

REGISTRO HISTÓRICO DE CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA FLUVIAL DEL RÍO JESÚS MARÍA PROVOCANDO EL COLAPSO DEL SISTEMA DE ACCESO DE UN PUENTE¹

Mariana Pagot², Carlos Gerbaudo³ y Marcelo Zeballos⁴

Resumen: En este trabajo se presenta un análisis multitemporal del emplazamiento de las márgenes de un tramo del río Jesús María en la provincia de Córdoba, Argentina. El objetivo principal fue registrar, durante el periodo 2002 a 2015, los procesos fluviales de erosión y sedimentación que se produjeron en esta área durante las crecientes del río y que provocaron en dos ocasiones, durante los años 2010 y 2015, el colapso del sistema de apoyo y de acceso al puente sobre Ruta Nacional 9, respectivamente. Se trabajó con la premisa de aportar elementos técnicos para la reparación de los daños producidos. Se realizó un análisis hidrogeomorfológico del área basado en percepción remota y sistema de información geográfica, y se generaron mapas de los cambios morfológicos del tramo en estudio registrando los máximos desplazamientos de las barrancas. Como resultado, se cuantificó un área erosionada de 6 Ha y un área sedimentada de 1 Ha. A partir de este seguimiento satelital se estimó un desplazamiento máximo de 90 metros.

Palabras clave: cambios morfológicos, erosión, márgenes, teledetección.

HISTORICAL REGISTRY OF CHANGES IN THE MORPHOLOGY OF THE JESÚS MARÍA RIVER CAUSING THE COLLAPSE OF THE BRIDGE ACCESS SYSTEM

Abstract: This work presents a multitemporal monitoring of the location of the Jesús María riverbanks, in the province of Córdoba, Argentina. The main objective was to record, for the period from 2002 to 2015, the river erosion and sedimentation processes that occurred in this area during the floods of the river and which caused on two occasions, between 2010 and 2015, the collapse of the support system and the access to the bridge on National Route 9, respectively. The work has been carried out under the premise of providing technical elements for the repair of the damages produced. A hydro-geomorphological study has been performed using remote sensing and a geographic information system to measure the morphological evolution of the river section under study such as the maximum displacements of the riverbanks. The eroded area was 6 Ha, and the sedimented area was 1 Ha. From this satellite monitoring, a maximum displacement of 90 meters was estimated.

Keywords: erosion, margins, morphological changes, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El río Jesús María, en su paso por la localidad homónima, ha dejado, durante la crecida del año 2015, un saldo de 150 personas evacuadas por anegamientos de sus viviendas e interrupción del tránsito en las vías de comunicación con

¹ Artículo recibido el 30 de septiembre de 2016 y aceptado para publicación el 3 de marzo de 2017.

² M.Sc. Ing. Civil. Profesora Adjunta, Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Email: mariana.pagot@gmail.com

³ M.Sc. Ing. Civil. Profesor Adjunto, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Email: ingroup@ingroup-op.com.ar

⁴ Dr. Ing. Civil, Profesor Titular, Departamento de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Email: marcelo.zeballos@unc.edu.ar

localidades vecinas. En este trabajo se presenta una evaluación de los procesos fluviales registrados durante los últimos años provocando inestabilidad debido a la erosión producida por el río.

Se realizó la modelación hidráulica de un tramo del río, incluyendo en el área de trabajo, la sección del Puente sobre la Ruta Nacional 9 (RN9) según topografía relevada. Con el objetivo de limitar el riesgo por erosión e interrupción del tránsito sobre la RN9 ante la ocurrencia de nuevas crecidas similares a la ocurrida en febrero de 2015, se analizó una posible situación para remediar esta problemática considerando la ampliación de la sección libre del flujo debajo del Puente sobre RN9.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

El área de trabajo se encuentra al oeste de la Ruta Nacional N° 9 (RN9) y hacia el norte del trazado urbano de la localidad de Jesús María, en la Provincia de Córdoba, Argentina (

Figura 1). En esta área se encuentra el puente sobre el río Jesús María o Guanusacate, a los 30° 57' 57,58" de latitud Sur y 64° 04' 55,83" de longitud Oeste.



Figura 1: Ubicación relativa del tramo del río en estudio.

En términos generales, el río Jesús María está conformado por la unión del río Ascochinga y el arroyo Santa Catalina. Sus aguas se embalsan en el Dique Los Nogales ubicado aguas arriba del Puente sobre la RN9, el cual se utiliza con fines de riego y de abastecimiento de agua potable. La cuenca del río Jesús María (Figura 2) drena con dirección predominante oeste – este y luego se re-direcciona hacia el noreste, hasta la Laguna Mar Chiquita, cuerpo receptor final. La pluviometría regional media se encuentra en el orden de los 750 mm al año. El déficit hídrico presenta una variación de 180 mm al Este y 240 mm al Oeste. Los suelos de la región presentan usos de tipo residencial, industrial y agrícola-ganadero (

Figura 2).

El tramo en estudio del río Jesús María (según detalle en la

Figura 3) se emplaza en la región “agrícola ganadera central” (Ghida Daza y Sánchez, 2009), que se caracteriza por una actividad mixta agrícola ganadera con un leve predominio de esta última. La ganadería se desarrolla sobre una base forrajera constituida por pasturas implantadas. En agricultura sobresalen los cultivos de soja, maíz y maní. La vegetación característica es el bosque xerófilo, alternando con estepas de gramíneas duras. Específicamente en las regiones boscosas se observa un acentuado proceso de desmonte y degradación, este último expresado en la

arbustización de los montes o en la erosión del suelo que lo sustenta, fenómeno producido generalmente por el sobrepastoreo de estos ambientes.

La geomorfología del río, en el tramo en estudio, presenta durante el estiaje un cauce principal originado por la erosión hidráulica, de carácter meándrico y anastomasado. Esto indica que se organiza en canales que divergen y se vuelven a unir, dejando islas intercaladas a modo de trenzas. En general, este diseño se produce en tramos donde existe un incremento de pendiente o donde la carga sólida es elevada. Las barrancas se presentan como un salto brusco de la pendiente transversal. En este tramo estudiado, no existe un nivel de terraza intermedio y las barrancas presentan una altura considerable del orden de los 4 m. Normalmente, las barrancas son las que sufren en forma directa los procesos de erosión lateral de los ríos, dejando expuestos los sedimentos que las conforman. En este caso en estudio se observaron importantes procesos de erosión en ambas barrancas.

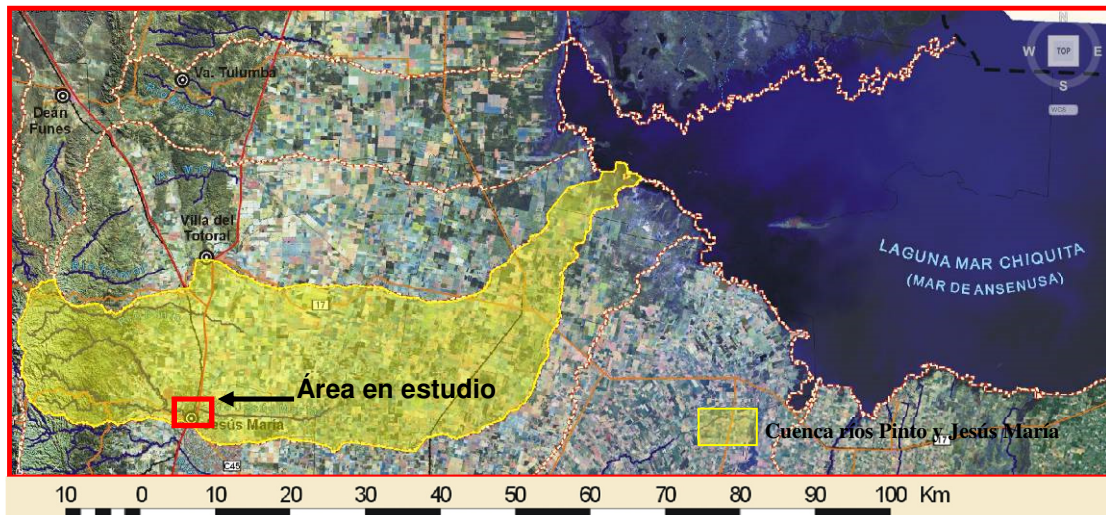


Figura 2: Red hidrográfica regional (adaptado de SSRH, 2011).



Figura 3: Detalle de la ubicación del puente en estudio sobre imagen satelital del año 2013.

DESCRIPCIÓN DEL COLAPSO DEL SISTEMA DE ACCESO AL PUENTE RN9

El problema particular que presenta esta área es la erosión en ambas márgenes del río, que se produjo por la socavación y transporte hacia aguas abajo de los sedimentos que conforman las barrancas durante las crecientes del río, poniendo en peligro la estructura del puente al colapsar los terraplenes de acceso. Los antecedentes recientes de febrero de 2015 muestran claramente este fenómeno de erosión de la margen norte del río, provocando la falla del terraplén de acceso norte y el corte temporal de la RN9.

Fenómeno hidrológico registrado durante febrero de 2015

Como consecuencia del temporal con fuertes precipitaciones que se presentó en la Provincia de Córdoba durante mediados de febrero de 2015, se produjo la crecida del río Jesús María asociada a un caudal de aproximadamente 500 m³/s. Este evento hidrológico provocó una marcada erosión de ambas márgenes del río y el colapso del terraplén de acceso norte al puente que une la ciudad de Jesús María con Sinsacate, a través de la RN9 (

Figura 4 y 5). El tráfico estuvo interrumpido durante un mes, cuando se rehabilitó el paso a través de la reconstrucción del terraplén del puente (Figura 6).

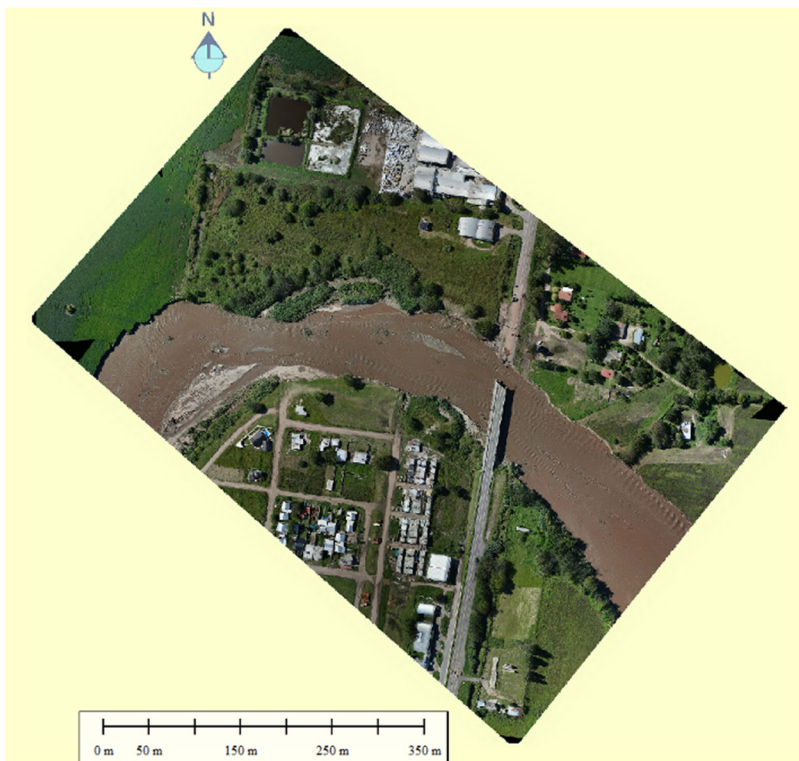


Figura 4: Fotografía con un “drone” del puente sobre RN9 mostrando el colapso del acceso norte.



Figura 5: Registro durante la crecida del colapso de acceso norte al puente sobre RN9.



Figura 6: Reconstrucción del terraplén de acceso norte al puente sobre RN9. Vista desde aguas abajo: (a) desde margen izquierda, y (b) desde margen derecha.

Fenómeno hidrológico registrado durante enero de 2010

La crecida extraordinaria del día 31 de enero de 2010 se presenta como un antecedente próximo del colapso de este puente sobre RN9. En esta ocasión la estructura del puente colapsó por socavación de los apoyos de las pilas. Se estimó un caudal pasante de 450 m³/s (INGROUP, 2010).

En la

Figura 7 se observa una vista general del río en la zona de emplazamiento del puente colapsado y sus características morfológicas. Aquí se observa que la ubicación del puente se encuentra aguas abajo de un meandro con un cauce abandonado sobre el radio externo de la curva, y depósito de material aluvial sobre el radio interno.



Figura 7: Imagen satelital del 08 de julio de 2010(fuente: Google Earth).

Topografía digital disponible

Para este trabajo se contó con relevamientos topográficos en detalle adquiridos durante febrero de 2015. Los datos topográficos disponibles cubrieron aproximadamente 700 m de las planicies de inundación del río Jesús María. Estos datos digitales fueron procesados con el programa Global Mapper (Blue Marble Geographics, 2013) para el tratamiento de información topográfica 3D del tipo Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permite generar perfiles transversales en las secciones presentadas en la

Figura 8, a partir de los cuales se extraen las características topográficas de las barrancas (altura y pendiente). Según los datos analizados, aguas arriba del puente se estimó que la barranca sur supera en 1,2 m la altura de la barranca norte de 4,5 m de altura. El ancho de la sección de cauce es de 170 m.

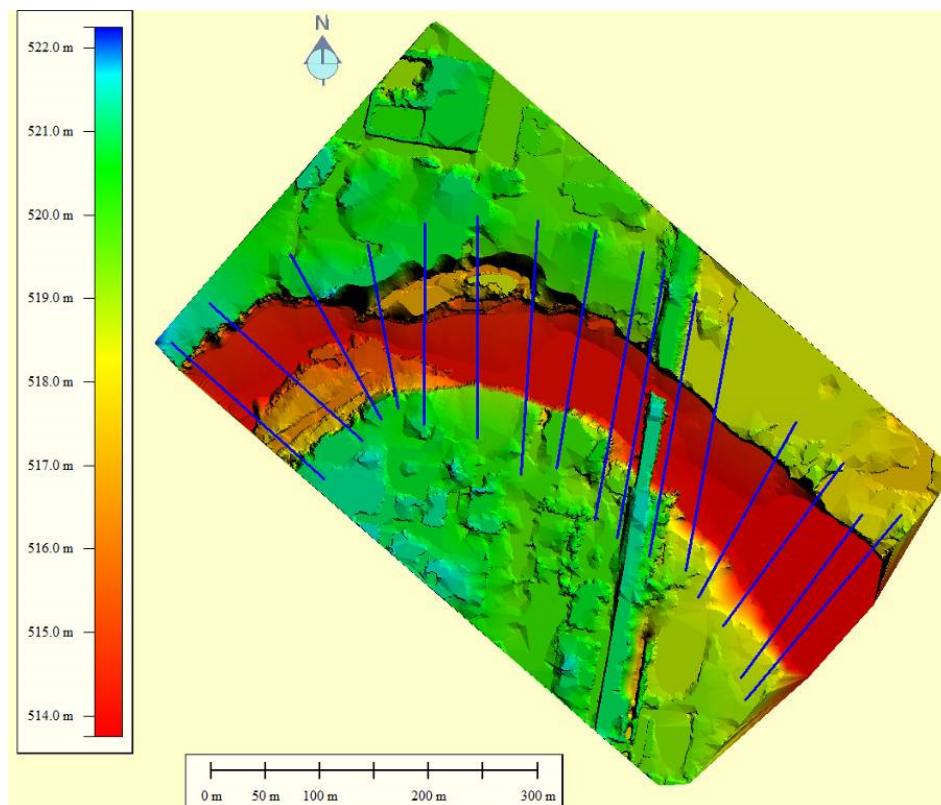


Figura 8: Relevamiento topográfico sobre río Jesús María y perfiles transversales utilizados en la modelación hidráulica del tramo.

SIMULACIÓN DEL CAUDAL ESTIMADO PARA FEBRERO DE 2015

Se realizó la modelación hidráulica del tramo en estudio con el caudal estimado asociado a un valor de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, y la condición topográfica relevada registrando la reconstrucción del terraplén de acceso al Norte, contando en la sección del puente con tres tramos de 30 m de luz parcial.

La modelación hidráulica del tramo en estudio sobre el río Jesús María, se calculó a partir del modelo HEC-RAS (USACE, 2010), estimando el valor de la cota máxima del nivel de la superficie libre. La geometría del tramo del río modelado, incluye 16 secciones transversales medidas cada 50 m promedio y el puente existente, según se presentan en la

Figura 9. Este escenario se denominó E1.

El nivel de agua máximo estimado resultó de 3.2 m para el escenario simulado, dejando una revancha o despegue libre (distancia entre el borde inferior de la viga del puente y el nivel máximo determinado) de igual magnitud a la estimación de la profundidad máxima estimada. Los límites de las crecientes del caudal simulado se presentan en la

Figura 9 junto con una vista tridimensional del puente en el tramo estudiado.

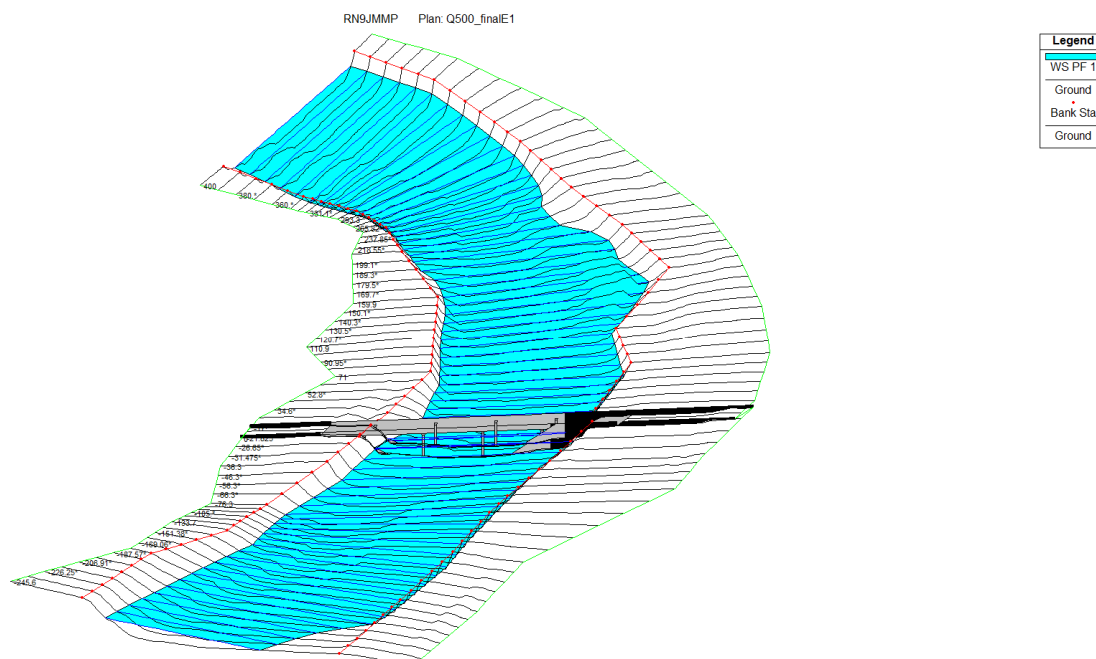


Figura 9: Vista tridimensional de la modelación para el escenario E1.

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN

Los valores de erosiones estimados en la sección de un puente dependen fundamentalmente de las condiciones hidráulicas del flujo de aproximación (especialmente las velocidades medias y su distribución lateral, los tirantes y los caudales unitarios asociados), de las características del sedimento en el lecho fluvial (tanto en cauces como en planicie) y la geometría del puente y sus elementos estructurales, es decir, las luces, alturas, alineamiento planimétrico y características particulares de las fundaciones (Farías, 2002).

Con relación a los aspectos geotécnicos, se contó con antecedentes (INGROUP, 2010) que indican la presencia, en el sector de emplazamiento del puente y en el centro del cauce principal, de un manto de 20 m de profundidad con material aluvional de materiales gruesos (arenas medias a gruesas, grava y rodados). En el sector sur de la sección del puente se encontraron a 2 m de terraplén compactado, continuando 5 m de arena mediana con grava hasta el nivel freático. En el sector norte de la sección del puente se presenta un manto de limo arenoso de 1.5 m de espesor, seguido por un manto con 4.5 m de espesor de arena mediana con grava y rodados. Continúa un manto de 8 m de espesor con arena gruesa y rodados, seguido por un manto de arena fina con grava de 5 m de espesor. En el cauce se observan bancos de estos materiales donde se produjo la deposición diferencial de los mismos, en función de su variada granulometría. En las barrancas se visualizó el proceso fluvial registrado en febrero de 2015, como consecuencia de la erosión lateral.

Los aspectos hidráulicos se extrajeron de los resultados alcanzados con la aplicación del modelo numérico realizado con el programa HEC-RAS, que utiliza el concepto de conductividad hidráulica de la sección. Para este escenario en estudio, se estimó una velocidad máxima en el eje de la sección hidráulica del puente de 3.8 m/s y el tirante antes mencionado igual a 3.2 m.

Con estos datos se estimaron los valores de erosión generalizada causada por el flujo del agua a través del puente considerando las hipótesis de las características de circulación del flujo modelado. Se analizaron otros factores que contribuyen a un aumento de la socavación en diferentes sectores de la sección transversal del río como son el efecto de la contracción del cauce principal a medida que éste se aproxima al puente, el terraplén de la ruta en la proximidad del puente que direcciona parcialmente el flujo dentro del cauce principal, los estribos del puente dentro del cauce principal, las pilas del puente que bloquean un porcentaje de la sección del flujo, y la pendiente final del agua aguas abajo del puente, la cual produce un aumento de la velocidad en la sección del puente.

En base a estas consideraciones, se estimó 8.7 m de máxima erosión con un esquema de distribución según se presenta en la

Figura 10.

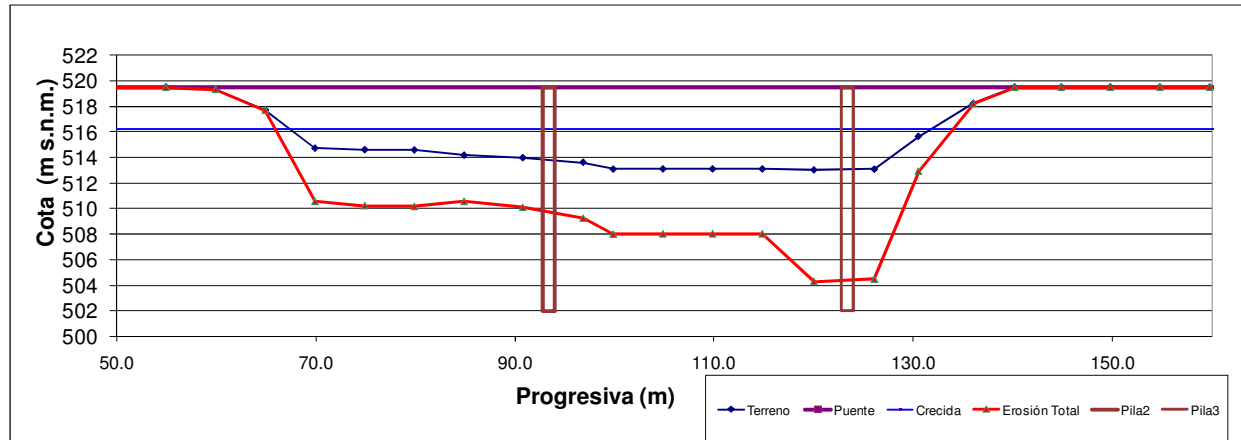


Figura 10: Esquema de erosión total. Vista desde aguas abajo de la sección del puente.

ANÁLISIS MORFOLÓGICOS Y MULTITEMPORAL DEL TRAMO EN ESTUDIO

En términos generales, Balbis et al. (2007) definen un río estable o inestable en función de: (a) factores hidrogeomorfológicos, y (b) de factores antrópicos. Entre los primeros (a), se destacan las características hidráulicas propias del río (sedimentos, pendientes, secciones y caudales, entre otros) y el comportamiento hidrológico de la cuenca de aporte. Los segundos factores (b) que intervienen dependen del grado de afectación antrópica que ha sufrido la cuenca de aporte y el tramo del río en análisis. Por ejemplo, la destrucción de la vegetación ribereña, la utilización de terrazas bajas, la extracción de áridos en el cauce, la modificación de barrancas o márgenes con obras de protección o rigidización, como así también la construcción de obras civiles como puentes, con sus correspondientes obras complementarias (canalizaciones, albardones u otras).

En el marco de este apartado, se recurrió a la técnica de teledetección para identificación de cambios geomorfológicos en las márgenes del río Jesús María. En este sentido, el uso de esta herramienta es habitual, como se presenta en los siguientes antecedentes: Francisca et al. (2005), Balbis et al. (2007), Cardini et al. (2009), entre otros.

En el presente trabajo se realizó la digitalización de ambas barrancas relevadas en el tramo en estudio del río Jesús María, cubriendo un periodo de 13 años, basada en un proceso de interpretación visual de imágenes satelitales adquiridas durante los años 2002 y 2015.

Para realizar este análisis multitemporal se contó con imágenes de alta resolución, producto de los satélites QUICKBIRD e IKONOS, que fueron adquiridas los días 7 de enero de 2002 (Figura 11a), 27 de junio de 2007 (Figura 11b), 28 de febrero de 2010 (Figura 12a), 2 de noviembre de 2013 (Figura 12b), 22 de noviembre de 2014 (Figura 13a) y 7 de junio de 2015 (Figura 13b).

La digitalización de las barrancas se basó en los productos derivados de estas imágenes filtrando los valores de niveles digitales y separando aquellos que correspondían al límite del cauce del río. Estos límites se vectorizaron y se generaron polilíneas, las cuales se organizaron geográficamente en un SIG tomando como base el programa Google Earth®.

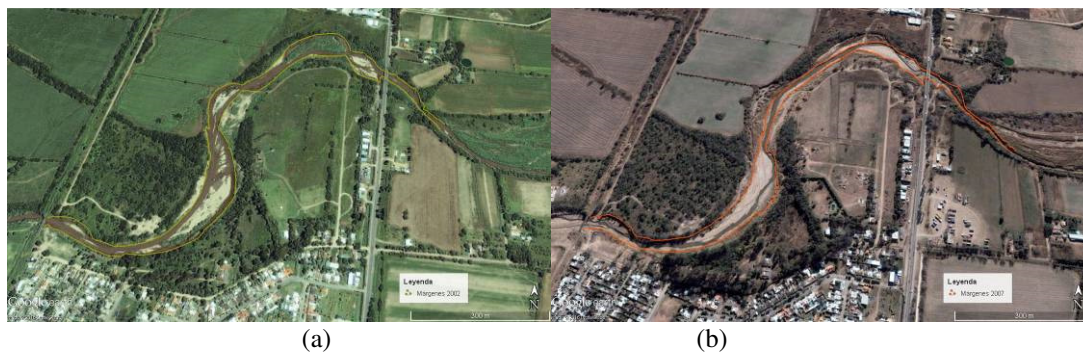


Figura 11: Definición de márgenes sobre imágenes satelitales del río Jesús María: (a) Año 2002, y (b) Año 2007 (fuente: Google Earth).

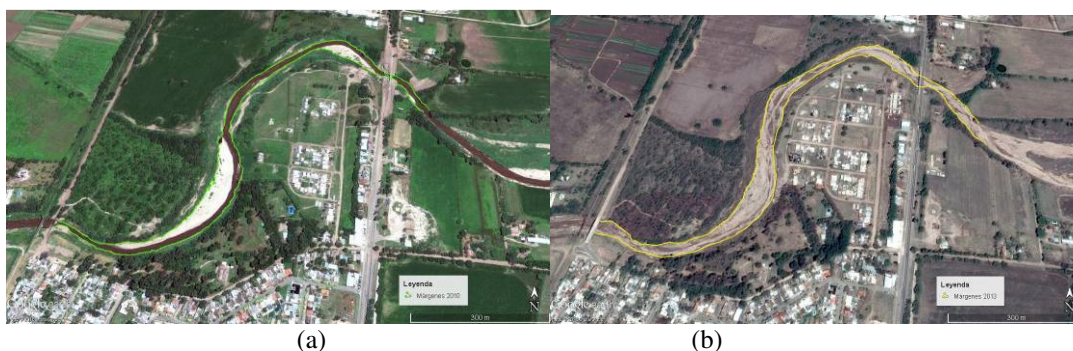


Figura 12: Definición de márgenes sobre imágenes satelitales del río Jesús María: (a) Año 2010, y (b) Año 2013 (fuente: Google Earth).

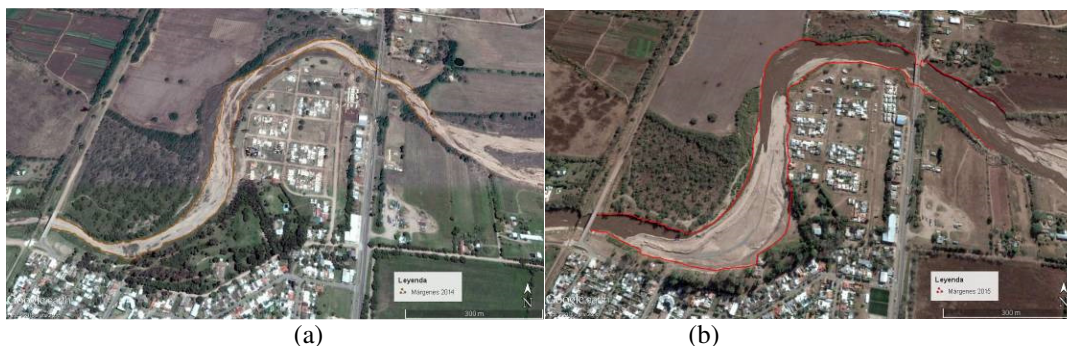


Figura 13: Definición de márgenes sobre imágenes satelitales del río Jesús María: (a) Año 2014, y (b) Año 2015 (fuente: Google Earth).

Se observa en la Figura 11 (a), que corresponde a una imagen satelital del año 2002, un cauce bien definido para el escurrimiento del flujo al inicio del tramo analizado y una zona que permite la divagación del río a 100 m aguas arriba del puente. Hacia aguas abajo del puente, el río se presenta encauzado por ambas barrancas que se encuentran totalmente cubiertas por árboles, arbustos y cañaverales.

En la Figura 11 (b), que corresponde a una imagen satelital del año 2007, se evidencia un cambio en la sección transversal del cauce, principalmente aguas arriba del puente sobre RN9, el cauce del río aumenta su sección mojada respecto a la Figura 11 (a). Aguas abajo comienza a presentarse una zona sin cobertura de vegetación en los primeros 80 m sobre margen derecha principalmente. Este proceso fluvial de degradación del cauce se registró en forma remota y presenta remoción de la vegetación, indicando un síntoma visible de erosión de las barrancas.

Este proceso se observa también (Figura 12 (a)) sobre la margen izquierda y aguas abajo del puente en la imagen satelital del año 2010.

La Figura 12 (b) y Figura 13 (a) corresponden a dos imágenes satelitales del año 2013 y 2014 respectivamente, en donde se observa que se duplica el ancho del cauce principal aguas abajo del puente respecto de la imagen del año 2002. El ancho del cauce principal del río se ensancha de 23 m a aproximadamente 45 m. Además, comienza a visualizarse una divagación del río en este ancho disponible. Este registro da continuidad al proceso fluvial de erosión del cauce con los síntomas visibles de erosión en las curvas de los meandros y bancos de sedimentos sin vegetación en el cauce.

En la imagen del año 2014 (

Figura 14) muestra un síntoma visible de la erosión en margen derecha del cauce, (sobre la esquina inferior izquierda de la imagen), donde se observa sobre la margen externa de la curva sur del tramo estudiado, la caída de árboles (señalados con una flecha). A partir de esta remoción de la vegetación, es que se infiere un proceso fluvial de incisión en la barranca derecha.

Se registró el proceso erosivo sobre la margen derecha del río superponiendo las barrancas digitalizadas y presentadas ambas en la

Figura 15, correspondientes a los años 2014 (véase la Figura 13 (a)) y 2015 (véase la Figura 13 (b)). Aquí se cuantifica el mayor corrimiento de márgenes, durante el periodo analizado, cubriendo una distancia de 90 m.



Figura 14: Erosión margen y caída de árboles sobre radio externo de la curva sur.



Figura 15: Erosión margen entre 2014 y 2015.

Las líneas de barranca identificadas sobre las imágenes analizadas se superpusieron en la

Figura 16 utilizando de base la imagen del año 2015. La visualización conjunta de estas líneas puso en evidencia las erosiones de márgenes que se registraron en el periodo analizado. Se destaca el corrimiento registrado principalmente sobre el trazado urbanizado que se desarrolla al norte de la localidad de Jesús María y el puente emplazado sobre RN9. La principal variación morfológica que influye en forma directa sobre el puente en RN9 se encuentra en el desplazamiento de la margen izquierda (norte) del río Jesús María tanto aguas arriba como aguas abajo del puente sobre RN9.

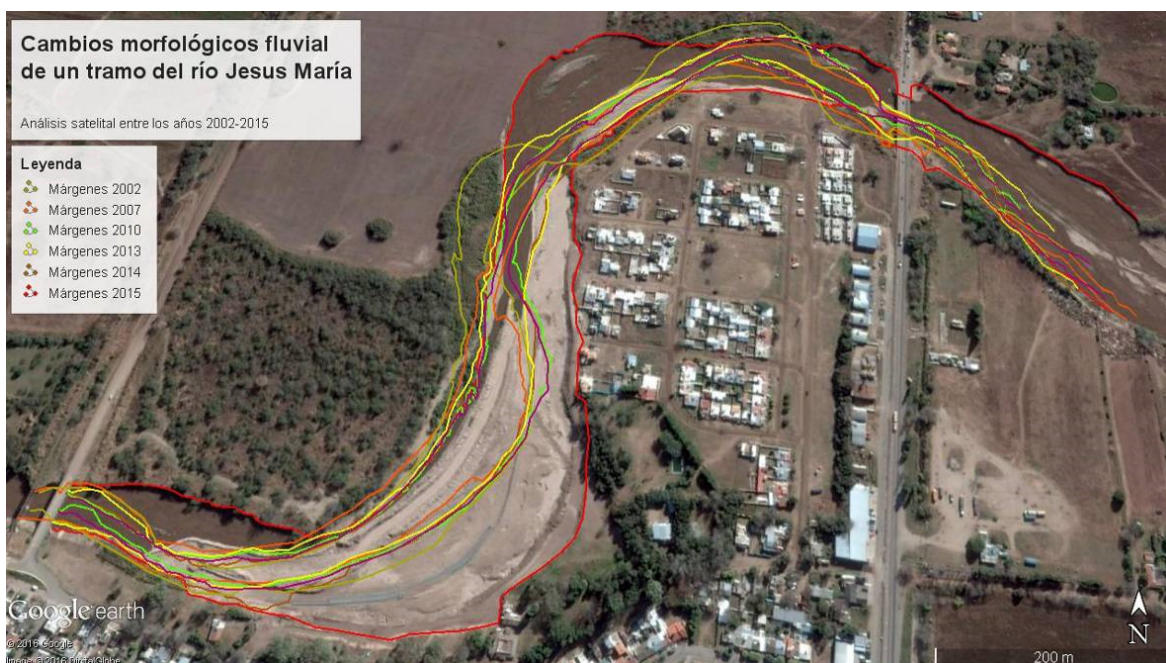


Figura 16: Cambios morfológicos del río Jesús María entre los años 2002 y 2015.

La detección de los cambios en la morfología fluvial del tramo en estudio se evaluó a partir del procesamiento digital aplicando la técnica de interpretación visual de las imágenes satelitales de alta resolución disponibles en el periodo de 2002 a 2015.

A partir de este análisis multitemporal, se detectaron áreas de erosión y sedimentación, según la

Figura 17, que indicaron un total de 7 Ha modificadas en el tramo en estudio. Sobre el total de estas áreas, 6 Ha corresponden a zonas de erosión y 1 Ha corresponde a zonas de sedimentación.

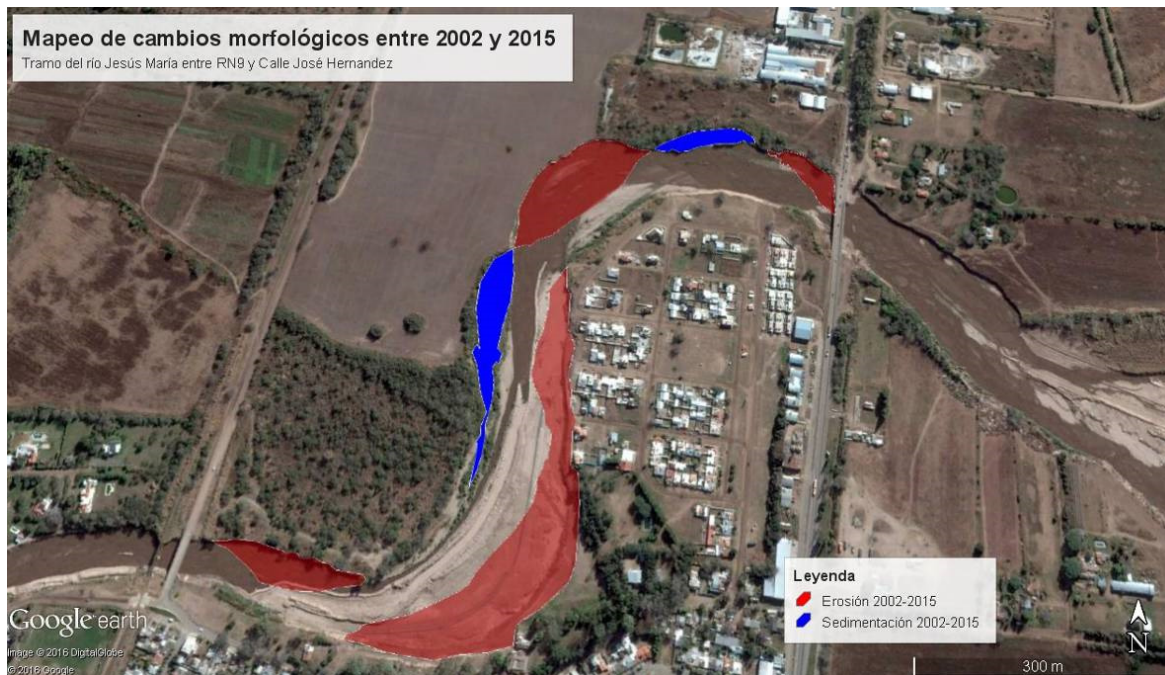


Figura 17: Cambios morfológicos entre 2002 y 2015 en el río Jesús María.

Durante el año 2015, el daño sobre el sistema de acceso norte al puente se generó porque se produjo un proceso de erosión sobre la barranca norte próxima a la estructural hidráulica-vial, lo que permitió que el flujo impacte en forma frontal al mismo.

NUEVO ESCENARIO DE SIMULACIÓN PROPUESTO EN FUNCIÓN DEL ANÁLISIS DEL ANCHO ESTABLE DEL RÍO

Considerando la nueva sección del río generada con los procesos de erosión arriba registrados, se realizó una nueva modelación hidráulica del tramo en estudio, estimando en primer lugar el ancho teórico estable del mismo.

Se asumió un valor de caudal de 500 m³/s y la sección del puente con un tramo adicional de paso proyectado, configurando cuatro tramos de 30 m de luz parcial, considerando el concepto de ancho estable del río y definiendo una sección de paso mínima de 90 m aproximadamente. Este ancho propuesto corresponde al criterio de considerar el ancho estable de un río. Esta dimensión junto con la profundidad y la pendiente estable de un río aluvial, comúnmente se denomina "geometría hidráulica" y debe ser un aspecto a considerar en hidráulica fluvial, con aplicaciones en el diseño de canales estables, obras de encauzamiento, restauración de cauces, etc. (Farías, 2005).

En general, la geometría hidráulica de un tramo de río (Figura 18) habitualmente se expresa a través de un conjunto de ecuaciones que describen de manera global la forma y tamaño del cauce (representados a través del ancho B y profundidad H de la sección transversal y la pendiente longitudinal S, asumidas como variables dependientes) en función del caudal dominante Q. Es decir: $B, H, S = f_{B,H,S}(Q)$.

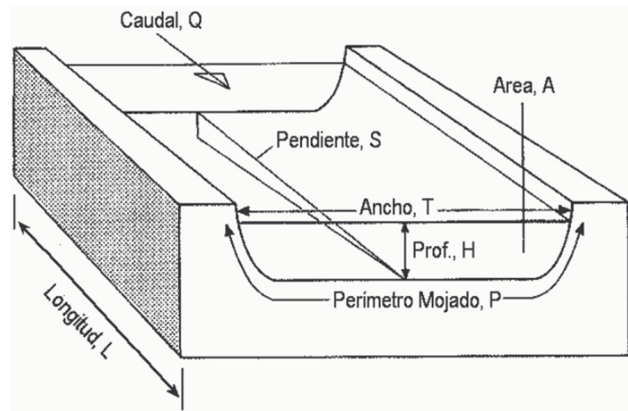


Figura 18: Esquema para definir la geometría hidráulica de cauces aluviales (Fariás, 2005).

Se aplicó el método de Manning y Strickler, ecuación (1), que está basado en los valores de tres coeficientes: de rugosidad “n”, por las características del tipo material (K) y por las características del cauce (m).

Para el caso del coeficiente de rugosidad (n) los valores recomendados varían de 0,025 a 0,045, según el tipo de material presente. Se asume el valor de 0,040 para el tramo en estudio. La variación de los valores para K va a depender del tipo de material, si es aluvial, erosionable o muy resistente. Se asume el valor recomendado igual a 10. En el caso del coeficiente “m”, los valores varían de 0,5 a 1, según el tipo de cauce: aluvial, arenoso o de montaña. Se asume el valor recomendado igual a 0,5 para ríos aluviales. El ancho estable se estima según la siguiente expresión:

$$B = (Q^{0.5} / S^{1/5}) * (n * K^{5/3})^{3/(3+5m)} = 87,48 \text{ m} \quad (1)$$

Resultados de la modelación hidráulica

El perfil longitudinal del tramo modelado se presenta en la

Figura 19, donde se destacan los niveles que alcanza el agua para este escenario simulado (E2) y para las condiciones topográficas relevadas (E1). Las modelaciones hidráulicas indicaron que los máximos niveles de agua tienen suficiente resguardo respecto a la cota de borde inferior de la viga del tablero del puente.

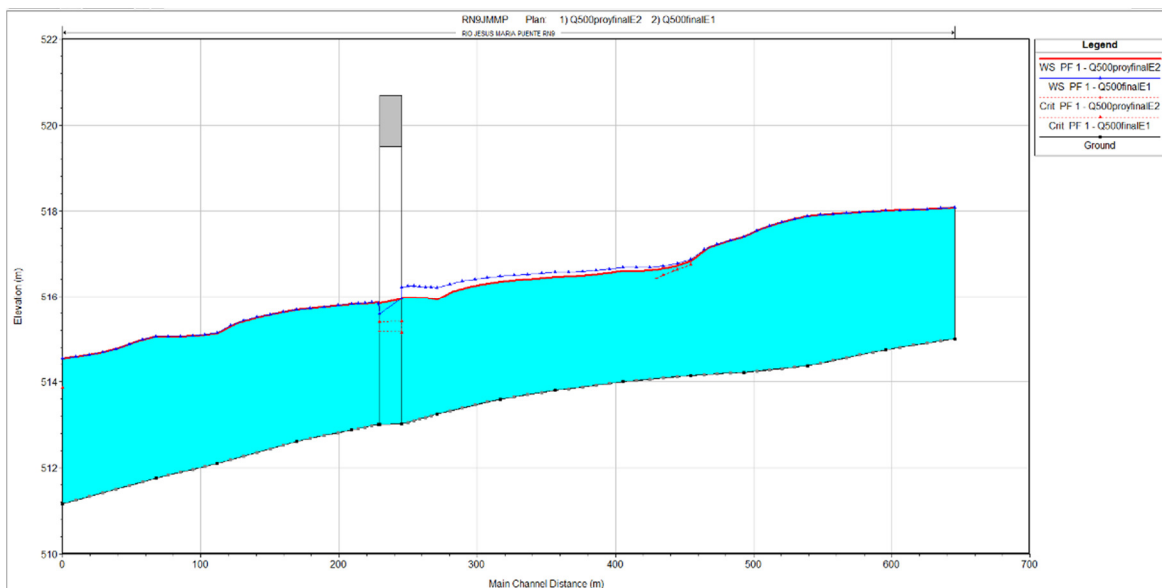


Figura 19: Perfil Longitudinal del río Jesús María. Modelo hidráulico para escenarios E1 y E2.

Estas condiciones de escurrimiento generan tirantes de 3,20 m y 2,97 m para la crecida simulada para los escenarios E1 y E2 respectivamente. La cota máxima de elevación del agua se encuentra a 3,50 m en distancia vertical con respecto a la cota inferior de viga del puente para el escenario E2. La máxima erosión estimada en el marco de este escenario propuesto alcanzó un valor de 5 m

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis multitemporal con apoyo satelital de un tramo del río Jesús María cubriendo el periodo desde 2002 a 2015. Este análisis permitió realizar mapas por teledetección de los cambios morfológicos que muestran la ubicación de las áreas erosionadas y sedimentadas que se generaron.

El total de estas áreas modificadas están conformadas por un 85% de áreas afectadas por procesos de erosión y por un 15 % de áreas con sedimentación. La digitalización de todas las líneas de márgenes en el tramo (

Figura 10) presentan cambios por sedimentación entre 2002 y 2007. Luego, estas áreas se mantienen prácticamente constantes hasta 2015.

En cambio, los procesos fluviales más significativos, con mayores áreas de erosión registradas, se destacaron entre 2014 y 2015. Con este marco de trabajo, se pone en evidencia que las marcadas erosiones y consecuentes modificaciones en las márgenes del río Jesús María en el tramo estudiado, coinciden con el impacto sobre la barranca del flujo proveniente de la importante crecida que ocurrió en febrero de 2015, aunque procesos de erosión menores se registraron también durante todo el periodo analizado.

A partir de este seguimiento satelital se estimó que durante este evento histórico se produjo un retroceso máximo de 90 m.

En función de los resultados hidráulico-fluviales obtenidos, se observó que la ampliación de la sección de paso del caudal debajo del puente sobre RN9 en el río Jesús María implica una reducción de la erosión máxima del orden del 42 % respecto de la condición relevada. Adicionalmente, se propone colocar una protección con un enrocado de diámetro mayor a 0,50 m, de los taludes de los conos del terraplén de acceso del Estribo Norte.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa Roggio S.A. por el aporte de material topográfico y fotografía aérea utilizada en este artículo.

REFERENCIAS

- Balbis, A., Miyno, S., Castelló, E. y Vanoli, W. (2007). "Análisis multitemporal para evaluación de erosión en el Río Ctlamochita (Tercero) en la localidad de Villa Ascasubi", RIOS 2007: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos, *Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, H. D. Farias, J. D. Brea y R. Cazeneuve (Editores).
- Bettess, R. (2002). "A review of predictive methods for general scour", *First International Conference on Scour of Foundations (ICSF-1)*, Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Blue Marble Geographics (2013). "Global Mapper 5", GIS Software, Hallowell, Maine, USA.
- Cardini, J.C., Jaime, P.R., Parimbelli, M. y Legal, N. (2009). "Desarrollo de una erosión extraordinaria en la margen del Río Paraná en Lavalle", RIOS 2009: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos, *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, H. D. Farias, J. D. Brea y R. Cazeneuve (Editores).
- Farías, H.D. y Pilán, M.T. (2002). "Cálculo de las profundidades de socavación general en cauces aluviales. Aspectos teóricos y aplicaciones", *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana, Cuba.

- Farías H.D. (2005). “Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes”, RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos, *Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, H. D. Farías, J. D. Brea y R. Cazeneuve (Editores).
- Francisca, F., Giovine, L., Rodríguez, A., Moya, G., Corral, M., Pagot, M. y Hillman, G. (2005). “Protección de las márgenes del Río Grande en Tierra del Fuego: Estudio de caso”, *Revista de la Asociación Argentina de Geología aplicada a la Ingeniería*, Nro. 21, pp. 59-69.
- Ghida Daza, C. y Sánchez, C. (2009). “Zonas Agroeconómicas Homogéneas. Estudios Socioeconómicos de Sustentabilidad de los Recursos Naturales, Área Estratégica Economía y Sociología”, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina.
- INGROUP (2010). “Puente sobre río Jesús María. Anexo 1, Estudio Hidráulico. Informe Técnico y Anexo 2, Estudio de Suelos”, Córdoba, Argentina.
- Maza Álvarez, J.A. (1988). *Introduction to River Engineering*, Università Italiana per Stranieri, Perugia, Italia.
- Moreno, C. y Fuentes, R. (1998). “Socavación generalizada; método de cálculo de Lischtván Lebediev y Maza. Verificación experimental”, *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México, Vol. 2, pp. 149-154.
- Richardson, E.V., Simons, D.B. and Julien, P.Y. (1990). “Highways in the River Environment”, FHWA-HI-90-016, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.
- Soil Conservation Service (1985). *National Engineering Handbook*, Section 4: Hydrology, USDA Soil Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación – SSRH (2011). “Atlas de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina – Versión 2010”, Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, Buenos Aires, Argentina.
- US Army Corps of Engineers – USACE (2010). “HEC-RAS River Analysis System”, Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.0, Hydraulic Engineering Center, Davis, California, USA.