

CARCAVAMIENTO EN LA PAMPA ONDULADA: 50 AÑOS DE EVOLUCIÓN EN LA CUENCA DEL ARROYO DEL TALA

Lucía Worcel^{1,*}, Sebastián Vangeli¹, Celio Ignacio Chagas¹

¹ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

La erosión en cárcavas, clásicas o efímeras, es la manifestación más extrema del proceso de erosión hídrica. El carcavamiento altera y fragmenta significativamente el paisaje y aumenta los costos productivos. Este estudio evalúa la dinámica del carcavamiento en la cuenca del arroyo del Tala (San Pedro, Bs. As.), representativa de la pampa ondulada. Sus objetivos fueron a) monitorear la evolución de las cárcavas entre 1968 y 2019 y b) estimar la actividad erosiva actual de las cárcavas en dos sectores contrastantes representativos de la fisiografía de la cuenca. El sector Los Patricios (LP) presenta pendientes suaves y largas, mientras que La Esperanza (LE) presenta pendientes más pronunciadas. En base a una escala de semidetalle se identificó la cantidad, longitud y densidad de cárcavas en 1968 y 1981, mediante fotografías aéreas. Estos datos se compararon con un mapa base de 2019 generado a partir de imágenes satelitales y validado a campo. Se relevó la morfometría de 33 cárcavas en ambos sectores y se estimó la velocidad y el caudal máximo del flujo hídrico en el cauce para determinar la actividad erosiva. Durante los últimos 50 años el avance de las cárcavas fue continuo. En 1968 LP poseía una densidad de cárcavas intermedia (0,01-0,05 km km⁻²), alcanzó una alta densidad en 1981 (0,5-1 km km⁻²), y una extremadamente alta (>1 km km⁻²) en 2019. LE partió de una alta densidad en 1968, donde se mantuvo hasta 1981, y alcanzó niveles extremadamente altos en 2019. El proceso erosivo sigue activo en ambos sectores, si bien LE presenta una red de drenaje más activa y desarrollada debido a su mayor energía geomórfica. Se concluye que la erosión está en desarrollo activo y se identifica la necesidad de estudiar los factores incidentes en el proceso, así como la identificación de áreas susceptibles.

Palabras clave: erosión hídrica severa, escurrimiento, imágenes satelitales, densidad de cárcavas

GULLY EROSION IN THE ROLLING PAMPA: 50 YEARS OF EVOLUTION IN THE ARROYO DEL TALA BASIN

SUMMARY

Classical and ephemeral gully erosion represents the most extreme manifestation of water erosion processes. This phenomenon significantly alters and fragments the landscape, leading to increased operational production costs. This study evaluates the dynamics of gully erosion in the Arroyo del Tala basin (San Pedro, Buenos Aires), representative of the Rolling Pampa. The objectives were: a) to monitor gully erosion evolution between 1968 and 2019, and b) to estimate the current erosive activity of gullies in two contrasting sectors representative of the basin's physiography. The Los Patricios (LP) sector is characterized by gentler, yet longer slopes, whereas the La Esperanza (LE) sector features steeper slopes. Using a semi-detailed scale, the quantity, length, and density of gullies were identified for the years 1968 and 1981 through aerial photographs. These data were compared with a 2019 base map of gullies, which was generated through hi-

* Autor de contacto:
lworcel@agro.uba.ar

Recibido:
13-09-24

Recibido con revisiones:
28-10-24

Aceptado:
29-10-24

gh-resolution satellite imagery and validated through field observations. The morphometric characteristics of 33 gullies were surveyed in both sectors, and the maximum flow velocity and discharge in the channel were estimated to determine the erosive activity. Gully advance has been continuous in both sectors over the past 50 years. In 1968, LP had an intermediate gully density ($0.01-0.05 \text{ km km}^{-2}$), which increased to a high density ($0.5-1 \text{ km km}^{-2}$) by 1981 and reached an extremely high density ($>1 \text{ km km}^{-2}$) in 2019. LE started with a high gully density, which persisted until 1981, reaching an extremely high density in 2019. The erosive process remains active in both sectors. However, LE exhibits a more active and developed drainage network due to its higher geomorphic energy. Results indicate that gully erosion in the study area is active and ongoing, highlighting the need to study influencing factors in the process and to identify susceptible areas.

Keywords: severe water erosion, runoff, remote sensing, gully density

INTRODUCCIÓN

La erosión en cárcavas, tanto clásicas como efímeras, es una de las manifestaciones más severas del proceso de erosión hídrica. Una vez desencadenada, se retroalimenta positivamente, ya que el avance de las cabeceras genera saltos hidráulicos cada vez mayores, aumentando la energía cinética y el poder erosivo del flujo de agua (Cisneros et al., 2012). Su avance incrementa la conectividad hidrológica y sedimentológica, acelerando los procesos erosivos a escala de microcuenca, y actuando como la principal fuente de sedimentos que pueden adsorber y transportar diferentes tipos de contaminantes químicos y biológicos hacia los cursos y cuerpos de agua (Ongley, 1997; Chagas et al., 2010a; Ares et al., 2016). El carcaamiento fragmenta el paisaje y aumenta los costos operativos asociados a las dificultades para el desplazamiento de maquinaria agrícola, junto a la caída en la productividad de cultivos y pasturas (Viglizzo y Jobbagy, 2010; Chagas y Kraemer, 2018).

La dinámica del proceso, expresada en su avance y profundización, se encuentra regulada por la ocurrencia de flujos hídricos concentrados de gran poder erosivo. Estos flujos se generan pendiente arriba en áreas sujetas a lluvias intensas sobre suelos frágiles con escasa cobertura superficial. Los gradientes pronunciados de las pendientes les otorgan una mayor capacidad de corte, que junto a la resistencia del suelo regulan la incisión inicial de las cárcavas. Algunas propiedades de los suelos, como la estabilidad estructural, la textura y el contenido de materia orgánica, entre otras, influyen en esta resistencia, que junto a las tasas de infiltración y la velocidad del flujo hídrico se encuentran a su vez condicionadas por la cobertura del suelo. (Nearing et al., 2004; Cisneros et al., 2012; Denoia y Ruiz, 2014; Yang et al., 2023).

La Pampa Ondulada es una región con suelos altamente susceptibles a la erosión hídrica; en 1988, más del 30% de la superficie de las cuencas presentaban erosión hídrica severa a grave (Iruetia et al., 1988). En la Cuenca del arroyo del Tala, representativa de esta región, predominan los Argiudoles típicos y vérticos, desarrollados a partir de loess pampeano, en las posiciones altas del paisaje. Su textura superficial, franco limosa a franco arcillo limosa, les confiere una alta susceptibilidad a la degradación física por su elevado contenido de limo. Asimismo, sus horizontes subsuperficiales poseen una elevada concentración de arcilla (superior a 50%) con apreciables contenidos de esmectita que, al expandirse en húmedo, restringen la percolación profunda pero que sin embargo le otorgan resistencia al corte (Knapen et al., 2007). En los sectores bajos de la cuenca, asociados al plano aluvial del Arroyo del Tala, predominan los Natracuoles y Natracualfes típicos (Chagas y Santanatoglia, 2016; Vangeli, 2019).

En esta cuenca se han registrado tasas de erosión hídrica por encima del nivel de tolerancia admitida, con valores de entre $11,5$ y $36 \text{ tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de pérdida de suelos junto a una densidad de cárcavas extremadamente alta ($> 1 \text{ km km}^{-2}$), con la consiguiente sedimentación de parte del material desprendido y transportado hacia las posiciones bajas del paisaje (Bujan et al., 2003; Worcel et al., 2022).

La estimación de la tasa de avance de las cárcavas resulta de utilidad para analizar la direccionalidad del proceso a una escala temporal de mediano o largo plazo. En los últimos años se han multiplicado los estudios de la dinámica de las cárcavas, generalmente enfocados en la estimación de la tasa de avance (m año^{-1}), a escala tanto de cárcava individual como de microcuenca, basándose en la identificación por fotogrametría con un corto tiempo de revisita (Frankl et al., 2012; Dong et al., 2019). Esta variable permite evaluar la direccionalidad del proceso en el mediano (5-50 años) y largo plazo (> 50 años), habida cuenta de las dificultades que ofrecen los análisis a corto plazo (< 5 años), en los cuales la incidencia de los eventos climáticos extremos, así como las transformaciones abruptas en el uso de la tierra (desmontes, reemplazo de pastizales) tienen una incidencia significativa (Vandekerckhove et al., 2003). A través del estudio

del avance de estas formas de erosión resulta factible analizar los posibles factores incidentes, como la morfometría, los factores climáticos y la incidencia de la cobertura vegetal a una escala temporal de largo plazo (Govers, 1991; Vanmaercke et al., 2016). La determinación del crecimiento de las cárcavas en forma lineal facilita la evaluación del cambio en la densidad de cárcavas en el tiempo en un área determinada y su comparación con otras regiones del mundo.

La estimación de la actividad erosiva actual en el cauce de las cárcavas permite inferir la direccionalidad del proceso a futuro, determinando si las cárcavas se encuentran activas o estabilizadas. La velocidad del flujo que circula por la misma es un factor que incide directamente en su energía de corte, y está influenciada por las características morfométricas de las cárcavas o canales, tales como el área de la sección transversal, el perímetro de mojado, el gradiente de la pendiente, y la rugosidad, dependiente de la cobertura vegetal y las irregularidades superficiales (Chow et al., 1994). En términos generales se considera que, en cauces desnudos y refinados, el flujo superficial adquiere capacidad de corte a una velocidad mayor a $0,5 \text{ m s}^{-1}$, mientras que en cauces medianamente cubiertos con vegetación debe superar $1,5 \text{ m s}^{-1}$ (Cisneros et al., 2012; Chagas y Kraemer, 2018).

Con el propósito de evaluar la dinámica del carcavamiento en la Cuenca del arroyo del Tala, este trabajo se propone: a) monitorear la evolución de las cárcavas y otras formas de erosión severa en los últimos 50 años (1968-2019) en la cuenca del arroyo del Tala (San Pedro, Buenos Aires), representativa de la pampa ondulada y b) estimar la actividad erosiva actual de las cárcavas en dos sectores representativos de la variabilidad ambiental y fisiográfica de dicha cuenca. La hipótesis que se pone a prueba es que la erosión en cárcavas se incrementó en los últimos 50 años y que el proceso se encuentra activo.

MATERIALES Y METODOS

Definición del área de estudio

Se estableció una escala de trabajo de semidetalle, en función de la cual se delimitaron dos sectores representativos de la variabilidad físico ambiental de la Cuenca del Tala, correspondientes a los tercios que la componen, de acuerdo a Ackerman et al. (2000). Ambos sectores, ubicados en el Partido de San Pedro, abarcan una superficie aproximada de 60 km^2 cada uno. El primero, denominado "Los Patricios" (LP), corresponde a los tercios superior y medio de la cuenca, y está compuesto por microcuencas primarias con cauces paralelos y pendientes suaves (1-2%). El segundo sector, denominado "La Esperanza" (LE), abarca el tercio inferior y se caracteriza por poseer una red de drenaje más compleja y desarrollada, que incluye cauces primarios, secundarios, terciarios e incluso de cuarto orden, con pendientes máximas de 2-3% (Fig. 1). En ambos sectores predomina la actividad agrícola anual, si bien en LP se observa una mayor superficie dedicada a la producción ganadera con pasturas perennes (Vangeli, 2019).

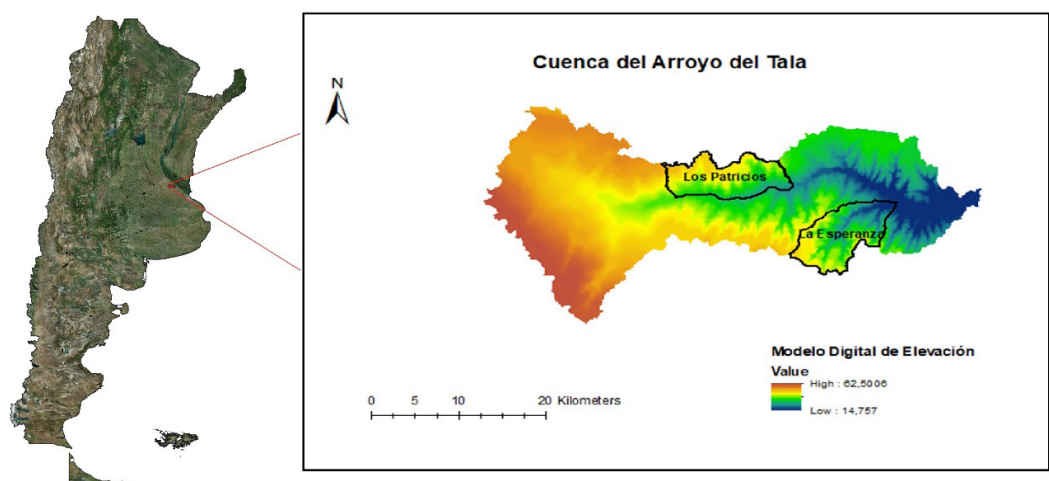


Figura 1: Ubicación de la Cuenca del Arroyo del Tala en Argentina y de los sectores bajo estudio dentro de la cuenca. Se observa el Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca (metros).

Figure 1: Arroyo del Tala Basin and the sectors under study location. Digital Elevation Model (DEM) (meters) of the basin is shown.

Tasa de avance de las cárcavas

Con el propósito de cuantificar la tasa de avance de las cárcavas en los últimos 50 años, se comparó su longitud en 1968, 1981 y 2019. Se utilizó un mapa base de cárcavas de ambos sectores del año 2019, construido a partir de imágenes satelitales de alta resolución espacial y validado a campo (Worcel et al., 2022). Aplicando la misma metodología se identificaron las cárcavas para el año 1965 y 1981 a partir de fotografías aéreas proporcionadas por la Agencia de Recaudación de la Provincia de Buenos Aires (ARBA). Se considera que las imágenes satelitales de alta resolución pueden tomarse como equivalentes a la fotografía aérea para estudios de la dinámica del proceso erosivo que utilizan ambas fuentes de información (Goloso et al., 2018) (Fig. 2). Las fotografías aéreas fueron georreferenciadas y se generó un mosaico. Por faltantes en la disponibilidad de capturas del mosaico de 1968 en sectores reducidos de la cuenca se definió un área de estudio determinada por la superficie cubierta por el vuelo mencionado. La extensión estudiada en 1981 y 2019 fue correspondiente a esa superficie de referencia, a fin de compatibilizar la información.

Se digitalizaron las cárcavas identificadas en toda la superficie de los sectores bajo estudio y se determinaron la cantidad, longitud individual, longitud total y promedio y densidad ($\text{km de cárcava km}^{-2}$). Los márgenes del arroyo del Tala fueron excluidos en la identificación, ya que se trata de un sector que fue sometido a una alta presión de pastoreo, redundando en la degradación física del suelo por pisoteo animal, presentando características particulares que ameritan un estudio posterior más específico.

Se estimó el avance de las cárcavas para cada período: 1968-1981 (Período I) y 1981-2019 (Período II) y se obtuvo la tasa de avance anual mediante el cociente entre el avance lineal y la cantidad de años de cada período. Luego, se aplicó la clasificación por densidad de cárcavas propuesta por Goloso et al. (2018), que considera 4 clases de densidad: sin presencia significativa de cárcavas ($0-0,005 \text{ km km}^{-2}$), muy baja densidad de cárcavas ($0,005-0,01 \text{ km km}^{-2}$), alta densidad de cárcavas ($0,5-1 \text{ km km}^{-2}$) y densidad extremadamente alta ($> 1 \text{ km km}^{-2}$). Se incorporó la clase de densidad intermedia ($0,01-0,5 \text{ km km}^{-2}$) no descrita en la clasificación original pero presente en el área de estudio y se calculó el cambio en la densidad para cada uno de los sectores.



Figura 2: Ejemplo comparativo de una misma superficie. Arriba: fotografía aérea correspondiente al año 1981. Abajo: imagen satelital de alta resolución espacial de Bing Aerial correspondiente al año 2019 (Microsoft Corporation, 2019).

Figure 2: Comparative example of the same area. Top: 1981 aerial photograph. Bottom: 2019 high-resolution satellite image of Bing Aerial (Microsoft Corporation, 2019).

Actividad erosiva actual

Con el propósito de estimar la actividad erosiva actual en cada uno de los sectores, se calculó la velocidad máxima del flujo hídrico en el cauce de las cárcavas, considerando que éstas se comportan como canales abiertos. Se aplicó el modelo de Manning (Chow et al., 1994) (Ecuación 1) para identificar aquellas situaciones en las cuales la velocidad estimada del flujo hídrico superaba la capacidad de corte del suelo.

$$Q = AV \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde,

Q: caudal máximo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

A: área máxima de la sección transversal medida in situ (m^2)

V: velocidad máxima estimada de flujo (m s^{-1})

A su vez, la velocidad máxima estimada del flujo puede calcularse a partir de la siguiente ecuación (Ecuación 2).

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde,

R: radio hidráulico (m), que resulta del cociente entre A y el perímetro mojado (PM)

S: pendiente longitudinal (m m^{-1}) estimada para un tramo de 200 m aguas arriba y abajo del punto estudiado, empleando las cartas topográficas IGN

n: rugosidad estimada según grado de cobertura vegetal y de irregularidades del cauce relevados *in situ*.

Las características morfométricas de las cárcavas (perímetro de mojado, ancho y profundidad) fueron medidas a campo durante el año 2020. La sección transversal del cauce se obtuvo dividiendo la misma en una secuencia de formas geométricas simples (dos triángulos rectángulos y dos trapecios), sumando el área de cada una (Casalí et al., 2006; Liu et al., 2020). Esto se realizó a partir de la toma de medidas del perfil de 33 cárcavas (19 en LP y 14 en LE): ancho, profundidad en el centro del cauce (P50), profundidad al 25% del ancho (P25) y al 75% del mismo (P75). Todos los sitios relevados se ubicaron geográficamente mediante GPS, se fotografiaron y se describieron en función de las siguientes condiciones: cobertura vegetal del lote en el cual se ubica, posición en el paisaje, signos de actividad erosiva de la cárcava, presencia de ramificaciones, presencia de sedimentos dispersos sobre la superficie, forma del cauce, vegetación presente en la misma. En los casos en que fue posible acceder a las cabeceras, las medidas fueron tomadas en el punto de ensanchamiento más próximo ubicado aguas abajo de las mismas. En aquellas cárcavas de acceso restringido por ubicación de los caminos y rutas, se tomaron en cuenta puntos de la trayectoria de las cárcavas distribuyendo los puntos de manera que sean representativos de los sectores estudiados.

Para el cálculo de rugosidad (n) se estimó la cobertura vegetal *in situ* y se ajustó en gabinete con respaldo en las fotografías de cada sitio. Se definieron valores mínimos y máximos de 0,025 y 0,045 respectivamente. El valor mínimo adoptado corresponde a cauces desnudos y es similar al que cita Geyik (1986), mientras que el valor máximo corresponde a un cauce medianamente vegetado, considerado por encima del 50% de cobertura estimada. Entre estos valores, se definieron intervalos rugosidad de 0,005 y de cobertura vegetal asociada, lo cual coincide con lo propuesto por Arcement y Schneider (1989). Además, para cada sección medida se estimó el caudal máximo (Q) que podría transportar cada cárcava suponiendo que el agua ocupara la totalidad de la sección relevada. Para corroborar esto último se verificó la presencia de restos vegetales arrastrados por el flujo hídrico hasta el límite superior del cauce.

Se consideraron activas las cárcavas cuyas velocidades de flujo superaron los umbrales de velocidad de corte de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ para suelos desnudos y de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ para suelos medianamente cubiertos por vegetación. Aquellas en las que se calcularon velocidades de flujo menores a esos umbrales fueron consideradas no activas o estabilizadas (Cisneros, 2012; Chagas y Kraemer, 2018).

RESULTADOS

Tasa de avance de las cárcavas

Se obtuvo un mapa de avance de cárcavas de ambos sectores de la cuenca para los tres años considerados (1968, 1981 y 2019) (Fig.3). Las cárcavas se desarrollaron inicialmente (1968) sobre las vías naturales de drenaje de las microcuencas. En el año 1981 se identificaron sobre vaguadas en las cuales no se habían presentado anteriormente, al mismo tiempo que se estableció la conexión entre cárcavas individuales que se unificaron como un cauce único. Para el año 2019 se evidenció un proceso de ramificación y se registraron cárcavas de menor longitud, paralelas entre sí y dispuestas en forma perpendicular a las pendientes, fundamentalmente en LE.

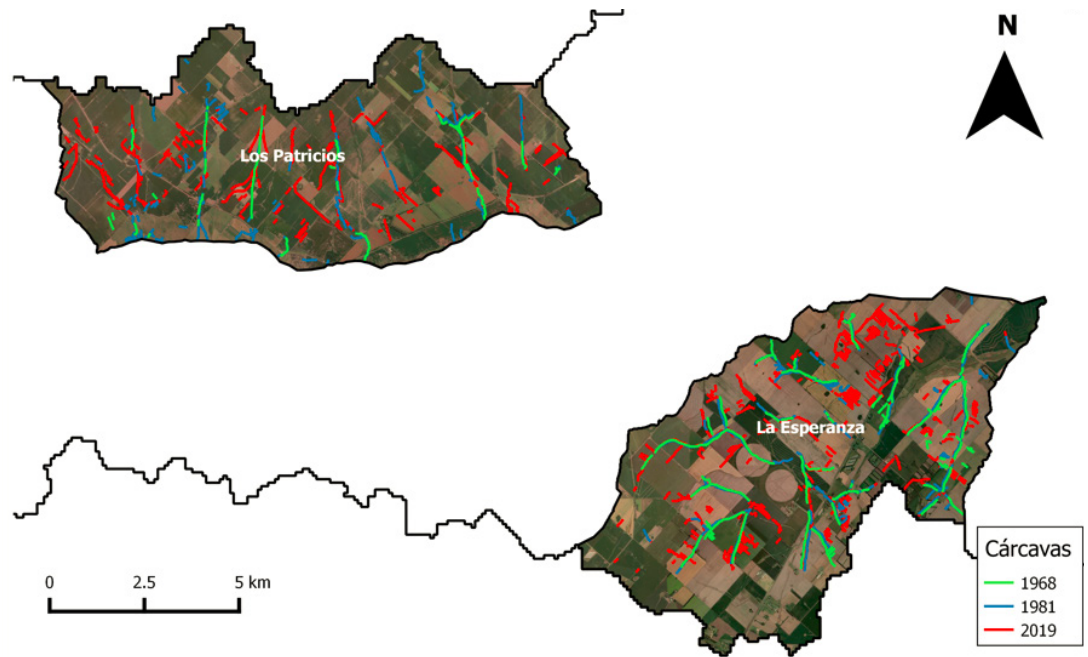


Figura 3: Mapa de cárcavas identificadas en 1968, 1981 y 2019 en ambos sectores.

Figure 3: Map of identified gullies in 1968, 1981, and 2019 across both study areas.

El proceso erosivo avanzó en forma continua en el largo plazo en ambos sectores, los cuales presentaron tasas de avance contrastantes. En el Período I (1968-1981) el ritmo de crecimiento lineal de la red de cárcavas fue mayor en LP respecto de LE, ocurriendo lo contrario durante el Período II (1981-2019), en el que se evidenció un marcado aumento en la extensión lineal de las cárcavas de LE respecto de LP (Fig. 4; Tabla 1). De acuerdo con la clasificación de densidad utilizada (Golosov et al., 2018), el sector LP poseía en el año 1968 una densidad de cárcavas intermedia ($0,01-0,05 \text{ km km}^{-2}$), llegando en 1981 a una alta densidad de cárcavas ($0,5-1 \text{ km km}^{-2}$), y en 2019 a la clase de densidad extremadamente alta ($>1 \text{ km km}^{-2}$). El sector LE partió de una alta densidad de cárcavas, clase en la que se mantuvo durante el Período I, alcanzando una densidad extremadamente alta al finalizar el Período II. El avance de las cárcavas y el cambio en la categoría de densidad fue común a ambos sectores.

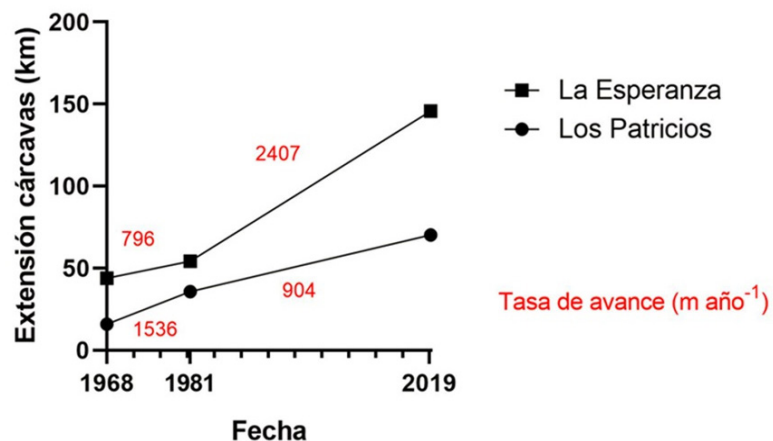


Figura 4: Tasa de Avance de cárcavas (m año⁻¹) para los dos sectores y períodos (1968-1981 / 1981-2019).

Figure 4: Gully erosion rate (m year⁻¹) for the two study areas and time periods (1968-1981 / 1981-2019).

Tabla 1: Avance lineal (m), tasa de avance (m año⁻¹) y cantidad de cárcavas en ambos sectores para ambos períodos.
Table 1: Linear advance (m), advance rate (m year⁻¹), and number of gullies in both sectors for each period.

		Período I (1968-1981)	Período II (1981-2019)
LP	Avance (m)	19.964,30	34.368,30
	Tasa de avance (m año ⁻¹)	1.535,70	904,4
	Cárcavas nuevas	56	88
	Incremento (%)	226	196
	Avance (m)	10.349,00	91.477,40
LE	Tasa de avance (m año ⁻¹)	796,1	2407,3
	Cárcavas nuevas	15	311
	Incremento (%)	124	268

Actividad erosiva actual

En ambos sectores los sitios en actividad superaron a los estabilizados. De los 19 puntos medidos en LP, 12 se consideraron activos y siete no activos o estabilizados, mientras que en LE se identificaron 12 puntos activos y dos estabilizados. Al mismo tiempo, durante el relevamiento se percibieron signos de actividad en la mayoría de los sitios, como la presencia de derrumbe de cabeceras, restos de cultivo volteados o arrasados y sedimento suelto en el cauce (Fig. 5).



Figura 5: Material suelto y restos de cultivo arrastrados por el cauce de la cárcava.
Figure 5: Loose material and crop residues transported across the gully.

Se identificó un comportamiento contrastante entre ambos sectores. Las cárcavas de LE tuvieron una actividad erosiva más intensa que las de LP, ya que las primeras evidenciaron en promedio un caudal máximo estimado 320% superior y una velocidad máxima 16% mayor que en LP, acompañados de una menor cobertura vegetal (Fig. 6; Tabla 2). En el caso de LE, la velocidad máxima promedio superó el umbral de corte para suelos medianamente cubiertos por vegetación ($1,5 \text{ m s}^{-1}$). Estos resultados son coherentes con el mayor desarrollo de la red de drenaje en un geoambiente con relieves más pronunciados.

Los Patricios



La Esperanza



Actividad de cárcavas
 ● Activas
 ● No activas

Figura 6: Mapa de actividad erosiva de los sitios relevados. Los números indican la identificación de los sitios de muestreo. Dos o más números contiguos implican cercanía de los sitios no perceptible por la escala.

Figure 6: Erosive activity map of surveyed sites, with numbers identifying sampling locations. Contiguous numbers indicate site proximity not discernible at this scale.

Tabla 2: Caracterización de la actividad erosiva actual de las cárcavas.**Table 2:** Current gully erosion activity characterization.

Sector	LP	LE
Puntos activos	12 (63%)	12 (86%)
Puntos estabilizados	7 (37%)	2 (14%)
Cobertura promedio (%)	29	18
Caudal máximo promedio (m ³ s ⁻¹)	1,08	4,54
Velocidad máxima promedio (m s ⁻¹)	1,4	1,63

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación apoyan la hipótesis de que en la Cuenca del Arroyo del Tala el proceso de carcamamiento avanzó en los últimos 50 años y se encuentra activo. En ambos sectores se registró un avance del carcamamiento a lo largo de la serie histórica, aumentando la densidad de cárcavas con su consecuente cambio de categoría (Golosov et al., 2018). Asimismo, se estimó que la velocidad del flujo hídrico superó la capacidad de corte para las condiciones de cobertura estimadas en la mayoría de los sitios analizados. La velocidad máxima promedio registrada en LE, que supera el umbral de corte incluso para los suelos medianamente cubiertos por vegetación, sugiere que el proceso puede seguir activo incluso en las cárcavas vegetadas.

El avance de carcamamiento en ambos sectores podría estar asociado a grandes volúmenes de escurrimiento asociados al proceso de erosión laminar. Los ambientes altos de la cuenca han sido utilizados durante más de 50 años para la producción de cultivos anuales con labranza convencional, en rotación con ganadería de pasturas plurianuales mixtas bajo pastoreo directo convencional. La escasa cobertura en los períodos de barbecho en posiciones moderadamente inclinadas y con siembras a favor de las pendientes redundó en la pérdida de suelos por erosión hídrica (Bujan et al., 2003). Asimismo, en las últimas décadas se incrementó la utilización agrícola bajo siembra directa de cultivos anuales, principalmente soja, al mismo tiempo que se reemplazó la ganadería por la implantación de cultivos anuales en sectores del plano aluvial del arroyo, que poseían una aptitud agrícola marginal, resultando en la manifestación de procesos de degradación física, química y biológica en esas tierras (Vangeli, 2019).

En el periodo bajo estudio, se identificó un cambio en el patrón de distribución de las cárcavas clásicas y efímeras, aumentando la conectividad entre las mismas y se registró el nacimiento de nuevos elementos de erosión lineal. En el año 1968 las cárcavas se ubicaban casi exclusivamente sobre las vaguadas y vías principales de drenaje. En el año 1981 se observó la ramificación y la conexión entre distintas cárcavas que estaban ya, junto a la aparición de nuevos cursos sobre las vaguadas. El último registro, en el año 2019 evidencia la profundización del proceso de ramificación, así como el nacimiento de cárcavas de menores dimensiones sobre las laderas de las pendientes, modificando el patrón original (Figura 3). Resulta esperable que la complejización del patrón de distribución de este tipo de elementos afecte positivamente la conectividad hidrológica y sedimentológica de la cuenca, profundizando el proceso erosivo.

La tasa de avance de las cárcavas, así como el caudal y la velocidad de flujo fueron contrastantes entre sectores. De acuerdo con la descripción de Ackerman et al. (2000) el tercio inferior de la cuenca, del cual forma parte el sector LE, está dominado por pendientes más pronunciadas y un patrón hidrológico más complejo. En este tercio se identificaron las mayores tasas de erosión potencial y se documentó la relación positiva entre las tasas de erosión y la longitud de las pendientes junto a pulsos de escurrimiento más fre-

cuentas y pronunciados (Castiglioni et al., 2009; Chagas et al., 2010b; Kraemer et al. (2013). Es posible que los mayores niveles de carcaavamiento registrados en LE ya en el año 1968 se encuentren asociados a las características morfométricas de este sector. Por otra parte, el patrón contrastante en la tasa de avance de las cárcavas entre sectores para los períodos analizados requiere una explicación asociada a factores dinámicos, que podrían estar asociados a un cambio en el uso del suelo diferencial en los mismos.

Los resultados aportan evidencias para concluir que la erosión en cárcavas en el área de estudio se encuentra activa y en desarrollo. Si bien la densidad de cárcavas es extremadamente alta en estos sectores, el proceso continúa desarrollándose, pudiendo alcanzar un mayor volumen de pérdida de suelo que lo aproximen a las densidades registradas en regiones con condiciones de mayor susceptibilidad de acuerdo con sus características morfométricas, climáticas y de génesis de suelos (Hayas et al., 2017). A su vez, dado que ambos sectores se clasifican con la máxima categoría de densidad de cárcavas del sistema de clasificación propuesto por Golosov et al. (2018), resulta necesario desarrollar un sistema de clasificación de cárcavas por densidad que se adapte a las condiciones particulares de la Pampa Ondulada.

La identificación de la dirección del avance del fenómeno y las consecuencias que tiene para la producción agrícola y ganadera, así como para la contaminación ambiental, sustenta la necesidad de identificar áreas con mayor susceptibilidad al nacimiento y avance de las cárcavas. Estas áreas fueron generalmente asociadas a la relación entre el gradiente de la pendiente y el área de aporte pendiente arriba respecto a las cabeceras de las cárcavas (Torri y Poesen, 2014). Un análisis de estas características para el área de estudio permitiría generar una herramienta predictiva de potenciales sectores frágiles al carcaavamiento sería fundamental para poder desarrollar sistemas de alerta y formular recomendaciones de manejo a escala regional.

CONCLUSIONES

Este estudio de 50 años sobre la dinámica del carcaavamiento en la cuenca del arroyo del Tala ofrece una visión detallada de la evolución de la erosión en cárcavas en la pampa ondulada. Utilizando tanto fotografías aéreas históricas como imágenes satelitales actuales, se monitoreó la progresión de las cárcavas y se evaluó la actividad erosiva actual. Los resultados indican que la erosión sigue siendo activa y significativa en ambos sectores estudiados (LP y LE), con una mayor intensidad en LE debido a su red de drenaje más desarrollada. Este relevamiento no solo confirma la actividad continua del carcaavamiento, sino que también establece un primer paso para colaborar en la identificación de áreas susceptibles a este proceso y mejorar la comprensión del proceso de erosión en cárcavas y los factores que lo regulan en la Pampa Ondulada.

REFERENCIAS

- Ackerman, G., De Pietri, D. E., y Santanatoglia, O. J. (2000). Detección de áreas con diferente vulnerabilidad a erosionarse a partir de la morfodinámica del paisaje. *Revista Facultad de Agronomía*, 20, 235-243.
- Arcement, G. J., y Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains* (No. 2339). USGPO; For sale by the Books and Open-File Reports Section, US Geological Survey.
- Ares, M. G., Bongiorno, F., Holzman, M., Chagas, C., Varni, M., y Entraigas, I. (2016). Water erosion and connectivity analysis during a year with high precipitations in a watershed of Argentina. *Hydrology Research*, 47(6), 1239–1252. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.179>
- Bujan, A., Santanatoglia, O. J., Chagas, C., Massobrio, M., Castiglioni, M., Yañez, M., Ciallella, H. y Fernandez, J. (2003). Soil erosion evaluation in a small basin through the use of ¹³⁷Cs technique. *Soil and Tillage Research*, 69(1-2), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00134-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00134-4)
- Casali, J., Loizu, J., Campo, M. A., de Santisteban, L. M., y Álvarez-Mozos, J. (2006). Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*, 67(2), 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.005>
- Castiglioni, M., Fernandez Moritan, M., Massobrio, M., Chagas, C., Palacín, E., y Santanatoglia, O. (2009). *Efecto de la forma y el relieve de microcuencas de Pampa Ondulada sobre su producción de sedimentos*. XXII Congreso Nacional del Agua. 11 al 14 de noviembre de 2009. Trelew.
- Chagas, C. I. y Kraemer, F. B. (2018). *Escorrentamento, erosión del suelo y contaminación de los recursos hídricos superficiales por sedimentos asociados a la actividad agropecuaria extensiva: algunos elementos para su análisis*. Editorial de la Facultad de Agronomía UBA. Archivo Digital: descarga y online. 34 pp.
- Chagas, C. I., y Santanatoglia, O. J. (2016). Uso de la tierra y procesos degradatorios en una cuenca representativa de la Pampa Ondulada. En N. M. B. do Amaral Sobrinho, C. I. Chagas y E. Zonta (Eds.), *Impactos ambientais provenientes da produção agrícola: Experiências Argentinas e Brasileiras* (pp. 97-118). Livre Expressão Realizando Sonhos. Enriquecendo Vidas
- Chagas, C., Santanatoglia, O., Castiglioni, M., Massobrio, Palacín, E., Kraemer, F., y Bujan, A. (21-24 de septiembre de 2010b). *Comparación del escurrimiento de dos microcuencas agrícolas de Pampa Ondulada con diferente energía geomórfica, durante un período húmedo*

- [Trabajo expandido]. Primer Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Chagas, C., Santanatoglia, O., Moretton, J., Paz, M., y Behrends Kraemer, F. (2010a). Movimiento superficial de contaminantes biológicos de origen ganadero en la red de drenaje de una cuenca de Pampa Ondulada. *Ciencia del suelo* 28:23-31.
- Chow, V.T., Maidment, D., y Mays, L., 1994. *Hidrología aplicada [Applied Hydrology]*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill.
- Cisneros, J., Cholaky, C., Gutiérrez, A. C., González, J., Reynero, M., Diez, A., y Bergesio, L. (2012). *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. UniRío.
- Denoia, J., y Ruiz, A. (2014). *La erosión en cárcavas en áreas de llanura. Material de apoyo didáctico. Especialidad Manejo de Tierras*. Facultad de Ciencias Agrarias U.N.R.
- Dong, Y., Wu, Y., Qin, W., Guo, Q., Yin, Z., y Duan, X. (2019). The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes. *Catena*, 182. 104146. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104146>
- Frankl, A., Poesen, J., Deckers, J., Haile, M., y Nyssen, J. (2012). Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology*, 173–174, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.011>
- Geyik, M. P. (1986). FAO watershed management field manual. Gully control. Based on the work of MP Geyik. *FAO Conservation Guide (FAO)*. no. 13/2.
- Golosov, V., Yermolaev, O., Rysin, I., Vanmaercke, M., Medvedeva, R., y Zaytseva, M. (2018). Mapping and spatial-temporal assessment of gully density in the Middle Volga region, Russia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(13), 2818–2834. <https://doi.org/10.1002/esp.4435>
- Govers, G. (1991). Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena*, 18, 133–155. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(91\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0341-8162(91)90013-N)
- Hayas, A., Poesen, J., y Vanwalleghem, T. (2017). Rainfall and Vegetation Effects on Temporal Variation of Topographic Thresholds for Gully Initiation in Mediterranean Cropland and Olive Groves. *Land Degradation and Development*, 28(8), 2540–2552. <https://doi.org/10.1002/ldr.2805>
- Irurtia, C, Berón, R, Costamagna, C y Glave, A (1988) Provincia de BsAs. En: W. Kugler, A. Cantero, R. Capurro, A. Glave y J. L. Panigatti (Eds) *El deterioro del ambiente en Argentina* 2da ed. (pp. 55-64). Editorial FECIC, PROSA.
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., y Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80(1–2), 75–109. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.08.001>
- Kraemer, F. B., Chagas, C. I., Marré, G., Palacin, E. A., y Santanatoglia, O. J. (2013). El desplazamiento de la ganadería por la agricultura en una cuenca de la pampa ondulada: efectos sobre el escurrimiento superficial y erosión hídrica. *Ciencia del Suelo*, 31(1):83-92.
- Liu, H., Hörmann, G., Qi, B., y Yue, Q. (2020). Using high-resolution aerial images to study gully development at the regional scale in southern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.004>
- Microsoft. Corporation (2019). *Bing Aerial Imagery* [Base de mapa]. QGIS. <https://www.bing.com/maps>
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., y O'neal, M. R. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43-50.
- Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. En *Estudio FAO Riego y Drenaje-55, GEMS/Water Collaborating Center Canada Center for Inland Waters*, (pp. 21-37). FAO
- Torri, D., y Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*, 130, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.006>
- Vangeli, S. (2019). *El avance de la agricultura en tierras con características hidro-halomórficas bajo uso de pastizal: su efecto sobre algunas propiedades edáficas y la calidad del agua de escurrimiento* [Tesis de maestría]. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J., y Govers, G. (2003). Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena*, 50(2-4), 329-352. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00132-7)
- Vanmaercke, M., Poesen, J., van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, J. F. R., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, A. J. T., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons, J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., ... Yermolaev, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, 154, 336–355. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
- Viglizzo, E., y Jobbágy, E. G. (Eds.). (2010). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Ediciones INTA.
- Worcel, L., Maggi, A. E., Vangeli, S., y Chagas, C. I. (2022). Alta densidad de cárcavas en una cuenca representativa de la Pampa Ondulada. *Revista Científica Agropecuaria* 25 (1): 156-164.
- Yang, Y., Zhang, Y., Yu, X., y Jia, G. (2023). Soil microorganism regulated aggregate stability and rill erosion resistance under different land uses. *Catena*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107176>