

ALTA DENSIDAD DE CÁRCAVAS EN UNA CUENCA REPRESENTATIVA DE LA PAMPA ONDULADA

Worcel, L.¹; Maggi, A. E.¹; Vangeli, S.^{1,2}; Chagas, C. I.¹

¹Facultad de Agronomía, UBA; Av. San Martín 4453, (1417) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

²INTA, CONICET, Instituto de Clima y Agua, CIRN, CNIA, 1686, Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.

Autor de correspondencia: lworcel@agro.uba.ar

RESUMEN

La erosión en cárcavas es un fenómeno irreversible que puede afectar el ciclo hidrológico de las microcuencas, incrementando la conectividad del paisaje y el movimiento de agua y sedimentos. En la Argentina, si bien se publicaron algunos trabajos al respecto en regiones áridas o semiáridas, este tipo de erosión no ha sido suficientemente estudiado. En la Pampa Ondulada, región con mayor historia de uso agrícola del país, se observa la presencia de erosión en surcos y cárcavas. El objetivo de este trabajo consiste en determinar el grado de carcavamiento en la Cuenca del Arroyo del Tala, representativa de la variabilidad físico ambiental de la región. Con este propósito, se realizó una identificación visual de cárcavas a través de imágenes satelitales de alta resolución espacial en dos sectores representativos de la cuenca, contrastantes entre sí de acuerdo a sus características morfológicas. El producto fue validado a campo, resultando en una eficiencia de identificación del 85,3%. De acuerdo a bibliografía internacional, se puede determinar que ambos sectores se encuentran afectados por una densidad de cárcavas extremadamente alta ($>1\text{ km/km}^2$). Esta investigación resulta pionera en alertar sobre la gravedad de la problemática en esta región de intenso uso agrícola.

Palabras clave: erosión hídrica retrocedente, sensores remotos, SIG

SUMMARY

High density of gullies in a representative basin of the rolling Pampa.

Gully erosion is an irreversible phenomenon that can affect the hydrological cycle of micro-basins, increasing landscape connectivity and water and sediments movement. Although some gully erosion papers have been published in this regard in arid or semi-arid regions of Argentina, this type of erosion has not been sufficiently studied. In Pampa Ondulada, the region with the longest agricultural history in the country, rill and gully erosion is broadly observed. The aim of this paper is to dimension gully erosion in the Arroyo del Tala Basin, which is representative of the physical and environmental variability of the Pampa Ondulada region. For this purpose, visual identification of gullies was carried out through high spatial resolution satellite images in two representative areas of the basin, both of them with contrasting morphological characteristics. This identification resulted in a preliminary map which was field validated, resulting in an efficiency of 85.3%. According to the international bibliography, both sectors are affected by an extremely high gully density ($>1\text{ km km}^{-2}$). Our results warn about the importance of gully erosion in this region of intensive agricultural use.

Keywords: receding water erosion, remote sensing, GIS

Introducción

La erosión del suelo es un problema de creciente importancia, siendo la principal causa de degradación de tierras a nivel mundial (Valentin *et al.*, 2005; Poesen *et al.*, 2011). Esta afecta la producción de alimentos, la calidad ambiental, la salud humana y las economías nacionales (Capra, 2013). Se pronostica que el cambio climático incrementará la intensidad de las precipitaciones y la escorrentía, y en consecuencia, las tasas de erosión hídrica en algunas regiones del mundo (Nearing *et al.*, 2004). Según FAO, el rendimiento de los cultivos por erosión de suelos disminuye con una tasa de 0,3% anual, que proyectada al año 2050, comprendería un 10% de caída en la productividad global (Pennock y McKenzie, 2016).

En la Argentina, el territorio erosionado aumentó fuertemente a partir de la década de 1990. La superficie afectada es 105,6 millones de hectáreas, 61% de las cuales presentan erosión hídrica (Casas y Albarracín, 2015). Dentro de la pradera pampeana, la Pampa Ondulada se considera extremadamente frágil, en la cual más del 36% de la superficie ya sufría procesos erosivos hace más de tres décadas (FECIC-PROSA, 1988). En esta región predominan los planteos productivos de agricultura continua en esquemas de rotación muy simplificados, bajo siembra directa. Como consecuencia de ello, resulta muy frecuente la presencia de estructuras laminares y densificaciones en el horizonte A de los suelos, situación que se traduce en una reducción de la conductividad hidráulica con el consecuente aumento del escurrimiento (Chagas y Kraemer, 2018).

La erosión en cárcavas es uno de los fenómenos más severos de la erosión hídrica, tanto por la tasa de pérdida de suelo que significa, como por los problemas ambientales y logísticos asociados. Se genera por la acción del flujo concentrado de agua, el cual adquiere una mayor capacidad de desprendimiento y transporte de partículas que el flujo laminar, con el consecuente incremento de las tasas de erosión, en un proceso de retroalimentación positiva. Esto fragmenta el paisaje, disminuye

la productividad de cultivos y pasturas, y aumenta los costos de operación, asociados a las dificultades para el desplazamiento de maquinaria agrícola (Viglizzo y Jobbago, 2010; Chagas y Kraemer, 2018). Al mismo tiempo, este tipo de erosión es la principal fuente de sedimentos, los contaminantes difusos más importantes de los cursos y cuerpos de agua (Ongley, 1997), poniendo en peligro la provisión de servicios ecosistémicos. Tanto en nuestro país como en otras regiones del mundo, se registró que entre 60% y 98% de los sedimentos depositados en los embalses, provienen de la erosión en surcos y cárcavas (Krause *et al.*, 2003; Cisneros *et al.*, 2010; Zhu y Cai, 2004).

Estudios recientes en la Pampa Ondulada abordan la problemática de la erosión hídrica con énfasis en los procesos laminares y por salpicadura. En la cuenca del Arroyo del Tala, se evidenció la ocurrencia de procesos erosivos en surcos y cárcavas hace casi veinte años (Buján *et al.*, 2000, 2003), llegando incluso a estimarse una tasa de pérdida de suelo de entre 11,5 y 36 t/ha año, valores que de acuerdo a Li *et al.* (2009) exceden la tolerancia admitida en suelos con horizontes superficiales extremadamente texturales, como los que presenta el área de estudio. Sin embargo, el proceso no se encuentra suficientemente estudiado y sus consecuencias aún no se dimensionaron adecuadamente.

En otras regiones del país, principalmente áridas y semiáridas, con suelos de texturas gruesas, existe una creciente preocupación por la intensificación de la erosión en cárcavas (Neder *et al.*, 2010; Antón *et al.*, 2016). En estos lugares el proceso se ha acelerado principalmente por la transformación en el uso del suelo de pastizal natural o bosques a cultivos anuales, con la consecuente alteración del ciclo hidrológico y la aparición de este tipo de erosión tanto por procesos superficiales como subsuperficiales (Cisneros, 2010; Gallardo *et al.*, 2017).

Para estudiar el proceso en la región, resulta necesario, en un primer momento, dimensionar el grado de afectación, así como

la disposición geográfica de las cárcavas. Las herramientas cartográficas facilitan el abordaje de problemáticas asociadas al territorio en la que intervienen distintos factores ambientales y antrópicos, ya que estas permiten analizar gráficamente la distribución espacial de los fenómenos y los factores a los que se vinculan. Al mismo tiempo, los sensores remotos resultan de utilidad para ampliar la escala espacial de análisis del territorio pudiendo abarcar grandes regiones, así como la escala temporal, permitiendo llevar adelante estudios de largas series históricas (Navone, 2003). Numerosos investigadores han construido mapas de cárcavas, basándose principalmente en la identificación visual de las mismas en fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución espacial. Las imágenes más utilizadas han sido las proporcionadas por los satélites SPOT, Ikonos, Quickbird y más generalizadamente las de libre disponibilidad, como Bing Aerial y Google Earth (Taruvina, 2009; Kai Liu *et al.*, 2018). Estas últimas han sido empleadas inclusive en la elaboración de mapas de escala nacional (Karydas y Panagos, 2020). Si bien la fotografía aérea continúa siendo la herramienta más utilizada para este fin (Taruvina, 2009), algunos autores sugieren limitaciones en su uso, como ser la gran cantidad de trabajo de personal calificado para la identificación, así como la reducida dimensión geográfica que se puede abarcar (Kai Liu *et al.*, 2018). En el mismo sentido, en algunos países donde la disponibilidad de fotografías es escasa, como en el caso de la Argentina, la utilización de imágenes satelitales de alta resolución puede considerarse equivalente a las fotografías aéreas (Golosov *et al.*, 2018), permitiendo estudios de la dinámica del proceso erosivo que utilicen ambas fuentes de información. Los mapas de cárcavas han resultado de utilidad para determinar el grado de afectación de un área determinada, así como para definir una línea de base de esta problemática, tanto para el estudio de su desarrollo a futuro como para el análisis en tiempo pasado. El mapeo de cárcavas constituye una herramienta

adecuada para determinar la ubicación de las mismas, las características morfológicas y de uso a las cuales se asocian, y el estudio de la direccionalidad del proceso, lo cual permite conocer si el mismo se encuentra estabilizado o en avance. Al mismo tiempo, permite ubicar aquellas áreas de mayor avance y su relación con los factores que podrían explicar el fenómeno. En adición, resulta posible cuantificar la expansión y definir el grado de carcavamiento de forma comparable a otras regiones, a través de la densidad (km^2/km^2), así como construir una referencia geográfica como verdad de campo para el desarrollo de algoritmos automáticos de clasificación de cárcavas para una región.

El objetivo de este trabajo fue determinar el grado de carcavamiento de la Cuenca del Arroyo del Tala (provincia de Buenos Aires), para lo cual se validó a campo una metodología de identificación de la erosión lineal a través de imágenes satelitales de alta resolución espacial.

Materiales y Métodos

En primer término, se definió 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, con características morfológicas contrastantes, correspondientes a los tres tercios de la misma (Ackerman *et al.*, 2000). Ambos sectores se encuentran en el Partido de San Pedro y poseen una superficie aproximada de 60 km^2 cada uno. El sector delimitado en los tercios superior y medio de la cuenca se denominó "Los Patricios" (LP). El mismo presenta microcuencas primarias con cauces paralelos y pendientes suaves (1-2%). El sector definido en el tercio inferior de la cuenca, fue denominado "La Esperanza" (LE), y posee una red de drenaje más compleja, cauces primarios, secundarios, terciarios y hasta de cuarto orden, y pendientes máximas de 2-3%. En ambos sectores predomina la actividad agrícola anual, si bien en el primero hay mayores extensiones dedicadas a la ganadería con pasturas perennes implantadas y la historia agrícola de LE es más antigua

(Vangeli, 2019). La delimitación de estos sectores se realizó mediante software libre de procesamiento de imágenes QGIS (QGIS.org, 2022), correspondiéndose los límites con las divisorias de aguas y con el arroyo principal (Arroyo del Tala) (Figura 1).

En segundo término, en función del objetivo de obtener un mapa de cárcavas para el área de estudio, se realizó una identificación visual de las mismas a través de sensores remotos, utilizando el mosaico de imágenes satelitales Bing Aerial® (Microsoft Bing Map Platform), correspondiente al año 2019. Este consiste en una composición unibanda (RGB) de alta resolución espacial, ofrecido como mapa base del Q-Gis (QGIS.org, 2022). La identificación se basó principalmente en la presencia de formas lineales que cruzan lotes productivos, generalmente asociadas a las vaguadas definidas a través de las curvas de nivel del IGN (Instituto Geográfico Nacional). Además, se tuvo en cuenta el contraste de color de

estas formas con su entorno y la presencia de vegetación natural que las acompaña en aquellas que parecen ser cárcavas largas y posiblemente antiguas.

La detección de las mismas se realizó a una escala de 1:30.000, mientras que la digitalización se efectuó a 1:20.000, llegando en algunos casos a utilizarse escalas de hasta 1:5.000 para corregir detalles o precisar la trayectoria en casos en que la cobertura dificultaba la distinción respecto al área circundante. En el caso de las cárcavas efímeras o de menor extensión, se realizó una segunda identificación a una escala de 1:5.000, trazando las mismas a 1:2.500 (Figura 2). Aquellas que presentaban ramificaciones fueron consideradas como un único vector, mientras que las formas discontinuas se digitalizaron por separado, comprendiendo distintas unidades vectoriales.

En tercer término, con el propósito de validar a campo el mapa resultante, se

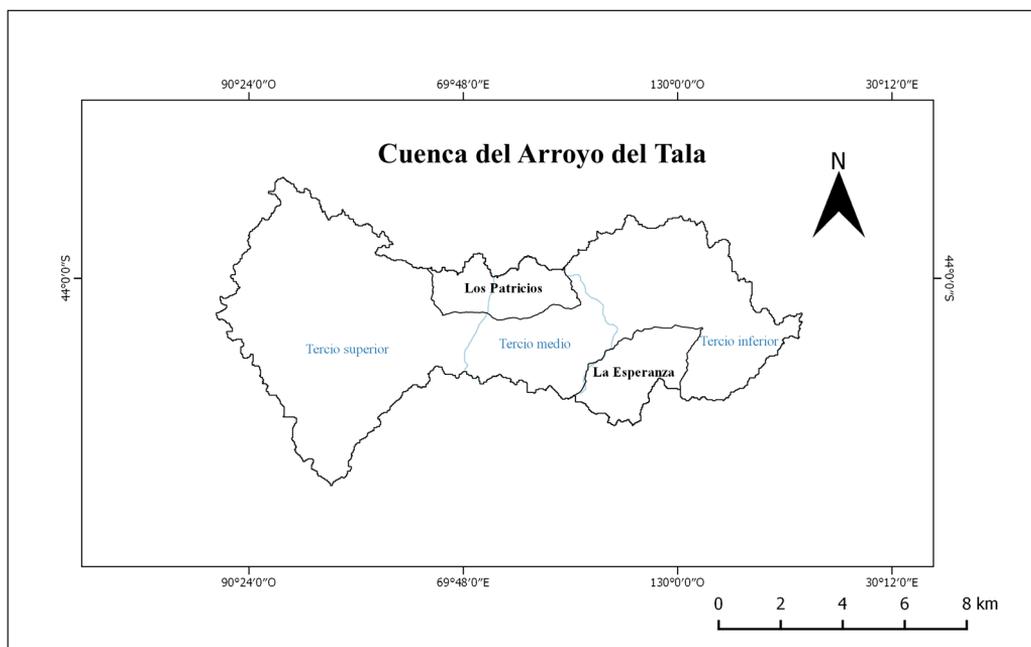


Figura 1. Se muestra la Cuenca del Arroyo del Tala y la ubicación de los sectores bajo estudio, en relación a los tercios descritos por Ackerman *et al.* (2000).



Figura 2. Escalas de trabajo en la digitalización de cárcavas. Identificación (1:30.000), digitalización (1:20.000), corrección (1:5.000). Fuente: Microsoft Bing Map Platform.

relevamos a campo 34 sitios de muestreo, que comprendían el 5,47% de las cárcavas identificadas. En los mismos, se verificó la presencia o ausencia de las unidades definidas. Esto permitió, por un lado, corregir la digitalización y obtener el mapa de cárcavas validado de ambos sectores, y por otro lado, calcular la eficiencia de la metodología de identificación visual a través de imágenes con la siguiente fórmula:

Eficiencia de identificación (%) = $(1 - \text{errores} \cdot \text{total de cárcavas visitadas}^{-1}) \cdot 100$

Por último, se cuantificaron las cárcavas, su longitud total y promedio para cada sector, y su densidad (km km^{-2}). A partir de esta información, se clasificaron los sectores estudiados en función de esta última variable, de acuerdo a lo propuesto por Golosov *et al.* (2018), quienes definieron 8 clases de densidad para evaluar la dimensión de la problemática. Las clases principales son: cárcavas no significativas ($0-0,005 \text{ km km}^{-2}$); densidad extremadamente baja ($0,005-0,01 \text{ km km}^{-2}$); alta densidad ($0,5-1 \text{ km km}^{-2}$) y densidad extremadamente alta ($>1 \text{ km km}^{-2}$). Las otras clases refieren a niveles intermedios de bajas densidades.

Resultados y discusión

Mapeo de cárcavas mediante sensores remotos
La validación a campo del mapa de cárcavas

obtenido a través de la digitalización, mostró una eficiencia del 85,3% en la identificación de este tipo de erosión mediante sensores remotos, resultando en una medida altamente aceptable para adoptar esta metodología en áreas de estas dimensiones. Este resultado implica además la validación del producto generado para ser utilizado como base para el entrenamiento de un sistema de identificación de cárcavas con imágenes satelitales para la Pampa Ondulada, ya que fue generado en una cuenca representativa de la misma, en dos sub-sectores que representan la variabilidad ambiental que ésta presenta. El mapa resultante puede observarse en la Figura 3.

En el relevamiento se registraron 5 errores de comisión (identificación de cárcavas donde éstas no se presentaban): un camino de hacienda; un canal de desagüe; una cárcava que fue rellenada posteriormente a su identificación (detalle proporcionado por el propietario del establecimiento); y dos lotes en que se digitalizaron surcos, no distinguibles de las cárcavas a través de la identificación visual. Adicionalmente, se definieron 12 cárcavas en el sector LE que correspondían a un arroyo que por sus dimensiones no se encuentra digitalizado en el mapeo de cursos de agua, las cuales representaban 11,8 km de longitud. Este último error en particular

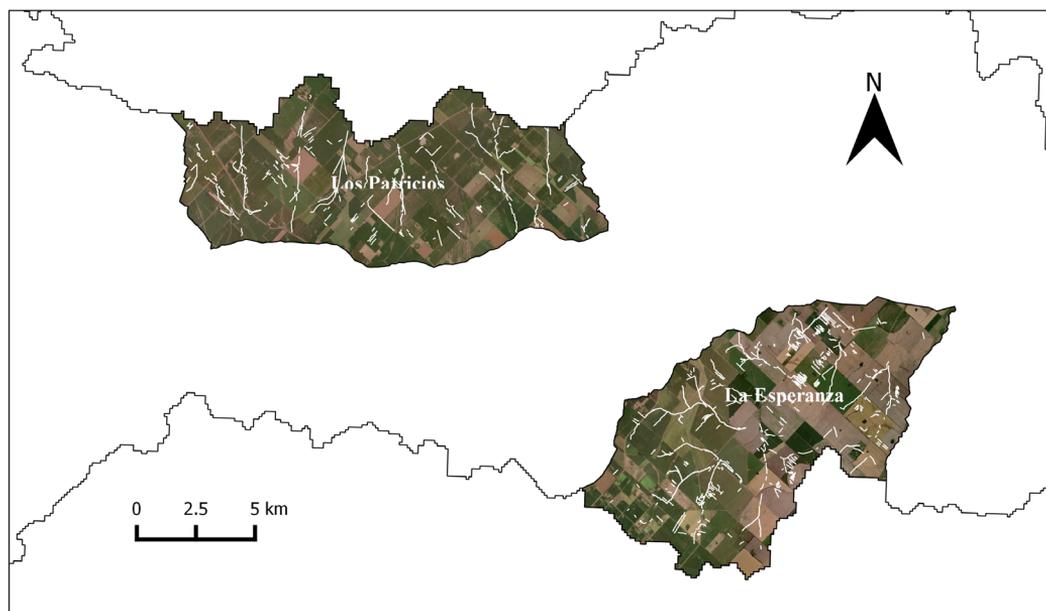


Figura 3. Mapa base de cárcavas (líneas en blanco) obtenido en los sectores bajo estudio, luego de la corrección resultante del relevamiento a campo.

representó el 80% del total. Respecto a los errores de omisión (aquellos casos en que no se identifican cárcavas existentes), se registró un único sitio, que fuera seleccionado por verse fuertemente degradado a través de las imágenes, en el que no habían sido identificadas las cárcavas existentes.

Variabilidad espacial

Se identificaron 647 cárcavas, con mayor afectación en el sector LE (68%) que en LP (32%). Esto podría deberse a que LE tiene un patrón de drenaje más complejo y dinámico con mayores pendientes (Ackerman *et al.*, 2000). Sin embargo, como puede verse en los resultados presentados en la Tabla 1, en LE la longitud promedio de las cárcavas resultó menor que en LP. En este último sector, las mismas se ubican principalmente en las vaguadas, presentando ramificaciones laterales cerradas. En el caso de LE se observó una gran cantidad de cárcavas de corta longitud agrupadas en forma paralela,

cortando las pendientes.

En el relevamiento se ha observado que las cárcavas más largas y antiguas se encuentran generalmente estabilizadas y vegetadas, mientras que las más cortas muestran mayor actividad, con sedimentos en superficie. Al mismo tiempo, se ha registrado la utilización de pivot de riego por aspersión en varios de los sitios que presentan este patrón de distribución agrupada en las laderas, pudiendo resultar en un factor incidente del nacimiento de nuevas cárcavas.

Densidad extremadamente alta

La clasificación de los sectores en función de la densidad, ubica a ambos sectores en una situación de *densidad de cárcavas extremadamente alta* ($>1 \text{ km km}^{-2}$) (Golosov *et al.*, 2018). Este resultado alerta sobre la situación de la erosión hídrica en la Cuenca de Arroyo del Tala, al mismo tiempo que permite abrir interrogantes respecto a los factores incidentes, ya que si bien ambos

Tabla 1. Variables determinadas a través de imágenes satelitales de alta resolución y su posterior corrección a través del relevamiento a campo.

Sector	Identificación visual		Corrección a campo	
	Los Patricios	La Esperanza	Los Patricios	La Esperanza
Cárcavas	209	456	207	440
Longitud (km)	69	140,62	67,65	128,33
Densidad (km/km ²)	1,13	2,16	1,10	1,97

sectores se ubican en la escala más alta de densidad, LE registra una densidad 79 por ciento superior a la de LP. Si bien esta mayor densidad de cárcavas podría estar asociada a las mayores pendientes registradas en esta zona (Ackerman *et al.*, 2000), también LE tiene mayor proporción de superficie bajo agricultura que LP, donde el uso ganadero pastoril predomina en los sectores cercanos al arroyo (Vangeli, 2019). Si bien existen publicaciones en las que se registran valores más altos de densidad de cárcavas, mayores a 5 km km⁻² (Hayas *et al.*, 2017), estos refieren a zonas áridas y con elevadas pendientes, que no son comparables con el área de estudio. Estos resultados indican la necesidad de diseñar una clasificación por densidad de cárcavas ajustada a la Pampa Ondulada, con una mayor segmentación de las clases correspondientes a las altas densidades, otorgando al presente trabajo la posibilidad de alcanzar una escala regional.

Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo radica en la caracterización del problema de la erosión en cárcavas, ya que ambos sectores estudiados pueden ser clasificados como áreas con una densidad de cárcavas extremadamente alta. A la actualidad no existen registros bibliográficos de zonas con características morfológicas y climáticas similares que registren una densidad de cárcavas equivalente. Este resultado resalta la urgencia de abordar el estudio de las cárcavas y sus causas a escala regional, lo cual no reporta antecedentes en el país ni en la región.

Por otra parte, se evidencian las diferencias en el grado de erosión entre sectores, mostrándose como necesaria la profundización en el análisis de los factores que pueden incidir en este comportamiento diferencial, como la morfometría del terreno, los suelos y la historia de uso de la tierra. Al mismo tiempo, se presenta el interrogante sobre los factores puntuales que puedan estar afectando la estabilidad de los suelos en aquellos sitios en que se concentran las cárcavas con un patrón de distribución paralelo y en las laderas, por fuera de las vaguadas.

Se puede concluir además, que la metodología de mapeo de cárcavas a través de la identificación visual de imágenes satelitales de alta resolución espacial empleada, es adecuada para la generación de este tipo de mapas a escala de semidetalle en la Pampa Ondulada. Asimismo, asociada al relevamiento a campo, resulta apropiada para la generación de mapas base con el objetivo de entrenar sistemas de identificación por sensores remotos a escalas regionales, ya que es posible tomarlos como verdad de campo. Asimismo, el mapa resultante puede ser utilizado como línea de base para estudios que busquen caracterizar la evolución de la erosión en cárcavas en el área bajo estudio.

Referencias bibliográficas

- Ackerman, G., Depietri, D. E., & Santanatoglia, O. J. (2000). Detección de áreas con diferente vulnerabilidad a erosionarse a partir de la morfodinámica del paisaje. *Rev. Facultad de Agronomía*, 20, 235-243.
- Antón, J. M., Grau, J. B., Cisneros, J. M., Tarquis,

- A. M., Laguna, F. V., Cantero, J. J., & Sánchez, E. (2016). Discrete multi-criteria methods for lands use and conservation planning on La Colacha in Arroyos Menores (Río Cuarto, Province of Córdoba, Argentina). *Annals of Operations Research*, 245(1-2), 315-336.
- Bujan, A., Santanatoglia, O. J., Chagas, C., Massobrio, M., Castiglioni, M., Yanez, M. S., ... & Fernández, J. (2000). Preliminary study on the use of the 137 Cs method for soil erosion investigation in the pampean región of Argentina. *Acta geológica hispánica*, 35(3), 271-277.
- Bujan, A., Santanatoglia, O. J., Chagas, C., Massobrio, M., Castiglioni, M., Yañez, M., ... & 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.
- Capra, A. (2013). Ephemeral gully and gully erosion in cultivated land: a review. *Drainage Basins and Catchment Management: Classification, Modelling and Environmental Assessment*. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY.
- Casas, R., & Albarracín, G. (2015). El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. PROSA. Centro Para la Promoción de la Conservación del Suelo y el Agua. Tomos I y II
- Chagas, C. I. & Kraemer, F. B. (2018). Escurrimiento, erosión del suelo y contaminación de los recursos hídricos superficiales por sedimentos asociados a la actividad agropecuaria extensiva: algunos elementos para su análisis. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires.
- Cisneros, J. M., Grau, J. B., Antón, J. M., de Prada, J. D., Degioanni, A. J., Cantero, A., & Gil, H. A. (2010). Evaluación multicriterio de alternativas de ordenamiento territorial utilizando modelos hidrológicos y de erosión para una cuenca representativa del sur de Córdoba. *Valoración de servicios ecosistémicos*, 552-579. España, T. S. D. I. A.
- FECIC, P. (1988). El deterioro del ambiente en la Argentina. Buenos Aires.
- Gallardo, A. H., Giaccardi, A., Aguilera, D., Battistino, Y. N., & Martinez, A. (2017). Gully erosion and streams development in the Río Quinto Basin, Midwest Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30(1), 21-30.
- Golosov, V., Yermolaev, O., Rysin, I., Vanmaercke, M., Medvedeva, R., & 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>
- Hayas, A., Poesen, J., & Vanwallegghem, 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>
- Krause, A. K., Franks, S. W., Kalma, J. D., Loughran, R. J., & Rowan, J. S. (2003). Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena*, 53(4), 327-348.
- Li, L., Du, S., Wu, L., & Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *Catena*, 78(2), 93-99.
- Liu, K., Ding, H., Tang, G., Song, C., Liu, Y., Jiang, L., ... & Ma, R. (2018). Large-scale mapping of gully-affected areas: An approach integrating Google Earth images and terrain skeleton information. *Geomorphology*, 314, 13-26.
- Navone, S. M. (2003). Sensores Remotos aplicados al estudio de los Recursos Naturales (No. 333.7 621.3678). FAUBA.
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., & 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.
- Neder, L. D. V., Busnelli, J., & Sampietro Vattuone, M. M. (2010). Incremento de erosión y suelos degradados por acciones antropogénicas y variaciones climáticas, Tucumán. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(4):499-504
- Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos (No. 363.7394 O-58-I). FAO.
- Pennock, D., & McKenzie, N. (2016). Estado mundial Del Recurso suelo. Resumen

- Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Poesen, J. (2011). Challenges in gully erosion research. *Landform analysis*, 17, 5-9.
- QGIS.org, 2022. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Taruvinga, K. (2009). Gully mapping using remote sensing: Case study in KwaZulu-Natal, South Africa (Master's thesis, University of Waterloo).
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 132-153.
- Viglizzo, E., & Jobbágy, E. G. (Eds.). (2010). Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Zhu, Y., & Cai, Q. (2004). Rill erosion processes and its factors in different soils. Gully Erosion Under Global Change. *Sichuan Science and Technology Press*, Chengdu, China, 96-108.

Original recibido (19/05/2022)
Original aceptado (30/08/2022)