



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Programa Hidrológico Internacional
International Hydrological Programme

Aqua-LAC

ISSN 1688-2873

1

VOL. 6
MAR. 2014

Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe

Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean

Publicado en el 2014 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Published in 2014 by the International Hydrological Programme (IHP) of the Regional Bureau for Science for Latin America and the Caribbean of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso, 11200 Montevideo, Uruguay.

ISSN 1688-2873

© UNESCO 2014

Foto de portada: © Kamilia Poggi-Dugas, UNESCO.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

The designations employed and presentation of materials throughout the publications do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities or concerning the delimitations of its frontiers or boundaries.

Programa Hidrológico Internacional
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
Oficina Regional de Ciencia para América
Latina y el Caribe
UNESCO
Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: + 598 2 413 20 75
Fax: + 598 2 413 20 94
E-mail: aqualac@unesco.org.uy
<http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac>

CONSEJO EDITORIAL

- Eric Alfaro - Clima
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
- Patricia Avila - Ciencias Sociales / Antropología Social
Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Walter Baethgen - Agua y Agricultura
International Research Institute
for Climate and Society, USA
- Gino Cassasa - Glaciología
Centro de Estudios Científicos, Chile
- Henrique Chaves - Erosión / Sedimentos
Universidade de Brasília, Brasil
- José Rafael Cordova - Ingeniería Hidráulica
Universidad Simón Bolívar, Venezuela
- Evens Emmanuel - Calidad de Aguas
University of Quisqueya, Haiti
- Michael Glantz - Riesgos/ Adaptación
National Center for Atmospheric Research, USA
- Alfonso Gutierrez - Hidrología de Superficie
Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Lilián Laborde - Legislación
Universidad de Buenos Aires, Argentina
- Michael McClain - Ecohidrología
UNESCO - IHE Water Institute, Holanda
- Miguel Mariño - Aguas Subterráneas
University of California Davis, USA
- Polioptró Martínez - Ingeniería Hidráulica
Universidad de Puebla, México
- Victor Pochat - Gestión Integrada
Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Argentina
- Vincent Sweeney - Recursos Hídricos en SIDS
Programa de las Naciones Unidas
para el Medio Ambiente

STAFF EDITORIAL /EDITORIAL STAFF

- Editor en Jefe / Editor in Chief**
Roberto Pizarro
- Editora Ejecutiva / Executive Editor**
Zelmira May
UNESCO
- Coordinador de Edición / Editorial Coordinator**
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO
- Diseño Gráfico / Graphic Design**
Ser Graficos
- Diseño de Portada / Cover Design**
Gabriel Soumis-Dugas
UNESCO

CONTENIDO / CONTENTS

- Crecimiento aguas arriba de bancos de arena e islas
en el río Paraná
Edmundo C. Drago, Mario L. Amsler y Aldo R. Paira
Upstream growth of sandbars and islands in the Paraná river.... 1
- Valoración preliminar de la retención de sedimentos por
hidrófitas en cauces secundarios del Río Paraná Medio
Zuleica Y. Marchetti y Carlos G. Ramonell
Preliminary assessment of sediment retention by
macrophytes in secondary channels of the Middle
Paraná River..... 8
- Evaluación experimental de la técnica de velocimetría
por seguimiento de partículas a gran escala para la
determinación de caudales en ríos serranos
**Antoine Patalano, C. Marcelo García, Nicolás Guillén,
Cesar García, Érica Díaz, Andrés Rodríguez y
Andrés Ravelo**
Experimental evaluation of large scale particle tracking
velocimetry technique for flow discharge measurements
in mountains rivers 17
- Estudio de erosión local en grupos de pilas cuadradas
Martín Puricelli, Pablo Spalletti y Agnes Paterson
Study of local scour at square piers group 25
- Optimización del diseño de protecciones colocadas
junto a estribos de puentes aliviadores
**Ramiro J. Pighini, Marcela L. Reynares y
Graciela B. Scacchi**
The optimization of the revetments design placed
around abutments of relief bridges..... 33
- Producción de sedimentos en una cuenca de sierras
pampeanas, Córdoba, Argentina: estimación para
distintos escenarios
**M. Jimena Andreazzini, Susana Degiovanni, Pablo
Spalletti y Martín Irigoyen**
Sediment yield in a ampean range basin (Cordoba,
Argentina): estimations for different scenarios 38
- Cambios morfológicos del cauce principal del río Paraná
en Argentina, siglo xix a la actualidad
**Franco S. Sobrero, Carlos G. Ramonell y
Ma. Soledad Pereira**
Morphological changes of the main channel of the Paraná
river in Argentina, from sixth century to the present..... 50

CONSEJO DIRECTIVO / BOARD OF DIRECTORS

LUCILA CANDELA

Universidad de Cataluña-UPC, Barcelona, España
Technical University of Catalonia-UPC, Barcelona, Spain

MARÍA CONCEPCIÓN DONOSO

Agua Global para la Sostenibilidad (GLOWS),
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)
Global Water for Sustainability (GLOWS)
United States Agency for International Development (USAID)

VIRGINIA GARCÍA ACOSTA

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México
Center of Research and Higher in Studies of Social Anthropology (CIESAS), Mexico

BLANCA JIMÉNEZ

Aguas Urbanas
Universidad Nacional Autónoma de México, México

EDUARDO PLANOS

Instituto de Meteorología, Cuba
Meteorological Institute, Cuba

ALFONSO GUTIÉRREZ

Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ)
Universidad Autónoma de Querétaro, México
Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ - Water Research Center)
University of Queretaro, México

JUAN CARLOS BERTONI

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
National University of Córdoba, Argentina

EVENS EMMANUEL

Université Quisqueya, Haïti
University of Quisqueya, Haïti

WILL LOGAN

Centro Internacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (ICIWarm), USA
International Center for Integrated Water Resources Management (ICIWarm), USA

SUSCRIPCIONES

Si desea recibir la revista Aqua – LAC en forma
periódica en formato digital descargue el formulario
de suscripción de nuestro sitio web:

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
y envíelo a
aqualac@unesco.org.uy

SUSSCRIPTIONS

If you would like to periodically receive Aqua – LAC
journal in digital format download the suscription
form from our website:

www.unesco.org.uy/phi/aqualac
and send it to
aqualac@unesco.org.uy

EDITORIAL

Nos sentimos enormemente complacidos de tener la oportunidad de ser parte de este número especial de la revista Aqua-LAC, la revista científica del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Este número abarca una recopilación de trabajos seleccionados entre las más de 60 contribuciones presentadas en el Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, "Ríos 2013". Este evento reunió a cerca de 180 profesionales latinoamericanos en la Universidad Nacional del Litoral en Santa Fe, Argentina, entre el 6 y el 8 de Noviembre de 2013.

El Simposio "Ríos 2013" fue bautizado "Hidráulica de sistemas fluviales en Latinoamérica", equiparando el diverso espacio cultural de la región con la suma de sus ríos, hermanando por esa vía singularidades de historia y desarrollo con geografía. Desde las sierras "maestras" de México hasta la fría Cordillera Patagónica, una amplia variedad de sistemas montañosos dota de fuertes pendientes a los cursos de agua de la mayor parte de sus cuencas imbríferas. Ello, junto al carácter tropical y subtropical de más de 3/4 partes del territorio, imponen considerables caudales o elevadas cargas de sedimentos a los ríos. La extensión de las llanuras en la región hace el resto y varios de los ríos más grandes del mundo se concentran en este espacio, el más cuantioso en recursos hídricos superficiales del planeta y el de mayor riqueza en ecosistemas continentales.

En esta "diversidad en común" de nuestros ríos regionales, el ingenio humano requiere proyectarse con máxima responsabilidad a través de la evaluación básica, el diseño de obras y la planificación de manejos compatibles con sus propiedades naturales.

El "Ríos 2013" permitió advertir, en perspectiva, que parte de los temas requeridos en la región son muy complejos, donde los enfoques monodisciplinarios van requiriendo de miradas complementarias acordes a la naturaleza de los "objetos" de estudio. Este es un camino que muy lentamente ha comenzado a transitarse en Latinoamérica, y este número de Aqua-LAC va en pos de favorecerlo al mostrar, en la variedad de trabajos escogidos por su equipo editorial, la integración de los distintos aspectos tanto abióticos como bióticos que implica el análisis y la intervención física de los sistemas fluviales.

En nombre de todos los que estuvimos involucrados en la organización del Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, agradecemos esta nueva participación de los autores de los trabajos que aquí se presentan, y a los responsables de Aqua-LAC, quienes han posibilitado esta muestra más extendida de las valiosas contribuciones recibidas en el "Ríos 2013".

Carlos G. Ramonell, Graciela B. Scacchi, Marcela L. Reynares y Aylén Carrasco Milián

EDITORIAL

We are extremely pleased to having the opportunity to take part of this special issue of Aqua-LAC, the scientific journal of the International Hydrological Programme of UNESCO for Latin America and the Caribbean. This issue includes a compilation of selected works among more than 60 contributions presented during the Sixth Regional Symposium on Hydraulics of Rivers, "Rios 2013". This event brought together about 180 Latin American professionals in the Universidad Nacional del Litoral in Santa Fe, Argentina, on 6 - 8 November 2013.

The Symposium "Rios 2013" was named "Hydraulics of river systems in Latin America", equating the diverse cultural environment in the region with the sum of its rivers, twinning this way the historical and developmental singularities with geography. From the sierra "maestra" of Mexico to the cold Patagonian Cordillera, a wide variety of mountainous systems with steep slopes form the watercourses and their basins. This, together with the tropical and subtropical character of more than 3/4 parts of the territory, impose significant flows or high sediment loads in rivers. The expanse of the plains in the region brings the final contribution to concentrate in this area several of the world largest rivers, making this region one of the richest ones in the planet for its surface water resources and its continental ecosystems.

In this "common variety" of our regional rivers, human ingenuity requires to make projections with maximum liability through the basic assessment, the design of works and the planning of management in a compatible way with the natural properties of the region.

The Symposium "Rios 2013" allowed putting into perspective which complex topics in the region requires multidisciplinary approaches. This path slowly began to be applied in Latin America. This special number of Aqua-LAC favor it with a variety of works integrating different abiotic and biotic aspects involving analysis and physical intervention of river systems.

On behalf of all those who were involved in organizing the Sixth Regional Symposium on Hydraulics of Rivers "Rios 2013", we welcome the participation of the authors of the works presented in this issue, and also the Aqua-LAC team, who have enabled this extended sample of the valuable contributions received by "Rivers 2013".

Carlos G. Ramonell, Graciela B. Scacchi, Marcela L. Carrasco Reynares and Aylén Milián

POLÍTICA EDITORIAL

Frecuencia de publicación

La Revista Aqua-LAC será publicada cada seis meses o dos veces al año.

Contenido

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinaria que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social. El contenido de la publicación buscará abarcar las necesidades de la comunidad científica, gestores de los recursos hídricos, tomadores de decisiones y el público en general.

Idioma

La publicación Aqua-LAC aceptará manuscritos en inglés y español, y publicará el resumen en el idioma original del texto y un resumen en el otro idioma oficial de la revista.

Aceptación de los manuscritos

Los manuscritos sometidos para publicación deberán ser originales, no habiéndose sometido con anterioridad para su publicación en otros medios, y serán sometidos a un proceso de revisión y dictamen previos a su aceptación. Artículos invitados, o artículos en ediciones temáticas especiales, no necesariamente serán sometidos a revisión.

El Editor en Jefe, en consulta con el Consejo Directivo, se reserva el derecho de rechazar un manuscrito si se considera que su contenido en fondo y/o forma no se ajusta a la línea editorial de la revista Aqua-LAC.

Proceso de revisión

Todos los manuscritos sometidos a publicación serán revisados por al menos dos revisores calificados, no necesariamente miembros del Comité Editorial. Un manuscrito puede ser aceptado, aceptado con condiciones, o rechazado con la debida justificación en todos los casos. En el caso de que haya comentarios, el manuscrito será devuelto al (a los) autor(es) para que respondan a los mismos. El (Los) autor(es) tendrán 60 días para devolver el manuscrito modificado al Editor en Jefe, claramente indicando los cambios realizados o enviando una declaración escrita solidamente fundamentada del motivo por el cual no han acogido los comentarios de los revisores.

Derechos de reproducción (Copyrights)

Los autores de artículos aceptados para ser publicados, aceptarán de manera automática que los derechos de autor se transferirán a la revista.

Responsabilidad

Debido a la naturaleza intergubernamental de la UNESCO, la Organización se reserva los derechos de notificar en todas las publicaciones de Aqua-LAC que *“Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización”*.

EDITORIAL POLICY

Frequency of publication

The journal Aqua-LAC will be published every six months or twice a year.

Contents

The journal Aqua-LAC contains scientific, policy-related, legislative, educational, social, and communication articles and revisions related to water sciences and water resources topics. The content of the journal is aimed to meet the requirement of the scientific community, water resources managers, decision-makers, and the public in general.

Languages

The journal Aqua-LAC accepts manuscripts in English or Spanish and publishes abstracts in both languages.

Acceptance of manuscripts

Manuscripts submitted for publication must be originals that have not been submitted for possible publication elsewhere. Submitted manuscripts will be undergoing a review process. Invited articles or articles in special topical editions, will not necessarily be submitted to review.

The Editor in Chief, in consultation with the Board of Directors, reserves the right to reject a manuscript if its contents is deemed substantially or formally inconsistent with the editorial line of AQUA-LAC magazine

Review process

All manuscripts submitted for publication will be reviewed by at least two qualified reviewers, not necessarily members of the Editorial Committee. A manuscript can be accepted with or without comments or it can be rejected with due justification. In the first case, the manuscript will be returned to the author(s) for him/her/them to address the comments. The author(s) will have 60 days to return the modified manuscript to the Editor in Chief, clearly indicating the changes made or providing a written statement with solid fundamentals for not addressing comments by the reviewers.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree the author rights to be transferred to the Journal. The author(s) are expected to sign a copyright form available in the Aqua-LAC webpage.

Disclaimer

Due to the intergovernmental nature of UNESCO, the organization reserves the right to state in all Aqua-LAC publications that *“The designations employed and the presentation of material throughout the journal do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. The authors are responsible for the facts and opinions expressed therein, which are not necessarily those of UNESCO and do not commit the Organization”*.

CRECIMIENTO AGUAS ARRIBA DE BANCOS DE ARENA E ISLAS EN EL RÍO PARANÁ

UPSTREAM GROWTH OF SANDBARS AND ISLANDS IN THE PARANÁ RIVER

Edmundo C. Drago¹, Mario L. Amsler^{1,2} y Aldo R. Paira^{1,2}

Resumen:

La identificación de algunas de las variables que intervienen en los procesos que dan origen a bancos e islas de cauce y controlan su evolución, se ha basado mayormente en estudios realizados en ríos pequeños y medianos o en experimentos de laboratorio con sedimento relativamente grueso donde predomina la carga de fondo. Si bien en investigaciones recientes se ha aportado información detallada acerca de esa dinámica en grandes ríos con fondo de arena, aún se carece de suficientes conocimientos referidos a los mecanismos relacionados con el transporte de sedimento de fondo en suspensión que inciden en su origen y evolución. La excepción la constituyen investigaciones llevadas a cabo en algunos grandes ríos asiáticos. En este trabajo se brindan datos surgidos de trabajos de campo y del análisis de cartas de navegación, fotografías aéreas e imágenes satelitales de un proceso fluvial poco investigado como lo es el crecimiento de bancos de arena aguas arriba del frente de islas y bancos en el río Paraná, uno de los más grandes de Sudamérica. Se destaca aquí el papel que jugaría el transporte de fondo en suspensión en el desarrollo de ese fenómeno.

Palabras clave: bancos de arena, islas, río Paraná.

Abstract

The identification of some of the variables which drive the origin of channel bars and islands and control their evolution has largely focused on results of studies performed in small to medium river sizes or laboratory flumes with relatively coarse sediment where bed load prevails. Although recent investigations have reported detailed information on the bars and islands dynamics in large sand-bed rivers, there is still a lack of knowledge concerning the mechanisms governing knowledge concerning the their origin and evolution associated with the flow and suspended bed sediment transport. The exception are investigations carried out in some large Asian rivers. This paper reports data obtained from field trips and the analysis of navigation charts, aerial photographs and satellite imagery about a scarcely investigated riverine process as the upstream growth of sand bars on island and bars fronts in the Paraná River, one of the biggest rivers of South America. The role that would play the suspended bed sediment transport in this phenomenon is highlighted.

Keywords: sandbars, islands, Paraná river.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de bancos e islas de cauce ha sido objeto de intensa investigación dado el papel central que se les asigna en el desarrollo del entrelazamiento de cauces aluviales (Ashworth, 1996; Best y Bristow, 1993; Bridge, 2003; Schumm, 2005). El cuerpo de conocimientos habituales sobre estos tópicos proviene de experimentos de laboratorio y estudios de campo llevados a cabo en corrientes pequeñas o medianas, esto es, a reducidas escalas espaciales y con sedimento de fondo más bien grueso. Bajo estas condiciones, se comprobó que la carga de fondo fue el modo de transporte dominante y una evolución general hacia aguas abajo de aquellas geoformas a través de diversos procesos.

Los estudios de estos temas en ríos con carga mixta (considerables cantidades de sedimento de fondo en suspensión en relación con la carga de fondo) y a grandes escalas espaciales, son relativamente escasos si bien se han incrementado en los últimos años (Ashworth et al., 2000; Sambrook Smith et al., 2009; Szupiany et al., 2009, 2012). En estas circunstancias se ha observado, además de los procesos anteriores, un recrecimiento hacia aguas arriba de bancos e islas de cauce, un hecho poco documentado en la literatura (Popov, 1962 citado por Schumm, 2005; Coleman, 1969; Drago, 1973, 1977, 1990). En este trabajo se presentan datos acerca de este último fenómeno en el río Paraná a lo largo de su tramo alto

¹ Instituto Nacional de Limnología (INALI), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas-Universidad Nacional del Litoral (CONICET-UNL), Ciudad Universitaria, Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina. e-mail: edmundodrago@arnet.com.ar

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria, Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina.

Recibido: 28/04/2014

Aceptado: 01/06/2014

y medio, obtenidos desde diversas fuentes cartográficas y observaciones de campo. Los objetivos buscados fueron determinar las frecuencias de aparición de sedimentaciones aguas arriba de bancos e islas en relación con los otros tipos comunes de depósitos (bancos de cola y de herradura) y explorar la posible asociación de los cambios detectados en esas frecuencias con las variaciones en la granulometría del sedimento del lecho, la carga de fondo y la arena en suspensión a lo largo del sector estudiado.

ÁREA DE ESTUDIO

Se ha analizado un tramo de 1087 km del río Paraná entre Ituzaingó (Corrientes, Argentina) y el ápice del delta cerca de Villa Constitución (53 km aguas abajo de la ciudad de Rosario, Argentina). Si se incluye el sub-tramo entre Posadas e Ituzaingó la longitud total del tramo asciende a 1216 km (Figura 1). Este último sector se incluyó con el fin de conocer el número de bancos antes de la construcción del embalse de Yaciretá.

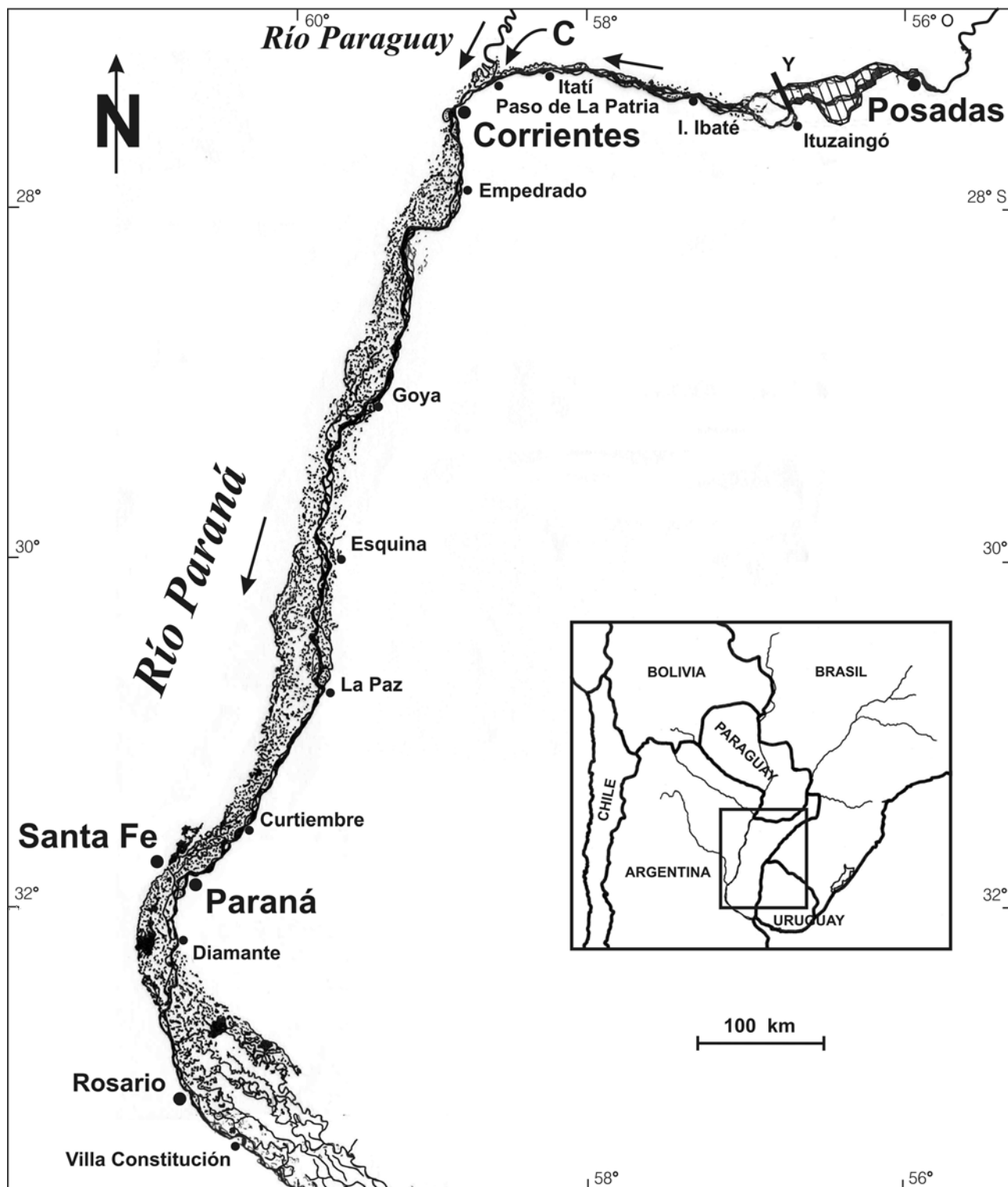


Figura 1. Tramo estudiado del río Paraná. Y: presa de Yaciretá (el área sombreada corresponde a la superficie del embalse). C: confluencia de los ríos Paraná y Paraguay.

En toda esa longitud bancos e islas se concentran en los tramos ensanchados de cauce imprimiéndole la configuración entrelazada en planta con que se ha categorizado al cauce principal del río Paraná (Drago, 1977, 1990; "entrelazado con thalweg divagante" según Ramonell et al., 2002). Las islas son más estables debido al crecimiento de vegetación sobre los bancos originales formados y controlados por la dinámica del cauce principal. A lo largo del Alto Paraná las más estables son aquellas originadas a partir de afloramientos rocosos característicos entre Yaciretá y las cercanías de la ciudad de Corrientes. Aguas abajo de este punto bancos e islas están formadas por acumulaciones de arena de diverso origen (interacción morfología-escorrimento de agua y sedimento de fondo, sedimentaciones producidas por obstáculos en el lecho como raigones, etc.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las longitudes de los sub-tramos seleccionados en el estudio variaron entre 39 y 129 km entre Posadas y la confluencia Paraná-Paraguay y 32 a 164 km entre este punto y Villa Constitución. Las longitudes medias de sub-tramos fueron de 54 y 59 km, respectivamente. Las mediciones se realizaron sobre fotos aéreas (1954, 1968, 1989, 1994) e imágenes satelitales (2000, 2008). Se complementaron, asimismo, con revisiones de ediciones viejas y nuevas de las cartas de navegación realizadas por el Servicio de

Hidrografía Naval de Argentina e inspecciones de campo. En todos los casos se registró el número total de bancos de arena e islas emergidos durante un estado del río de aguas medias. Los datos de tamaño del sedimento de fondo y parámetros hidráulicos necesarios para las estimaciones del transporte, se obtuvieron de bibliografía disponible (Drago y Amsler, 1998; Amsler y Prendes, 2000; Nicholas et al., 2012).

RESULTADOS

Los bancos e islas de cauce constituyen macro-formas muy comunes en el río Paraná con una apariencia en planta en forma de diamante, angosta y alargada. Son muy comunes los bancos en el extremo de aguas abajo de las islas ("bancos de cola") o en sus bordes laterales ("bancos marginales"). Menos frecuentes son los llamados "bancos en herradura" originados a partir de un núcleo arenoso y con dos depósitos creciendo aguas abajo separados por una zona de aguas muertas. A medida que esta forma evoluciona los dos depósitos arenosos incrementan sus longitudes y tienden a cerrarse aguas abajo formando una laguna pequeña y playa. Los depósitos aguas arriba o en el frente de grandes bancos e islas, llamados tentativamente aquí "bancos de cabecera", se forman junto con los otros tipos en los tramos entrelazados o ensanchados del cauce (Drago, 1973, 1990; Figuras 2, 3 y 4).

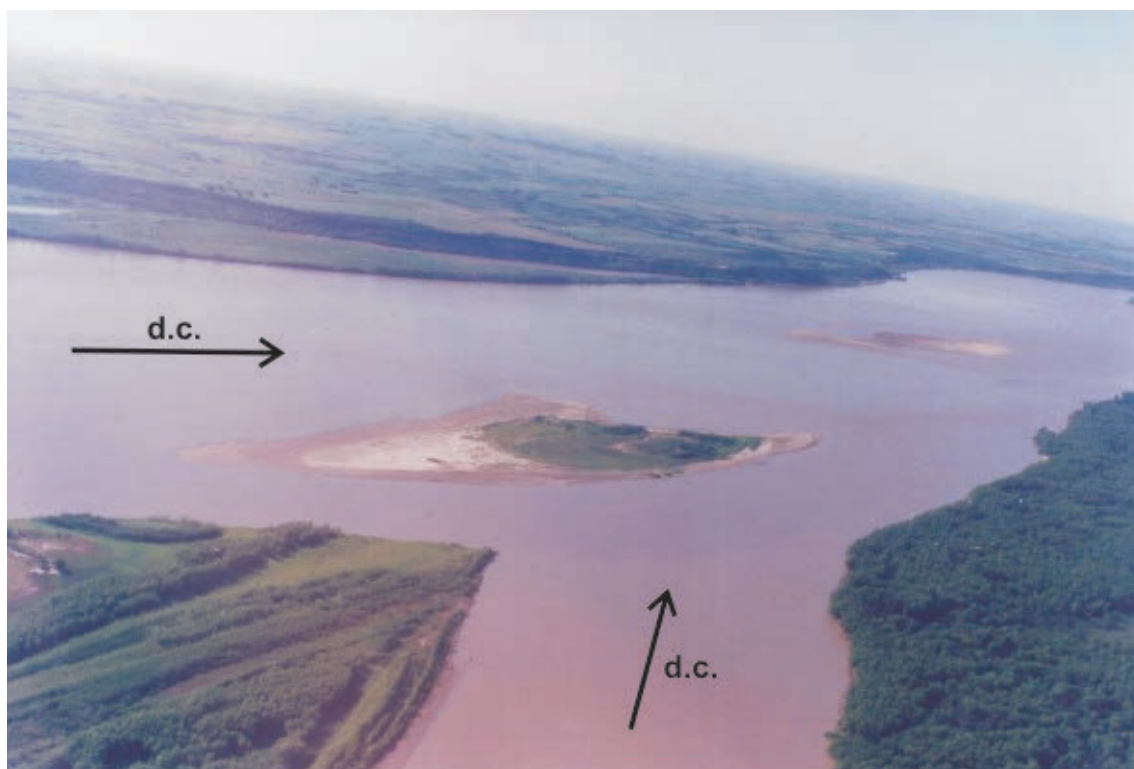


Figura 2. Banco de cabecera. Río Paraná (km 570; 31° 50' 25" Sur y 60° 30' 51" Oeste). Nivel hidrómetro Pto. Paraná: 1,84 m. Fecha: 16/01/2002. Nótese la formación de bancos marginales sobre ambos lados y un banco de cola. d.c.: dirección de la corriente.

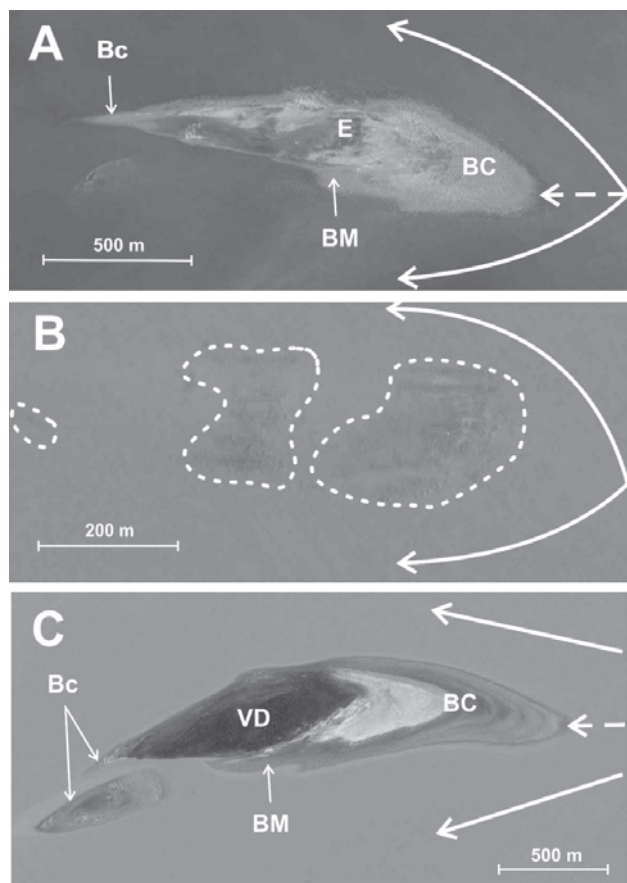


Figura 3. Isla de cauce 27 km aguas arriba de la ciudad de Paraná (km 628) con bancos de cabecera (BC), marginales (BM) y de cola (Bc). A: año 2002 con vegetación pionera en la zona de formación del banco original (E). B: año 2002 durante una fase de inundación. C: año 2006 con vegetación densa (VD) cubriendo la zona del banco original.

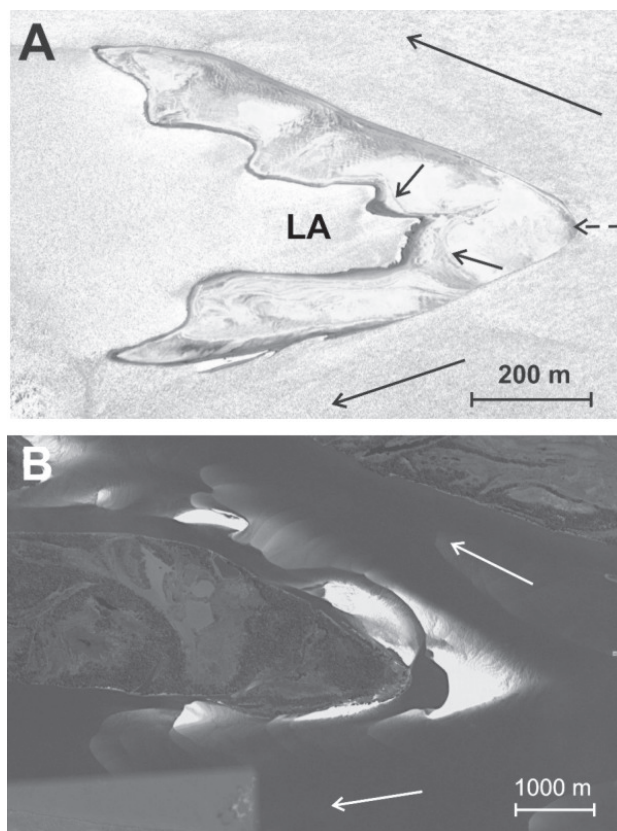


Figura 4. Bancos en herradura. A: aproximadamente 6 km aguas abajo de la ciudad de Paraná. Nótese los típicos depósitos que le dan su forma característica y el futuro lago aluvial (LA) a formarse entre ellos; dunas y rizos aparecen sobre la superficie sin ningún tipo de vegetación. B: aproximadamente 13 km aguas abajo de Itá Ibaté (Corrientes) en el río Alto Paraná; nótese la combinación de depósitos de grandes bancos y dunas.

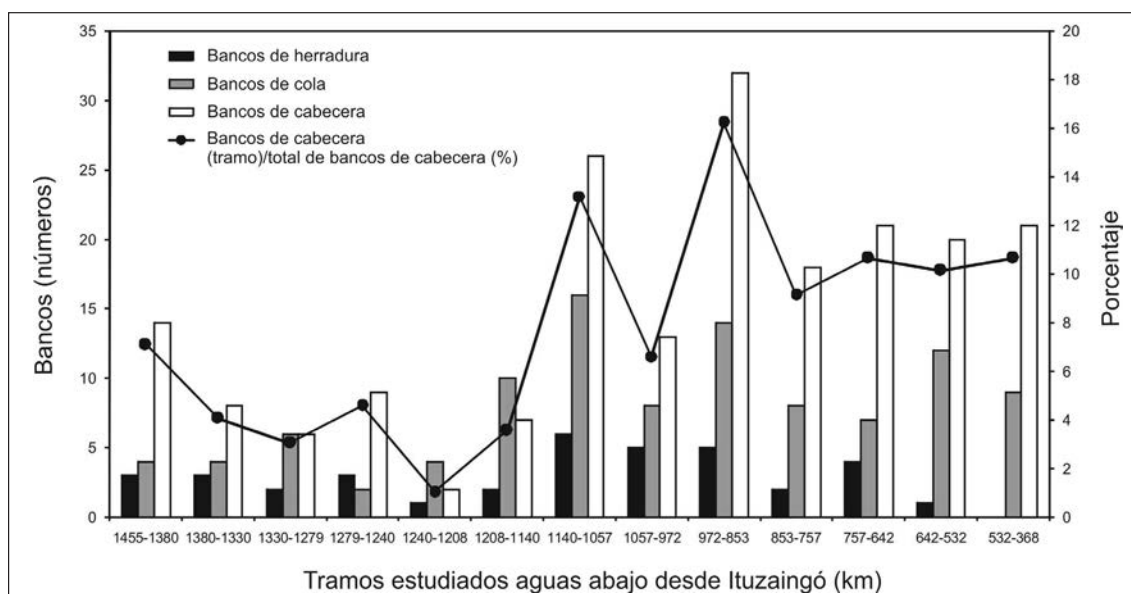


Figura 5. Distribución de los tres tipos de bancos más comunes en los diferentes sub-tramos examinados desde Ituaingó (Provincia de Corrientes) hasta Villa Constitución (Provincia de Santa Fe). Los círculos llenos indican los porcentajes del número local de bancos de cabecera respecto del número total de este tipo de bancos a lo largo del tramo completo desde km 1455 a km 368 (km: kilómetros de cauce a lo largo de la ruta de navegación).

En la Figura 5 se presentan los números de los tres tipos de bancos registrados en los sub-tramos estudiados a lo largo del río Paraná entre Ituzaingó y Villa Constitución. Los bancos de cabecera predominan en el 77% de esos sub-tramos. Los bancos de cola prevalecen en un 15% de ellos mientras que los de herradura son los menos frecuentes.

Las relaciones entre el número acumulado de bancos de cabecera y la distancia a lo largo del tramo analizado desde Ituzaingó y Posadas junto con las

respectivas rectas de regresión, se muestran en Figura 6.

Se advierte la diferencia en las pendientes de las rectas de ajuste antes y después de la confluencia Paraná-Paraguay. Esa diferencia es estadísticamente significativa ($p = 0,005$). Nótese, además, la similitud de las pendientes en el tramo superior (una diferencia de solamente el 8%) al incluir el sub-tramo Posadas-Ituzaingó, con datos previos a la construcción de Yaciretá.

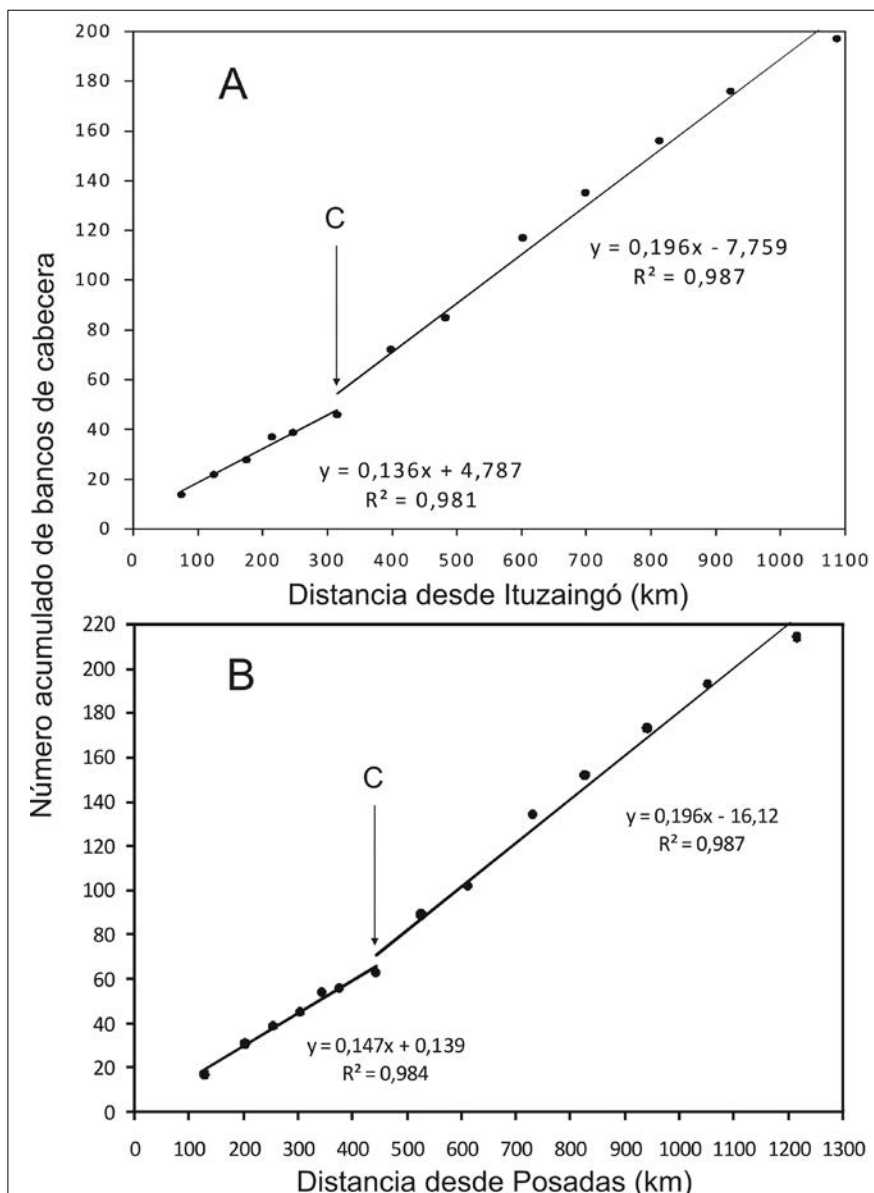


Figura 6. Número acumulado de bancos de cabecera a lo largo de los tramos de cauce analizados del río Paraná. A: entre Ituzaingó (Corrientes) y Villa Constitución (Santa Fe); longitud: 1087 km. B: ente Posadas (Misiones) y Villa Constitución (Santa Fe); longitud: 1216 km. Nótese en ambos casos el quiebre de las rectas de ajuste en torno del punto C el cual indica la zona de confluencia de los ríos Paraná y Paraguay.

Discusión

Recientemente Szupiany et al. (2012), sugieren que los depósitos aguas arriba de bancos e islas sería el resultado de la divergencia del escurrimiento debido a desplazamientos laterales del thalweg en esos sitios.

Según el grado de esos desplazamientos cantidades importantes de arena fina en suspensión pueden no acompañar al flujo y continúan siendo transportadas a las áreas de muy baja velocidad y tensiones de

corte frente a bancos e islas, lo cual promueve su progresiva sedimentación y el crecimiento aguas arriba de sus cabeceras mediante procesos cuya mecánica íntima debe ser aún investigada. La idea, adelantada por esos autores, está basada en mediciones detalladas aguas arriba de bifurcaciones de diverso tipo en el río Paraná, realizadas con tecnología Doppler acústica (ADCPs).

La relevancia de las partículas de fondo en suspensión en la evolución de los bancos de arena debe concebirse en relación con la de la carga de fondo. Esto es, si esta última aumenta su importancia debido a cambios en la capacidad de transporte del escurrimiento y/o engrosamiento de las partículas de arena del fondo, la frecuencia de crecimiento aguas arriba de bancos e islas disminuiría en relación con la de bancos de cola y herradura producto, en estos casos, de la deposición de la carga de fondo a través de conocidos mecanismos detallados en la literatura específica (v.g. Ashworth, 1996).

En el río Paraná la relación promedio arena en suspensión/carga de fondo (G_{ss}/G_{sf}) es $\approx 10,4$ en su tramo medio (Alarcón et al., 2003). Estos autores determinaron este valor aplicando fórmulas de transporte cuidadosamente calibradas con mediciones de ambos tipos de cargas. Si las mismas fórmulas se aplican en el Alto Paraná (tramo Itatí - Paso de la Patria) con valores medios de profundidades, pendientes, caudales y tamaños de sedimento de fondo (Nicholas et al., 2012), la relación se reduce a $\approx 8,7$. La elevada proporción de arena en suspensión con respecto a la transportada como carga de fondo, explicaría la predominancia de bancos de cabecera por sobre los otros dos tipos en todo el tramo atendiendo a los hallazgos mencionados de Szupiany et al (2012).

Por otro lado, la mayor importancia de la carga de fondo en el tramo superior (la relación G_{ss}/G_{sf} aumenta $\approx 20\%$ en el tramo medio), estaría asociada a la tasa diferenciada de aparición de bancos de cabecera aguas abajo de Paso de la Patria. El punto de quiebre de ambas rectas de ajuste en el entorno de la confluencia Paraná-Paraguay (Figura 6), revela que la cantidad de bancos de cabecera se intensificaría en el tramo medio.

En Tabla 1 se presenta la composición del sedimento del lecho del río Paraná antes y luego de su confluencia con el río Paraguay la cual es compatible con la diferencia señalada en G_{ss}/G_{sf} .

Se advierte que el porcentaje de los granos más gruesos del lecho, normalmente transportados como carga de fondo en las condiciones del río Paraná, disminuye marcadamente (más de un 40%) en el tramo medio. Por el contrario, la proporción de arena fina crece cerca del 60% luego de la desembocadura del río Paraguay. La composición del fondo de este último curso en su tramo inferior, también incluida en Tabla 1, prueba su rol central en los aportes de

arenas finas y muy finas aguas abajo, las cuales constituyen parte preponderante de la carga de fondo en suspensión en el tramo medio (Latosinski et al., 2014).

Tabla 1.- Composición promedio del sedimento del lecho de los ríos Paraná y Paraguay (GMF: grava muy fina; AMG, AG, AM, AF, AMF: arena muy gruesa, gruesa, media, fina y muy fina, respectivamente; L: limo; a: arcilla). Fuente: Drago y Amsler, 1998 e INALI, 2010.

GMF+AMG+AG (%)	AM (%)	AF (%)	AMF (%)	L+a (%)
Alto Paraná (tramo Posadas - Paso de la Patria)				
21,6	57,0	17,7	2,6	1,1
Paraná Medio e Inferior (tramo Corrientes - km 361)				
12,3	55,6	28,2	2,1	1,8
Río Paraguay Inferior (km 1349,5 - km 1298)				
8,6	20,7	24,8	23,0	22,4

CONCLUSIONES

Se ha verificado que los depósitos existentes en las caras de aguas arriba de bancos e islas de cauce predominan con respecto a otros tipos de bancos (de cola y en herradura), comunes en los tramos alto y medio del río Paraná. Ese predominio estaría asociado a las elevadas tasas de arena en suspensión con respecto a la transportada como carga de fondo, registradas para este río. Las diferencias en la relación entre ambos tipos de transporte existente antes y luego de la confluencia Paraná-Paraguay, explicaría la disparidad encontrada en la frecuencia de aparición de los bancos de cabecera en los tramos correspondientes que separa ese sitio.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Limnología (INALI - CONICET/UNL) por el apoyo logístico recibido que permitió el desarrollo de esta investigación. La experticia y dedicación del personal de campo del INALI fueron claves en ese apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, J.J., R.N. Szupiany, M.D. Montagnini, H.E. Gaudin, H.H. Prendes & M.L. Amsler. 2003. Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos - RIOS 2003. Buenos Aires, Argentina (CD).
- Amsler, M.L. & H.H. Prendes. 2000. Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados, Tomo 1: pp. 233-306. En Paoli C. y M. Schreider (eds.). El Río Paraná en su Tramo Medio. Contribución al co-

nocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Ashworth, P.J. 1996. Mid-channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 103-123.

Ashworth P.J., J.L. Best, J.E. Roden, C.S. Bristow & G.K. Klaassen. 2000. Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh. *Sedimentology* 47: 533-555.

Best, J.L. & C.S. Bristow. 1993. Braided Rivers. *Special Publications Geological Society, London*, 419 p.

Bridge, J.S. 2003. Rivers and Floodplains. Forms, Processes, and Sedimentary Record. Blackwell, 491 p.

Coleman, J.M. 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. *Special Publications Geological Society* 3: 129-239.

Drago, E C. 1973. Caracterización de la llanura aluvial del Paraná Medio y de sus cuerpos de agua. *Boletín Paranaense de Geociencias* 31: 31-44.

Drago, E.C. 1977. Erosión y sedimentación en un tramo de cauce del río Paraná Medio (República Argentina). *Asociación Geológica Argentina* 32: 277-290.

Drago, E.C. 1990. Geomorphology of large alluvial rivers: Lower Paraguay and Middle Paraná. *Interciencia* 15: 378-387.

Drago, E.C. & M.L. Amsler. 1998. Bed sediment characteristics in the Paraná and Paraguay Rivers. *Water International* 23: 174-183.

INALI (Instituto Nacional de Limnología). 2010. Proyecto: Influencia de la variabilidad hidrodinámica y morfológica en ambientes acuáticos de la llanura aluvial del río Paraná Medio sobre la fauna bentónica y peces. Subsidio: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET - PIP No. 11220090100127). Período: 2010-2012.

Latosinski, F.G., R.N. Szupiany, C.M. García, M. Guerrero & M.L. Amsler. 2014. Estimation of Concentration and Load of Suspended Sediment in a Large River by Means of Acoustic Doppler Technology. *Journal of Hydraulic Engineering* doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859.

Nicholas, A.P., S.D. Sandbach, P.J. Ashworth, M.L. Amsler, J.L. Best, R.J. Hardy, S.N. Lane, O. Orfeo, D.R. Parsons, A.J.H. Reesink, G.H. Sambrook Smith & R.N. Szupiany. 2012. Modelling hydrodynamics in the Río Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced-complexity and physics-based models applied to a large sand-bed river. *Geomorphology* 169-170: 192-211.

Popov, I.V., 1962, Application of morphological analysis to the evaluation of the general channel deformations of the River Ob: *Soviet Hydrol.*, v. 3, p. 267-324.

Ramonell, C., M.L. Amsler & H. Toniolo. 2002. Shifting modes of the Paraná River thalweg in its middle-lower reach. *Zeitschrift für Geomorphologie* 129: 129-142.

Sambrook Smith, G.H., P.J. Ashworth, J.L. Best, I.A. Lunt, O. Orfeo & D.R. Parsons. 2009. The sedimentology and alluvial architecture of a large braid bar, Río Paraná, Argentina. *Journal of Sedimentary Research* 79: 629-642.

Schumm, S.A. 2005. River Variability and Complexity. Cambridge University Press: 220 p.

Szupiany, R.N., M.L. Amsler, D.R. Parsons & J.L. Best. 2009. Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences. *Water Resources Research* 45, W05415, doi: 10.1029/2008WR007428.

Szupiany, R. N., M.L. Amsler, J. Hernandez, D.R. Parsons, J.L. Best, E. Fornari & A. Trento. 2012. Flow fields, bed shear stresses, and suspended bed sediment dynamics in bifurcations of a large river. *Water Resources Research* 48, W11515 doi:10.1029/2011WR011677.

VALORACIÓN PRELIMINAR DE LA RETENCIÓN DE SEDIMENTOS POR HIDRÓFITAS EN CAUCES SECUNDARIOS DEL RÍO PARANÁ MEDIO

PRELIMINARY ASSESSMENT OF SEDIMENT RETENTION BY MACROPHYTES IN SECONDARY CHANNELS OF THE MIDDLE PARANÁ RIVER

Zuleica Y. Marchetti¹ y Carlos G. Ramonell¹

RESUMEN

La sedimentación de materiales finos en el sistema fluvial del Paraná, ha sido un proceso vinculado comúnmente con las inundaciones, siendo la sedimentación en el interior mismo de los cauces y el rol de las hidrófitas en este proceso, fenómenos recientemente sugeridos. Dos cauces secundarios del sistema fueron seleccionados con el objetivo de evaluar la superficie ocupada por las hidrófitas arraigadas, y su potencial efecto en los procesos de sedimentación. Las hidrófitas cubrieron entre un 6% y un 54% de esos cauces en los últimos 10 años. Cada 100 gramos de las especies más frecuentes (*Panicum elephantipes*, "canutillo" y *Polygonum ferrugineum*, "catay"), se registraron valores medios de 201 gr y 129 gr de sedimento, principalmente de limos y arcillas. Considerando las superficies totales ocupadas por hidrófitas y las cantidades atrapadas por unidad de superficie, se estimó una retención potencial de sedimentos de 1,8 y 9,1 toneladas por kilómetro de cauce, sólo en superficie y acumulados en un máximo de 17 meses. Complementariamente, tasas de sedimentación puntuales de hasta 3,8 mm/día fueron registradas en sitios vegetados del interior de los cursos de agua. Las velocidades del flujo medidas en los ensambles indicaron condiciones favorables para la sedimentación de finos. Estos primeros resultados evidencian un rol activo de las hidrófitas en la sedimentación intra-cauce en el sistema del río Paraná.

Palabras claves: sedimentación intra-cauce, vegetación acuática arraigada, río Paraná

ABSTRACT

Sedimentation of silts and clays in the Paraná River fluvial system has been a process associated to floods. Differently, sedimentation within channels themselves and the hydrophytes role in this process has been an aspect recently suggested. In order to evaluate the surface occupied by hydrophytes and their potential effects on sedimentation processes, two secondary channels of the system were studied. Near 6% and 54% of the channel surfaces were covered by hydrophytes during the last 10 years. Mean values of 201 gr and 129 gr of sediment, mainly silt and clay, were recorded by 100 gr of more frequent species (*Panicum elephantipes*, "canutillo", and *Polygonum ferrugineum*, "catay"). From the total surface occupied by hydrophytes and the retained quantities of sediments by surface unit, a potential rate of retained sediment of 1.8 and 9.1 Tons/km of channel was estimated, just on the channel surface and during a maximum of 17 months. Furthermore, punctual sedimentation rates up to 3.8 mm/day were recorded in vegetated sites of the channels. Flow velocities measured into vegetation assemblages showed favorable conditions to silting of fine sediments. These first results evidence an active role of the hydrophytes in the within-channel sedimentation in this fluvial system.

Key words: in-channel sedimentation, rooted aquatic vegetation, Paraná River

INTRODUCCIÓN

El río Paraná constituye, en virtud de su descarga media anual (~17,000 m³/s) y del área de su cuenca de drenaje (2,6 millones de km²), el segundo río más importante en Sudamérica y se posiciona entre los diez mayores a nivel mundial, con los que comparte un patrón de cauce múltiple (o "anabranching", Latrubesse 2008). El transporte de sedimentos en su cauce principal ha sido evaluado en 135 millones de toneladas/año (Amsler y Prendes 2000), de las cuales cerca del 80

% corresponden a limos y arcillas, que constituyen la carga de lavado de este sistema fluvial. Justamente, la sedimentación de estos tamaños finos en el tramo medio del río, aguas abajo de la confluencia del río Paraguay, ha sido un proceso tradicionalmente vinculado a las inundaciones de su planicie aluvial, así como a la transferencia de la carga de lavado desde los cauces a las lagunas de la planicie (Drago 2007, Amsler et al. 2007). Sólo recientemente unas pocas

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral (FICH - UNL). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Paraje Universitario El Pozo, Ruta Nacional 168, Santa Fe, Argentina. Tel.: 054 342 4575245 # 152. zuleicayael@hotmail.com

contribuciones han considerado la sedimentación de limos y arcillas en el interior mismo de parte de los numerosos cauces que posee el sistema. Prendes et al. (2009) reportaron la acumulación de esos sedimentos en el lecho de un cauce secundario promovida por la ocurrencia de bajas velocidades y tensiones de corte de la corriente, en tanto que Ramonell et al. (2011, 2012) presentaron evidencias de tal acumulación en estrecha asociación con geoformas generadas en el interior de diversos cauces secundarios ("albardones de intra-cauce") y favorecida por la presencia de vegetación acuática arraigada.

Como cualquier otro ecosistema, las características y dinámica de los cuerpos de agua surgen de la interacción entre sus diferentes componentes, tanto bióticos como abióticos. Sin embargo, los fenómenos de sedimentación en el sistema fluvial del Paraná han sido abordados casi exclusivamente en función de las propiedades hidráulicas del flujo, sin considerar las particularidades biológicas de la vegetación (estacionalidad, superficie, estructura, etc.) más allá de su influencia como factor (deducido) de rugosidad. En tal sentido, la vegetación acuática (hidrófita) y especialmente las hidrófitas arraigadas, llegan a cubrir importantes superficies dentro de los cauces secundarios del tramo medio. Esta ocupación de las hidrófitas se corresponde con una densa red de tallos sumergidos dotados de diferentes estructuras anatómicas -vainas, ócreas, láminas, raíces adventicias, entre otras- que les confieren potencial no sólo para modificar las condiciones hidráulicas de los cauces, sino también para retener sedimentos en forma directa, un aspecto que no ha sido abordado con sistematicidad en el Paraná hasta el presente.

Localmente, la vegetación acuática del río Paraná Medio es conocida a partir de contribuciones realizadas principalmente en ambientes lénticos o de aguas quietas. Inventarios y aspectos inherentes a la biomasa, productividad y dinámica anual de la vegetación durante las fases de inundación/estiaje han sido reportados para diferentes lagunas de la planicie aluvial (Neiff, 1975, 1979; Lallana, 1980, 1981; Sabbatini et al. 1983, Sabbatini 1985, Sabbatini y Lallana 2007). En contraposición, los ambientes lóticos o de aguas corrientes constituyen sitios de características y dinámicas particulares, en muchos de los cuales la vegetación se desarrolla y persiste todo el año ejerciendo roles aún no considerados y/o cuantificados.

En este marco, el presente trabajo incluye los primeros resultados que evalúan el potencial de las hidrófitas arraigadas en su capacidad de atrapar o retener sedimentos en cauces secundarios/menores del río Paraná Medio. Para ello se plantearon tres objetivos específicos: 1- valorar la importancia espacio-temporal de los ensambles de hidrófitas dentro de tales cauces; 2- cuantificar la cantidad de sedimento adherido a las hidrófitas así como los depositados debajo de éstas, en el lecho de los cauces; y 3- comparar parámetros hidráulico-sedimentológicos básicos en sitios vegetados y libres de vegetación de los cauces.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dos cauces menores conectados en sus embocaduras y desembocaduras con el cauce principal del Río Paraná, se seleccionaron para este estudio: los arroyos Chapetón y Tirapatrás (Fig. 1).

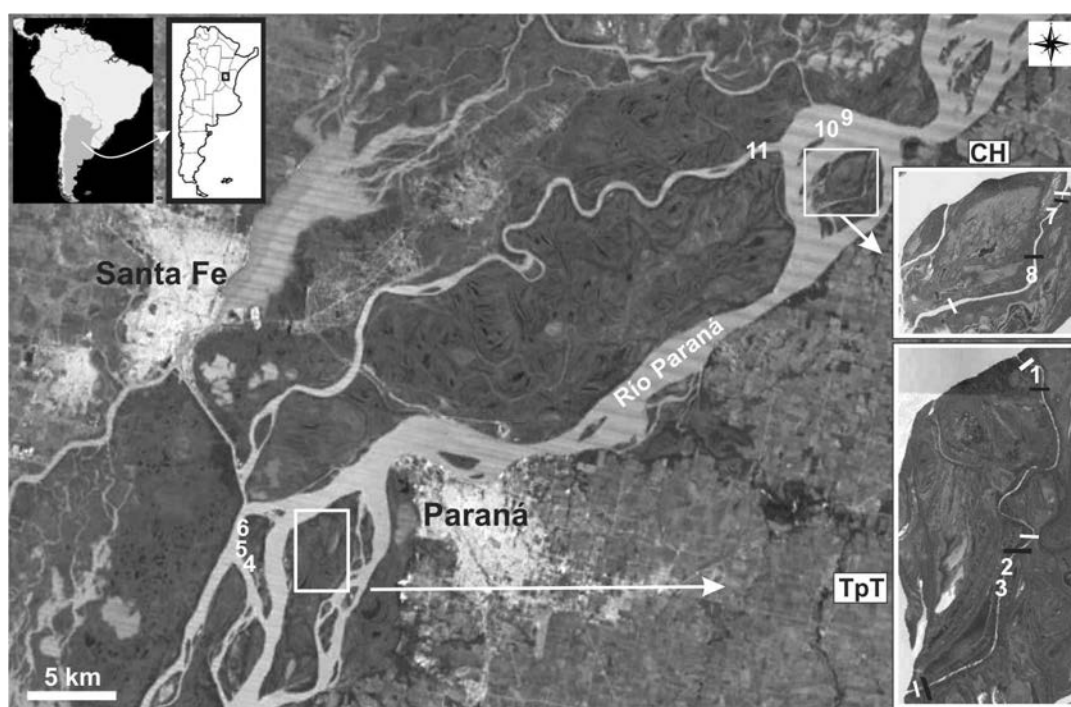


Figura 1. Ubicación de los arroyos Chapetón (CH) y Tirapatrás (TpT), próximos a las ciudades de Santa Fe (provincia de Santa Fe) y Paraná (Prov. de Entre Ríos, km 601 del río), indicando las secciones evaluadas en 2012 (blanco) y 2013 (negro). Los números señalan sitios en que se instalaron trampas de sedimentos.

Ambos son cauces de patrón recto -el segundo con algunas curvas de meandro-, con anchos medios actuales de 60 m y 20 m, respectivamente (1/3 y 2/3 inferiores a los de hace 40 años atrás). El A° Chapetón posee una longitud de 5,5 km, lecho de arenas medias con dunas como formas de fondo y caudales de 40 m³/s a 200 m³/s, medidos en aguas bajas y durante una crecida ordinaria, respectivamente. El A° Tirapatrás tiene 6,6 km de longitud, limos como material de fondo y caudales instantáneos extremos de 10 m³/s y 40 m³/s, evaluados en iguales situaciones hidrométricas que las del A° Chapetón.

Tanto la longitud y superficie de los ensambles de hidrófitas, así como la superficie de tales cauces, fueron cuantificadas a partir de imágenes de satélite de alta resolución exhibidas en Google Earth®, correspondientes a 8 años entre el 2002 y el 2013.

Los muestreos de hidrófitas y de parámetros hidráulicos se efectuaron durante 2 campañas (aguas medias de Julio de 2012 y aguas bajas de Febrero de 2013), en secciones ubicadas en cercanías de la embocadura, parte media y desembocadura de cada cauce secundario. En cada una de las secciones mencionadas se seleccionó un ensamble de hidrófitas homogéneo en su composición florística, en el cual se obtuvieron 3 muestras de vegetación de 0,25 m² cada una. Se evaluaron de esta forma, 3 ensambles (con 3 muestras de vegetación cada uno), en 3 secciones del A° Tirapatrás, y 2 ensambles (con igual número de muestras que el primer arroyo), en 2 secciones del A° Chapetón.

Asimismo, tanto en el interior de los ensambles de hidrófitas como en el centro de cada cauce (fuera de los ensambles) se procedió al registro de variables tales como profundidad y velocidad superficial de la corriente. Muestras de agua dentro y fuera de los ensambles de hidrófitas fueron colectadas además, a los efectos de evaluar las concentraciones de sedimento en suspensión. Dentro de los ensambles de hidrófitas se colectó una segunda muestra de agua luego de agitar enérgicamente la vegetación (20 golpes fuertes de remo sobre ca. 1 m² de superficie propinados durante algunos segundos), a fin de disponer de otra medida indicativa de los sedimentos adheridos a la vegetación acuática.

Las muestras de vegetación fueron lavadas en laboratorio obteniendo fracciones separadas del sedimento adherido y de biomasa fresca (libre de sedimento). El sedimento fue separado en sus fracciones finas y gruesas (en torno a los 62,5 µm), en tanto que la biomasa fue secada en estufa a 106° hasta peso constante. El resultado final del procesamiento permitió calcular el peso de sedimento adherido cada 100 gr de vegetación seca.

Complementariamente, se instalaron trampas de sedimentos en diferentes sitios de los cauces aludidos y otros próximos (y de mayor tamaño) del área, tanto en el interior de los ensambles de hidrófitas como en puntos cercanos (Fig. 1) fuera de éstos. Las trampas, de 15 cm de altura por 9 cm de diámetro,

fueron recuperadas luego de permanecer sumergidas durante 7 meses entre Febrero y Septiembre de 2013, período que comprendió una crecida ordinaria del río en el que se mantuvo en condición de desborde durante casi un mes.

Vale consignar que el grueso de las metodologías adoptadas para cuantificar el sedimento retenido por las hidrófitas fueron ideadas en el desarrollo de este estudio por carecerse de referencias en la literatura.

RESULTADOS

1. Ocupación espacio-temporal de hidrófitas en el interior de cauces secundarios

Aun considerando que los ensambles de hidrófitas son elementos comunes en los cauces secundarios y menores del sistema fluvial del río Paraná (Fig. 2), es de destacar que todavía persiste un vacío considerable en relación a diversos aspectos de su dinámica intrínseca y de la interacción con los cauces.

A partir de mediciones sobre imágenes de satélite de alta resolución correspondientes a 10 años del presente siglo, surge que entre el 4 % y el 70 % de las márgenes de los dos arroyos estudiados estuvieron colonizadas por hidrófitas en ese lapso (Fig. 3).

Los valores más frecuentes de ocupación de la vegetación dentro de ambos cauces son contrastantes (ca. 20 % en el A° Chapetón vs. 50 % en el Tirapatrás), un hecho probablemente vinculado a las características morfo-hidráulicas o de energía de cada cauce, reflejado en la disparidad de caudales medidos y en la composición hidro-sedimentológica de sus lechos (dunas de arena vs. sedimentos finos).

Las causas del descenso en la cobertura de hidrófitas (valores de cobertura cercanos al 5%) registrado en ambos cauces en las imágenes correspondientes a Septiembre de 2011 no están aún bien establecidas. No obstante ello, es de destacar la alta tasa de recuperación de los ensambles en los meses posteriores, los cuales cubrieron 4 meses después, cerca de un 20% en ambos cauces.

La consideración conjunta de la longitud de ribera colonizada y del ancho medio de los ensambles de hidrófitas, permitió valorar la superficie ocupada por éstos dentro de los cauces secundarios (Tabla 1). En tal sentido, se advierte que entre un 37% y 54% de la superficie del A° Tirapatrás estuvo cubierta por hidrófitas en 2013 y 2009. La superficie del A° Chapetón, presentó un 6 % y 10% de su superficie cubierta en el 2013 y 2002, respectivamente. Estas superficies son, al igual que los porcentajes de ribera colonizada, sumamente variables; como ejemplo de ello, cabe mencionar que el 70% de márgenes colonizadas por hidrófitas en el A° Tirapatrás en Septiembre de 2002 (Fig. 2), corresponde a una longitud de 9290 m lo cual considerando el ancho medio de los ensambles reportado en Tabla 1, eleva la ocupación espacial de las hidrófitas dentro de este cauce, hasta un 64 % de su superficie.

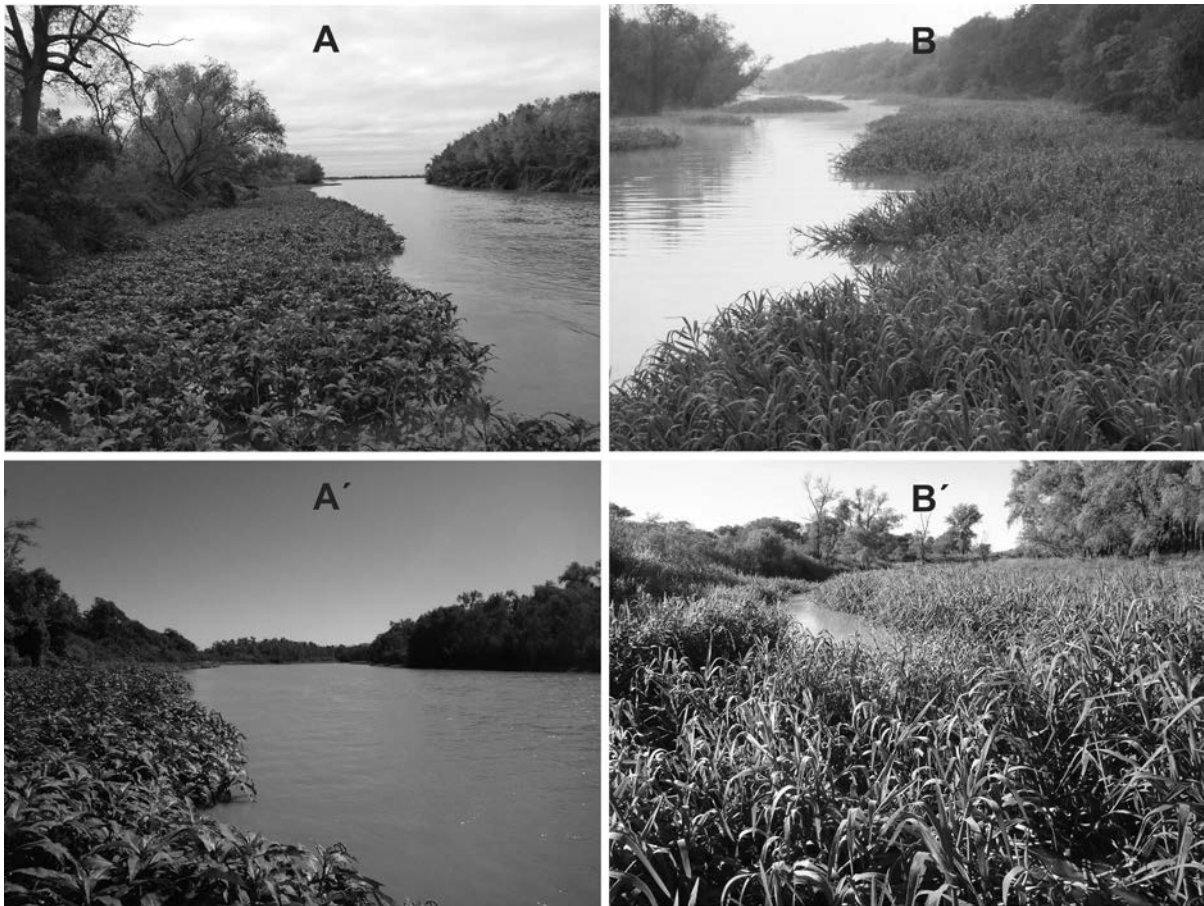


Figura 2. Ocupación espacial de hidrófitas en los arroyos Chapetón (A-A') y Tirapatrás (B-B') durante Julio de 2012 (invierno; A y B) y Febrero de 2013 (verano; A' y B').

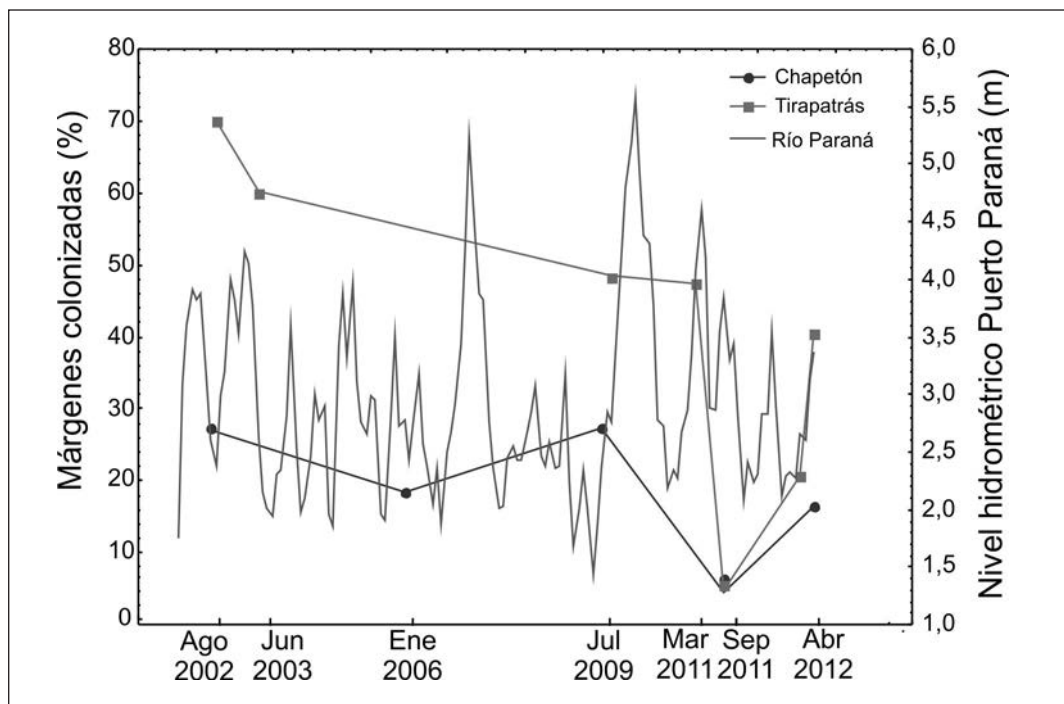


Figura 3. Porcentaje de márgenes colonizadas por hidrófitas en los arroyos Chapetón y Tirapatrás entre 2002 y 2012, y niveles hidrométricos registrados en el km 601 del río (nivel de desborde: ~ 4 m).

Tabla 1. Ocupación espacial de ensambles de hidrófitas en el interior de los arroyos Tirapatrás (TpT) y Chapetón (CH).

Ocupación espacial de hidrófitas	Cauces			
	TpT	CH	TpT	CH
	Abril de 2013		Septiembre de 2009	Agosto de 2002
Longitud de margen colonizada por hidrófitas (m)	5400	1800	6430	2980
Ancho medio de ensambles (m)	9	11	11	11
Superficie de cauces (km ²)	0,13	0,33	0,13	0,33
Superficie de ensambles (km ²)	0,048	0,019	0,070	0,032
Ocupación de hidrófitas (%)	37	6	54	10

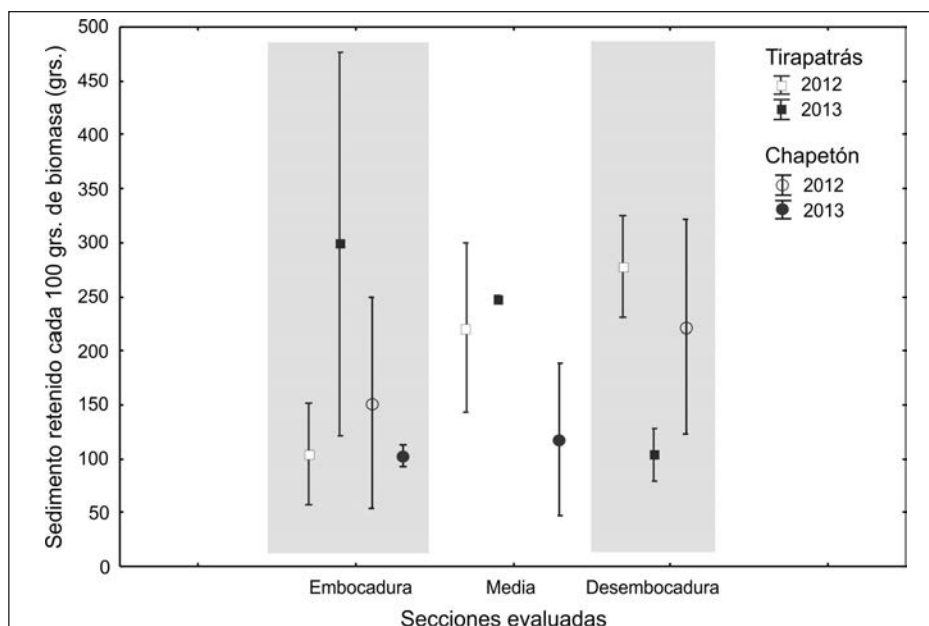
Tanto a partir de los escasos registros indicados en la Tabla 1, como de las sucesivas observaciones en el terreno, emerge que, si bien las mayores superficies ocupadas por hidrófitas se registran hacia las estaciones de crecimiento de la vegetación (primavera-verano en la región), áreas igualmente importantes permanecen cubiertas en los meses de otoño-invierno, en los que gran parte de la vegetación acuática de los ambientes leníticos de la planicie parece a causa de las bajas temperaturas. Esta permanencia de la vegetación acuática arraigada durante todo el año en el interior de los cauces secundarios indica que, sea cual fuere su efecto en la retención de sedimentos y la modificación de las condiciones hidráulicas, el mismo estaría presente durante todo el año.

2. Sedimentación asociada a los ensambles de hidrófitas

Siete especies de hidrófitas arraigadas fueron identificadas dentro de los cauces. Localmente estas especies son conocidas como canutillo (*Panicum elephantipes*, *Paspalum repens* e *Hymenachne am-*

plexicaulis), catay (*Polygonum ferrugineum*), capín (*Echinochloa crus-galli*, *E. polystachya*) y camalote (*Eichhornia azurea*). De las especies mencionadas, una de las de canutillo (*P. elephantipes*) y el catay (*P. ferrugineum*), fueron claramente dominantes formando, en la mayoría de los casos, ensambles mono-específicos. El total de muestras procesadas para tales especies mostró una capacidad similar en su potencial para la retención de sedimentos: 201 gr (± 112) y 129 gr (± 66) de sedimento retenido, por cada 100 gr de biomasa seca de *P. elephantipes* (n = 16) y *P. ferrugineum* (n = 10), respectivamente.

La Fig. 4 muestra que las hidrófitas mencionadas retienen varias veces su peso en sedimentos (entre 1 y 3 veces, en términos medios) por el atrape directo de sus estructuras anatómicas. Esta retención de sedimentos no presentó a priori un patrón homogéneo; la misma fue variable en las 2 campañas de registro así como entre los dos cauces y las secciones consideradas. A pesar de tal variabilidad, la retención fue, en términos medios, mayor hacia la desembocadura en los dos cauces durante el 2012, con una tendencia opuesta en el 2013, al menos para el A° Tirapatrás.

**Figura 4.** Valores medios y desvíos de los sedimentos adheridos a las hidrófitas en las secciones evaluadas de los arroyos Chapetón y Tirapatrás.

Los registros de campo efectuados en Febrero de 2013 evidenciaron en el A° Tirapatrás una retención media de sedimentos por m² de hidrófitas superior al doble de la registrada en el A° Chapetón (Tabla 2). Si se considera que dos meses después, el 37% y el 6% de la superficie de ambos arroyos estuvo cubierta por hidrófitas (Tabla 1), es posible estimar valores aproximados de retención de sedimentos para la superficie total de ambos cauces cubierta por hidrófitas en unas 60 Tn y 10 Tn, respectivamente, sólo en la parte más superficial de los ensambles.

Si bien se desconoce el lapso de tiempo exacto en el cual los sedimentos reportados en la Tabla 2 se adhirieron a las hidrófitas, dada la baja cobertura de éstas en ambos arroyos en Septiembre de 2011 (cerca del 4%, Fig. 3), es posible considerar la fecha mencionada, como el inicio de la retención/acumulación de sedimentos en las hidrófitas. Esto permite

asociar las cantidades de sedimentos reportados en la Tabla 2 a un período aproximado de 17 meses lo cual conduce a una tasa “especulativa” de retención de sedimentos suspendidos de, al menos, unos 0,1 mg/l y 0,005 mg/l en los niveles más superficiales de las hidrófitas en cada arroyo, asumiendo caudales más frecuentes de 10 m³/s y 50 m³/s en ellos, de acuerdo a la persistencia de niveles de aguas bajas en el lapso considerado.

La granulometría de los sedimentos adheridos a las hidrófitas fue predominantemente fina en ambos cauces (Tabla 3). Más del 90 % de los sedimentos retenidos por las hidrófitas en el A° Tirapatrás fueron limos y arcillas. En el A° Chapetón, en cambio, los sedimentos retenidos durante el 2012 mostraron entre un 14% y un 23% de arenas, en tanto que durante el 2013 tales tamaños fueron inferiores al 5 %.

Tabla 2. Superficie ocupada por los ensambles de hidrófitas dentro de los arroyos Tirapatrás (TpT) y Chapetón (CH) en 2013, y pesos real y potencial de sedimentos retenidos en la parte superficial de tales ensambles.

Hidrófitas-Sedimentos retenidos	Cauces	
	TpT	CH
Superficie de ensambles de hidrófitas (km ²)	0,048	0,019
Sedimento retenido por hidrófitas (kg/m ² ; valores medidos en niveles superficiales)	1,25	0,56
Total de sedimento potencialmente retenido (Tn)	60	10,64

Tabla 3. Fracciones mayores y menores a 62,5 µm de los sedimentos retenidos por hidrófitas en los arroyos Tirapatrás y Chapetón.

Secciones-Año / Sedimento retenido	A° Tirapatrás			A° Chapetón		
	> 62,5 µm [%]	< 62,5 µm [%]	Peso Total [gr]	> 62,5 µm [%]	< 62,5 µm [%]	Peso Total [gr]
Embocadura 2012	7	93	125	23	77	284,3
Embocadura 2013	2	98	523,6	2	98	138,4
Sección media 2012	2	98	325,8			
Sección media 2013	2	98	298,2	5	95	144,5
Embocadura 2012	3	97	366,9	14	86	478,5
Desembocadura 2013	4	96	113,9			

Parte de las trampas de sedimentos colocadas en los dos cauces analizados y otros mayores del área (sitios numerados en Fig. 1), fueron recuperadas después de 7 meses de permanecer instaladas en diferentes sitios de los cauces aludidos, con y sin ensambles de hidrófitas. A partir de las trampas recuperadas se constató que las cantidades sedimentadas colmataron la totalidad de las trampas y, en muchos

casos, superaron su altura (15 cm), acumulándose por encima de ésta varios centímetros extra. Las trampas acumularon principalmente sedimento fino, y sólo a fines comparativos puede destacarse que las cantidades de sedimento depositadas debajo de los ensambles de hidrófitas, son notablemente superiores a las retenidas por éstas en las estructuras anatómicas (tallos, hojas, raíces), al menos a nivel superficial según se indica en Tabla 2.

Tabla 4. Localización de trampas en el interior de cauces, y sedimento depositado durante 7 meses (Febrero a Septiembre de 2013, período que comprendió una crecida ordinaria del sistema con máximo en Julio).

Cauce (referencia en Fig. 1)	Contexto morfológico de instalación	Ubicación de la trampa, vegetación	Tamaño del sedimento depositado	Espesor de sedimento [mm]	Tasa de sedimentación [mm/día]
Chapetón (7)	Cercano a la margen	Intra-ensamble	Limo	790	3,8
Tirapatrás (1)	Cercano a la margen	Intra-ensamble	Limo	450	2,1
Tirapatrás (3)	Cercano a la margen	Intra-ensamble	Limo	190	0,9
Tirapatrás (2)	Cercano a la margen	Extra-Ensamble	Limo	50	0,2
Colastiné (11)	Cercano a la margen	Intra-ensamble	Limo	630	3,0
Paraná (9)	Superficie de banco central	Sauzal joven	Arena	600	2,9
Paraná (10)	Superficie de banco central	Sauzal joven	Arena limosa	710	3,4
Paraná (6)	Espira de meandro	Sauzal joven	Limo	110	0,5
Paraná (4)	Espira de meandro	Sauzal joven	Limo	90	0,4

3. Parámetros hidráulico-sedimentológicos en sitios vegetados y libres de vegetación

La velocidad de la corriente constituye el registro más contrastante entre sitios colonizados por hidrófitas y libres de éstas, llegando a tener valores nulos en el primer caso (Tablas 5 y 6). Por otro lado, como

se observa en las tablas mencionadas, las concentraciones de sedimento suspendido fueron mayores en el interior de las zonas vegetadas con relación a zonas libres de vegetación (evaluadas en el centro de los cauces), lo cual podría explicarse a partir de la progresiva incorporación de sedimentos finos desde ríos a cuerpos de agua quieta (Nemec, 1995).

Tabla 5. Valores promedio de velocidad superficial, concentración de sedimento suspendido y profundidad puntual registrados en el A° Tirapatrás dentro y fuera de las superficies vegetadas. E: embocadura, M: sección media, D: desembocadura, C: Cauce, I-E: intra-ensamble. *Registros obtenidos a 1 m de profundidad.

Variables / Secciones C		2012		2013	
		I-E (Agit.)	C	I-E (Agit.)	
Vel. (m/s)	E	0,5	0	0,6	0,02*
	M	0,5	0	0,2	0
	D	0,3	0	0,15	0,04*
Conc. (mg/l)	E	81	112 (1376)	170	159 (507)
	M	59	51 (3022)	96	120 (274)
	D	28,3	27 (1348)	79	106 (216)
Prof. (m)	E	3,6	3,2	1,3	1,5
	M	3,8	3,3	2	1,6
	D	4,4	2,6	2,8	2,7

Tabla 6. Valores promedios de velocidad superficial, concentración de sedimento suspendido y profundidad puntual registrados en el A° Chapetón dentro y fuera de las superficies ocupada por hidrófitas. E: embocadura, M: sección media, D: desembocadura, I-E: intra-ensamble. *Registros obtenidos a 1 m de profundidad.

Variables / Secciones C		2012		2013	
		I-E (Agit.)	C	I-E (Agit.)	
Vel. (m/s)	E	1	0,1*	0,7	0
	M/D	0,8	0	0,7	0,05*
Conc. (mg/l)	E	90	128 (2219)	78	151 (314)
	M/D	97	131 (1585)	74	185 (317)
Prof. (m)	E	5	4,3	3,9	2,1
	M/D	2,6	2,8	3	1,5

Las Tablas 5 y 6 contienen además, entre paréntesis, los valores promedio del sedimento desprendido de la vegetación luego de su agitación energética, expresados como concentración de sedimento suspendido. Estas cifras superan ampliamente (hasta 60 veces) las concentraciones medias en el agua sin agitar, lo que pone en evidencia que los sedimentos se adhieren paulatinamente a la vegetación en el interior de los ensambles, y se desprenderían en diferentes proporciones de acuerdo a disturbios directos de cierta magnitud (e.g. oleaje natural o provocado por embarcaciones).

En ambos casos, el sedimento desprendido de la vegetación luego de la agitación energética fue notablemente superior en el 2012 respecto del 2013.

Cabe señalar que este último fue un año en el que la carga de lavado transportada por el Paraná fue anómalamente baja en comparación a situaciones previas, de acuerdo a las relaciones de tal carga en este sistema y los aportes sólidos suministrados por el río Bermejo, y las correspondencias entre éstos con sus caudales/niveles hidrométricos (e.g., en la estación de aforos de El Colorado, Fig. 5; Alarcón et al., 2003; Amsler & Drago, 2009; Brea y Spalletti, 2010).

De todo lo anterior se desprende que la capacidad de retención de sedimentos de las hidrófitas estaría en estrecha relación con la dinámica de crecimiento de sus ensambles en el interior de los cauces, la magnitud de disturbios que puedan liberar sedimento ya retenido, así como también con la oferta anual de sedimentos del sistema del Paraná.

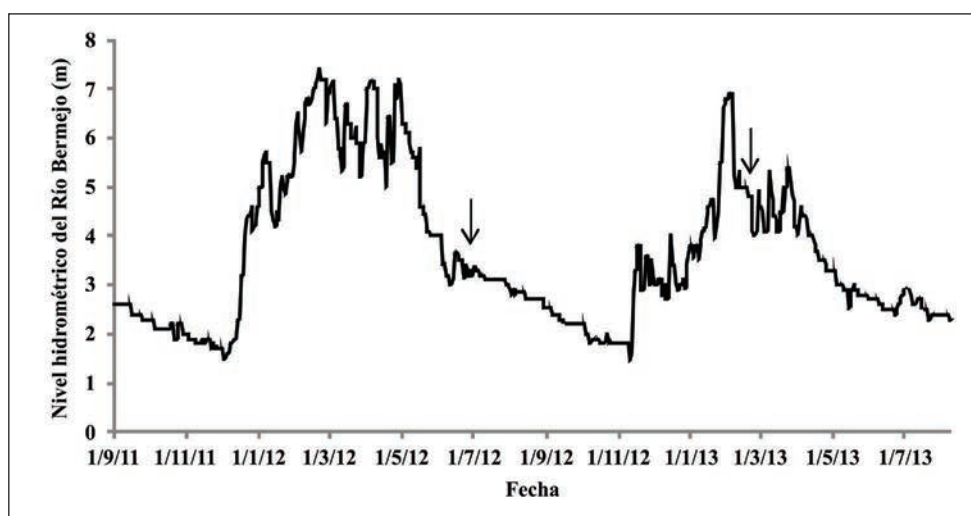


Figura 5. Niveles hidrométricos del río Bermejo registrados en la estación El Colorado (Prov. de Formosa), durante los años hidrológicos 2011-2012 y 2012-2013 (Fuente: Unidad Provincial Coordinadora del Agua, Gobierno de Formosa). Varios autores han demostrado la ajustada correspondencia entre niveles hidrométricos y concentraciones de sedimentos finos en el Bermejo, siendo el 2013 un año de exiguos aportes de carga de lavado. Las flechas señalan las fechas de las campañas de registro presentadas en este trabajo.

CONCLUSIONES

Estos primeros resultados aportan nueva información respecto del rol de la vegetación acuática en la dinámica de cauces secundarios del sistema del Río Paraná. Permiten justipreciar cuantitativamente el rol de las hidrófitas arraigadas en la retención de sedimentos, proceso que se manifestaría básicamente, en dos aspectos complementarios: las hidrófitas no sólo modificarían las condiciones hidráulicas en el interior de sus ensambles favoreciendo la sedimentación del material no adherido, sino que también retienen importantes cantidades de sedimento directamente en sus estructuras anatómicas. Al desprenderse este material adherido (por el oleaje, por ejemplo), permanecerá en un ambiente donde las condiciones hidráulicas, favorecerán su sedimentación.

Finalmente, resta enfatizar que mientras la sedimentación de materiales finos en el sistema fluvial del Paraná ha sido usualmente asociada a fenómenos

de desborde, la presente contribución cuantifica la sedimentación ocurrida en estados hidrométricos de aguas encauzadas, los cuales son los más frecuentes en el sistema fluvial.

Este trabajo representa una primera aproximación a la temática, por lo cual un mayor número de registros será necesario para comprender, en forma interdisciplinar y sistémica, el complejo proceso de sedimentación en el interior de cauces activos y el rol que las hidrófitas tienen en el mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. I. Cristina, del Centro de Informaciones Meteorológicas de la Universidad Nacional del Litoral (CIM – UNL), la información hidrométrica suministrada en diferentes etapas de este estudio. Esta contribución fue realizada con subsi-

dios de las Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNL (proyectos CAI+D "Origen y características de cauces secundarios del río Paraná. Hacia una comprensión interdisciplinar del patrón de múltiples cauces en grandes sistemas aluviales" y CAI+D Orientado "Identificación a mediano plazo de situaciones de compromiso para el escurrimiento fluvial en cruces viales del sistema del río Paraná").

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, J.J., R. Szupiany, M. D. Montagnini, H. Gaudin, H. H. Prendes y M. L. Amsler. 2003. Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná. *Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Ezeiza, Argentina. (En CD ROM).
- Amsler, M. L., y H. H. Prendes. 2000. Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados. En: *El Río Paraná en su tramo medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* (C. Paoli y M. Schreider, Eds.), Tomo 1: 233-306. Centro de Publicaciones de la Univ. Nac. del Litoral. Santa Fe.
- Amsler, M. L., E. C. Drago & A. R. Paira. 2007. Fluvial sediments: main channel and floodplain interrelationships. In: *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. (M.H. Iriondo, J.C. Paggi and M.J. Parma Eds.), Springer-Verlag, Chapter 5: 113-142. Berlín.
- Amsler, M. L. & E. C. Drago. 2009. A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers. *Hydrological Processes*, 22 (23): 3230–3235.
- Brea, J.D. y P. Spalletti. 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. COBINABE, Buenos Aires, 230 pp.
- Drago, E.C. 2007. The physical dynamics of the river-lake floodplain system. In: *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. (M.H. Iriondo, J.C. Paggi and M.J. Parma Eds.). Springer-Verlag, Chapter 4. pp 83-119. Berlín.
- Lallana, V.H. 1980. Productividad de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. en una laguna isleña cuenca del río Paraná Medio. II. Biomasa y dinámica de la población. *Ecología (Argentina)* 5:1–16.
- Lallana, V.H. 1981. Productividad de *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) en una laguna isleña de la cuenca del río Paraná medio. I. Análisis del crecimiento. *Bol Soc Arg Bot* 20:99–107.
- Latrubesse, E.M. 2008. Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustment of mega rivers", *Geomorphology*, 101:130–145.
- Neiff, J.J. 1975. Fluctuaciones anuales en la composición fitocenótica y biomasa de la hidrofitia en lagunas isleñas del Paraná medio. *Ecosur* 2(4):153–183.
- Neiff, J.J. (1979). Fluctuaciones de la vegetación acuática en ambientes del valle de inundación del Paraná medio. *Physis (Buenos Aires)* B 38:41–53.
- Nemec, W. 1995. The dynamics of deltaic suspension plumes. In: *Geology of Deltas*. M.N. OTI & G. Postma. Balkea, Rotterdam. 315 pp.
- Prendes, H. H., J. Huespe y S. Mangini. 2009. El mantenimiento del acceso fluvial al puerto de Barranqueras. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, CD de Trabajos. Salta, 2009.
- Ramonell, C. G., R. N. Szupiany, E. M. Latrubesse, M. García, M. S. Pereira, M. G. Gallego, Z. Y. Marchetti, E. D. Cafaro, A. R. Paira, F. Latosinski, A. C. Bosisio y G. Torres. 2011. Procesos de formación del río Paraná Medio. Nuevos paradigmas para su estudio. Quinto Simp. Reg. sobre Hidráulica de Ríos, CD de Trabajos. Santiago del Estero.
- Ramonell, C.G., Z. Y. Marchetti y M. S. Pereira. 2012. Albardones de intracauce: geoformas conspicuas de la planicie aluvial del Río Paraná. V Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Acta de Resúmenes: 126-127. Río Cuarto, Córdoba.
- Sabattini, R.A. & V. H. Lallana. 2007. Aquatic Macrophytes. In: *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. (M.H. Iriondo, J.C. Paggi and M.J. Parma Eds.). Springer-Verlag, Chapter 8. pp 205-226. Berlín.
- Sabattini, R.A. (1985). Dinámica y productividad de *Paspalum repens* ("canutillo") en un ambiente lenítico del valle aluvial del río Paraná. *Rev Hydrobiol Trop* 18(1):3–11.
- Sabattini, R.A., V.H. Lallana y M. C. Marta. 1983. Inventario y biomasa de plantas acuáticas en un tramo del valle aluvial del río Paraná Medio. *Rev Asoc Cienc Nat Litoral* 14(2):179–191.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TÉCNICA DE VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN RÍOS SERRANOS

EXPERIMENTAL EVALUATION OF LARGE SCALE PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY TECHNIQUE FOR FLOW DISCHARGE MEASUREMENTS IN MOUNTAINS RIVERS

Antoine Patalano¹, C. Marcelo García¹⁻³, Nicolás Guillén¹, Cesar García²⁻³,
Érica Díaz¹⁻³, Andrés Rodríguez¹⁻³ y Andrés Ravelo³⁻⁴

RESUMEN

Este trabajo presenta una evaluación experimental de una técnica de cuantificación de caudales de aguas superficiales en ríos serranos de la provincia de Córdoba. Los ríos serranos de la provincia de Córdoba se caracterizan por su alta variabilidad temporal definida por la ocurrencia de crecientes repentinas o torrenciales de corta duración y gran velocidad de la corriente (en épocas de lluvias) y por la presencia de periodos extensos de estiaje (período de aguas bajas) con caudales del orden de unos cientos de litros por segundo lo que dificulta la selección de una técnica experimental óptima para todas las condiciones de flujo presentes durante un año. En este trabajo se presenta como alternativa una técnica remota para estimar el caudal escurrido en un curso fluvial en el ámbito serrano implementando a gran escala la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (de sus siglas en inglés LS PTV) la cual puede ser aplicada eficientemente en periodos de aguas bajas y medias con un bajo costo relativo. El campo de velocidad superficial determinado experimentalmente con LS PTV en un curso fluvial sembrado con partículas o trazadores y la batimetría de la sección transversal conocida permiten realizar estimaciones del caudal escurrido. La metodología experimental propuesta es validada con resultados obtenidos utilizando simultáneamente otras técnicas en el río San Antonio en la región serrana de la provincia de Córdoba, en dos secciones diferentes, Cuesta Blanca y Villa Carlos Paz, en condiciones de aguas bajas y medias, respectivamente. Finalmente, se discuten las posibles fuentes de errores involucradas en la implementación de la metodología experimental presentada.

Palabras claves: Métodos experimentales, Medición de caudales, LS PTV.

ABSTRACT

This paper presents a validation of an experimental technique for surface water flows discharge measurements in mountain rivers of the of Córdoba province. The mountain rivers of the Córdoba province are characterized by high temporal variability defined by the occurrence of flash floods with very high volumes of fast flows (during the rainy season) and the presence of extended periods of low water conditions with flow rates of the order of a few hundred liters per second which makes difficult the selection of an optimal experimental technique for flow discharge measurement for the different flow conditions present during the year. This paper presents an alternative remote experimental technique, estimating flow discharges in rivers of mountain areas, based on large scale particle tracking velocimetry technique (LS PTV) which can be applied efficiently in periods of low and medium flow conditions with relatively low cost. The surface flow velocity field sampled using LS PTV in a fluvial reach seeded with tracer particles and the cross section bathymetry allow flow discharge estimation. The proposed experimental technique is validated with results obtained using other experimental techniques simultaneously in the San Antonio river in the mountainous region of the of Córdoba province, Argentina, at two different locations (Cuesta Blanca and Villa Carlos Paz). Finally, a discussion is performed on sources of error involved in the implementation of the LS PTV.

Keywords: Experimental Method, Flow discharge measurements, LS PTV.

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina, email: antoine.patalano@gmail.com

² Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (EHCPA), Universidad Católica de Córdoba, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

⁴ Centro de Relevamiento y Evaluación Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable del recurso hídrico superficial requiere una cuantificación precisa de la disponibilidad del mismo para que los planes de gestión de ese recurso sean eficientes. La magnitud que cuantifica la disponibilidad del agua superficial en cursos fluviales para su uso como provisión de agua potable, riego o generación de energía hidroeléctrica es el caudal. Los modelos numéricos continuos de simulación hidrológica son herramientas muy útiles para la predicción y pronóstico de caudales escurridos, pero su calibración y validación requiere determinaciones experimentales precisas de caudales escurridos superficialmente tanto en épocas de aguas altas (crecidas) como de aguas bajas (estiaje).

En este trabajo se evalúa experimentalmente una técnica específica de cuantificación de aguas superficiales en ríos serranos de la provincia de Córdoba, que escurren en una región perteneciente a las zonas áridas y semiáridas de la República de Argentina. La técnica evaluada se basa en la implementación a gran escala (LS) de una técnica no intrusiva de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) que permitiría a priori obtener descripciones de los campos superficiales de flujo en cursos fluviales durante periodos de aguas bajas y altas. La técnica de PTV (también conocida como Velocimetría lagrangiana por imágenes de partículas) consiste en obtener (desde una de las márgenes o desde un puente) imágenes digitales de la posición de trazadores previamente “sembrados” en el agua a intervalos constantes de tiempo. En base a dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido, se identifican (mediante el uso de programas computacionales específicos) las posiciones de los trazadores en cada imagen. En los casos en que se cuenta con una ubicación oblicua de la cámara digital en relación al plano superficial de movimiento de las partículas (situación habitual en la implementación a gran escala)

es necesario rectificar las coordenadas de los trazadores. Finalmente, se calcula el desplazamiento de los trazadores en dos imágenes sucesivas, el cual dividido el tiempo de exposición entre las imágenes permite obtener el vector de velocidad superficial del flujo para cada trazador. Para validar esta técnica, en este trabajo, los resultados obtenidos con LS PTV se los compara con resultados de aforos realizados con instrumental convencional (molinete) y con Perfiladores de corriente acústicos Doppler –ADCP, disponible desde hace pocos años para su implementación en aguas poco profundas.

SITIOS DE MEDICIÓN, INSTRUMENTAL Y METODOLOGÍA

Los sitios de medición evaluados en este trabajo constituyen dos tramos de un curso fluvial emplazado en la cuenca alta del Río Suquía (Primero) en la zona serrana de provincia de Córdoba en Argentina. El primer sitio de medición (Figura 1) está emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca (aguas arriba y al sur de la ciudad de Villa Carlos Paz) lo que permite cuantificar el flujo superficial aguas abajo de la toma de agua de la ciudad de Villa Carlos Paz y localidades vecinas. Al momento de realizar el trabajo experimental, la sección de este tramo donde se realizaron las mediciones tenía un ancho aproximado de 6 m y una profundidad máxima aproximada de 0.6m. El segundo tramo (Figura 2) se encuentra en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz. La sección del tramo donde se realizaron las mediciones tenía al momento de la medición un ancho aproximado de 12 m y una profundidad máxima aproximada de 1.0m. Las condiciones analizadas en ambas secciones corresponden a periodos de aguas bajas y medias, respectivamente. Trabajos experimentales en desarrollo prevén la realización de trabajos de campo en periodos de crecidas.



Figura 1. Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.



Figura 2. Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz.

Para ambos casos, se realizó primero una cuantificación del caudal superficial (aforo) por método de vadeo (sección media) con un molinete a eje vertical (Modelo 6215 USGS Tipo AA-MH Tipo AA). Además se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP RiverSurveyor S5 YSI/Sontek. Este último está equipado con un GPS que permite obtener en forma alternativa la posición del perfilador en cada instante del recorrido con una resolución del orden del 0.01m. Además, este perfilador cuenta con un dispositivo denominado “SmartPulse”, el cual en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad (en las tres dimensiones), lo que permite capturar perfiles de velocidad de flujo con una frecuencia de 1 Hz y tamaños de celda pequeños de hasta 0.02m. Con el ADCP instalado sobre una plataforma móvil (Figura 3), se realizaron

números pares de transectas o cruces (de ida y vuelta para evitar efectos direccionales) muestreando el campo de flujo y la batimetría de la sección evaluada de manera de completar un tiempo total de medición superior a los 12 minutos (Tarrab et al. 2012) con el fin de minimizar la incertidumbre asociada a la determinación experimental de caudales de flujo. Para estimar la velocidad en las regiones no medidas del flujo, en la parte superior (debido a la sumergencia del instrumento) e inferior (para evitar interferencias del fondo en el pulso acústico) se ajustó una ley potencial de velocidades sobre todo el perfil de velocidades (exponente = $1/6$). Las velocidades no medidas en la margen derecha e izquierda (zonas de menor profundidad) se estimaron utilizando el método recomendado para cursos con márgenes con pendiente. El valor del caudal determinado con esta tecnología consiste en el promedio de los caudales cuantificados en todas las transectas realizadas en cada sección.



Figura 3. Medición con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.

En relación a las mediciones con la técnica LS PTV se utilizaron dos trazadores diferentes para caracterizar el campo de velocidad superficial en el primer tramo seleccionado del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca (Figura 1) con el fin de evaluar la sensibilidad de los resultados a la selección del trazador óptimo. Uno de los trazadores seleccionados son elementos formados por dos tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm logrando cierto peso de forma tal que la acción del viento no modifique su velocidad,

manteniendo la flotabilidad y constituyendo partículas simétricas respecto de sus dos caras (Figura 4). Los motivos de la elección son fundamentalmente su visibilidad y bajo costo. Se ensayó además una alternativa que consiste en el uso de naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas) como trazadores naturales. En la sección de medición en el segundo tramo del río en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz, se utilizaron solamente naranjas a partir de los buenos resultados obtenidos en el primer tramo de Cuesta Blanca.

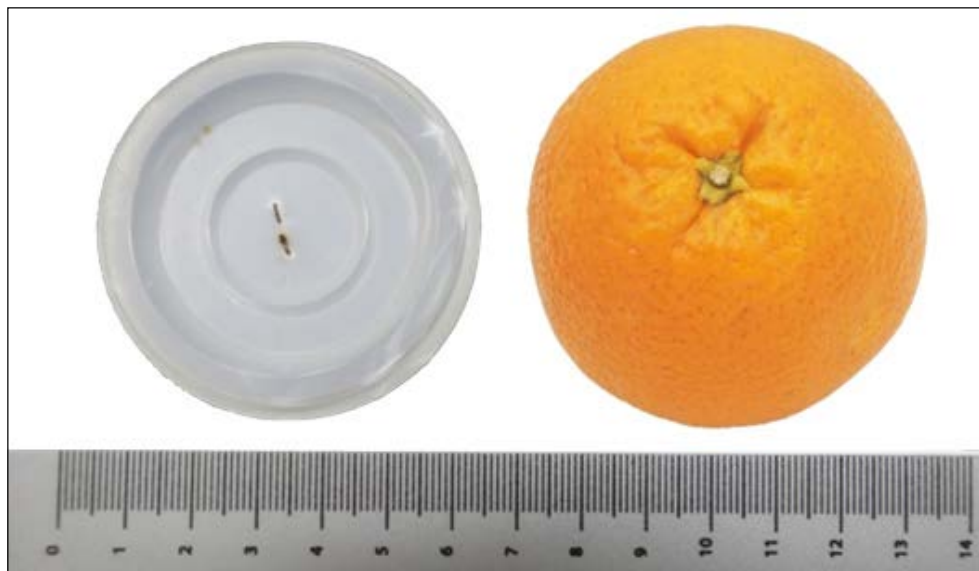


Figura 4. Trazadores utilizados para caracterizar el campo de velocidad superficial en el tramo seleccionado del primer sitio en la sección de estudio en el río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.

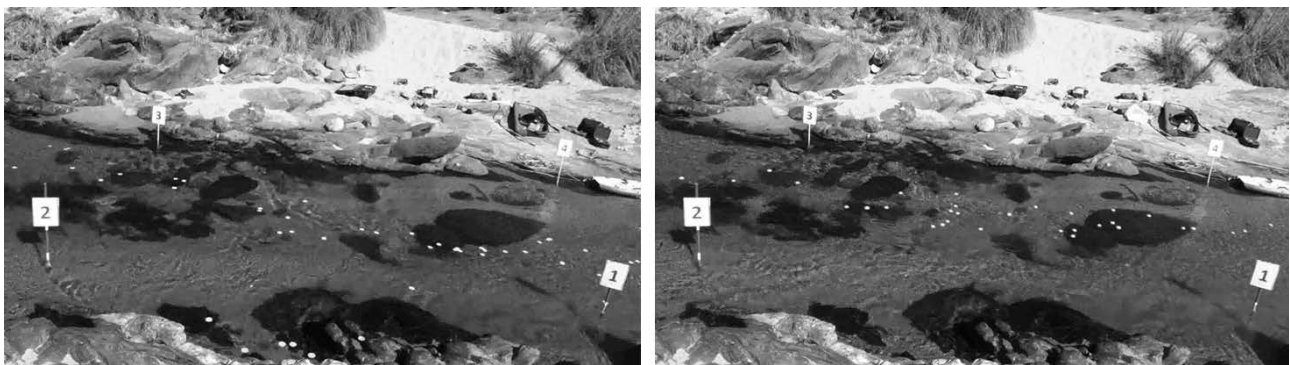


Figura 5. Flujo sembrado con dos trazadores diferentes en el tramo seleccionado del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca. Izquierda: tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm. Derecha: naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas).

La cámara de fotografía digital utilizada en la primera sección de medición fue una Sony RX-100, que registra videos con una resolución de 1444x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En la implementación de LS PTV en la sección del río emplazada en el ejido urbano de Villa Carlos Paz se utilizó una cámara digital (Sony WX300) montada sobre un trípode que permite enfocar todo el ancho del río. La cámara

digital registra un video de alta definición con una resolución de 1920 x 1080 pixeles a una frecuencia de 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En ambos tramos, la cámara digital fue ubicada sobre una de las márgenes de manera tal que la zona capturada incluya la región donde se realizaron las mediciones con ADCP y molinete. En las imágenes capturadas la zona de interés se muestra en perspectiva por lo que se ve distorsionada

debido a que la cámara se colocó oblicuamente al plano de la superficie libre (ver por ejemplo Figura 5 para la primera sección de medición). Por ello, los resultados obtenidos con PTV se corrigieron para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal (Patalano et al. 2013b). Para cada medición se registró un video de 60s de duración a 30 imágenes por segundos. La secuencia metodológica desarrollada en la implementación de PTV se detalla a continuación:

a) Pre-procesamiento de imagen que consiste a transformar las imágenes en escala de gris, sustraer de las imágenes el “fondo” (todo lo que no sea partículas) y detectar cada una de las partículas: el “fondo” de las imágenes se obtiene calculando el promedio de toda la serie de imágenes. Según las partículas usadas, diferentes filtros son utilizados sobre las imágenes de tal manera que las partículas sean blancas con una distribución gaussiana a partir del centroide de ellas hacia fuera. Cuando se resta el fondo de cada imagen individualmente se quedan las partículas blancas sobre un fondo negro.

b) Procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio con por Correlación Cruzada (Brevis et al. 2011);

c) Post-Procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]. Todo el proceso de LS PTV ha sido realizado con el programa libre *PTVlab* y su interface gráfica de usuario desarrollada por el grupo de trabajo (Patalano et al. 2013a). En la Figura 6 se presenta un ejemplo de rectificación digital realizada a partir de 4 puntos de control que vinculan las coordenadas del Mundo Real y las de la fotografía.

Los puntos de control seleccionados para rectificar las imágenes digitales en la implementación de la técnica PTV sobre el río San Antonio en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz fueron materializados a través de un marco de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 0.0127m de diámetro (Figura 7). El marco se retira de la imagen unos segundos después de iniciar el registro del video.

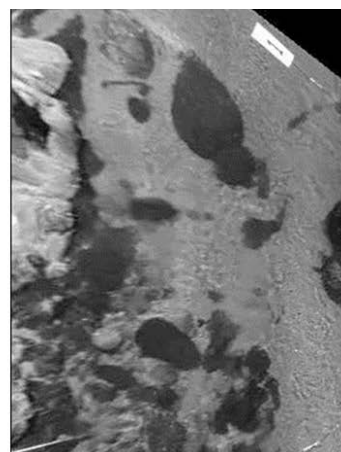


Figura 6. Ejemplo de rectificación digital de la zona de interés del río San Antonio al primer tramo: A la izquierda imagen original de la zona de interés con los 4 puntos de control, a la derecha la misma imagen rectificada en un plan ortogonal. Para disminuir el costo computacional, en el post-procesamiento, una imagen única es rectificada para poder graficar encima los resultados rectificados.



Figura 7. Marco de tamaño de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 0.0127m de diámetro, utilizado para la rectificación digital de imágenes registradas en la sección de medición emplazada en el Río San Antonio, en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz.

RESULTADOS

La técnica de velocimetría LS PTV presenta una ventaja sobre el resto de las técnicas experimentales utilizadas en este trabajo ya que la implementación de la técnica PTV a gran escala (LS PTV) provee el campo de velocidad superficial media en la región cubierta por el sensor de la cámara. Para obtener

ese campo de velocidad media, los campos instantáneos de velocidades de las partículas son interpolados sobre un grilla común y promediados en el tiempo. La Figura 8 muestra los campos de medios de velocidades de flujo rectificados en los dos tramos estudiados del río San Antonio.

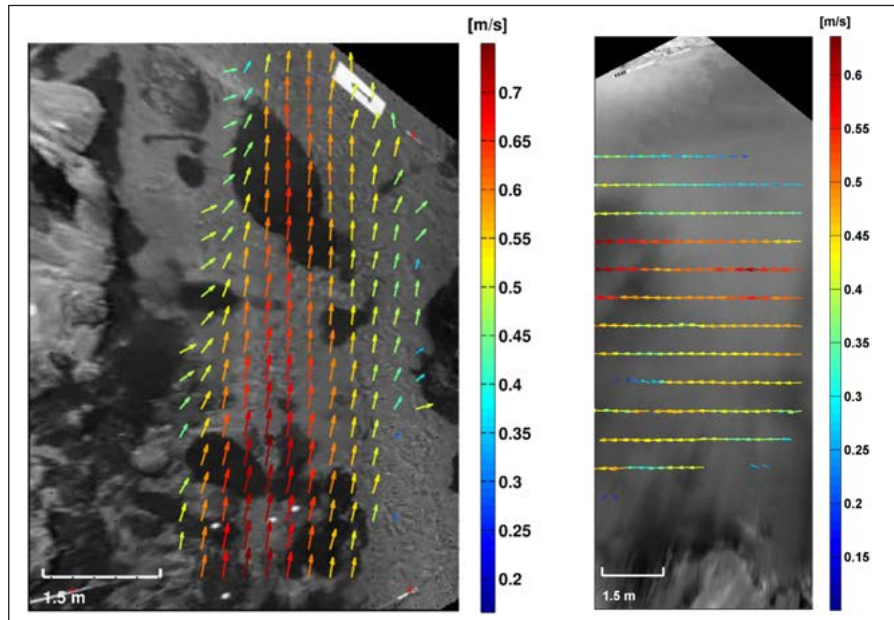


Figura 8. Campos de velocidades medias de flujo interpolados [m/s] y rectificados del río San Antonio en Cuesta Blanca (izquierda) y en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz (derecha).

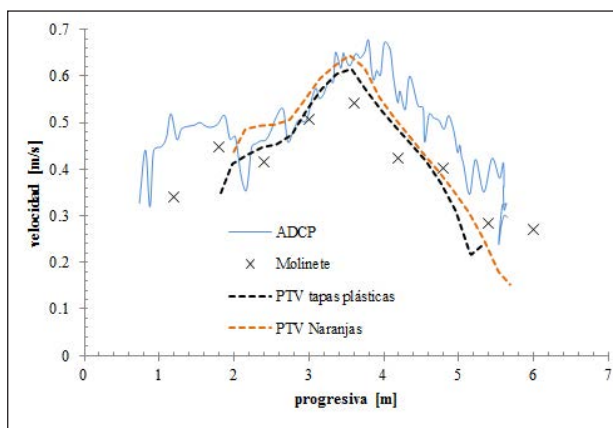


Figura 9. Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en el sección relevada en el río San Antonio en Cuesta Blanca.

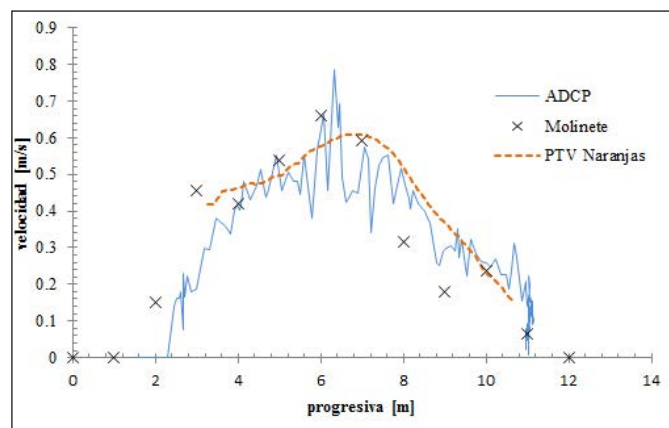


Figura 10. Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en el sección relevada en el río San Antonio en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz.

A partir de la información de los campos medios de velocidades de flujo obtenidos con PTV, se extrajeron los valores correspondientes a los perfiles trasversales de velocidades superficiales donde se implementaron las otras técnicas de medición (molinete y ADCP). Las Figuras 9 y 10 muestran los perfiles transversales de velocidad superficial de flujo registrados en las dos secciones del río San Anto-

nio con las distintas técnicas. Los valores de ADCP incluidos en estas Figuras corresponden a valores registrados en las celdas más cercanas a la superficie libre (0.15m desde esta superficie) mientras que las mediciones con molinete corresponden a valores de velocidad superficial (con molinete sumergido) específicamente registrados para este trabajo. Los perfiles relevados muestran una buena correspon-

dencia entre los valores observados. En la Figura 9, se observa un buen acuerdo entre los perfiles de velocidad superficial determinados con LS PTV utilizando diferentes partículas trazadoras (para la sección del río San Antonio en Cuesta Blanca) y las pequeñas diferencias observadas podrían explicarse por los efectos sobre las partículas plásticas de la fricción superficial del viento presente el día de las mediciones en sentido contrario a la dirección del flujo medio.

Finalmente se realiza el contraste de los caudales medios de flujo estimados por las distintas técnicas de medición (Tabla 1). Para ambas secciones relevadas del río San Antonio, se adopta como valor de referencia al caudal medido con ADCP. La incertidumbre asociada a la determinación de caudal con ADCP depende de configuración de registro adoptado, del ruido electrónico y el ruido ambiental presente durante las mediciones (Tarrab et al, 2012). Durante la medición reportada en este resumen, el caudal medido por el ADCP en el primer tramo fue $0.94 \pm 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal estimado a partir de las mediciones con molinete ($0.97 \text{ m}^3/\text{s}$) presenta una diferencia de (-3%) relativa al ADCP siendo estadísticamente similares. De la misma forma, en el segundo tramo el caudal medido con ADCP fue $3.03 \pm 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ para la sección relevada en el segundo tramo y presenta una diferencia de (-7%) con el valor estimado a partir de las mediciones con molinete.

La estimación de caudales a partir de los campos superficiales de velocidad del flujo determinados con LS PTV a gran escala de manera no intrusiva requiere definir la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales. Esta relación depende de la geometría del fondo, de la rugosidad, de las corrientes secundarias y del efecto del viento. (Cheng et al. 2004) realizaron una estimación de este coeficiente utilizando ADCP para las mediciones de velocidad de flujo en la columna de agua y velocimetría por radar para evaluar las velocidades de flujo superficiales. Estos autores sugieren que es factible usar las velocidades superficiales como índice para determinar caudales de flujo ya que el valor de α cae siempre en el mismo rango del valor teórico ($\alpha \approx 0.85$) calculado empíricamente (Plant et al. 2005).

En la Tabla 1 se muestran los valores de los caudales medidos con las diferentes técnicas presentadas en este trabajo y para cada uno de los casos visto. Los caudales evaluados con LS PTV han sido calculados integrando el producto de las velocidades superficiales ajustadas con el factor α y por el área de escurrimiento obtenida durante las mediciones con el molinete. Con el factor teórico, el error relativo entre los caudales medidos con ADCP y con LS PTV es de 12% y 13% respectivamente para las secciones relevadas y 14% y 20% respectivamente con el molinete. Usando el factor los errores

relativos entre los caudales medidos con los dos instrumentos (ADCP y molinete) y con LS PTV son significativamente menores: 3% y 2% (relativo a ADCP) respectivamente y 0% y 6% (relativo a molinete) respectivamente.

Tabla 1: Resumen de los caudales medidos para los casos diferentes.

Sección de estudio	Q_{ADCP} [m ³ /s]	Q_{molinete} [m ³ /s]	$Q_{\text{PTV(naranjas)}}$ [m ³ /s]		$Q_{\text{PTV(tapas)}}$ [m ³ /s]	
San Antonio (Cuesta Blanca)	0.94	0.97	$\alpha=0.85$	0.83	$\alpha=0.85$	0.80
			$\alpha=1$	0.97	$\alpha=1$	0.93
San Antonio (Carlos Paz)	3.03	3.27	$\alpha=0.85$	2.63	-	-
			$\alpha=1$	3.09	-	-

A continuación se sintetizan algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LS PTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales:

- Factores ambientales: En la implementación de LS PTV a gran escala estas fuentes de errores son relevantes. El tipo de iluminación (la reflexión de la luz del Sol sobre la superficie del agua puede perturbar los algoritmos de detección de partículas) y el viento (influye directamente la velocidad de las partículas) son dos de los fenómenos físicos del medio ambiente que influyen en forma más notoria en las mediciones.
- La siembra de las partículas: como se muestra en la Figura 8, no se pudo caracterizar las velocidades a las orillas de los ríos ya que las partículas sembradas agua arriba del tramo de medición tienden a entrar en las zonas de mayores velocidades y salir de las zonas de estancamiento o menores velocidades.
- Técnica de procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio.
- El post-procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]: La calidad de la rectificación depende esencialmente del método (marco flotante o puntos fijos) y del usuario que determina las distancias entre los puntos de control en la realidad y luego sobre las imágenes.
- El valor del factor α que depende de cada sección medida. El valor del coeficiente que relaciona la velocidad superficial y la velocidad media es función de la geometría de la sección, de la pendiente del tramo, de la rugosidad del fondo, de la configuración aguas arriba y aguas abajo del tramo. El valor adoptado por defecto es 0.85 pero según los resultados, el valor real del factor para ambos tramos es mayor (entre 0.96 y 0.98 respectivamente).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una evaluación experimental de una técnica de cuantificación de caudales de aguas superficiales en dos tramos de un río serrano de la provincia de Córdoba. La técnica evaluada consiste en la implementación a gran escala de la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (LS PTV por sus siglas en inglés). Si bien las condiciones analizadas en este trabajo corresponden a periodos de aguas bajas y medias, esta técnica puede ser aplicada eficientemente en periodos de crecidas con un bajo costo. La técnica no intrusiva LS PTV constituye una alternativa satisfactoria (con costos relativos significativamente menores) para la determinación experimental de caudales escurridos superficialmente en los ríos con características físicas y geométricas similares, a condición de conocer la batimetría de la sección aforada. En este trabajo se sintetizaron algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LS PTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales en ríos serranos. Estudios relacionados específicamente a cada uno de estos errores representan un área de vacancia. Estudios posteriores además incluyen relevamientos experimentales en cursos fluviales con similares características para realizar una estimación más precisa de la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales para ríos serranos de la provincia de Córdoba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brevis, W., Niño, Y. & Jirka, G.H., 2011. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*, pp.135–147.
- Cheng, R. T., Gartner, J. W., Mason, R. R., Costa, J. E., Plant, W. J., Spicer, K. R., Haeni, F. P., Melcher, N. B., Keller, W. C., and Hayes, K. (2004). Evaluating a Radar-Based , Non Contact Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis , California. Menlo Park, California, 24.
- Patalano, A., Brevis, W., García, C.M., et al., 2013. PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas. Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., Brevis, W., Guillén, N.F., et al., 2013. Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando Velocimetría por imágenes de partículas. Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Plant, W.J. et al., 2005. Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(8), pp.657–664.
- Tarrab, L. et al., 2012. Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements. *Water Resources Research*, 48(6), p.W06507

ESTUDIO DE EROSIÓN LOCAL EN GRUPOS DE PILAS CUADRADAS

STUDY OF LOCAL SCOUR AT SQUARE PIERS GROUP

Martín Puricelli¹, Pablo Spalletti² y Agnes Paterson¹

Resumen

Con el objeto de realizar experiencias relativas a la erosión local en grupo de pilas, para los casos menos estudiados pero de aplicación práctica, se trabajó con dos pilas de sección cuadrada. Se realizaron ensayos a fondo móvil en un canal de 2 metros de ancho en condiciones de agua clara, sin transporte de sedimento aguas arriba de estas estructuras para evitar las complejidades propias de las formas de fondo. Se exploraron una variedad de condiciones experimentales con diferentes tirantes (entre 30 y 50 cm), espaciamiento entre pilas y la configuración de las mismas. Las pilas tienen 20 cm de lado. En un caso, ambas pilas están alineadas a la corriente y en el segundo caso que denominamos al tresbolillo, las pilas están desplazadas lateralmente una respecto de la otra. En este trabajo se analizan las erosiones máximas medidas, el campo de velocidades alrededor de las pilas y el relevamiento batimétrico del lecho del canal. Las erosiones máximas medidas se compararon con diferentes fórmulas de predicción. Se estudió la evolución temporal de la erosión comparándola con ensayos similares de larga duración pero con una única pila, analizándose también el ajuste de formulaciones predictivas del avance de la socavación en el tiempo.

En todos los casos se observó una dependencia de la erosión máxima respecto de la separación entre pilas para los grupos de pilas alineadas. Esta erosión es sobreestimada con la fórmula del HEC-18 para la geometría en tresbolillo. Estos efectos de conjunto para las pilas alineadas se manifiestan desde los primeros minutos de las experiencias. Para la geometría en tresbolillo se observó un cambio en la curvatura de la evolución temporal de la erosión que se puede asociar justamente a estos efectos de conjunto.

Palabras Claves: Pilas cuadradas, sedimento granular, Grupos de pilas, Erosión, Evolución, Velocidades.

Abstract

The task in this investigation was to perform experiences concerning local scour development around two square piers related with those less studied cases and with practical appliances. The experiments are carried out under clear-water conditions in a two meters wide and thirty meters long channel. A variety of conditions including different flow depths, pier spacing and pier spatial configurations are considered to have significant influence on the development of the scour hole. In one configuration, both piers are aligned with the flow and in the second one, call staggered, piers are laterally displaced relative to one another.

Experimental measurements of the maximum depth and the morphology of the bed channel are performed. The maximum scour measured is compared with the prediction of different formulas. The temporal evolution of erosion at a characteristic point is compare to similar long-term tests with a single pier. In all cases a dependency of the maximum scour on the separation between the piers were observed in the aligned configuration. This erosion is overestimated with HEC-18 formula for the staggered geometry. Data show that group effects are manifested since the first minutes of the experiences in the aligned configuration. For the staggered geometry, a change was observed in the curvature of the temporal evolution of scour that can be associated to group effects.

Key Word: Square Piles, Granular sediment, Piers group, Scour, Evolution, Velocity.

INTRODUCCIÓN

La erosión local en las estructuras de los puentes es una de las causas principales del colapso de los mismos (Qiping, 2005). Los fenómenos que gobiernan estos procesos de erosión local son conceptualmente conocidos pero aún son necesarios estudios cuantitativos debido a la complejidad de las mutuas interacciones entre fluido, estructura y sedimento.

Si bien en la bibliografía pueden encontrarse una cantidad considerable de estudios de socavación local en estructuras (Breusers, 1991), no hay un criterio único para la estimación de la evolución temporal de los procesos y de las erosiones máximas (Melville, 1999). Los distintos autores sugieren una cantidad numerosa e incluso excesiva de ecuaciones de pre-

¹ Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires (UBA). Argentina
Au. Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery Km 1,620 Teléfono: (54 11) 4480-4500 int. 2353 / 2338
E-mail: martinpuricellivil@gmail.com

² Laboratorio de Hidráulica. Programa de Hidráulica Fluvial – Instituto Nacional del Agua (INA). Argentina

dicción de la socavación en estructuras interpuestas en corrientes de agua (Melville, 2000).

Los estudios para grupos de pilas, que en su mayoría están basados en experiencias con eventuales efectos de escala, han sido desarrollados con elementos de sección circular, privilegiando la alineación y simetría del conjunto (Coleman, 2005).

En las aplicaciones prácticas, la propia complejidad del fenómeno se suma a las incertidumbres relativas a las características de la crecida, a los procesos constructivos del puente y al material del lecho que son propias de cada río y cada cruce.

Con el objeto de realizar experiencias que constituyan un avance en el conocimiento en casos de aplicación práctica pero que han sido poco estudiados, se trabajó con dos pilas de sección cuadrada con diferentes configuraciones espaciales. Esta tipología suele ser empleada en obras de menor envergadura que no ameritan estudios físicos. Por un lado, las aristas vivas producen una separación del flujo y zonas de estancamiento que modifican la estructura tridimensional del escurrimiento respecto al que se desarrolla en torno a elementos de sección circular. Por otro lado, el análisis del efecto de conjunto de las pilas permite estudiar las diferencias de los procesos erosivos respecto de la pila aislada.

METODOLOGÍA

Para la ejecución de los ensayos se utilizó un canal de 2 metros de ancho, 1 metro de altura y 30 metros de longitud, localizado en la Nave 6 del Laboratorio de Hidráulica (LH) del Instituto Nacional del Agua (INA, Argentina).

Los ensayos se realizaron en condiciones de agua clara con una velocidad del flujo cercana a la de inicio de movimiento del sedimento del lecho para estudiar el fenómeno erosivo en una condición lo más cercana posible a su máxima intensidad.

Los ensayos tuvieron una duración de entre 6 y 10 hs cada uno sin llegar a la condición de equilibrio del proceso erosivo. En consecuencia en estos ensayos no se llega a la erosión máxima alcanzable.

El dispositivo cuenta con una capacidad de bombeo del orden de los $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. El agua ingresa al canal mediante un dispositivo aquietador ubicado en un extremo del mismo, que uniformiza el escurrimiento, escurre por el canal de ensayo y desemboca en una cisterna configurándose un circuito hidráulico cerrado. En su tramo medio, el canal cuenta con un segmento de 5 metros de longitud, 2 metros de ancho y 50 centímetros de espesor, con material granular constituido por arena tamizada con diámetros característicos de $d_{16}=0.24\text{mm}$, $d_{50}=0.37\text{mm}$ y $d_{84}=0.51\text{mm}$. Aguas arriba y abajo del segmento de canal a fondo móvil, el modelo se completa con sendos fondos fijos constituidos por carpetas de cemento que forman un plano horizontal único con el lecho de arena. Aguas abajo se encuentra una trampa de arena para rete-

ner el posible material arrastrado, y una compuerta manual rebatible para regular el tirante.

Antes de comenzar cada ensayo, fue necesario restituir el lecho a su condición inicial. Para ello se realizó una limpieza general del fondo retirando el material extraño, luego se alisó el mismo dejándolo a nivel con las carpetas de cemento mencionadas. Esta operación se repitió para cada nuevo ensayo. El material de aporte necesario para la nivelación se obtuvo de la trampa de arena donde se encontraba sedimento de la misma granulometría. Las características del mismo fueron tales que no hubo riesgo de posible disgregación en distintas fracciones de la granulometría inicial. En la Figura 1 se puede observar la condición inicial del fondo antes de los ensayos.

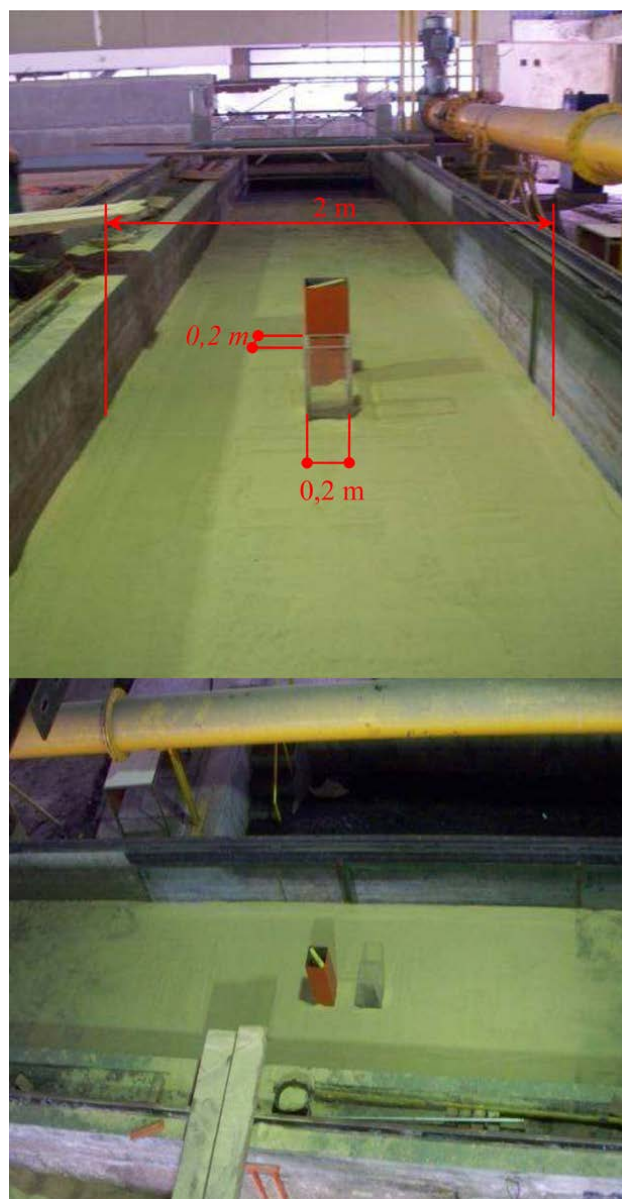


Figura 1. Condición inicial del lecho del canal en la configuración de pilas alineadas al flujo.

Para el registro de profundidades se utilizó un equipo ultrasónico (Micro-Eco) desarrollado en el INA, (Iz-

quierdo et al., 2010), y para la medición del campo de velocidades un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) Sontek. También se midieron velocidades en forma simultánea con el ADV y con un mini-molinete Ott durante la puesta en régimen de las experiencias.

Finalizada la puesta en régimen, se colocó en primera instancia el Micro-Eco que relevó durante todo el ensayo la evolución temporal de la erosión en un punto característico. El mismo se ubicó a 5 cm del vértice izquierdo de la cara frontal de la pila de aguas arriba, alineada con ésta y desplazada en dirección transversal al flujo. Posteriormente se deja evolucionar al fenómeno erosivo en las condiciones citadas por el término de unas dos horas. Luego se realizó la medición del campo de velocidades.

Para minimizar el efecto de la contracción de la corriente en el flujo tridimensional desarrollado en torno a las estructuras estudiadas, se trabajó con pilas de sección cuadrada de 20 cm de lado, correspondiente al 10% del ancho del canal. El dispositivo experimental permitió trabajar con tirantes de hasta 50 cm, adoptándose en las experiencias valores de 30, 40 y 50 cm.

Se estudiaron dos configuraciones geométricas alineadas a la corriente, la primera con una separación entre las caras de los dos elementos del orden del menor tirante (30 cm), para la que son esperables mayores efectos de conjunto (Serra, 2011), y una segunda aumentando dicha separación a 50 cm. El Departamento de Hidráulica de la Universidad de Buenos Aires (UBA, Argentina), propuso utilizar una geometría en tresbolillo, y de esa forma quedó establecida la tercera disposición geométrica. En la Tabla 1 se resumen las condiciones geométricas y los parámetros hidráulicos de los ensayos realizados.

Tabla 1.- Condiciones de ensayo

En.	Sep. Long. [cm]	Sep. Trans. [cm]	U/Uc* [1]	Dur. [min.]	Esquema Geométrico
A	30	0	95	265	
B	30	0	95	323	
C	30	0	90	358	
D	30	0	95	422	
E	50	0	95	361	
F	50	0	95	356	
G	50	0	95	358	
H	30	20	95	522	
I	30	20	95	351	
J	30	20	95	588	

(*)Porcentaje propuesto para cada ensayo

Se evitó incluir en el análisis los efectos de las formas de fondo que aportan complejidad a la fase experimental e influyen la erosión máxima. Para ello se utilizó una velocidad de aproximación del 95% de la velocidad de inicio de movimiento, calculando ésta última mediante la parametrización de Van Rijn (1993). Este método, ampliamente difundido, es dimensionalmente compatible. Se considera el peso sumergido y la granulometría del sedimento, así como la velocidad del fluido y su viscosidad. Se puede observar la velocidad crítica para cada tirante en la Tabla 2.

Tabla 2.- Velocidades de inicio de movimiento.

Tirante [cm]	U_c [cm/s]	95 % U_c / 90% U_c
30	27.6	26.2 / 24.8
40	28.6	27.2 / 25.7
50	29.3	27.8 / 26.3

RESULTADOS

En las 10 experiencias realizadas se midió la batimetría final del lecho, el campo de velocidad en torno a las pilas y la evolución temporal de la erosión en un punto característico localizado en la zona de mayor socavación local.

En la Figura 2 y 3 se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los resultados correspondientes al Ensayo J. En la figura 2, se representa el campo de velocidades medido. La longitud de las flechas rojas es proporcional a la componente horizontal de la velocidad. Puede observarse en amarillo la zona del flujo que presenta velocidades ascendentes.

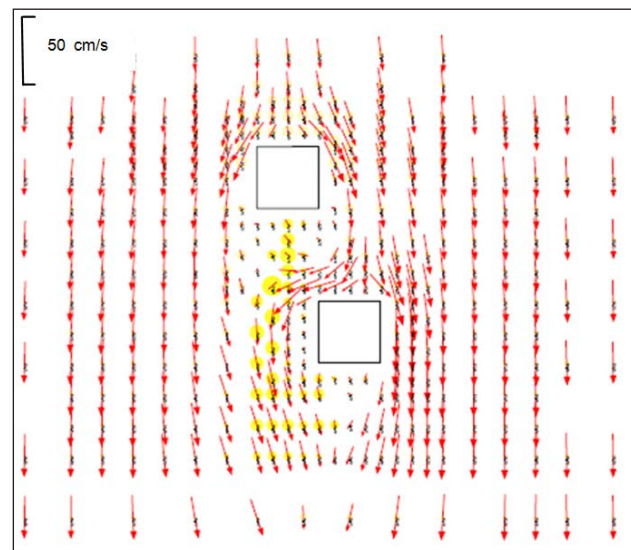


Figura 2. Campo de velocidades para el Ensayo J

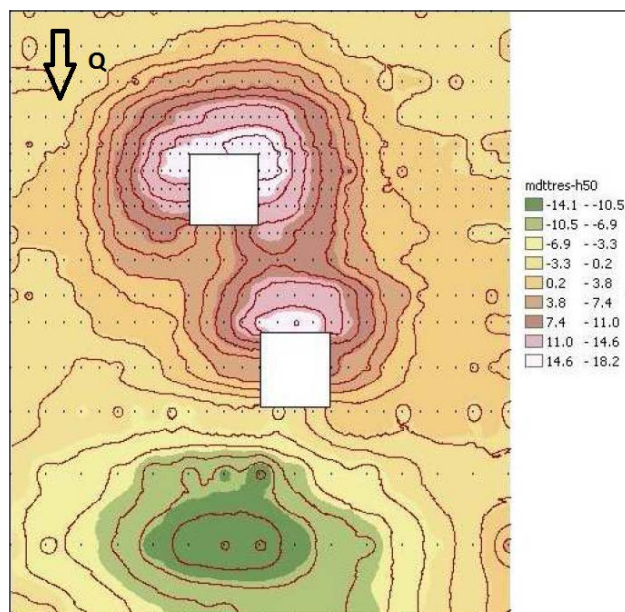


Figura 3. Lecho final para el Ensayo J

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las condiciones de ensayo y de los resultados obtenidos, donde: "d" es la separación entre pilas medida entre caras enfrentadas, "h" el tirante, "b" el ancho de pila, " U_m " es la velocidad media del flujo, " U_c " la velocidad crítica de inicio del movimiento, " d_{se} " la máxima erosión en la pila de aguas arriba, " d_{sp} " la máxima erosión en la pila de aguas abajo y " d_{sa} " la altura del depósito aguas abajo de las pilas, según se muestra en la figura 4.

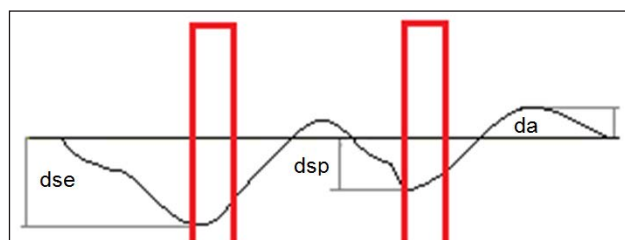


Figura 4. Nomenclatura utilizada

Tabla 3.- Resultados experimentales

En.	h [cm]	U/U_c^{**}	Fr	Dur. [min]	d [cm]	d_{se}/b	d_{sp}/b	d_{sa}/b
A	30	0.96	0.154	265	30	0.84	0.16	-0.13
B	40	0.95	0.153	323	30	0.85	0.12	-0.14
C	50	0.88	0.117	358	30	0.52	0.13	-0.15
D	50	0.94	0.124	422	30	0.91	0.26	-0.16
E	30	0.94	0.150	361	50	0.62	0.30	-0.12
F	40	0.91	0.131	356	50	0.54	0.24	-0.09
G	50	0.93	0.123	358	50	0.53	0.20	-0.16
H	30*	0.95	0.153	522	30	0.51	0.63	-0.77
I	40*	0.95	0.138	531	30	0.72	0.72	-0.75
J	50*	0.95	0.126	588	30	0.85	0.81	-0.71

(*) En estas experiencias se alinearon los vértices opuestos de las pilas. (**) Porcentaje según datos de laboratorio

Se puede observar que la altura del depósito de sedimento medido en la zona detrás de la segunda pila alcanza valores semejantes para el caso de pilas alineadas, no así para los ensayos a tresbolillo, donde los valores son notoriamente superiores.

Los valores medidos de las tres variables para el ensayo C (88% U_c) son menores respecto del ensayo D (94% de U_c). Este resultado se encuentra en concordancia con la menor turbulencia y las menores tensiones de corte aplicadas sobre las partículas del sedimento en el ensayo C.

Las erosiones máximas medidas se compararon con las expresiones de predicción de Arunachalam, Coleman, Shen, Aruchalam, Richardson, HEC-18, entre otras. Sólo la ecuación del HEC-18 permite estimar la erosión máxima cuando la configuración es al tresbolillo. Se aplicaron las formulas mencionadas por que son las que mejor aproximan los resultados obtenidos por Bermúdez (2011). En la tabla 4 se pueden observar los valores de las predicciones de la erosión máxima para cada fórmula y el porcentaje de dicho valor alcanzado durante cada experiencia.

Tabla 4. Erosión máxima, predicciones de distintas fórmulas y porcentaje alcanzado en las experiencias respecto de los valores teóricos.

Ensayo	Medido [cm]	Arunachalam [cm] / [%]	Coleman [cm] / [%]	Shen [cm] / [%]	Arunchalam (1948) [cm] / [%]	Richardson [cm] / [%]	HEC-18 [cm] / [%]
A	16.8	24.6 / 68	29.9 / 56	18.3 / 92	24.0 / 70	22.7 / 74	25.0 / 67
B	17.0	29.3 / 58	40.9 / 42	16.5 / 103	27.2 / 63	25.0 / 68	27.5 / 62
C	10.3	33.4 / 31	49.6 / 21	15.6 / 66	30.3 / 34	24.1 / 43	26.5 / 39
D	18.2	33.4 / 54	50.2 / 36	15.8 / 115	30.5 / 60	24.7 / 74	27.2 / 67
E	12.3	24.6 / 50	29.7 / 41	18.0 / 68	23.8 / 52	22.4 / 55	24.7 / 50
F	10.7	29.3 / 36	39.7 / 27	16.4 / 65	27.1 / 39	23.4 / 46	25.7 / 42
G	10.6	33.4 / 32	50.1 / 21	15.8 / 67	30.4 / 35	24.6 / 43	27.1 / 39
H	10.1	-	-	-	-	-	39.0 / 26
I	14.3	-	-	-	-	-	41.3 / 35
J	18.0	-	-	-	-	-	42.9 / 42

Se observa que en la mayoría de los casos la relación entre la erosión máxima medida y la obtenida por las distintas formulas de cálculo se encuentra contenida entre el 30% y el 70%. La expresión de Shen subestimó, en algunas experiencias, los valores medidos.

Los resultados guardan coherencia con los estudios de Bermúdez (2011), donde para una pila aislada de sección cuadrada de 20 cm de lado, un tirante de 20 cm y una duración total de ensayo de 470 horas, obtuvo a las 8 horas de ensayo un 57% de la erosión máxima. Esta comparación es posible pues, para los valores utilizados, la variación del tirante no muestra mayor efecto sobre los valores máximos de la erosión para geometrías alineadas.

En las Figuras 5 y 6 se comparan las máximas erosiones en cada pila y los depósitos máximos para las distintas configuraciones geométricas en función de la relación h/b (tirante/ancho de la pila).

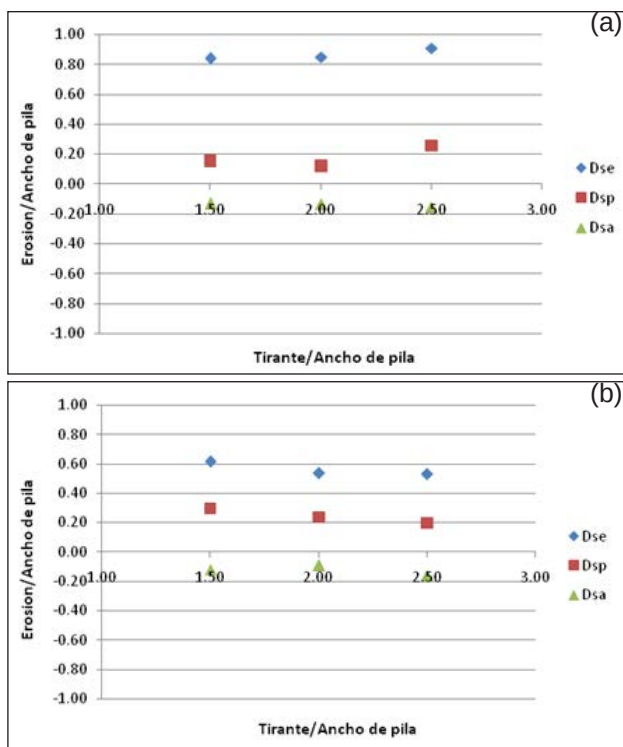


Figura 5. Variación de la erosión con el tirante para pilas alineadas. Separación de 30 cm (a) y 50 cm (b)

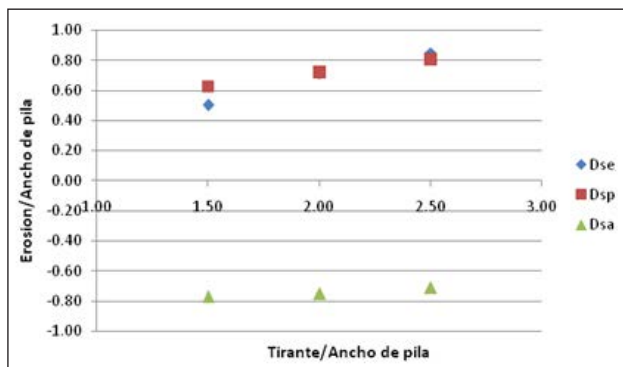


Figura 6. Variación de la erosión con el tirante para la configuración al tresbolillo

Se puede observar que en todos los casos donde las estructuras presentan alineación, existe independencia de los efectos de los procesos erosivos respecto del tirante. Dicha información concuerda con las predicciones, salvo para la formulación de Coleman. La misma describe un crecimiento casi lineal de la erosión máxima con el tirante y conduce además a una predicción algo excesiva.

Se observa que en la configuración alineada, al disminuir la separación entre pilas aumenta la erosión máxima. Para ambas separaciones de pilas, la erosión sobre la pila de aguas abajo y la altura máxima de los depósitos aguas abajo de la interferencia tienen valores de máxima similares.

En el caso de geometría en tresbolillo se observó que los valores de dse y dsp obtenidos en un mismo ensayo son comparables entre sí. En virtud de lo expresado, se estaría sobreestimando fuertemente el efecto erosivo al utilizar la propuesta del HEC-18 si se considera como estructura equivalente la proyección de las pilas sobre la sección. Estas conclusiones son válidas para los resultados de las experiencias, pudiendo estar obviándose efectos de conjunto no desarrollados al momento de finalizar estos ensayos.

Como se mencionó, se estudió también la evolución temporal de la erosión en un punto característico. Para que los datos sean comparables, se escalaron con el valor de máxima socavación medido para cada ensayo (obtenidos de la tabla 3). En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran los resultados agrupados por configuración geométrica.

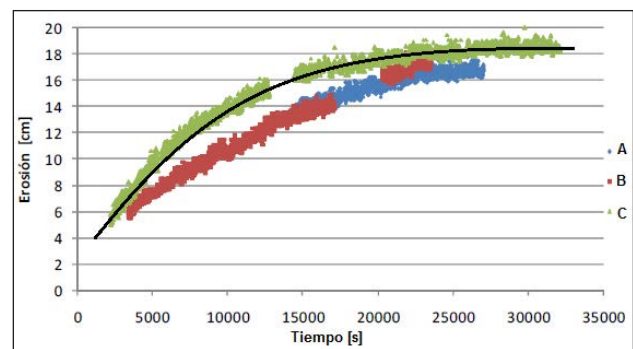


Figura 7. Evolución temporal de la erosión. Pilas alineadas separadas 30 cm.

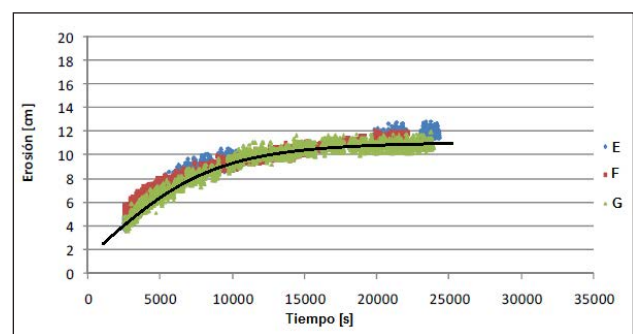


Figura 8. Evolución temporal de la erosión. Pilas alineadas separadas 50 cm.

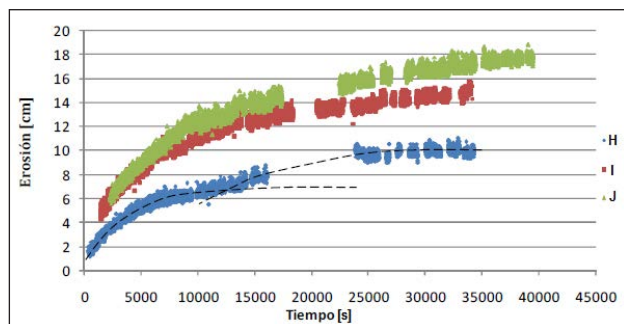


Figura 9. Evolución temporal de la erosión. Pilas al tresbolillo separadas 30 cm.

Los puntos medidos correspondientes a la erosión en función del tiempo en los ensayos con geometrías alineadas y separaciones entre elementos de 30 y 50 centímetros (Figuras 7 y 8) se pueden ajustar mediante una curva exponencial. Aun así, la velocidad en la que se producen estas profundizaciones es diferente entre las dos geometrías, siendo más rápida en el primer caso.

Al estudiar la configuración al tresbolillo se observa, en particular para el tirante de 30 cm, un cambio en la dinámica del proceso erosivo que se manifiesta como un punto de inflexión en la curva de evolución temporal (a los 10.000 segundos aproximadamente). Este resultado es importante porque muestra en qué momento la erosión es influenciada por el efecto de conjunto. El primer tramo en la curva se asocia con el desarrollo de la erosión en correspondencia con la pila de aguas arriba que está próxima al punto de medición. El cambio de curvatura puede relacionarse a un cambio del patrón erosivo debido ya a la erosión del conjunto de los elementos que conforman el grupo de pilas. Para esta serie es notoria la dependencia de los resultados respecto del tirante. Puede observarse que el primer tramo de la curva punteada de la figura 9 es similar a la dibujada en la figura 8, mientras que el segundo tramo tiene un desarrollo similar a la línea negra observada en la figura 7. Ello

lleva a considerar que para el caso alineado, en la serie con separación de 30 cm se están observando efectos de conjunto desde un comienzo del ensayo, mientras que para la serie de mayor separación dichos efectos no se han observado en el tiempo ensayado.

Se dispuso de la evolución temporal de la socavación en el mismo punto para los ensayos presentados y para los de Bermúdez (2011), donde se registraron las profundidades en el tiempo para una pila cuadrada. La comparación de resultados es válida ya que el mayor porcentaje de erosión suele alcanzarse en las primeras horas del ensayo, convergiendo el resultado de forma asintótica a un valor final a través del tiempo. En sus experiencias, Bermúdez considera que se ha llegado al valor final de la erosión. Se busca comparar el comportamiento de la evolución temporal de la erosión y determinar posibles comportamientos asociados al efecto de grupo. La suma de la duración total de los ensayos en horas fue similar para las dos investigaciones, realizando Bermúdez 3 ensayos de larga duración contra los 10 ensayos de corta duración de la presente investigación.

En la Figura 10 se muestran las mediciones de evolución temporal del lecho para las geometrías alineadas junto con las mediciones del ensayo de Bermúdez y los valores obtenidos de la ecuación de Melville (1999) considerando como valor último de equilibrio aquel obtenido por Bermúdez al finalizar su ensayo. Para ajustar la ecuación de Melville es necesario calcular el tiempo teórico necesario para alcanzar el equilibrio, que según las expresiones del citado autor, para las condiciones de la experiencia de Bermúdez es de 330 horas, mientras que el ensayo tuvo una duración de 470 horas. Por ello se consideró razonable adoptar el valor último del ensayo como el de equilibrio. Se encontró que la curva de Melville es una envolvente de los resultados de Bermúdez, con una pendiente similar a la de los resultados de la pila unitaria, desde aproximadamente los 500 minutos de ensayo.

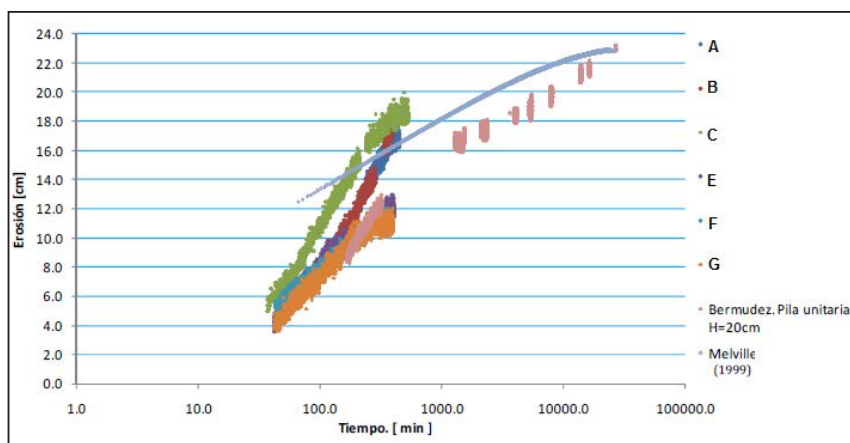


Figura 10. Comparación de la evolución temporal de la erosión para distintas experiencias.

Las mediciones pueden considerarse Tomando los primeros tramos de estas las pendientes de las curvas de la evolución temporal de la erosión son mayores para las experiencias con separación de 30 cm entre pilas. Ello se corresponde con una tasa de socavación más rápida, consecuencia de la superposición de la erosión propia de la pila de aguas arriba y la formación de la fosa en torno al conjunto de elementos.

Para la separación de 50 cm el efecto del conjunto es menor, alineándose las mediciones con los resultados del ensayo de larga duración para una pila aislada. Esto pone de manifiesto que, al menos en las primeras horas de ensayo, el efecto del conjunto no es significativo como para aumentar notoriamente la socavación local máxima en la pila frontal.

En todos los ensayos realizados con las pilas alineadas, se observó una alta simetría en la batimetría obtenida. Esto implica que el flujo de aproximación en el canal de ensayo fue prácticamente simétrico, por lo que puede decirse que es factible en estos casos adoptar la condición de simetría para la medición del campo de velocidades. En la serie con separación de 50 cm se observó que en el frente de la pila de aguas arriba el patrón de la fosa de erosión es semejante a la serie alineada con separación de 30 cm, con los valores máximos en cercanías de los vértices frontales. Sin embargo la fosa que se forma en torno a la pila de aguas arriba tiene un comportamiento relativamente independiente de aquella que se desarrolla en la pila de aguas abajo, existiendo una zona de depósitos intermedia. Por lo tanto, la forma de la fosa de erosión en cercanías de la pila de aguas arriba presenta una mayor similitud con aquella que se tiene en una pila aislada. Para los ensayos con separación de elementos de 30 cm se apreció que el desarrollo en planta de la fosa de erosión de aguas arriba es tal que alcanza a la pilas de aguas abajo, es decir que tiende a no formar depósitos con cota superior al lecho original, entre pilas. La ubicación del punto de máxima erosión de la pila de aguas abajo se encuentra siempre sobre la cara frontal al escurrimiento y no en los vértices como ocurre en la de aguas arriba.

Para el caso de geometría al tresbolillo, los depósitos entre pilas son prácticamente nulos. La fosa de erosión en torno a la pila de aguas abajo se desarrolla en forma aproximadamente simétrica respecto de ésta, mientras que los depósitos aguas abajo del conjunto se ubican sobre el eje del canal, con una ligera desviación hacia la margen derecha. Se observó que las fosas de erosión asociadas a cada pila están en mutua interacción, induciendo un notorio efecto de conjunto. Se confirma así la existencia de una fosa única, según se aprecia en la Figura 11 donde se muestra un perfil realizado a 10 cm del eje del canal sobre margen izquierda en coincidencia con el eje de la pila de aguas abajo. Las dos fosas están en proceso de unión e interferencia.

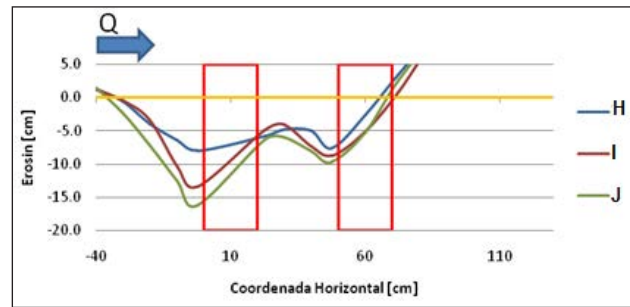


Figura 11. Perfil de la batimetría, pasante por el eje de la pila de aguas abajo.

Al estudiar el campo de velocidades del flujo, se encontró que la principal diferencia entre las series de ensayos con distintas separaciones entre elementos alineados, reside en la ubicación del flujo ascendente entre pilas. Para distancias mayores entre elementos se observa que al aumentar el tirante, el flujo ascendente se desplaza hacia las cercanías de la pila trasera. Para la geometría en tresbolillo, en la pila de aguas abajo se observaron velocidades ascendentes sobre la cara de margen derecha y velocidades descendentes sobre la cara de margen izquierda. Las mayores velocidades en el plano horizontal están en correspondencia con la cara de margen izquierda, siendo estos efectos más notorios para los ensayos con tirantes mayores.

CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos para estudiar la erosión local en grupos de pilas cuadradas, y se compararon las mediciones con ecuaciones de predicción de la profundidad máxima desarrolladas por diversos autores. De la selección efectuada, sólo las formulaciones de Richardson y del HEC-18 tienen en cuenta la geometría de sección cuadrada. Con esas dos formulas, los valores predichos estuvieron dentro del orden de magnitud esperable para los grupos alineados. La estimación con la fórmula del HEC-18 para la geometría al tresbolillo fue claramente mayor a los valores registrados, ya que el cálculo se basa en el ancho equivalente. Esto implica que no se considera la influencia del flujo entre pilas, con lo cual se está ante una estimación por exceso de las erosiones máximas. Para subsanar esto, se podría reducir el ancho equivalente utilizado. Los resultados arrojan valores de reducción del orden de un 30 a 40%, pero son totalmente estimativos, debiéndose abordar mayores estudios al respecto.

Para las geometrías con pilas alineadas a la corriente, no se apreciaron efectos significativos del tirante en las máximas socavaciones. Si se observó dependencia de la erosión máxima respecto de la separación entre pilas. Para la configuración en tresbolillo, se constató dependencia del fenómeno erosivo respecto del tirante.

Los ensayos realizados fueron del orden de las 8 horas. El tiempo adoptado se correspondió con las

limitaciones prácticas del dispositivo experimental y del tiempo para la realización del trabajo de tesis de grado, en que esta investigación se enmarca. De la comparación con ensayos de larga duración, del orden de las 400 horas, se desprende que la erosión máxima medida para los tiempos de ensayo del presente estudio estaría en el orden del 60% de la erosión máxima esperada.

Se encontró que para una separación entre pilas de 30 cm existen efectos de conjunto que se manifiestan desde los primeros minutos de las experiencias, no observándose dicha influencia cuando la separación es de 50 cm, al menos durante el tiempo de ensayo. Esto puede deberse a una interacción más temprana de las fosas de erosión si la separación entre pilas es menor. Para la geometría al tresbolillo, el efecto de interacción entre ambas fosas de erosión se observa en el quiebre que presenta aproximadamente a las 4 hs de iniciado el ensayo en la curva de evolución temporal de erosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bermúdez Badía, M. (2011) "Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas. Influencias de la anchura de la pila". 711-TES-CA-5294. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991) "Scouring". IAHR Hydraulic Design Manual 2, Balkema Rotterdam, The Netherlands.

Coleman, S.E., (2005) "Clearwater Local Scour at Complex Piers". Journal of Hydraulic Engineering 131(4):330-334

Istiarto, I. (2001). "Flow around a cylinder in a scoured channel bed". École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.

Izquierdo, J.M.; Tatone, G (2010): "Equipo ultrasónico para Estudio de Erosión en Modelos Físicos", XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre 2010.

Melville, Bruce W.; Chiew, Yee-Meng. "Time Scale for Local Scour At Bridge Piers". Journal Of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, January.

Melville, B. W. and Coleman, S.E, (2000) "Bridge Scour". Water Resources publications LLC, Colorado, U.S.A.

Quiping, Yang.(2005) "Numerical investigation of scale effects on local scour around a bridge pier". The Florida State University. FAMU-FSU College of Engineering.

Raudkivi, A.J. (1985). "Estudio de sedimentos finos y cohesivos". Curso latinoamericano de mecánica fluvial. Laboratorio de Hidráulica Aplicada – INCYTH. Buenos Aires, Argentina.

Serra, J.M.; Spalletti, P. y Brea, J.D. (2011) "Estudio de Erosión Local en Pilas Cuadradas". Quinto Simposio Regional de Hidráulica de Ríos, Santiago del Estero, Argentina, Noviembre 2011.

Van Rijn, Leo C. (1993) "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas", Amsterdam: Aqua publications.

Agradecimiento.

A mis tutores, Agnes Paterson y Pablo Spalletti, que me brindaron su apoyo, su guía y su tiempo de forma totalmente desinteresada. Al personal del Instituto Nacional del Agua y su buena voluntad. A Martín Irigoyen que me brindó su ayuda y una grata compañía, y a mi novia que me acompañó y estuvo a mi lado durante todos estos años.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE PROTECCIONES COLOCADAS JUNTO A ESTRIBOS DE PUENTES ALIVIADORES

THE OPTIMIZATION OF THE REVETMENTS DESIGN PLACED AROUND ABUTMENTS OF RELIEF BRIDGES

Ramiro J. Pighini¹, Marcela L. Reynares¹ y Graciela B. Scacchi¹

Resumen

El presente trabajo tiene como objeto determinar, mediante experiencias de laboratorio, la incidencia de las dimensiones y geometría en planta de una protección flexible sobre el sector erosionado en las inmediaciones de un estribo de pared vertical, y evaluar las mínimas dimensiones del revestimiento a fin de asegurar la estabilidad de la obra. Los ensayos fueron realizados en un canal de grandes dimensiones ubicado en la Nave I del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). Los experimentos fueron realizados en condiciones de agua clara y manteniendo constante los parámetros hidráulicos. Los resultados muestran que bajo diferentes geometrías de la protección, la máxima profundidad de erosión se mantuvo semejante a la situación de referencia. Sin embargo, la reducción del área del revestimiento deja zonas del lecho muy expuestas a los procesos erosivos, desestabilizando la protección y dejándola suspendida de su anclaje. Por este motivo es necesario incorporar al estudio un análisis de estabilidad geotécnica del sistema lecho erosionado-protección.

Palabras clave: Estribo, Protecciones, Erosión local, Puente aliviador.

Abstract

An experimental study of scour processes related to vertical-wall abutments protected with blocks mats placed in a river flood plain is reported. The purpose of the study was to determine the influence of apron width related to the maximum scour depth, the shape and volume of the scour hole. The experiments were conducted on a wide channel placed in FICH Hydraulics Laboratory of the Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). Laboratory tests were carried out under clear-water flow conditions and the same flow conditions. The results show that for different concrete block matting geometries, the maximum scour depths are similar to the situation without protection. However, reducing the area of the revetment could be generated the instability protection. It is therefore necessary to incorporate the study of geotechnical stability analysis of eroded bed – protection system.

Key Words: Abutment, Protection, Local Scour, Relief Bridge

INTRODUCCIÓN

Los puentes aliviadores son aquellos emplazados en valles de inundación, distantes del cauce principal y cuyo comportamiento es independiente del mismo. Los procesos de erosión local que se generan junto a los estribos de estos puentes, pueden ser controlados mediante la colocación de protecciones al pie de dichas estructuras. Esta herramienta ingenieril ha tenido una amplia aceptación en la región del litoral argentino. Sin embargo, la presencia de la protección no evita la formación de la hoya de erosión sino que la aleja del estribo (Melville et al., 2006a y b; Morales et al., 2008; Cardoso et al., 2009 y Reynares et al., 2010). Resulta así necesario optimizar las dimensiones en planta de revestimiento para minimizar los

costos de proyecto asegurando al mismo tiempo la integridad del puente. El presente estudio enfoca su análisis en estribos largos, característica principal de los puentes que se construyen en grandes llanuras de inundación como la del río Paraná. El trabajo tiene como objeto determinar, mediante experiencias de laboratorio, la incidencia que las dimensiones y geometría en planta de una protección flexible tienen sobre el sector erosionado en las inmediaciones de un estribo de pared vertical, con el objetivo final de evaluar las dimensiones mínimas que debiera tener el revestimiento de manera que asegure la estabilidad del estribo ante la ocurrencia de los procesos de erosión.

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)-Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina. Ciudad Universitaria. Paraje "El Pozo". S3000. Santa Fe. Argentina. E-mail: ramiro_pighini@hotmail.com

METODOLOGÍA. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los ensayos fueron realizados en un canal de grandes dimensiones, ubicado en la Nave I del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina). El mismo posee 18.50 m de largo, 7.65 m de ancho y 0.93 m de profundidad (Figura 1). El agua ingresa al canal por un sector a fondo fijo de 3.50 m de longitud al que le sigue un sector a fondo móvil de 11.00 m de largo y un ancho coincidente con el del canal. El sector a fondo móvil se encuentra conformado por un manto de 0.60 m de espesor, de arena uniforme de 1 mm de diámetro medio ($\sigma_g = 1.3$) y un peso específico de 2650 kg/m³. En los tramos rígidos se ha adherido una delgada capa de material granular de similares características a las del sector a lecho móvil, para mantener constante la rugosidad superficial en todo el recorrido del flujo. El tramo final se conforma por otro sector fijo de iguales dimensiones que el primero.

A 8.50 m aguas abajo de la sección de entrada se produce un cierre parcial de 3.65 m de extensión (L) y 0.12 m de espesor, con origen en la margen derecha, materializando así un estribo prismático de pared vertical. El tirante de agua en todos los ensayos (h) fue de 0.12 m. De esta manera, la relación L/h fue constante y mayor a 25 en todos los casos, asegurando la condición de estribo largo.

En su margen izquierda existe un muro longitudinal móvil para modificar el ancho de la sección, manteniendo fija la longitud del estribo. El ancho de la sección de paso será denominado como brecha (B) y estará refiriendo al semiancho del puente. La pared móvil, opuesta al estribo, se constituye en un eje de simetría, no sólo desde el punto de vista geométrico sino también en cuanto al fenómeno en estudio, lo que permitió trabajar con un solo estribo.

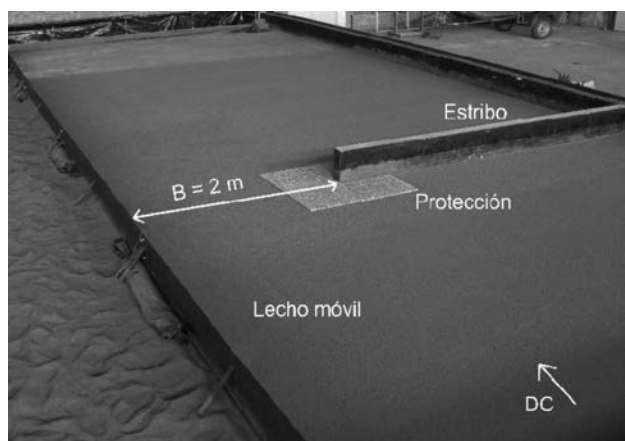


Figura 1. Canal de ensayos.

Las protecciones utilizadas fueron facilitadas por una empresa dedicada al diseño y construcción de revestimientos flexibles. Se entregaron como mantas de 1.00 m por 0.50 m compuestas por prismas de base

tronco piramidal cuadrada, con lados de 0.026 m y un espesor de 0.012 m adheridos a una tela permeable (Figura 2). Los mismos se encuentran separados entre sí por una distancia media de 3mm.

Las protecciones fueron ancladas al lecho para prevenir deslizamientos. Un croquis general de la geometría en planta de las protecciones se puede observar en la Figura 2. Donde:

- W: es el ancho de la protección;
- W_{R1} : es el remate lateral en la cara de aguas arriba;
- W_{R2} : es el remate lateral en la cara de aguas abajo;
- W_1 : es el remate longitudinal hacia aguas arriba;
- W_2 : es el remate longitudinal hacia aguas abajo.
- DC: Dirección de la corriente.

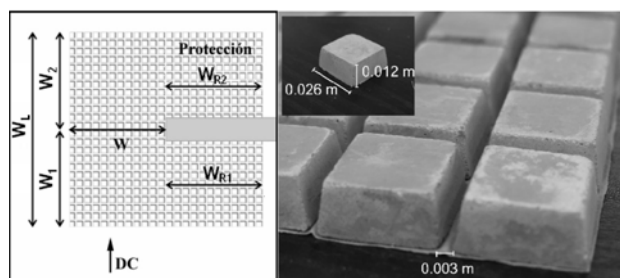


Figura 2. Esquema y detalle de la protección.

Durante toda la experimentación el ancho de la brecha fue de 2.00 m, el caudal de ensayo fue constante e igual a 72 l/s, definido de manera tal que se verificó un caudal específico medio de 0.036m²/s en la sección estrecha. Todos los ensayos fueron realizados bajo condiciones de agua clara y la duración de los mismos fue de 24 horas, tiempo considerado suficiente para lograr una profundidad de erosión local, próxima al 80% del valor final de equilibrio (Schreider et al, 1998).

Una vez finalizado cada experimento, se desagotó lentamente el canal mediante drenes ubicados en el fondo de manera de no afectar la configuración final del lecho y se realizó un relevamiento de detalle del mismo, mediante un distanciómetro laser posicionado sobre un carro porta instrumental. La topografía fue acompañada de un exhaustivo registro fotográfico tanto al inicio como al final.

Los ensayos fueron organizados en dos series, la primera de ellas se caracterizó por poseer un ancho de protección (W) de 0.50 m, mientras que en la segunda el "W" fue de 0.25 m. Adicionalmente se realizó un ensayo patrón, en el cual el estribo fue considerado sin protección alguna, de modo tal de utilizar los resultados que de él se deriven como referencia a

la hora de analizar los restantes ensayos realizados. En el primer ensayo de cada una de las series experimentales se colocaron mantas cuyas geometrías en planta fue cuadrada envolviendo por completo al estribo, mientras que en los ensayos posteriores ésta se modificó disminuyendo su área, en un 25% en cada caso. En efecto, en el segundo ensayo se prescindió del sector ubicado en la cara de aguas abajo del estribo y en el experimento siguiente se quitó el remate de revestimiento ubicado en la cara de aguas arriba. Se entiende por remate, al sector de la protección que limita inmediatamente con las caras, tanto de aguas arriba como de aguas abajo, del estribo. Finalmente, en ambas series se ensayó una configuración que solo contempla la colocación de protección en el sector de aguas arriba del estribo, con una extensión W_1 en el sentido del escurrimiento y una ancho de $W_R + W$, un esquema detallado se puede observar en la figura 3.

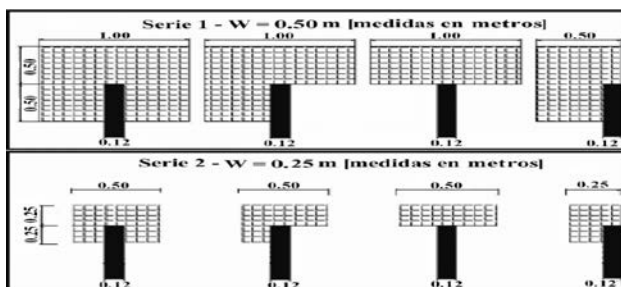


Figura 3. Esquema de la secuencia de ensayos realizada.

En la Tabla 1 se resumen las dimensiones utilizadas en cada uno de los experimentos.

Tabla 1. Dimensiones de las protecciones.

Ensayo	W [m]	W_1 [m]	W_2 [m]	WR_1 [m]	WR_2 [m]
Referencia	-	-	-	-	-
SERIE 1	S1E1	0,50	0,50	0,50	0,50
	S1E2	0,50	0,50	0,50	0,00
	S1E3	0,50	0,50	0,50	0,00
	S1E4	0,50	0,50	0,00	0,50
SERIE 2	S2E1	0,25	0,25	0,25	0,25
	S2E2	0,25	0,25	0,25	0,00
	S2E3	0,25	0,25	0,25	0,00
	S2E4	0,25	0,25	0,00	0,25

Mediante dichos esquemas se pretende analizar la influencia que tienen las diferentes geometrías en planta de una protección, en el lecho resultante, en las inmediaciones de un estribo prismático de pared vertical.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados alcanzados en ambas series de ensayos muestran cómo la geometría de las hoyas de erosión se encuentra estrechamente relacionada con las dimensiones y disposición del revestimiento. En los casos en los que la protección tuvo una extensión de 0.50 m, el sector erosionado se desarrolló en el lateral de la protección, alejado del estribo. La hoya se extendió en todo el largo de la protección (W_L). En la figura 4 se presentan imágenes del lecho resultante una vez finalizado cada ensayo de la serie 1. En la misma se puede observar cómo las hoyas de erosión poseen prácticamente la misma geometría, con anchos y largos semejantes, ubicadas en el mismo lugar de la sección transversal del canal. Claramente, la protección trabaja correctamente, alejando el sector erosionado del estribo mismo. Sólo cuando la protección se dispuso de manera transversal al estribo (Figura 4c) se produjeron importantes profundizaciones en las cercanías del mismo. Sin embargo, las máximas profundidades se ubicaron a 0.50 m del extremo del estribo.

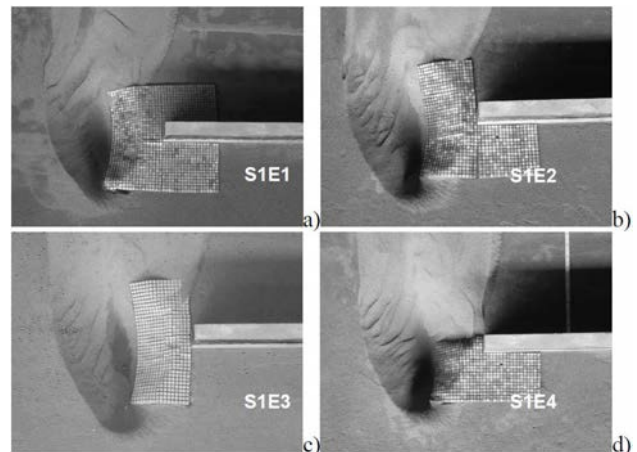


Figura 4. Comparación de las hoyas resultantes en la Serie 1

Los resultados alcanzados estarían indicando que existen sectores del revestimiento que podrían considerarse "prescindibles". En efecto, si la protección se encuentra correctamente anclada al lecho, tanto los remates de aguas arriba como de aguas abajo (W_1 y W_2 , respectivamente) podrían no colocarse, y la protección seguiría trabajando correctamente, alejando las erosiones del estribo.

Sin embargo en la segunda serie de ensayos, en la cual la protección tuvo un ancho de 0.25 m, el sector erosionado se desarrolló envolviendo al estribo y su correspondiente protección, acercando las máximas profundidades al mismo.

En la figura 5 se muestra una comparación de resultados entre los ensayos S1E2 y S2E2, pudiéndose observar un comportamiento diferenciado entre ambos experimentos, que poseen una misma geometría pero anchos diferentes.

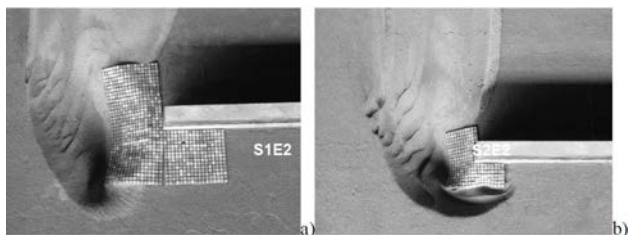


Figura 5 - Comparación de las hoyas S1E2 ($W = 0.50$ m) y S2E2 ($W = 0.25$ m)

Tal como se observa en la figura 5, la forma de la hoya de erosión cambia sustancialmente en función de “W”. En efecto, en la Serie 1 la hoya se desarrolla en el lateral de la protección, mientras que en la Serie 2 envuelve al estribo y su protección, generando importantes deformaciones en el sector de aguas arriba del revestimiento (Figura 5b).

En todos los experimentos, las máximas profundidades de erosión tuvieron magnitudes semejantes a la observada en el ensayo patrón. Esto fue representado en la figura 6, donde se ha graficado la erosión adimensional versus el área de la protección utilizada en cada ensayo. La máxima erosión observada en cada experimento (y_{EP}) fue adimensionalizada con la máxima socavación obtenida en el ensayo patrón (y_E). En la figura se puede observar cómo las máximas profundidades no difieren significativamente respecto del valor de referencia a pesar de aumentar considerablemente el área de protección utilizada.

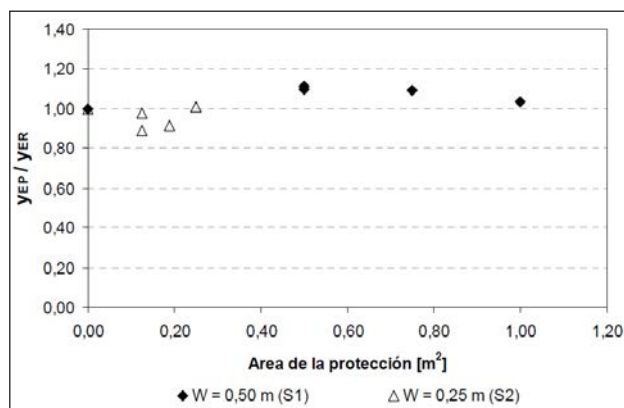


Figura 6 - Erosión adimensional vs área de la protección.

Las hoyas de erosión generadas tuvieron una forma más alargada, acompañando la extensión de la protección en el sentido del escurrimiento, con profundidades semejantes por lo que el volumen de sedimento removido se incrementó significativamente. Esto puede observarse en la figura 7 en la cual se representó el volumen adimensional, como el cociente entre el volumen observado en cada experimento (V) y el correspondiente al medido en el ensayo de referencia (V_R), respecto de la superficie de revestimiento. La figura muestra cómo el volumen de la hoya se incrementa un 50 % en la

serie 1, mientras que duplica su magnitud cuando el revestimiento tuvo un ancho $W = 0.50$ m (Serie 2).

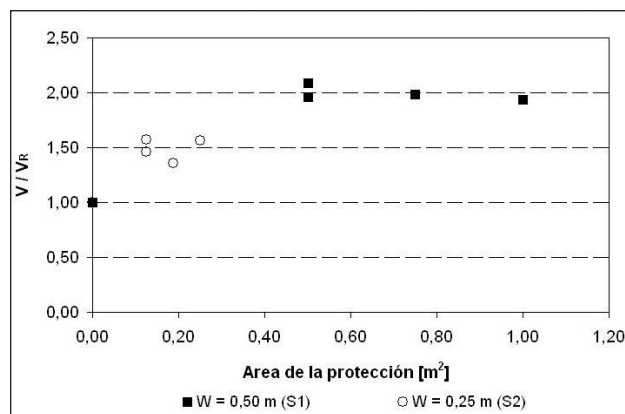


Figura 7 - Volumen adimensional vs área de la protección.

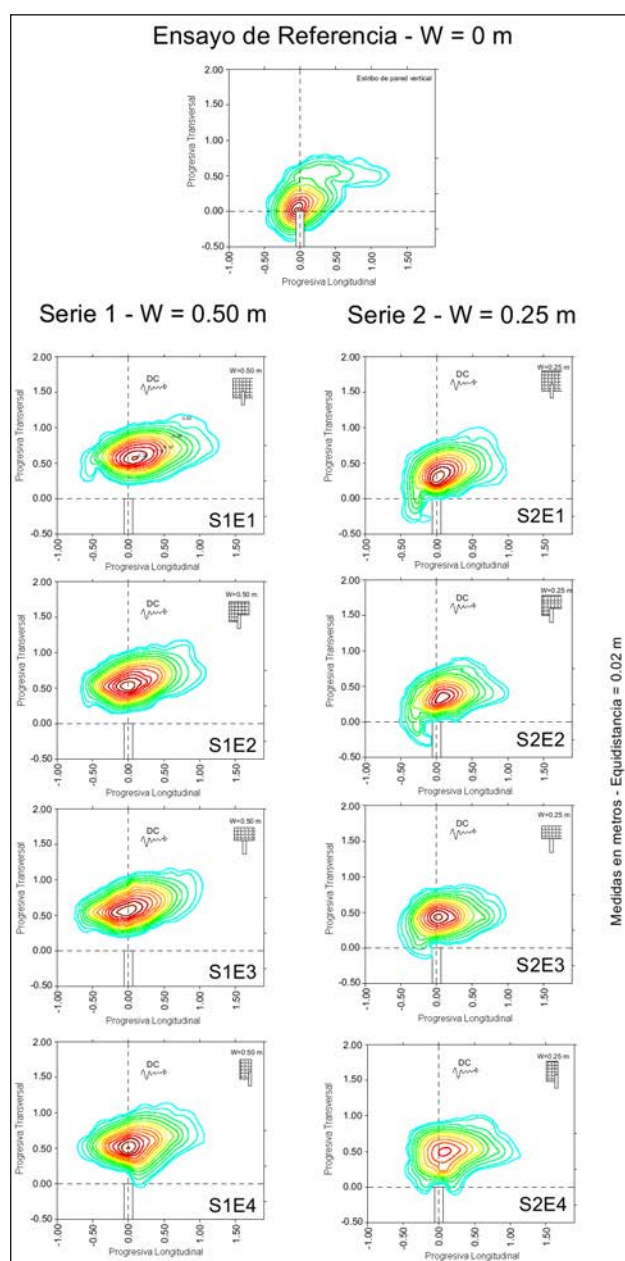


Figura 8 - Relevamientos de detalles de las Series 1 y 2 de experimentos.

Las máximas profundidades de erosión han mantenido no solo su magnitud sino también su ubicación respecto del extremo del estribo a lo largo de toda la experimentación. Con el objetivo de visualizar de mejor manera la posición y geometría que han adquirido las hoyas de socavación, es que se confeccionó la figura 8. En la misma se puede observar un desplazamiento de las máximas profundidades de erosión proporcional al ancho de la protección y una semejanza entre las geometrías que adquirieron las mismas.

En la figura 8 se puede ver cómo las hoyas de erosión copian su forma en los distintos experimentos y las máximas profundidades se desplazan en la propia sección de emplazamiento del estribo de manera proporcional al ancho de protección considerado (W). Al comparar los resultados respecto del ensayo de referencia, se puede apreciar cómo las hoyas tienen un mayor desarrollo en el sentido del escurrimiento, y por lo tanto, un incremento del volumen de sedimento removido.

CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados muestran que las máximas profundidades de erosión mantienen su valor semejante a la situación de referencia, pero desplazan su ubicación de manera proporcional al ancho del revestimiento considerado. Sin embargo, siempre se desarrollan en la sección transversal correspondiente al emplazamiento del estribo.

Para un mismo ancho de protección "W" los valores del área, volumen y forma de las hoyas de erosión se conservan, empero incrementan significativamente su magnitud respecto de la situación de referencia.

Para un mismo ancho de protección considerado (W), reducciones de hasta el 50% en la superficie del revestimiento generan hoyas de erosión semejantes. Desde el punto de vista de la erosión, produciría los mismos resultados colocar una protección del lecho cuadrada que envuelva a todo el estribo, a suprimir los remates ubicados en las caras de aguas arriba y aguas abajo del estribo.

Resulta importante destacar que, para determinadas geometrías como las ensayadas en los experimentos S1E4 y S2E4, la reducción del área del revestimiento deja zonas del lecho en las proximidades de la obra muy expuestas a los procesos erosivos, desestabilizando la protección y dejándola colgada de

su anclaje. Por este motivo es necesario incorporar al estudio, el análisis de estabilidad geotécnica del sistema lecho erosionado-protección en los ensayos realizados.

A fin de establecer una configuración óptima, se puede mencionar que la protección del ensayo S1E3 es la que satisface de manera más económica la integridad del estribo, ya que reduce a la mitad el material empleado en relación a la protección cuadrada y aleja la hoya de erosión de la obra, asegurando su estabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Melville, B.W; van Ballegooy, S; Coleman S.E. y Barkdoll B. (2006a) "Countermeasure Toe Protection at Spill-Through Abutments". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 3, March, A.S.C.E., pp 235-245.

Melville, B.W; van Ballegooy, S; Coleman S.E. y Barkdoll B. (2006b) "Scour Countermeasures for Wing-Wall Abutments". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 6, June, A.S.C.E., pp 563-574.

Morales, R; Ettema, R; y Barkdoll, B (2008) "Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on a Floodplain" *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 134, No. 6, June, A.S.C.E., pp 800-809.

Reynares M.; Schreider M. y Scacchi G. (2010) "Máximas profundidades y geometría de la hoya de erosión junto a un estribo protegido de un puente aliviador". XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Punta del Este – Uruguay.

Schreider, M., Zanardi, L., Scacchi, G., Franco, F. (1998) "Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación". *Revista Ingeniería del agua*. Vol. 5. Nº 2. pp 23-34. Madrid, España.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación (CAI+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo. A la empresa CORIPA S.A. por el suministro de las mantas de bloques de concreto, confeccionadas especialmente para este dispositivo experimental.

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DE SIERRAS PAMPEANAS, CÓRDOBA, ARGENTINA: ESTIMACIÓN PARA DISTINTOS ESCENARIOS

SEDIMENT YIELD IN A PAMPEAN RANGE BASIN (CORDOBA, ARGENTINA): ESTIMATIONS FOR DIFFERENT SCENARIOS

M. Jimena Andreazzini¹⁻², Susana Degiovanni¹, Pablo Spalletti³ y Martín Irigoyen³

Resumen

La producción de sedimentos (G) en una cuenca, sintetiza la compleja interrelación entre aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos y de uso del territorio, y es una de las principales variables que definen la morfodinámica de los cursos colectores. Ante la complejidad de efectuar mediciones directas, G puede estimarse mediante técnicas de predicción, como la ecuación de Gavrilovic, que relaciona coeficientes de producción (W) y de retención (R) de sedimentos en una cuenca. Esta metodología fue aplicada en la cuenca del río Las Cañitas (Sierras Pampeanas, Córdoba) analizando la influencia de las variables de control y considerando hipotéticos cambios en el uso del suelo y condiciones climáticas. Las Sierras Pampeanas de Córdoba conforman bloques submeridianos y asimétricos, de basamento cristalino precámbrico-paleozoico inferior, cuyas alturas varían desde 2600 a 650 m.s.n.m., descendiendo hacia el Este y Sur. Particularmente, la cuenca de estudio se desarrolla sobre la vertiente oriental de la Sierra de Comechingones (Sierras Grandes) y sector pedemontano. Se definieron ocho ambientes geomorfológicos donde el relieve está fuertemente condicionado por las características litológicas y topográficas, los cuales fueron además caracterizados según las variables que intervienen en la metodología aplicada, tales como el tipo de cobertura vegetal y el uso del suelo, entre otros. El valor de producción de sedimentos obtenido fue de 21,43 tn/ha/año. El valor promedio de R fue 0,15 indicando que del total de la producción de sedimentos en la cuenca, el 15% pasa a transporte y el resto quedaría retenido dentro de la misma, en las distintas subcuencas. Los aspectos litológico-geomorfológicos mostraron gran influencia en los valores de G obtenidos, especialmente sobre el parámetro W. El parámetro R, dependiente de la morfometría, mostró menor variabilidad. Los incrementos en G asociados a escenarios post-incendios forestales mostraron que la cobertura vegetal es una variable de alta sensibilidad, y que su pérdida incide diferencialmente según el contexto litológico-geomorfológico afectado. Considerando los escenarios de incrementos en precipitación y temperatura proyectados para el centro-sur de Córdoba para los años 2020 y 2050, G aumentó aproximadamente un 9% y un 20%, respectivamente, en relación a las condiciones actuales.

Palabras clave: producción de sedimentos, Sierras Pampeanas, incendios forestales, cambio climático, río Las Cañitas

Abstract

In a drainage basin, the sediment yield (G) synthesizes the complex relationships between geological, geomorphological, climatic, biotic and land uses features, being one of key variables that define the dynamics of the main stream. Considering the complexity for direct measures, G can be estimated using prediction methods such as Gavrilovic's equation, which link production (W) and retention (R) sediment coefficients. This procedure was applied in Las Cañitas river basin (Comechingones Mountains). The influence of control variables was analyzed and hypothetical land uses and climatic conditions changes were taken into account. The Córdoba Pampean Mountains are formed by lower Precambrian- Paleozoic bedrock blocks with an asymmetrical, sub meridian arrangement and heights descending from 2600-650 m.a.s.l. towards the East and South. The studied basin is developed on the eastern slope of Comechingones Mountains and its piedmont area. Eight geomorphological environments characterized by a relief strongly controlled by lithological and topographic features were defined. Each unit was characterized considering the variables involved in Gavrilovic methodology such as vegetation cover and land use, among others. The obtained sediment yield value was 21.43 tons/ha/yr. The R average value was 0.15, indicating that 15% of the sediment yield is transported while the rest would be retained in the different sub-basins. Lithological-geomorphological features show great influence on the obtained G values, especially on W. The R parameter, dependent from basin morphometry, showed less variability. G values increments, associated with post-wildfire scenarios, showed that vegetation cover is a highly sensitive variable whose loss influences G in different ways according to the lithological-geomorphological setting. Considering the projected climatic scenarios (2020 and 2050) for the South-Central Córdoba region, with higher temperature and precipitation than present conditions, G increased approximately 9% and 20%, respectively.

Keywords: yield sediments, Pampean Ranges, wildfire, landuse, climatic change, Las Cañitas river

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 – Km 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. CP: X5804BYA. Tel: 0358-4676229. E-mail: mandreazzini@exa.unrc.edu.ar

² CONICET. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³ Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA), Ezeiza.

Recibido: 28/08/2013

Aceptado: 25/03/2014

INTRODUCCIÓN

La producción de sedimentos sintetiza la compleja interrelación entre los aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos y de uso del territorio de una cuenca y a su vez es una de las variables principales que definen la morfodinámica de los cursos colectores. Su conocimiento adquiere alto valor, en tanto permite efectuar diagnósticos y pronósticos del funcionamiento de los sistemas fluviales, tanto en condiciones naturales como intervenidas; sin embargo, su cuantificación es compleja.

Para definir propuestas de manejo de cuencas fluviales, ya sean de ordenamiento territorial o intervenciones directas en los cursos, resulta imprescindible conocer no sólo el volumen sino el comportamiento del material sólido generado en una cuenca, que es transportado luego por el sistema fluvial.

La cantidad de sedimentos entregados por una cuenca hidrológica en la unidad de tiempo se define como *producción de sedimentos*. No todo el material movilizado por procesos erosivos en una cuenca alcanza la red de drenaje, por lo que se considera como producción de sedimentos al volumen que se transporta hacia los colectores principales. En cuencas montañosas dicha producción se puede asociar fundamentalmente a dos fuentes, una relacionada a la *erosión superficial* generalizada del sustrato, y otra a los *procesos de remoción en masa* en sitios puntuales. La cantidad de sedimentos generados en una determinada cuenca hídrica y, consecuentemente, el grado de erosión de la misma, pueden evaluarse en forma indirecta a través de relevamientos topo-batimétricos de los vasos de lagos y embalses o mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua (COBINABE, 2010). Sin embargo, es un problema común de muchas cuencas la inexistencia de estaciones de aforos sólidos, de caracterizaciones granulométricas del material transportado en suspensión y por arrastre de fondo, y de datos de sedimentación en espejos de agua. Resulta necesario entonces utilizar técnicas de predicción para determinar órdenes de magnitud de la producción de sedimentos. En general, las formulaciones analizan la interacción de factores tales como clima, litología, cobertura vegetal, uso del suelo y topografía.

A pesar de la gran cantidad de metodologías existentes, la valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos, es imposible de asegurar debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos actuantes. Sin embargo, a pesar de las dificultades, pueden ajustarse ciertas metodologías con una precisión aceptable, que permita cumplir los objetivos perseguidos (UNESCO, 2010).

Entre ellas, la metodología de Gavrilovic (1972, 1988) ha sido empleada en diferentes contextos

geológicos, climáticos y de uso del territorio, con resultados en general aceptables. En numerosas cuencas de montaña ha podido ser validada a partir del contraste de los resultados con mediciones de caudales sólidos en suspensión y la comparación de batimetrías en embalses. Originalmente, este método fue desarrollado para ser aplicado en cuencas de montaña en el Sur y Sudeste de Yugoslavia, y luego fue utilizado en Suiza, Italia (Bazzoffi, 1985), Croacia (Globevnik *et al.* 2003), Grecia (Emmanouloudis *et al.* 2003), entre otros. Más recientemente diferentes autores utilizan esta metodología en conjunto con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Panagos *et al.* 2014), o para contrastar los resultados alcanzados con otros modelos, tales como el PSIAC (Pacific Southwest Inter Agency Committee) (Vezzoli *et al.* 2013), obteniendo un buen nivel de aproximación. Tosic *et al.* (2012) emplea la ecuación de Gavrilovic para comparar producción de sedimentos en relación a cambios importantes en el uso del territorio, como los ocurridos en la situación post-guerra en Bosnia y Herzegovina. En otros estudios, como los realizados por Abadi & Ahmadi (2011) en la cuenca Kasilian (Irán), se observa que la metodología de Gavrilovic sobrestima los datos medidos, aunque los autores sugieren que es posible mejorar los resultados utilizando los Sistemas de Información Geográfica para discretizar los parámetros intervinientes. En Argentina se ha empleado satisfactoriamente en cuencas del Noroeste (Brea *et al.* 1999; Olmos *et al.* 2008; COBINABE, 2010; Brea y Spalletti, 2010) y en la Patagonia (Spalletti y Brea, 2006). Beltramone *et al.* (2005) presentan estimaciones realizadas por este método para cuencas serranas de Córdoba. Diversos trabajos han utilizado esta metodología en combinación con técnicas de SIG, demostrando un gran potencial para la estimación de la erosión de suelos en las cuencas (Globevnik *et al.* 2003; Amini *et al.* 2010; Olmos *et al.* 2008; COBINABE, 2010; Brea y Spalletti, 2010; Tangestani, 2006, entre otros).

Específicamente, para los cursos que drenan las Sierras Pampeanas de Córdoba, en especial su extremo sur, aún son pocos los trabajos que se refieren a la producción y/o transporte de sedimentos y sus principales características (textura, composición, etc.) entre los que pueden citarse Corral *et al.* (2009), Ulla (2008) y Degiovanni *et al.* (2010), entre otros. Considerando los aspectos morfodinámicos e intervenciones realizadas y previstas en la red de drenaje de esta región, el conocimiento de todas estas variables y sus proyecciones futuras, resulta de primordial importancia para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

La mayoría de los cursos del sur de Córdoba nacen en la Sierra de Comechingones (Sierras Pampeanas) y se integran a la cuenca del Plata, ya sea natural o artificialmente (Degiovanni *et al.*, 2005, Blarasin *et al.*, 2005). Especialmente en la última centuria, en respuesta a cambios climáticos, de uso del territorio

e intervenciones ingenieriles, la red de drenaje en su conjunto se encuentra desajustada, dominando los procesos de incisión y erosión retrocedente, en las cuencas medias y bajas, con una alta tasa de transporte de sedimentos hacia las áreas de descarga, lo que promueve nuevas intervenciones (Blarasin *et al.*, 1993; Cantero *et al.*, 1998; Degiovanni, 2008; Degiovanni *et al.*, 2009; 2014).

En las cuencas altas se registran alteraciones vinculadas a sobrepastoreo, obras hidráulicas y, especialmente, incendios forestales. Esta problemática, muy común y recurrente en las sierras de Córdoba, tiene alto impacto en los caudales líquidos y sólidos de los cursos de agua. La mayoría de los años se registran numerosos focos de incendio (150-200), especialmente entre los meses de julio y noviembre, que involucran importantes áreas de bosques y pastizales naturales. En los años 2008, 2010 y 2013, se afectaron 61.541,65 has, 10.305 has (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2009 y 2011) y más de 50.000 has, respectivamente.

Por otra parte, considerando los cambios en las variables climáticas (precipitación y temperatura) proyectados para la región centro-Sur de Córdoba (AIACC, 2006) también es esperable que surjan modificaciones en la producción de sedimentos, por lo que resulta de interés evaluar también estos escenarios hipotéticos.

Así, el objetivo de este trabajo fue estimar la tasa de producción actual de sedimentos de una subcuenca representativa de la problemática descrita, analizar la influencia de las variables de control y efectuar estimaciones de producción considerando cambios en el uso del suelo y en las condiciones climáticas. Se seleccionó la subcuenca del río Las Cañitas, que integra el sistema del río Cuarto, uno de los más intervenidos de la región, especialmente en su cuenca media debido a que presenta extracción de áridos, rectificaciones y obras transversales, y en su cuenca baja por la existencia de canalizaciones.

Cuenca del río las cañitas: características generales

La cuenca de estudio se desarrolla sobre la vertiente oriental de la Sierra de Comechingones (Sierras Grandes) y sector pedemontano adyacente. Estas serranías forman parte de las Sierras Pampeanas de Córdoba, constituidas por bloques submeridianos de basamento cristalino precámbrico-paleozoico inferior, que conforman cordones montañosos de perfil transversal asimétrico. Su borde occidental es más abrupto y está representado por la escarpa de falla principal, mientras que el oriental constituye la pendiente estructural de menor pendiente. Sus alturas varían desde 2600 a 650 m.s.n.m., descendiendo hacia el Este y Sur.

La cuenca del río Las Cañitas forma parte de la cuenca alta del río Cuarto (provincia de Córdoba, Argentina), y drena una superficie de 267 Km² en el faldeo oriental de la Sierra de Comechingones (Fig. 1), entre los 1800 y los 650 m.s.n.m. Esta vertiente está fuertemente disectada por la red de drenaje, que preserva relictos de superficies de erosión en los sectores cumbres ("pampas de altura"). En el área serrana dominan rocas metamórficas poco alteradas y, subordinadamente, rocas miloníticas y graníticas. En el pedemonte, valles serranos y pampas de altura, se presentan sedimentos cuaternarios aluviales, coluviales y eólicos.

Desde el punto de vista geomorfológico se reconocieron ocho ambientes principales (Fig. 1), los cuales son caracterizados considerando además aquellas variables que intervienen en la metodología aplicada, como la vegetación y el suelo, entre otras. Las *pampas de altura* (I-A) presentan bajas pendientes, afloramientos rocosos parcialmente cubiertos por loess, suelos de alto desarrollo, erosión hídrica localizada, canales de lecho rocoso poco profundos, escasos materiales aluviales y alta cobertura de pastizales. La *superficie metamórfica central* (I-B) exhibe un 40 a 60% de superficie rocosa, pendientes moderadas-altas, cursos muy incididos de lecho rocoso y aluvión subordinado, procesos gravitatorios e hídricos muy localizados asociados a depósitos coluviales, parcialmente edafizados y cubiertos de pastizales. El *ambiente granítico* (I-C) posee alto porcentaje de afloramientos de roca alterada (arenización) y erosión activa, cursos con mayor material aluvial, y cubierta de pastizales discontinua. El *sector serrano oriental y bloque pedemontano* (I-D y E) presenta menor pendiente y áreas de afloramientos, mayor agradación en valles, mayor cobertura arbórea-arbustiva y pastizales, mejor desarrollo edáfico, y cárcavas locales en ejes de valles. La *planicie de agradación pedemontana* (IIA, B, C) está incidida por los ríos principales, que desarrollaron cursos meandriformes hasta su semiconfinamiento en secuencias cohesivas. Los procesos de erosión hídrica son moderados a leves.

El clima de la región es de tipo Templado Subhúmedo, disminuyendo las precipitaciones medias anuales (PMA) y la temperatura media anual (TMA) desde la zona pedemontana (Estación Las Tapias, 728 m.s.n.m., con 910.9 mm y 14 °C, Fig. 1) hacia las pampas de altura (Estación La Cumbre, 1500 m.s.n.m., con 760.8 mm y 11.9 °C, Fig. 1). Las lluvias son estacionales, concentrándose el 80% en el periodo primavera-verano.

Respecto al uso del suelo, el sector serrano se destina a ganadería extensiva, con mayor sobrecarga de ganado vacuno en las pampas de altura. En el sector pedemontano predomina la agricultura.

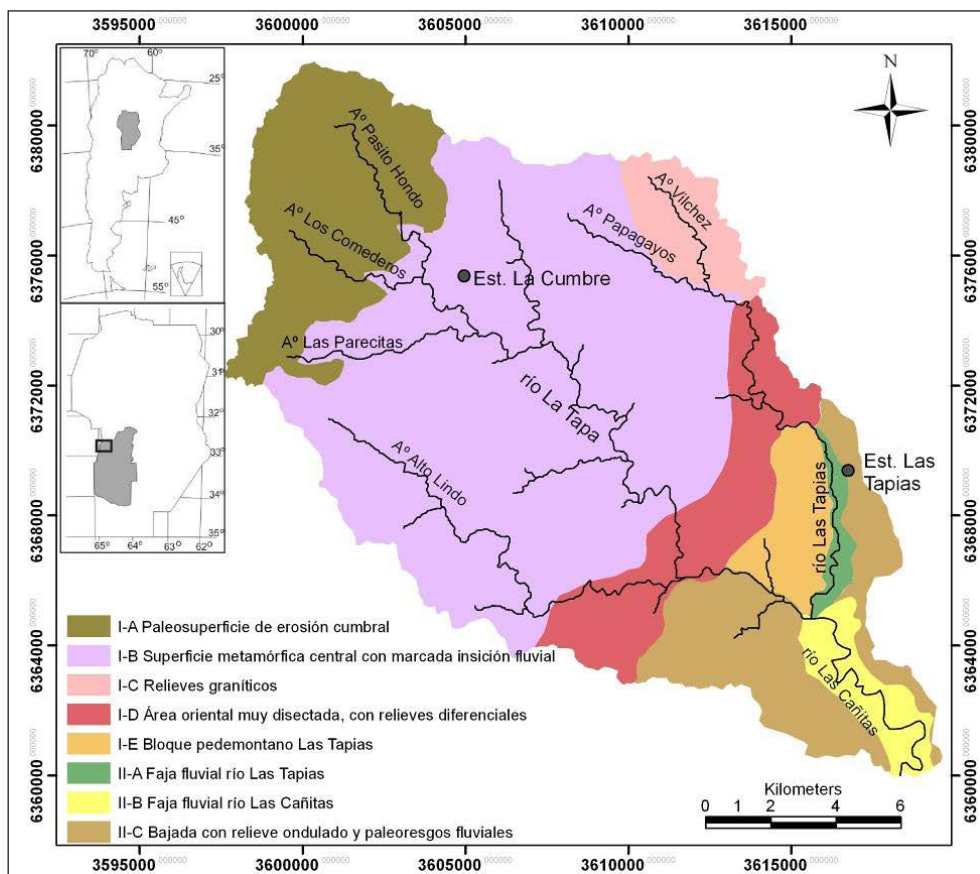


Figura1. Ubicación de la cuenca Las Cañitas y mapa geomorfológico. Se sitúan además las estaciones meteorológicas La Cumbre y Las Tapias.

METODOLOGÍA APLICADA

En este trabajo se aplicó el método de Gavrilovic (1972, 1988), que considera el volumen de sedimentos “G” (en m³/año) producido por erosión y transportado a la sección de cierre de una cuenca, como el producto de la producción media anual de sedimento por erosión superficial “W” y el coeficiente de retención de sedimentos “R”.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \text{ (m}^3\text{/año)} \quad (1)$$

Donde:

T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = [(t/10) + 0.1]^{1/2} \quad (2)$$

Siendo *t* la temperatura promedio anual (°C), *h* la precipitación media anual (mm/año) y *F* la superficie de la cuenca (km²). *Z* es el coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + 1)^{1/2} \quad (3)$$

Los valores de los coeficientes *X* (entre 0.1 y 1), *Y* (entre 0.2 y 2) y *φ* (entre 0.1 y 1) son propuestos por

el autor de la metodología y representan respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de resistencia a la erosión del suelo considerando sus características geolitológicas, y el estado erosivo de la cuenca. *I* es el gradiente de la pendiente superficial (en %).

Por su parte, el coeficiente *R* indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial. La ecuación para su cálculo según Zemljic (1971) es la siguiente:

$$R = [O \cdot D^{1/2} \cdot (L+Li)] / (L+10) \cdot F \quad (4)$$

Donde *O* es el perímetro de la cuenca (km), *D* la diferencia de nivel media en la cuenca (cota media menos cota mínima, en km), *Li* la longitud total de los afluentes fluviales laterales (km), *L* la longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km) y *F* la superficie de la cuenca (km²).

Toda la información fue trabajada en ambiente SIG, obteniendo el valor de “G” en 47 subcuencas.

El valor del coeficiente *X* se asignó a partir de un mapa de cobertura vegetal y uso del suelo, elaborado desde una imagen Landsat 5 de fecha 31/12/08, y tomando como base el trabajo de Suárez (1993) e

imágenes Google Earth. Se realizó una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, obteniendo 9 clases.

Para definir la distribución espacial de los parámetros Y y ϕ , se utilizó la información litológica y geomorfológica, la de las características edáficas y la de los procesos activos observados en la cuenca, basadas en datos de campo, trabajos antecedentes e información cartográfica disponible.

El mapa de pendientes (en %) fue obtenido a partir de un modelo de elevación digital de la banda X del Shuttle Radar Topographic Mission (25 m de resolución), disponible gratuitamente en EOWEB-NG (2013).

La distribución de las lluvias y temperatura en función de la cota se obtuvo por regresión, utilizando los datos de las estaciones Las Tapias y La Cumbre (Fig. 1).

Desde el modelo de elevación digital y empleando herramientas SIG, se obtuvo la red de drenaje y un total de 47 subcuencas, en general de orden 3. A partir de ello se calcularon las áreas y perímetros de las subcuencas y la longitud de los cursos principales y tributarios.

Se calculó el valor de W para las distintas subcuencas, y finalmente se obtuvo el volumen de sedimento G ($m^3/año$) para cada una de ellas y para la cuenca completa.

Luego de obtenida la producción de sedimentos para las condiciones climáticas y de uso del suelo actual, se realizaron cálculos para compararla con la producción en escenarios hipotéticos de: 1) situación post-incendios forestales, y 2) incremento en la precipitación y temperatura media anual.

En el primer caso y teniendo en cuenta la heterogeneidad espacial de las variables que controlan los procesos erosivos, se consideró conveniente evaluar las modificaciones en la producción total de sedimentos, si el incendio afectara a diferentes unidades geomorfológicas. Se asumió un incendio hipotético de 550 has en los ambientes de relieves graníticos (I-C), la unidad metamórfica central (I-B), y las pampas de altura (I-A), siendo el área quemada igual dentro de cada ambiente. Fueron modificados únicamente los valores del coeficiente X del método de Gavrilovic en los tres casos analizados, y dentro de esas áreas no se incluyeron los afloramientos rocosos.

En el segundo caso se empleó información sobre escenarios de cambio climático proyectados para la región centro-sur de la provincia de Córdoba, disponibles en AIACC (2006). En dicho estudio se construyeron escenarios climáticos base a partir de datos del período 1961-1990 de las variables temperatura y precipitación, y escenarios de cambio climático para el 2020 y 2050. Estos autores utilizaron las salidas de tres Modelos Climáticos Globales (MCG): EH4TR98 del European Center for Medium Range Weather Forecast, GFDLTR90 del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory, y HAD3TR00 del

Centro Hadley; y escenarios de emisión A2 (mayor desarrollo económico) y B2 (mayor sustentabilidad ambiental). Para el presente trabajo se tomaron solamente los resultados obtenidos con el primer MCG (denominados escenarios E-A2 y E-B2), ya que fueron los que proyectaron los máximos incrementos en precipitación, y sólo se evaluaron cambios en la producción de sedimentos modificando las variables climáticas en la metodología de Gavrilovic.

Para el caso del escenario E-A2, la PMA de la serie Las Tapias-Los Chañares y de la Estación La Cumbre fue incrementada en un 6.57% y la TMA en 0.07 °C para 2020, mientras que para 2050, la PMA se incrementó en un 16.94% y la TMA en 0.64 °C.

En el escenario E-B2, la PMA de las series utilizadas fue incrementada en un 6.10% y la TMA en 0.19 °C para el escenario 2020. Para el 2050, la TMA se incrementó en un 13.14% y la TMA en 0.55 °C. Si bien el registro de la Estación La Cumbre es de corta duración, se lo utilizó ya que son datos medidos en la cuenca, de modo que los resultados obtenidos surgen de considerar estos datos como representativos de un período de mayor longitud (el evaluado como escenario de base).

RESULTADOS

Producción de sedimentos para las condiciones actuales

La Figura 2 presenta el mapa de clases de vegetación (incluyendo las áreas correspondientes a afloramientos rocosos y cauces fluviales) y la Figura 3 el mapa del coeficiente X para el área de estudio. Se asignaron los menores valores de X a las unidades Bosque (que es de tipo alto y abierto en este caso, con vegetación arbustiva y herbácea en la base), Pradera (pastizales con más de 70% de cobertura), Mallines (cobertura del 90% de herbáceas, dominando pastizales), y Estepa Arbustiva (cobertura herbácea con monte bajo). Valores intermedios se asignaron a la unidad Estepa Herbácea, que posee un 60-70 % de cobertura herbácea y 30-40 % de afloramientos rocosos, y a las Áreas Cultivadas, donde la cobertura dada por los cultivos genera menos protección que en los casos anteriores. Los valores mayores se indicaron para los sectores donde dominan los afloramientos rocosos (60% o más) y para los cauces fluviales, siendo en ambos casos la cobertura vegetal mínima o ausente.

Para el coeficiente Y (Fig. 4), se asignaron los valores más altos a los suelos arenoso-limosos con bajo desarrollo edáfico del sector extraserrano, y a los desarrollados en la faja fluvial del río Las Cañitas. A los suelos de las pampas de altura, si bien son loésicos, se les otorgó un valor menor dado su mayor contenido en arcillas y materia orgánica, su fuerte estructura y su mayor espesor. Valores intermedios se seleccionaron para los suelos de escaso desarrollo, sobre materiales heterogéneos, presentes en laderas de variada pendiente dentro del ambiente gra-

nítico y metamórfico. Finalmente, los más resistentes se asociaron a los suelos de los mallines (resistencia debido a la saturación), sedimentos aluviales de granulometría muy gruesa de los cauces y a los aflora-

mientos rocosos (con una mayor resistencia en las metamorfitas, dado que la roca se encuentra con muy bajo grado de alteración).

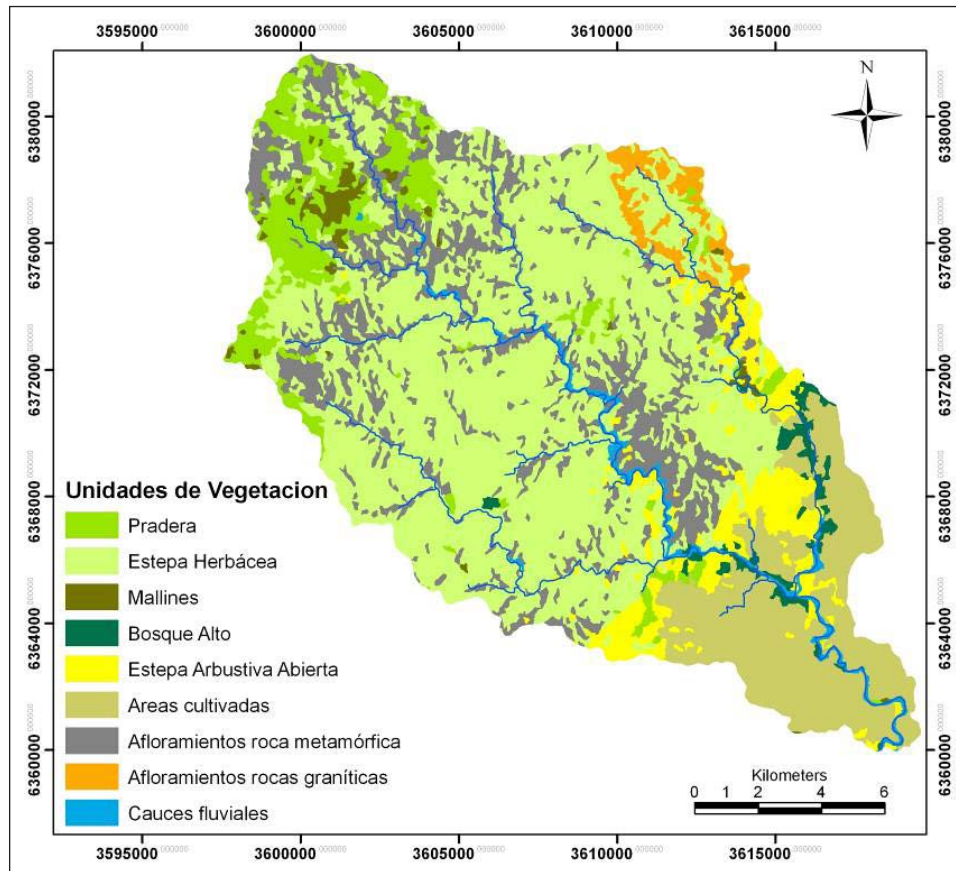


Figura 2. Mapa con las clases de vegetación definidas para la cuenca del río Las Cañitas.

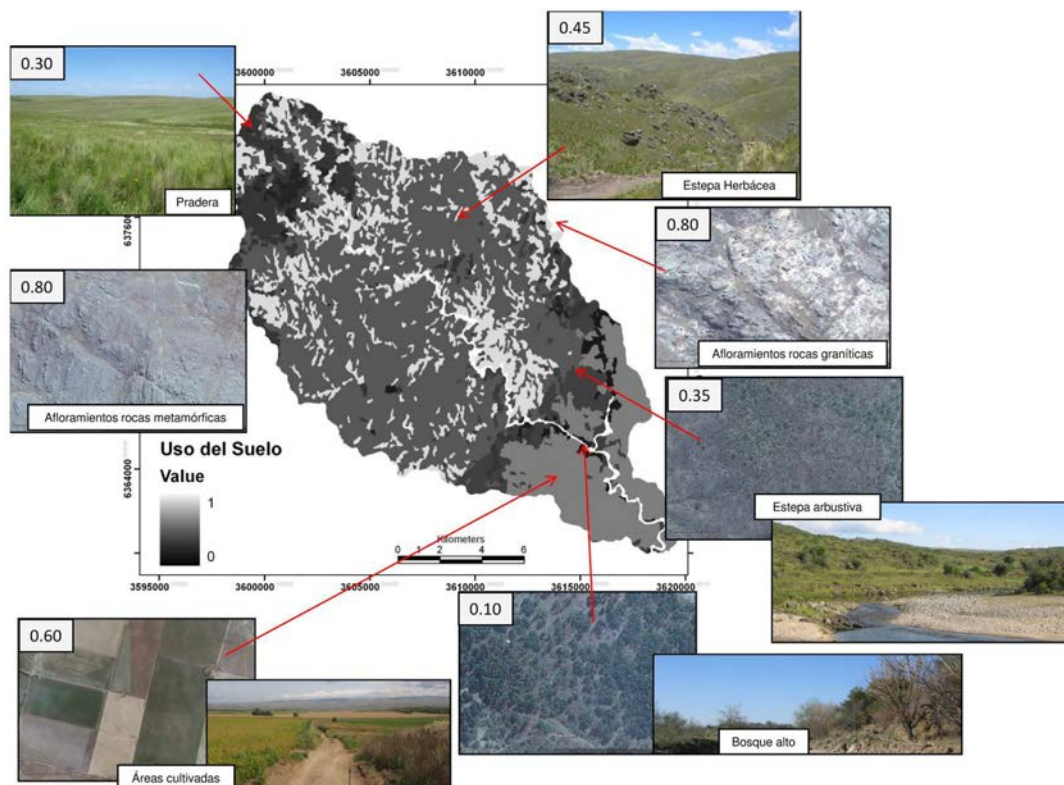


Figura 3. Mapa del coeficiente X de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

En el mapa para el coeficiente ϕ (Fig. 5) las unidades con menor presencia de rasgos erosivos son las vinculadas al ambiente metamórfico, donde los afloramientos se encuentran prácticamente inalterados, y en las laderas de los valles se observa mínima erosión, asociada a pequeñas cárcavas que en general se encuentran estabilizadas. Desde las laderas de mayor pendiente llegan al canal aportes por procesos gravitatorios muy localizados. Valores bajos también fueron asignados a los sectores de Bosque y Estepa Arbustiva, asociados al sector más oriental de la sierra, donde localmente se desarrollan cárcavas en los ejes y laderas de los valles con relleno sedimentario. En el sector extraserrano, también los procesos de erosión hídrica en surcos y cárcavas están muy localizados, especialmente en los bordes de terrazas fluviales, por lo que el coeficiente asignado fue intermedio a bajo. Entre las unidades con mayor evidencia de procesos de erosión se incluyeron algunos sectores en las pampas de altura, donde se han desarrollado cárcavas de cientos de metros de longitud, aunque en la actualidad se encuentran parcialmente vegetadas y estabilizadas, como puede

comprobarse comparando su extensión y desarrollo en fotografías aéreas del año 1970 e imágenes satelitales actuales. En el ambiente granítico, los rasgos erosivos son más importantes, y es posible observar el grado de alteración que presenta la roca expuesta, que lleva a la arenización de la misma. Se observan rasgos de erosión laminar y rills, además de cárcavas en los materiales sueltos que conforman las laderas.

Por otra parte, el mapa de pendientes para la cuenca se muestra en la Figura 6a. La pampa de altura, el sector serrano oriental y el extraserrano muestran los menores valores, mientras que el sector serrano central los más elevados, en especial la unidad metamórfica, con abruptas laderas asociadas al marcado proceso de incisión fluvial, controlado por estructuras de dirección NO-SE y ENE-OSO.

Por su parte, la Figura 6b muestra el modelo de elevación del terreno utilizado y las subcuencas y cursos fluviales principales, a partir de los cuales se calcularon los parámetros para determinar el coeficiente "R".

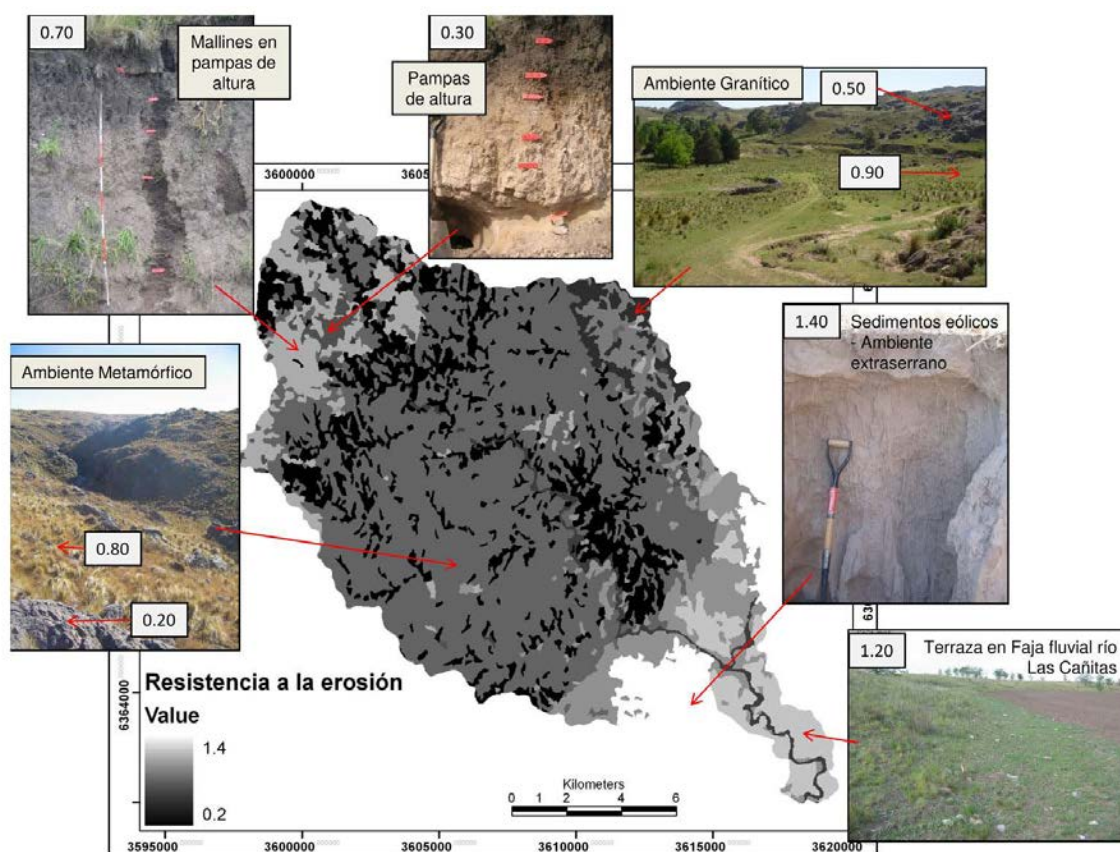


Figura 4. Mapa del coeficiente Y de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

El valor de producción de sedimentos obtenido, sumando la producción de las 47 subcuencas fue de 216220.41 m³/año, lo que da un total de 21.43 tn/ha/año. Según esta metodología, el valor promedio de R dio 0.15, indicando que del total de la producción de sedimentos en la cuenca, el 15% pasa a transporte y el resto quedaría retenido dentro de la misma, en las

distintas subcuencas. La Figura 7 y Tabla 1 muestran la distribución espacial de la producción de sedimentos en los diferentes ambientes geomorfológicos de la cuenca.

Como puede observarse hay una marcada variación de la producción de sedimentos, con valores máxi-

mos en el ambiente granítico, controlado fundamentalmente por los coeficientes γ y ϕ , que evidencian el mayor grado de meteorización de las rocas graníticas, la presencia de procesos erosivos activos

y una cubierta de pastizales más discontinua. Este ambiente con sólo el 4.7 % del área total aporta el 8.4 % de G , al igual que otras unidades que triplican el área.

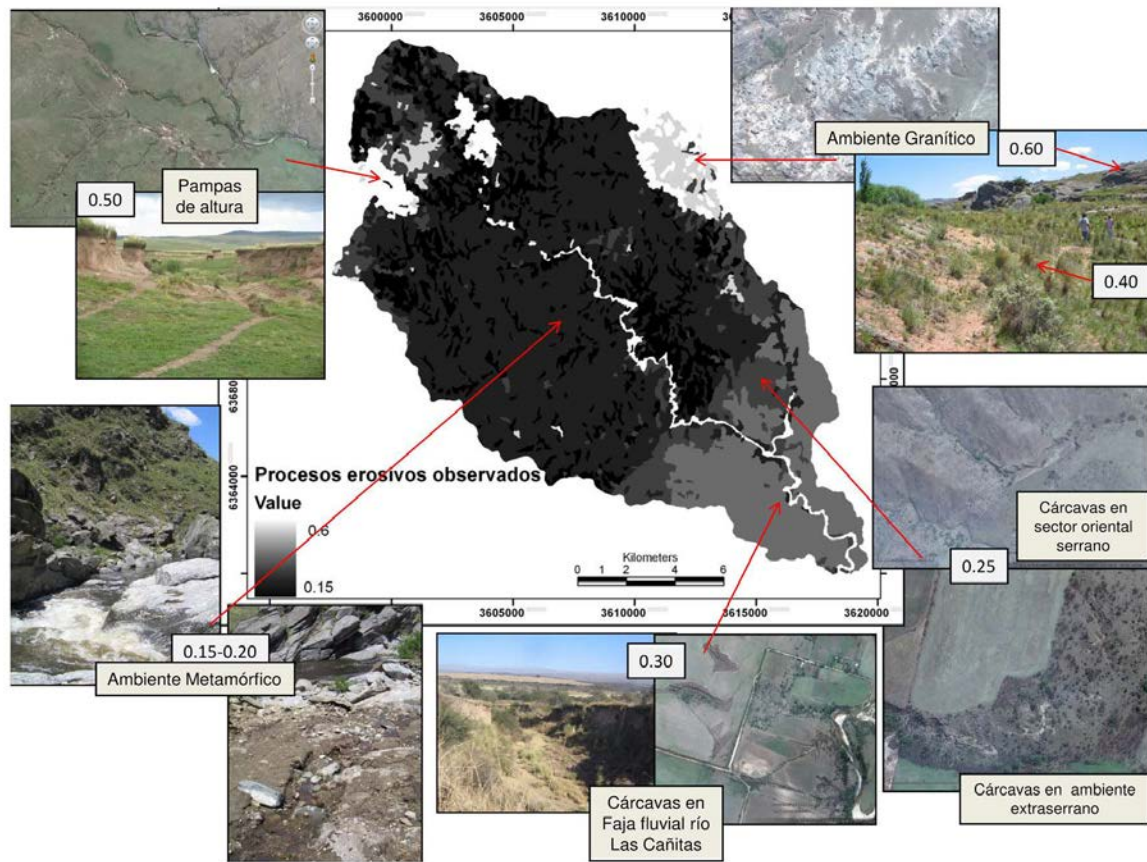


Figura 5. Mapa del coeficiente ϕ de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

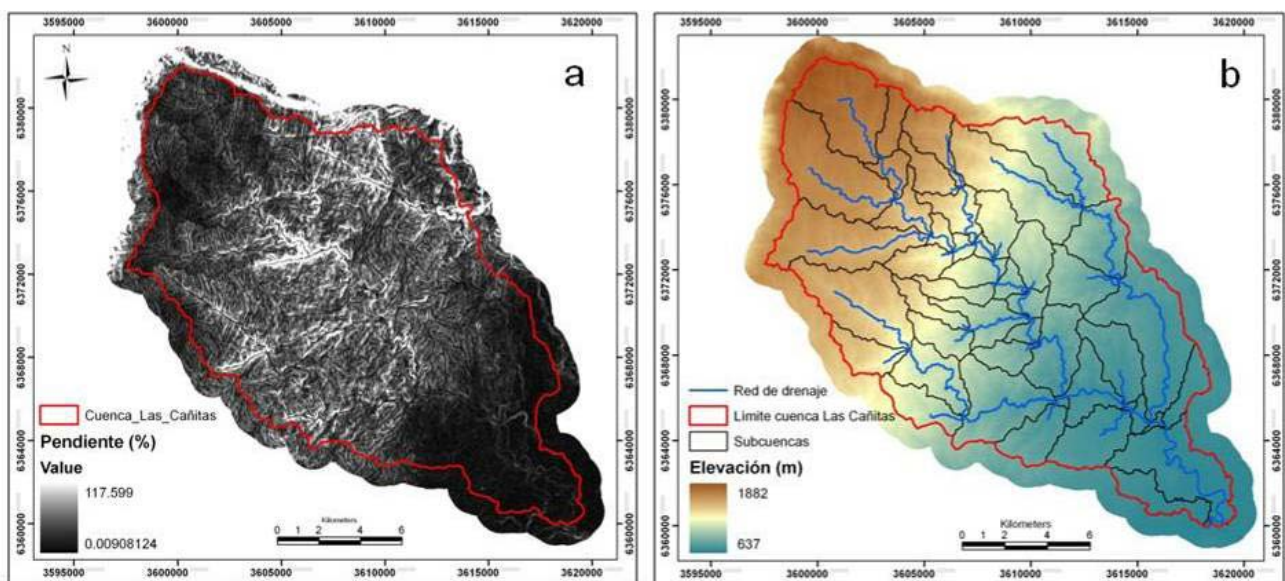


Figura 6. a- Mapa de pendientes y b- Modelo de elevación digital, red de drenaje principal y subcuencas definidas para la cuenca Las Cañitas.

Las unidades con menor producción son las del sector serrano oriental (I-D y E) y pampas de altura (I-A) dado sus menores pendientes, desarrollo edáfico y cobertura vegetal. Se destaca la baja producción de la unidad I-A, asociada a suelos con alto contenido en materia orgánica y arcillas (y saturados en los mallines), e importante cobertura de pastizales. La zona extraserrana muestra una producción intermedia, donde los mayores valores se asocian a suelos limosos-arenosos muy

finos, de moderado desarrollo y uso agrícola (II-C). Finalmente, la unidad I-B con una producción intermedia, aporta casi el 67% de G debido a su mayor superficie, y es la que define el aporte medio de la cuenca (21.4 tn/ha/año). En este caso la distribución interna de G es muy variable, y los más altos valores se asocian a las laderas de moderada a alta pendiente de los valles incididos, cubiertas de derrubios con suelos de alta infiltración y poco profundos.

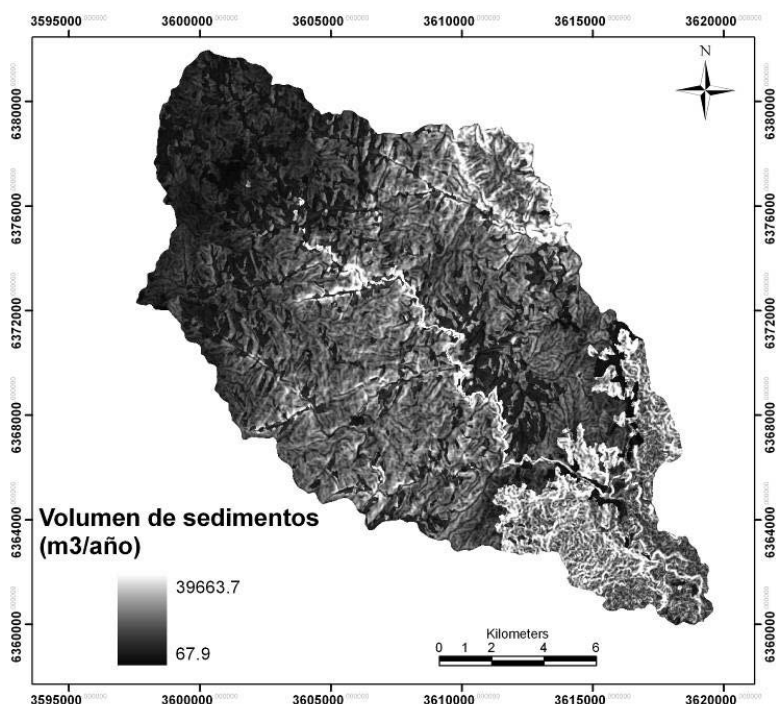


Figura 7. Mapa de la tasa anual promedio de producción de sedimentos por erosión superficial cuenca Las Cañitas (m³/año).

Tabla 1. Cuenca Las Cañitas. Producción de sedimentos en condiciones actuales (G) y post-incendio (G_i =promedio en cada unidad x total cuenca, G_{it} =total cuenca x promedio en cada unidad). Se incluye el valor promedio de R de cada unidad.

Unidad Geomorfológica	Área	R promedio	G tn/ha/año - %	G_i	G_{it}	% cambio G_i vs. G
Total cuenca	100	0.16	21.4-100	---	---	---
I-A	13.2	0.16	9.8-6	15	22	53.1
I-B	57.3	0.18	25-66.9	26	22.4	6
IC	4.7	0.2	38.9-8.4	66	22.8	69.9
I-D+I-E	13.3	0.1	14.3-8.8	19	22.2	32.9
II-A, ByC	11.7	0.1	18-9.8	---	---	---

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS PARA ESCENARIOS HIPOTÉTICOS

Incendios forestales

En la Tabla 1 se presentan los valores de producción de sedimentos para una situación post-incendios forestales en la cuenca. Si bien no son significativos

los cambios en la producción total de la cuenca (G_{it}), al considerar incendios en diferentes unidades, surgen incrementos mayores, especialmente en I-A y I-C, demostrando la alta sensibilidad de estos ambientes a la pérdida de vegetación.

En el caso de la pampa de altura, con un 13% del área quemada, la producción se incrementa en más

del 50%. La pérdida de los pastizales de alta cobertura deja expuestos suelos desarrollados sobre materiales loessoides, los cuales a pesar de la baja pendiente que posee esta unidad, muestran alta sensibilidad a los procesos erosivos. Si bien estos suelos poseen buena estructura y alto contenido en materia orgánica, debe tenerse en cuenta que los incendios también pueden afectar las propiedades físicas del suelo (agregación-estructura), convirtiéndose en muchas oportunidades en suelos hidrofóbicos, con lo que se potencia la tasa de erosión. Para el caso de la unidad granítica, con un 44% de área afectada, el valor de G aumenta un 70%, demostrando que esta unidad posee un alto potencial de producción al

alterar la protección del suelo dada por la cobertura vegetal, ya que los otros coeficientes de la metodología poseen valores intermedios a altos.

Como ejemplo, en el año 2011 y 2013 ocurrieron incendios en la cuenca Las Cañitas (Fig. 8a), y el contenido de sólidos en suspensión de los arroyos se incrementó durante el periodo de lluvias siguiente (Fig. 8b). El caudal sólido medido en el río Las Tapa, a la salida del área serrana, para caudales del orden de 0,7-0,8 m³/seg varió de 26,9 a 92 gr/seg en situaciones normales y con posterioridad a los incendios del 2011, respectivamente. Para el caso del río Las Tapias, la concentración de sólidos en suspensión varió de 0-0,07 gr/L en condiciones normales a más de 5 gr/L para crecidas post-incendios 2013 (Fig. 8b).

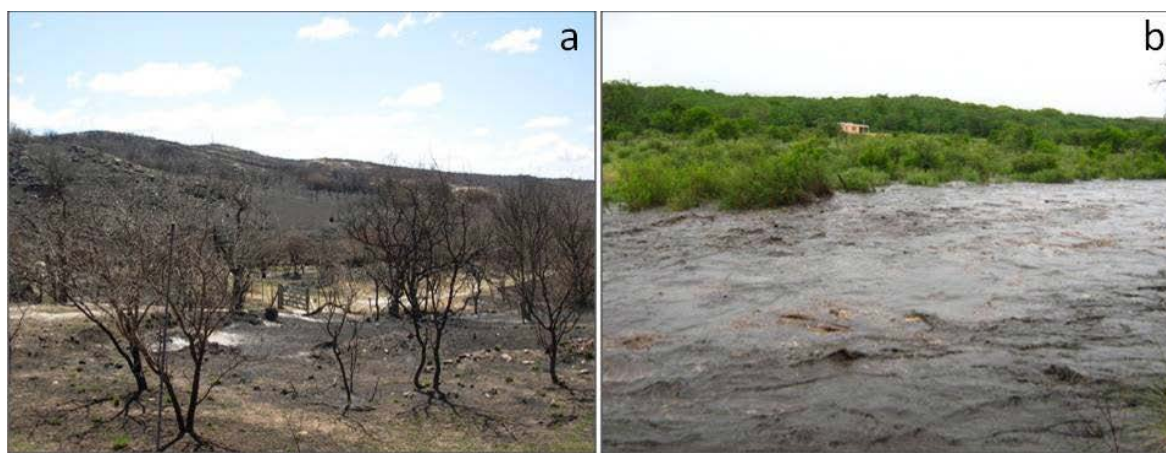


Figura 8. a) Vista de un sector de la subcuenca del río Las Tapias afectado por los incendios del 2013. b) Incremento de sólidos en suspensión en el río Las Tapias a la salida del sector serrano, en una crecida posterior a los incendios.

Cambio climático

Estos escenarios también mostraron incrementos en la producción de sedimentos (Tabla 2). Como puede observarse, la producción para el 2020 aumenta de manera similar en ambos escenarios, en algo más del 9% respecto a la condición actual. Aquí no se han marcado diferencias apreciables ya que la variación en la temperatura en el escenario A2 es muy pequeña. Para el 2050 los valores se incrementan aproximadamente en un 20% respecto a la producción total actual de la cuenca y se observan más diferencias entre escenarios, correspondiendo la mayor producción al E-A2.

Para comparar los cambios en la producción dentro de las distintas unidades geomorfológicas, a modo de ejemplo se muestran los porcentajes de cambio del escenario E-A2 para 2050 respecto a las condiciones actuales (Tabla 2), observándose que las mayores diferencias son para el sector serrano oriental y extraserrano. Tal como lo muestra la ecuación (1), al no modificar ninguno de los demás factores del método, las mayores producciones se asocian a las mayores precipitaciones y temperaturas, en este caso, en el sector oriental de la cuenca.

Tabla 2. Producción de sedimentos (tn/ha/año) cuenca Las Cañitas en los 4 escenarios climáticos proyectados.

Unidad Geomorfológica	G	E-A2 2020	E-A2 2050	E-B2 2020	E-B2 2050	% cambio E-A2 2050 respecto a G
I-A	9.8	10.4	11.7	10.5	11.5	19.4
I-B	25	27.3	30.6	27.4	29.8	22.4
IC	38.9	42.8	46.2	42.6	46.4	18.8
I-D+I-E	14.3	15.8	17.7	15.8	17.2	23.8
II-A, ByC	18	19.9	22.4	19.9	21.7	24.4
Total cuenca	21.4	23.4	26.2	23.4	25.5	
% cambio de la producción total	---	9.3	22.4	9.4	19.2	

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los aspectos litológico-geomorfológicos tienen una marcada influencia en la producción de sedimentos en la cuen-

ca, especialmente sobre el parámetro W. El parámetro R, dependiente de la morfometría, mostró menor variabilidad. Además se observó que la distribución areal de las lluvias y temperaturas tiene menor incidencia para explicar variaciones en dicha producción.

Con relación a los escenarios evaluados, globalmente la producción de sedimentos se incrementa para los escenarios climáticos proyectados, aunque sería conveniente analizar también las variaciones de X y ϕ ante tales cambios, ya que las características de la cobertura vegetal y uso del suelo como así también la presencia de rasgos erosivos en la cuenca posiblemente, se verán afectados.

Por otra parte, los incrementos en la producción de sedimentos asociados a incendios forestales mostraron que en general la cobertura vegetal es una variable de alta sensibilidad, y que su pérdida incide diferencialmente según el contexto litológico-geomorfológico afectado.

Si bien los resultados obtenidos son preliminares, demuestran la importancia de discretizar el análisis de la producción de sedimentos en una cuenca determinada, para lograr una mayor representatividad de las variaciones de los parámetros que controlan la producción y el almacenamiento de sedimentos.

Finalmente, a pesar del carácter estimativo de la metodología empleada en el presente trabajo, los valores asignados a los diferentes coeficientes evaluados en la metodología de Gavrilovic surgen de un detallado tratamiento de la información disponible, apoyado en un importante relevamiento de campo, por lo cual se considera que los resultados obtenidos son consistentes y que este análisis podría ser extendido a otras cuencas de características similares en Sierras Pampeanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aalto, R., Dunne, T. & J.L. Guyot 2006. Geomorphic controls on Andean denudation rates. *The Journal of Geology* (114): 85-99. Abadi, I.Z. & H. Ahmadi, 2011. Comparison of EPM and geomorphology methods for erosion and sediment yield assessment in Kasilian Watershed, Mazandaran Province, Iran. *DESERT* 16: 103-109.

Amini, S., Rafiei, B., Khodabakhsh, S. & M. Heydari, 2010. Estimation of erosion and sediment yield of Ekbatan Dam drainage basin with EPM, using GIS. *Iranian Journal of Earth Sciences* (2): 173-180.

AIACC - Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change -. 2006. Vulnerability and Adaptation to Climate Variability and Change: The Case of Farmers in Mexico and Argentina. Final Report Project N° LA29. 173 p.

Beltramone, C., Barbeito, O., Ambrosino, S. & R. Ugarte. 2005. Determinación del área fuente y producción de sedimento anual para la cuenca superior

del río Cuarto. Pcia. de Córdoba. Actas del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata. 581-585.

Blarasin, M., Cantú, M., Degiovanni, S., Becker, A. & C. Eric, 1993. Estudio geoambiental de un área de llanura loésica sometida a alta presión de uso agrícola: el caso de General Deheza, Córdoba. XII Congreso Geológico Argentino, Mendoza. Tomo VI: 274-283.

Blarasin M., Degiovanni S., Cabrera A. & Villegas M. 2005. Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental. 1ª ed.- Universidad nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Argentina, 346 p.

Brea, D. & P. Spalletti. 2010. Generación y transporte de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. Documento Técnico N° 22, 52-74. En Brea, J.D. & F. Balocchi (Eds.). Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. Volumen 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

Cantero, A., M. Cantú, J. Cisneros, J. Cantero, M. Blarasin, V. Becerra, J. González, A. Degiovanni, H. Gil, J. de Prada, S. Degiovanni, C. Cholaky, M. Villegas, A. Cabrera & C. Eric, 1998. Las tierras y aguas del Sur de Córdoba: propuestas para un manejo sustentable. Ed. UNRC. ISBN: 950-665-101-9.

COBINABE - Comisión Binacional para el desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija-. 2010. Generación y Transporte de Sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. 230 p.

Corral, M., Baldissoni, M., Farías, H., Rodríguez, A. & F. López. 2009. Balance sedimentológico simplificado para el río Cuarto, Córdoba. Actas RIOS 2009: IV Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina.

Degiovanni, S. 2008. Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del A° Achiras-del Gato, como base para su gestión sustentable. Tesis Doctoral, UNRC. Inédita. 597 pág.- Río Cuarto-Córdoba.

Degiovanni, S., N. Doffo & M. Villegas, 2009. Rejuvenecimiento de la red de drenaje del Sur de Córdoba como consecuencia del cambio climático durante la última centuria. En: Geomorfología y Cambio Climático- Capítulo 6. Sayago y Collantes (Eds.), IN-GEMA (Universidad Nacional de Tucumán)- MAGNA Ediciones. 20 pág.

Degiovanni, S., Andreazzini, J., Villegas, M., Eric, C. & Doffo, N. 2010. Caracterización de la carga en suspensión de los arroyos del sur de Córdoba. Implicancias morfodinámicas y ambientales, 185-192. En Varni, M., Entraigas, I. & L. Vives (Eds.). Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina, 1301 p.

- Degiovanni, S., Echevarría, K., Andreazzini, J. & N. Doffo, 2014. Los sistemas fluviales del sur de Córdoba: alteraciones históricas, procesos de ajuste y consecuencias ambientales. Actas CD, XIX Congreso Geológico Argentino. Córdoba. 2 p.
- EOWEB- Earth Observation Center-. German Remote Sensing Data Center, Alemania, 01/09/2013. <http://eoweb.dlr.de:8080/>, e-mail: helpdesk-dfd@dlr.de
- Gavrilovic, S. 1972. Inzenjering o bujicnim tokovima i eroziji. Izgradnja, specijalno izdanje, 261-264. Beograd, Serbia and Montenegro.
- Gavrilovic, Z., 1988. The use of an empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. In: International conference of river regime, 18–20 May. John Wiley and Sons, Wallingford, Chichester, pp. 411–422.
- INA, 2007. Proyecto “Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la cuenca alta del Río Pilcomayo”: determinación de la producción de sedimentos por erosión superficial en la cuenca alta del Río Pilcomayo. INA (Instituto Nacional del Agua, Argentina).
- Olmos, L.A., Spalletti, P., Farías, H.D. & M.T. Pilán 2008. Verificación de modelos de producción de sedimentos en cuencas del NO Argentino. Revista de Ingeniería del Agua, Vol. 15, N°2.
- Panagos, P., Karydas, C., Ballabio, C. e I. Gitas, 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 27 (2014) 147–155
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina. 2009. Estadística de incendios forestales 2008. 01/09/13, www.ambiente.gob.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202008/incend-2008-%20correg3/Documento%20completo.pdf
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina. 2011. Estadística de incendios forestales 2010, 01/09/13, www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202010/Documento%20completo.PDF.
- Suarez, S.A. 1993. Mapeo fisionómico-estructural de la vegetación natural del Dpto. Río Cuarto. III Achiras y Las Cañitas. Informe final Beca de Iniciación Científica. Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Argentina.
- Tangestani, H. 2006. Comparison EPM and PSIAC Model in Erosion and Sediment Yield Assessment with GIS tools in Afzar Sub-Catchments, Fars Province, Iran, Elsevier Magazine, Vol. 27 (5): 585-597.
- Tosic, R., Dragicevic, S., Zlatic, M., Todosijevic, M. & S. Kostadinov, 2012. The impact of socio-demographic changes on land use and soil erosion (Case study: Ukrina river catchment). Географски разгledi (46):69-78.
- Ulla, J.P. 2008. Variación de parámetros sedimentológicos y su relación con la descarga e intervenciones de cauce en la cuenca media alta del río Chocancharava, Córdoba. Tesis de Licenciatura. Dpto. de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 159 p.
- UNESCO. 2010. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. Volumen 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Documento Técnico N° 22. Brea, J.D. & F. Balocchi (Eds.), 138 p.
- Vezzoli, G., Ghielmi, G., Mondaca, G., Resentini, A., Villarroel, E.K., Padoan, M. & P. Gentile 2013. Quantifying modern erosion rates and river-sediment contamination in the Bolivian Andes. Journal of South American Earth Sciences 45: 42-55.
- Zemljic M. 1971. Calcul du debit solide. Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. International Symposium Interpretevent, Villach, Austria.

CAMBIOS MORFOLÓGICOS DEL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO PARANÁ EN ARGENTINA, SIGLO XIX A LA ACTUALIDAD

MORPHOLOGICAL CHANGES OF THE MAIN CHANNEL OF THE PARANÁ RIVER IN ARGENTINA, FROM NINETEENTH CENTURY TO THE PRESENT

Franco S. Sobrero¹, Carlos G. Ramonell¹ y Ma. Soledad Pereira¹

Resumen

El cauce principal del Río Paraná entre las ciudades argentinas de Corrientes y Rosario presenta una morfología algo heterogénea y muy dinámica, a lo largo de sus cerca 800 km de longitud. La cartografía histórica existente en este tramo es de gran utilidad para justipreciar su evolución morfológica espacial y temporal. Potencialmente, sectores sucesivos del río están afectados por factores que los condicionan, tales como el caudal, la erodabilidad de las márgenes, etc., y en este trabajo se segmentó el tramo completo atendiendo a indicadores de esas variables, como ser: cauces secundarios que implican derivaciones significativas de caudales, tipos de sedimentos que aparecen en las márgenes y sus cercanías, pendiente del cauce, entre otras. De esta manera se reconocieron 13 segmentos del cauce en el tramo, cuyas longitudes oscilan entre los 35 km y los 70 km. En ellos se evaluaron diversos parámetros morfológicos en 5 momentos de los últimos casi 160 años (1847, 1913, 1939, 1969 y 2011), a saber: ancho efectivo, profundidad y sinuosidad del thalweg, y parámetro de entrelazamiento. Los mecanismos generales de formación y reemplazo de islas en los 13 segmentos también fueron analizados, distinguiendo frecuencias características entre 3 tipos de formas de generación de islas. Se encontró que los segmentos poseen, en general, valores medios distintos entre sí, y variables en el tiempo. Existe una clara tendencia a la disminución del ancho efectivo promedio en la dirección del escurrimiento, sostenida en todo el período considerado, junto al aumento de la profundidad media del thalweg, que se registra sólo para los últimos 500 km del tramo. Un único segmento resultó tener márgenes estables en relación a los demás, aunque en él ocurrió la mayor tasa de recambio de islas. La resistencia a la erosión de las márgenes en ese subtramo, limitando la movilidad y meandricación del thalweg que caracteriza la morfodinámica básica del cauce del Paraná, explicaría tales cualidades.

Palabras Claves: Grandes ríos, Río Paraná, cambio morfológico fluvial

Abstract

The main channel of the Paraná River between Corrientes and Rosario has a heterogeneous and dynamic morphology in all its 800 km-length. Historical charts are useful in the analysis of its morphologic evolution, in time and space. Each sector of the river is affected by control variables, such as discharge, bank erodability, etc.; we segmented the overall length by using indicators of those variables: major secondary channels implying flow diversion, sediment types at or near channel banks, etc. Thirteen channel segments were recognized in this way, ranging between 35 and 70 km-length. Some morphological parameters of the main channel were evaluated in five periods of the last 160 years (1847, 1913, 1939, 1969 y 2011): effective width, thalweg depth, thalweg sinuosity and braiding index. The development and replacement of channel islands were also analyzed, according to different models of island constructions. Each channel segment had characteristic mean values of the morphological parameters, and non-uniform temporally. There is a clear trend in decreasing mean effective channel width in a downstream direction throughout the entire period; average thalweg depth increase downstream also, but only in the lower 500 km of the entire reach. Only one segment had stable banks as compared with the others, although the replacement of the channel islands by erosion and sedimentation processes was the most important of the reach. The low bank erodability in such segment, limiting the capacity of the channel thalweg for shifting and meandering, would explain such properties.

Keywords: Large rivers, Paraná River, fluvial morphological changes

INTRODUCCIÓN

El Río Paraná es uno de los grandes sistemas fluviales del planeta, y comparte con los de esta categoría un patrón de cauce múltiple ("anabranching") en torno a islas de dispar tamaño, lecho arenoso y baja pendiente, del orden del cm/km (Latrubesse, 2008). Su cauce principal aguas abajo de la confluencia del

Río Paraguay (en donde se inicia el "tramo medio" del río, Fig. 1) ha sido objeto de varios estudios de evolución morfológica, entre los que se destacan los de Cabral (1973), Papolizio et al. (1980), Toniolo (1999), Ramonell et al. (2000), Amsler et al. (2005), Castro (2007) y FICH (2008, 2012), por ser los más

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (Universidad Nacional del Litoral). francosobrero@gmail.com; cgramonell@yahoo.com.ar; nacionisol@yahoo.com.ar

extensivos tanto en la longitud de los tramos considerados como en las series de tiempo analizadas, que llegan a cubrir gran parte del siglo XX.

Una parte de esos trabajos vincularon los cambios históricos detectados con variaciones en el caudal formativo o dominante del río (e.g., Amsler et al., 2005), que a lo largo del siglo XX osciló entre los aproximadamente 24.400 y 16.400 m³/s en las partes del río donde el flujo está concentrado en un cauce único o de varios brazos relativamente cortos, y los 15.400 a 12.500 m³/s en las secciones en las que el cauce principal coexiste con brazos secundarios

importantes, de gran longitud y persistencia a través del tiempo.

En tal sentido, es bien conocido que los cauces aluviales suelen ser afectados por más controles en la dirección del escurrimiento, que pueden condicionar sus dimensiones y cambios morfológicos de manera diferencial en segmentos sucesivos. Por tal razón, resulta apropiado segmentarlos en subtramos, a fin de indagar sobre el grado de influencia de la suma de controles en la morfodinámica fluvial, o de individualizar, siguiendo fines aplicados, las partes morfológicamente más estables o inestables de un río.

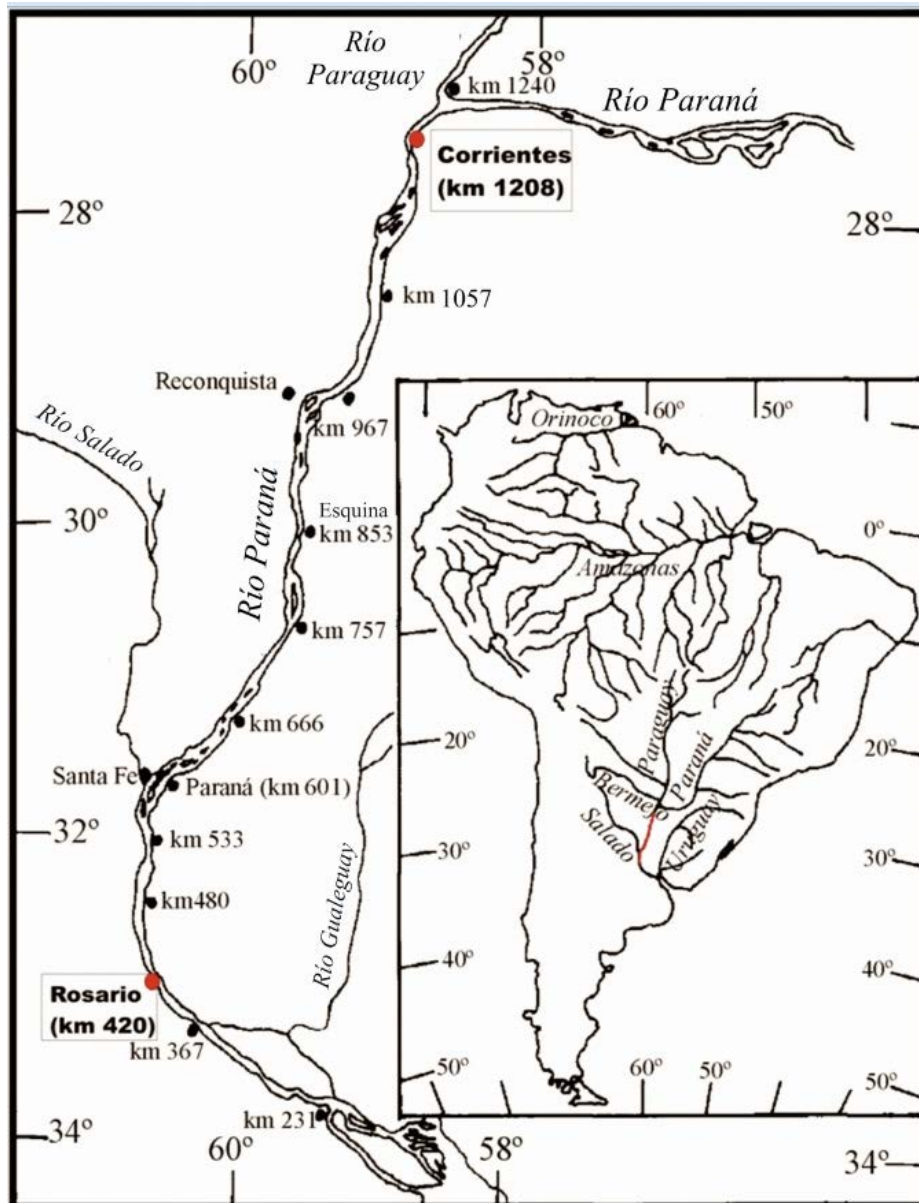


Figura 1. Ubicación geográfica del tramo medio del Río Paraná, entre los km 1208 (Corrientes) y 420 (Rosario) de la ruta de navegación fluvial.

En el caso del Paraná existen muy pocas propuestas de segmentación, siendo una de las primeras la de Iriondo (1988), basada exclusivamente en cambios de la pendiente media del cauce principal. En este trabajo se presenta una nueva diferenciación de segmentos atendiendo a una franja más amplia

de factores de control, a partir de la cual se evaluó la evolución de algunos parámetros morfológicos desde cartografía de pequeña escala (1:50.000 a 1:100.000), la más antigua correspondiente a mediados del siglo XIX, hasta la actualidad.

Ese material permitió cuantificar magnitudes del cauce en la totalidad del tramo medio a la vez, lo que se complementó con análisis de los cambios morfológicos desde imágenes satélite de los últimos casi 40 años, siendo la caracterización temporo-espacial de estas variables, discriminadas en los segmentos reconocidos, el principal objetivo de esta contribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los registros cartográficos utilizados como fuente básica de información fueron:

- Año 1847: Mapa de navegación confeccionado por el Capitán Sullivan a bordo del HMS Philomel, desde Corrientes hasta Rosario, escala 1:84.000.
- Año 1913: Planos de navegación del Río Paraná entre Corrientes y Esquina (Km 853), y Esquina y la Desembocadura. Ministerio de Obras Públicas de la Nación (MOP). Dirección General de Obras Hidráulicas. Comisión del Paraná Inferior, escala 1:100.000.
- Año 1939: Río Paraná entre la Desembocadura y la Confluencia del Río Paraguay (11 láminas). MOP. Dirección General de Navegación y Puertos, escala 1:100.000.
- Año 1969: Cartas de navegación del Río Paraná (desde Corrientes hasta Rosario). Secretaría de Obras Públicas. Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables, escala 1:50.000.
- Año 2011: Mosaico compuesto por 5 imágenes Landsat 5, tomadas los días 15 y 26 de Enero de 2011, georreferenciadas con errores absolutos menores a 1 píxel (30 m x 30 m). Los datos planimétricos extraídos del mosaico fueron complementados con valores de profundidad obtenidos de relevamientos batimétricos efectuados por FICH en 2004, 2005, 2006 y 2011, y otros facilitados por el Departamento Paraná Medio de la Dirección Nacional de Vías Navegables del año 2010.

Cabe aclarar que las cartas de navegación correspondientes a 1913, 1939 y 1969 son compilaciones que involucran relevamientos efectuados en tales años y hasta de ca. 10-15 años antes, manteniéndose en este trabajo la referencia del año de edición, sólo por fines prácticos. Igualmente, para el registro de "2011" se conserva tal denominación, hecha ya la aclaración sobre los años en que se midieron las profundidades.

Con el fin de determinar si los registros cartográficos fueron confeccionados con un grado de precisión que permitiera obtener datos confiables, se evaluaron sus propiedades intrínsecas en dos etapas: en primer lugar se midieron sobre la cartografía histórica distancias entre localidades y entre ellas y puntos que hayan perdurado en el tiempo, tales como barrancas poco susceptibles a la erosión (las denomi-

nadas "puntas" del río), para luego compararlas con las obtenidas del mosaico georreferenciado de imágenes Landsat y con cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, utilizadas como contralor; en base a estas comparaciones se calcularon los errores relativos de las distancias.

En segundo lugar se procedió a la medición de azimuts de las alineaciones entre los puntos mencionados previamente para verificar la fiabilidad de los canevas geográficos y controlar sus escalas en relación a la de la cartografía. Se verificó por esta vías que la cartografía resultaba confiable, ya que los máximos errores en las distancias planimétricas fueron del 13 % en el registro de 1847, e inferiores al 9 % en los demás.

A partir de ello se evaluaron los siguientes parámetros morfológicos para cada "año":

- Ancho efectivo del cauce principal (sin considerar islas centrales), B_0 . Medido cada 2 km, considerando cauce principal al brazo del río que contenía al thalweg, más todos los brazos conectados en ambos extremos con él, que fueran relativamente cortos y de anchos individuales iguales o mayores a tres veces el ancho de la isla adyacente.
- Profundidad del thalweg, h_0 . Registrada puntualmente cada 2 km, a lo largo de la línea del thalweg. En las cartas de 1969 se detectaron valores de profundidad puntual anómalos para lo conocido del río, por lo que el parámetro no fue tenido en cuenta para tal año.
- Sinuosidad del thalweg, $Pt = Lt/Lr$.
- Parámetro de entrelazamiento, $PE = \sum Li/Lt$ (s. Mosley, 1981).

Siendo:

Lt: Longitud del thalweg.

Lr: Longitud rectificada del cauce principal.

Li: Longitud total de los brazos adyacentes al del thalweg. Este valor se obtuvo de la suma de las longitudes de todos aquellos canales relativamente cortos del cauce principal que cumplen la condición de que su ancho es mayor o igual a 3 veces el ancho de la isla adyacente.

De este modo, 4400 datos fueron medidos desde la cartografía de pequeña escala.

Paralelamente a las mediciones se hicieron observaciones cualitativas sobre la naturaleza de los cambios detectados cuantitativamente, tanto en el tiempo como en la longitud completa del tramo, con énfasis en evaluar las transformaciones de las islas del cauce principal desde 1913 en adelante.

Con relación a la tramificación del cauce se tuvieron en cuenta tres variables que condicionan la morfodinámica fluvial, ampliamente consensuadas en la literatura: el caudal líquido, la erodabilidad del material de la margen, y la pendiente, tanto la regional de la planicie aluvial como la general relativa al cauce. Dado que la información antecedente sobre estos

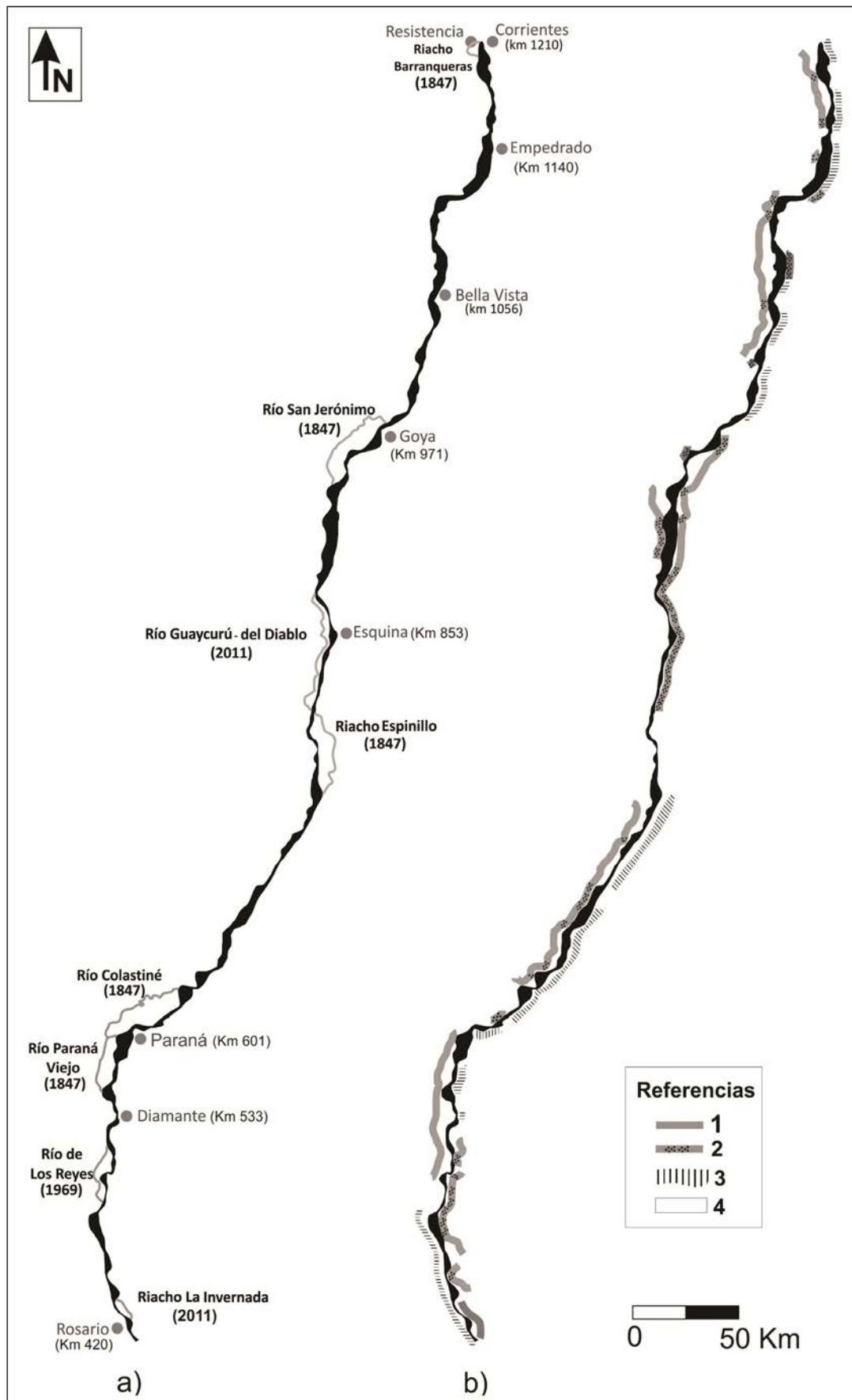


Figura 2. a) Ubicación de los brazos secundarios considerados en la delimitación de segmentos del cauce principal (los datos de años se explican en el texto). b) Tipo de material de las márgenes: 1: Material aluvial cohesivo (resistente a la erosión) ubicado distante de la margen actual del cauce. 2: Material aluvial cohesivo (resistente) que constituye la margen actual. 3: Margen con formaciones geológicas antiguas (del Terciario y Cuaternario Inferior), resistentes. 4: Material aluvial friable (arenas y/o finos de depositación moderna).

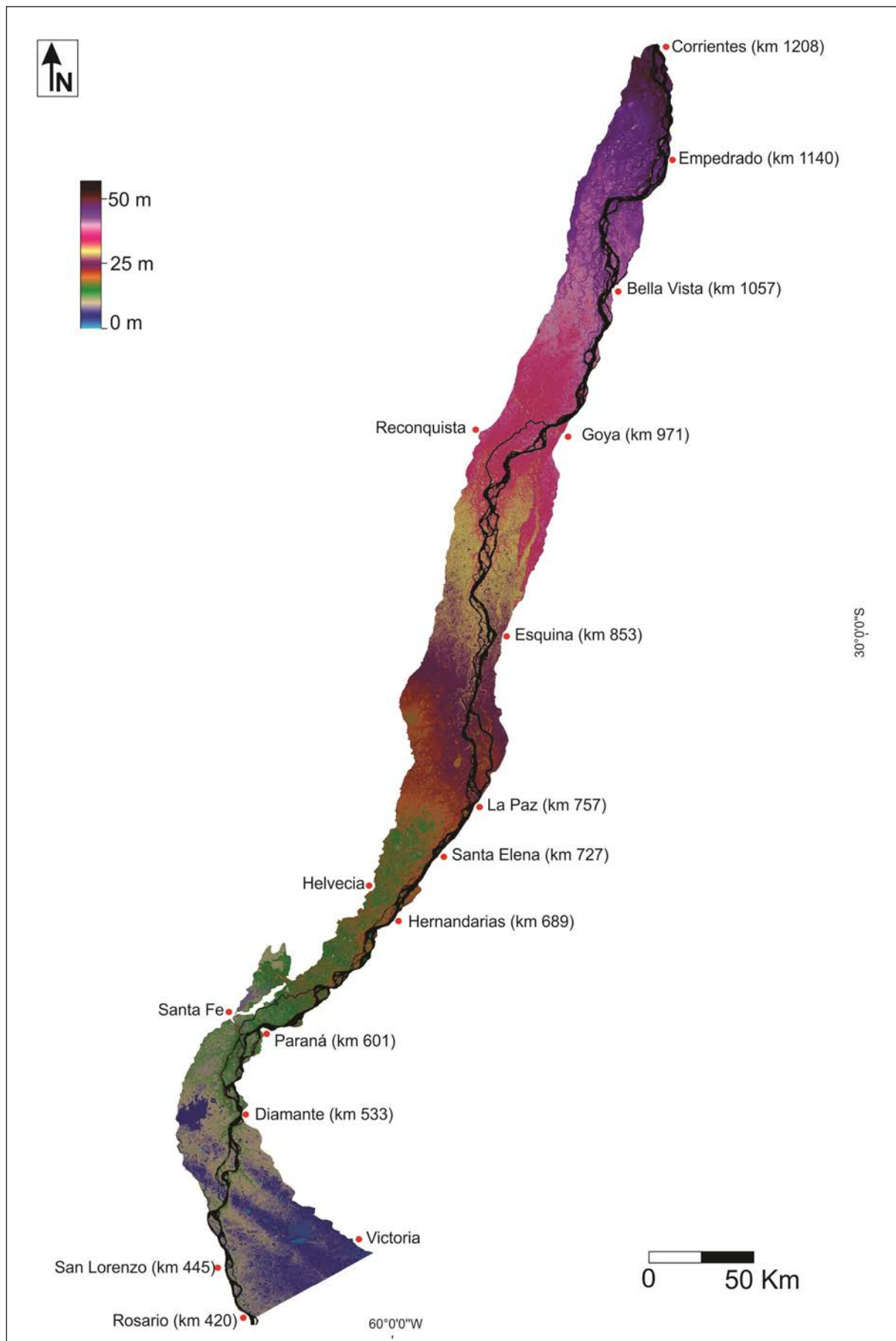


Figura 3. Modelo digital de terreno de la planicie de inundación del Río Paraná Medio.

parámetros es escueta en toda la longitud considerada del río, se adoptaron indicadores de esas variables de control.

Así, y atendiendo a que el tramo medio no posee aportes significativos de caudales líquidos desde los tributarios a su valle (Giacosa et al., 2000), se identificaron subtramos con variaciones de caudal por la presencia de brazos secundarios que nacen y desembocan en el cauce principal luego de recorridos “largos”, esto es, manteniéndose independientes del mismo por longitudes que comúnmente son de varias decenas de kilómetros (Fig. 2a).

Parte de los cauces secundarios delineados en la Fig. 2a ya estaban configurados como tales a mediados del siglo XIX (Ramonell et al., 2000), mientras que unos pocos adquirieron su “independencia” del cauce principal en tiempos posteriores. Entre estos últimos pueden mencionarse el Río de Los Reyes, distinguible del principal hacia 1969, y el Riacho Guaycurú – del Diablo, en vías de formación hacia la actualidad. La característica común en todos ellos es que el *thalweg* del río no ha intervenido directamente en la morfología de sus trazas desde hace décadas, y que sus caudales encauzados son aproximadamente uniformes a lo largo de sus trazas, como se deduce de la persistencia de sus anchos, habida cuenta la falta de aforos sistemáticos en la mayoría de ellos.

Los años de registros cartográficos a partir de los cuales estos brazos se consideraron independientes del cauce principal fueron, nombrándolos de norte a sur (entre paréntesis se consignan sus anchos característicos):

- Riacho Barranqueras: existente hacia 1847 (ha mermado su ancho a lo largo del siglo XX, hasta los 120 a 150 m actuales).
- Riacho San Jerónimo: existente hacia 1847 (anchos frecuentes: 550 a 600 m).
- Riacho Guaycurú - del Diablo: 2011 (600 m).
- Riacho Espinillo: existente hacia 1847 (ca. 700 m).
- Riacho Correntoso: configurado hacia 1913, posee también escasa longitud (ancho frecuente: 300 m).
- Río Colastiné: existente hacia 1847 (350 m).
- Río Paraná Viejo: existente hacia 1847 (500 m).
- Río de Los Reyes: configurado como brazo “independiente” hacia 1969 (500 m).

Por su parte, la diferente resistencia a la erosión de las márgenes fue vinculada a la presencia de barrancas con formaciones geológicas del Terciario y Cuaternario Inferior, junto a sedimentos cohesivos de la planicie aluvial (limos y arcillas de ambiente fluvial depositados en lagunas o pantanos), todos ellos resistentes en comparación a los materiales arenosos y/o finos de sedimentación más moderna, de características friables.

La Fig. 2b muestra la distribución actual de tales márgenes en el tramo medio, y fue elaborada en base a

reconocimientos de campo, interpretaciones de imágenes aéreas y evaluación de antecedentes geológicos y de geotecnia realizadas por los coautores. Dado que los sedimentos aluviales resistentes en la planicie se encuentran tanto formando las márgenes del río como también alejados de ellas (con materiales friables entre medio), en la Fig. 2b se marcaron sus posiciones en el interior de la planicie cuando yacían a cierta distancia del cauce principal, de pocos kilómetros.

En cuanto a las pendientes, se tuvieron en cuenta para la segmentación el “perfil hidráulico” del cauce elaborado por Soldano (1947) más datos del extinto Ministerio de Obras Públicas de la Nación, junto a un modelo digital de elevación del terreno de la planicie de inundación que se reproduce en Fig. 3.

Además de los indicadores mencionados, se consideraron límites adicionales debido a la existencia de rasgos conspicuos de la planicie de inundación del río, como ser las zonas donde cambian sustancialmente la frecuencia y tamaño de lagunas fluviales (ca. del km 970, Minotti et al., 2013), o en la que existen resaltos topográficos singulares en contrapendiente (km 690 y km 640, Ramonell et al., 2000) y marcadas variaciones de anchura de la planicie (Fig. 3).

En torno a esas partes distintivas del río es dable esperar modificaciones del flujo de inundación que complementan a las del escurrimiento encauzado a través de sus brazos secundarios, como las demostradas recientemente por Ramonell y Cristina (2014), quienes detectaron efectos de concentración del flujo de crecida en el cauce principal en Hernandarias (km 689), y fenómenos de remanso en esa parte más estrecha y con resaltos de la planicie.

En este marco, es importante aclarar que los límites de los tramos definidos a partir de todas estas propiedades son aproximados, habida cuenta que los indicadores de las variables de control tienen diferente persistencia temporal: por caso, la embocadura del Río San Jerónimo (km 970, Fig. 2) cambió su ubicación en decenas de kilómetros durante los 160 años estudiados, o el Riacho Guaycurú – del Diablo, cuya “independencia” del brazo que contiene al *thalweg* ha sido adquirida últimamente.

En otras palabras, la segmentación por caudal se realizó tanto considerando la situación hidrográfica actual (2011) como la devenida de las zonas con grandes lagunas, que existen como áreas bajas de la planicie desde hace centurias o aún mucho más.

RESULTADOS

El primer resultado alcanzado fue la segmentación del cauce principal en 13 tramos (Fig. 4), cuyas longitudes oscilan entre los 35 km y 70 km aproximadamente. En la Tabla 1 se han resumido datos relativos a los indicadores de las variables de control potencial en cada tramo, que complementan los datos de cambios de pendiente regional que se visualizan en el mapa de la Fig. 3.

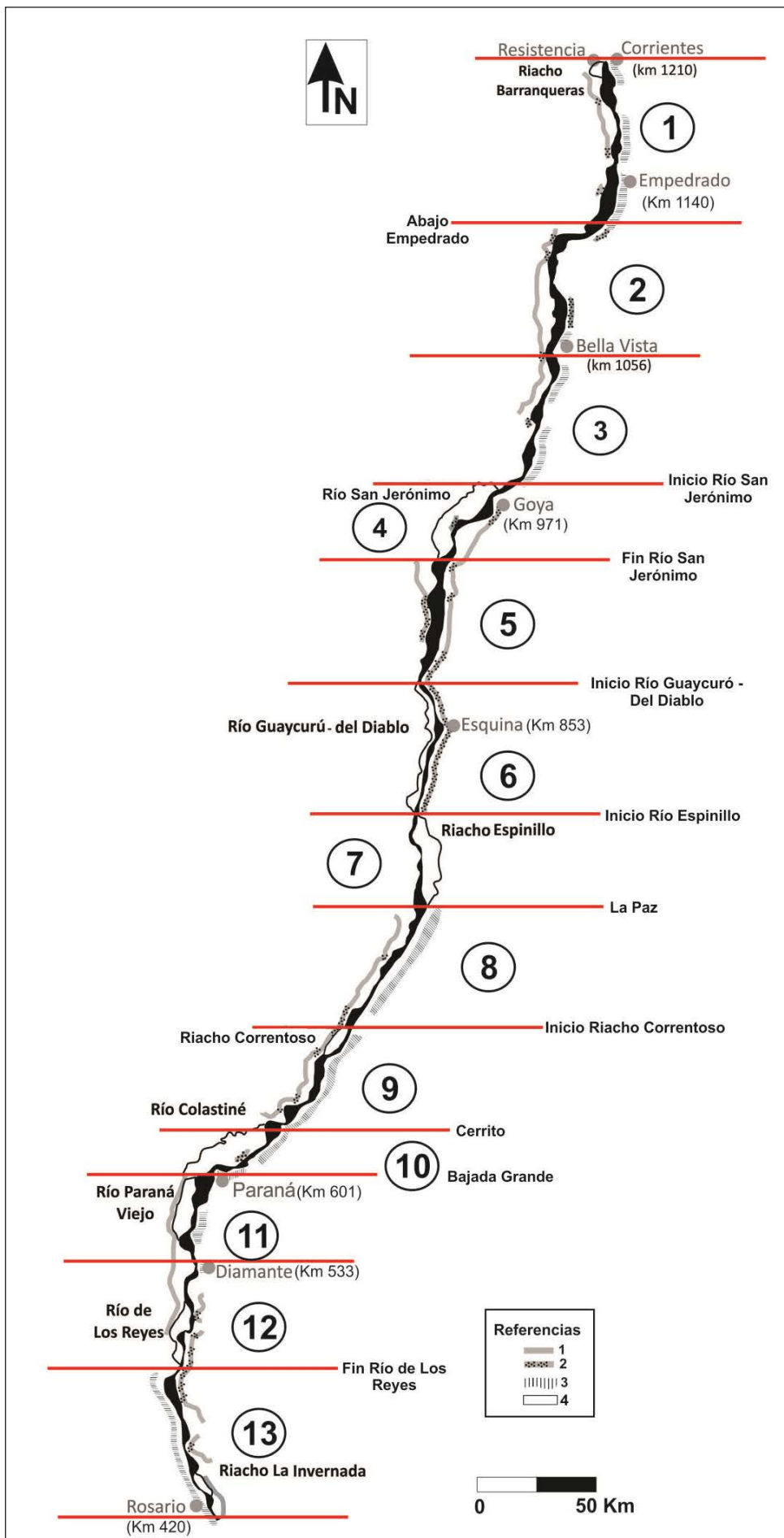


Figura 4. Segmentos diferenciados del cauce principal en el tramo medio.

Tabla 1.- Síntesis de variables de control morfológico en los segmentos del cauce principal del Paraná (Fig. 4). El material de la margen se consigna como porcentaje de la longitud de los segmentos; Tc y Qi: formaciones geológicas del Terciario y Cuaternario Inferior; Aluv. Fr. – Coh.: Aluvio friable – cohesivo.

Seg- mento	Lon- gitud (km)	Material de la margen (%)						Derivaciones significativas de Caudal	Pendiente del cauce (m/km)	Singulari- dades de la Planicie de Inundación
		Margen Izquierda			Margen Derecha					
		Tc y Qi	Aluv. Fr.	Aluv. Coh.	Tc y Qi	Aluv. Fr.	Aluv. Coh.			
1	67	67	24	9	-	88	12		0,039	Baja densidad de lagunas
2	60	11	68	22	-	86	14	-	0,060	
3	67	67	33	-	-	90	10	-		
4	45	-	85	15	-	92	8	Río San Jerónimo	0,064	Presencia de grandes lagunas y bajíos
5	53	-	71	29	-	64	36	-		
6	55	-	-	100	-	100	-	Río Guaycurú – del Diablo	0,058	
7	43	14	86	-	-	100	-	Riacho Espinillo		
8	58	77	23	-	-	80	20	-	0,043	
9	48	100	-	-	-	79	21		0,039	Salto topográfico
10	35	72	28	-	-	85	15	Río Colastiné		Salto topográfico
11	43	37	63	-	-	47	53	Río Paraná Viejo	0,041	Presencia de grandes lagunas y bajíos
12	44	6	57	37	-	92	8	Río de Los Reyes	0,039	
13	55	-	80	20	100	-	-	Riacho La Invernada	0,025	

La medición de los parámetros morfológicos del cauce principal de la manera expuesta en el ítem previo, permitió obtener valores promedio de ellos en

cada tramo para los cinco “años” estudiados, con los cuales se confeccionaron las gráficas de la Figura 5 (a-d).

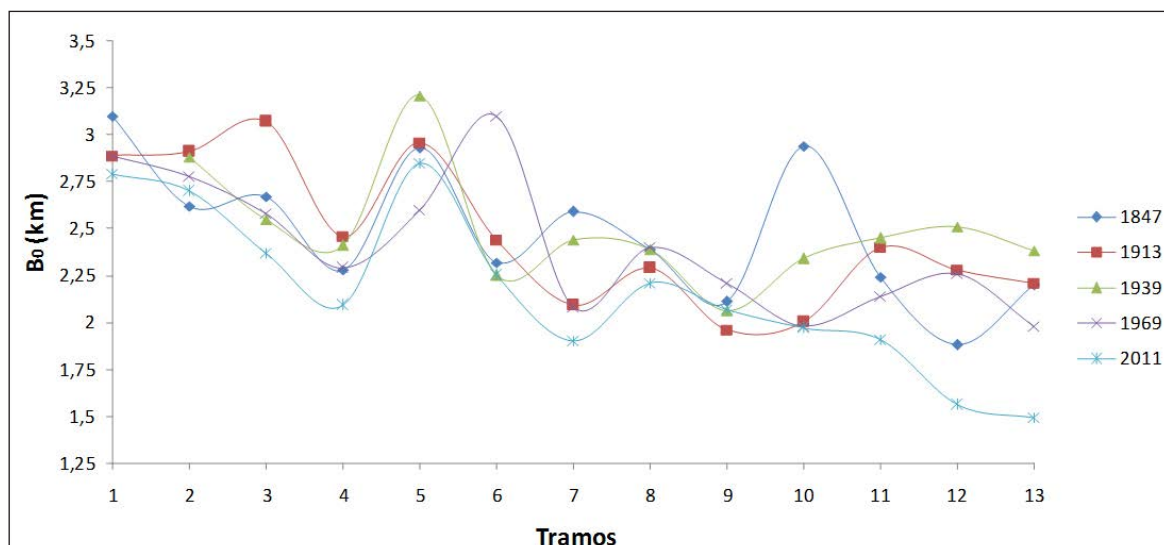


Figura 5a. Ancho efectivo medio, B_0 , por tramos, del cauce principal.

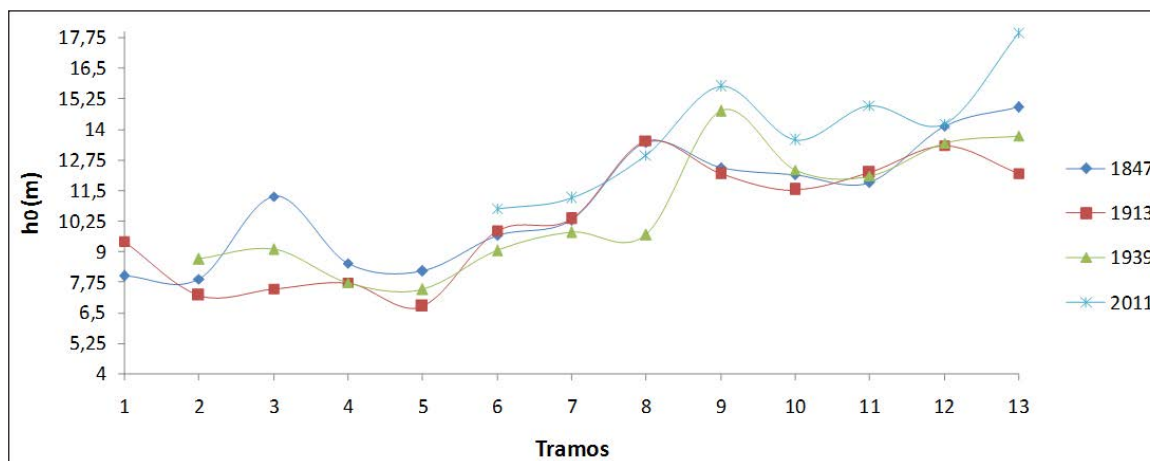


Figura 5b. Profundidad media, h_0 , por tramos, del thalweg.

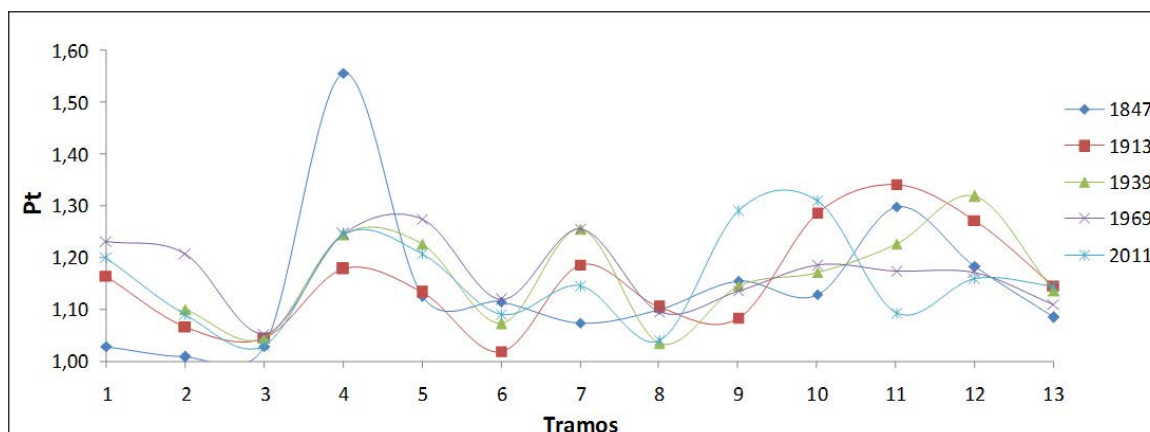


Figura 5c. Sinuosidad del thalweg, P_t , por tramos.

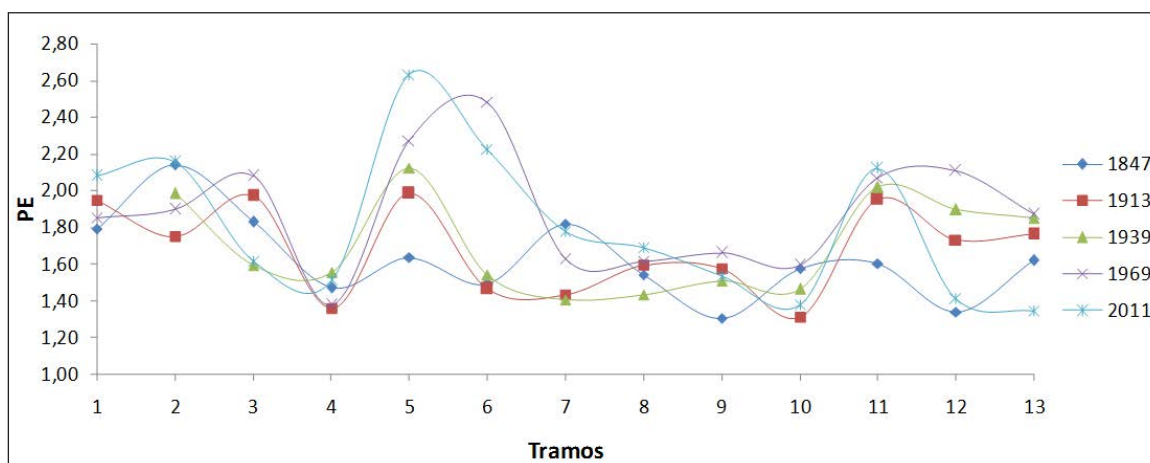


Figura 5d. Parámetro de entrelazamiento del cauce principal, PE , por tramos.

Las gráficas de Fig. 5 ponen en evidencia algunas características y comportamientos singulares en la evolución espacio-temporal del cauce principal. En primer lugar, puede observarse una tendencia general a la disminución del ancho efectivo en la dirección del escurrimiento (Fig. 5a), que se repite en todo el período analizado.

Por otro lado, la baja variabilidad de ese parámetro en algunos tramos (8 y 9, específicamente), parece asociarse al “encajonamiento” del cauce principal

entre márgenes resistentes, lindantes o muy próximas a su traza.

La profundidad media del thalweg tiende a aumentar hacia aguas abajo (Fig. 5b), fundamentalmente desde el tramo 5 desde donde lo hace en forma casi continua, y con una variación de ca. 50 % para los promedios de cada registro.

La sinuosidad del thalweg (Fig. 5c) muestra un patrón casi “ondulatorio” en la dirección del escurrimiento, aunque con cambios en la amplitud o longi-

tud de las “ondas” en algunos registros (o en partes de ellos, e.g., años 1847 y 1969). El patrón marca la proclividad a la meandricación de varios segmentos del cauce, separados por otros más cortos, menos sinuosos.

La reducción abrupta de la sinuosidad en el tramo 4 luego de 1847 se explica en parte con el detalle de evolución morfológica presentado en la Fig. 6, y estuvo asociada a fenómenos de rectificaciones y avulsiones del thalweg que acontecieron desde aquél año.

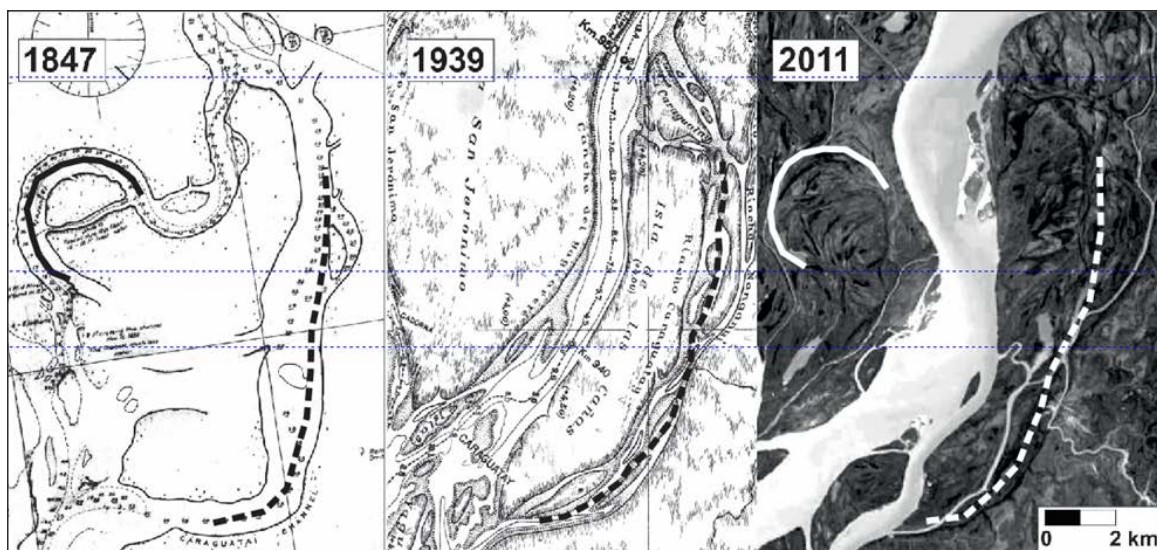


Figura 6. Avulsiones del thalweg del cauce principal en la parte terminal del segmento 4. El arco blanco en la imagen de 2011 reproduce el meandro del thalweg de 1847 (arco negro). La línea de trazos blanca sobre el actual Rcho. Caraguatay (brazo principal del río antes de 1913) se imitó en negro en los registros previos; así, se advierte una segunda avulsión del thalweg ocurrida entre 1847 y 1939, con un desplazamiento al oeste de más de 3 km desde la traza del Caraguatay.

Con relación al parámetro de entrelazamiento (Fig. 5d) se advierte que el cauce ha tendido históricamente a ser más simple en los tramos 4, 8, 9 y 10 en comparación al resto de los segmentos, que poseen promedios más altos o cambiantes.

En ese sentido, los cambios en las variables planimétricas de Fig. 5 estuvieron acompañados de transformaciones substanciales en las islas del cauce principal en toda la extensión del tramo medio, aún en los segmentos más “estables” (en términos medios). Si bien los mecanismos elementales de generación y ampliación de islas del río incluyen la migración lateral del thalweg y la sedimentación concomitante de bancos de arena tras él, junto a la acreción de nuevos bancos en los extremos de aguas arriba, o de abajo, o en los flancos de islas preexistentes (Ramonell et al., 2000; Pereira et al., 2009), es posible definir tres modelos básicos de formación de islas en el Paraná, a nivel de grandes islas o de agrupamientos de ellas en un sector del cauce (Parody y Estruco, 1975; Ramonell et al., 2000): Modelo A) por desarrollo/jerarquización de un riacho menor de la planicie aluvial, que escinde una porción de la misma convirtiéndola en isla (Fig. 7a); Modelo B) por jerarquización de un riacho en islas grandes del cauce (Fig. 7b); y Modelo C) por aumento de la amplitud de una onda o meandro del thalweg (Fig. 7c).

Con esa base conceptual, todos los segmentos del tramo medio fueron evaluados cualitativamente, con-

siderando los registros cartográficos de los últimos 100 años (1913 – 2011), e imágenes satélite de los satélites Landsat 2, 3 y 5 correspondientes a siete momentos equiespaciados entre 1977 y 2009.

Se detectó que en cada uno de los 13 segmentos ocurrieron los tres modelos de generación de islas, aunque algunos fueron predominantes según los tramos. Así, en los tramos 1, 3, 8, 9 y 13 se advirtió la preponderancia del modelo C. Estos segmentos se distinguen por poseer morfologías comunes, como el de la configuración en planta definida por sectores ensanchados, en los que se forman la mayor cantidad de islas, seguidas por tramos estrechos en los que el flujo se concentra en un único cauce, más profundo. A la vez, todos los segmentos se encuentran limitados por una margen no aluvial resistente a la erosión, mientras que la otra se conforma por materiales aluviales friables (antiguas islas adosadas a la planicie, principalmente) con partes menores cohesivas (Tabla 1 y Fig. 4). Las islas son, en general, de geometría fusiforme en planta.

Una diferencia que existe entre los segmentos en los que ha predominado el modelo C concierne a la variabilidad en el tamaño de las islas: en el tramo 8 son mayormente pequeñas (promedio de 2,5 km² de superficie para los últimos 35 años) mientras que en los segmentos restantes llegan a superar los 30 km², con áreas medias 2 a 4 veces más grandes que las del tramo 8.

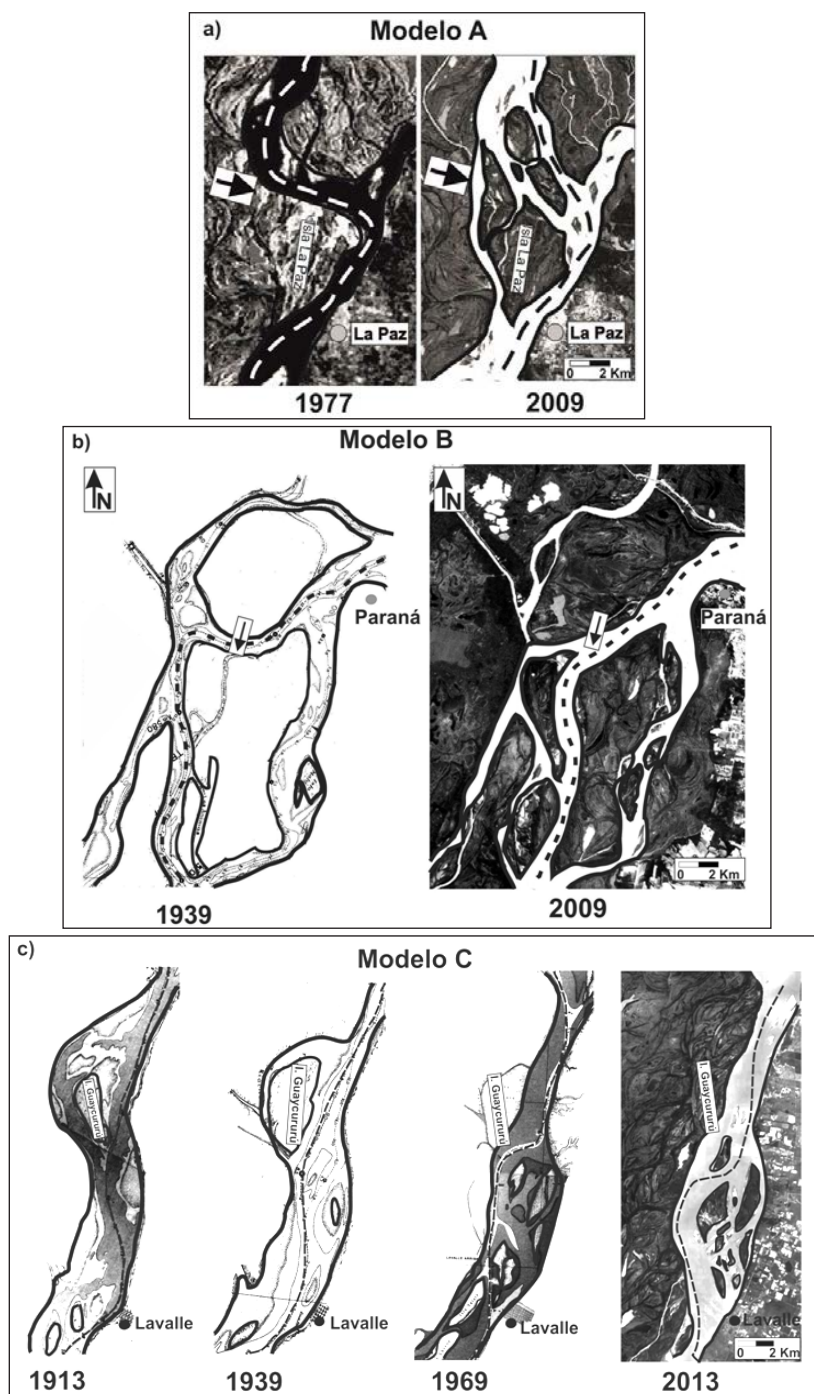


Figura 7. Modelos básicos de formación de islas en el cauce principal del Paraná Medio (Parody y Estruco, 1975; Ramonell et al., 2000): a) jerarquización de riachos de la planicie aluvial; b) jerarquización de riachos en grandes islas del cauce; c) aumento de la amplitud de las ondas del thalweg.

El ritmo de reemplazo de islas también es desigual: en el segmento 8 casi la totalidad de las islas no supera los 40 años de antigüedad, habiéndose substituido hasta en dos oportunidades en sectores, modificándose la ubicación de las partes estrechas y ensanchadas del cauce. En los segmentos 3, 9 y 13 estos fenómenos ocurrieron parcialmente, con zonas sin tal variación desde 1913.

En los tramos 2, 5, 6, 11 y 12 los modelos A y B de Fig. 7 fueron los predominantes, en proporciones equitativas. Al igual que en los segmentos previos

estos tramos mantienen similitudes entre ellos, como la de estar limitados por márgenes aluviales de manera casi exclusiva, tanto friables como cohesivos; sus islas son alargadas principalmente, con relaciones largo/ancho superiores a 2:1, y crecen mayormente en la dirección del eje mayor, tanto hacia aguas arriba como aguas abajo por la acreción de bancos y/o islas más pequeñas. La dinámica sinuosa a meandriforme del thalweg genera islas según el modelo C, en forma minoritaria.

La producción/reemplazo de islas en los cinco segmentos considerados ha sido desigual, con menores variaciones en los tramos 11 y 12 en comparación a los restantes.

Finalmente, los segmentos delimitados por la embocadura y desembocadura de un brazo secundario con más de 100 años de existencia (tramos 4, 7 y 10, brazos San Jerónimo, Espinillo y Colastiné, respectivamente) se distinguen por poseer pocas islas, de dimensiones relativamente pequeñas y formadas mediante el modelo C, sobre todo. Los sectores específicos de la embocadura y la desembocadura de los brazos son muy variables, con creación y reemplazo de islas mediante los tres modelos de Fig. 7 (principalmente del modelo C en la embocadura, y los A y B en la desembocadura).

CONCLUSIONES

A partir de la definición y reconocimiento espacial de indicadores de variables de control morfológico, se diferenciaron 13 segmentos del cauce principal del Río Paraná en los casi 800 km que posee entre las ciudades de Corrientes y Rosario (Fig. 4). En ellos se evaluaron cuatro parámetros morfológicos para los últimos 160 años: ancho efectivo, profundidad y sinuosidad del thalweg, y parámetro de entrelazamiento; los valores medios de estos parámetros resultaron ser característicos para la mayor parte de los segmentos en tramos sucesivos para cada momento temporal analizado, y variables a lo largo del período entero.

En la longitud completa del tramo medio y en toda la serie temporal analizada se identificaron rectificaciones de ondas del thalweg del cauce principal en las formas descritas por Ramonell et al. (2002), esto es, subaéreas y subacuáticas, y un único fenómeno de avulsión aparentemente no vinculado a esos procesos, con la formación de un nuevo brazo conteniendo al thalweg, de unos 12 km de longitud.

Se observó una clara tendencia a la disminución del ancho efectivo medio del cauce principal hacia los tramos de aguas abajo, sostenido en el período, y el aumento de la profundidad media del thalweg en esa dirección, aunque sólo en los últimos 500 km analizados de cauce.

Un solo segmento resultó ser planimétricamente estable en relación a todos los evaluados (tramo 8, entre La Paz y Hernandarias, km 757 a 689 de la ruta de navegación fluvial), aunque en él ocurrió la mayor tasa de generación y destrucción (o recambio) de islas en los últimos 100 años. Tales cualidades estarían explicadas por el “encajonamiento” del cauce principal entre materiales geológicos resistentes, que restringen la meandricación del thalweg del río.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución es producto de proyectos de investigación sobre el río Paraná desarrollados en la Fa-

cultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), con subsidios de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNL e incluye información generada en el marco de trabajos de posgrado que realizan parte de sus autores, y la revisada desde una beca de iniciación a la investigación hecha por el primer autor, bajo la dirección de Carlos G. Ramonell y la co-dirección del Lic. Aldo Paira (INALI –FICH, UNL).

Los autores agradecen al Lic. Paira los asesoramientos generales y relativos a la cartografía de pequeña escala que sirvió de base a este trabajo; al PTC Claudio Carrión por el acceso a la base de registros batimétricos históricos y recientes del Dpto. Paraná Medio de la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN); al Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Brasil), por la provisión libre vía web de imágenes satélite.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amsler, M. L., Ramonell, C. G., & Toniolo, H. 2005. Morphologic changes in the Paraná River channel (Argentina) in the light of the climate variability during the 20th century. *Geomorphology*. 70, 257-278.
- Cabral, S. 1973. Presencia del efecto de Coriolis en el Río Paraná. Santa Fe: Colmegna.
- Castro, S. L., E. D. Cafaro, M. G. Gallego, A. M. Ravelli, J. J. Alarcón, C. G. Ramonell y M. L. Amsler 2007. Evolución morfológica histórica del cauce del Río Paraná en torno a Rosario (km 456 – 406). XXI Congr. Nac. del Agua, CD de Trabajos, 20 pág. S. M. de Tucumán, Argentina
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) 2008. Estudio fluvial del Riacho Barranqueras. Comitente: Administración Provincial del Agua (APA) de la Pcia. del Chaco. Informe Final, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) 2012. Estudios básicos para la determinación de la vulnerabilidad a las inundaciones de las áreas costeras al río Paraná, próximas a las localidades de Goya y Reconquista. Comitente: Secretaría de Obras Públicas de la Nación. Informe Final, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- Giacosa, R., C. Paoli, y P. Cacik. 2000. Conocimiento del régimen hidrológico, Tomo 1: 69-103. En Paoli, C., Schreider, M. I. (Eds.). El río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura. Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Iriondo, M. 1988. A comparison between the Amazon and Paraná river systems. *Mitt. Geol.-Paläont. Inst.*, H. 66: 77 – 92.
- Latrubesse, E. 2008. Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology*, 101: 130–145.

Minotti, P., C. G. Ramonell y P. Kandus 2013. Regionalización del corredor fluvial Paraná-Paraguay. p. 33-90 En: L. Benzaquén & otros, (eds.). *Inventario de los humedales de Argentina. Sistemas de Paisajes de Humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay*. Secr. de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Buenos Aires.

Mosley, M. P. 1981. Semi-determinate hydraulic geometry of river channels, South Island, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*. 6: 127-137.

Parody, H., y J. Estruco. 1975. Racionalización del dragado del Río Paraná. Teoría de las mutaciones periódicas. IV Reunión Asoc. Latinoamericana de Dragado (ALAD), Buenos Aires. pp 1-54.

Pereira, M. S., Montagnini, M. D., Cafaro, E. D., Gallego, M. G., Hernández, J., & Ramonell, C. G. 2009. Disparidades de evolución morfológica y transporte sedimentario en ensanchamientos sucesivos del Río Paraná. IV Simposio Reg. sobre Hidráulica de Ríos. Salta, Argentina: CD de Trabajos.

Popolizio, E., A. A. Borfitz y P. Y. Serra. 1980. Fotointerpretación aplicada al estudio de las causas de los desmoronamientos de ribera en la localidad de

Lavalle (prov. de Corrientes). Centro de Geociencias Aplicadas UNNE, Serie C de Investigación, Tomo 15, 3: 1-57. Resistencia, Chaco, Argentina.

Ramonell, C.G., y I.M. Cristina. 2014. Geomorfología y propagación de crecidas en el tramo medio del río Paraná, Argentina. 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Argentina.

Ramonell, C. G., M. L. Amsler y H. Toniolo. 2000. Geomorfología del cauce principal. En: Paoli, C. U. & Schreider, M. (eds.). *El Río Paraná en su tramo medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* : T. 1, 173-232. Centro de Publicaciones de la UNL. Santa Fe.

Ramonell, C. G., M. L. Amsler & H. Toniolo. 2002. Shifting modes of the Paraná River thalweg in its Middle-Lower reaches. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd.* 129:129-142. Stuttgart.

Soldano, F. 1947. Régimen y aprovechamiento de la red fluvial argentina. Címera. Buenos Aires.

Toniolo, H. A. 1999. Las divagaciones del thalweg del río Paraná. Tesis de Maestría de Ing. en Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista Aqua-LAC es una publicación multidisciplinar que contiene artículos, notas técnicas y reseñas en el campo de los recursos hídricos, tanto en su dimensión científica como en su dimensión económica y social.

Las contribuciones deben ser el resultado de una investigación original adecuadamente diseñada y que contenga un **título, resumen, palabras clave, introducción, metodología, resultados y discusión, conclusiones o consideraciones finales, agradecimientos (opcional) y referencias bibliográficas**. Los artículos presentados deben ser originales en idioma español o inglés y escritos a espacio sencillo, con letra Arial tamaño 10 y márgenes de 2 cm. y de una extensión de entre 8-15 páginas, contando inclusive aquellas con tablas y figuras.

Formato

Primera página: Incluirá el título en español e inglés, que debe ser conciso y reflejar el contenido del trabajo, los nombres de los autores, así como su afiliación (nombre de la institución a la que pertenece y correo electrónico). Siempre que aparezcan nombres científicos en el título, estos deberán ser escritos de acuerdo a los registrados en **ITIS** (Sistema de Información Taxonómico Integrado, <http://www.itis.usda.gov/>) siempre y cuando se encuentren disponibles.

Resumen: Los trabajos deben incluir un resumen representativo del artículo, en el idioma original del texto y en el otro idioma oficial de la revista. Se requiere además de 3-6 palabras clave en ambos idiomas separadas por comas que permitirán ubicar el trabajo en las bases internacionales de datos que incluirán a la revista.

Texto

Tendrá que ser consistente con el tipo de publicación, siguiendo la estructura estándar presentada en la matriz disponible en el sitio web de Aqua-LAC.

Referencias

Las referencias que aparecen en el texto deben estar presentes en la sección Referencias Bibliográficas en orden alfabético y cronológico. Solo los trabajos citados en el texto deberán aparecer en la sección de Referencias Bibliográficas y viceversa.

Figuras y Tablas

Se prefieren figuras, dibujos y fotografías electrónicas en formato GPS o TIFF, de 300 DPI (color) y 1200 DPI (blanco y negro).

Las figuras, ilustraciones y fotografías digitales deben ser enviadas en forma separada, debidamente identificadas conteniendo un número que deberá ser consistente con su aparición en el manuscrito y con una breve descripción.

Las tablas deben ser enviadas por separado, enumeradas y con un título, que aparecerá en la parte superior de la misma. Deberán estar citadas en el texto en un orden ascendente de numeración a medida que son descritas, preferiblemente no debiendo exceder un máximo del 50% del tamaño de la página. NOTA: Las tablas deben utilizar el Sistema Internacional de unidades

Remisión de Trabajos

Los autores deberán enviar sus trabajos en solamente en formato electrónico a aqualac@unesco.org.uy.

Derechos de autor

Los autores de manuscritos aceptados para publicación en la revista de forma automática dan su consentimiento para que los derechos de autor sean transferidos a la Revista.

NOTA: Descargue las instrucciones en versión extendida en www.unesco.org.uy/phi/aqualac

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The Aqua-LAC journal is a multidisciplinary publication that will contain articles, technical notes and water resources reviews, as much in a scientific as in an economic and social dimension.

The articles must be the result of an original research, duly designed and containing **title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, conclusions, acknowledgments (optional), and bibliographic references**. The manuscripts presented will be originals in Spanish or English, on subjects related to the areas of the journal. Will be written with Arial font size 10 pt, with single spacing, 2 cm margins, and with a length between 8 and 15 pages including tables and illustrations.

Format

First page: will include the title in Spanish and English, that should be concise reflecting the content of the document, the authors names and their affiliation (name to their belonging institution, telephone, fax and e-mail). If scientific names appear in the title, this should be written according with those in ITIS (Integrated Taxonomic Information System, <http://www.itis.usda.gov/>) if they are available.

Abstract: the articles must include a representative abstract, in the language of the paper and in the other official language of the journal. Also, 3-6 key words in both languages will be requested, separated by commas to allow finding the manuscript in the international databases including the journal.

Text

Shall be consistent with the type of journal, following the standard format presented in the template provided in the Aqua-LAC web-page.

References

References that appear in the text should be presented in the Bibliographic References section in alphabetical and chronological order. Only works cited in the text should appear in the References section and viceversa.

Tables and Figures

Figures, drawings and digital photos are preferable in GPS or TIFF, 300 DPI (colour) and 1200 DPI (black and white).

The figures, illustrations and digital photos should be sent separately, properly identified with a number that should be consistent with the way they are mentioned in the manuscript and a short description.

The tables should be sent separately, numbered and with a title that will be shown on its upper part. In the text the tables should be cited with a rising numeration order according to its description, preferably not exceeding a maximum of 50% of the size of the page.

NOTE: The tables should use the International Units System.

Submission of manuscript

Manuscripts must be submitted only in electronic format to aqualac@unesco.org.uy.

Copyrights

The authors of accepted papers automatically agree for the author's rights to be transferred to the Journal.

NOTE: Download the extended instructions from www.unesco.org.uy/phi/aqualac

UNESCO

Programa Hidrológico Internacional
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe

International Hydrological Programme
Regional Office for Science
for Latin America and the Caribbean

Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94
aqualac@unesco.org.uy
www.unesco.org.uy/phi/aqualac

