

ROA

Revista Científica Agropecuaria

Número Especial UMS 2019
IX Congreso sobre
Uso y Manejo del suelo.

Número 23 (1) 2019
ISSN 0329-3602
ORO VERDE - ENTRE RIOS - ARGENTINA



Facultad de Ciencias
Agropecuarias

CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL ARROYO ESTACAS Y RELACIÓN CON EL USO DEL SUELO Y LA MORFOLOGÍA DEL CAUCE

Ramiro J. PIGHINI¹⁻², Ana B. WINGEYER², Marcelo G. WILSON², Emmanuel A. GABIOUD², Natalia V. VAN OPSTAL², Mariela S. SEEHAUS², María C. SASAL².

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Paraná. Ruta 11 Km 12,5. (3101) Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

Autor de correspondencia: pighini.ramiro@inta.gob.ar

RESUMEN

La caracterización morfométrica de una cuenca es una etapa inicial de la modelación de la dinámica hídrica y procesos erosivos asociados. Los objetivos del trabajo fueron caracterizar la cuenca del Arroyo Estacas y su cauce principal, y conocer la relación del uso de los suelos con la morfología de secciones de cauce (principal y secundario). Se obtuvieron y analizaron los parámetros morfométricos a partir de un modelo digital del terreno e imágenes satelitales, sumado a un relevamiento topográfico con GPS Geodésico, de secciones transversales del cauce en diferentes puntos. La cuenca del Arroyo Estacas, Departamento La Paz, Provincia de Entre Ríos, comprende una red hidrográfica de cursos temporales (cuenca alta, este) y permanentes (cuenca media-baja, oeste) alimentados por agua subterránea. La cuenca posee mayor desarrollo de bosques nativos al sureste, mientras que al noroeste se encuentra una mayor actividad agrícola. Se observan Alfisoles en su cuenca media-alta con baja o casi nula erosión hídrica, mientras que en la cuenca media-baja se observan Vertisoles y Molisoles en los márgenes de los cursos de agua, presentando síntomas de erosión hídrica, en surcos y cárcavas. Los resultados definieron un área de cuenca de 725,73 km², una longitud axial de 57,6 km y un ancho de 12,60 km. El factor de forma 0,22 indica una forma alargada, y rectangular oblonga según el coeficiente de compacidad de 2,47. La longitud del cauce principal es de 70,42 km con pendiente media de 0,012 m.m⁻¹. Los relevamientos topográficos indicaron gran profundización del cauce desde los 3 a 4 m aguas arriba hasta 7 a 8 m hacia aguas abajo, y secciones muy irregulares en relación a sus márgenes. Todos los parámetros, junto con la curva hipsométrica, establecen que la cuenca es relativamente joven y propensa a grandes cambios en su morfología a medida que las crecidas pasan por su cauce.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, caracterización morfométrica, erosión hídrica, inestabilidad de márgenes, MDE.

SUMMARY

Characterization of the Estacas stream basin: its relation to land use and channel morphology

Morphometric characterization of a basin is the initial step to model water dynamics and erosive processes associated. The objectives of this study were to characterize the Estacas stream basin and its main channel and learn about the relationship between land use and sections of the main and secondary channels. Morphometric parameters were obtained and analyzed from digital

terrain models and satellite imagery. Additionally, an in-situ topographic survey of different cross sections of the main channel was carried out with a geodetic GPS receiver. The Estacas stream basin, located in La Paz, Entre Ríos, comprises a hydrographic network of temporary flows (at the upper basin - eastern side) and permanent flows (at the lower-to-middle basin - western side) fed by groundwater seepage. The basin shows highly developed native forests at the southeast side and a more frequent agricultural activity at the northwest side. Observed soil types include Alfisols in the medium-to-upper basin, with none or low water-induced erosion, and Vertisols and Mollisols in the lower-to-middle basin, with a large number of gullies and rills by the sides of the channels. The defined basin area resulted in 725.73 km², with an axial length of 57.60 km and a width of 12.60 km. Basin form factor of 0.22 indicates an elongated, oblong-rectangular shape in accordance with the compactness coefficient of 2.47. Main channel is 70.42 km long with an average slope of 0.012 m.m⁻¹. The topographic surveys indicated a deepening of the channel from 3-4 m upstream to 7-8 m downstream, and irregular banks in the cross section. The parameters, together with the hypsometric curve, indicate that the Estacas stream basin is of recent origin and prone to important changes on its main channel morphology as floods occur.

Keywords: watershed, morphometric characterization, water erosion, river margin instability, DEM

Introducción

La forma de una cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico, ya que cuencas con áreas similares pero de diferentes formas presentan distintas respuestas en sus hidrogramas, ante una lluvia de igual magnitud y desarrollo (Ibáñez *et al.*, 2011). Una cuenca hidrográfica típica puede caracterizarse por su morfología, el tipo y uso de sus suelos, y la cobertura vegetal (Henaos, 1988). La influencia de cada uno de estos factores sobre la dinámica hídrica de la cuenca es difícil de caracterizar mediante parámetros simples, pero se pueden definir índices que sirven de referencia a la hora de clasificar y comparar cuencas semejantes (López Cadenas de Llano, 1998).

Los índices que describen físicamente a la cuenca se consideran como propiedades morfométricas. Estos índices permiten realizar comparaciones entre distintas unidades hidrográficas y sirven para predecir de forma preliminar las características del territorio y del ambiente en el cual se emplaza el curso de agua. Además, estos parámetros relacionan eventos de precipitación con una posible

respuesta del aprovechamiento hídrico de los mismos, tales como la escorrentía superficial, transporte de sedimentos o distribución de los nutrientes del suelo (Ibáñez *et al.*, 2011). Reducir los procesos de erosión de suelos en la provincia de Entre Ríos, es una premisa para la conservación del agua y el suelo y representa un desafío para los sistemas agropecuarios. Para disminuir el decaimiento de la producción de los suelos y la calidad de las aguas, es necesario identificar primero, los sectores de origen y desarrollo de la erosión hídrica (Lane, 1997).

El A° Estacas, al norte del Departamento de La Paz (Entre Ríos), es el único afluente en la margen derecha del A° Feliciano, al cual desemboca, debido a fuertes controles estructurales (Arbuet, Ma. A., 2009). Comprende una red hidrográfica que en su cuenca alta posee cursos de agua temporales, mientras que en la cuenca media y baja posee cursos permanentes vinculados al agua subterránea, constituyendo su caudal base (Figura 1). Esta cuenca recibe una precipitación media anual entre 1100 y 1200 mm, y constituye uno de los

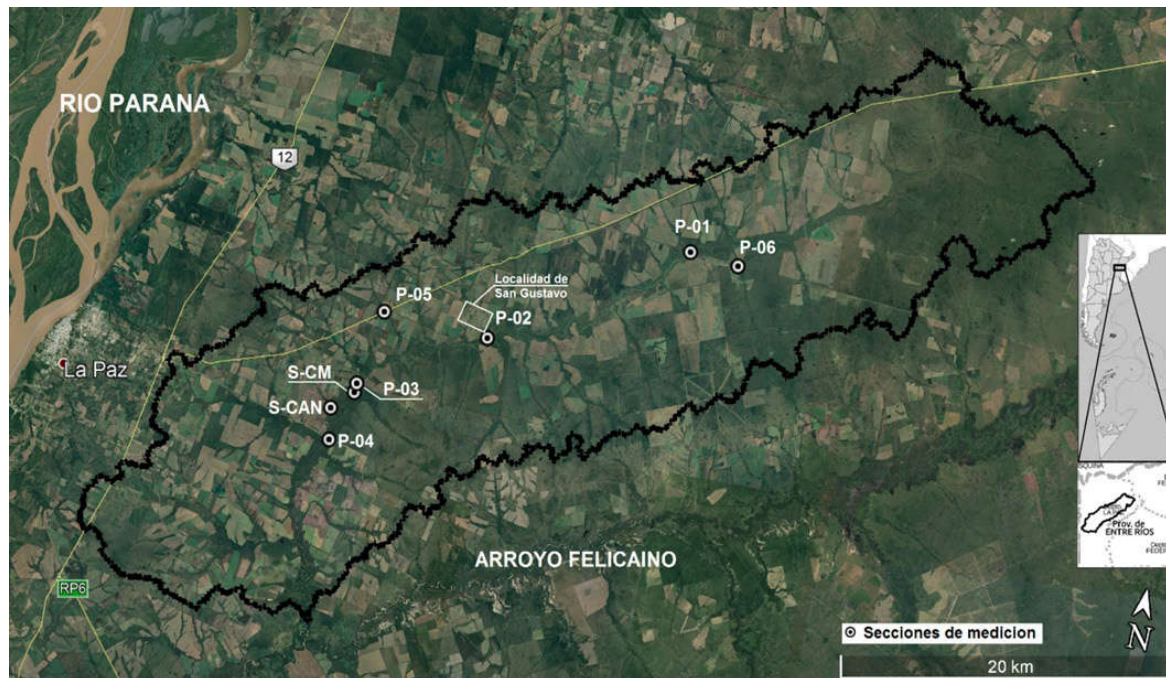


Figura 1. Ubicación de la cuenca del A° Estacas y secciones de medición. P-01, P-02, P-03 y P-04: puntos de medición de sección transversal en el cauce principal. P-05 y P-06: puntos de medición de sección transversal en cauces secundarios. S-CM: punto de descarga de la subcuenca "monte". S-CAN: punto de descarga de la subcuenca "agrícola".

sitios piloto del Observatorio Nacional de Degradación y Desertificación de Tierras (INTA – CONICET – Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable - FAUBA). Además, tiene la particularidad de contener en toda su extensión una sola concentración urbana importante, la localidad de San Gustavo, la cual en el último censo nacional registró un total de 1.618 habitantes (INDEC, 2010).

En cuanto a los suelos, en la cuenca media-alta predominan Alfisoles de aptitud ganadera, con problemas de encharcamiento, y con baja o casi nula erosión hídrica. En la cuenca media-baja predominan Vertisoles con aptitud ganadera-agrícola, que presentan cárcavas y erosión en surcos. En esta área también se observan Molisoles en todo el sector de márgenes del cauce principal y de los cauces secundarios, con síntomas de erosión hídrica (INTA, 1990). Similar al resto de la Provincia, el A° Estacas ha sufrido un importante cambio en el uso de la tierra debido a la conversión del

ecosistema natural hacia sistemas agrícola. El incremento en la superficie agrícola en la cuenca se ha debido fundamentalmente a un proceso de deforestación sin planificación del uso y manejo posterior de la tierra (Wilson, 2007). El área con monte nativo en la cuenca se ha reducido en un 19,3 % entre 1991 y 2011, a una tasa anual media de $-1,1\%$, es decir 540 ha.año^{-1} (Sabattini *et al.*, 2016). Estos cambios en el uso de la tierra, suponen una mayor vulnerabilidad de los suelos a los procesos erosivos.

Encuanto a obras civiles, la cuenca es atravesada por algunos caminos rurales y puentes, para la comunicación de asentamientos y estancias más alejadas (Figura 2). Las cuatro obras de mayor envergadura corresponden a: i) Ruta Provincial N° 1: vía principal de comunicación, ésta no corta en ningún momento al cauce principal, pero sí a los secundarios, que se regulan con alcantarillas puentes; ii) Puente sobre la Ex Ruta Provincial N° 50, que corta

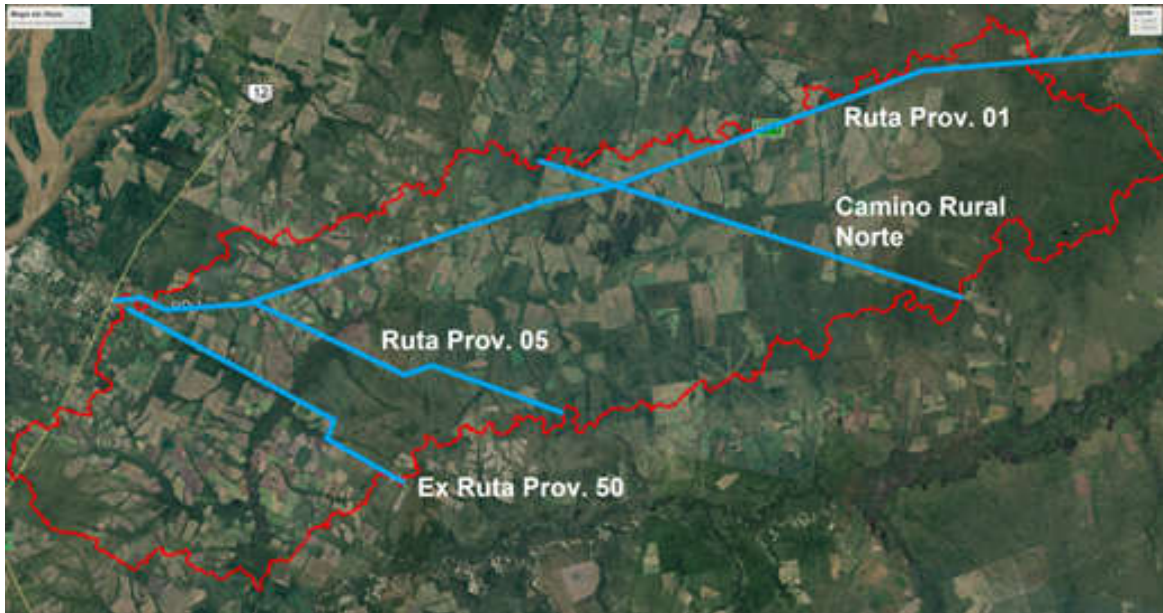


Figura 2. Principales obras civiles en la cuenca del A° Estacas.

el cauce principal a los 13,9 km desde su desembocadura, y se ubica cercano al punto de muestreo P-04; iii) Puente sobre Ruta Provincial N° 5, corta al cauce principal a los 19,1 km desde su desembocadura y en el cual se ubica el punto P-03. Comunica con la ciudad de Federal; y iv) Camino Rural Norte, que es un camino de tierra que no posee comunicación más que para los predios internos con la Ruta Provincial N° 01.

Conocer el funcionamiento hidrológico de la cuenca, a través de su análisis morfológico, es el primer paso a realizar para obtener una relación entre el uso del suelo y los procesos de erosión/sedimentación que se producen en el sistema (Rodrigues, 2014). Para ello, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales, permiten definir su forma y su red de drenaje, por medio de los Modelos Digitales de Elevaciones (DEM, por su denominación en inglés). En base a los resultados de dicha interpretación, se pueden obtener características morfológicas y funcionales propias, que de acuerdo a Gaspari *et al.* (2009), son básicas para una modelación hidrológica posterior. En tal sentido, se plantean como

objetivos caracterizar morfológicamente la cuenca del A° Estacas y conocer la relación del uso de los suelos con la morfología de secciones de cauce (principal y secundario).

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en dos etapas: la primera en gabinete, de estudio de información antecedente y de procesamiento digital, y la segunda etapa de relevamiento topográfico de 4 secciones del cauce principal y 4 de cauces secundarios, para comprobar la estabilidad de las márgenes en cada caso.

ESTUDIO DE INFORMACIÓN ANTECEDENTE Y PROCESAMIENTO

Para la obtención de los parámetros morfológicos, se trabajó sobre un DEM de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 30 m de resolución espacial, el cual fue referenciado al sistema POSGAR 2007 – ARGENTINA – FAJA 5. El procesamiento del mismo se realizó por medio de un entorno SIG.

Parámetros de forma:

-Área (A - km²): corresponde al área encerrada entre la divisoria de aguas tomando como

sección de cierre, la desembocadura del A° Estacas en el A° Feliciano.

- Perímetro (P - km): es la longitud del contorno o divisoria de aguas del área de la cuenca.

- Longitud axial (La - km): línea recta paralela al cauce principal. Comprende desde la sección de cierre, hasta la cabecera del límite de la cuenca, siguiendo el recorrido más probable del agua.

- Ancho promedio (W - km): se obtiene como el cociente entre el área y la La.

- Factor de forma de Horton (K): es un factor adimensional que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial, y resulta del cociente entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de La (La²). Cuando K es cercano a 1, representa una cuenca de forma redondeada. Por debajo de la unidad, caracteriza una cuenca alargada, mientras que por encima de la unidad se habla de una cuenca con achatamientos y cursos principales más cortos (Horton, 1932).

- Índice de Compacidad (Kc): también llamado coeficiente de Gravelius, es un parámetro adimensional que compara el perímetro de la cuenca (P) con el área de la misma (A) mediante la siguiente expresión:

$$Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

El índice toma valores entre 1 y 3, siguiendo la clasificación de Gravelius (1914).

- Tiempo de concentración (t^c - min): es el tiempo que demora en llegar a la desembocadura de la cuenca, una gota de agua situada hipotéticamente en el punto más alejado de la misma. A partir de ese momento, el caudal es máximo y no podrá incrementarse, si se mantiene una intensidad de precipitación constante (Kirpich, 1940). Siendo: "S" la pendiente media de cuenca (m.m⁻¹) y "La" la longitud axial (m), Kirpich (1940) establece la siguiente función para obtener el tiempo de concentración:

$$t_c = 0,025 \left(\frac{La}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (2)$$

Parámetros de Relieve:

- Pendiente media de la cuenca (S): es la relación existente entre el desnivel altitudinal de la cuenca y su longitud. Este dato se obtuvo por medio de procesamiento del DEM en entorno SIG, el cual permite obtener un plano de pendientes por cada pixel de la imagen. La pendiente media se definió como la mediana de todos los valores de pendiente de este último plano.

- Curva Hipsométrica: representa la superficie acumulada de la cuenca, en función de la altitud. Dependiendo la forma de la curva, se puede clasificar en cuencas jóvenes o con un cierto grado de vejez (Llamas, 1993)

Parámetros de la red de drenaje: La morfología de las vías fluviales naturales depende de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del lecho.

- Longitud de cauce principal (L_p) y cauces secundarios (L_s): Se trata de la longitud (en km) de todos los canales de aporte al drenaje de la cuenca.

- Pendiente media del cauce principal (S_p): es la relación adimensional existente entre el desnivel altitudinal del cauce principal y la longitud del mismo (L_p).

- Orden de drenaje: El orden de la cuenca, o clasificación de Horton-Strahler, expresa que las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas por un conjunto de nodos conectados unos a otros por segmentos, de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la salida (Strahler, 1952).

- Densidad de drenaje (D_d - km.km⁻²): es definida para una cuenca como la longitud de todos los cursos de agua (L_i) por unidad de área (Horton, 1932).

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (3)$$

D_d se clasificó según la propuesta de Delgadillo y Paez (2008), en la cual se establecen cuatro clases de densidad de drenaje (baja, media, alta y muy alta), según el valor del parámetro (desde D_d < 1 a D_d > 3).

RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO DE SECCIONES

Se realizaron mediciones de secciones transversales del cauce principal y cauces secundarios del arroyo, mediante el uso de GPS Geodésico. Los puntos de control, correspondieron a secciones características donde la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná del INTA realiza toma de muestras de agua para evaluación de calidad. Las últimas dos secciones (S-CAN y S-CM) corresponden a subcuencas piloto en las cuales se realizará un monitoreo hidrológico más detallado en el futuro. Teniendo en cuenta que el inicio de la progresiva del cauce principal es la desembocadura de la cuenca, los puntos seleccionados fueron (Figura 1):

- Punto de muestreo 1 (P-01). Progresiva 43,3 km del cauce principal.
- Punto de muestreo 2 (P-02). Progresiva 24,4 km del cauce principal.
- Punto de muestreo 3 (P-03). Progresiva 19,1 km del cauce principal.
- Punto de muestreo 4 (P-04). Progresiva 13,9 km del cauce principal.
- Punto de muestreo 5 (P-05). Subsidiario en margen derecha a mitad de cuenca.
- Punto de muestreo 6 (P-06). Subsidiario en margen izquierda en cuenca alta.
- Microcuenca Agrícola Norte (S-CAN): Es una

subcuenca en donde se realiza más de un 75% de actividad Agrícola en su área. Posee una superficie 14,35 km² (2% del total). Posee una longitud de cuenca de 3,43 km y 4,77 km de cauce principal. La pendiente media del terreno es de 0,65% y su orden de drenaje es de 2, con un total de 12,68 km de canales de drenaje.

- Microcuenca Monte (S-CM): Es la única subcuenca que posee más de un 75% de su extensión con actividad ganadera bajo monte, subsistiendo aun la vegetación de monte renoval en su interior. Se encuentra enfrentada a la Microcuenca Agrícola Norte con una superficie similar (11,37 km² – 1,6% del total). Posee una longitud de cuenca de 7,25 km y 7,23 km de cauce principal. La pendiente media del terreno es de 0,32% y su orden de drenaje es de 2, con un total de 12,18 km de canales de drenaje

Debido a la imposibilidad de acceder con los equipos de medición a las proximidades de la desembocadura, es que la sección medida más cercana a ella, fue el punto de muestreo P-04). Las mediciones se realizaron en 3 campañas diferentes: del 26 al 28 de noviembre de 2018, 23 y 24 de abril de 2019, y 22 de agosto de 2019.

El relevamiento se georreferenció al marco POSGAR 07, en coordenadas planas



Figura 3. Regla-Escala instalada por la DHER bajo puente sobre Ex Ruta Provincial N° 50, cercana al punto de muestreo 4.

GAUSS KRUGGER y plano de nivelación con cotas IGN (Instituto Geográfico Nacional) que se obtuvieron en base a puntos de Vialidad Provincial de Entre Ríos ubicados sobre la Ruta Provincial N° 01. El relevamiento con GPS se efectuó con equipos doble frecuencia RTK. Además, existe información hidrológica de alturas del A° Estacas en un puente cercano al punto de muestreo 4 (Ex Ruta Provincial N° 50), en la cual existe una regla-escala colocada al pie del puente (Figura 3). Los

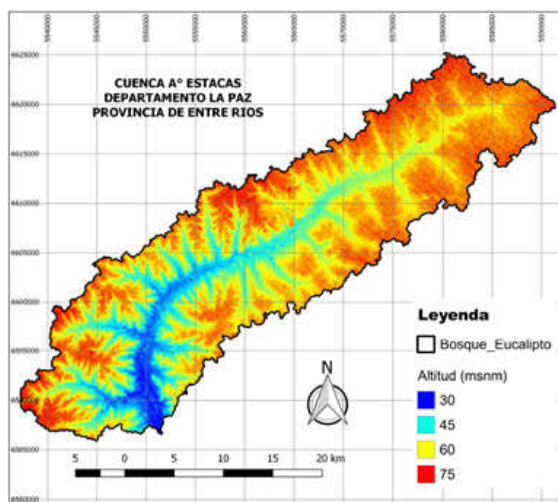


Figura 4. Modelo digital de elevaciones de la cuenca del A° Estacas.

datos de altura son diarios, abarcan desde mayo del año 2015 hasta mayo del año 2018, y fueron realizadas por la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (DHER). Los datos se obtuvieron de la Base de Datos Hidrológica Integrada del Consejo Hídrico Federal (COHIFE). No existen en esta base de datos, mediciones de caudales en el curso de agua.

Resultados y discusión

CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL A° ESTACAS

El DEM que se obtuvo para realizar los cálculos en gabinete es el que se presenta en la Figura 4. El área de la cuenca del A° Estacas se estimó en 725,73 km², P de 237,30 km, La de 57,60 km y W de 12,60 km. El resto de factores que se relacionan con los parámetros morfométricos se muestran en la Tabla 1.

El factor de forma de Horton, al igual que el índice de compacidad, indica que la cuenca es del tipo alargada, lo cual se puede apreciar en los planos generales. El escurrimiento resultante de una lluvia sobre una cuenca de forma alargada, no se concentra tan rápidamente, como en una cuenca de forma redondeada (Horton, 1932). En las cuencas alargadas, los hidrogramas de descarga poseen menor caudal debido a que el cauce de agua principal es más largo que los cauces

Tabla 1. Valores de los parámetros morfométricos de la cuenca del A° Estacas.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Factor de forma de Horton	K	0,22
Índice de Compacidad	Kc	2,47
Pendiente media de la cuenca (%)	S	1,20
Tiempo de concentración (hs)	tc	10,6
Longitud de cauce principal (km)	Lp	70,42
Longitud total de cauces secundarios (km)	Ls	805,65
Pendiente media de cauce principal (%)	SP	0,04
Orden. Clasificación de Horton-Strahler	O	4
Densidad de drenaje (km.km ⁻²)	Dd	1,27

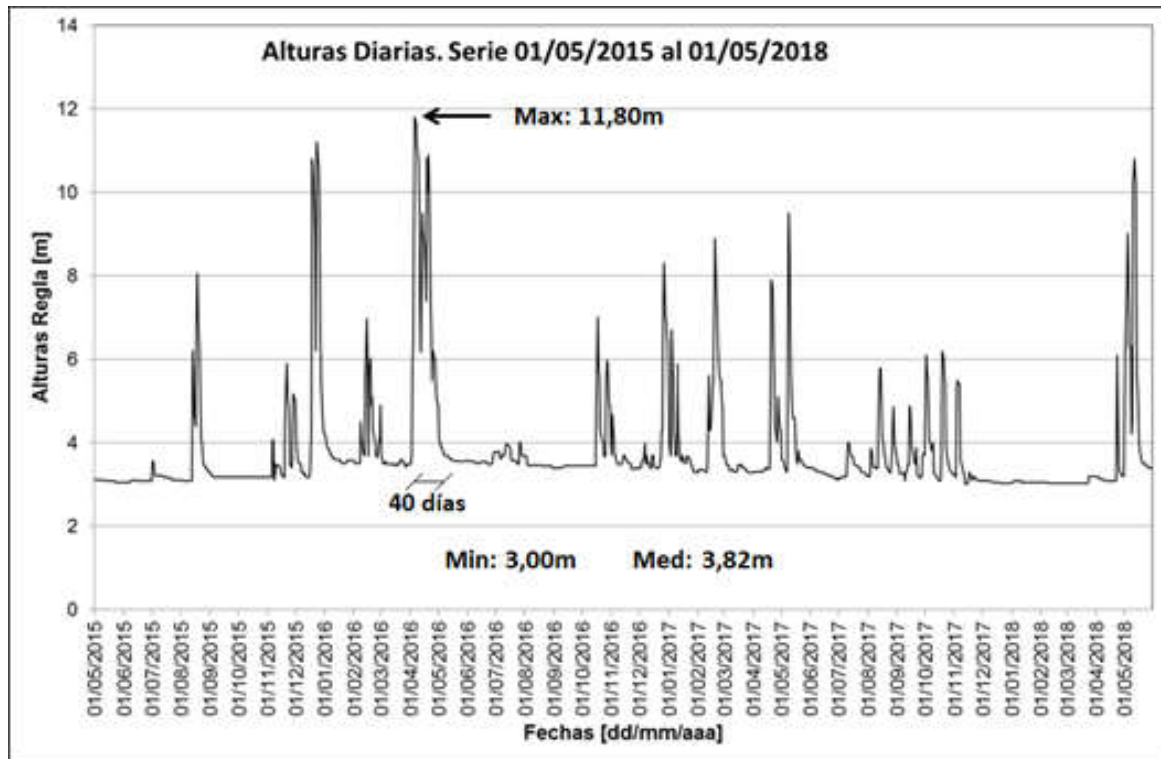


Figura 5. Alturas del A° Estacas medidas por la DHER. Serie 2015-2018.

secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos (López Cadenas de Llano, 1998). No obstante, el relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma; en general se puede afirmar que a mayor relieve o pendiente la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores (Horton, 1945). Particularmente, para la cuenca del A° Estacas, ésta última aclaración se ve reflejada conjuntamente entre la estimación del tiempo de concentración, cuyo valor es de 10,6 hs, y los datos de alturas que se han medido en el P-04 entre mayo de 2015 y mayo de 2018 (Figura 5). De esta manera, los parámetros de forma y relieve sugieren hidrogramas con una curva de crecida pronunciada, pero con una curva de recesión muy tendida (Busnelli, 2009). Sin embargo, si en dicho análisis se considera el resultado del tiempo de concentración, que influye más que la forma de la cuenca, se puede establecer que los hidrogramas serán de corta duración, pero con curvas de crecida

y recesión más pronunciadas, tal y como se reflejan en las mediciones de la Figura 5.

La curva hipsométrica (Figura 6), demuestra además que es una cuenca relativamente joven con gran poder erosivo. Esto implica grandes cambios en su morfología a medida que las crecidas pasan por su cauce (Llamas, 1993; Marmol, 2008). Los parámetros de la red de drenaje, indican una red de drenaje densa (Tabla 1). A mayor densidad de drenaje, el tiempo de concentración es menor, lo que contribuiría también a establecer la afirmación de hidrogramas cortos y con curvas pronunciadas (Delgadillo y Paez, 2008).

USO DE LOS SUELOS Y MORFOLOGÍA DE SECCIONES DE CAUCE

Con respecto al relevamiento topográfico, se puede observar que las secciones correspondientes a los puntos de muestreo 5 y 6, los cuales son afluentes del cauce principal, poseen morfologías simétricas con poco rastro de erosión generalizada y profundidades bajas

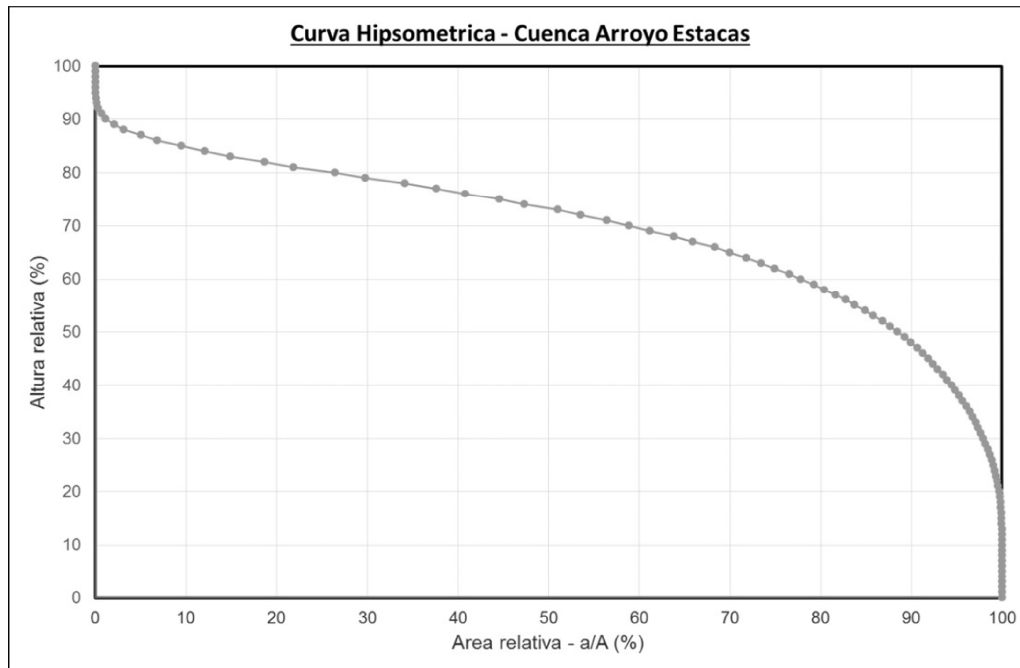


Figura 6. Curva hipsométrica de la cuenca del A° Estacas.

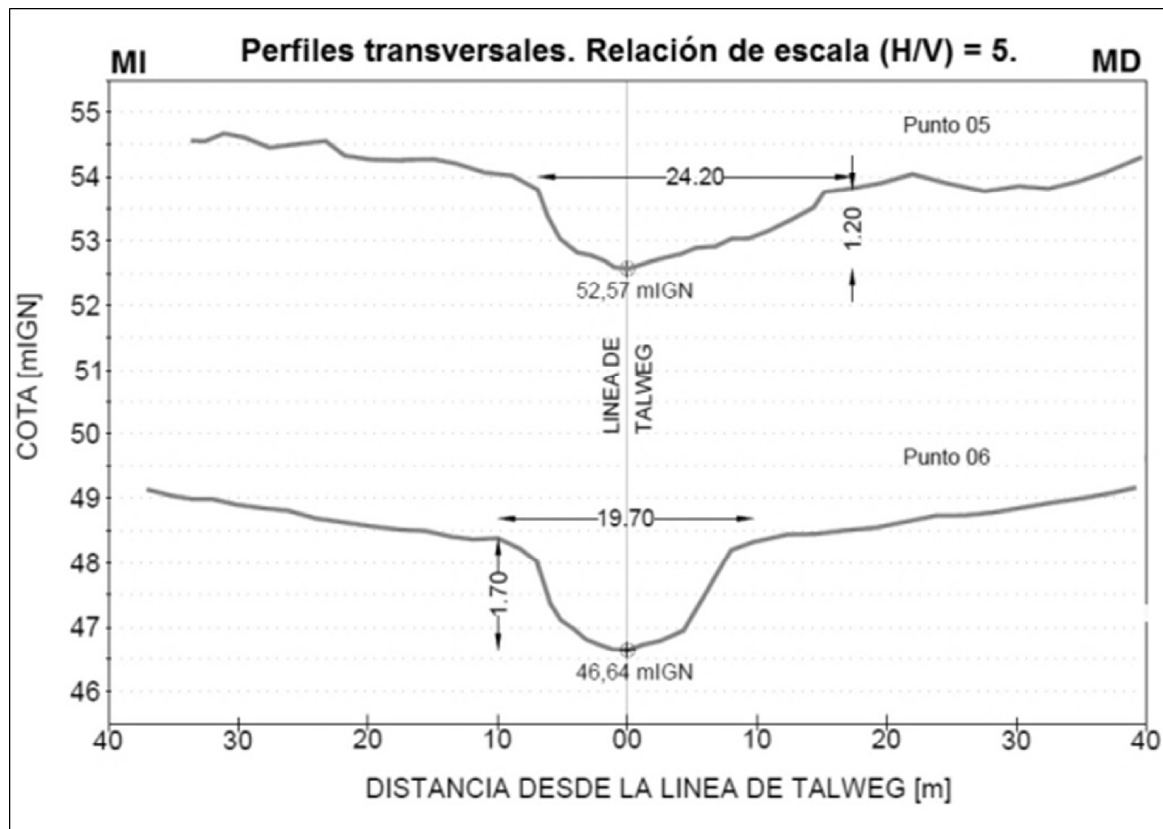


Figura 7. Secciones transversales de los puntos de muestreo 5 y 6, correspondientes a fuentes del A° Estacas.

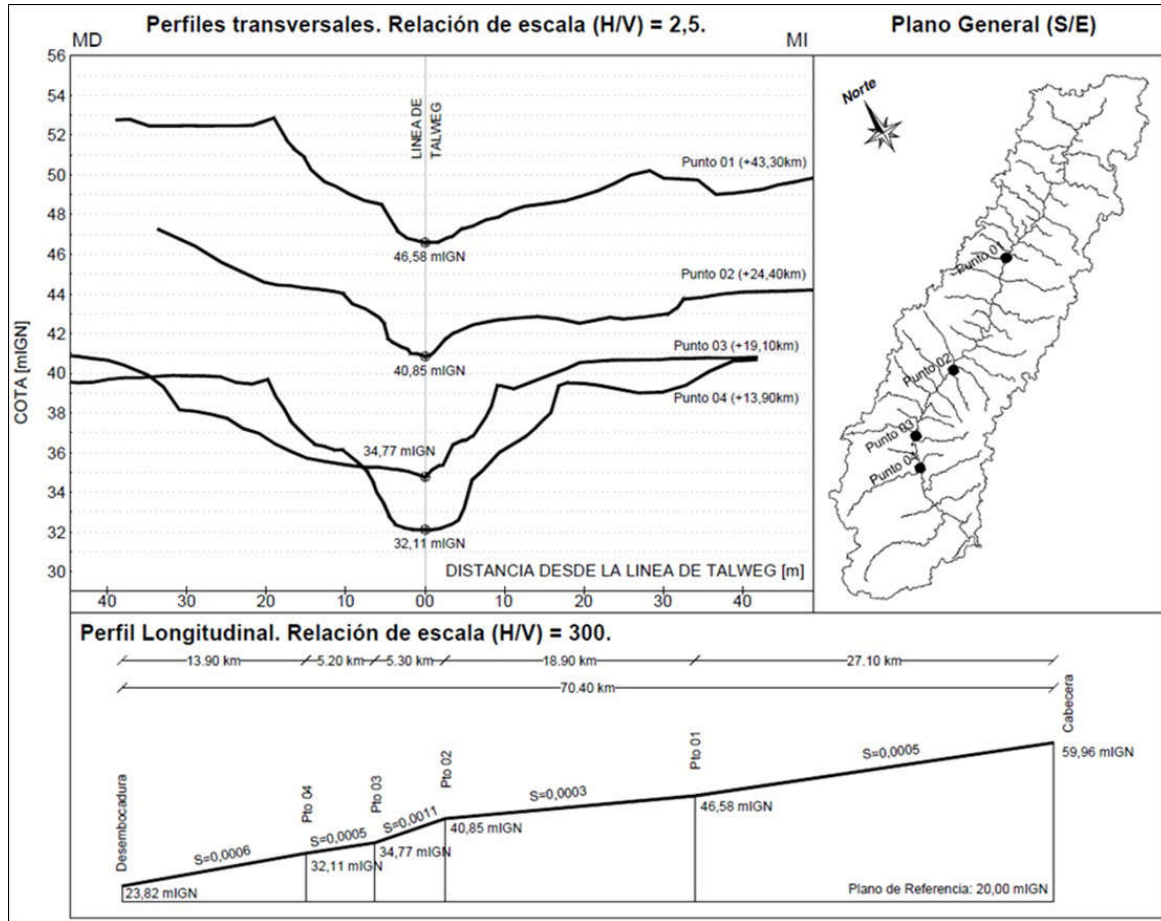


Figura 8. Secciones transversales de los puntos de muestreo 1 a 4, correspondientes al cauce principal del A° Estacas.

que no superan los 2 m (Figura 7). Esto se debe a las áreas de aporte pequeñas que descargan en estos puntos, ya que son afluentes menores del cauce principal. En este último, las secciones de los puntos de muestreo 1 a 4 verifican profundidades mayores que rondan desde los 5 a los 8 m, aumentando hacia aguas abajo (Figura 8 y Tabla 2). Se observan fuertes irregularidades en sus márgenes, producto del poder erosivo del cauce manifestado con la curva hipsométrica, y de la inestabilidad estructural que detallan las cartas de suelos de INTA (1990). Se debe tener en cuenta que la estabilidad de la estructura del suelo afecta de manera directa e indirecta a otras propiedades suelo y puede ser usada como un indicador en la degradación (Cerdeira, 2000).

En las secciones transversales de los puntos 1, 2 y 3 se puede observar que una de las márgenes posee mayor cota que la otra. Este fenómeno, además de deberse al fuerte control estructural que rige la geología de la cuenca (Arbuet Moraes, 2009), es producto del desprendimiento del suelo y la deposición de grandes bancos de arena en la margen más tendida, que disminuyen el cauce principal (Figura 9).

Los desprendimientos mencionados son producto del cambio de uso del suelo. La remoción de la vegetación nativa para ganar áreas de cultivos aumenta el volumen de agua que escurre hacia el canal principal, aumentando la erosión de fondo y de pie de margen, desestabilizando las barrancas y

Tabla 2. Dimensiones de secciones medidas en los puntos de muestreo 1 a 6 en el A° Estacas.

PUNTO DE MUESTREO	ÁREA DE APORTE	ÁREA TOTAL (DESBORDE)	ANCHO CANAL PRINCIPAL	ANCHO VALLE DE INUNDACIÓN	PROF. TOTAL
	km ²	m ²	m	m	m
P-01	227,76	78,06	18,00	42,70	3,60
P-02	394,25	58,76	19,00	37,80	2,90
P-03	490,58	122,03	22,40	58,50	5,70
P-04	541,29	155,85	20,50	37,40	7,40
P-05	5,92	17,56	19,70	---	1,70
P-06	10,13	17,01	24,20	---	1,20



Figura 9. Vista de un puente cercano al punto de muestreo 3 donde se pueden ver bancos de arena en la margen izquierda del A° Estacas. (MD: Margen derecha; MI: Margen Izquierda)

provocando procesos de colapsos masivos debido a inestabilidad geotécnica de los márgenes (Naiman *et al.*, 2005; Basile, 2005). En los puntos 1 y 2, este proceso se observa en la margen derecha, mientras que en el punto 3 sucede en la margen izquierda. Por otro lado, las secciones de los puntos 3 y 4 presentan cotas de superficie muy similares debido a que ambas ya forman parte de la cuenca baja con demasiada proximidad entre sí. Sin embargo, se puede observar que la sección 4 es claramente más profunda y con una sección más regular. Esta sección es en la cual se encuentra ubicada la regla

limnimétrica con la que se han tomado los datos de aforos entre los años 2015 y 2018. Por otro lado, al observar el DEM de la figura 4, se podrá establecer que en las cercanías de la desembocadura, la profundidad podrá ser aún mayor, y con cotas de fondo que se encuentren por debajo de la cota de 30 m del IGN.

El aumento del paisaje que presenta cárcavas profundas y bien marcadas en la cuenca hacia aguas abajo, también permitiría explicar la irregularidad de las secciones del cauce. En este sentido, la erosión en cárcavas es el producto de una erosión hídrica lineal intensa, que produce el desarrollo de un nuevo canal de aportes, estableciendo que la cuenca todavía posee una fuerte dinámica morfológica (Basile, 2018). Por otro lado, los bancos de arena que se encuentran en las cercanías de las obras civiles transversales al flujo, determinan la deposición de los sedimentos arrastrados por la formación de surcos y cárcavas superficiales, en los sectores de menor velocidad (Figura 9).

En cuanto a las dos subcuencas piloto (Figura 10), en aquella que tiene actividad ganadera exclusivamente, la sección presenta una zona de flujo encauzado y otra de inundación en épocas de crecidas donde el ancho se incrementa de 3,50 m a casi 12,00 m para una altura superior a 1,20 m desde el talweg del cauce. Andreassian (2004) establece que la tala de árboles genera en una primera

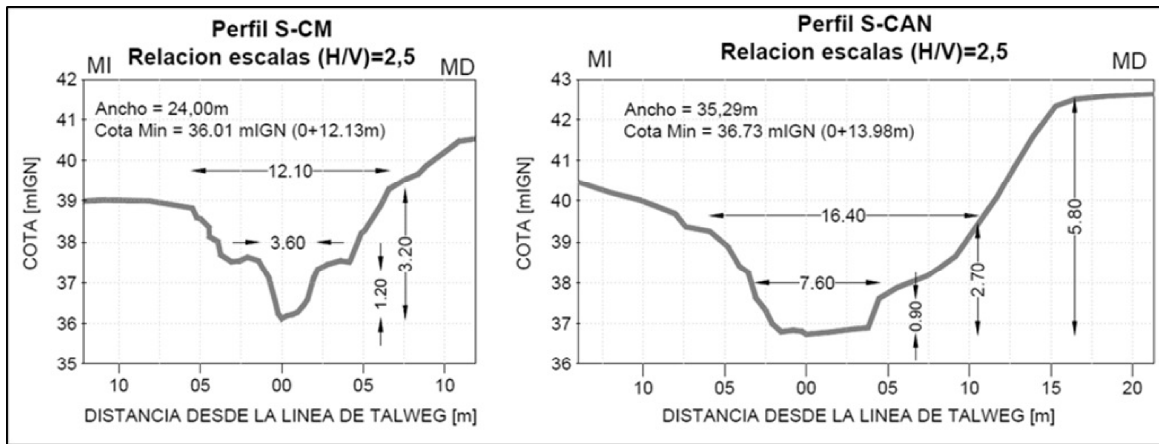


Figura 10. Secciones transversales de los afluentes del A° Estacas correspondientes a las microcuencas piloto agrícola (S-CAN) y ganadera (S-CM).



Figura 11. Imagen de sección de medición del cauce de la Microcuenca Ganadera S-CM.



Figura 12. Imagen de sección del cauce de la Microcuenca Agrícola S-CAN correspondiente al exterior de una curva.

etapa un incremento en el caudal, seguido por una segunda etapa de disminución, atribuida a la regeneración de la vegetación. Esto permitiría explicar por qué la subcuenca ganadera también posee cárcavas y surcos (aunque estas son menos frecuentes y de menor profundidad que las de la subcuenca agrícola), ya que el gran porcentaje de la vegetación es monte renoval (Figura 11). Por otro lado, la microcuenca agrícola posee una sección más irregular e inestable, producto de los grandes arrastres de material y de la formación de cárcavas profundas que tienen

más presencia en esta subcuenca (Figura 12). Además, la falta de cobertura en la superficie del terreno disminuye la interceptación de la lluvia y aumenta los caudales transportados por el cauce, favoreciendo a la erosión general (Basile, 2018). Esto explicaría el gran aumento de las dimensiones del cauce principal y del valle de inundación entre la cuenca agrícola y la ganadera. Estos resultados, sumado a los estudios realizados por Sabattini *et al.* (2016) y Wilson (2007), demuestran que los procesos de degradación del suelo se inician en la medida

en que actúen varios factores de manera simultánea como lluvias, morfología de la cuenca, acción antrópica, entre otros (Casas, 1978).

Por último, al comparar las observaciones a campo y los parámetros calculados, se observa un vínculo entre la curva hipsométrica y la dinámica morfológica de la cuenca. En tal sentido, la clasificación de Llamas (1993) establece que la cuenca es de tipo A, caracterizada por poseer una cuenca joven de gran potencial erosivo y alta actividad morfológica. Además, la forma empuntada de los limnigramas medidos entre 2015 y 2018, cerca del punto de muestreo 4, permiten determinar hidrogramas con curvas de crecida muy empuntadas, y por ende con altas velocidades de escurrimiento en cauce que favorecen el transporte de sedimentos (Chow, 1959).

Estas afirmaciones se pueden observar en el terreno hasta el P01, con el gran desarrollo de erosiones lineales como cárcavas y surcos, así como la erosión y desprendimiento de suelos al pie de los márgenes del cauce, que demuestran que la cuenca aún se encuentra en estado de cambio morfológico.

Conclusiones

En base a los objetivos del trabajo, se puede establecer que el A° Estacas posee una cuenca joven, con muchos problemas de inestabilidad del suelo. Respecto al uso del suelo, las condiciones particulares de drenaje, la textura y estructura del suelo, sumado al avance de la actividad agrícola en la mayor parte de la cuenca, provocan un mayor porcentaje de escurrimiento superficial en relación al agua precipitada y un fuerte proceso de pérdida de suelos, manifestándose en la inestabilidad y en las características de las secciones del cauce principal y de sus márgenes. Específicamente, la diferenciación de las subsidiarias puramente agrícolas frente a las ganaderas se destaca en las secciones irregulares o más regulares, respectivamente, en donde las últimas poseen zonas de flujo encauzado y de inundación en crecidas. Es claro que será necesario realizar estudios más

detallados de la relación del impacto del uso del suelo sobre la pérdida por erosión, para llegar a una conclusión certera. Sin embargo, como una primera aproximación, se puede establecer que la pérdida de cobertura arbórea, las condiciones físicas del suelo y la erosión hídrica, producen cauces con barrancas inestables y disminución de área productiva tanto agrícola como ganadera.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por CONICET, a través de la Beca Doctoral CONICET del primer autor, y se enmarca, además, en el Observatorio Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación (ONDTyD). Las actividades fueron financiadas parcialmente por los Proyectos Nacionales INTA PE I046, PD I039, PD I062 y PE I041

Bibliografía

- ANDRÉASSIAN V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. N° 291. pp.1-27.
- ARBUET MORAES, M.A. (2009). Efectos hidrológicos del cambio de uso del suelo en el Litoral Argentino. Estudio de caso: cuenca del A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos). Tesis de Maestría. FICH, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. 175 p.
- BASILE, P. A. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. *Editorial de la Universidad Nacional de Rosario*. Edición digital en PDF. Rosario. Argentina. 473p.
- BASILE, P.A. (2005). Modelación de la Erosión de Márgenes por Mecanismo de Colapso Masivo Asociado a Falla Plana". XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza. ISBN 987-22143-0-1.
- BUSNELLI, J. (2009). Evolución Histórica, Situación Actual y Perspectivas Futuras del Riesgo de Inundación en la cuenca del Río Gastona. Tucumán. Argentina. Tesis Doctoral Posgrado en Geología. *Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Tucumán*. 629 p.
- CABRERA A.L. (1976). Regiones Fitogeográficas Argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. 2da. Edic. Tomo II. ACME. Buenos Aires. Argentina. 85 p.

- CASAS R. (1978). La agricultura permanente y la degradación de los suelos en República Argentina. *IDIA*. N 433 - 436. pp. 62-74.
- CERDÀ, A. (2000). Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research*, N° 36, pp 1- 8.
- CHOW, V. T. (1959). *Open Channels Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- DELGADILLO, A. & PÁEZ, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.). (2008). *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties*. Mérida: FUNDAPRIS.
- GASPARI F.J., SENISTERRA G.E., DELGADO M.I., RODRÍGUEZ VAGARÍA A., BESTEIRO S. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. 1° Ed. La Plata, Argentina. *Editorial Autores*. 321p
- GRAVELIUS, H. (1914): *Flusskunde*. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En ZAVOIANU, I. (1985): *Morphometry of Drainage Bassins. Developments in water science*. Elsevier, Amsterdam, 238 p.
- HENAO J.E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada, Bogotá, Colombia: 396 p
- HORTON R.E (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*. Washington. N° 13. USA. pp 350-361.
- HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. N° 56, pp 275 - 370.
- IBÁÑEZ, S., MORENO, H., GISBERT, J. (2011). Morfología de una cuenca. *Universidad Politécnica de Valencia*, Valencia, 12 p.
- KIRPICH, Z. P. (1940): Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6), 362 p.
- LANE, L. (1997). Modelling erosion on hillslopes: concepts, theory and data. USDA-ARS, *Southwest Watershed Research Center*, Tucson, AZ, USA.
- LLAMAS, J. (1993). *Hidrología General. Principios y Aplicaciones*. Azehu, Bilbao, 635 p.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. *Editorial Mundi Prensa*, Madrid, España: 945 p
- MÁRMOL L. (2008). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes*. *Universidad Nacional de Salta*. Salta, Argentina.
- NAIMAN, R.J.; DECAMPS, H.; Mc CLAIN, M.E. 2005. *Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities*, *Elsevier/Academic Press*, San Diego, CA, USA. 430 p.
- PLAN MAPA DE SUELOS (1990). *Carta de Suelos de la República Argentina*. Departamento La Paz, Provincia de Entre Ríos. Acuerdo complementario del Convenio INTA- Gob. de ER. INTA EEA Paraná. *Serie Relevamiento Recursos Naturales* N° 7. 321 p.
- RODRIGUES, V.A. (2004). Morfometría e mata ciliar da microbacia hidrográfica. In: *Anais do VIII Workshop em Manejo de Microbacias Hidrográficas*. UNESP. Botucatu. 7-18.
- SABATTINI, R.A.; SIONE, S.M.; LEDESMA, S.G.; SABATTINI, J. Y M.G. WILSON (2016). Estimación de la pérdida de superficie de bosques nativos y tasa de deforestación en la Cuenca del Arroyo Estacas (Entre Ríos, Argentina). *Revista Científica Agropecuaria*. 20 (1-2): 45-56.
- STRAHLER, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63: 1117 – 1142.
- WILSON, M.G. (2007). *Uso de la Tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina*. Tesis Doctoral. Instituto Universitario de Xeoloxía Isidro Parga Pondal. Universidad de La Coruña, España. 277 p.

Original recibido (15/05/2020)
Original aceptado (31/07/2020)