 inicios de cauces en la formación Napostá y 19 en Bravard. Del total de los inicios de cauces que se desarrollan en la formación Napostá (63%), 13 se localizan en la Vn y 20 en la Vs. En la Vn, donde se encuentran ambos tipos de litologías, se hallan 19 inicios en la formación Bravard y 13 en Napostá. La primera está integrada por areniscas de grano mediano a grueso y la formación Napostá que sigue directamente a la de Bravard, está integrada por areniscas cuarcíticas muy homogéneas de grano fino a muy fino, compactadas, macizas y densas (Harrington, 1947). Estas diferencias en la composición de las litologías, traducido en la resistencia del material a la erosión por un lado y a la infiltración del agua por otro, podrían atribuirse como un factor que contribuye al inicio de un cauce. En relación con esto, Rabassa (1982) demostró cómo la densidad de drenaje está fuertemente ligada a las unidades litológicas superficiales. Gil *et al.* (2009) registraron en el sistema de Ventania diferencias en los valores de algunos parámetros morfométricos, entre ellos, la densidad de drenaje, vinculadas a variaciones en las litologías del lugar lo que concuerda con lo hallado en este trabajo.

a	Altitud del inicio de cauce (m s.n.m)	Área de captación (m ²)	Perímetro (m)	Longitud (m)	Pendiente media (°)
Promedio	743	27,39	1.051,43	322,06	26
Máximo	1003	45,59	1.450,58	486	62
Mínimo	488	23,75	825,33	173	11
σ	132,4	4,8	155	84,8	11,1

b	Altitud del inicio de cauce (m s.n.m)		Área de captación (m ²)		Perímetro (m)		Longitud (m)		Pendiente media (°)	
	Vn	Vs	Vn	Vs	Vn	Vs	Vn	Vs	Vn	Vs
Promedio	805,3	643	27,96	26	1091,9	987	353,5	272	27,34	23
Máximo	1003	843	45,6	29,2	1450,6	1325,5	486	423	62	45
Mínimo	488	532	23,8	23,8	850,3	825,3	205	173	11	13
σ	113,7	94,13	5,5	1,72	151,9	140,41	82,9	61,35	12,3	8,41

Tabla 1. Estadísticos de centralidad y dispersión de los inicios de cauces de la cuenca alta del Ao. La Ventana: a. totalidad de la cuenca; b. divididos según vertiente norte y sur (Vn-Vs). Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos sugieren que las características cuantitativas de las áreas de captación y los inicios de cauces de ambas vertientes son significativamente diferentes. El rango de altitudes de la Vn es más amplio en comparación con la Vs (Figura 5). En esta última el 50% de los datos se encuentran entre los 532 y los 617 m s.n.m. mientras que, en la Vn, excluyendo el valor atípico (488 m s.n.m.), el 50% de los datos se encuentra entre los 745 y 796 m s.n.m. Respecto a la distribución de las pendientes, (Figura 5) se observa que la vertiente norte presenta una mayor dispersión de los datos y el rango intercuartílico es significativamente mayor que la distribución de los datos de

pendiente de la vertiente sur. En este último, se encuentra un valor atípico que corresponde al valor máximo de la pendiente de los inicios de cauces (45°). El cuartil 1 coincide en ambas distribuciones, sin embargo, el 50% de las pendientes máximas de los inicios de cauces identificados en la vertiente sur poseen valores entre los 25° y los 37° (exceptuando el valor atípico de la distribución) mientras que el 50% de los valores máximos de la vertiente norte se encuentran en el rango entre los 25° y los 62°. Los valores de pendientes en esta última son significativamente mayores que en la vertiente sur.

Formación geológica	Altitud del inicio de cauce (m s.n.m.)								Total
	400-600		600-800		800-1000		1000-1200		
	Vn	Vs	Vn	Vs	Vn	Vs	Vn	Vs	
Napostá	1	8	7	10	5	2			33
Bravard			8		10		1		19
Total	9		25		17		1		52

Tabla 2. Distribución de las áreas de captación de la Vn y la Vs de la cuenca alta del Ao. La Ventana según grupo geológico y altitud. Fuente: elaboración propia.

Con la finalidad de identificar una posible relación entre las variables pendiente y altitud de los inicios de cauces se elaboró un gráfico de dispersión (Figura 6). Se observa una correlación no lineal de los datos, sin embargo, las variables no son totalmente independientes. Si se discrimina por vertientes se observa que en la vertiente sur la distribución indica una correlación positiva débil en comparación con los puntos de la vertiente norte que se encuentran distribuidos de manera aleatoria. Se da una correlación positiva entre las variables de pendiente y área para los datos de la Vs (Figura 6) dado que, en general para áreas de captación menores, la pendiente es menor, aunque, como en el caso

anterior, no se puede afirmar lo mismo para la Vn ya que los pares de datos de esta vertiente se encuentran dispersos y no puede asegurarse una relación. Henkle *et al.* (2011) observaron en sus áreas de estudio diferencias significativas en la relación área-pendiente según distintas elevaciones y lo atribuyeron a morfologías y profundidades del suelo diferentes. En el área de estudio, la vertiente norte, que presenta las mayores altitudes, es la ladera cuyas relaciones entre variables son más dispersas y esto puede atribuirse a las diferencias en la morfología del paisaje vinculada a las distintas litologías y pendientes del área.

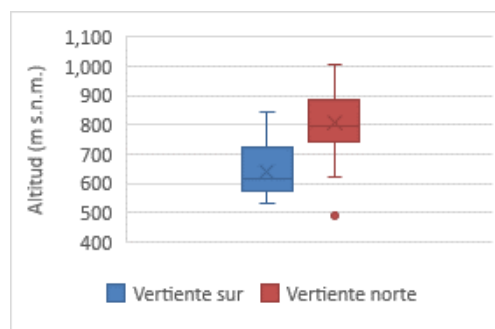
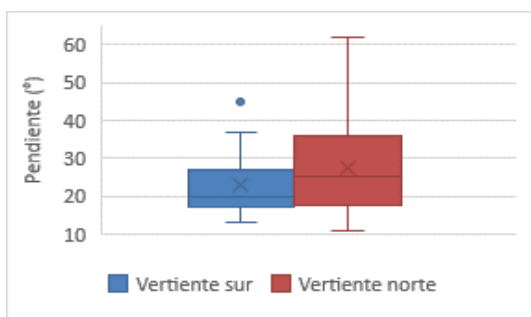


Figura 5. Diagrama de cajas para pendiente (°) y altitudes (m s.n.m.) de los inicios de cauces para la vertiente norte y sur de la cuenca alta del Ao. La Ventana. Fuente: elaboración propia.

Respecto a las morfologías, Montgomery y Dietrich (1988) clasificaron los inicios de cauces en su área de estudio (litologías de grauvaca intensamente deformada) como abruptos y graduales y plantearon que, si bien su identificación en el terreno resultó una tarea relativamente sencilla, este reconocimiento se volvió más subjetivo cuando el cauce comenzaba gradualmente. En el caso particular del área de estudio, la identificación visual tanto en el terreno como en las imágenes satelitales de alta resolución resultó relativamente más sencilla en la vertiente norte, donde los inicios de cauces son abruptos y bien definidos. Algunos presentan incisiones de varios metros o encajamientos en las paredes del cauce que permiten visibilizar y reconocer su localización. En la vertiente sur, los inicios de cauces son en su mayoría graduales y carecen de una cabecera distintiva, por lo que su identificación resultó más dificultosa. En esta ladera la red de canales es generalmente discontinua, algunos de ellos presentan varios cortes separados por pequeñas zonas sin cauces definidos (Figura 7 -b).

Las densidades de drenaje, inferidas a través del número de inicios de cauce identificados en cada ladera (32 en ladera norte y 20 ladera sur) son otro indicador de la variabilidad entre laderas. Rabassa (1982) observó para la cuenca del río

Sauce Grande, que la densidad de drenaje aumenta con el incremento en relieve relativo y porcentaje de roca de base aflorante, pero disminuye con el incremento de distancia planimétrica al punto más alto de la divisoria externa de la cuenca. Esto se pone en evidencia en el área de estudio y se vincula a su vez con las teorías de Montgomery y Dietrich (1988, 1992) y Dietrich y Dunne (1993) en lo referente a la densidad de drenaje de una cuenca y como ésta se encuentra influida por la localización de los inicios de cauce. La mayoría de los inicios identificados en la vertiente norte se localizaron a escasos metros de la divisoria de aguas de la cuenca, lo que para Dietrich y Dunne (1993) significa un mayor número de canales ocupando una unidad de área y un paisaje más disectado (Figura 7 - a). Esto puede comprobarse a través del número de inicios de cauces registrados en los resultados para cada vertiente (32 Vn y 20 Vs) y de la mayor densidad de drenaje de la vertiente norte respecto a la sur, como se indicó anteriormente (Figura 4). Cabe mencionar que en la vertiente norte se identificaron inicios de cauces que se originaron en su mayoría sobre afloramientos de roca correspondientes a la formación Bravard. Estos corresponden con los 8 inicios identificados entre los 600 y 800 m s.n.m. en la formación Bravard de la Tabla 1.

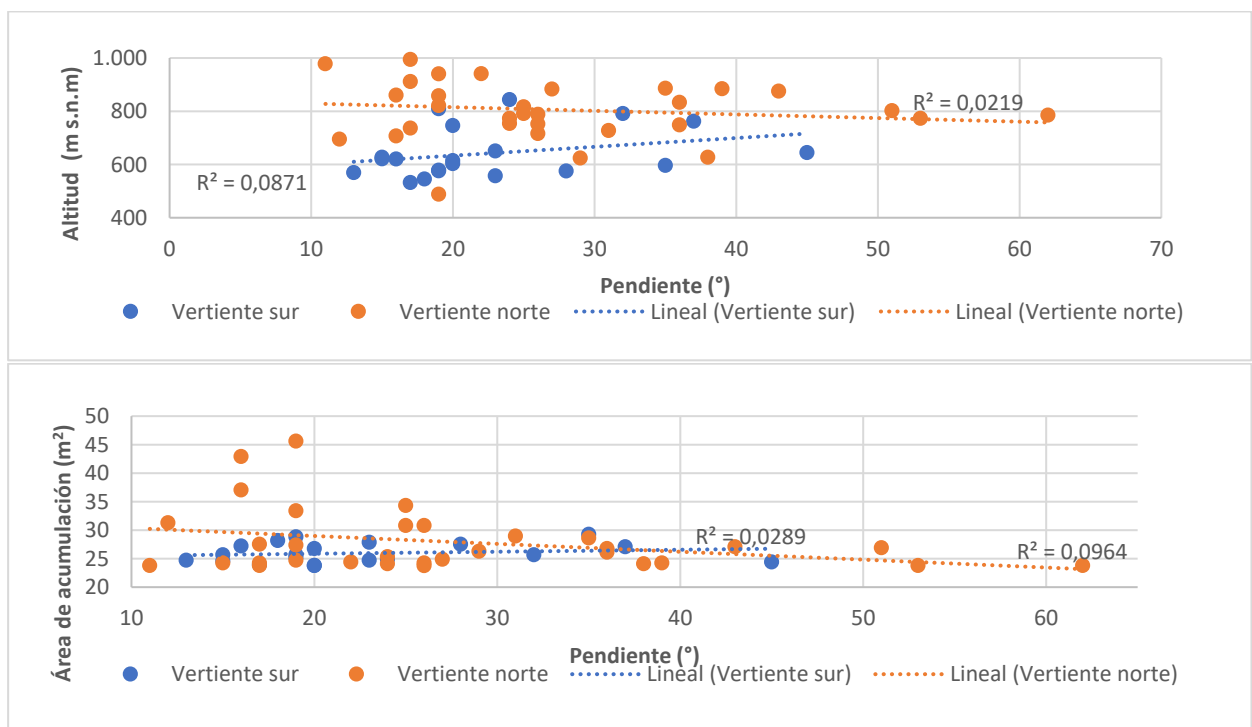


Figura 6. Gráficos de dispersión para altitud - pendiente y área de acumulación - pendiente correspondientes a los inicios de cauces de la cuenca alta del Ao. La Ventana. Fuente: elaboración propia.

Montgomery y Dietrich (1994) observaron que el área de captación requerida para iniciar un canal es en función de la pendiente local, excepto en áreas donde las propiedades del lecho rocoso controlan la ubicación de los inicios del canal. En el área de estudio, los valores de área y pendiente sugieren una relación débil para la V_n respecto a la observada para la V_s . Por consiguiente, y en consonancia con Montgomery y Dietrich (1994), esto podría indicar que los inicios de cauces de la V_n respecto a la V_s reflejan más la influencia del sustrato en la escorrentía. Henkle *et al.* (2011) demostraron en su estudio que los factores topográficos de la superficie explican aproximadamente la mitad de la variabilidad en las ubicaciones de los inicios de cauces. Mencionan otros elementos que crean dispersión y complejidad en los datos como son la infiltración, los incendios y los cambios en los usos del suelo. Por su parte, Istanbulluoglu *et al.* (2002) señalan que el único caso en el que los inicios de los canales observados en el campo pueden seguir la forma funcional de la relación entre el área y la pendiente es el caso especial en el que todos los parámetros físicos son constantes en el espacio y el tiempo.

A través del análisis realizado en este trabajo se puede comprobar que, si bien la ubicación de los inicios de cauces en la cuenca alta del arroyo La Ventana parece estar sujeta a los controles físicos (pendiente, altitud, litología), esta influencia no es tan fuerte como la demostrada por otros autores en otras regiones húmedas ya

que existen múltiples factores locales que influyen esta formación. A esto se suma la complejidad que otorga la variabilidad de las precipitaciones en tiempo y espacio. Frente a esto, Garret y Wohl (2017) sostienen que, los patrones y las correlaciones entre los elementos y factores que dan lugar a la formación de cauces y caracterizan las áreas de captación han sido bien estudiados en zonas templadas y húmedas donde el clima ejerce una fuerte influencia y existe una cobertura vegetal continua (Montgomery y Dietrich, 1988, 1989; Orlandini *et al.*, 2011; Julian *et al.*, 2012; Jefferson y McGee, 2013). Sin embargo, la comprensión de la distribución espacial de los inicios de cauces y las correlaciones entre las características físicas de estos en regiones más áridas o semiáridas, como en el caso del área de estudio, sigue siendo menos conocida y más compleja. Jarefjäll (2021) estudió las variables físicas de los inicios de cauce y las áreas de captación de la red fluvial de Suecia y en su análisis reveló correlaciones insignificantes o débiles a moderadas. Explica que, para el caso de la relación entre área y pendiente, la alta dispersión en los gráficos del área que contribuye a la pendiente implica que la correlación significativa es el resultado de una asociación débil entre las variables y no una causalidad. Lo mismo ocurre en el área de estudio, en esta complejidad de relaciones entre variables, como ha sido mencionado anteriormente, intervienen numerosos factores locales que deben ser considerados en el análisis.

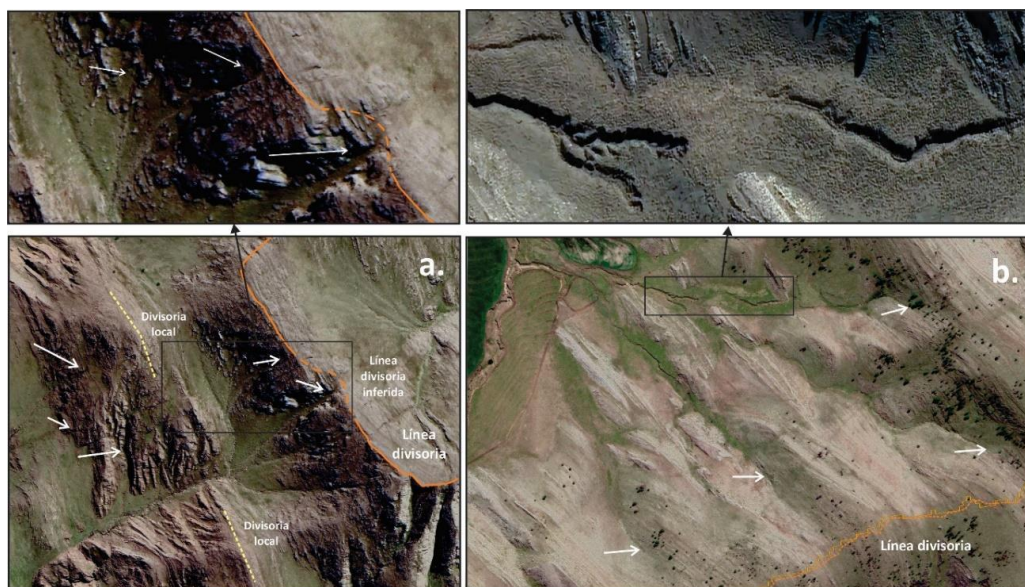


Figura 7: Inicios de cauces identificados en la cuenca alta del Ao. La Ventana: a. vertiente norte; b. vertiente sur (Las flechas blancas indican el inicio del cauce; la línea anaranjada discontinua indica un sector de la línea divisoria discontinua debido a procesos de erosión retrocedente). Fuente: elaboración propia.

Respecto a los usos del suelo, Jarefjäll (2021) otorga una importancia relevante a las modificaciones antrópicas y usos que se realizan en las áreas de captación y analiza las diferencias en la dinámica y características de los inicios de cauces naturales respecto a los intervenidos. En el caso particular de la cuenca del arroyo La Ventana, la zona urbanizada se encuentra en el tramo medio del cauce principal, no coincidiendo con los inicios de cauces analizados. Por ello, a pesar de la importancia otorgada a los usos del suelo e intervenciones antrópicas, no se tuvieron en cuenta para este análisis. Por otro lado, más del 80% de los inicios de cauces se encuentran dentro del Parque Provincial Ernesto Tornquist, en el cual se preservan especies endémicas del pastizal pampeano por lo que se realiza un uso del suelo turístico-recreativo de bajo impacto.

Respecto a la cobertura vegetal, otro factor importante de diferenciación espacial que influye en la formación de un cauce, se encontraron diferencias significativas entre ambas laderas. En toda la cuenca predomina pastizal pampeano, sin embargo, en el caso de la vertiente norte se encuentran parches de vegetación de tipo arbórea (coníferas introducidas) (Figura 4 - b) mientras que en la ladera sur predominan pastos y arbustos pequeños, siendo la distribución de especies arbóreas dispersa (Figura 4 - b). La cobertura de vegetación adiciona rugosidad y genera obstrucciones en la circulación del agua y del material sedimentario. En las zonas de captación de la ladera sur desprovistas de vegetación se observaron procesos de erosión más acentuados que en la ladera norte que contribuyen a potenciar la erosión en forma de cárcavas. Por otra parte, los efectos de los incendios y su vínculo con la vegetación en las áreas de captación han sido estudiados por Istraboulluglu *et al.* (2002) quienes, en una zona montañosa con características semiáridas, identificaron obstrucciones producto de los incendios que modificaron el tamaño de las áreas de captación del flujo. En la cuenca del arroyo La Ventana, si bien durante el periodo de observaciones no se registraron incendios, estos son eventos característicos de la región durante periodos de sequía (Michalijos, 2018). La ladera norte, posee mayor cobertura arbórea susceptible de ser combustionada junto al pastizal pampeano, por ello, es susceptible a la ocurrencia de estos eventos y este es otro factor que debe considerarse dentro de los procesos que contribuyen a la formación o modificación de las características físicas y morfométricas de las áreas de captación y formación de cauces. Otra diferencia entre ambas laderas tiene que ver con

la identificación, en la ladera norte, de inicios de cauce que coinciden con el afloramiento de flujo subsuperficial. La existencia de estos manantiales o surgentes en esta área y su ausencia en la ladera sur, evidencian aún más la importancia del flujo de agua subterráneo en la formación de canales, relación que ha sido observada también por Hancock y Evans (2006) en su área de estudio.

Este estudio ha demostrado que definir el inicio de un canal en la cuenca del arroyo La Ventana, representa una tarea compleja y desafíos que no pueden ser abordados sólo a partir del análisis de correlaciones entre variables físicas. Esto ha sido destacado también por Jarefjäll (2021) quien en su estudio concluye la importancia de considerar los múltiples elementos y condiciones variables que componen el paisaje en el estudio de los inicios del cauce. Así, la variabilidad y correlaciones débiles, principalmente en la ladera norte del área de estudio, pueden atribuirse a la heterogeneidad de las condiciones ambientales de la cuenca.

CONCLUSIONES

A través del análisis realizado se identificaron y caracterizaron los inicios de cauces de la cuenca alta del arroyo La Ventana y se establecieron relaciones con las variables geomorfológicas que influyen en su localización, así como otros factores locales. Se hallaron diferencias físicas significativas entre los nacimientos de cauces y las áreas de captación de las laderas norte y sur de la cuenca, tanto cuantitativas como cualitativas que se atribuyen a la heterogeneidad de las características físicas de cada ladera. Se constató que, si bien las dimensiones de las áreas de captación presentan un promedio similar, lo que varía es su forma dado que las áreas de captación de la vertiente norte son más elongadas que las de la vertiente sur. Vinculado a las alturas de los inicios de cauces, se registró que el 80% de los mismos se encuentran entre los 600 y 800 m s.n.m., siendo la vertiente norte la que presenta el mayor rango de alturas. Las pendientes calculadas demostraron una mayor dispersión en los valores para la vertiente norte en relación con la vertiente sur. Respecto a la pendiente y altura, si bien se consideran como elementos que contribuyen en la formación de un canal, no se han podido comprobar relaciones nítidas como las observadas por otros autores.

Este trabajo permitió constatar la variabilidad en las características de los factores físicos considerados que intervienen en la formación y

evolución de los inicios del cauce y sus áreas de captación de la ladera norte respecto a la ladera sur de la cuenca. Estas diferencias repercuten en el funcionamiento y dinámica de los procesos fluviales que pueden influir en el potencial peligro que representan las crecidas en la cuenca. Los resultados de este estudio aportan conocimiento a la comprensión y representación de los procesos hidrogeomorfológicos que ocurren en la cuenca del arroyo La Ventana contribuyendo a profundizar el análisis del peligro de las crecidas en este tipo de ambientes fluviales efímeros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el PGI-UNS "Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas ambientales a diferentes escalas témporo-espaciales" (24/G092).

BIBLIOGRAFÍA

Adams, R.K., y Spotila, J.A. (2005). The form and function of headwater streams based on field and modeling investigations in the Southern Appalachian Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 30(12), 1521-1546. <https://doi.org/10.1002/esp.1211>

Albouy, R., y Bonorino, G. (1997). Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 52(1), 81–92.

Anderson, V.J., Horton, B.K., Saylor, J.E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D.O., y Ketcham, R.A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon river systems. *Geosphere*, 12(4), 1235-1256. <https://doi.org/10.1130/GES01294.1>

Beron De La Puente, F., Gil, V., y Viale, M. (2022). Precipitaciones orográficas en el cordón Sierra de la Ventana, Buenos Aires, Argentina. En *XIV Jornadas de Geografía Física*, Corrientes, República Argentina. Resumen.

Bischetti, G.B., Gandolfi, C., y Whelan, M.J. (1998). The definition of stream channel head location using digital elevation data. En *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*, 248, 545–525.

Burak, A. (2015). *Mapping stream channel head locations in the state of Alabama* (Tesis Doctoral). Universidad de Auburn, Alabama, 116 pp.

Campo de Ferreras, A.M., Capelli de Steffens, A., y Diez, P.G. (2004). *El clima del Suroeste bonaerense*. Ed. Ediuns, Bahía Blanca, 99 pp.

Cappannini, D., Scoppa, C.O., y Vargas Gil, J.R. (1971). Suelos de las sierras australes de la provincia de Buenos Aires. En *Reunión Geología Sierras Australes*. Comisión Investigaciones Científicas, 203–234.

Casado, A., y Campo, A.M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 22(1–2), 6-26. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>

Clubb, F., Mudd, S., Mildowski, D., Hurst, M., y Slater, L. (2014). Objective extraction of channel heads from high-resolution topographic data. *Water Resources Research*, 50(5), 4283-4304. <https://doi.org/10.1002/2013WR015167>

Colson, T.P. (2006). *Stream network delineation from high-resolution digital elevation models* (Ph.D. Dissertation). Department of Forestry y Environmental Resources, North Carolina State University, Raleigh, NC, 241 pp.

Dietrich, W.E., y Dunne, T.D. (1993). The channel head. En K. Beven y M.J. Kirkby (Eds.), *Channel Network Hydrology*. John Wiley, Nueva York, pp. 175–219.

Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., Mckean, J., y Bauer, R. (1992). Erosion thresholds and land surface morphology. *Geology*, 20(8), 675–679.

García Martínez, B., Gil, V., Carbone, M.E., y Posada Simeón, C. (2016). Caracterización del patrón hidromorfológico del Arroyo de La Ventana en su tramo medio alto (Buenos Aires, Argentina). *Estudios Geográficos*, 77, 521–541.

Garrett, K.K., y Wohl, E.E. (2017). Climate-invariant area-slope relations in channel heads initiated by surface runoff. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(11), 1745–1751. <https://doi.org/10.1002/esp.4148>

Gentili, J.O. (2012). *Hidrografía del arroyo Sauce Corto aplicada a peligro de inundaciones y anegamientos* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 146 pp.

- Gentili, J.O., y Gil, V. (2013). Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 22(1–2), 147–166.
- Gil, V. (2010). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 269 pp.
- Gil, V., y Campo, A.M. (2011). Geomorfología de las nacientes del río Sauce Grande. *Anales Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas*, Santiago de Chile, 35–40 pp.
- Gil, V., y Campo, A.M. (2012). Geomorfología y procesos de vertiente. Cuenca alta del río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 26, 133–174.
- Gil, V., Gentili, J.O., y Campo, A.M. (2009). Influencia de la litología en la variación de los parámetros morfométricos, Sistema de Ventania, Argentina. *Papeles de Geografía*, 49–50, 55–68.
- González, M.A., Gil, V., y Gentili, J. (2023). Determinación de inicios de cauces a partir de Modelos Digitales de Superficie. Cuenca alta del arroyo La Ventana (Buenos Aires, Argentina). *Revista GeoFocus, International Review of Geographical Information Science and Technology*, 31, 101–114.
- Hancock, G.R., y Evans, K.G. (2006). Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(7), 809–824. <https://doi.org/10.1002/esp.1285>
- Hancock, G.R., y Willgoose, G.R. (2021). Predicting gully erosion using landform evolution models: Insights from mining landforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3271–3290. <https://doi.org/10.1002/esp.5234>
- Harrington, H.J. (1947). Explicación de las Hojas Geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana. *SEGEMAR*, 61, 42–44.
- Henkle, J.E., Wohl, E., y Beckman, N. (2011). Locations of channel heads in the semiarid Colorado Front Range, USA. *Geomorphology*, 129(3–4), 309–319.
- Howard, A.D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG Bulletin*, 51(11), 2246–2259.
- Istanbulluoglu, E., Tarboton, D.G., Pack, R.T., y Luce, C.H. (2002). A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resources Research*, 38(12), 61–1.
- Jarefjäll, A. (2021). *Digitizing and Mapping Channel Heads Across Various Forested Regions in Sweden Using a High-Resolution DEM: A Regional Analysis of How Landscape Properties Influencing Channel Head Initiation* (Degree Project in Earth Science). Swedish University of Agricultural Sciences.
- JAXA (2008). *ALOS Data Users Handbook*. Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency, 158 pp. Disponible en: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf
- Jefferson, A.J., y McGee, R.W. (2013). Channel network extent in the context of historical land use, flow generation processes, and landscape evolution in the North Carolina Piedmont. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 601–613.
- Julian, J.P., Elmore, A.J., y Guinn, S.M. (2012). Channel head locations in forested watersheds across the mid-Atlantic United States: a physiographic analysis. *Geomorphology*, 177–178, 194–203.
- Li, J., Li, T., Zhang, L., Sivakumar, B., Fu, X., Huang, Y., y Bai, R. (2020). A D8-compatible high-efficient channel head recognition method. *Environmental Modelling and Software*, 125, 1–13.
- Michalijos, M.P. (2018). *Estudio del riesgo de incendio forestal en un sector de la Comarca de la Sierra de la Ventana utilizando geotecnologías* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 229 pp.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1988). Where do channels begin? *Nature*, 336, 232–234.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*, 25(8), 1907–1918.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E. (1992). Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. *Science*, 255(504), 826–830.

- Ollero, A., Conesa García, C., y Vidal-Abarca, M.R. (2021). *Buenas prácticas en gestión y Restauración de cursos efímeros Mediterráneos: Resiliencia y adaptación al Cambio climático*. Universidad de Murcia, Murcia.
- Orlandini, S., Tarolli, P., Moretti, G., y Dalla Fontana, G. (2011). On the prediction of channel heads in a complex alpine terrain using gridded elevation data. *Water Resources Research*, 47, W02538. <https://doi.org/10.1029/2010WR009648>
- Placzkowska, E., Cebulski, J., Bryndza, M., Mostowik, K., Murawska, M., Rzonca, B., y Siwek, J. (2021). Morphometric analysis of the channel heads based on different LiDAR resolutions. *Geomorphology*, 375, 107–546.
- Portilla, O., Leiva, C., Luna, M., y González, I. (2023). Evaluación de los modelos digitales de terreno y geopotenciales en el Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 38(2), 59-81. <https://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.05>
- Quesada-Román, A., y Zamorano Orozco, J.J. (2019). Peligros Geomorfológicos en Costa Rica: Cuenca Alta del Río General. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3), 239-251.
- Sellés-Martínez, J. (2001). Geología de la Ventania (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Journal of Iberian Geology*, 27, 43-69.
- Senciales González, J.M. (1999). *Redes fluviales. Metodología de análisis*. Ed. Universidad de Málaga, Málaga, 337 pp.
- Shavers, E., y Stanislawski, L.V. (2020). Channel cross-section analysis for automated stream head identification. *Environmental Modelling and Software*, 132, 104-809.
- Volonté, A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas. Cuenca del arroyo San Bernardo, Sistema de Ventania, Argentina* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 169 pp.
- Volonté, A., y Gil, V. (2019). Aportes de la hidrogeomorfología histórica en la determinación de áreas inundables a partir de eventos extremos de crecidas. *Huellas*, 23(1), 11-26.
- Walker, S.J., Wilkinson, S.N., Van Dijk, A.I.J.M., y Hairsine, P.B. (2020). A multi-resolution method to map and identify locations of future gully and channel incision. *Geomorphology*, 358, 107–115.
- Willgoose, G.R., Hancock, G.R., y Kuczera, G. (2003). *Variability of catchment statistics*. Ed. American Geophysical Union, Washington, 217 pp.
- Willgoose, G., Bras, R.L., y Rodriguez-Iturbe, I. (1991). A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 1. Theory. *Water Resources Research*, 27(7), 1671–1684.
- Willgoose, G., Bras, R.L., y Rodriguez-Iturbe, I. (1992). The relationship between catchment and hillslope properties: implications of a catchment evolution model. *Geomorphology*, 5(1–2), 21–37.
- Wohl, E. (2018). The challenges of channel heads. *Earth-Science Reviews*, 185, 649-66.