

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**ANÁLISIS DE MEANDROS EN EL RÍO SINÚ**

**<sup>1</sup>Alvaro López-Ramos, <sup>1,2</sup>Luisa Martínez Acosta, <sup>2,3</sup>Alvaro López-Lambrano**

<sup>1</sup> *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, campus Montería, Colombia;*

<sup>2</sup> *Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, unidad Ensenada, B.C., México*

<sup>3</sup> *HIDRUS S.A. de C.V. Querétaro, México*

*alopezl@hotmail.com, ingluisamartinez@gmail.com, altoti@gmail.com*

**RESUMEN:**

En el presente documento se estudia el comportamiento morfológico del río Sinú, localizado en Colombia. El análisis fue realizado para los periodos de 1986 a 2017, mediante el uso de sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG), identificando las variables morfológicas que caracterizan el comportamiento del río en el tramo estudiado a través del tiempo de observación. Teniendo en cuenta lo anterior, se empleó un análisis multitemporal se obtuvieron los radios de curvatura, áreas movilizadas, migración lateral del río, sinuosidad, pendientes y zonas de socavación y sedimentación. Se encontró que el comportamiento del río Sinú en el tramo de estudio, se caracteriza por ser de tipo sinuoso, con desplazamientos del cauce y con pendientes muy bajas.

**ABSTRACT:**

This document examines the morphological behavior of the Sinú River, located in Colombia. The analysis was carried out for the periods from 1986 to 2017, using remote sensors and geographic information systems (GIS), identifying the morphological variables that characterize the behavior of the river in the section studied through the observation time. Taking into account the foregoing, a multi-temporal analysis was used to obtain curvature radius, mobilized areas, lateral river migration, sinuosity, slopes and scour and sedimentation areas. It was found that the behavior of the Sinú River in the study section, is characterized by sinuous type, with displacements of the riverbed and with very low slopes.

**PALABRAS CLAVES:** Morfología; Sinuosidad; Migración; Erosión; Sedimentación

## **INTRODUCCIÓN**

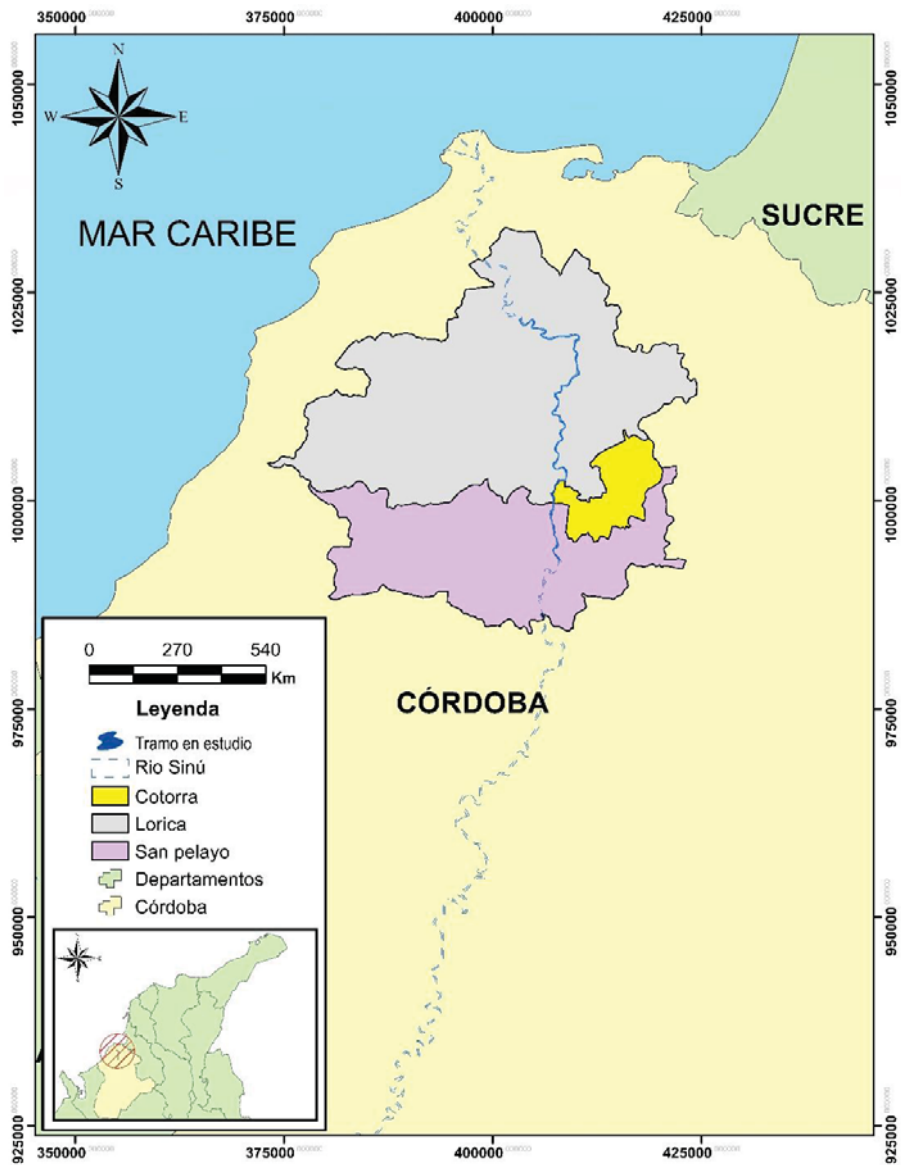
Las condiciones de cambio climático presentes a nivel mundial han generado consecuencias en los recursos naturales, entre los cuales se encuentra el hídrico. El recurso hídrico superficial representado en ríos, arroyos, lagos, entre otros, se ha visto sometido a cambios por las variaciones en el régimen de las precipitaciones debidas al cambio climático. Dentro del análisis de las corrientes, es importante realizar estudios morfológicos ya que permiten estimar las características de una cuenca e identificar los cambios que se han producido en ésta a lo largo del tiempo, así como tratar de determinar si fueron generados por causas naturales o antropogénicas (Mesa, 2006).

Además de lo anterior, se pueden establecer algunos parámetros de base para la planificación de los recursos hídricos teniendo en cuenta las áreas idóneas para el aprovechamiento de agua lluvia, así como las zonas de posibles inundaciones e incluso zonas de recargas de acuíferos (Bajabaa, Masoud, & Al-Amri, 2014; Bhagwat, Shetty, & Hegde, 2011; Magesh, Jitheshlal, Chandrasekar, & Jini, 2012; Mahmoud & Alazba, 2015).

En zonas tropicales como Colombia, las variaciones presentadas en el clima han generado temporadas de intensa sequía y otras de lluvias abundantes con las consecuentes inundaciones. La cuenca del río Sinú no ha sido ajena a esta problemática, razón por la cual se hace necesario desarrollar un estudio morfológico del mismo con el fin de establecer las variaciones del cauce a causa de las inundaciones, en diferentes periodos de tiempo mediante el uso de imágenes satelitales.

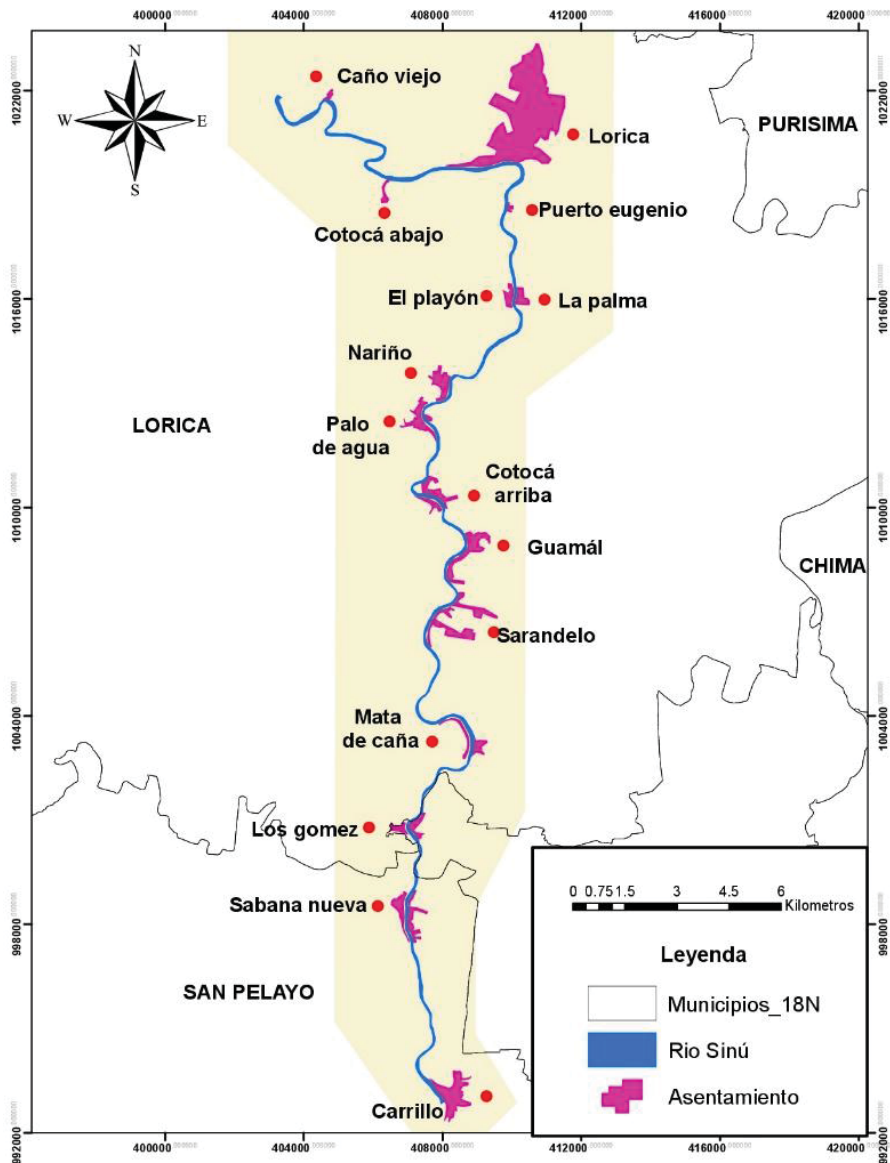
## **METODOLOGÍA**

El área de estudio es la cuenca del río Sinú, ubicada en Córdoba, Colombia, localizada entre las coordenadas 8°58'50.24" latitud norte, 75°50'12.72" longitud oeste y 9°14'34.95" latitud norte, 75°52'49.59" longitud oeste (ver figura 1).



**Figura 1.-** Localización del área de estudio

La longitud total del tramo es aproximadamente 45 Km, se extiende desde el corregimiento de Carrillo (San Pelayo), hasta el municipio de Loricá ubicados en el departamento de Córdoba, en cuyo recorrido irriga 15 asentamientos poblacionales de los municipios de San Pelayo y Loricá, como se puede apreciar en la figura 2.



**Figura 2.-** Asentamientos poblacionales en el área de estudio

Para conocer la morfología del cauce del río Sinú, se realizó un análisis multitemporal en la zona de estudio para un periodo de 31 años, utilizando imágenes satelitales Landsat TM 04, Landsat TM 05 y Landsat TM 08. La selección de las imágenes satelitales se realizó de acuerdo a: i) la fecha de origen, es decir, en la misma época del año; y ii) nubosidad, que ésta estuviera ausente en los tramos de interés.

Una vez obtenidas las imágenes satelitales, se realizaron las coberturas para identificar el cuerpo de agua, combinando las bandas espectrales de tal manera que se obtenga un falso color (urbano), que permite la mejor visualización del río.

Luego se procedió a utilizar los sistemas de información geográfica y se digitalizó el cauce del río para cada año de información (1986, 1990, 1991, 1992, 1998, 2001, 2015, 2016 y 2017); posteriormente, se realizó el análisis de sinuosidad teniendo en cuenta la longitud del valle de inundación,  $L_v$  y de Thalweg,  $L_c$  (línea central de la corriente en la cual el cauce es más profundo y el flujo posee una mayor velocidad). La sinuosidad fue calculada con la ecuación 1 (Yousefi et al, 2016).

$$S = \frac{Lc}{Lv} \quad [1]$$

Digitalizado el cauce, se ejecutó el abscisado cada 5 kilómetros, cuya distancia se fue modificando, teniendo en cuenta los cambios de dirección del cauce.

El análisis multitemporal del cauce se realizó superponiendo el río digitalizado en cada año y comparando las características morfológicas de la zona de estudio en períodos de dos años. También se trazaron los márgenes de cada curso del río en los diferentes años, y se calculó el eje del cauce, que representara el comportamiento del río empleando la herramienta Channel Platform Statistics tools, desarrollada por el Centro Nacional para la Dinámica de la Superficie de la Tierra, de la Universidad de Minnesota. El desplazamiento de los meandros se calculó empleando la metodología de Lagasse et al. (2004), la cual consiste en trazar una circunferencia ceñida a la orilla exterior por meandro para cada curso del río de los años estudiados. Posteriormente, se ubican los centroides de cada circunferencia con SIG, facilitando la medición de la distancia entre centroides de diferentes períodos y su orientación geográfica. Luego de cuantificado el movimiento de los meandros y su dirección, se graficaron los desplazamientos de cada meandro durante los años en estudio, con el fin de analizar la variación del movimiento para cada uno. También se calculó el radio de curvatura de la circunferencia, el cual permite analizar si el meandro aumenta o disminuye en los años de registro. En el tramo estudiado se encontraron veinticuatro (24) meandros con mayor pronunciación con respecto al eje del río.

El área movilizada se visualizó al superponer dos trazados del cauce natural del río de los años escogidos dentro de los períodos de estudio, y se midió el área movilizada entre la orilla del cauce del río en el año inicial y la misma orilla del año final, esta metodología corresponde a la utilizada por Downward et al. (1994). Igualmente se analizó el área activa obtenida superponiendo los dos trazados del río en dos años consecutivos. El área obtenida entre los dos trazados es el área activa y permite conocer el aumento o disminución de la superficie en la cual el río presenta cambios en la longitud de tiempo estudiado. También se analizaron las secciones transversales según lo propuesto por Ochoa (2011), comparando las mismas y los caudales de cuatro (4) períodos de tiempo, a partir de los datos registrados en las estaciones hidrométricas operadas por la empresa hidroeléctrica URRÁ S.A. E.S.P.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

La pendiente media del tramo del río Sinú fue obtenida mediante el uso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE). La pendiente calculada fue del 0,02% y, por lo tanto se considera un valle casi plano, con lo cual al aumentar el caudal del río en la zona por el aumento de las precipitaciones, incrementa la probabilidad de inundaciones en dicho valle.

Con la información obtenida a partir de la digitalización de las imágenes satelitales, se calcularon la longitud del valle y el Thalweg, así como la sinuosidad para los años considerados, los cuales se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.-** Valores de *Lv*, *Lc* y sinuosidad

Año	1992	1998	2001	2015	2016	2017
<i>Lv</i> (km)	34,33	34,33	34,31	34,32	34,33	34,31
<i>Lc</i> (km)	46,69	46,83	46,70	46,89	46,54	46,70
Sinuosidad	1,36	1,364	1,36	1,37	1,36	1,36

El valor estimado de la sinuosidad está comprendido entre 1,3 y 1,4, indicando que se clasifica el río Sinú como meándrico (Suárez Díaz, 2001).

Se determinó la tasa de migración lateral en (m/año) del río Sinú, dichos valores se encuentran consignados en la tabla 2, donde se observa una variación máxima de 7,09 m/año para los años 1991-1992 y una variación mínima de 0,60 m/año para los años 2001-2015.

**Tabla 2.-** Valores de migración promedio en el tramo estudiado

Periodo [Año]	Migración Promedio [m/año]
1986-1990	2,24
1990-1991	5,01
1991-1992	7,09
1992-1998	1,37
1998-2001	2,37
2001-2015	0,60
2015-2016	5,57
2016-2017	5,55

En cada meandro se calculó su dinámica, orientación, y los periodos en los cuales se presentó mayor o menor movimiento, estableciéndose que el desplazamiento del meandro es variable. Lo anterior como resultado de la acción erosiva y sedimentaria en los márgenes, así como las constantes inundaciones y sequías debidas al cambio en la frecuencia de las precipitaciones, consecuencia del cambio climático.

Se midieron los radios de curvatura en cada meandro y en la tabla 3 se presenta el aumento o disminución de la longitud y amplitud de estos. La variación del radio, indica que si éste disminuye, el meandro tiende al encuentro con el cuello hasta llegar al corte; por el contrario, si el radio aumenta éste se dispone a desaparecer convirtiéndose recto.

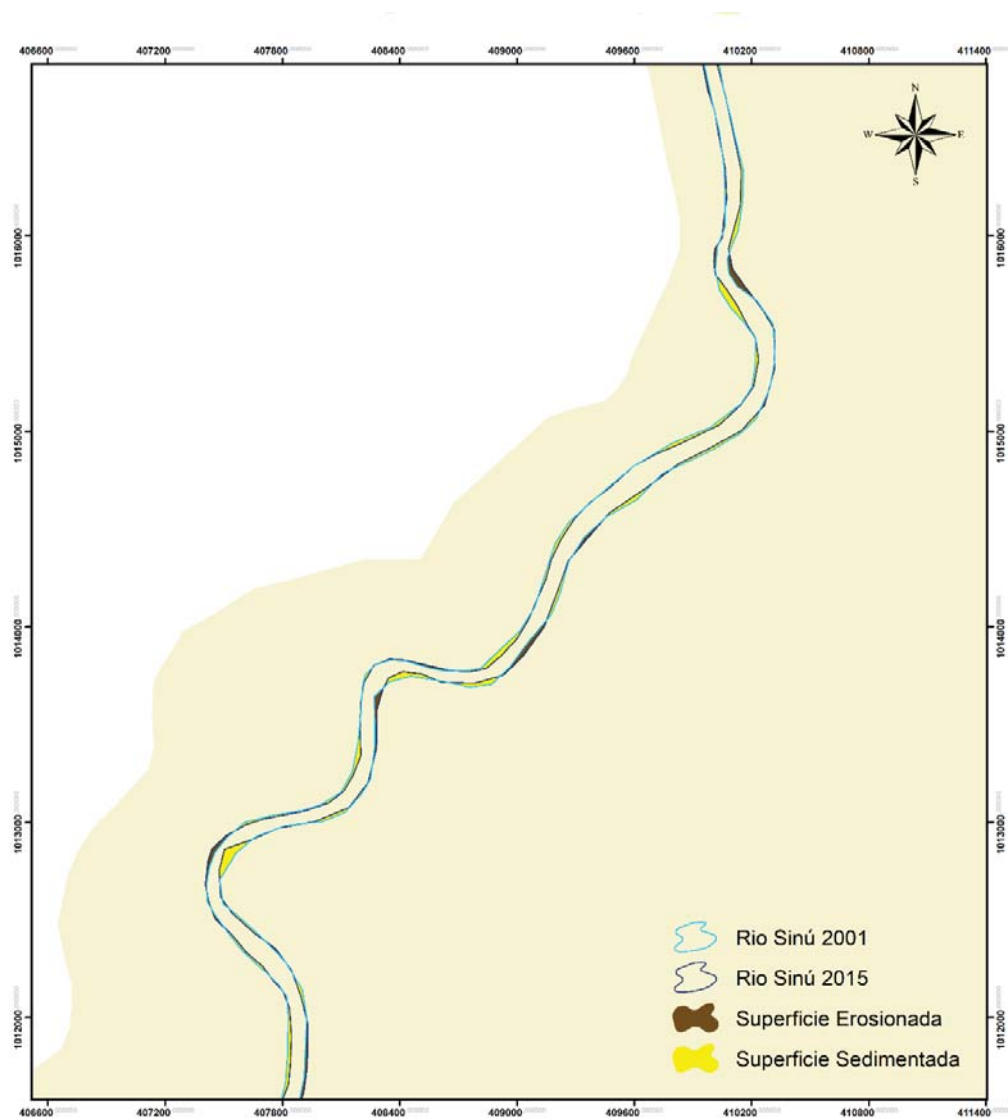
**Tabla 3.-** Radio de curvatura para los meandros 1, 2, 3 y 4

Año	Radios de curvatura [m]			
	Meandro 1	Meandro 2	Meandro 3	Meandro 4
1986	228	457	397	460
1990	250	389	384	450
1991	247	365	401	430
1992	252	390	440	443
1998	217	441	422	431
2001	236	442	347	451
2015	233	379	372	463
2016	231	410	394	453
2017	216	427	469	447

En el cálculo de las áreas movilizadas, se determinó el proceso de erosión y sedimentación del tramo del río a lo largo de las 9 secciones en los cuales se dividió para su estudio. Se realizaron para los periodos de tiempo en los cuales se tienen imágenes satelitales (1986-1990, 1990-1991, 1991-1992, 1992-1998, 1998-2001, 2001-2015 y 2015-2016), encontrándose que en el período 2001 a 2015, se presentó actividad erosiva y de sedimentación como se muestra en la figura 3. Lo anterior puede ser ocasionado por efecto de la acción antrópica, en donde de acuerdo con el recorrido realizado, hay presencia de la extracción de materiales pétreos del cauce del río Sinú, a la altura de Lórica.

Posteriormente, se hizo el análisis de las secciones transversales y de los caudales en las estaciones La Palma y Cotocá Abajo, ubicadas en el abscisado Km 31+340 y 37+140 respectivamente. Se analizaron los períodos 2000-2004, 2004-2008, 2008-2012 y 2012-2016, encontrándose en las dos estaciones efectos de sedimentación y erosión en todos los tramos estudiados, ratificando lo encontrado en las áreas migradas, donde se evidencia una mayor erosión que sedimentación.

Con relación al caudal medio del río, los resultados obtenidos muestran que éste permanece en constante variación con un gasto que varía de 350 hasta 500 m<sup>3</sup>/s en los años analizados, de acuerdo a las reglas de operación del proyecto hidroeléctrico URRÁ S.A. ESP.



**Figura 3.-** Superficie sedimentada y erosionada en el periodo 2001-2015

## CONCLUSIONES

Las alteraciones del río en el tramo estudiado pueden ser originadas por la erosión, la sedimentación, la intervención antrópica, la contaminación y el cambio climático.

Además, fue posible evaluar la dinámica del río mediante los radios de curvatura, las migraciones, desplazamiento de los meandros, los procesos erosivos y sedimentarios generados en el mismo.

Finalmente, el estudio de la morfología del río Sinú se convierte en una herramienta para la gestión y planificación del recurso en la sección estudiada.

## REFERENCIAS

- Bajabaa, S., Masoud, M., and Al-Amri, N.** (2014). “Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia)”. *Arabian Journal of Geosciences*, No 7, pp. 2469–2481. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0941-2>
- Bhagwat, T. N., Shetty, A., & Hegde, V. S.** (2011). “Spatial variation in drainage characteristics and geomorphic instantaneous unit hydrograph (GIUH); implications for watershed management-A case study of the Varada River basin, Northern Karnataka#”. *Catena*, No 87, pp. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.007>
- Downward, S.R., Curnell, A.M. and Brookes, A.** (1994). “A methodology for quantifying river channel planform change using GIS”. *IASH*, No 224, December 1994, pp. 449-456
- Lagasse, P.F., Spitz, W.J., Zevenbergen, L.W., Zochmann, D.W. and Owen Ayres & Associates Inc.** (2004). *Handbook for predicting stream meander migration – NCHRP report 533*, Washington D.C, USA.
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V.** (2012). “GIS based morphometric evaluation of Chimmini and Mupily watersheds, parts of Western Ghats, Thrissur District, Kerala, India”. *Earth Science Informatics*, No 5, pp.111–121. <https://doi.org/10.1007/s12145-012-0101-3>
- Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A.** (2015). “Geomorphological and geophysical information system analysis of major rainwater-harvesting basins in Al-Baha region, Saudi Arabia”. *Arabian Journal of Geosciences*, No 8, pp. 9959–9971. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1927-z>
- Mesa, L. M.** (2006). “Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina)”. *Environmental Geology*, No 50, pp. 1235–1242. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0297-y>
- Ochoa Rubio, T.** (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe ediciones, Bogotá D.C.
- Suárez Díaz, J.** (2001). *Control de erosiones en zonas tropicales*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Yousefi, S., Reza Pourghasemi, H., Hooke, J., Navratil, O. and Kidová, A.** (2016). “Changes in morphometric meander parameters identified on the Karoon river, Iran, using remote sensing data”. *Geomorphology*, No 271, July 2016, pp. 55-64.