

El **Centro de Estudios y Tecnología del Agua**, dependiente de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, reúne equipos de trabajo de extensa trayectoria y experiencia en la investigación de los recursos hídricos. Su compromiso apunta a desarrollar proyectos de I +D + i que favorezcan la innovación en el contexto local, regional e internacional.

La infraestructura de equipos de laboratorio del CETA se complementa con la tecnología de otros centros e institutos de investigación de la UNC para dar respuesta a múltiples problemáticas del uso y consumo del agua, como también a las asociadas a la conservación y protección de los recursos hídricos.

Es también un espacio de formación y capacitación de estudiantes y graduados de la UNC, de otras universidades del país y del extranjero.



Universidad Nacional de Córdoba

RECTOR

Dr. Hugo Oscar Juri

VICE-RECTOR

Dr. Ramón Pedro Yanzi Ferreira

SECRETARIO GENERAL

Ing. Roberto Terzariol

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

DECANO

Mg. Ing. Pablo Recabarren

VICE-DECANA

Mg. Ing. Adriana Cerato

SECRETARIO GENERAL

Ing. Daniel Lago

SECRETARIO ACADÉMICO (ÁREA INGENIERÍA)

Ing. Eduardo Nestor Zapico

SECRETARIA ACADÉMICA (ÁREA BIOLOGÍA)

Biol. Analia González

SECRETARIO ACADÉMICO (ÁREA GEOLOGÍA)

Geol. Raúl Eduardo Paredes

SECRETARIA ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN Y POST-GRADO (ÁREA CIENCIAS NATURALES)

Dra. Marcela Cioccale

SECRETARIO ACADÉMICO DE INVESTIGACIÓN Y POST-GRADO (ÁREA INGENIERÍA)

Dr. Federico Pinto

Revista del CETA
*Centro de Estudios
y Tecnología del Agua*
Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, UNC.

DIRECTOR

Dr. Andrés Rodríguez

COORDINACIÓN EDITORIAL

Lic. Zusana Boneu.

EDICIÓN

Editorial Comunicarte

DISEÑO

Ivana Myszkoroski

Vol. 1, N° 2 - 2016

ISSN 2525-0582



Sumario

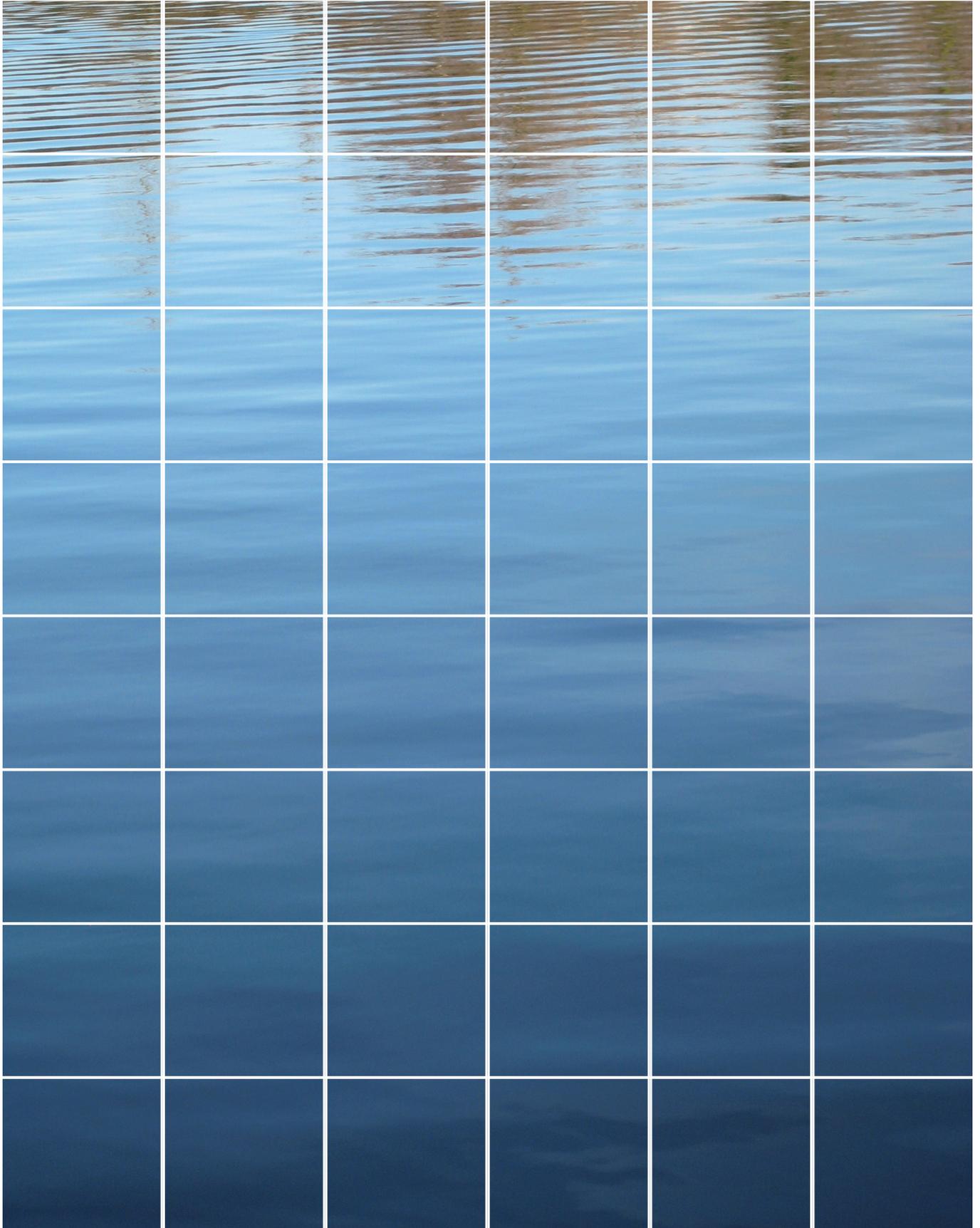


7 Editorial

9 Radar RMA-1 en la UNC

Proyectos de investigación del CETA

- 10** *Uso del Perfilador de Velocidad Ultrasónico para caracterizar experimentalmente el flujo alrededor de una pila cilíndrica.*
Horacio S. Herrero, Carlos Marcelo García, Francisco Pedocchi, Guillermo López
- 14** *Análisis de sensibilidad de la calidad del pronóstico hidrológico empleando optimización multiobjetivo.*
Facundo J. Alonso, Nicolás Le Moine, Ludovic Oudin, Pierre Ribstein, Juan Carlos Bertoni
- 18** *Influencia del fenómeno La Niña en la ocurrencia de sequías intensas en la región central de Argentina.*
Leticia Vicario, Carlos M. García, Juan Carlos Bertoni
- 21** *Técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala.*
Antoine Patalano, W. Brevis, Carlos M. García, T. Bleninger, Andrés Rodríguez y J. Alvarez
- 25** *Análisis de simultaneidad de extremos hídricos en el centro y norte de la RA.*
Erica Díaz, Andrés Rodríguez, O. Dölling, Gerardo Moya, Juna C. Bertoni, E. Castello, Mariana Pagot y Gerardo Hillman
- 31** *Estudio de estabilidad de un dique exento semisumergido mediante modelo físico.*
Paolo Gyssels, Mariana Pagot, Gerardo Hillman, Héctor Muratore y Andrés Rodríguez
- 34** *Uso de simulaciones numéricas directas para optimizar mediciones con instrumentos hidroacústicos.*
Vicente G. Gil Montero, Leticia Tarrab, Carlos M. García, Mariano I. Cantero
- 38** *Aplicación de herramientas numéricas como complemento de la caracterización experimental del flujo en una componente de una planta de tratamiento de agua potable.*
Matias Ragessi, Carlos Marcelo García, Santiago Márquez Damián y Mariano I. Cantero
- 42** *Problemáticas hidrosedimentológicas en la cuenca media-baja del Río Pilcomayo y aportes a la solución.*
Cristian Marcelo Baldissone, Andrés Rodríguez, Mariana Pagot, Mariano Corral, Héctor Farías, Alejo Testa Tacchino, Gerardo Hillman





Artículos científicos CONAGUA 2011

- 48** *Propuesta urbana para una ciudad inundable. Resistencia, Chaco.*
Santiago Figueroa Langou y Giselle Garay
- 54** *Caracterización de la cantidad y calidad de agua em un tramo del Río Dulce en Córdoba, Argentina.*
Silvia Navarro Ramos, Gerardo Hillman Cecilia Pozzi, Claudia Oroná, Andrés Rodríguez, Matías González, Nadia Intra, Natalia Biolatto, Héctor Zanoni, Daniel Cabido, Conrado Rosacher
- 60** *Delimitación de áreas vulnerables a la contaminación difusa del acuífero con nitratos.*
Américo Degioanni
- 66** *Regionalización paramétrica de curvas de duración de caudales.*
Patricia M. López, Jorge A. Maza, Victor H. Burgos, Adrián Vargas Aranibar, Luis A. Fornero, Jorge Bonilla
- 71** *Transferencia de sedimentos de una microcuenca de resistencia a la red de drenaje.*
Guillermo José Mendez, Carlos Alberto Depetris, Oscar Orfeo, Alejandro Ruberto, Jorge V. Pilar
- 78** *Depósitos sedimentarios modernos y antiguos del Río Paraná (Corrientes, Argentina): un análisis comparativo.*
Oscar Orfeo, Sergio M. Georgieff, Karina B. Anís, Gustavo E. Rizo
- 84** *Clasificación trófica de una Laguna de Agua Salada: Laguna del Plata Mar Chiquita, Córdoba.*
Claudia Oroná, Gerardo Hillman, Cecilia Pozzi, Nevor Pajón, Mariana Pagot, Mariano Corral, Andrés Rodríguez



Editorial

Este número de la Revista CETA es el resultado del trabajo de numerosos profesionales, docentes, investigadores y estudiantes que trabajan en relación a los recursos hídricos en el ámbito local y regional en el LH-CETA desde hace varios años. La edición se enmarca, desde 2011 a la fecha, en el contexto de las actividades conjuntas entre el Laboratorio de Hidráulica y el Centro de Tecnología del Agua de la FCEfyN de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las principales líneas de investigación del LH-CETA se orientan a demandas identificadas en nuestro medio, incluyendo tanto el desarrollo y aplicación de técnicas experimentales como de modelos numéricos de problemas de mecánica de fluidos, hidrología e hidráulica.

Adicionalmente, en el presente Nro. de la Revista CETA se han incluido un conjunto de siete artículos seleccionados entre los presentados al Congreso Nacional del Agua CONAGUA (Resistencia, 2011), escogidos por su calidad entre las principales áreas temáticas que el Congreso ha cubierto. Dichos artículos han tenido un proceso de evaluación con referato posterior a su presentación oral.

Finalmente es pertinente mencionar otro hito en las actividades de investigación y transferencia en las que el LH-CETA ha estado involucrado desde su creación, tal cual es la instalación en sus inmediaciones y puesta en operación del primer Radar Meteorológico Argentino RMA1. Este moderno Radar Doppler en Banda C, que posee doble polarización simultánea, ha sido desarrollado por la empresa INVAP en contrato con la SSRH de la Nación. El CETA, en particular como natural continuador de las políticas que iniciara en forma pionera el ISRH, mantiene a la UNC activa dentro del Programa Nacional denominado Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, SINARAME, donde se juntó con el reciente Grupo de Radares Córdoba conformando el nodo local del SINARAME, a partir de los aportes conjuntos de la FCEfyN y FAMAf.



Radar RMA-1 en la UNC

En el extremo suroeste de la Ciudad Universitaria de la UNC, instalado en una torre de 33 metros de altura, se instaló El Radar Doppler en Banda C, con doble polarización simultánea (RMA-1) construido por la empresa nacional INVAP. La Universidad Nacional de Córdoba está estrechamente involucrada en este proyecto a través de dos Unidades académicas, implicadas con roles y responsabilidades específicas, Facultades de Matemática, Astronomía y Física (FAMAF), y de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfyN).

Algunas de las importantes aplicaciones que tendrá este aparato: descripción del estado del tiempo instantáneo, la generación de pronósticos a corto plazo, la posibilidad de prever y monitorear contingencias climáticas (granizo, inundaciones, etc.), colaborar con la aeronavegación y navegación, brindar datos para estudios de física de la atmósfera, entre otras prestaciones. Al ser Doppler, el RMA-1 podrá, por ejemplo, identificar y medir la velocidad de las partículas de una precipitación. El alcance del radar llega a los 480 km y se incorpora a los sistemas de alerta provincial y nacional.

El Radar RMA fue desarrollado en el marco del proyecto del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARME) impulsado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación durante la gestión gubernamental de la Cristina Fernández de Kirchner. La primera etapa del SINARME incluyó la instalación y puesta en funcionamiento del prototipo de prueba RMA-0 en la ciudad de Bariloche y la instalación del RMA-1 en Córdoba.



Uso del Perfilador de Velocidad Ultrasónico para caracterizar experimentalmente el flujo alrededor de una pila cilíndrica

HORACIO S. HERRERO
CARLOS MARCELO GARCÍA
FRANCISCO PEDOCCHI
GUILLERMO LÓPEZ

Resumen

En este artículo se presenta el uso de un Perfilador de Velocidad Ultrasónico (UVP por sus siglas en inglés), para caracterizar experimentalmente el flujo alrededor de un obstáculo constituido por una pila cilíndrica. Las mediciones se realizaron en un canal de laboratorio de sección rectangular, imponiendo dos condiciones de flujo, y distintas configuraciones del instrumento fueron implementadas en función de distintos objetivos de la medición.

Caracterización del flujo alrededor de una pila cilíndrica

Cuando cualquier estructura se sitúa en medio de una corriente de agua, se genera un proceso físico tridimensional debido a la presencia del obstáculo. Como características del flujo medio se destaca que el flujo se acelera alrededor de ésta, de manera que el gradiente de velocidad vertical del flujo se transforma en un gradiente de presión en la parte donde impacta directamente sobre la estructura. Este gradiente de presión provoca una corriente vertical hacia abajo que impacta en el lecho, en la base de la pila, donde se forma un vórtice que arrastra el material del lecho alrededor y aguas abajo de la estructura. Éste es el llamado vórtice de herradura, conocido por este nombre debido a la forma que adquiere cuando se observa desde encima. Por otra parte, en la superficie libre del agua, el flujo y la pila interactúan formando una ola llamada vórtice superficial. Además, detrás de la estructura, donde el flujo se ha separado,

se producen unos vórtices de estela (Kothyari y Ranga Raju, 2001).

Por lo tanto, más allá de que las características medias de los procesos físicos presentes en el flujo alrededor de un obstáculo está bien identificado, la disponibilidad de nuevo instrumental con mayor resolución espacial y temporal permite caracterizar con mayor detalle la complejidad de los procesos físicos presentes. En el presente trabajo se aprovechan las capacidades de un Perfilador de Velocidad Ultrasónico (UVP por sus siglas en inglés) para caracterizar el flujo alrededor de una pila cilíndrica. Los trabajos experimentales que se presentan en este proyecto se desarrollaron en el marco de un intercambio que el primer autor de este trabajo realizó en el IMFIA, Universidad de la República, Uruguay, en el periodo de los meses de marzo a mayo de 2012. Esta actividad se suma a distintas actividades de cooperación que los grupos de trabajo del CETA e IMFIA vienen desarrollando.

Perfilador de Velocidad Ultrasónico

El UVP utiliza el principio Doppler para determinar la velocidad de las partículas transportadas por el flujo (que se asume igual a la velocidad del flujo). Adicionalmente el instrumento permite estimar la tasa de transporte en suspensión a partir del dato de la amplitud de la señal de retorno, o *backscatter* (Pedocchi y García, 2009).

Si las partículas en el volumen de medición se mueven a una velocidad u_r , a lo largo del eje de transmisión del sonido, el sensor recibirá una señal acústica con una frecuencia diferente a la emitida (Lhermitte y Serafin, 1984), (Lhermitte y Lemmin, 1994). La relación entre la frecuencia emitida F , la

frecuencia recibida F_D , y la velocidad de las partículas en el volumen de medición, está dada por la siguiente relación:

(1)

$$u_r = \frac{F_D c}{F 2}$$

donde c es la velocidad del sonido en el medio.

El UVP mide velocidad de las partículas en diferentes posiciones a lo largo del eje de transmisión del pulso acústico, y la máxima distancia desde el sensor r_{\max} está dada por el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso acústico y la recepción de la onda reflejada, que es igual al tiempo entre pulsos expresado por la frecuencia de repetición de pulsos F_S , luego

(2)

$$r_{\max} = \frac{c}{2F_S}$$

La máxima velocidad que el instrumento puede medir $u_{r_{\max}}$ está dada por el criterio de muestreo de Nyquist,

(3)

$$u_{r_{\max}} = c \frac{F_S}{4F}$$

De las ecuaciones 2 y 3 se llega a

(4)

$$u_{r_{\max}} \cdot r_{\max} = \frac{c^2}{8F}$$

Luego, el producto de la velocidad máxima y la distancia máxima que el instrumento puede medir es una constante, dada por las condiciones del medio y la frecuencia de sonido emitida.



El instrumento empleado en este trabajo es un Perfilador de Velocidad Ultrasónico modelo UVP-DUO, fabricado por la compañía Met-Flow SA, disponible en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Se utilizaron sensores de 2 MHz y 4 MHz de frecuencia acústica, dependiendo el objetivo de la medición.

Instalación experimental y metodología empleada

La instalación experimental utilizada en este trabajo es un canal de sección rectangular construida en su totalidad en mampostería, disponible en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Las dimensiones del canal son 1.5 m de ancho, y una longitud total de 18 m. El fondo del canal es de arena cuasi uniforme, lavada, con un diámetro nominal $d_{50} = 0.8$ mm.

El caudal fue generado por una bomba sumergida capaz de desarrollar un caudal máximo de 150 l/s, equipada con válvulas de operación manual que permiten regular los caudales desde la cisterna hacia la instalación experimental. La cañería de impulsión es un tubo de PVC de 250 mm de diámetro, y los caudales fueron registrados mediante un caudalímetro de inserción para alta temperatura Burkert® modelo 8041, el cual fue calibrado en una instancia previa a las mediciones.

La tipología de obstáculo utilizada es una pila cilíndrica. La pila cilíndrica tiene un diámetro de 16 cm, y se colocó sobre el eje central del canal, a una distancia de 8 metros desde el inicio del canal (aproximadamente a la mitad de su longitud total).

Se evaluaron experimentalmente dos condiciones de flujo, que se muestran en la Tabla 1.

Para la implementación de la técnica UVP en la instalación experimental utilizada en este trabajo, se registraron series temporales de velocidad en diferentes localizaciones y con distintas configuraciones, según los objetivos

de la medición que se definen a continuación:

• **Objetivo: medición del flujo de aproximación aguas arriba de la pila.**

Estas mediciones se realizaron en condiciones de lecho rigidizado. En esta ocasión se midieron series temporales de perfiles de velocidad del flujo en 3 perfiles, en una sección ubicada a 1 metro aguas arriba del obstáculo.

Se emplearon 3 sensores de 4 MHz de frecuencia (uno vertical y dos inclinados a 30°) alineados en forma paralela a la dirección del flujo, de forma tal de obtener valores de las componentes longitudinal y vertical de la velocidad del flujo (Ver Figura 1). El tiempo de medición fue de 5 minutos con una frecuencia de adquisición de 40 datos por segundo.

• **Objetivo: medición del flujo descendente aguas arriba de la pila, y evolución temporal de la profundidad de erosión local.**

Estas mediciones se realizaron en condiciones de lecho móvil, siendo la condición inicial fondo plano, y a lo largo de la medición la profundidad de erosión local fue evolucionando y modificando la geometría del fondo. En este caso se midieron series temporales de un perfil de velocidad vertical del flujo localizado en el eje central del canal a 2 cm de la cara aguas arriba la pila.

Se empleó un sensor de 4 MHz de frecuencia ubicado en posición vertical alineado en forma paralela a la cara aguas arriba de la pila, y orientado

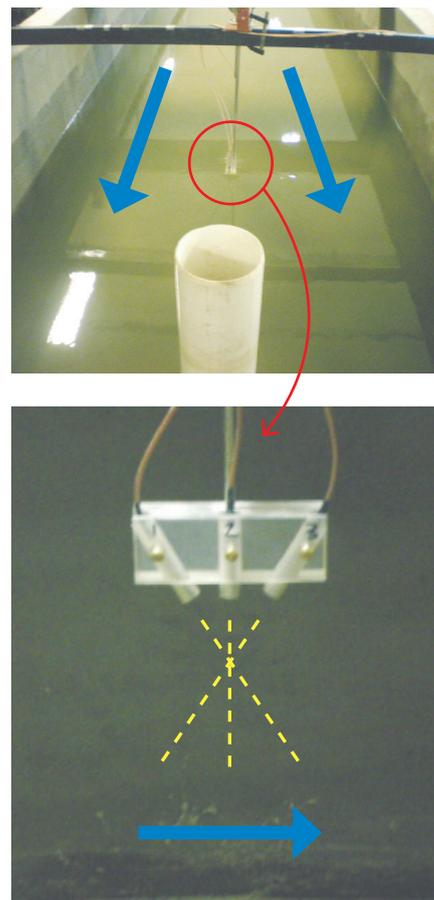


Figura 1. Montaje del instrumento para la medición del flujo de aproximación aguas arriba del obstáculo. Las flechas en azul muestran el sentido del flujo y las líneas de trazo la dirección del haz acústico.

hacia el fondo, de forma tal de obtener valores de la componente vertical de la velocidad del flujo (flujo descendente) y variación temporal de la distancia del sensor al fondo (profundidad de la erosión local). El tiempo de medición fue de 15 horas con una frecuencia de adquisición de 20 datos por segundo.

Parámetro	Unidad	Valor	
		Condición 1	Condición 2
Caudal (Q)	[l/seg]	80	30
Profundidad (H)	[cm]	26	15
Velocidad estimada ($U = Q/A$)	[cm/seg]	21	13
Nº de Reunolds: $Re = U.H/\nu$	Adim	5.3×10^8	2.0×10^8
Nº de Froude: $Fr = U/(g.H)^{0.5}$	Adim	0.13	0.11

Tabla 1. Condiciones experimentales.

El montaje del instrumento se muestra en la Figura 2.

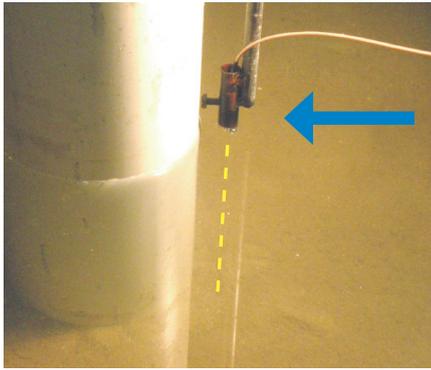


Figura 2. Montaje del instrumento para la medición del flujo descendente y evolución de la erosión local. Las flechas en azul muestran el sentido del flujo y las líneas de trazo la dirección del haz acústico.

• **Objetivo: caracterización del campo de flujo medio aguas abajo de la pila**

Estas mediciones se realizaron en condiciones de lecho rigidizado. En este caso se midieron series temporales de perfiles de velocidad del flujo en 9 perfiles distribuidos en el ancho del canal, separados a una distancia de 15 cm, en una sección ubicada 50 cm aguas abajo del obstáculo.

Se emplearon sensores de 2 MHz de frecuencia ubicados en posición horizontal alineados en forma paralela al eje del canal, y orientados hacia aguas arriba de forma tal de obtener valores de la componente longitudinal de la velocidad del flujo en un plano horizontal ubicado a 14 cm del fondo para la condición 1, y 7 cm del fondo para la condición 2 (Ver Figura 3). El tiempo de medición fue de 5 minutos con una frecuencia de adquisición de 25 datos por segundo.

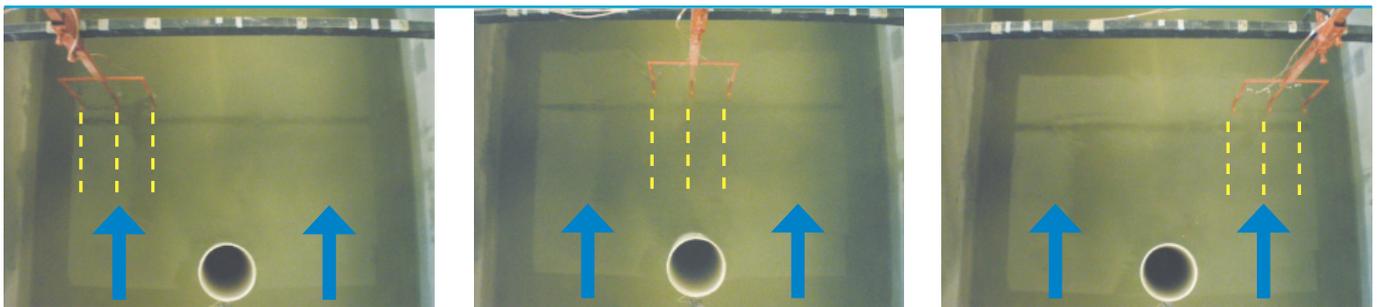


Figura 3. Montaje del instrumento para la medición del flujo descendente y evolución de la erosión local. Las flechas en azul muestran el sentido del flujo y las líneas de trazo la dirección del haz acústico.

Resultados

• **Perfiles de velocidad aguas arriba de la pila.**

En la Figura 4 se observan los perfiles medios de velocidad y de tensiones medidos al centro del canal aguas arriba de la pila cilíndrica, para la condición de 80 l/s y 26 cm de profundidad. Además se observa el perfil de velocidad ajustado a la ley logarítmica y el perfil de tensiones ajustado a la ley de variación lineal. De esta manera fue posible estimar no sólo la velocidad media del flujo, sino también otros parámetros como la velocidad de corte y la rugosidad del fondo.

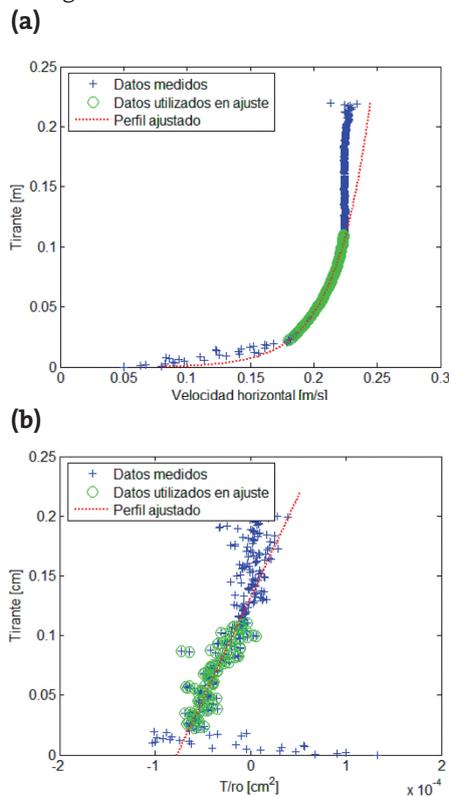


Figura 4. Perfiles medios de aproximación aguas arriba de la pila. (a) Velocidad; (b) Tensión

Luego, integrando la totalidad de los perfiles medidos en la sección transversal, se obtuvo el caudal que se verifica con el valor reportado por el caudalímetro instalado antes del ingreso al canal. Para el caso de la pila se obtuvieron también resultados similares para la segunda condición experimental.

• **Flujo descendente y evolución temporal de la erosión local frente a la pila.**

En la Figura 5(a) se muestra un perfil instantáneo de velocidad para un caudal de 80 l/s y una profundidad de 28 cm registrado en un tiempo de 15 minutos luego de iniciado el ensayo. Se puede observar que la velocidad descendente aumenta desde la superficie libre, y en ese instante de tiempo el valor máximo se registró a 25 cm de profundidad.

Luego, en la Figura 5(b) se observa la evolución de la profundidad de erosión en la cara aguas arriba de la pila para, en los primeros 25 minutos de ensayo. Se puede apreciar que erosión aumenta de manera más intensa en los primeros 15 minutos de ensayo. El uso de un UVP permitió obtener este tipo de información con elevada resolución espacial y temporal.





Figura 5(a). Perfil de la componente vertical de velocidad (flujo descendente) frente a la pila.

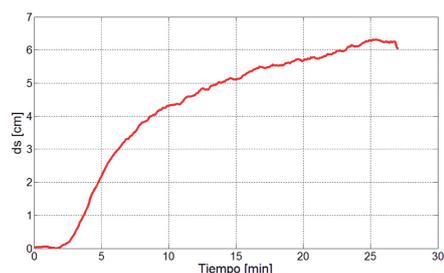


Figura 5(b). Evolución temporal de la profundidad de erosión frente a la pila

Esta caracterización aguas arriba de la pila, sólo se llevó a cabo para una sola condición experimental.

• Campo de flujo medio aguas abajo de la pila.

En la Figura 6 se muestran los valores medios de velocidad medidos aguas abajo de la pila. En este caso los valores reportados corresponden al caso de la pila para la condición de 80 l/s y 26 cm de profundidad, medidos en un plano ubicado a 14 cm del fondo y en progresivas separadas cada 10 cm.

Se puede observar al centro del canal un déficit del valor medio de la velocidad longitudinal del flujo aguas abajo del obstáculo, que viene dado por la presencia del obstáculo. Esta diferencia entre los valores de velocidad media entre el centro del canal y las márgenes disminuye hacia aguas abajo a medida que se aleja del obstáculo, de manera tal que a una cierta distancia del mismo el perfil se hace uniforme nuevamente.

En la sección ubicada a la altura de la pila se observa que las máximas velocidades se registraron en las localizaciones ubicadas a los costados, coincidiendo con el esquema de la Figura donde ocurren las máximas aceleraciones.

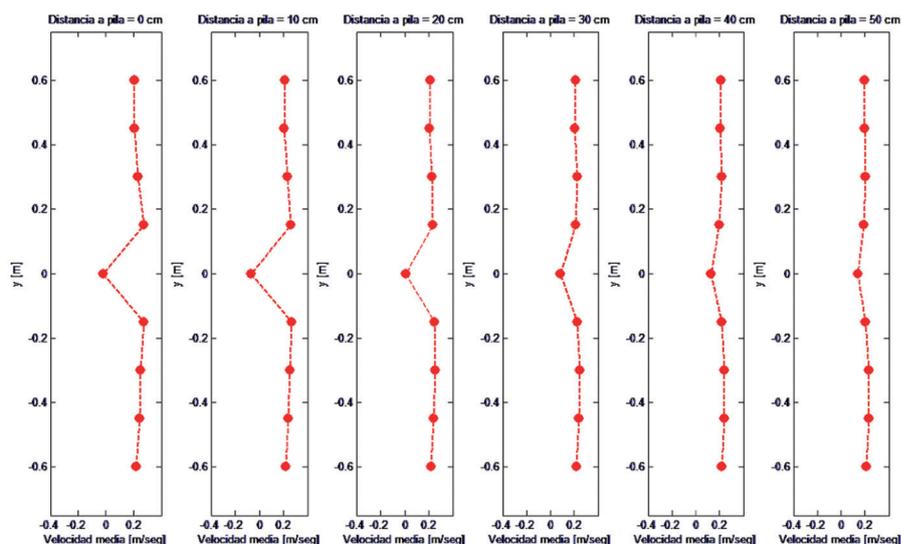


Figura 6. Velocidades medias medidas en distintas progresivas aguas abajo de la pila, a lo largo del ancho del canal.

Conclusiones

En este informe se presentó el uso de la técnica del Perfilador de Velocidad Ultrasonico (UVP) para caracterizar el flujo medio alrededor de pila cilíndrica.

En función de los objetivos de la medición y de las condiciones del flujo, diferentes configuraciones del instrumento fueron implementadas (cantidad de sensores, orientación, frecuencia acústica emitida, etc.) de manera tal que los datos adquiridos sean lo más representativos posible.

La alta resolución espacial y temporal que posee este instrumento hace posible caracterizar el flujo alrededor de un obstáculo, pudiendo obtener perfiles de velocidad longitudinal y vertical del flujo, y la evolución espacial de valores medios de velocidad longitudinal del flujo aguas abajo de la pila. Para obtener resultados relacionados a la turbulencia 3D es necesario recurrir a otros instrumentos acústicos, como es el caso del Velocímetro Acústico Doppler (ADV).

Referencias bibliográficas

- Kothyari, U.C. y Ranga Raju, K.G.** (2001). "Scour around spur dikes and bridge abutments". *Journal of Hydraulics Research*, 39: 367–374.
- Pedocchi, F. y García, M.** (2009). "Application of fan Ultrasonic Velocity Profiler for velocity and suspended sediment measurements in an oscillatory Boundary layer". *Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series No. 83*, ISSN: 0442-1744, UIIU-ENG-2009-2003. VTCHL, USA.
- Lhermitte, R. y Serafin, R.** (1984). "Pulse-to-pulse coherent Doppler sonar signal processing techniques". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1(4): 293-308.
- Lhermitte, R. y Lemmin, U.** (1994). "Open-channel flow and turbulence measurement by high-resolution Doppler sonar". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(5): 1295-1308.

* Horacio S. Herrero¹, Carlos Marcelo García¹, Francisco Pedocchi², Guillermo López²

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

² Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay.

Análisis de sensibilidad de la calidad del pronóstico hidrológico empleando optimización multiobjetivo

FACUNDO J. ALONSO
NICOLÁS LE MOINE
LUDOVIC OUDIN
PIERRE RIBSTEIN
JUAN CARLOS BERTONI

Introducción

Desde los tiempos más remotos de los cuales se tenga alguna evidencia histórica, las poblaciones del mundo presentan una marcada tendencia al asentamiento sobre las márgenes de los cursos de agua dulce, teniendo por consecuencia, en algunos casos, la invasión de la llanura de inundación del río y su consiguiente incremento del grado de vulnerabilidad frente a las recurrentes crecidas. Por esta razón, las inundaciones urbanas son un fenómeno cada vez más frecuente en varias regiones del planeta. Los Sistemas de Pronóstico de Crecidas cumplen la función de prevenir estos eventos y minimizar sus efectos, para lo cual cuentan con una herramienta de principal importancia como son los modelos hidrológicos. Es decir, aquellas estructuras matemáticas capaces de utilizar la información disponible de lluvia y caudal para estimar con algún grado de probabilidad, cuál será el caudal (o nivel) de agua que llegará a una sección de interés, con cierto horizonte de tiempo de anticipación. La mayor parte de dichos modelos han sido desarrollados bajo la premisa de que la información de lluvia y caudales observados a tiempo real es transmitida ininterrumpidamente. Ahora bien, si durante el proceso de pronóstico se produce una falla en el sistema de transmisión de caudales observados a tiempo real al centro de procesamiento de datos, el modelo comienza a trabajar como un simple modelo de simulación, perdiendo todas las ventajas que le atribuían los procesos algorítmicos implicados en el pronóstico.

Este trabajo constituye los primeros pasos en el análisis del impacto que puede producir a la calidad del modelo en el proceso de predicción

de caudales, la ausencia de la información transmitida a tiempo real. La propuesta de trabajo incluye el empleo de una metodología de optimización multi-objetivo capaz de generar la Región de Pareto optimizando los parámetros para un modelo hidrológico frente a dos criterios de optimización distintos: 1) minimización del error de pronóstico considerando al modelo funcionando en simulación, asumiendo que se ha perdido durante el pronóstico la transmisión de datos de caudal en la sección de aforo medidos en tiempo real, y 2) minimización del error de pronóstico con el modelo trabajando con la disponibilidad de la información referida. Como metodología de optimización se ha propuesto el empleo de dos algoritmos multi-objetivo, denominados MOCOM-UA (Yapo *et al.*, 1998) y CaRaMEL (Le Moine, 2009), y como modelos hidrológicos, los modelos IPH2 (Tucci *et al.*, 1981) y Génie Rural Prévision horario (Berthet, 2010). Sin embargo, actualmente se ha avanzado hasta la programación computacional en lenguaje Fortran 90/95 de la optimización multiobjetivo mediante el algoritmo MOCOM-UA del modelo hidrológico GRP, funcionando en simulación y previsión alternativamente. Por esta razón, a continuación se presenta un esquema de la estructura del GRP y se recomienda la lectura del algoritmo de optimización MOCOM-UA, explicado en Alonso (2008), de los cuales se muestran al final algunos resultados preliminares. Una descripción completa del modelo IPH2 puede encontrarse en Alonso (2008), y del algoritmo CaRaMEL en Le Moine (2009).

El pronóstico hidrológico

Conforme es descrito en Bertoni (2004), la previsión de caudales en un



determinado lugar puede ser realizada a corto plazo (tiempo real) o a largo plazo. Un sistema de alerta de pronóstico en tiempo real envuelve los siguientes aspectos: 1) sistema de colecta y transmisión de informaciones; 2) sistema de procesamiento de informaciones; 3) modelo de previsión de caudales y niveles; 4) procedimientos para la transferencia de informaciones para la Defensa Civil y la sociedad; y 5) planificación de las situaciones de emergencia a través de la Defensa Civil.

Descripción del Modelo Hidrológico “Génie Rural Prevision” (GRP)

Los modelos Génie Rural fueron desarrollados por una institución técnico-científica, denominada “CEMAGREF” (actual “IRSTEA”), dependiente del gobierno francés. El mismo ha experimentado muchas variaciones en su estructura, normalmente orientadas a su simplificación, desde su nacimiento a principios de 1980, hasta la actualidad. A pesar de su gran simplicidad, las distintas versiones de estos modelos han dado muy buenos resultados (Mouelhi, 2003; Mouelhi *et al.*, 2006b; Perrin *et al.*, 2003; Mathevet, 2005; Tangara, 2005). El modelo GRP está conformado por la estructura del modelo GR4J, con ciertas modificaciones asociadas al proceso de pronóstico hidrológico.

A continuación se presenta un esquema del modelo GR4J (Figura 1) como se describe en Perrin *et al.* (2007), a los fines de comprender globalmente el funcionamiento del modelo, y luego se agregan los elementos asociados a la previsión. No se pretende en esta publicación, agotar su explicación, pero se sugiere al lector interesado consultar la bibliografía referida (Perrin *et al.*, 2007) donde están expuestas todas las ecuaciones asociadas a las variables estimadas en cada parte de su estructura.

El esquema conceptual del modelo confronta inicialmente la lluvia diaria del día k (P_k) con la evapotranspiración potencial (E) promedio para el mismo día calendario, de donde surgen P_n (precipitación neta), o E_n (evaporación neta). Una función de producción se emplea para calcular el escurrimiento.

En el caso en el cual P_n es distinto de cero, una parte P_s de P_n alimenta al reservorio de producción, cuya cantidad está gobernada por una lámina denotada por la variable de estado S_k , y cuyo máximo valor corresponde a una lámina representada por el parámetro X_1 . En el caso contrario, cuando E_n es distinto de cero, una cantidad de evaporación es retirada del reservorio de producción. Una parte ($Perc$) de este reservorio percola, y se une al remanente de P_n menos P_s , para abastecer el escurrimiento. P_r es dividido en dos componentes de escurrimiento, 90% distribuido por un hidrograma unitario HU_1 y un reservorio de tránsito, y 10% por un hidrograma unitario HU_2 . Siendo la base de HU_1 el parámetro X_4 , y dos veces este valor representa la base de HU_2 . Empleando estos hidrogramas unitarios, se calculan en cada intervalo los valores de caudal Q_9 y Q_1 respectivamente. Q_9 alimenta un reservorio de tránsito, cuyo nivel de llenado es gobernado por una lámina indicada por la variable de estado R_k , y cuyo máximo valor es la lámina denotada por el parámetro X_3 , mientras que Q_1 se incorpora directamente al escurrimiento directo sin amortiguamiento por tránsito.

Entre el escurrimiento amortiguado, y el directo sin amortiguar, existe un flujo de agua que es función de un parámetro denominado X_2 . En cada intervalo, el escurrimiento total es denotado por el caudal Q_k , que resulta de la suma del caudal Q_r , proveniente del amortiguamiento de la lámina escurrida, y Q_d , que escurre sin amortiguar.

Estructura de actualización

Tomando paso de tiempo diario, Tangara (2005) explica en la Figura 2 el componente de la estructura del modelo hidrológico que tiene en cuenta el proceso de actualización para el pronóstico de caudal. El subíndice 1 representa el día de hoy, en el cual se lleva a cabo la operación de previsión, y subíndice 2 representa el día de mañana, en el cual el caudal es pronosticado.

a) Sean P_1 y E_1 la lluvia y la evapotranspiración potencial observados para hoy. Estas entradas harán evolucionar el nivel del reservorio de suelo

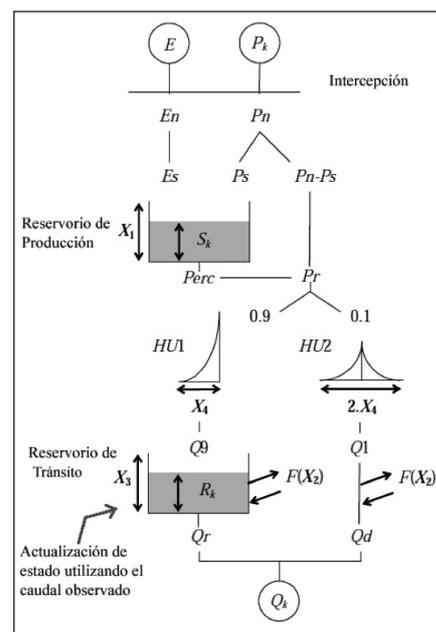


Figura 1. Esquema de la estructura del modelo GR4J con el proceso de actualización.

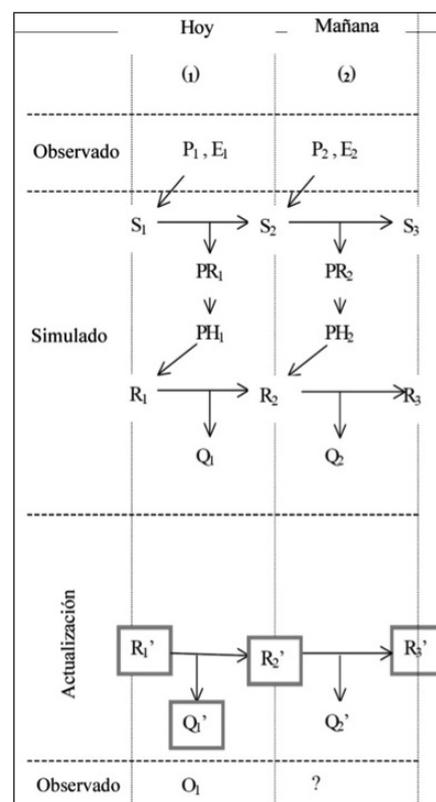


Figura 2. Esquema del proceso de actualización del modelo GRP.

S para alcanzar el nivel S1, simulado por el modelo, para el comienzo del día de hoy. Este nivel S1 del reservorio de suelo evoluciona al curso del día para tender hacia el nivel S1 al final del día de hoy, dejando una lluvia neta PR1 como salida del reservorio de suelo S. Esta lluvia neta PR1 es retardada por el hidrograma unitario (HU) que entrega una lluvia PH1 en su salida, que finalmente se agrega al nivel del reservorio de transferencia R. Este nivel R1 del reservorio de transferencia R evoluciona al curso del día para tender hacia el nivel R1 al final del día de hoy, liberando un caudal Q1 simulado, para el día de hoy.

- b) En realidad, el caudal observado para el día de hoy es O1, es distinto al caudal Q1 calculado por el modelo para este mismo día.
- c) Entonces, se reajusta el nivel R1 del reservorio de transferencia R hasta alcanzar el nivel R1' que debería tener, como el nivel de hoy, para entregar el caudal Q1' igual al caudal O1 observado ese mismo día, y producir el nivel R2' al final del día.
- d) El proceso precedente se repite de la misma manera para los días siguiente hasta el final de las observaciones, considerando a cada etapa de nuevas estimaciones como las nuevas condiciones iniciales del modelo.

El criterio de persistencia

En la Figura 3, e_m y e_r indican el error del cálculo de caudal y la diferencia entre un valor de caudal y el correspondiente a un tiempo L de diferencia, respectivamente. Se define el "coeficiente de persistencia" como un criterio racional de evaluación de la calidad del ajuste en un proceso de pronóstico hidrológico, como se muestra en la ecuación 1.

(1)
$$\frac{\epsilon_{m2}}{\epsilon_{r2}}$$

La dimensión e_r indica la medida de referencia con la cual se adimensiona el error de pronóstico.

Propuesta metodológica

La calidad de un modelo de pronóstico hidrológico a tiempo real está manifestada principalmente por el grado de precisión en la predicción de los valores de caudal (y nivel) en una determinada sección de interés de un río, con un cierto horizonte de previsión.

La falta de los valores de caudal a tiempo real puede originar una caída abrupta de la precisión del pronóstico. Por esa razón, puede tomarse también como otra manera de medir la calidad del modelo de previsión, la capacidad

de continuar trabajando con un pronóstico aceptable durante el evento extremo, aún cuando carezca de los valores de caudal medidos a tiempo real. En consecuencia, se propone el empleo de un método de optimización multiobjetivo para encontrar la Región de Pareto que presenta la zona de compromiso entre el juego de valores de parámetros que minimiza el error del modelo cuando cuenta con datos de caudal a tiempo real, versus el criterio de minimización, sin disponibilidad de dicha información.

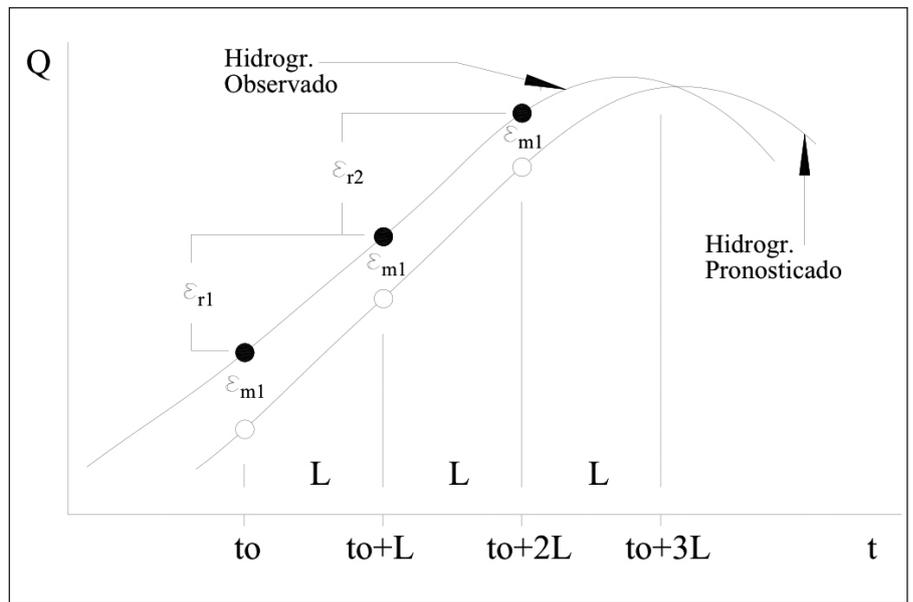


Figura 3. Descripción de las variables que intervienen en el Coeficiente de Persistencia.

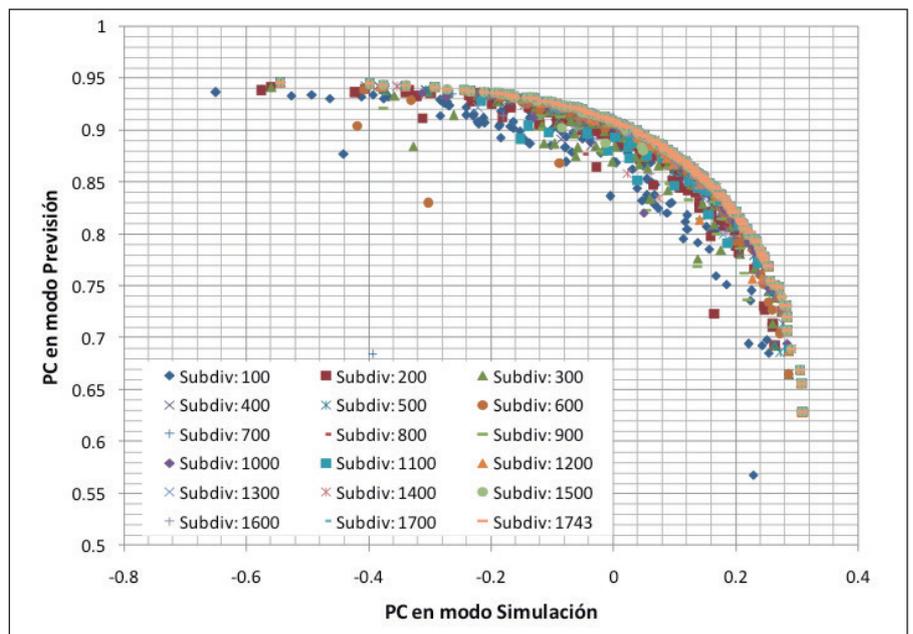


Figura 4. Evolución de la población de soluciones optimizada hasta la Región de Pareto.



Resultados preliminares y comentarios

Se puso a prueba la metodología sobre la cuenca “Le Gardon de St-Jean” (en Corbès, Francia), con una serie de 84.000 datos de lluvia y caudal con paso de tiempo horario, con un área de unos 263 km², y para un horizonte de previsión de 4 horas. En la Figura 4 se presenta la evolución de la población cada 100 subdivisiones en complejos de la población, y se observa cómo en la última subdivisión es alcanzada la Región de Pareto. Es importante destacar para la adecuada observación de los resultados, que el coeficiente de persistencia puede variar entre un valor de uno, con ajuste perfecto, a menos infinito.

Si analizamos la curva envolvente representada por la Región de Pareto, notaremos que se ha alcanzado finalmente dos soluciones extremas: sin datos de caudal a tiempo real, el coeficiente de persistencia es de 0.32, y con esa información (PC=0.95).

Se destaca primeramente la importancia de contar con los datos de caudal a tiempo real en la calidad del ajuste. Nótese que aún para la peor condición con datos de caudal el PC es del orden de 0.6, es decir todavía mejor que la mejor condición del modelo sin esa información. Sin embargo, si recorremos la curva de Pareto de izquierda a derecha, notamos que al principio su gradiente es suave, con lo cual, se puede permitir un mejoramiento considerable del modelo en modo simulación sin perder calidad el pronóstico del mismo en modo previsión. Es decir, se puede permitir un juego de valores de parámetros que ajusten considerablemente el modelo para que trabaje como si no se dispusiera de datos de caudal a tiempo real, y aún así no se estará sacrificando demasiada calidad en la previsión en el caso de que sí se disponga de esos datos.

Referencias bibliográficas

Alonso, F. J. (2008). *Calibración Automática de un Modelo Hidrológico basada en Algoritmos Genéticos, aplicación a dos cuencas típicas argentinas*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba.

Berthet, L. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire: pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. PhD Thesis de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech.

Bertoni, J. C. (2004). Curso sobre Gestión de Inundaciones en Áreas Urbanas. Programa de Capacitación para Gestores y Tomadores de Decisión Públicos en el Campo de los Recursos Hídricos. Global Water Partnership, South America - Asociación Mundial del Agua.

Le Moine, N. (2009). Description de l'algorithme développé pour le calage automatique du modèle CEQUEAU. Rapport intermédiaire n2. Edf-R&D-UPMC.

Lilas, D., Perrin C., Andréassian V. (2012). *Comparaison et évaluation de trois modèles de prévisions des crues sur le bassin de la Sarre*. SCHAPI Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations.

Mathevet, T. (2005). *Quels modèles pluie-debit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Thèse de Doctorat, à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 463 pp.

Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, Ch., Andréassian, V. (2006). *Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model*. Journal of Hydrology 318 (2006) 200–214.

Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 pp.

Perrin, Ch., Michel, C., Andréassian, V. (2003). *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*. Journal of Hydrology, 279, 275–289.

Perrin, Ch., Michel, C., Andréassian, V. (2007). *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. Rapport de Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.

Tangara, M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de Doctorat, Ecole pratique des hautes études de Paris - Sciences de la Vie et de la Terre, Paris, 374 pp.

Tucci, C. E. M., Ordonez, J. S., Simões, M. L. (1981). *Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados*. Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH Fortaleza.

Yapo, P. O., Gupta, H. V. and Sorooshian, S. (1998). *Multi-objective global optimization for hydrologic models*. Journal of Hydrology, 204, 83-97.

* Facundo J. Alonso¹, Nicolás Le Moine², Ludovic Oudin², Pierre Ribstein², Juan Carlos Bertoni¹

¹ Facultad de Cs. Ex. Fís. y Nat. de la “Universidad Nacional de Córdoba”, Argentina.

² Laboratorio Sisyphe 7619, “Université Pierre et Marie Curie”, París, Francia.

Influencia del fenómeno “La Niña” en la ocurrencia de sequías intensas en la Región Central de la Argentina

LETICIA VICARIO
CARLOS M. GARCÍA
JUAN CARLOS BERTONI

Introducción

La escasez de precipitaciones en un área y en un período de tiempo determinado constituye un proceso hidrológico extremo denominado “sequía”. Estos fenómenos pueden ser detectados utilizando información de diversas variables hidroclimáticas como la precipitación (sequía meteorológica), la humedad del suelo (sequía agrícola) o la escorrentía (sequía hidrológica).

Cuando se inicia un período de sequía, generalmente el sector agrícola es el primero en ser afectado debido a su alta dependencia de la cantidad de humedad en el suelo. No obstante, un período de sequía agrícola en una región, es consecuencia de la ocurrencia previa de un período de sequía meteorológica y, a su vez, es posiblemente precedente a la ocurrencia de un período de sequía hidrológica, según la extensión en el tiempo, de una o más de sus características.

Dado el carácter agrícola-ganadero de la región central pampeana de la República Argentina y su relevancia en la economía territorial, es indispensable analizar las sequías ya que se

caracterizan por afectar amplias zonas del país con recurrencias e intensidades variables y como consecuencia provocan importantes pérdidas económicas en la agricultura y ganadería (Ravelo, 2009). Además, es necesario el análisis de los períodos secos para realizar la planeación y manejo de los recursos hídricos en aquellas zonas donde gran parte de la actividad económica depende del aprovechamiento de los recursos hídricos (Ortiz Gómez *et al.*, 2010).

Se conoce que el ciclo enfriamiento de la superficie del océano en el Pacífico Central y Oriental denominado La Niña, correspondiente al fenómeno climático ENSO (El Niño–Southern Oscillation) provoca efectos climáticos extremos en distintos puntos del planeta, como períodos de sequías en América del Sur.

Debido a esto se considera necesario efectuar un análisis regional de la influencia de los episodios de La Niña en la ocurrencia de las sequías hidrometeorológicas en la región central de la República Argentina.

Índice	Categoría
>2	Extremadamente húmedo
1.99 a 1.50	Muy húmedo
1.49 a 1.00	Moderadamente húmedo
0.99 a -0.99	Normal
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
<-2.00	Sequía extrema

Tabla 1. Valores adimensionales del índice estandarizado de precipitación (SPI).



Sobre las sequías hidrometeorológicas

Se utilizaron trece estaciones pluviométricas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, representativas de la región de estudio, ubicadas en las provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos; para el período 1980-2009. Las mismas son las estaciones de superficie denominadas Córdoba, Pilar, Villa María de Río Seco, Río Cuarto, Laboulaye, Marcos Juárez, Sauce Viejo, Rosario, Venado Tuerto, El Trébol, Ceres, Paraná y Gualguaychú.

La identificación de los períodos secos y húmedos en la región se realizó a través del valor promedio de los índices SPI (por su sigla en inglés: Standardized Precipitation Index), (McKee *et al.*, 1993), de las estaciones pluviométricas. Este índice considera las probabilidades de ocurrencia de precipitación para un período dado. El cálculo consiste en ajustar una serie histórica de precipitación mensual con la función de distribución probabilística Gamma, ya que es la función de distribución que mejor ajusta a la variable precipitación (Thom, 1966; Young, 1992). Este índice ofrece la posibilidad de medición de la sequía en distintas escalas temporales, dependiendo del objetivo del estudio.

Se considera sequía cuando el valor del índice es igual o menor a -1. Los valores del SPI y las categorías de sequías se los presentan en la Tabla 1.

La ventaja de analizar el índice SPI (para 12 meses), es que permite evaluar el comportamiento de las sequías con un criterio tempo-espacial, observando la variabilidad interanual del proceso dentro de una región.

En la Figura 1 se muestra el valor promedio del índice SPI del conjunto de estaciones consideradas.

Cabe destacar que dentro del área de estudio se observaron sequías severas y/o extremas alrededor de los años 1989, 1997 y 2008-2009. Lo que indicaría un importante déficit hidro-meteorológico a nivel regional y en la segunda mitad de cada década.

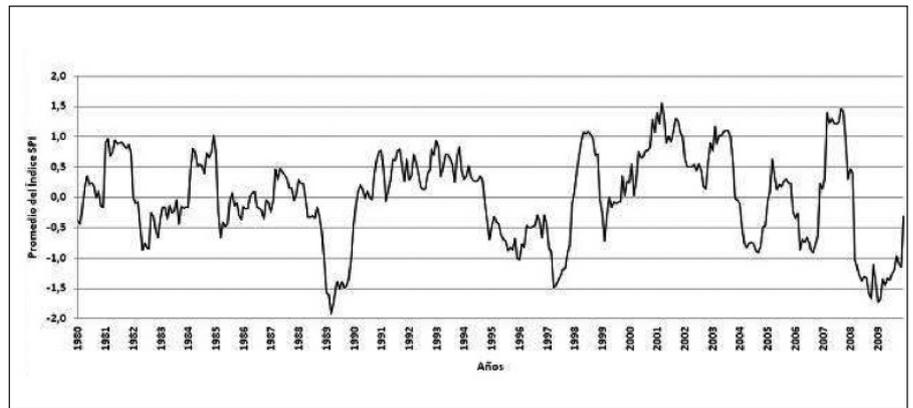


Figura 1. Gráfico del promedio de los valores del índice SPI (para 12 meses) de las estaciones: Córdoba, Pilar, Villa María de Río Seco, Río Cuarto, Laboulaye, Marcos Juárez, S.

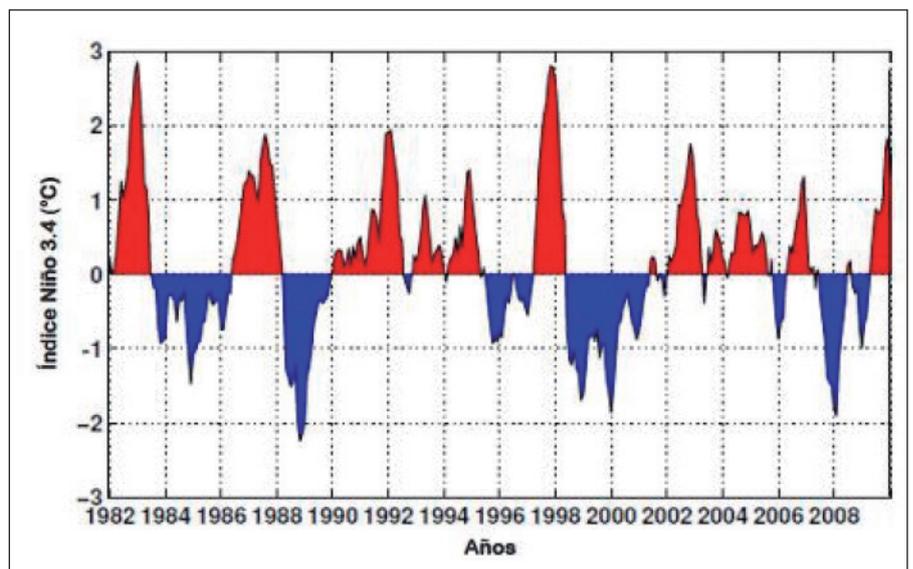


Figura 2. Índice histórico de Temperatura Oceánica (1982-2008).

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - Earth System Research Laboratory (ESRL)

Sobre el fenómeno climático “La Niña” y su influencia en el área de estudio

El fenómeno climático denominado ENSO (El Niño - Southern Oscillation) es un proceso de gran escala geográfica e implica un ciclo de calentamiento y enfriamiento de la superficie del océano en el Pacífico Central y Oriental. Esta región presenta un enfriamiento debido a los vientos del noreste, a la subida de agua fría en la costa de Perú y de una corriente oceánica fría que llega desde la costa de Chile. Cuando dicho enfriamiento es más intenso de lo normal se conoce como el fenómeno de La Niña, lo que provoca efectos climáticos extremos en distintos puntos del planeta,

como períodos de sequías en América del Sur y lluvias intensas asociadas a inundaciones en Australia oriental. Por el contrario, cuando el enfriamiento disminuye notoriamente, se conoce como el fenómeno del Niño, provocando efectos inversos a los citados previamente.

Cicero (2005) destaca que en la República Argentina, el fenómeno denominado ENSO afecta de manera diferenciada y sus efectos varían según la región. Tal es así, que en algunas zonas del centro del país y del Litoral, los períodos de El Niño pueden provocar una disminución de las precipitaciones y en otros casos, los ciclos de La Niña pueden generar lluvias por encima de lo normal.

Por otra parte Coronel y Sacchi (2006) observaron que en una localidad del Sur santafesino los eventos secos y húmedos pueden ocurrir tanto en situaciones de El Niño, La Niña o Neutralidad e infieren la necesidad de analizar a nivel local las relaciones existentes entre la precipitación y las anomalías atmosféricas de gran escala.

Dado que los efectos de los ciclos climáticos denominados La Niña correspondientes al fenómeno ENSO, están asociados a la escasez de precipitaciones en el continente sudamericano y que existen diversos estudios sobre la variabilidad de sus efectos en escalas geográficas menores o a nivel local, se establece el análisis y comparación de los períodos de sequías observados en la región central de Argentina con la ocurrencia de dicho fenómeno.

En la Figura 2 se muestra el Índice histórico de Temperatura Oceánica (1982-2008), el cual indica la ocurrencia de eventos Niño o Niña, si las temperaturas son superiores o inferiores a cero, respectivamente.

Como es posible observar, los años donde se suceden sequías intensas en las estaciones representativas del área de estudio son coincidentes con la ocurrencia del fenómeno La Niña. Sin embargo, dentro del período que abarca el presente trabajo, ocurrieron otros períodos de La Niña, tales como en los años 1984-1986 y 1999-2001, entre otros eventos menores, que no tuvieron efectos notables en cuanto a la intensidad de las sequías en la zona. Esto denota y ratifica que si bien en la región central de Argentina, el fenómeno de La Niña es una causa de importancia en la escasez de lluvias, la identificación de los factores y la interacción de los mismos para la determinación de las características de los períodos de sequías es complejo y requiere de un análisis detallado a nivel de cada localización.

Referencias bibliográficas

Cicero, A. R. (2005). Evaluación agrometeorológica de indicadores de sequía en la provincia de Mendoza. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias, Mención Agrometeorología. Escuela para Graduados, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

Coronel, Alejandra y Sacchi, Oscar. (2006). Climatología de eventos secos y húmedos en el sur santafesino. Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias. Número IX. Universidad Nacional de Rosario. Earth System Research Laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/>

Mckee, T. B., Doesken, N. J. and Kliest, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society. Boston, MA. 179-184.

Ortiz Gómez, R., Barragán Barrios, M.C. y Alvarado Medellín, P. (2010). Evaluación de la sequía meteorológica a escala regional en la cuenca Lerma Chacabala. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.

Ravelo, A. C. (2009). Monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. Seminario Internacional sobre Sequías y Gestión del Riesgo Climático. CAZALAC. Chile.

Thom, H. (1966). Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.

Young (1992). A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values. Monthly Weather Review, 120, pp. 2561-2569.

* Leticia Vicario^{1,2}, Carlos M. García^{2,3}, Juan Carlos Bertoni²

1 Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Universidad Nacional de Córdoba.

2 Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

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



Técnicas de Velocimetría por Seguimiento de Partículas a gran escala

A. PATALANO
W. BREVIS
C. M. GARCÍA
T. BLENINGER
A. RODRÍGUEZ
J. ÁLVAREZ

Introducción

Durante las dos últimas décadas, las técnicas de medición cuantitativa de velocidad de flujo por imágenes como la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, siglas en inglés) se han utilizado ampliamente en experimentos en laboratorio para la investigación de problemas dinámicos de fluidos (Adrian y Yao, 1985; Adrian, 2005). La aplicación de la Velocimetría por Imágenes de Partículas a gran Escala (LSPIV) es más moderna y resultó muy adecuada para caracterizar los campos de flujo con velocidades pequeñas que están por debajo del límite de detección de la mayoría de los dispositivos convencionales o en aguas someras (Meselhe, Peeva, y Muste, 2004). Dentro de los métodos actuales de PIV, el método Lagrangiano, conocido como Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV), tiene la principal ventaja de que es posible lograr la localización de la velocidad medida dentro del límite de la trazabilidad de las partículas, mientras que con la correlación cruzada de PIV, se obtiene la velocidad media de un conjunto de partículas en una determinada región del flujo (Ohmi & Li, 2000). En este artículo se presenta la implementación de la técnica de Velocimetría por imágenes de Partículas Lagrangiana (PTV) a mediciones de velocidad del flujo en instalaciones experimentales de gran escala, más precisamente para la determinación experimental de campos de velocidades superficiales. Esta

información es luego utilizada por investigadores del Centro de Estudios y Tecnología del Agua para estimar caudales escurridos y patrones de flujo en proyectos de extensión e investigación específicos.

Descripción de la Técnica PTV

Esta técnica, en la forma que se implementa en este trabajo, requiere de la siembra (agua arriba del tramo de estudio) de partículas artificiales repartidas lo más homogéneamente posible y el tamaño debe ser elegido por el usuario de tal manera que ocupe varios píxeles sobre las imágenes.

El rendimiento óptimo de la Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) implementada a gran escala depende esencialmente de las siguientes etapas: adquisición de la imagen y del procesamiento de la señal. El procesamiento de la señal, se puede dividir en las etapas de pre-procesamiento de imagen, definición del desplazamiento de las partículas, y por último el post-procesamiento de esta información. Para implementar el PTV a gran escala, los autores sugieren la siguiente estrategia:

- Separar la adquisición y las tareas de procesamiento de imágenes de manera tal que el sistema puede operarse independiente de la cámara. Esto hace posible utilizar cualquier tipo de cámara (webcam, cámara de video o cámara de fotos), sin imponer ninguna limitación en la óptica de la cámara o la resolución de la imagen, lo que permite la portabilidad y además aliviar los costos de instalación (especialmente para mediciones en campo). La fase de adquisición incluye también las posibles correcciones geométricas (corrección de lente y rectificación de imagen).

- Desacoplar las tareas de pre-procesamiento de imagen en dos fases principales: el tratamiento de las imágenes (definición de zona de interés/máscara, o sustracción del fondo de la imagen para que resalten mejor las partículas) y la detección de partículas.
- Procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de parámetros estadísticos de la velocidad del flujo en tiempo y espacio (por ejemplo, velocidad y vorticidad instantáneas y promedias).
- El uso de interfaces gráficas que permitan el uso de la técnica por no especialistas en lenguaje de programación.

Adquisición de las Imágenes

La adquisición de imágenes se logra por extracción de un video grabado por una cámara fotográfica desde una localización fija. Como se mencionó anteriormente, una de las ventajas de la técnica que se presenta es que la cámara usada puede ser cualquiera que grave video y se encuentre comercialmente disponible (webcam, video-cámara o cámara común), lo cual hace que esa técnica sea relativamente de bajo costo. Para optimizar la información contenida en cada imagen, el contraste entre las partículas y el fondo debe ser maximizado. La posición de la cámara debe ser elegida en función de la hora del día, para evitar reflexiones no deseadas del sol sobre el agua, lo cual provoca una sobre-saturación sobre las imágenes, lo que se traduce en pérdida de información. En el uso de PTV en laboratorio o para otro tipo de medición superficial de pequeña escala, es muy común posicionar la cámara sobre la región de interés perpendicular a la dirección de flujo. De tal forma, queda solamente

una corrección de lente a aplicar sobre las imágenes para el pre-procesamiento. Para mediciones en instalaciones experimentales de gran escala, en la mayoría de los casos es imposible colocar la cámara sobre la región de interés y la cámara debe ser lo suficientemente bien posicionada en el lugar, de tal manera que la zona de interés del flujo cubra una superficie importante de cada imagen. En éstos la corrección de geometría incluye:

- la calibración de la cámara, donde los parámetros internos son determinados en laboratorio. La técnica usa varias fotografías de un tablero de ajedrez sacadas desde varios puntos de vista. El algoritmo utilizado con la subrutina Matlab® “Camera Calibration Toolbox” (Bouguet, 2010) permite determinar los parámetros internos de la cámara.
- La distorsión de las imágenes debido a la propia lente de la cámara es corregida gracias a la subrutina Matlab®, basada en el modelo de distorsión de (Heikkilä & Silvén, 1997) el cual usa los parámetros internos de la cámara previamente calculados.
- La rectificación: En el caso que la cámara esté posicionada oblicuamente al flujo y no por arriba y perpendicular a éste, la rectificación es necesaria. Este proceso permite transformar las imágenes de tal manera que, sean libres de deformaciones provocadas por la oblicuidad de la cámara (Wolf & Dewitt, 2000). El programa utilizado para esa rectificación se encuentra basado en el Modelo de Terreno Digital (DTM), éste ha sido desarrollado y utilizado para video de vigilancia, aplicable al estudio de la morfodinámica de playas (Taborda, *et al* 2009 y 2012).

Procesamiento de la señal

A partir de esta etapa de implementación de la técnica de medición PTV descrita se usa el software “PTVlab” desarrollado con Matlab® por los autores de este trabajo en el grupo de investigación de Descripción de Turbulencia (DETU) del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). A continuación se describen cada una

de las sub etapas que se realizan con este software.

Pre-procesamiento de imagen

El pre-procesamiento de imagen consiste en:

- Remover el ruido de las imágenes (Honkanen & Nobach, 2005), es decir todas las partes fijas de las imágenes que no son partículas, llamado “fondo”. Se debe destacar que el pre-procesamiento de imagen sirve únicamente para modificar información registrada, esto es así, porque es imposible agregar información luego de hecha la medición (Fincham y Spedding, 1997). Sin embargo, el procesamiento de imagen, puede facilitar la detección de partículas y ahorrar el costo computacional. Esta etapa necesaria debería preservar la precisión de la medición si no cambia el perfil (escala de grises) de las partículas (Honkanen & Nobach, 2005). Las partes fijas de las imágenes llamadas “fondo” consiste en el promedio en escala de grises de todas las imágenes registradas. Cuando se resta el promedio a cada imagen, solamente quedan las partículas blancas sobre un fondo negro.
- Identificar las partículas. En primer lugar se destaca que el programa PTVlab detecta partículas blancas. Si las partículas son negras en escala de gris, el mapa de color debería ser invertido previamente. Generalmente el patrón de brillo de una imagen de partícula tiene un pico en el centro de esa imagen, y se asume que el brillo de la partícula tiene forma de distribución Gaussiana en dos dimensiones (Takehara & Etoh, 1998). Por lo tanto, el usuario del software debe definir el valor de la desviación estándar de la distribución gaussiana lo que corresponde aproximadamente al diámetro de las partículas.

Definición del desplazamiento de las partículas

Para la definición del desplazamiento de las partículas de una imagen a la siguiente, el software permite tres opciones metodológicas:

- Algoritmo BCC/CC: la velocidad asociada con una partícula se encuentra, mediante el más alto coeficiente de correlación cruzada obtenido después de comparar una matriz de intensidad (para cada partícula) de referencia, en el primer cuadro y un conjunto de sub-matrices en el segundo. Normalmente, el algoritmo de BCC, hace uso de las matrices de intensidad binarias y, debido a esto, se conoce como método BCC (Uemura, Yamamoto, Ohmi, 1989, y Hassan, Blanchat y Seeley 1992). El BCC se basa en la mayor similitud de los patrones de distribución de partículas para seguir las partículas individuales, y se caracteriza por un bajo nivel de cálculo (Ishikawa *et al.*, 2000 y Ruhnau, Guetter, Putze y Schnoerr, 2005). Con el fin de binarizar la imagen original, se puede utilizar un nivel de intensidad umbral, único o múltiple, pero en nuestro caso se utiliza un algoritmo de PTV que no usa la binarización (Brevis, Niño y Jirka, 2011) que se denomina CC, para diferenciarlo del BCC. De tal manera el CC, usa todo el campo de intensidad durante el proceso de semejanza.
- Algoritmo RM: Este algoritmo de PTV, se basa en el uso de la técnica de relajación etiquetada iterativa. Históricamente, la técnica ha sido ampliamente utilizada, para resolver los problemas de semejanza en visión artificial y luego fue aplicada a la técnica de PTV (Baek y Lee, 1996; Ohmi y Li, 2000; y Pereira, Stuer, Graff y Gharib, 2006). Básicamente, ese algoritmo, calcula la probabilidad P de semejanza de desplazamiento de una partícula “objetivo” con la de una partícula “vecina”. Una partícula “vecina”, se ubica dentro de un radio Tn . Aunque eficaz, el RM, puede fallar en el caso de las partículas solitarias, porque se basa en la probabilidad de desplazamiento de partículas “vecinas” que tienen movimiento similar. Además, el algoritmo requiere un gran número de iteraciones por imagen, para lograr una convergencia adecuada, lo cual aumenta el costo computacional de ese método.



- Algoritmo CCRM: (Brevis, Niño y Jirka, 2011) presenta un algoritmo híbrido, que permite mejorar significativamente el tiempo de proceso del método de RM, utilizando el método de CC previamente, lo cual reduce la cantidad de iteraciones necesarias para el algoritmo de Relajación.

Ejemplo de Aplicación

Metodología

Se aplicó la técnica en una instalación experimental de gran escala, la cual consiste en un canal artificial de 6.53m de ancho con una profundidad de flujo de 0.81 m que presenta particularidades de recirculación en los patrones de flujo. Se utilizó una cámara no profesional SonyDSCH20 para grabar una secuencia de 45 segundos desde la orilla. La siembra de partículas agua arriba se hizo manualmente con partículas de plástico de 6 cm de diámetro. Las imágenes grabadas fueron transformadas en escala de gris para un menor costo computacional (Figura 1a). Se corrigió la distorsión de las imágenes debido a la propia lente de la cámara (Figura 1b) y se rectificó las imágenes de tal manera que se tiene una vista ortogonal del flujo (Figura 1c). Para el procesamiento de la señal se usó el software PTVlab que detecta las partículas después de haber eliminado el fondo de las imágenes (Figura 2a). Luego, se eligió el algoritmo híbrido CCRM del software para determinar el desplazamiento individual de las partículas entre pares de imágenes (Figura 2b). Por fin, se interpoló el desplazamiento sobre una misma grilla para visualizar los resultados promedios (Figura 2c).

Resultados

Los valores de velocidad muestran una buena coincidencia con valores preliminares registrados simultáneamente con otro instrumental: integrando el perfil de velocidad transversal superficial multiplicado por la sección de flujo se obtiene un caudal aproximativo de 2.45 m³/s versus 2.25 m³/s medido con el ADCP. Se produce una completa coincidencia entre ambos caudales cuando se multiplica la velocidad superficial por un coeficiente igual a 0.9

para calcular la velocidad media en la transversal. Además, los patrones de recirculación coinciden con los observados en campo.

Conclusiones

En este trabajo se implementó la técnica PTV en mediciones a gran escala. Se detallaron las etapas requeridas en la implementación, como así también sugerencias metodológicas para obtener resultados precisos.

A partir de la etapa de procesamiento de las señales digitales, se usó el software "PTVlab" desarrollado con Matlab® por los autores de este trabajo en el grupo de investigación de DETU

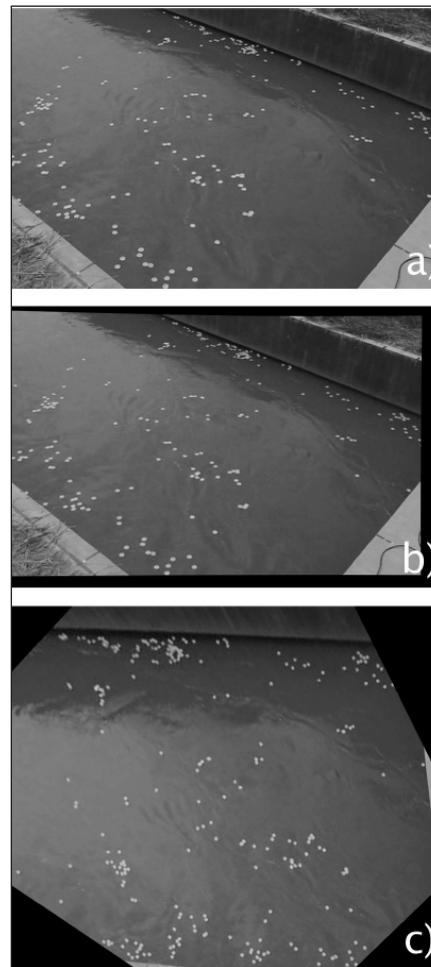


Figura 1. Adquisición de las Imágenes. a) Imagen original instantánea, b) Imagen corregida por distorsión debido a la propia lente y c) Imagen Rectificada en un plano ortogonal.

del CETA de la Universidad Nacional de Córdoba.

Se ha utilizado la técnica descrita en este artículo para un caso de aplicación real. Los resultados obtenidos en la determinación de los patrones de flujo en un canal artificial muestran las ventajas de implementar dicha técnica que genera una muy buena cobertura espacial.

En un trabajo futuro se propone automatizar las etapas de corrección y rectificación de las imágenes e incorporarlas a una nueva interfaz o en la existente. Se investigará sobre la mejora de la técnica para usar partículas ya presentes en el agua sin usar siembra artificial.

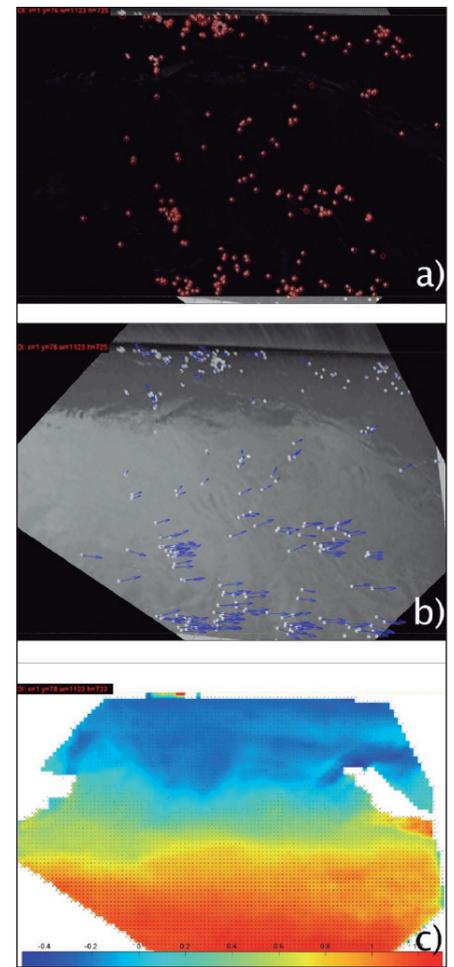


Figura 2. Procesamiento de la señal en PTVlab. a) Detección de las partículas de una imagen instantánea después de remover el fondo, b) Resolución del desplazamiento individual de las partículas y c) Visualización de los resultados interpolados y promedios de la velocidad longitudinal.

Referencias bibliográficas

- Adrian, R. J.** (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 39, 159-69.
- Adrian R. J. & Yao C-S.** (1985). Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials. *Appl. Opt.* 24, 44-52.
- Baek S. J. and Lee S. J.** (1996). A new two-frame particle tracking algorithm using match probability. *Exp Fluids* 22:23-32.
- Bouguet, J.** (2010). Camera calibration toolbox for matlab. Obtenido de http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- Brevis W., Niño Y. & G Jirka G. H.** (2011). Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Exp Fluids* 50 135-147.
- Fincham, A. M. & Spedding, G. R.** (1997). Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow. *Experiments in Fluids*, Volume 23, Number 6, Pages 449- 462.
- Hassan Y.A., Blanchat T.K. & Seeley C.H.** (1992). PIV flow visualization using particle tracking techniques. *Meas. Sci. Technol.* 3 633-42.
- Heikkilä, J., & Silvén, O.** (1997). A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)* (pp. 1106-1112.). San Juan, Puerto Rico.
- Honkanen, M., & Nobach, H.** (2005). Background extraction from double-frame PIV images. *Experiments in Fluids*, 38(3), 348-362. doi:10.1007/s00348-004-0916-x.
- Ishikawa M., Murai Y., Wada A., Iguchi M., Okamoto K. & Yamamoto F.** (2000). A novel algorithm for Particle Tracking Velocimetry using the velocity gradient tensor. *Exp Fluids* 29(6):519-531.
- Meselhe, E. A., Peeva, T., & Muste, M.** (2004). Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows, (September), 937-940.
- Ohmi K. & Li H.** (2000). Particle tracking velocimetry with new algorithms. *MeasSciTechnol* 11(6):603-616.
- Pereira F., Stuer H., Graff E & Gharib M.** (2006). Two-frame 3D particle tracking. *MeasSciTechnol* 17:1680-1692.
- Ruhnau P., Guetter C., Putze T & Schnoerr C.** (2005). A variational approach for Particle Tracking Velocimetry. *MeasSciTechnol* 16:1449-1458.
- Taborda, R., & Silva, A.** (2012). COSMOS: a lightweight coastal video monitoring system. *Computers & Geosciences*. doi:10.1016/j.cageo.2012.07.013.
- Taborda, R., Silva, A., Catalão, J., & Freire, P.** (2009). DTM Extraction Using Video-monitoring Techniques: Application to a Fetch limited Beach. *Journal of Coastal Research*, 2009(56), 203-207.
- Takehara, K., & Etoh, T.** (1998). A Study on Particle Identification in PTV. *Journal of Visualization*, 1(3), 313-323.
- Uemura T., Yamamoto F., Ohmi K.** (1989). A high-speed algorithm of image analysis for real time measurement of a two-dimensional velocity distribution. *Flow visualization*, ASME FED-85, pp 129-134.
- Wolf, P. R. & Dewitt, B. A.** (2000). *Elements of photogrammetry: with Applications in GIS*. 3rd ed., USA, McGraw-Hill Book Company, pp. 607.

* A. Patalano¹, W. Brevis², C. M. García¹, T. Bleninger³, A. Rodríguez¹ y J. Alvarez¹

1 Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

2 Department of Civil and Structural Engineering, Sir Frederick Mappin Building.

3 Dpto. de Engenharia Ambiental (DEA), Univ. Federal do Paraná (UFPR), Curitiba - PR, Brazil.



Análisis de simultaneidad de extremos hídricos en el centro y norte de la República Argentina

ERICA DÍAZ
 ANDRÉS RODRÍGUEZ
 O. DÖLLING
 GERARDO MOYA
 JUAN CARLOS BERTONI
 E. CASTELLO
 MARIANA PAGOT
 G. HILLMAN

Introducción

Una adecuada planificación del uso y manejo del recurso hídrico requiere principalmente, la toma de conciencia de que “el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente” (Tratado de Dublin, 1992).

El conocimiento de la variación espacial y temporal de los recursos hídricos es fundamental para evaluar la disponibilidad hídrica regional. Ya que permite identificar la fragilidad de los sistemas que abastecen a una región durante los extremos hidrológicos (períodos de excesos como de escasez de escurrimientos).

El siguiente trabajo presenta un análisis de simultaneidad de extremos hídricos en 8 cuencas del centro y norte de la República Argentina (RA) evaluando aportes anuales.

Las cuencas seleccionadas son la de los Ríos Colorado, Paraná, Ctalamochita, Xanaes, Suquía Dulce, Bermejo y Pilcomayo.

Para evaluar la influencia de la variabilidad de la temperatura superficial del Océano Pacífico Ecuatorial sobre esta zona de estudio, (ya que es una de las fuentes más atribuidas de variabilidad interanual de las variables hidrológicas en el continente Sudamericano (Díaz, 1998), se incluyó al análisis los índices ONI (Ocean Niño Index).

Análisis de las variaciones anuales de las cuencas de Región Centro de la República Argentina vinculadas al abastecimiento del Gran Córdoba

La ciudad de Córdoba y su zona de influencia, denominada el Gran Córdoba (GC), se encuentran comprendidas dentro de la región centro de la provincia homónima, perteneciente a la República Argentina, con una población de aproximadamente 1.300.000 habitantes en la capital y llegando a un total de 1.600.000 con su zona de influencia.

El abastecimiento de agua en la región se realiza principalmente de la cuenca del río Suquía, y en menor medida de la cuenca del río Xanaes. Estas almacenan los aportes hídricos superficiales en el embalse San Roque y Los Molinos respectivamente.

Las cuencas de los ríos Ctalamochita y Dulce son dos cuencas potenciales de abastecimiento de agua al GC. que presentan el mayor módulo en la provincia de Córdoba por ello se suman al conjunto de las cuencas analizadas. (Ver Tabla 1 y Figura 1).

La cuenca del Río Suquía a la altura del Embalse San Roque colecta las aguas de los ríos San Antonio,

Cosquín, arroyos Los Chorrillos, Las Mojarras y los aportes no encauzados del perillago. Los datos registrados en el punto de medición Dique San Roque, perteneciente a la Red Hidrológica Nacional, revelan un caudal medio anual promedio de 9,66 m³/s en el período 1925-1986 (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010) en un área de aporte de 1350 km².

La cuenca del Río Xanaes tiene por tributarios los ríos San Pedro, Los Espinillos, Del Medio y Los Reartes junto con los aportes no encauzados del perillago. El módulo es de 9,46 m³/seg medido en la estación Embalse Los Molinos, período 1952-1980 (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010) y el área de aporte es de 980 km².

Ambos ríos desembocan en la Laguna Mar Chiquita. Es una zona serrana, y dada la dispersión geográfica de los cordones, el clima es muy variado, con mayores precipitaciones orográficas en las laderas orientales. Esto sumado a la variedad de temperaturas por la altura, origina el clima serrano, caracterizado por zonas húmedas en un entorno semiárido.

La cuenca del Río Ctalamochita, pertenece a la cuenca Carcaraña y es de carácter exorreico, terminando en la cuenca del Plata. Nace en las

Cuenca del Río	Estación			Altitud [msnm]	A de Aporte [KM2]	Módulo [m3/seg]	Volumen de Aporte medio Anual [HM3]	Período
	Denominación	Lat.	Long					
Suquía	San Roque	31° 22' 00,0"	64° 27' 00,0"	650	1.350	9,7	353,6	1926-2009
Xanaes	Los Molinos	31° 05' 00,0"	64° 30' 00,0"	770	980	9,5	321,2	1937-1998
Dulce	La Escuela	27° 30' 00,0"	64° 51' 00,0"	265	19.700	82,2	3484,8	1926-2009
Ctalamochita	Embalse	32° 09' 60,0"	64° 23' 00,0"	650	3.300	27	858,5	1926-1982
Bermejo	Pozo Sarmiento	23°13'58,13"	64°12'35,08"	296	25.000	446	11.790,4	1941-2009
Pilcomayo	La Paz	22°22'38,60"	62°31'23,29"	230	96.000	237	6.749,2	1961-2009
Paraná	Los Tambúes	32°39'30,00"	60°43'50,00"	12	2.346.000	15.171	487.303,43	1906-2010
Colorado	Pichi Mahuida	38°49'17,90"	64°58'53,20"	122	22.300	148,3	4.102,45	1918-2010

Tabla 1. Resumen de las características hidrológicas y geográficas de las cuencas de la RA analizadas.

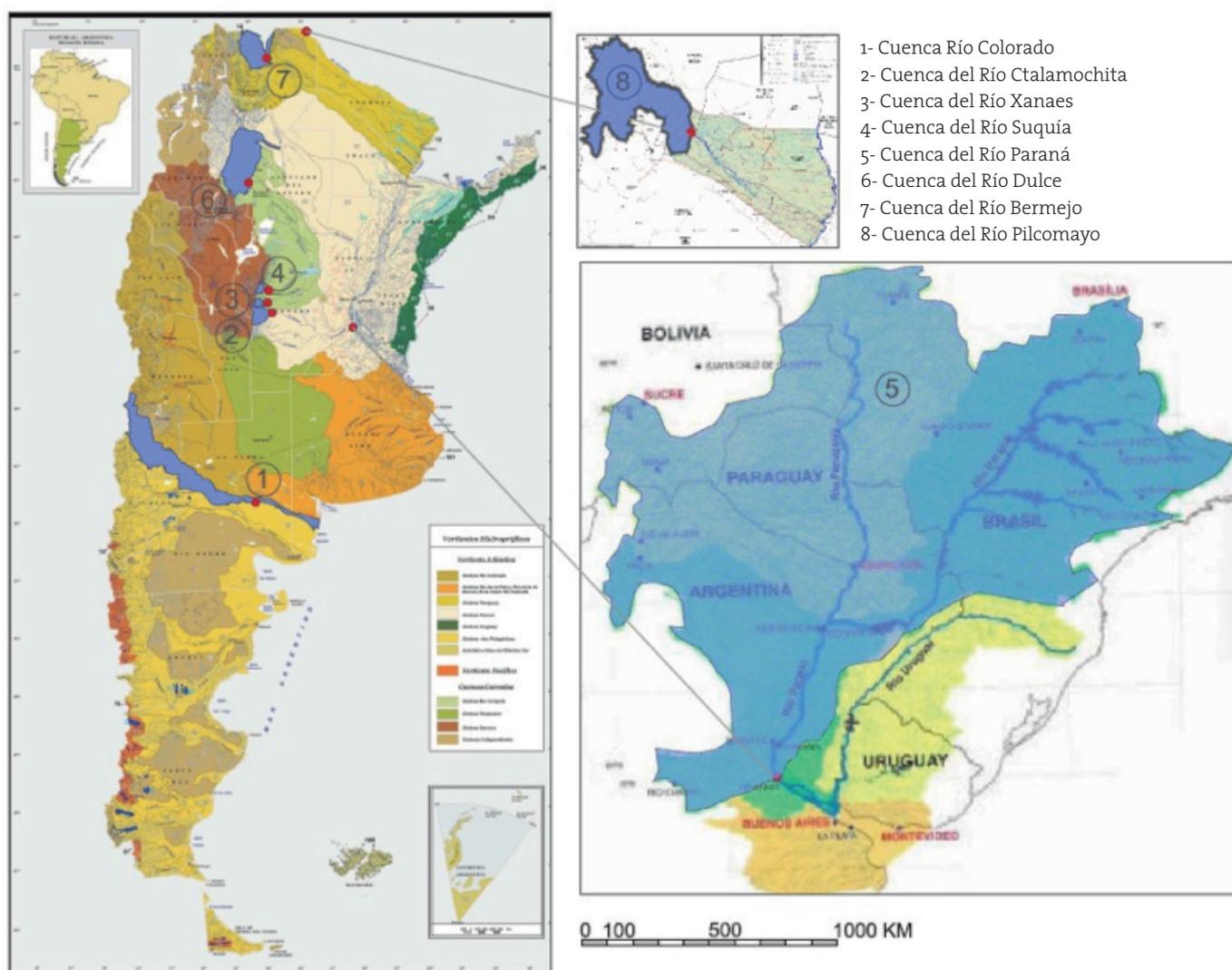


Figura 1. Ubicación de las cuencas analizadas de la RA Fuentes (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010) y (Halcrow, y otros, 2006).

vertientes orientales de la Sierra Grande y tiene una superficie aproximada de 3 300 km². Su módulo es de 27 m³/seg., es decir que representa casi 3 veces el del Suquía ó Xanaes.

La cuenca del río Dulce involucra parte de las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba. Por las especiales características geomorfológicas, a partir del embalse de Río Hondo, es posible distinguir dos sectores bien diferenciadas e inclusive con nombres diferentes:

El río Salí, que es la sub cuenca superior, se caracteriza por tener una precipitación media anual de aproximadamente 800mm con una subregión con valores medios mayores a 1000mm, por lo que se la puede considerar climáticamente húmeda. Estas lluvias están distribuidas irregularmente en

el espacio y en el tiempo. Presentando un semestre seco y otro húmedo donde llueve casi el 90% del total anual. Respecto a su distribución son mayores en la zona montañosa del oeste.

El río Dulce que corresponde a la llanura inferior, casi no recibe afluentes y se caracteriza por tener cauces inestables, algunos efímeros y numerosos bañados. Descarga en la Laguna Mar Chiquita.

Series de aportes utilizadas

La serie de aportes de la cuenca del río Suquía (desde 1926 a 1990) corresponden a la reconstrucción que realizó el Ing. Moya (Moya, 2004). Hasta el año 1980 se dispuso de datos de caudales medios mensuales, obtenidos de diversas fuentes. Desde 1980 a 1990 se utilizan volúmenes aportados al embalse

brindados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos Provincial (SRHP). Y desde 1990 a 2010 se completa la serie calculando los aportes a partir del balance hídrico en el embalse utilizando datos de niveles de embalse, descarga por vertedero y usina. (Díaz, 2012).

La serie de aportes de la cuenca del río Xanaes se obtuvo de (Moya, 2004); la del río Dulce de un informe del INCYT (Rodríguez, 1990; de Gallego, 2012 y Hillman, 2002). El resto de las series se obtuvo de las publicaciones hidrometeorológicas 2010 (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011).

Los datos de volúmenes anuales de escurrimiento corresponden a años hidrológicos (desde Julio a Junio del año siguiente).



Análisis de los aportes en las cuencas

Se presenta a continuación los gráficos (Figura 2) que comparan el comportamiento anual de los aportes en las cuencas de los Ríos Suquia, Xanaes, Dulce y Ctlamochita. Se toma como referencia los aportes del Río Suquia.

Para facilitar su comprensión y comparación en los gráficos se presentan las series de aportes anuales modificadas de manera que su media sea nula, y, además, se las adimensionalizó dividiéndolas por la máxima amplitud encontrada sobre la media (para que varíe entre +1 y -1):

Donde

V_i : es el volumen anual correspondiente al año i .

Volumen medio de la serie.

$V_{m\acute{a}x}$: Volumen máximo de la serie.

De este análisis de superposición de escurrimientos anuales se puede observar, que todas las series tienen tendencia positiva y un quiebre en el año 1976 que marca 2 períodos. En uno la característica es que más del 60% de los derrames anuales están por debajo de la media, y en el otro, (de menor cantidad de años) más del 60% de los derrames están por encima.

En todas las series, salvo la del río Xanaes, se distinguen 3 ciclos: uno de 1932 a 1943 y otro desde 1943 a 1956, ambos presentan períodos de 12 y 13 años, con valles de 10 y 11 años, respectivamente. Estos valles son aportes por debajo de la media (sin tendencia), que lo denominaremos como escasez de agua.

En la década del 60' se encuentra el tercer ciclo mencionado, en el cual hubo 7 años de escasez común entre 1965 a 1971. En todos los ciclos la intensidad de la escasez fue del orden de 1 a 6 veces el mínimo histórico registrado en cada serie.

Los mínimos históricos de todas las cuencas se dieron antes de 1976.

A partir de 1976 se observan 12 años de exceso hídrico en todas las cuencas (excepto la del río Ctlamochita que no se dispone de datos a partir de 1983), y luego ciclos, de mayor frecuencia. Estos presentan períodos de 6 años aproximadamente, con predominio de aportes por encima de la media, y años de

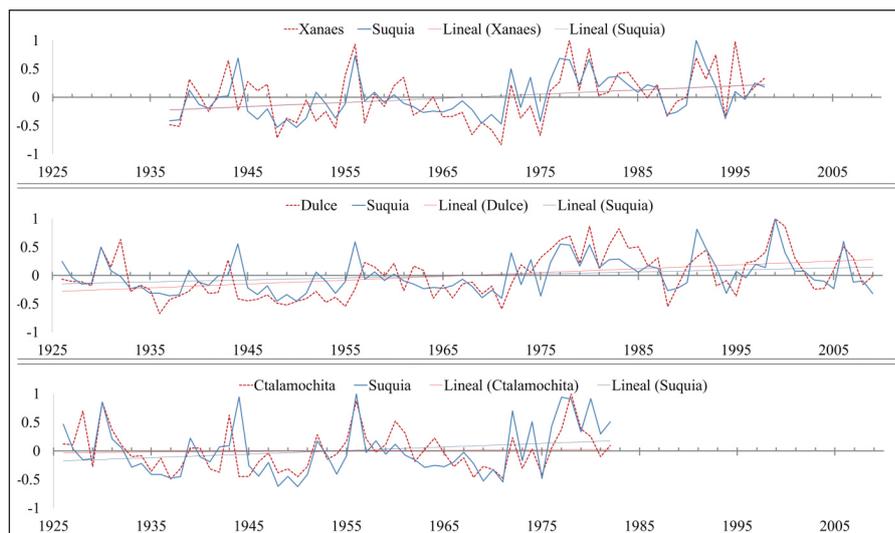


Figura 2. Series de aportes anuales adimensional.

escasez menos intensos, del orden de 1.5 a 10 el mínimo histórico registrado en cada serie. En esta etapa se detectaron los valores máximos de aportes históricos para todas las cuencas.

De los 4 sistemas analizados se observa una simultaneidad de los eventos hídricos extremos, que desde el punto de vista de la gestión del recurso representa una fragilidad para el sistema de interés del GC, ya que ante períodos de escasez de agua todos enfrentan la misma situación.

Se resalta también que los mínimos históricos se registraron antes de 1976 y no se han vuelto a repetir períodos semejantes en las últimas décadas para las cuencas de los ríos Suquia y Dulce de las cuales se dispone de datos. Esto debe tenerse en cuenta, ya que en los últimos años el GC. enfrentó crisis hídricas donde la demanda superó a la oferta.

Análisis de las variaciones anuales de las cuencas de la Región Centro y Norte de la R.A.

A fin de ampliar el estudio a nivel Regional se amplió la franja de análisis en latitud agregando otras cuencas como son la de los ríos Colorado, Paraná, Bermejo y Pilcomayo. Se debe resaltar que los sistemas ahora analizados son de mayor escala del orden de 10 a 1000 veces el módulo del Suquia. (Ver Figura 1)

La cuenca del Río Colorado comprende un área de 47.458,89 Km² (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010)

y está comprendida por 4 ecorregiones con relieve y régimen de precipitaciones muy variado, desde 100 a 600 mm medios anuales.

Los principales afluentes del río Colorado son los ríos Grande y Barrancas. El primero corre con orientación norte-sudeste desde alturas de aproximadamente 4600 m en sus nacientes hasta 835 m en su confluencia. El mayor aporte se debe a precipitación nival. El río Barrancas corre con sentido sudeste en un trayecto lineal de 130 Km y tiene su origen en la laguna Negra, en la falda de la cordillera límite con Chile. Es una cuenca de transición entre las hoyas nivales al norte y pluvio-nivales del sur.

La cuenca del Río Bermejo forma parte de la Hoya hidrográfica del Plata y es junto con el río Pilcomayo el principal afluente del río Paraguay. El río Bermejo se forma en la confluencia de los ríos Condado y Bermejo Chico, de cuya unión resulta el alto Bermejo al unirse con el río Grande de Tarija, constituyendo ambos la frontera internacional. La estacionalidad e intensidad de las precipitaciones (900mm anuales) en la alta cuenca, que se concentran en verano, influyen sobre el grado de erosión.

La cuenca del río Pilcomayo es una cuenca compartida con Bolivia y Paraguay. En el sector analizado es un río que escurre por una planicie aluvial, formada por sedimentos poco consolidados que han sido depositados y transportados. Una característica del

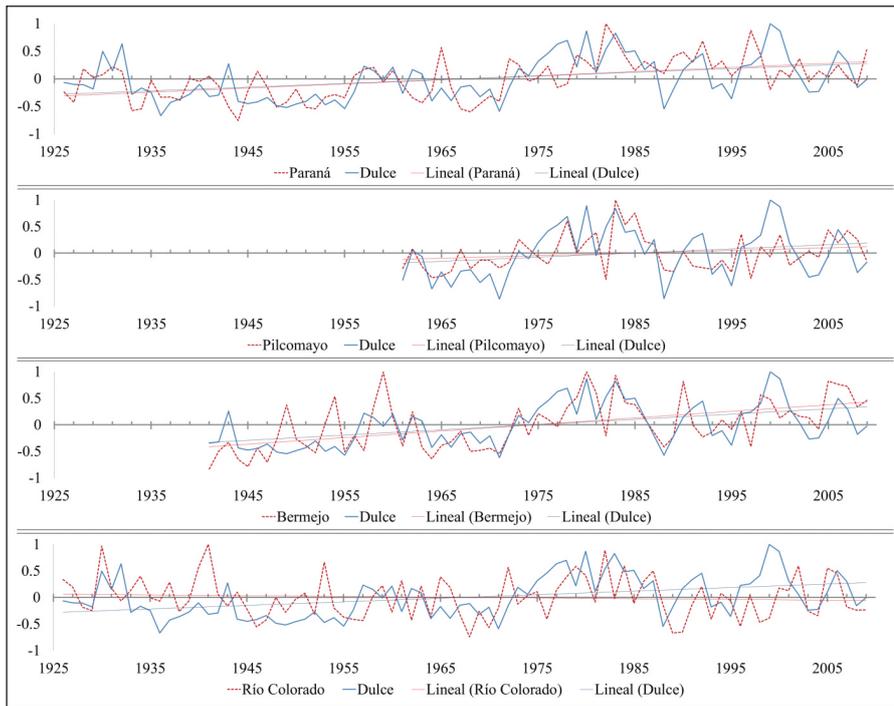


Figura 3. Series de aportes anuales adimensional.

río es el desborde y la sobre elevación permanente de su lecho por la deposición de los sedimentos transportados.

El río Paraná en el punto de análisis (estación Los Timbués) trae los aportes de la casi totalidad de la cuenca del Plata. Desde su origen en la confluencia con los ríos Paranaíba y Grande hasta su desembocadura en el río de la Plata tiene 2570 km, pero si se le suma el Paranaíba, su afluente principal, alcanza los 3740 km.

El Paraná superior se encuentra en Brasil, lo caracteriza la presencia de altiplanos escalonados y su ancho es variable, es un río con un alto grado de regulación. Luego de unirse con el Paraguay, el río desciende con leve pendiente hasta la desembocadura y disminuye su ancho. En el tramo medio e inferior, el cauce principal presenta numerosas islas, diseminadas a lo largo del curso. Como puede notarse el río Paraná es un importante sistema, dentro del cual desembocan de manera indirecta, el río Ctalamochita, el Pilcomayo y Bermejo.

A continuación se exponen los gráficos que revelan el comportamiento de estos sistemas. (Figura 3).

Las series de aportes de las cuencas agregadas al análisis fueron comparadas con los aportes del río

Dulce ya que este demostró el mejor coeficiente de correlación cruzada entre las cuencas que se agregan al estudio. Ver Tabla 2.

Del análisis de superposición de escurrimientos anuales se observa que casi todas las series tienen tendencia positiva y un quiebre en el año 1976, que marca 2 ciclos. En el primero más del 70% de los aportes son de escasez y en el segundo más del 55% son de exceso, excepto el río Colorado. La serie de este último presenta una tendencia negativa y un leve cambio en la frecuencia de aportes por debajo de la media que disminuye de 56 a 53 % después de 1976. Además se pueden distinguir, de las series que disponen

Cuenca del río	Suquía	Xanaes	Dulce	Ctalamochita	Paraná	Bermejo	Pilcomayo	Colorado
Suquía	1							
Xanaes	1936-1998 0.70	1						
Dulce	1926-2009 0.67	1936-1998 0.44	1					
Ctalamochita	1926-1982 0.65	1936-1982 0.76	1926-1982 0.53	1				
Paraná	1926-2009 0.33	1936-1998 0.39	1926-2009 0.51	1926-1982 0.33	1			
Bermejo	1941-2009 0.26	1941-1998 0.22	1941-2009 0.58	1941-1982 0.26	1941-1982 0.36	1		
Pilcomayo	1961-2009 0.22	1961-1998 0.27	1961-2009 0.54	1961-1982 0.36	1961-2009 0.03	1961-2009 0.73	1	
Colorado	1926-2009 0.24	1941-2009 0.11	1926-2009 0.20	1926-1982 0.20	1926-2009 0.19	1941-2009 0.12	1961-2009 0.11	1

Tabla 2. Coeficientes de correlación cruzada para las distintas series de aportes.



de datos, 2 periodos comunes de 4 años de escasez entre los años 1947-1950 y 1968-1971. Estos coinciden con los periodos encontrados en las cuencas del GC.

Los mínimos históricos se registran antes del 1976, salvo para la cuenca del río Pilcomayo, sin embargo de esta se disponen de datos a partir de 1961. Y los máximos históricos se registran después de 1976 para todas cuencas excepto la del Río Colorado.

Observando el comportamiento entre el Dulce y Paraná, las líneas de tendencia son muy similares y la correlación encontrada entre ellos es de 0.53. Entre ellos se distinguen 3 ciclos de distinto periodo pero con valles de aportes por debajo de la media comunes entre 1933-42; 1947-55; 1966-71 y luego un periodo de excesos entre 1979-87.

Entre Pilcomayo y Bermejo el comportamiento es semejante, entre ellos. Mientras que con respecto al Dulce y Bermejo se observan valles de escasez entre los años 1944-50; 1964-72; y crestas con excesos entre 1999-02. Además, las formas de oscilar son parecidas a partir de 1962, teniendo ciclos comunes entre 1962-73; 1980-83; 1983-1991; 1999-06. Entre el Colorado y Dulce se observan tres valles comunes entre los años 1945-50, 1954-56 y 1967-71.

A continuación se presentan los índices de correlación cruzada calculados.

Los índices de correlación cruzada indican el grado de relación de las variables para la misma ventana de tiempo.

Se destaca que las cuencas del Xanaes, Suquía, Dulce y Ctalamochita el grado de correlación es alto entre ellas. Mientras que El Dulce es el que mantiene mayor correlación con los otros sistemas. El Bermejo y Pilcomayo tienen una correlación mayor entre ellas, pero baja con los otros sistemas.

Índices ONI

Se agregó al análisis de las series una comparación con los índices ONI (Ocean Niño Index), con el fin de estudiar si existe alguna relación en el comportamiento de las serie de aportes con algún fenómeno vinculado a la variabilidad de la temperatura

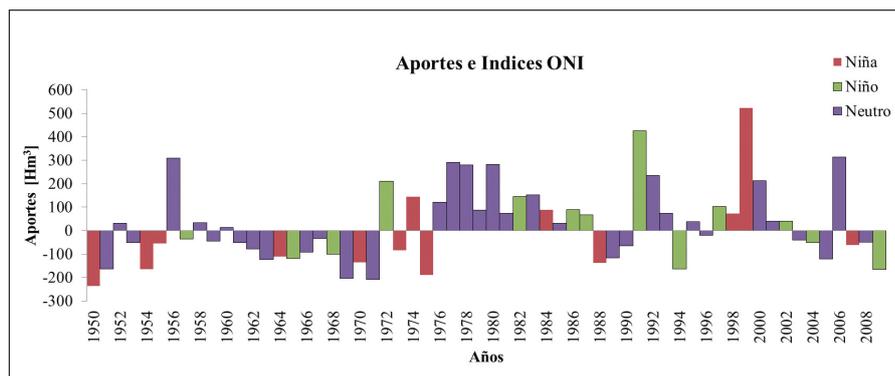


Figura 4. Serie de aportes anuales de la Cuenca del río Suquía menos la media de la serie superpuesta a la serie de índices ONI.

superficial del océano Pacífico Ecuatorial (TSM). Ya que es una de las fuentes más atribuidas de variabilidad interanual a multidecádica de las variables hidrológicas en el continente Sudamericano (Díaz, 1998).

El índice ONI es el promedio de tres meses de las anomalías de las temperaturas superficiales del Océano Pacífico (ATSM) en la región NIÑO 3.4. Si es mayor o igual a $+0.5^{\circ}\text{C}$, define un evento denominado “Niño”, si es menor o igual a -0.5°C , el evento es “Niña” y en el resto de los casos se determina como un evento Neutro.

Dado que se trabajó con aportes anuales hidrológicos, se definió años hidrológicos Niño, Niña o Neutros en función de la cantidad de eventos de una clase que predominaban en un año. Es así que se obtiene la siguiente gráfica donde se indica con la magnitud de las barras el valor del aporte anual menos la media para la Cuenca del Suquía y en color se indica si fue un año “niña”, “niño” o “neutro”. Se elige la cuenca del Río Suquía como representativa de la región centro del país, ya que presenta el mejor índice de correlación cruzada entre ellas. (Ver Figura 4)

Los valores de los índices ONI mensuales se obtuvieron (NOAA, 2012).

No se observa una relación aparente entre el fenómeno ENOS y los derrames anuales en la cuenca del río Suquía. Lo cual coincide con otros estudios sobre la región centro del país que muestran que no presenta relación directa la variabilidad interanual a multidecádica de variables hidrológicas con el fenómeno ENOS (Compagnucci, y otros, 2008), (Coronel, y otros, 2006).

Existen otros indicadores macroclimáticos que pueden dar mejor correlación en esta región, por tal se continuará avanzando en este punto.

Conclusiones

Del análisis de superposición de escurrimientos anuales se observa que casi todas las series tienen tendencia positiva y un quiebre en el año 1976, que marca 2 periodos distintos. El primero se caracteriza por que más del 60% de los aportes son de escasez y el segundo porque más del 55% son de exceso. Distinto comportamiento presenta el río Colorado con una tendencia negativa.

En todas las series los mínimos históricos se registran antes del 1976 (salvo para la cuenca del río Pilcomayo que se disponen de datos a partir de 1961), y los máximos se registran después de 1976 para todas cuencas, salvo la del Río Colorado. Sin embargo es importante resaltar que esta cuenca presenta una influencia del régimen nival distinta a las otras en análisis.

Este quiebre en los años 1975/76 en la tendencia de los volúmenes aportados y derrames anuales coincide con el cambio en las condiciones medias de temperatura del Pacífico ecuatorial central de 1976/77 y la transición climática que afectó a más de 40 variables bioambientales del Pacífico y de las Américas, que son expresiones de la variabilidad “tipo” ENOS (El Niño / Oscilación Sur), (Compagnucci, 2008). Pero no se observa relación evidente con el fenómeno ENOS que es de similar signo espacial al “tipo” ENOS, pero de mayor frecuencia (fenómeno interanual de 2 a 6 años).

En todas las cuencas analizadas entre los años 1947-50 y 1968-71 se observan periodos comunes con aportes por debajo de la media. Y en las cuencas de los ríos: Suquía, Xanaes, Dulce, Ctalamochita y Paraná se detectó una simultaneidad en sus periodos hídricos extremos entre los años 1933-42; 1944-54; 1965-71 y 1979-87. Los tres primeros corresponden a periodos de escasez de agua y el último a excesos.

Para la gestión del recurso hídrico del GC resulta de suma importancia conocer que las cuencas provinciales que abastecen a una misma región son afectadas simultáneamente por sequías severas. Así se encontró que los ríos Suquía, Xanaes, Ctalamochita son afectadas simultáneamente. También el río Dulce, pero no hay vinculación con el Colorado.

La relación entre el Pilcomayo y el Bermejo es alta (simultáneamente las mismas sequías), y el Dulce muestra cierta relación con el Bermejo, no así con el Pilcomayo.

El Paraná si bien es un gran sistema independiente posee cierta similitud con el comportamiento de las cuencas de la región central

Se resalta la inercia que presentan los ciclos de escasez y la importancia de avanzar en la caracterización de los periodos hidrológicos extremos en la región central de Argentina como en la determinación de los fenómenos macro que intervienen en este comportamiento, incorporando el efecto de TSM del océano Atlántico y otros indicadores en la TSM del Océano Pacífico.

Agradecimientos

Se agradece a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba por brindar información necesaria para el presente estudio.

Referencias bibliográficas

Barros, V., Clarke, R. y Silva Díaz, P. (2006). *El Cambio Climático en la Cuenca del Plata*, Buenos Aires, Argentina : CIMA (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera) del CONICET.

Compagnucci R. R. y Agosta, E. A. (2008). La Precipitación de Verano en el Centro-Oeste de Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur(Enos) e Interdecádico "Tipo" Enos". *GEOACTA*, 97-103.

Díaz, A., Studzinski, C. y Mechoso, C. (1998). Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate* [s.l.], 251-271.

Díaz, E. (2012). Balance Hídrico en el Embalse San Roque", Córdoba, Argentina: Laboratorio de Hidráulica, FCE-FyN-UNC.

Gallego, A. (2012). *Santiago del Estero y el Agua, Crónica de una relación controvertida*. Santiago del Estero, Argentina: Secretaria de Desarrollo, Ciencia, Tecnología y Gestión Pública.

Halcrow Ingenieros Consultores y Serman y Asociados S. A. (2006). Mapa de Red Hidrográfica Jerarquizada, Buenos Aires, Argentina: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la cuenca del Río Pilcomayo.

Hillman, G. (2002), *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Mar Chiquita*. Córdoba, Argentina. Tesis de Ingeniería Civil, FCE-FyN-UNC.

Moya, G. (2004). *Análisis de La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de los Ríos Suquia y Xanaes*. Provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, FCE-FyN UNC.

NOAA National weather service-climate prediction [Online]. (1 de Julio de 2012). <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>.

Rodríguez, A. (1990). Estudio de Régimen hidrológico del Río Dulce y Laguna de la Mar Chiquita. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídrica (IN-CYTH).

Subsecretaría de Recursos Hídricos Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la RA. (2010). [CD] Buenos Aires, Argentina-SSRH.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Publicaciones Hidrometeorológicas [CD]. (2011). Buenos Aires, Argentina: EVARSA.

* Erica Díaz; Andrés Rodríguez.; O. Dölling.; Gerardo Moya.; Juan Carlos Bertoni J.; E. Castello; Mariana Pagot y G. Hillman.

Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. Argentina.



Estudio de estabilidad de un dique exento semisumergido mediante modelo físico

PAOLO GYSSELS
 MARIANA PAGOT
 GERARDO HILLMAN
 HÉCTOR MURATORE
 ANDRÉS RODRÍGUEZ

Introducción

El presente trabajo se ha realizado en el marco de dos proyectos de investigación financiados por SeCyT-UNC y el Ministerio de Ciencia y Técnica de la provincia de Córdoba. El objetivo principal del estudio ha sido verificar experimentalmente la estabilidad del talud expuesto a las condiciones de diseño. Para ello, se han reunido las experiencias existentes en bibliografía y toda la información disponible para aplicar una metodología que pueda aplicarse a la mayoría de los ensayos en laboratorio con las mismas características del presentado en este estudio.

Los ensayos se han realizado en el canal vidriado del Laboratorio de Hidráulica, de 23 m de largo, utilizando un generador de oleaje de paleta frontal, bidimensional (HR-Wallingford).

Las estructuras en enrocado con baja cota de coronación (Low crested and submerged structures, LCS) como la aquí estudiada, se utilizan generalmente dispuestas paralelamente a la costa para la protección y recreación de playas, reduciendo la energía del oleaje incidente en la costa. En particular, se diseñan para permitir un cierto grado de transmisión de la energía del oleaje sobre y a través de la estructura, o causando rotura del oleaje en aguas someras.

Metodología

La metodología de trabajo se ha basado en la bibliografía existente y principalmente se han considerado las líneas guías expuestas en los

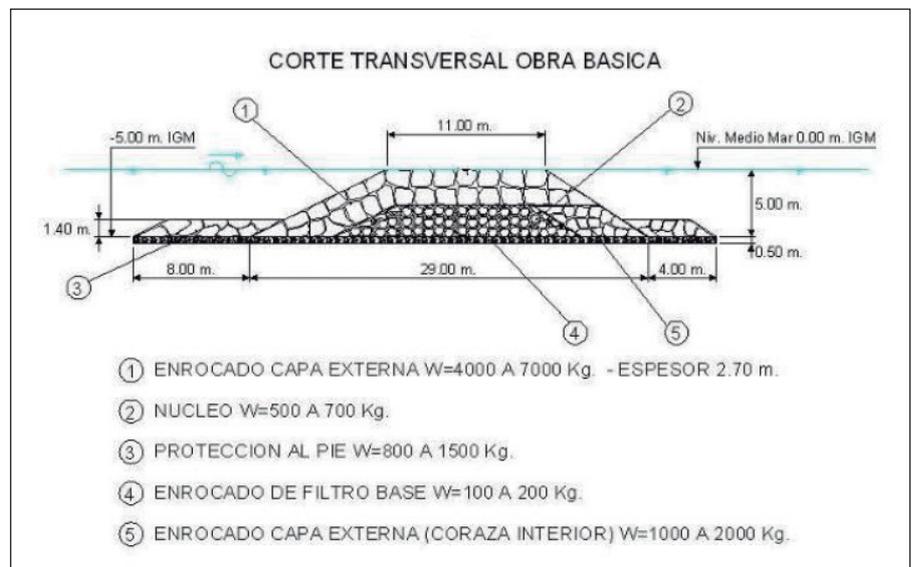


Figura 1. Sección transversal de la defensa de la escollera.

documentos del proyecto europeo Hydralab-III (2007). La estructura ensayada (prediseñada en LH-UNC, 2007) se compone de una armadura exterior de dos capas y de un núcleo de material de menor tamaño (Figura 1). Uno de los aspectos más importantes en el diseño de estas estructuras es la evaluación de la estabilidad de la misma que se realiza mediante el estudio del daño producido por el oleaje incidente. En el caso de estructuras en escollera el daño comienza con el movimiento de las piezas del manto principal debido a las fuerzas hidrodinámicas.

La evaluación de la estabilidad de la estructura se ha realizado experimentalmente y utilizando la formulación de Van der Meer (1991) para diques sumergidos. La evaluación visual del daño se ha realizado utilizando técnicas de video después de haber pintado las piezas del talud exterior en franjas con variación de colores.

En este contexto, la modelación física es la herramienta adecuada para la evaluación de la estabilidad de este

tipo de estructuras en cuanto permite simular condiciones de oleaje extremo para diferentes niveles de marea.

Fórmula de estabilidad

Van der Meer (1991) propuso la siguiente fórmula válida en el caso de diques sumergido con dos capas de protección en el paramento exterior:

$$\frac{h'_c}{h} = (2.1 + 0.1 \cdot S) \exp(-0.14 \cdot N_s^*)$$

Donde:

- h es la profundidad;
- h'_c es la altura de la estructura sobre el lecho marino (h - h'_c es la profundidad de la cresta de la estructura);
- S es el coeficiente de avería para el criterio adoptado;
- N_s^{*} es el número de estabilidad espectral;

$$N_s^* = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} s_p^{-1/3}$$

s_p es el peralte de la ola calculado para la ola de pico en aguas profundas; H_s es la altura de onda significativa a pie del dique;

$$s_p = \frac{H_s}{L_{op}}$$

L_{op} es la longitud de onda en aguas profundas correspondiente al período de pico;

D_{n50} es el diámetro medio de la escollera;

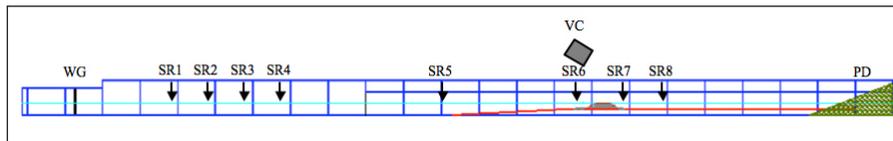
$$\Delta \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

En el presente estudio, el estado de mar de cálculo que alcanza el pie del dique tiene las mayores olas limitadas por la rotura debida al fondo. Las máximas alturas de ola que alcanzan el dique son las determinadas por la rotura y por ello, la altura de ola de cálculo será la altura de ola máxima que, por condiciones de fondo, se puede producir en el pie de la estructura.

Realización del Modelo Físico

Los ensayos se han realizado en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica (LH), de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba (UNC) durante los años 2010 y 2011.

El canal de oleaje tiene 23,5 m de largo, 0,9 m de altura y 0,5 m de ancho. El generador de oleaje bidimensional fue adquirido a HR Wallingford. Este generador cuenta con una paleta vertical con desplazamiento horizontal a través de un motor eléctrico, que genera un campo de velocidades controlado, el cual a su vez deforma la superficie libre del agua, dando lugar a una serie de ondas, ondas solitarias, además de oleaje regular (es decir con un único período constante y olas de igual altura) u oleaje de tipo irregular, donde tanto el período como las alturas cambian de ola a ola. El tren de ondas que se pueden generar, se corresponden a espectros de energía típicos de la naturaleza (Jonswap, Pierson Moskowitz, entre otros) o a series medidas directamente por una boya de oleaje en el mar. Las olas generadas en el canal son controladas por el programa computacional HP Wavemaker (HR Wallingford, 2008 y 2009).



WG = "Wave Gauge"; VC = "Video Camara"; SR = "Sensor".

Figura 2. Perfil del canal de oleaje. Estructura modelada y ubicación sensores (SR) y videocámara.

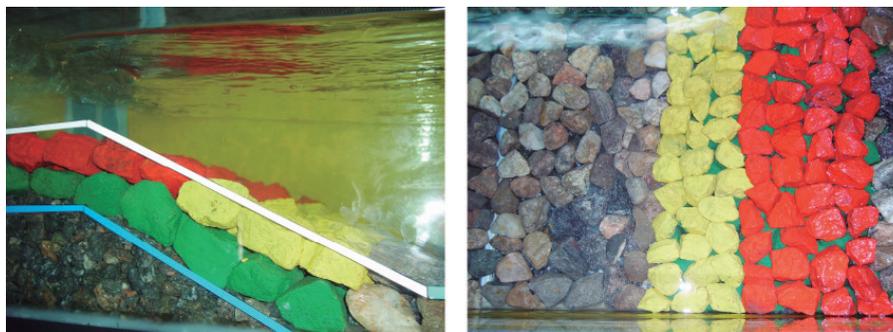


Figura 3. Estructura en modelo físico realizado en el LH-UNC. Vista en perspectiva y desde arriba.

Escala de Modelo

La escala de longitudes adoptada para realizar el modelo físico de la estructura marítima ha sido de 1:30, resultante de considerar los siguientes factores: experiencia pasada con modelos físicos hidráulicos; condiciones de diseño del oleaje y niveles de marea meteorológica y astronómica, ajustándolos a las dimensiones del canal y a la capacidad del generador de oleaje; dimensiones de las piezas que componen el manto principal con respecto a las dimensiones del canal; resolución requerida de las mediciones y capacidad instrumental; cumplimiento de la condición de flujo turbulento entre las primeras capas de la estructura.

La determinación de la escala máxima posible considerando estos factores, tiene que minimizar los efectos de escala, y los efectos de laboratorio. Los efectos de escala son los efectos no deseados que aparecen por haber reducido el prototipo a una determinada escala geométrica (efectos viscos y de tensión superficial por ejemplo). Los efectos de laboratorio son los efectos no deseados debido a que el fenómeno natural se reproduce en un laboratorio donde se introducen perturbaciones en los procesos simulados debido a la presencia de los contornos, de los instrumentos y de las instalaciones en general. Una vez definida la máxima escala posible para el modelo se ha

procedido a estimar estos efectos de escala y de laboratorio.

Geometría del ensayo

El canal de oleaje donde se han desarrollado los ensayos aquí presentados, está subdividido en cinco tramos (Figura 2): un tramo de desplazamiento de la pala y estructura absorbente por detrás, de 1,5 m; un tramo plano de 10 m de largo; una rampa de 3 m de largo; un falso fondo plano de 7 m de largo (para lograr la ola de diseño al pie de la estructura); una playa disipativa (PD) de 2 m de largo.

La estructura modelada se ha colocado a una distancia apropiada desde los extremos para minimizar sus efectos sobre esta y para obtener las condiciones del oleaje de diseño al pie de la estructura. Para ello, ha sido necesario diseñar y colocar una rampa y un falso fondo. La rampa con pendiente del 5%, permite la modificación de la ola incidente logrando una transformación del oleaje (asomeramiento) y permitiendo alcanzar la ola de diseño en condición de rotura al pie de la estructura ensayada.

Estructura modelada

En la estructura a verificar según anteproyecto del LH-UNC (2007), se han ensayado piezas del manto principal de 5 Tn y piezas del núcleo de 500 kg. Se han dispuesto las piezas seleccionadas



del manto principal, por arriba del núcleo, en dos capas que constituyen la coraza exterior.

El paramento externo de la estructura modelada, correspondiente a la primera capa de la coraza, se ha pintado de dos colores distintos. Las primeras dos líneas más cercanas al coronamiento y las primeras dos líneas en el coronamiento, se han pintado de color rojo y las tres líneas siguientes del talud exterior de color amarillo. Las piezas de la segunda capa se han pintado todas de un tercer color verde (Figura 3). De esta forma, se pueden identificar y diferenciar los desplazamientos de las rocas desde las diferentes partes de la estructura.

Se han colocado 8 sensores resistentes para mediciones de altura de ola y se ha utilizado una videocámara digital para identificar los movimientos de las piezas a lo largo de los ensayos.

Resultado de la estabilidad de la estructura modelada

Se han diseñado los ensayos para determinar la estabilidad de la estructura frente a condiciones extremas de oleaje con piezas de 5 Tn y niveles de marea de pleamar, media marea y bajamar, más el nivel de marea meteorológica. Se generaron un mínimo de 1000 olas para cada escalón, con un total de 5000 olas por ensayo. Cada ensayo de base, se ha realizado para los 3 diferentes niveles de marea (astronómica+tormenta): en Pleamar (PM), Media marea (MM) y Bajamar (BM).

Sobre la curva de estabilidad se han representado los puntos experimentales obtenidos calculando el número de estabilidad espectral (N_s^*) y la altura relativa de la cresta (h_c/h).

En la Figura 4 se presentan las gráficas para PM, MM y BM. Se observa que, al aumentar el nivel de energía del oleaje los puntos se acercan a la curva de Inicio de Avería.

Utilizando la formulación de Van der Meer (1991), los casos más desfavorables se presentan en Bajamar donde los puntos se ubican por encima del valor crítico de inicio de movimiento de las piezas. Cuantificando el daño mediante técnicas de video, no se observaron movimientos de las piezas en

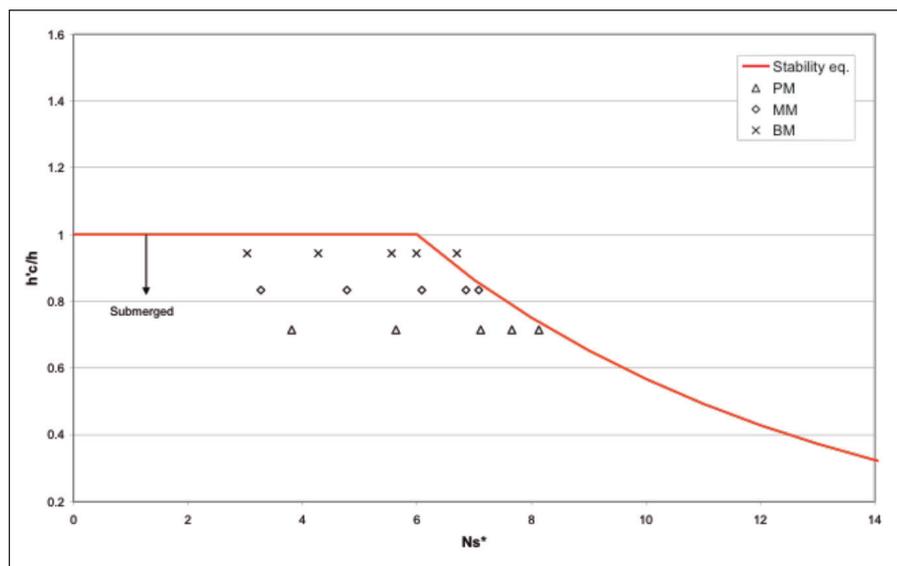


Figura 4. Variabilidad de la estabilidad del talud exterior en función del número de Iribarren con respecto a la curva de nivel de daño $S=2$ (inicio de avería) calculada en aguas someras.

el talud exterior en los casos ensayados. En particular, se observaron solamente movimientos de cabeceo de las piezas solamente con oleajes de alta energía (120% de la energía de diseño).

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado desde el Laboratorio de Hidráulica de la FCE-FyN de la UNC con la ayuda de Cristian Montanari y Lisandro Martínez, y se enmarca dentro de dos proyectos de investigación denominados “Procesos hidrodinámicos sobre modelos físicos de estructuras costeras”, financiado por SeCyT-UNC y “Técnicas Experimentales para Caracterizar Flujos Complejos”, financiado por el Min. CyT de la provincia de Córdoba en el programa PID 2008.

Referencias bibliográficas

Hughes S. A. *Physical Models And Laboratory Techniques In Coastal Engineering*. (1993). (vol. 7, p. 568). Ed. World Scientific Publishing.

Hydralab III. *Guidelines for physical modelling of sediment dynamics*. (2007). Deliverable NA3.1-3.

HR Wallingford Group. *Wave Generation System*. User Manual. (2008). Inglaterra.

HR Wallingford Group. *Wave Generation System*. Technical Manual. (2009). Inglaterra.

Laboratorio de Hidráulica (LH) Universidad Nacional de Córdoba (UNC). (2007). *Proyecto de Sistemas de Rompeolas Aislados al Sur de Punta Mogotes en la ciudad de Mar del Plata*. Informe Final para la Municipalidad de Mar del Plata.

Van Der Meer. *Stability and wave transmission at low-crested structures*. Delft Hydraulics publications. (1991). (nº 453). Delft Hydraulics Laboratory.

* Paolo Gyssels, Mariana Pagot, Gerardo Hillman, Héctor Muratore y Andrés Rodríguez.
Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Uso de simulaciones directas para optimizar mediciones con instrumentos hidroacústicos

VICENTE G. GIL MONTERO
LETICIA TARRAB
CARLOS M. GARCÍA
MARIANO I. CANTERO

Resumen

La simulación directa numérica (DNS) permite generar datos de flujos con alta resolución espacial y temporal, dado que resuelve todas las escalas turbulentas presentes en el flujo sin necesidad de adoptar esquemas de cierre de la turbulencia. Debido al alto costo computacional se resuelven números de Reynolds moderados, sin embargo los niveles de turbulencia alcanzados con estos Reynolds son representativos de flujos turbulentos desarrollados. Esta característica convierte al DNS en una herramienta computacional ideal para determinar fehacientemente el campo de velocidades de un flujo. Por consiguiente se pueden tomar series sintéticas del DNS aplicando el principio de funcionamiento de técnicas hidroacústicas y considerando las estrategias de muestreo llevados a cabo por los usuarios durante las mediciones para evaluar sus efectos sobre los principales parámetros característicos del flujo. Las técnicas evaluadas en este trabajo son el velocímetro acústico Doppler (ADV) y el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP).

Introducción

Los instrumentos hidroacústicos Doppler son utilizados mundialmente para caracterizar flujos turbulentos. Pero según el campo de aplicación se debe seleccionar el instrumento. En el caso de mediciones de campo (cuerpos de agua de gran escala), se utiliza el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) que permite caracterizar el flujo medio y por consiguiente

determinar caudales, mientras que en laboratorio el velocímetro acústico Doppler (ADV) permite medir además del flujo medio los principales parámetros característicos de la turbulencia.

Varios factores afectan la incertidumbre en las mediciones utilizando ADCP, tales como la ubicación de zona de medición, la configuración de registro del instrumento, el preprocesamiento interno del instrumento, niveles de ruido, y las estrategias espaciales y temporales de la medición. Así en el caso de mediciones desde plataformas móviles (botes) la estrategia recomendada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) consiste en realizar al menos cuatro transectas (cruces) en pares recíprocos, sin embargo esta estrategia no ha sido sustentada científicamente (Oberger and Mueller, 2007).

En el caso del ADV este instrumento mide la velocidad del flujo en un volumen de medición (variando desde 0.09 a 2 cm³ dependiendo del instrumento seleccionado) y a frecuencias relativamente altas (hasta 200 Hz). La mayoría de las investigaciones relacionadas con la capacidad de los ADV para resolver la turbulencia del flujo se han centrado en el ruido de la señal y en la forma de removerlo. Sin embargo, son escasos los antecedentes en la literatura sobre los efectos generados por los filtrados espaciales y temporales llevados a cabo por el instrumento durante las mediciones como consecuencia del tamaño del volumen de medición y frecuencia de registro adoptados por los usuarios.

El análisis sistemático de errores en la caracterización de flujos turbulentos requiere una alta resolución espacial y temporal del flujo (García *et al.*, 2005), lo cual es difícil de alcanzar con mediciones experimentales. Esto convierte al DNS en una herramienta computacional ideal para generar este tipo de

datos, ya que resuelve todas las escalas turbulentas presentes en el flujo. A pesar de que el DNS difícilmente se pueda aplicar para simular condiciones de flujo observados en campo (debido al alto costo computacional), los niveles de turbulencia alcanzados para números de Reynolds moderados, son representativos de flujos turbulentos desarrollados. En base a la similitud del número de Reynolds los resultados pueden ser extrapolados con cierto criterio a números de Reynolds mayores.

El objetivo del presente trabajo es analizar los efectos de las estrategias de muestreo de técnicas de medición hidroacústicas (ADV y ADCP) sobre los principales parámetros medidos del flujo. Para ello se realizó una simulación con DNS para un número de Reynolds $Re = 916$ y se muestrearon campos de flujo sintéticos simulando el uso de los instrumentos acústicos Doppler (ADV y ADCP) para diferentes condiciones de flujo y adoptando diferentes estrategias espaciales y temporales de muestreo.

Modelo Matemático y Numérico

El modelo implementado consiste en un canal horizontal en el cual el flujo es inducido por un gradiente de presiones uniformes en la dirección principal (y). Las ecuaciones de gobierno del flujo dimensionales son

(1)

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \mathbf{G} - \nabla p + \frac{1}{Re_\tau} \nabla^2 \mathbf{V}$$

(2)

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$



Donde $V=(u,v,w)=(u_x, u_y, u_z)$ es el vector de velocidad dimensional, p es la presión dinámica dimensional y $G=(0,1,0)$ es el gradiente medio negativo de presiones. Las variables dimensionales son definidas usando (a) la velocidad de corte, $u^*=(\tau w/\rho)^{1/2}$, como la escala donde τw es la tensión de corte en la pared del fondo y ρ es la densidad del fluido; (b) la altura del canal, H , (c) como la escala temporal, $Tt=H/u^*$ y (d) $P=\rho u^*2$ es la escala derivada para la presión. El número dimensional en la ecuación (2) es el número de Reynolds definido como $Re\tau = u^*H/\nu$ donde ν es la viscosidad dinámica, y para este trabajo $Re\tau = 509.1$, la cual da un número de Reynolds $Re = VwH/\nu = 9164$, usando el cociente $Vw/u^* = 18$. Las condiciones de borde empleadas fueron,

(3) $V=0$ en $z=0$

(4)

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \text{ y } w = 0 \text{ at } z = 1.$$

Las ecuaciones de gobierno fueron resueltas usando un código de alias pseudo-espectral (Canuto, *et al.*, 1988). Más detalles del esquema numérico pueden ser encontrados en Cortese and Balachandar (1995). La validación del código se puede encontrar en Cantero *et al.* (2007a) y Cantero *et al.* (2007b).

Optimización de mediciones con ADV

El propósito de esta parte del trabajo se focalizó en evaluar los efectos de los promediados espaciales y temporales llevados a cabo por el instrumento sobre los principales parámetros representativos de la turbulencia del flujo. Dado que tanto el tamaño del volumen de medición como la frecuencia de registro pueden ser ajustados por el usuario a la hora de medir, es necesario conocer el impacto de estas dos variables sobre la caracterización de la turbulencia. Consecuentemente para optimizar las estrategias de muestreo de esta técnica de medición se simuló series sintéticas de flujo a partir de los resultados del DNS considerando diferentes estrategias de muestreo tanto espaciales como temporales.

El número dimensional en la ecuación (2) $Re\tau = u^*H/\nu$ usado en el DNS es $Re\tau = 509$. Para definir las condiciones del flujo se adoptó como altura (H) igual a 6.41 cm , velocidad de corte de $u^* = 0.0079 \text{ m/s}$ (asumiendo $\nu = 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$), velocidad media del flujo $= 0.143 \text{ m/s}$, pendiente de energía $= 0.0001$ y ancho del canal 0.134 m . Por último la resolución temporal es $\Delta t = 0.004035 \text{ sec}$ ($f = 247.8 \text{ Hz}$).

El campo de velocidades de flujo resultante del DNS fue muestreado considerando diferentes distancias al fondo del canal, y considerando distintos volúmenes de medición. El vector de velocidad resultante del volumen de medición se calcula considerando una función de peso que adopta el valor de uno para el caso de las velocidades comprendidas dentro del volumen de medición, y cero en el resto del dominio.

Las frecuencias de registro (f_R) adoptadas para el análisis fueron: 247.8 [Hz] ; 49.5 [Hz] ; 24.7 [Hz] , 9.9 [Hz] y 4.9 [Hz] . Mientras que los volúmenes (h_v/H) adoptados fueron: 0.023 ; 0.047 ; 0.094 ; y 0.14 .

El efecto del promediado espacial se analizó sobre los parámetros: energía cinética turbulenta (TKE), varianza en la dirección principal del flujo y la componente uv del tensor de Reynolds. Estos parámetros fueron graficados en función de F_{sp} , parámetro adimensional que permite relacionar la máxima longitud de las estructuras turbulentas del flujo (distancia al fondo) con la mínima estructura que puede ser capturada por el instrumento (altura del volumen de medición), definido como,

(5)

$$F_{sp} = \frac{z}{h_v}$$

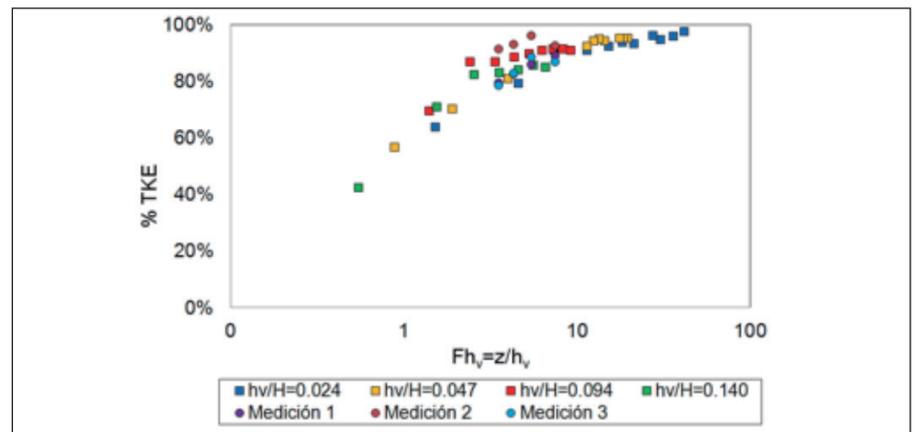


Figura 1. TKE capturada por el ADV considerando distintos volúmenes de medición ubicados a diferentes distancia con respecto al fondo.

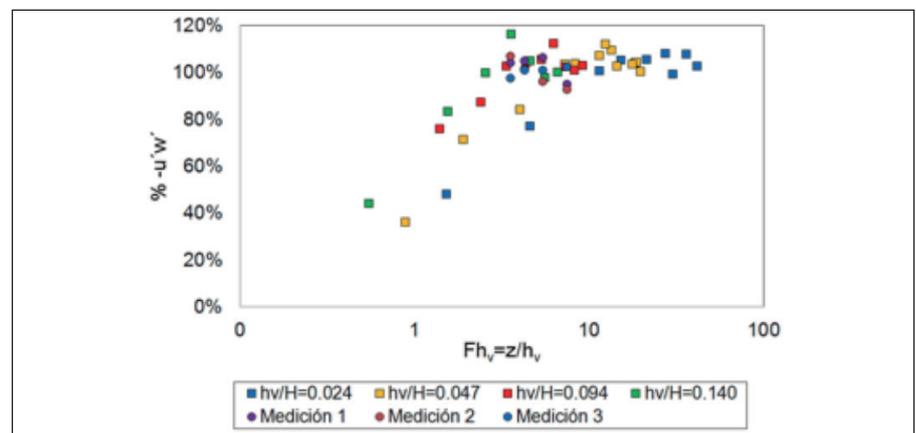


Figura 2. vw capturada por el ADV considerando distintos volúmenes de medición ubicados a diferentes distancia con respecto al fondo.

Donde h_v = altura del volumen de medición y z = distancia del centro de gravedad del volumen de medición al fondo del canal.

Los parámetros representativos de la turbulencia fueron dimensionalizados usando los valores correspondientes al parámetro computado para cada profundidad sin promediar espacialmente. Como se puede observar en la Figura 1, a medida que aumenta el volumen de medición y este se acerca al fondo del canal (mientras F_{sp} decrece) disminuye la capacidad del ADV para describir la turbulencia del flujo, dado que el porcentaje del TKE medido disminuye. En la Figura 2 se graficó la componente uw del tensor de Reynolds. Si bien los datos presentan una mayor dispersión con respecto a los resultados obtenidos para el caso de la energía cinética turbulenta, se observa la misma tendencia.

Para verificar la veracidad de los resultados del DNS, estos fueron contrastados con datos experimentales medidos en laboratorio. En el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional del Litoral se ensayaron tres condiciones de flujo (ver Gil Montero *et al.* 2012). Tal como se puede apreciar, los resultados numéricos presentan la misma tendencia que los datos experimentales.

Optimización de mediciones con ADV

La variación en el caudal medido para una misma condición de muestreo puede ocurrir debido a errores aleatorios generados por el instrumento, la turbulencia del flujo y la no estacionariedad del flujo. A partir de los datos generados con DNS solo se pueden considerar los errores aleatorios debido a la turbulencia del flujo. Mediante el análisis de campos de flujos turbulentos tridimensionales generados con DNS y el análisis dimensional se desarrollaron ecuaciones que cuantifican la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la turbulencia del flujo. El análisis dimensional fue utilizado para identificar grupos adimensionales relevantes y establecer entre ellos una relación funcional. Dos parámetros adimensionales para la

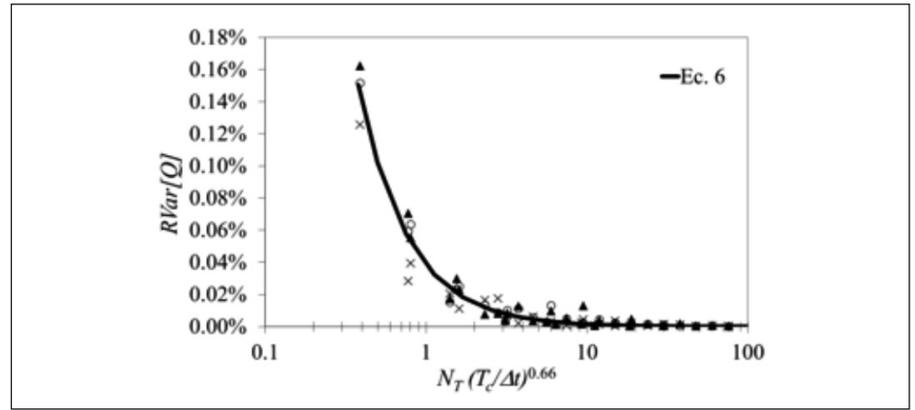


Figura 3. Evolución de $RVar[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación (6).

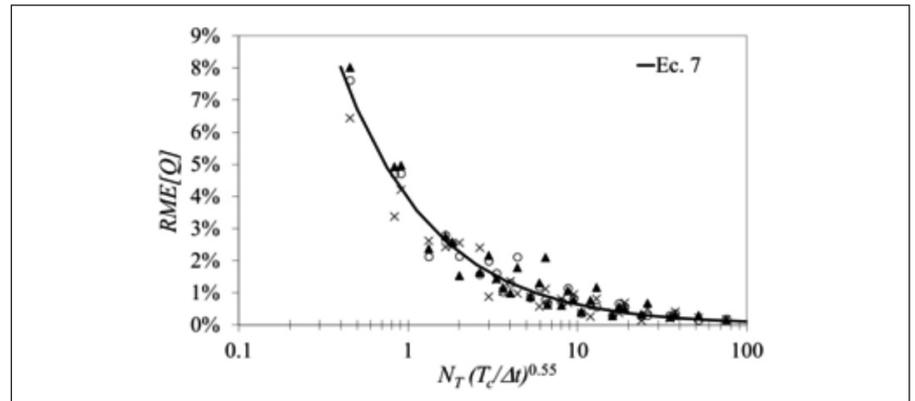


Figura 4. Evolución de $RME[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación (7).

cuantificación de la incertidumbre en las mediciones de caudal fueron considerados: la variación relativa, $RVar[Q]$ y el error máximo relativo esperado $RME[Q]$. A partir de las variables que intervienen en la determinación del caudal y el teorema Pi de Buckingham, se obtuvieron las siguientes formas funcionales (Tarrab *et al.*, 2012).

(6)

$$RVar[Q] = 0.00038 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{0.66} \right)^{-1.41}$$

(7)

$$RME[Q] = 0.039 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{0.55} \right)^{-0.79}$$

donde $T_t = H/u^*$ es la escala de tiempo de la estructura turbulenta del flujo de tamaño H , siendo H la profundidad del flujo y u^* la velocidad de corte, $T_c = H/V_b$ es el tiempo en el que el bote recorre una estructura turbulenta del flujo de tamaño H siendo V_b la velocidad

del bote y $\Delta t = 1/f$ es el intervalo tiempo en el muestreo de los perfiles de velocidad siendo f la frecuencia de muestreo del instrumento.

Los parámetros que se encuentran en las ecuaciones (6) y (7) fueron obtenidos por un ajuste no lineal de los datos generados con DNS. Para lo cual, el campo de flujo tridimensional instantáneo modelado se muestreó simulando diferentes estrategias de muestreo de un ADCP, variando N_T , Δt , y V_b , para un mismo número global de Reynolds $Re = 9164$. Se asumió como caudal real al caudal promedio de 12 transectas muestreadas en cada set de datos de DNS. Los conjuntos de datos seleccionados consisten en 12 transectas para cada condición de muestreo en donde cada transecta es realizada a la misma velocidad del bote. El error relativo máximo absoluto, $RME[Q]$, y la varianza relativa, $RVar[Q]$, se calcularon para cada conjunto de datos de la siguiente manera:



$$RME[Q] = \frac{|Q - Q_{av}|_{\max}}{Q_{av}}; \text{ y } RVar[Q] = \frac{(Q - Q_{av})^2}{Q_{av}^2}$$

respectivamente, donde Q es el caudal medido en cada transecta; $|Q - Q_{AV}|_{\max}$ es la máxima diferencia absoluta en el caudal dentro del set de datos Q_{AV} es el caudal promedio de las 12 transectas muestreadas en el set de datos. $RME[Q]$ es una medida de la desviación máxima en el conjunto de datos y $RVar[Q]$ representa el comportamiento global del conjunto de datos. En Figuras 3 y 4 se muestran la evolución de los parámetros $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ para las diferentes configuraciones de muestreo. El tiempo óptimo de exposición se puede obtener ya sea aumentando el número de transectas muestreadas (N_T) o disminuyendo la velocidad del bote (aumentando T_c). Por otro lado, Δt indica el efecto de la frecuencia de muestreo ya que afecta el número total perfiles muestreados. En las ecuaciones (6) y (7), el exponente para N_T y el exponente de la relación ($T_c/\Delta t$) son diferentes, siendo el exponente de la relación ($T_c/\Delta t$) más pequeño. Esto indica que el aumento del número de transectas tiene un mayor efecto en la reducción de la incertidumbre de medición de caudal con ADCP causada por las fluctuaciones turbulentas que el aumento de la frecuencia de muestreo o la disminución de las velocidades del barco, debido a la correlación de la estructura del campo de flujo.

Conclusiones

En este trabajo se presentan relaciones adimensionales elaboradas mediante el análisis de un campo de flujo turbulento tridimensional generado con DNS, con el fin de optimizar las estrategias de muestreo de técnicas de medición hidroacústicas (ADV y ADCP) para determinar en forma precisa el caudal y parámetros representativos de la turbulencia (como velocidades media, fluctuaciones turbulentas, esfuerzos de Reynolds, etc.).

Para el caso del ADV estas consideraciones incluyen definir convenientemente el volumen de medición y su distancia al fondo además de la frecuencia de registro. La tecnología ADV tiende a sesgar negativamente a los parámetros representativos de la turbulencia como consecuencia de los promediados temporales y espaciales llevados a cabo por el preprocesamiento. Sin embargo estos efectos puede ser minimizados al adoptar un $F_{sp} > 10$ para el caso del promediado espacial y $F > 20$ para el caso del promediado temporal (García *et al.* 2005).

En el caso de mediciones de caudal realizadas con ADCP, los resultados muestran que aumentar el número de transectas tiene un mayor impacto en la reducción del rol de las fluctuaciones de la turbulencia sobre las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP que el aumento de la frecuencia de muestreo y la disminución de las velocidades del bote. Esto se debe a la estructura de correlación del campo de flujo turbulento, y podría atribuido a que el aumento de N_T aumenta el número de muestras independientes. Además, los resultados indican que los errores aleatorios, debido a la turbulencia del flujo se hacen más grandes en la medición de los flujos poco profundos con velocidades de bote relativamente grandes.

Referencias bibliográficas

Cantero, M., Lee, J., Balachandar, S., and García, M. (2007a). On the front velocity of gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 586, 1-39.

Cantero, M., Balachandar, S., and García, M. (2007b). High resolution simulations of cylindrical density currents. *Journal of Fluid Mechanics*. 590, 437-469.

Canuto, C., Hussaini, M. Y., Quarteroni, A., and Zang, T. A. (1988). *Spectral Methods in Fluid Dynamics*. Springer, New York, U.S.A.

Cortese, T. & Balachandar, S. (1995). High performance spectral simulation of turbulent flows in massively parallel machines with distributed memory". *International Journal of Supercomputer Applications* 9 (3), 187-204.

García C., Cantero M., Niño Y., and García M. (2005). Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *J.Hydr. Engrg.* ASCE. 131, 1062-1073.

Gil Montero, V. G., García, M., Cantero, M. (2012). *Optimization of acoustic Doppler velocimeter sampling strategies using direct numerical simulation of turbulence flow*. MECOM.

Oberg, K. and Mueller, D. (2007). Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133 (12).

* Vicente G. Gil Montero, Leticia Tarrab, Carlos M. García, Mariano I. Cantero Laboratorio de Hidráulica, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), División de Mecánica Computacional, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica

Aplicación de herramientas numéricas como complemento de la caracterización experimental del flujo en una componente de una planta de tratamiento de agua potable

MATIAS RAGESSI
CARLOS M. GARCÍA
SANTIAGO MÁRQUEZ
DAMIÁN CANTERO
MARIANO I. CANTERO

Introducción

La ciudad de Córdoba se encuentra entre las regiones con mayor incremento poblacional en la República Argentina. A este incremento poblacional se le suma la rápida incorporación de los ambientes semirurales periféricos a la urbanización. Para satisfacer las necesidades de agua potable de una población en continuo crecimiento es necesario la optimización en los procesos de tratamientos existentes para la potabilización del agua. En este marco surge la necesidad de caracterizar el flujo en distintas componentes hidráulicas de las plantas de tratamientos de agua potable existentes para el abastecimiento de la ciudad de Córdoba, con el fin de optimizar el funcionamiento de estas componentes. En ese marco el grupo “Descripción Experimental de la Turbulencia” del Centro de Estudios y Tecnología del Agua ha venido desarrollando distintos estudios experimentales y numéricos en plantas de tratamiento de la ciudad de Córdoba.

En este trabajo se sintetizan los principales aspectos metodológicos utilizados y los resultados alcanzados en uno de esos estudios focalizados en la caracterización del flujo en la zona de ingreso de caudales al proceso de clarificación (ver Figura 1) de la planta de tratamiento de agua potable (Planta “Los Molinos”) que la empresa Aguas Cordobesas S.A. opera en cercanías de la localidad de Bower en la provincia de Córdoba. Esta planta es la encargada de abastecer a aproximadamente un 30% de la población de la ciudad

de Córdoba. Observaciones preliminares en la planta sugieren que existen en la zona de estudio patrones de flujo turbulentos los cuales podrían ser incompatibles para el correcto desarrollo de los procesos de clarificación requeridos. Entre los principales inconvenientes observados en la zona de estudio y que se analizan en este trabajo se pueden mencionar: a) elevados niveles de turbulencia en el flujo en los canales de aforo y distribución transversal que podrían afectar al tamaño de las partículas aglutinadas en los procesos de coagulación y floculación previos al de clarificación. Los esfuerzos de corte turbulentos presentes someten a los flóculos a cizallamiento rompiéndolos en partículas de menor tamaño y peso lo que genera menor eficiencia de los decantadores con volúmenes de extracción de barros menores a los previstos en el diseño. La menor eficiencia de los decantadores implicaría que el manto poroso de los filtros se obstruyera en un tiempo mucho más corto lo cual lleva a un lavado más frecuente; b) la localización asimétrica del canal de aforo con respecto a las unidades de

coagulación y floculación existentes produciría una distribución espacial del flujo no homogénea en la transversal; c) la reducción brusca de la sección del canal de aforo en su transición al canal de distribución transversal (ver Figura 1) genera zonas de recirculación, que reducen la sección de paso efectiva del flujo; d) diferentes dimensiones de los canales de distribución transversal de margen derecha e izquierda podría generar una distribución no homogénea de los caudales; y e) la disposición asimétrica de las compuertas de ingreso a los decantadores podría generar una distribución de los caudales no homogéneas en cada unidad de decantación.

En la primera etapa de este estudio (descrita en la sección 2) se procedió a la caracterización experimental del flujo, a partir de mediciones en la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos” con las condiciones existentes en las fechas y hora cuando se realizaron las mediciones. La segunda etapa del estudio (resumida en la sección 3) consistió en utilizar un modelo numérico computacional apto para

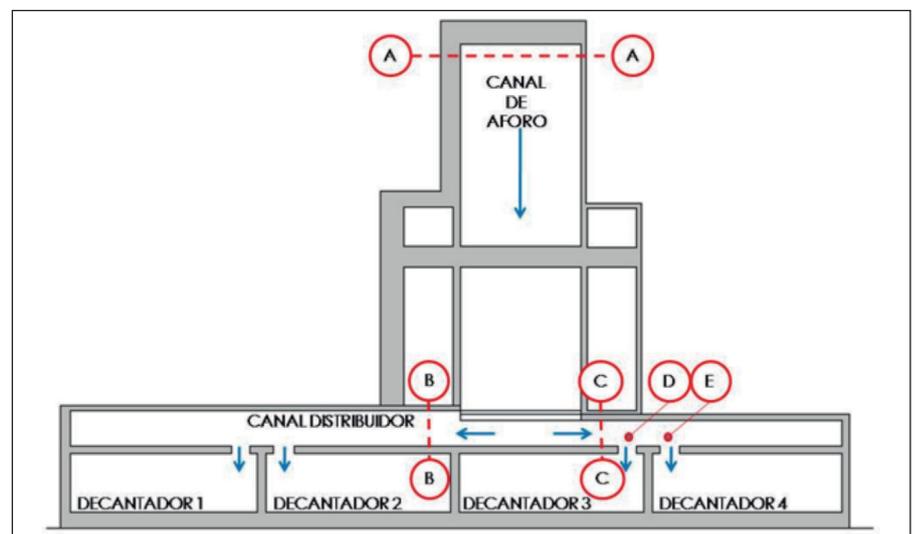


Figura 1. Esquema de la zona de estudio y ubicación de las secciones de medición in situ. Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. Las flechas azules indican la dirección del flujo.

simular flujos turbulentos en la zona de estudio.

Para realizar la caracterización experimental y la simulación numérica existen en la actualidad avanzadas técnicas con altas resolución espacial y temporal cuyas aplicaciones estaban en el pasado restringidas al análisis de flujos en escala de laboratorio. La aplicación de herramientas numéricas como complemento de la caracterización experimental del flujo es relevante ya que se pueden analizar complementariamente, una vez que el modelo computacional ha sido calibrado (utilizando datos relevados experimentalmente), distintas condiciones de funcionamiento de la planta (caudales procesados, unidades en funcionamiento, etc.) incluyendo la evaluación de nuevos diseños de las distintas componentes para mejorar las condiciones de flujo existentes. Esto último no es posible realizar in situ ya que la planta no puede dejar de funcionar y en la mayor parte de su tiempo funciona con caudales superiores al 75% de su capacidad.

Estudio experimental

La caracterización experimental del flujo turbulento requiere técnicas de medición que presenten altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo (velocidades medias, fluctuaciones turbulentas, escalas características del problema, etc.) (Ragesse, *et al.*, 2009). En este trabajo se utilizó un Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés), el cual registra puntualmente series temporales de las tres componentes del vector velocidad de flujo (García, *et al* 2005) con frecuencias de registro de 50 Hz. Mediciones preliminares indicaron que las condiciones experimentales (niveles de partículas en suspensión) resultan adecuadas para el uso de tecnología acústica. La caracterización de los procesos turbulentos del flujo utilizando ADV se llevó adelante aplicando la metodología experimental específica (García y Herrero, 2009). En la zona de ingreso al canal de aforo (sección A-A en Figura 1) se registraron señales temporales con ADV en cinco puntos

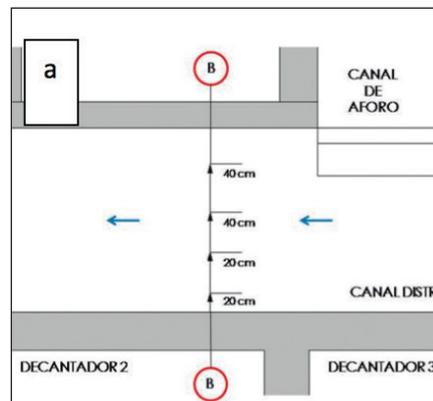
distribuidos a lo ancho del canal y en dos planos ubicados a 25 cm y 75 cm del fondo. Con estas señales se cuantificaron experimentalmente: los caudales de ingreso a la planta; la variación espacial (distribución transversal y vertical) de los patrones de flujo (velocidades medias, energía cinética turbulenta, tasa de disipación de la energía cinética turbulenta); y la evolución temporal de los patrones de flujo.

En las secciones B-B y C-C (canal distribuidor en Figura 1) se evaluaron y cuantificaron: los patrones de flujo tridimensionales (corrientes secundarias, etc.), niveles de turbulencia; presencia de zonas de recirculación; entre otros. Se registraron señales en cuatro puntos distribuidos a lo ancho de cada sección en el canal distribuidor (ver Figura 2) y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7cm, 27cm y 67cm.

Finalmente la caracterización del flujo en los puntos D y E en la cercanías de las compuertas (ver Figura 1) permite determinar, entre otras cosas, los caudales que ingresan a los respectivos decantadores, las direcciones de los vectores velocidad y los niveles de turbulencia, mediante mediciones en la línea central de cada compuerta a 15 cm de la sección de las compuertas (ver Figura 2 b) y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7 cm, 27 cm y 67 cm.

En todos los casos, los valores de energía cinética turbulenta (k) se calcularon como

$$(Ec. 1) \quad k = 0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)$$



donde $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$, son las varianzas corregidas por la presencia de ruido Doppler de las señales de velocidad en la dirección longitudinal, transversal y vertical, respectivamente.

La tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ) se calculó a través del ajuste de la ley -5/3 del espectro de velocidad en el rango inercial que no se ve afectado por los efectos del ruido Doppler. Los cálculos de todos los parámetros se realizaron utilizando el algoritmo TUDE desarrollado por García y García, 2006).

En base a las mediciones de velocidad en las distintas secciones mencionadas (A-A, B-B, C-C, D y E) fue posible cuantificar las escalas características de los procesos turbulentos: las escalas de los grandes vórtices y las microescalas (escalas de Kolmogorov) a partir de las cuales se puede inferir un orden de magnitud de los tamaños de flóculos presentes en el flujo en las distintas zonas. Las microescalas de Kolmogorov se calcularon con la Ecuación 2.

$$(Ec. 2) \quad \eta = (\nu^3 \epsilon)^{1/4}$$

donde η = Microescala de los procesos turbulento (escalas de Kolmogorov), y ν = Viscosidad del fluido.

Modelación numérica del flujo turbulento

Se ha implementado en este estudio un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS). El código computacional

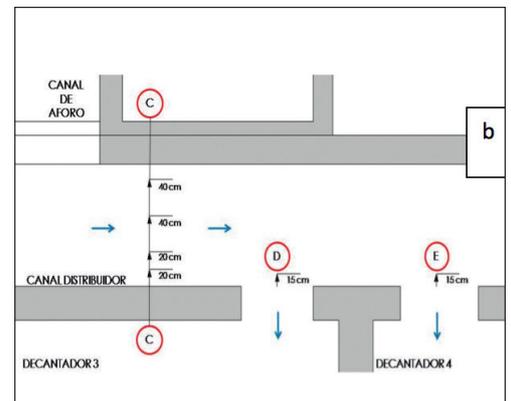


Figura 2. Esquema de medición en las secciones del canal distribuidor. Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. Las flechas azules indican la dirección del flujo.

utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto Open FOAM (Open Field Operation and Manipulation).

Se utilizó el solver Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (simple Foam en Open FOAM(R)), que permite acoplar las ecuaciones de Navier-Stokes con un procedimiento iterativo, para una malla de volúmenes finitos. Este se aplica para flujo estacionario, de una sola fase para densidad y viscosidad constantes (H. K. Versteeg and W. Malalasekera, 2007). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones - estándar (Launder y Sharma, 1974).

La implementación del modelo numérico fue del tipo tridimensional para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio y detectar zonas de conflicto como zonas de recirculación.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En los bordes (fondo y paredes de los canales) los volúmenes tienen una dimensión de 5 cm de lado, aumentando a 7 cm, 10 cm y 12 cm hacia la zona media del dominio, en la zona central se completa con volúmenes de igual tamaño. Además se

densificó la malla en la zona donde el flujo hace una transición desde el canal de aforo hacia el canal distribuidor.

El solver utilizado requiere establecer condiciones iniciales y de borde para las variables fundamentales: Presión (p), Velocidad (U), Energía cinética turbulenta (k) y Disipación de Energía cinética turbulenta (ϵ). Se estableció como valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se estableció condiciones de borde específicas (ver Tabla 1).

Resultados

Como una síntesis de los resultados que se obtuvieron, la Figura 3 muestra la comparación de la condición general observada en la zona de estudio a partir del estudio experimental y de la simulación numérica.

El diseño hidráulico óptimo de una planta potabilizadora debe lograr que la intensidad de la turbulencia (representada por la energía cinética turbulenta k) disminuya a medida que el flujo avanza en el proceso de clarificación (Figura 3a). Sin embargo, los resultados expuestos en la Figura 3 (b y c, condición observada y simulada respectivamente) indican que los valores de k en la sección C-C y los puntos D y E (ver

Figura 1), son mayores que los observados en el canal de aforo (sección A-A ver Figura 1).

Los valores de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ) muestran un comportamiento similar tanto en la condición observada en la planta a partir de datos experimentales como en la simulación numérica. Se observaron los siguientes valores máximos de ϵ : 400 cm^2/s^3 en la sección C-C, 160 cm^2/s^3 y 20 cm^2/s^3 los puntos D y E (ver localizaciones en Figura 1), y 3 cm^2/s^3 en el canal de aforo (sección A-A ver Figura 2). La simulación numérica arrojó los siguientes valores: 120 cm^2/s^3 en la sección C-C, 240 cm^2/s^3 y 130 cm^2/s^3 los puntos D y E (ver Figura 1), y 3 cm^2/s^3 en el canal de aforo (sección A-A ver Figura 2). Estos resultados indican que los valores de k en la sección C-C y los puntos D y E (ver Figura 1) son mayores que los observados en el canal de aforo (sección A-A en Figura 1).

Los resultados mostrados indican que los flóculos formados al inicio del proceso (coagulación - floculación, lo cual implica una inversión importante) podrían romperse debido a la intensidad de los procesos turbulentos en la zona del canal distribuidor y las compuertas de ingreso a los decantadores.

Zona	Variable		
	p	U	y
Entrada	Gradiente Nulo.	Valores de velocidad media medidos experimentalmente en la planta (sección A-A en Figura 2).	Valores calculados en base a los registros experimentales (sección A-A en Figura 2).
Salida	Presión estática media.	Gradiente Nulo.	Gradiente Nulo.
Paredes y Fondo	Gradiente Nulo.	Igual a Cero.	Se utilizó funciones estándar de la librería de Open FOAM(R) que establecen la ley de aproximación a la pared y al fondo.
Superficie Libre	Gradiente Nulo.	Superficie rígida sin esfuerzos de corte (condición slip en inglés).	Gradiente Nulo.

Tabla 1: Condiciones de borde establecidas para las variables en el modelo numérico.



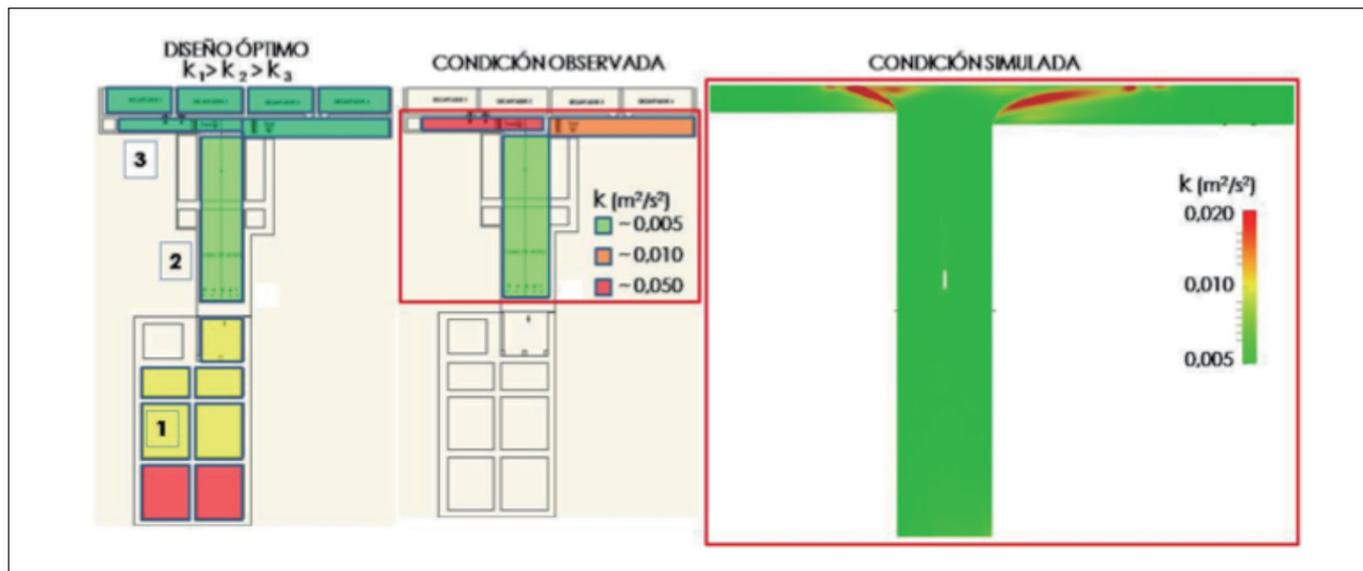


Figura 3. Comparación entre a) Diseño Teórico, b) Condición Observada y c) Condición Simulada. El cuadro rojo indica la zona simulada numéricamente que comprende desde el ingreso al canal de aforo hasta las compuertas de ingreso a los decantadores.

Conclusiones

Las principales conclusiones derivadas del análisis de los resultados se resumen a continuación.

- El estudio experimental indica que los valores de energía cinética turbulenta y la disipación de la energía cinética turbulenta en la sección B-B y C-C son un orden de magnitud superiores a los observados en la zona de ingreso (sección A-A).
- El programa de simulación numérica utilizado (OpenFOAM(R)) se adapta de forma adecuada al problema.
- Se ha calibrado y validado adecuadamente el modelo número tridimensional en base a los datos medidos en la planta de tratamiento. Los resultados obtenidos de la modelación numérica en tres dimensiones representan adecuadamente en forma cualitativa el comportamiento del campo de velocidad en la zona estudiada.
- La energía cinética turbulenta modelada muestra un patrón de comportamiento similar al observado en el prototipo.
- Los resultados expuestos indican que los flóculos formados al inicio del proceso (coagulación - floculación) se rompen debido a la intensidad de los procesos turbulentos en la zona del canal distribuidor y las compuertas de ingreso a los decantadores.

Referencias bibliográficas

- García C., Cantero M., Niño Y. and García M.** (2005). Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 131, 1062-1073.
- García y García** (2006). Characterization of flow turbulence in large-scale bubble-plume experiments. *Experiments in Fluids*, 41 (1), 91-10.
- García C. M y Herrero, H.** (2009). *Metodología experimental para caracterizar flujos turbulentos con velocímetros acústicos Doppler*. I Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- H. K. Versteeg and W. Malalasekera** (2007). *An Introduction to computational fluid dynamics. The Finite Volume Method*.
- Launder, B. E. and Sharma, B. I.** (1974). *Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc*, *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1(2), pp. 131-138.
- OpenCFD Ltd.** (2005). Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. Tech. Rep. TR/HGW/02.
- OpenCFD.** <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>, 2007.
- Ragessi, I.; Haisama, M.; García, C.; Herrero, H.; Balderrama, C.; Tarrab, I. y Cantero, M.** (2009), Caracterización experimental del Flujo Turbulento en componentes hidráulicas de una planta de tratamiento de agua potable para optimizar su funcionamiento. III Foro de Extensión Universitaria. Universidad Nacional de Córdoba.

* Matias Ragessi¹, Carlos Marcelo García¹, Santiago Márquez Damián² y Mariano I. Cantero³.

1 Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica, F.C.E.FyN., Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

2 Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), INTEC-UNL/CONICET, Santa Fe, Argentina.

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), División de Mecánica Computacional, Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica.

Problemáticas hidrosedimentológicas en la cuenca media-baja del Río Pilcomayo y aportes a la solución

CRISTIAN MARCELO BALDISSONE
ANDRÉS RODRÍGUEZ
MARIANA PAGOT
MARIANO CORRAL
HÉCTOR FARIÁS
ALEJO TESTA TACCHINO
GERARDO HILLMAN

Resumen

En la denominada cuenca baja del Río Pilcomayo, zona comprendida entre el límite de Argentina y Paraguay, en el tramo de las provincias argentinas de Salta y Formosa, el río presenta una serie de mecanismos fluviales que hacen sumamente compleja la gestión del agua, sedimentos y material vegetado. Procesos naturales como el atarquinamiento con retroceso progresivo del cauce y la posibilidad de avulsión del mismo, ponen en riesgo el sistema distribuidor de aguas (en la sección denominada “Embocadura” ex “Pantallón”) entre Paraguay y Argentina. Estas circunstancias han promovido la suscripción de acuerdos entre ambos países, por los cuales se comprometen a coordinar acciones conducentes por un lado, al uso equitativo del recurso y por otro, a la protección de los puntos críticos para evitar el cambio de la traza del río hacia alguno de los dos países. Enmarcados en este contexto, desde el CETA junto con el INA-CIRSA se ha trabajado en diversos aspectos técnicos que colaboran en la concreción de estos objetivos.

Introducción

El Pilcomayo es un sistema fluvial de régimen muy variable y no regulado, con una de las tasas de transporte de sedimentos en suspensión más altas del mundo. El río Pilcomayo en llanura constituye uno de los mejores ejemplos de mega-abanico fluvial, frecuentes en las faldas orientales de

los Andes, en América del sur, es también el mayor de ellos (más de 200.000 km²) y el único en el mundo que presenta el fenómeno de extinción de cauce por atarquinamiento.

Esta secuencia de fenómenos se ha traducido en un progresivo retroceso del curso del río y se estima que en este tiempo su desembocadura final se ha trasladado hacia aguas arriba aproximadamente 270 km (Martín-Vide, 2006), con un ritmo de retroceso de 10 km. por año, perdiéndose gran cantidad de tierras productivas y dejando sin el recurso hídrico a un gran número de poblaciones locales.

La génesis de este proceso está claramente identificada y responde a las altas tasas de sedimentación presentes en esta parte de la cuenca y al aporte de troncos desde las márgenes durante las crecidas. Producto de la sedimentación constante, el río en la cuenca media presenta una geometría de cauce colgado, lo que sumado a su alta tasa de migración lateral y la no regulación de sus caudales, propician

condiciones de alto riesgo de avulsión, es decir cambio repentino del cauce y formación de uno nuevo, en este caso por una crecida en la cual el cauce desborda en puntos específicos.

El entendimiento acabado de los procesos fluviales actuantes en el sector y cómo éstos son condicionados por las acciones tomadas en la cuenca son una relación clave para tratar de abordar medidas estructurales para el manejo del agua, los sedimentos y la vegetación.

Si bien hay antecedentes en la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (CTN) tal como los trabajos de Martín-Vide, Cafaro, Spalletti, Brea y Fariás entre otros, los cuales se encuentran sistematizados y disponibles en el sitio web <http://www.pilcomayo.net>, aún hay poca experiencia internacional en éste tipo de ríos, y a nivel regional, la experiencia es puntual, dispersa y con limitaciones de recursos. El propósito de este artículo es el de mostrar los trabajos que profesionales, docentes



Figura1. Esquema de la cuenca y ubicación de la zona de estudio (<http://www.pilcomayo.net>).



e investigadores relacionados al CETA están llevando a cabo respecto a la problemática.

Aspectos fluviales que se están abordando desde el CETA

Desde el CETA junto con el INA-CIRSA, y en forma coordinada con la Mesa Fluvial de la Comisión Trinacional (grupo de trabajo técnico asesor de la CTN) impulsada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se está trabajando en varios aspectos fluviales de esta compleja cuenca internacional.

Desde el punto de vista técnico se están abordando dos problemáticas, por un lado aquellas relacionadas a los puntos críticos, zonas de posibles cambios del curso del río con riesgo de avulsión y la otra concerniente a la división equitativa de agua y sedimentos entre Paraguay y Argentina.

Referido al primer punto, en el 2010 se completó una serie de trabajos, el primero de ellos: "Estabilización del cauce principal y márgenes del río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos. Tramo: Hito 1 / D'Orbigny - Misión la Paz / Pozo Hondo (Corral y Baldissonne, 2010) en este trabajo se aplicaron técnicas GIS para poder estimar patrones de comportamiento de ese tramo del cauce durante crecidas. Se utilizaron imágenes satelitales e imágenes de radar (SRTM) para elaborar un modelo digital de elevaciones (DEM) que luego fue explotado como insumo esencial para poder alimentar el modelo HEC-RAS, en el cual se modeló una serie de escenarios hidrológicos representativos de situaciones de crecidas con varias recurrencias.

A partir de la selección de una serie de imágenes satelitales Landsat 7 se pudieron mapear las manchas de inundación asociadas a crecidas que se presentaron en años recientes, y estos mapas se usaron para llevar a cabo un proceso de pseudo-calibración de los parámetros del modelo hidráulico. En función de los resultados obtenidos se determinaron los niveles de inundación que alcanzará el agua para diferentes escenarios, los sectores de desborde y las correspondientes manchas de inundación.



Figura 2. Obras de estabilización de puntos críticos con riesgo de avulsión.

Estos resultados han sido comparados con los obtenidos a través del análisis de imágenes satelitales con muy buena concordancia. Teniendo en cuenta caudales con recurrencias que se consideran razonables para el diseño de obras, se estimaron los diferentes umbrales de desbordes en cada sector lo que permitió establecer una jerarquía o prioridad para ejecución de obras.

En general las obras planteadas tienen el objetivo de contener las crecidas evitando la afectación de las aguas a las comunidades y a las obras de infraestructura presentes en la zona. En este caso se han agrupado las obras propuestas en tres grandes grupos: Obras de Contención, Obras de Estabilidad del Cauce, Obras de Mejoramiento Hidráulico, o bien, combinaciones de las mismas.

La misma metodología se desarrolló para el tramo correspondiente entre Misión la Paz / Pozo Hondo y la zona de embocadura. En la figura siguiente se muestran las obras resultantes en el primero de los tramos mencionados.

Siguiendo con la misma línea de trabajo, actualmente existe otro proyecto en la Mesa Fluvial de la Dirección Ejecutiva (DE) de la CTN, destinado a profundizar en el conocimiento del comportamiento hidráulico del cauce en el sector con riesgo de avulsión. El mismo

se relaciona con la estimación de caudales desbordados hacia cada margen e incluye una propuesta metodológica para la determinación de su distribución lateral.

Las metodologías usadas para el desarrollo de este trabajo incluyen el análisis de series históricas de caudales, modelación hidrodinámica 2D, utilización de productos de observación satelital y modelación física en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulico de la UNC.

En el contexto de este trabajo, se efectuó primeramente un análisis preliminar explorando la potencialidad y/o aplicabilidad de herramientas para la modelación 2D del tramo en estudio, con la consigna de adoptar aquellas que proporcionen un compromiso razonable entre costos de implementación y representatividad adecuada del fenómeno. En particular se trabajó como caso piloto un sector del río Pilcomayo, más específicamente sobre la zona denominada curva "El Chañaral" ($62^{\circ}46'52.904''W$; $22^{\circ}10'48.674''S$), ubicada entre las localidades de Santa Victoria e Hito 1, al noroeste de la provincia argentina de Salta. (Figura 3)

El modelo hidráulico empleado fue el IBER (CEDEX, 2010) promovido por Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX de España. IBER es un modelo

numérico de simulación de flujo turbulento, a superficie libre y en régimen no permanente integrado a la escala temporal de Reynolds para aguas poco profundas (2DH). Trabaja sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

Se ha podido observar mediante la aplicación de éstas técnicas los diferentes patrones de circulación y campos de velocidad en las cercanías de las márgenes y en la zona de bajas de las mismas (Figura 3), lo que ha permitido

delimitar correctamente los umbrales de desbordes y su caudal.

Con una metodología similar, se está estudiando el comportamiento del sistema de bifurcación de caudales frente a diferentes propuestas destinadas a equilibrar la partición actual. El trabajo consiste en la modelación hidráulica bidimensional de la zona de embocadura e incluye la incorporación de la propuesta de un canal hacia el lado argentino (Canal Las Torres) y otras posibles actuaciones como dragados y cambios en la geometría del

canal paraguayo para evaluar el funcionamiento del conjunto. El objetivo es determinar los porcentajes de agua derivado para cada lado en diferentes caudales de entradas a la zona de embocadura.

Por otro lado, desde el Laboratorio de Hidráulica - CETA en forma conjunta con la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se está trabajando también en el seguimiento multitemporal de los procesos morfológicos reflejados en los meandros aguas arriba de la Embocadura.

En la siguiente imagen satelital (Figura 4) se definen los meandros analizados visual y técnicamente a través de imágenes satelitales LANDSAT de alta resolución.

El proceso de análisis consiste en identificar el desplazamiento que se presenta entre dos imágenes secuenciales temporalmente y vincular dicho desplazamiento con datos hidrométricos medidos en la estación de aforo de La Paz, los cuales se encuentran disponibles en la base de datos única de la DE (la misma se puede consultar en www.pilcomayo.net).

En la Tabla 1 se presentan las imágenes que están en proceso de análisis cubriendo el periodo Octubre 2011 - Agosto 2012.

Consideraciones finales y trabajo futuro

Se ha ilustrado en forma sintética algunos de los estudios fluviales que se están realizando en el Pilcomayo en el ámbito de trabajo del CETA: la simulación hidrodinámica 1 y 2D de los principales puntos críticos para caudales medios y altos, el análisis y simulación numérica de la zona de embocadura con distribución de caudales y un análisis temporal de los meandros más importantes aguas arriba de la embocadura.

Si bien la problemática del río Pilcomayo excede ampliamente los intentos desarrolladas en estos trabajos, éstos sin dudas cumplen un papel importante dado el nuevo enfoque de las metodologías y resultados obtenidos.

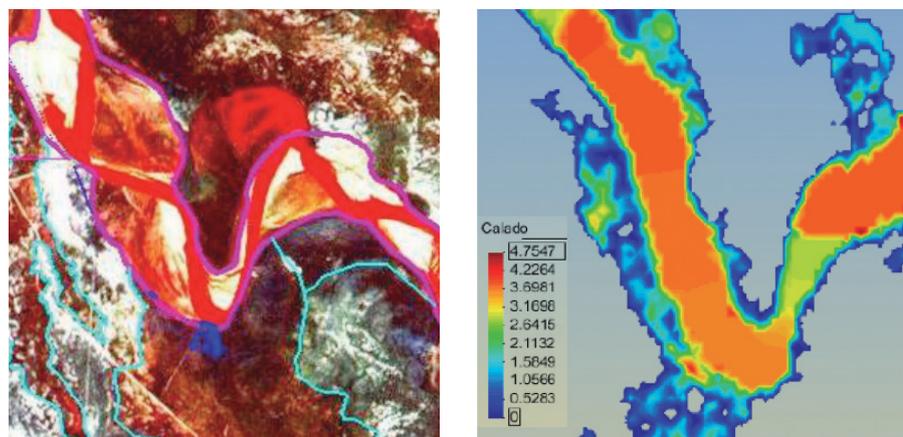


Figura 3. Izq.: Imagen satelital del punto crítico "El Chañaral" con desborde. Der.: Resultado de la modelación numérica del desborde.

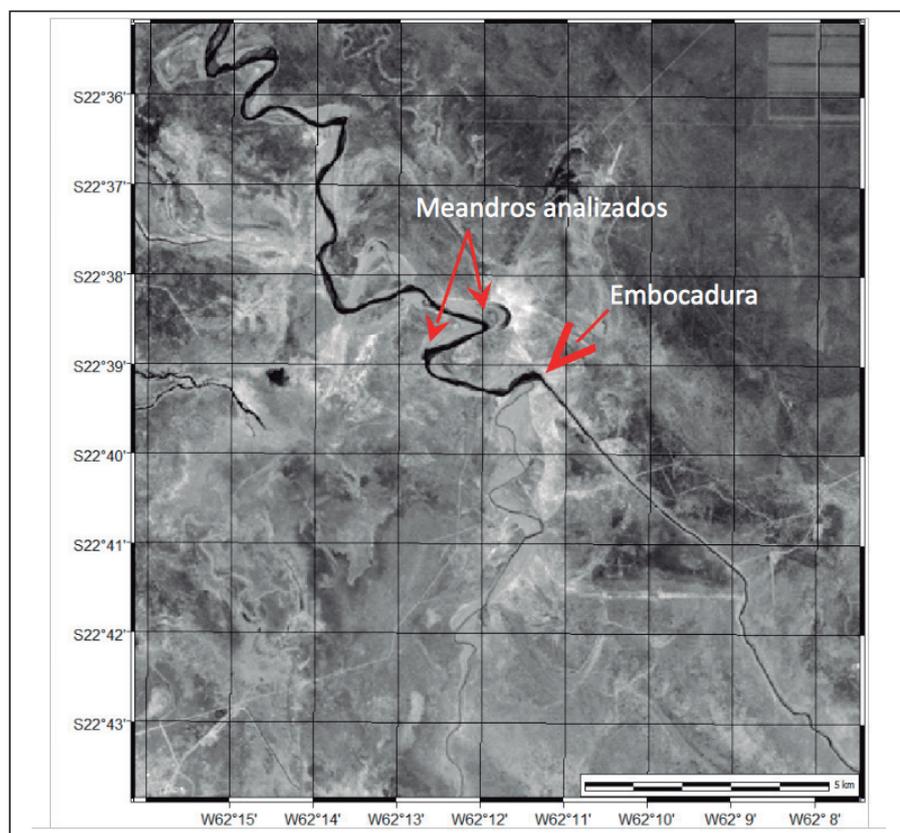


Figura 4. Zona de Embocadura y meandros aguas arriba. Imagen satelital del 20/10/12.

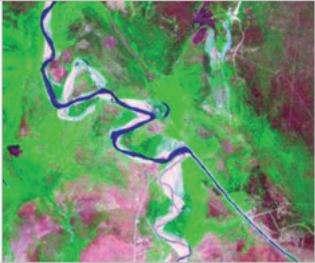
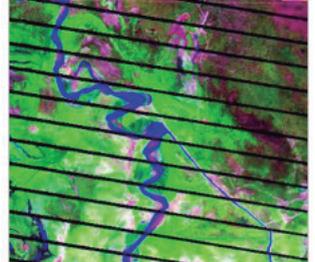
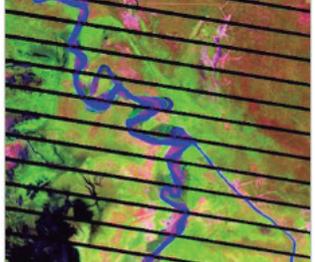
Fecha	Imágenes satelitales LANDSAT	Caudal en Misión La Paz (m ³ /s)	Nivel del agua en Misión La Paz (m)
20 Octubre 2011		13.48	3.01
16 Enero 2012		354.11	3.99
04 Marzo 2012		653.89	4.21
20 Marzo 2012		547	3.41
11 Ago 2012		38	3.06

Tabla 1. Asociación de imágenes satelitales, caudales y nivel de agua.

Agradecimientos

A los organismos de cuenca e instituciones que han facilitado la información técnica básica: Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (CTN), UPCA Formosa y SSRRHH de la Nación. Se agradece además el financiamiento en forma de becas de postgrado y subsidios por parte del INA-CIRSA, SECYT UNC y CONICET.

Referencias bibliográficas

Baldissonne M., Corral, M., Farías, H. D., Brea, J. D., Hillman, G. D., Hopwood, J. H., Zambón, H., Laboranti, C., Cafaro, E. y Rodríguez, A. (2011). *Un análisis de estrategias para el manejo de aguas, sedimentos y vegetación en la cuenca baja del río Pilcomayo*. Quinto Simposio Regional de Hidráulica de Ríos 2011.

Cafaro E. y Ramonell (2007) "Evaluación de la información necesaria para el diagnóstico de una posible zona de avulsión del río Pilcomayo". Informe Final de Pasantía y Cooperación.

CEDEX. (2010). IBER: *Two-dimensional modelling of free surface shallow water flow: Hydraulic Reference Manual*.

Corral, M. y Baldissonne, C. M. (2010): "Estabilización del cauce principal y márgenes del río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos, tramo Hito 1 / D'orbigny – Misión la Paz / Pozo Hondo". Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Farías, H. D. y Cafaro, E. (2010). *Estabilización del cauce principal y márgenes del río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos. Tramo: Misión la Paz / Pozo Hondo - El Pantalón*. Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Lagranja, C. (2001). *Pilcomayo, Río de la Vida*. Gobierno de la Provincia de Formosa.

Martín-Vide, J. P. (2006). *Problemática del Río Pilcomayo en la cuenca baja: Estado actual, historia, análisis, expectativas y propuestas*. Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Pilcomayo.

Plan Maestro de Gestión Integrada de la Cuenca del río Pilcomayo. (2010). Documento Base Resultante del Proceso de Socialización. Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

* Cristian Marcelo Baldissonne¹,
², Andrés Rodríguez², Mariana Pagot², Mariano Corral³, Héctor Farías³, Alejo Testa Tacchino², Gerardo Hillman^{2,4}

1 Instituto Nacional del Agua - CIRSA.
2 Centro de Estudios de Tecnología del Agua, CETA.
3 Instituto de Recursos Hídricos FCEyT-UNSE.
4 Laboratorio de Hidráulica, FCEyFyN-UNC.

CONAGUA 2011

Selección de trabajos presentados en CONAGUA 2011, realizado entre el 22 y el 25 de junio, en la ciudad de Resistencia, provincia del Chaco, Argentina.



El Congreso fue planteado bajo la premisa “El Agua, factor de inclusión social”, valorando la importancia del agua como recurso vital y sus implicancias sociales, políticas y económicas, como también las problemáticas que se desprenden de estos aspectos que son de amplio interés, tanto a nivel global como local.

El objeto del CONAGUA 2011, según se expresa en las actas del Congreso, fue actualizar y difundir el nivel de conocimiento científico y tecnológico inherente al recurso hídrico y propiciar el intercambio de experiencias entre profesionales y especialistas en la materia; promover el proceso de concientización sobre el valor estratégico del recurso hídrico y promover una visión integral de la situación del recurso hídrico en Argentina, en la región y en los países vecinos.





Agua para todos | Claudia Valdez | Chaco



Vida | Gustavo Miguel Torres | Chaco

Fotografías seleccionadas
de un concurso realizado
en el marco del Congreso



Todo vuelve | Andres Tessera Campos | Chaco

Propuesta urbana para una ciudad inundable Resistencia, Chaco

SANTIAGO FIGUEROA LANGOU
GISELLE GARAY

El presente artículo es un subproducto derivado de la tesis de grado de la carrera Arquitectura que realizamos a lo largo del año 2010 en la cátedra de Arquitectura VID. Se analiza el Área Metropolitana del Gran Resistencia en su relación histórica con el río Negro, buscando reflexionar sobre las decisiones y acciones a lo largo de la historia que determinaron el actual uso y configuración del territorio y la ciudad resultante de estas operaciones.

Materiales y Métodos

El trabajo fue abordado a partir del análisis de la relación del medio natural con el medio artificial (ciudad). Para ello fue necesario estudiar exhaustivamente el soporte natural del Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR) y los componentes que definen y caracterizan su espíritu; así mismo se buscó comprender la sociedad, sus instituciones, sus políticas y economías que generaron y generan el actual modo de habitar este medio.

Se realizaron las siguientes actividades:

En campo: relevamiento exhaustivo de la bibliografía existente sobre el AMGR en general y sobre los temas abordados en el trabajo. Entrevistas a informantes claves, de instituciones oficiales y académicas. Fue determinante en este punto la colaboración de determinados profesionales, que han estudiado el área a lo largo de varios años y conviven con las problemáticas del sitio.

En gabinete: análisis de la información recolectada y sistematización de la misma en función de poder generar reflexiones y un diagnóstico preciso, elaboración de objetivos, escenarios

tendenciales, hipótesis de trabajo y finalmente una Propuesta Urbana para un sector del AMGR.

Discusión de resultados

A partir del diagnóstico DAFO (Debilidades/ Amenazas/ Fortalezas/ Oportunidades) efectuado sobre el AMGR donde se cuestiona la relación de la ciudad actual y su convivencia con el medio natural que la soporta, identificamos como problema radical la incoherencia con la que se planificó el modelo urbano actual de ciudad en relación al medio ambiente donde está emplazado. La ciudad de Resistencia, como amerita su nombre, vivió en constante *resistencia* al sistema

hídrico Paraná-Paraguay y al sistema de cuencas que conforman un subsistema como es el caso del Río Negro, negándose a la realidad de comprender que la ciudad es sólo un “pequeño punto” en la magnitud de este sistema de ríos. Esta lectura del entorno geográfico no fue gravitante en la estructuración urbana, por el contrario, llevó a diseñar un trazado rígido e irreflexivo DAMERO que no dialoga en absoluto con las condicionantes del sitio e hizo que los ríos y las lagunas, en vez de ser los espacios de mayor belleza y de características ambientales a resaltar y preservar, sean accidentes traumáticos en su tejido. Planteamos como punto de inflexión un *escenario*

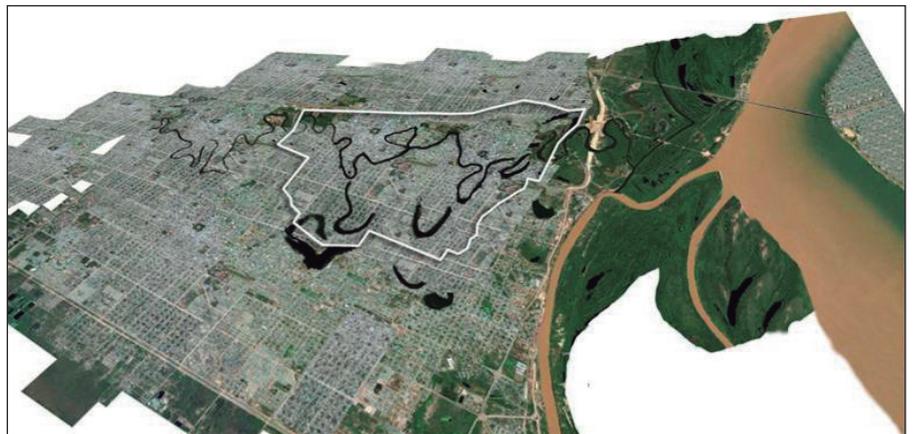


Figura 1. Fuente: elaboración propia. “Escenario futuro tendencial del AMGR a 50 años” G. Garay-S. Figueroa Langou.



Figura 2. Fuente: elaboración propia. Escenario futuro propuesto del AMGR a 50 años” G. Garay-S. Figueroa Langou.



tendencial a 50 años del AMGR si el modelo urbano actual no replantea su modo de actuar en el territorio.

El escenario futuro de Resistencia bajo este modelo incrementa el riesgo hídrico, afecta la calidad ambiental, pone en riesgo las reservas naturales del sistema fluvio-lacustre, cuestiona el patrimonio de los ciudadanos sobre su río, incrementa la marginalidad y desigualdad social e innumerables problemáticas producto de este modo de hacer ciudad.

Es en la intención de construir una ciudad desde la perspectiva del desarrollo sustentable, donde el medio ambiente, la sociedad y la economía se conjugan equilibradamente para gestar urbanidad, donde diseñamos una PROPUESTA URBANA según las características y espíritu del soporte natural, la realidad de sus habitantes y los motores económicos que soportarían su desarrollo.

Para plantearnos los objetivos que nos llevarían a definir los lineamientos y criterios de esta nueva propuesta urbana, surgen como disparadores los siguientes interrogantes:

- ¿Qué hace a Resistencia diferente a otras ciudades?
- ¿De qué modo se puede convertir la constante amenaza hídrica en una oportunidad y las debilidades del modelo urbano en una fortaleza?
- ¿Cuáles son las estrategias de proyecto que generan armonía entre el medio ambiente natural y los usos del suelo posibles en la *interfase* de la ciudad con el sistema fluvio-lacustre del río Negro?

Objetivos

- Recuperar y poner en valor el ecosistema del Río Negro como ordenador, motivador y aglutinador de actividades sociales, a través de proyectos estratégicos con capacidad de repercusión en el desarrollo de un área más amplia que el propio emplazamiento. Con una escala intermedia entre territorio y edificio, la escala “urbano arquitectónica”.
- Proponer un nuevo concepto o modelo de urbanizar trabajando con el río y no contra el río, entendiendo la dinámica fluvial y pluvial.

Aceptando la informalidad del agua (la no forma). Un modelo que afirme la identidad del lugar o que genere/potencie una identidad.

- Proponer un nuevo motor económico que germine de las potencialidades ocultas del lugar, que sirva para activar el territorio (industrias ecológicas / turismo). Dos motores económicos simultáneos y próximos que se potencian.
- Proponer un modelo que permita la inclusión social, responda a la diversidad social, y permita mayor equidad social.
- Densificar la ciudad en el área central, planificar una ciudad compacta (no difusa) que cuente con las infraestructuras necesarias que hoy carece parte de su población.

En el marco de estos criterios y objetivos generales para pensar ciudad, decidimos aproximarnos a una escala menor del territorio que nos permita definir con mayor precisión y detalle la propuesta urbana. Así, seleccionamos el cuadrante noreste de la interrelación ciudad/Río Negro, sector comprendido entre la Av. Sarmiento y la Av. San Martín, sector en el cual todavía la ciudad no atravesó el Río a diferencia de la Av. Sabin y la Ruta 11.

La pauta principal de intervención en el sitio es proyectar a partir de la lectura de idoneidades y pertinencias de la naturaleza. Para trabajar con un

escenario real, se replantean los usos actuales del suelo establecidos por la Normativa Municipal, el Código de Edificación y la Resolución 1111/98 de la APA. Se fija entonces como primera intención en el área:

- Proteger el sistema fluvio-lacustre del Río Negro para conservar sus características naturales únicas, no por medio de la prohibición indiscriminada de ciertas áreas, sino promoviendo un adecuado uso de las mismas que potencie y estimule una conciencia colectiva a nivel medio ambiental. Se definen manchas que delimitan el sector de acuerdo a las idoneidades naturales que proponen usos pertinentes para una.

A su vez, el sector es desconocido para sus ciudadanos porque no existen accesos por problemas de dominios privados. Es un condicionante de esta propuesta que el sector sea reconocido por los habitantes del AMGR para su valoración y uso. Se propone una red de movimiento en el sector de diferentes índoles de acuerdo al nivel de impacto y masividad que se pretende.

Para que el desarrollo del sector sea sustentable, se proponen dos motores económicos que se potencian:

1. explotar las cualidades paisajísticas ambientales del sistema fluvio-lacustre, entendiendo al Río Negro como un recurso, y

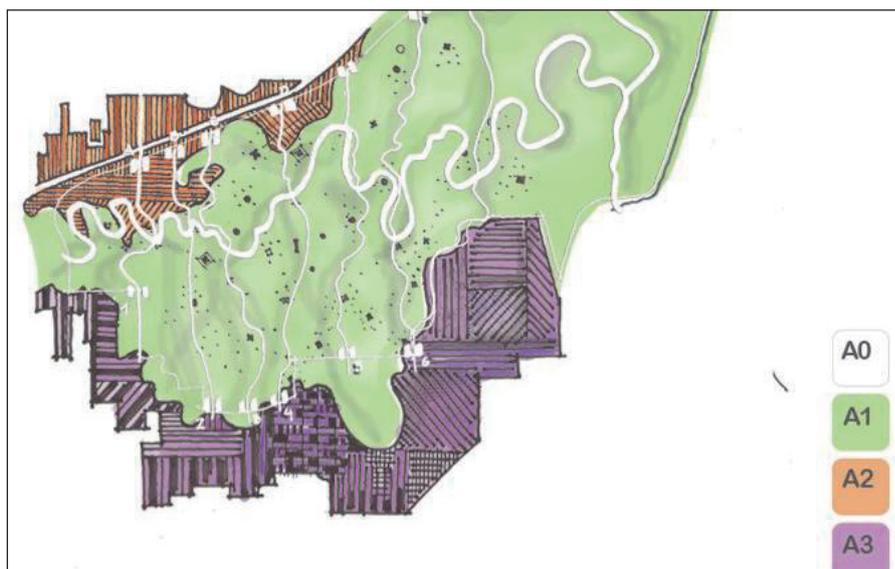


Figura 3. Fuente: elaboración propia. “Áreas a desarrollar de la propuesta urbana para una ciudad inundable” G. Garay- S. Figueroa Langou.



Figura 4. Fuente: elaboración propia. G. Garay- S. Figueroa Langou.

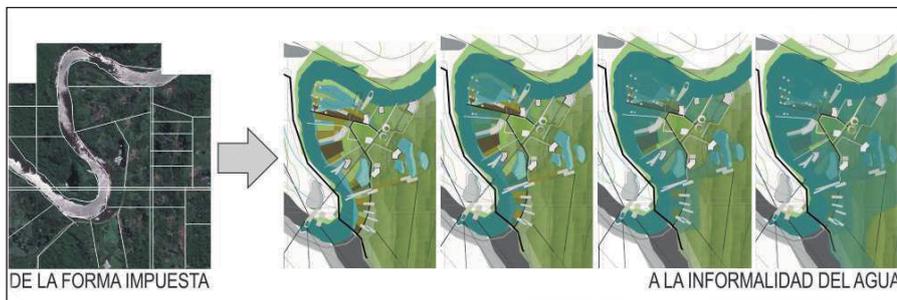


Figura 5. Fuente: elaboración propia. G. Garay- S. Figueroa Langou.

2. propiciar el desarrollo industrial y comercial a partir de Islas Productivas en sectores donde la cota de nivel del agua permita plantar proyectos estratégicos (industriales, de educación, investigación y desarrollo de nuevas tecnologías). Estos proyectos funcionarían como polos interconectados dentro del cuadrante, y conformarían una malla, generando un producto local con capacidad de ser comercializado en la “vidriera” interurbana, propuesta como espacio lineal en el corredor de la Ruta Nacional 16 que articula la ciudad vecina de Corrientes.

Por último, el cuadrante delimitado entre la Av. Sarmiento, Av. San Martín, Ruta Nacional 16 y la Defensa Norte provisoria, necesita consolidar sus bordes, áreas de *interfase* de la trama urbana actual y la nueva trama propuesta. Bordes que son caracterizados según los grupos sociales que los habitan, replanteando los componentes de la trama damero y proponiendo una transición amigable con el sector.

Bajo estos criterios se configura la propuesta urbana, que parte de entender la lógica del sistema hídrico del territorio y proyecta su urbanidad CON el río y NO CONTRA el río.

Siguiendo con una escala de aproximación y mayor definición de actores y proyectos de la propuesta, hacemos un *zoom* y delimitamos un fragmento dentro del cuadrante noreste, fragmento seleccionado estratégicamente porque relaciona dos extremos de cuadrante con realidades contrastantes, además de reunir a las 4 áreas de la propuesta:

la relación de la trama ortogonal con las lagunas, dejando anegado la isla prosperidad, aumentando su vulnerabilidad hídrica y potenciándose por los asentamientos informales:

- Las actividades tras defensa y el brusco límite que impone.
- Las pertinencias y potencialidades ocultas de los meandros y el río mismo.
- Paisajes inundados y de alto valor ambiental.
- La aparición del trazado cuadrangular con un grupo social de alto poder adquisitivo.

Creemos fehacientemente que el río es patrimonio indiscutible para todo habitante de un pueblo, no sólo porque es un derecho para sus ciudadanos, sino también porque creemos que el acceso y conocimiento del mismo es el punto de partida para su revalorización y reutilización como un recurso indispensable para el desarrollo local. Es por esto que replanteamos los usos del suelo y el modo en que éste norma cómo fraccionar el territorio en lotes ortogonales. Para repensar este nuevo modo urbano, partimos de entender la dinámica del río.

Nuestra ambición es la de dejar que el suelo exprese sus cualidades en lugar de implantar sobre el lugar un dibujo brutal, sino lo contrario: que la arquitectura, el paisaje no se dibuja, expresa la historia de un territorio y la relación que sus habitantes mantienen con él, y es reflejo de la fuerza del río. El borde de ribera es un espacio de desbordamiento y de filtraje natural a través de la vegetación donde el río puede disipar energía y reconducirse aguas abajo. Las partes más tratadas y los edificios auxiliares del meandro quedarán a resguardo de estas crecidas, mientras los sotos de ribera serán cubiertos por la lámina del Negro.



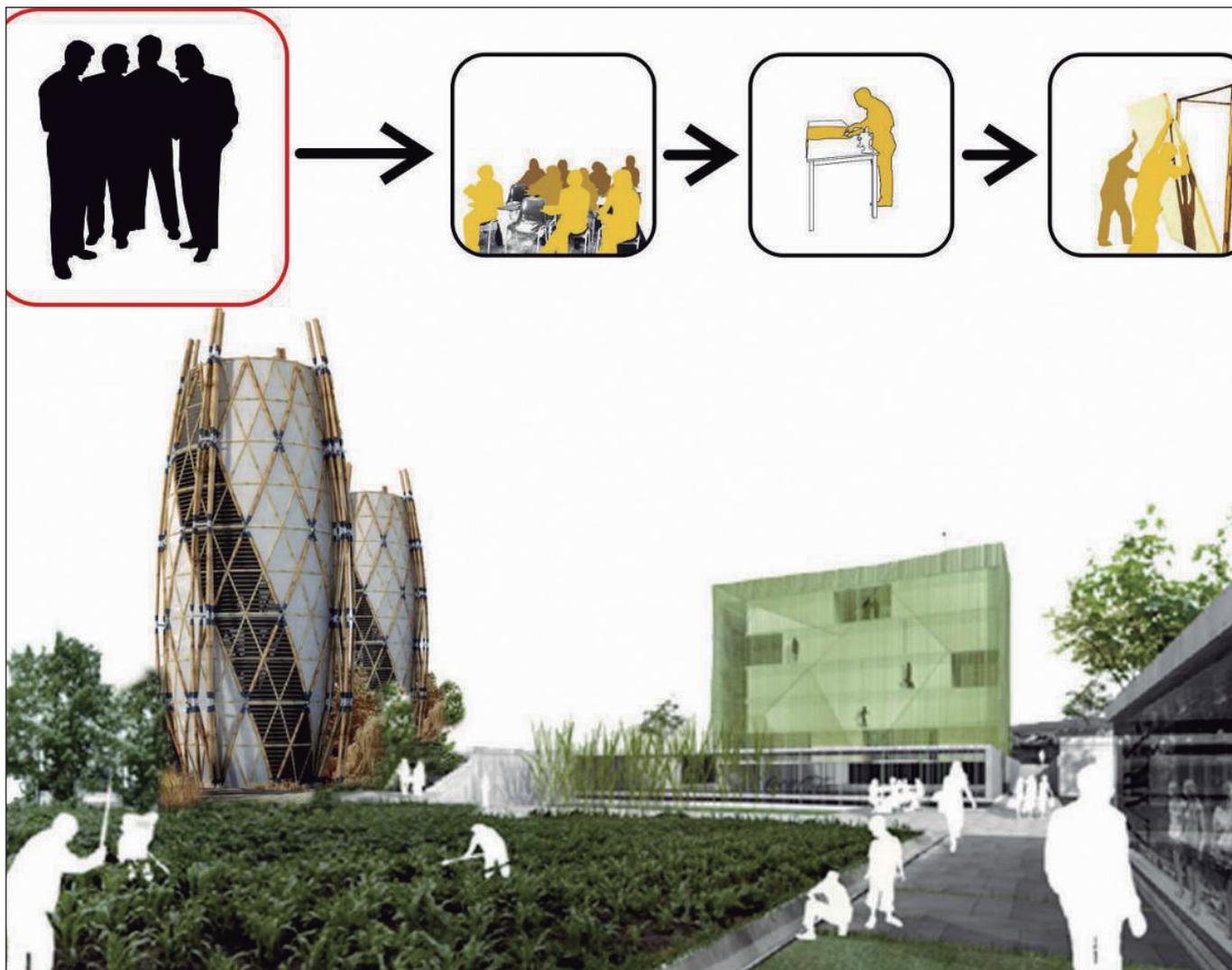


Figura 6. Fuente: elaboración propia. G. Garay- S. Figueroa Langou.



Figura 7. Fuente: elaboración propia. G. Garay- S. Figueroa Langou.

Se proyecta en un meandro del Negro un área productiva que ha de conjugar la implantación de usos ciudadanos que sustituyen el uso meramente agrícola o de extracción de materia prima, en un entorno seguro y sostenible, social y económicamente, con la devolución de una importante parte de la superficie del meandro a la

dinámica fluvial y a la recuperación y potenciación de los ecosistemas de ribera. El bosque recuperado lamina y filtra las avenidas a la vez que es irrigado y fertilizado por ellas.

De pronto, esta suma de lotes privados se convierten en Centros de Investigación y Desarrollo, Centros de Capacitación y Educación, Centros

Tecnológicos que como instituciones se fundan en el seno de la sociedad y atienden incumbencias sociales divergentes (o no), del ámbito privado y público. Comienzan a dialogar sectores de la ciudad como la Universidad, el INTI y el mismo Gobierno Municipal que, junto con los intereses privados, conjugan y materializan un rumbo común, camino al cual creemos que debe orientarse el *desarrollo local sustentable*.

Como estos equipamientos urbanos buscan entre sus objetivos principales reinsertar a grupos sociales que son marginados del sistema, encontramos también en la dinámica de la ciudad sectores que son alejados no sólo socialmente sino, además, físicamente. Para seguir con la coherencia del “fragmento” urbano seleccionado que tomamos como ejemplo, encontramos a Villa Prosperidad como un

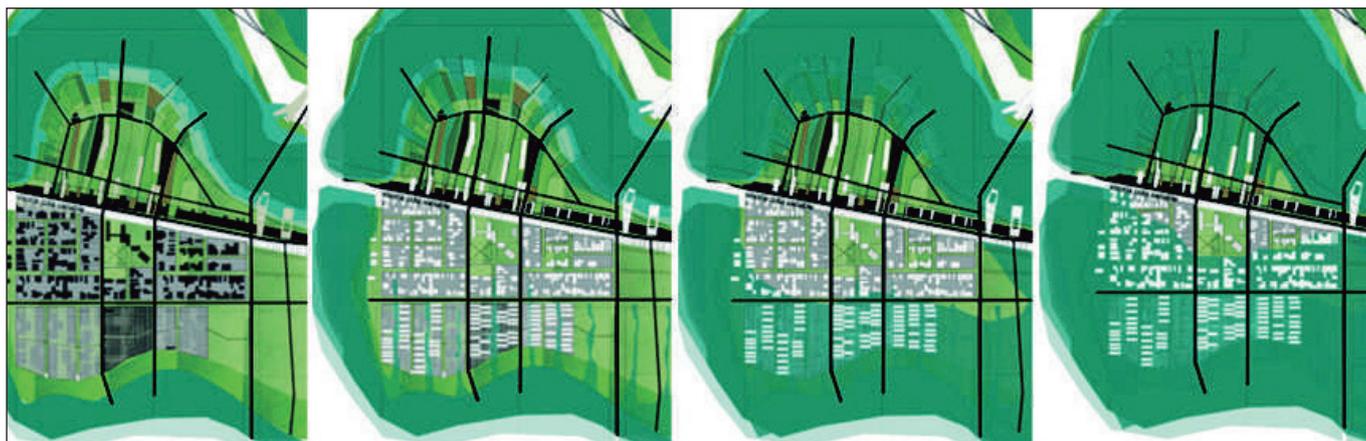
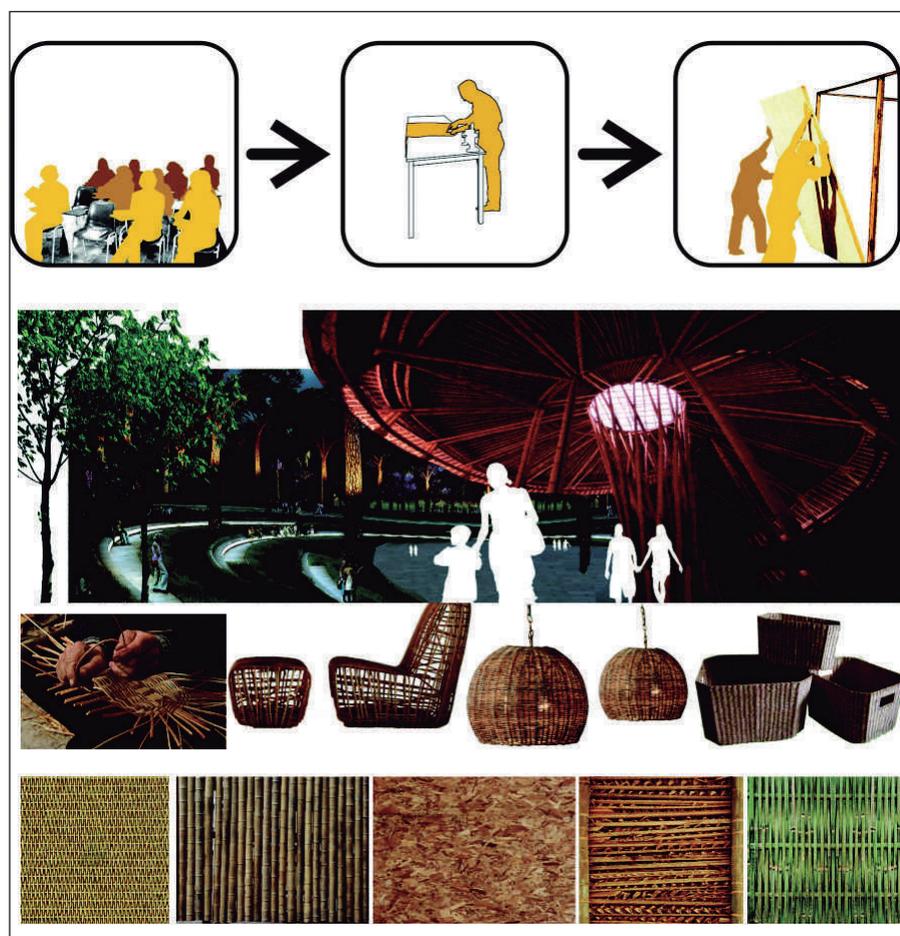


Figura 8. Fuente: elaboración propia. G. Garay- S. Figueroa Langou.



Conclusión

Se hace evidente la necesidad de empezar a pensar en la nueva forma de urbanizar Resistencia, bajo una nueva mirada en donde las áreas de riesgo hídrico deberían ser la base para el desarrollo de directrices generales de planificación, convirtiéndose entonces el Río Negro y su sistema fluvio-lacustre en un elemento esencial, motivador y propulsor del espacio público.

Sumando a esto una mirada paisajística ambiental que advierte el medio natural particular, no olvida la ciudad existente y valora a la sociedad y sus necesidades.

caso peculiar, pero repetible, de asentamientos espontáneos en áreas hídricas vulnerables.

Comprendiendo el territorio desde el dinamismo de su naturaleza y la sociedad, la Villa Prosperidad ahora se estructura a partir de las pulsaciones naturales del sistema fluvio-lacustre, entendiendo este último como una

potencialidad que aumenta el valor ambiental del barrio. Suturar la isla a través de accesos peatonales es un intento de dar forma al agua para que su convivencia con la gente sea amigable, buscando el remate de las calles, descubriendo la laguna y conectando visualmente a la ciudad.



Bibliografía

Resolución 1111/98, de la Administración Provincial del Agua del Chaco.

De Sola - Morales, Ignasi. (2002). *Territorio*. GG. Barcelona. 2002.

Hough, Michel. (1995). *Naturaleza y Ciudad*, Barcelona, Ed. G.G. 1995.

Lootsma, B. (2001). El nuevo paisaje. En *Boeri, S. et al. Mutaciones*. Actar. Barcelona.

López Candeira, Jose A. (1999). *"Diseño Urbano. Teoría y Práctica"*. Ed. Munillalera. Madrid.

Lootsma, B. (2001). El nuevo paisaje. En *Boeri, S. et al. Mutaciones*. Actar. Barcelona.

Santanamera, Juan A. *"Introducción al Planeamiento Urbano"*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. (2001). *Servicio de publicaciones. Colección Escuelas*. Madrid. España.

Queiroz Ribeiro, Luiz C., Bragos, Oscar. *"Territorios en transición. Políticas Públicas y transformaciones metropolitanas"*. UNR Editora. 2003.

Bennato, Anibal. *La arquitectura funcional del frente portuario en la conformación de la imagen urbana de Barranqueras y Vilelas 1907 - 1930*. Instituto de Investigaciones Geohistóricas - IIGHI. CONICET. Secretaría General de Ciencia y Técnica. UNNE.

Bennato, Anibal. *Evolución histórica del área portuaria de Barranqueras*. Instituto de Investigaciones Geohistóricas - IIGHI. CONICET. SGCyT. UNNE.

Chaves, Mariana. Imaginario y Ciudad: estigma, opacidad, transparencia, pos-tales y placere. En: *Ciudades* 46.

De La Fuente De Val, Gonzalo J. *P preferencias Paisajísticas: un factor relevante para la gestión y conservación del paisaje de Chile Central*. Departamento Interuniversitario de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. Madrid. 2004.

Leon Balza, Sergio. (1998). Conceptos sobre espacio público, gestión de proyectos y lógica social: reflexiones sobre la experiencia chilena. En: *Revista Eure* N° 71 (Vol XXIV). Santiago de Chile. Marzo 1998.

Sánchez Guzmán, Armando J.; 1995. *Plan Director de la Ciudad de Resistencia, Provincia del Chaco*, Ministerio Del Interior, Secretaría Asistencia para la Reforma Económica Provincial, P.R.E.I., S.U.C.C.E.

Scornik, Carlos Osvaldo. (1998). *Diagnóstico Urbano Expeditivo del Área Metropolitana del Gran Resistencia*. Sub-Unidad Provincial de Coordinación para la Emergencia del Chaco (S.U.P.C.E). Resistencia, Chaco.

Scornik, Carlos Osvaldo; Franchini, Teresita. (1997). *Urban Settlements in Areas of Natural Risk - The Case of the Greater Resistencia Metropolitan Area, Argentina*, Working Paper en Risk Assessment and Management: Planning for an Uncertain Future. Ed. International Society of City and Regional Planners, Ogaki, Japan.

Scornik, Marina. (2003). *Pautas para la ordenación urbana de áreas con vulnerabilidad hídrica del Gran Resistencia*, Secretaría General de Ciencia y Técnica (SGCyT), Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Resistencia, Chaco.

Scornik, Marina; Godoy, Susana M.; Trabalón, José. (2005). *Ordenamiento y gestión de territorios vulnerables. El caso de las localidades de Barranqueras y Fontana (AMGR)*. III Seminario Internacional. La Interdisciplina en el Ordenamiento Territorial. Mendoza, Argentina.

Scornik, Marina; Godoy, Susana M.; 2006. *"Amenazas y vulnerabilidad. Lineamientos para el ordenamiento de Barranqueras - AMGR, Chaco"*, publicación en prensa, Red de Políticas Urbanas, Estrategias Regionales y Desarrollo Local. PICT Redes 009, Rosario, Santa Fe.

* Santiago Figueroa Langou; Giselle Garay
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño Industrial, Universidad Nacional de Córdoba.

Caracterización de la cantidad y calidad de agua en un tramo del Río Dulce en Córdoba, Argentina

SILVIA NAVARRO RAMOS
GERARDO HILLMAN
CECILIA POZZI
CLAUDIA ORONÁ
ANDRÉS RODRÍGUEZ
MATÍAS GONZÁLEZ
NADIA INTRA
NATALIA BIOLATTO
HÉCTOR ZANONI
DANIEL CABIDO
CONRADO ROSACHER

Introducción

La Laguna Mar Chiquita y los Bañados del Río Dulce, constituyen uno de los sistemas cerrados más importantes de Argentina (Figura 1). Este sistema tiene tres afluentes: al sur los Ríos Primero (Suquía) y Segundo (Xanaes) y al norte el Río Dulce o Petri. Este último, a lo largo de su cuenca, está regulado principalmente por obras hídricas menores con fines de riego y por el embalse de Río Hondo, para la generación de energía y control de sus crecidas (UNC, 1998).

La Laguna Mar Chiquita es el mayor lago salado de Sudamérica y el quinto en el mundo. Se ubica al noreste de la provincia de Córdoba y es una laguna poco profunda. En la cuenca predomina la zona de llanura, especialmente al Norte por donde ingresa el Río Dulce. Hacia el norte de la Laguna, por las características topográficas del terreno (pendiente <1%), se forman los Bañados del Río Dulce, ocupando el sureste de la provincia de Santiago del Estero y noreste de Córdoba. Este subsistema posee una gran fluctuación de superficie inundada, entre 325 km² en la época seca y 12.000 km² en época húmeda (UNC, UNSE. (2007)).

Recientemente se firmó un Convenio entre la Secretaría de Ambiente de la Provincia y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC, para realizar un monitoreo, bianual,

hidrometeorológico y de calidad de agua del sistema Bañados del Río Dulce - Laguna Mar Chiquita.

Objetivos

El objetivo planteado para llevar a cabo este proyecto fueron:

- Realizar un diagnóstico de la cantidad y calidad del agua del Río Dulce.
- Conocer el aporte real y la calidad del agua que ingresa a los Bañados del Río Dulce y que puede llegar a la Laguna Mar Chiquita, con el fin de asegurar la conservación de su biodiversidad en todo el recorrido.

Metodología utilizada

Para concretar los objetivos propuestos, se realizaron hasta el momento 3 campañas estacionales en la zona de estudio, a los efectos de aforar el Río Dulce en dos secciones de control, Paso de la Cina y Paso de Oscares y extraer muestras de agua para conocer su calidad.

La metodología que se usó para medir el caudal en las dos secciones de estudio fue realizada en base a la norma ISO 748 (Medición de Caudales en

cauces abiertos. Método área-velocidad), (Pozzi, 2006).

A partir de esas mediciones, se vincularon los caudales aforados a los niveles registrados por los limnímetros instalados en dos puntos de muestreo y se obtuvo el caudal en cada tramo. Luego se ajustó una curva de tipo potencial que relaciona la cota con el caudal medido en cada campaña de aforo (Pozzi, 2006 y Plencovich, 2006).

En cuanto a la calidad del agua, la metodología, así como las técnicas de análisis utilizadas, fueron las recomendadas por APHA, AWWA (1995). A partir de la concentración de los cationes y aniones mayoritarios presentes en el agua, se realizó la caracterización de la misma. Para determinar la carga de nutrientes, se relacionó el caudal obtenido en cada aforo realizado con la concentración de los mismos presentes en el agua (Marín Galvín, 2003). Este cálculo se realizó para las distintas formas de fósforo presentes (fósforo reactivo soluble: PRS, fósforo total: PT), como así también las del nitrógeno (nitritos: NO₂⁻ y nitratos: NO₃⁻), (Snoeyink . & Jenkins, 1987).

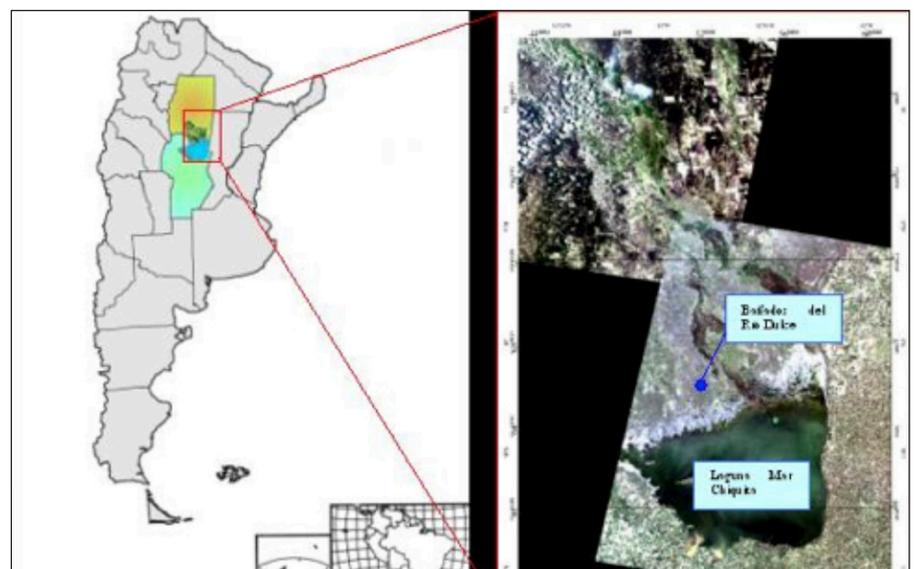


Figura 1. Ubicación del Sistema Laguna Mar Chiquita-Bañados del Río Dulce en Argentina.



Resultados y Discusión

Cantidad de agua

Los limnómetros situados en Paso de los Oscares y en Paso de la Cina, que registran automáticamente la variación de nivel, permitieron disponer de una serie de niveles diarios desde octubre de 2006 a junio de 2010 en la primera sección de control y desde octubre de 2007 a junio de 2010 en la segunda sección. Se utilizaron las 3 campañas de aforo realizadas (Tabla 1), para asociar esos niveles con el caudal medido.

Para estimar el valor de caudal en Paso de los Oscares se asoció la lectura del limnómetro a un punto físico definido en la base del instrumento igual a 4 metros. Esta relación se utilizó para obtener una ecuación potencial con sentido físico.

El valor de lectura del limnómetro para la fecha y hora del monitoreo se asoció a la diferencia de cota establecida con respecto a la distancia entre la base del aparato y el pelo de agua. A partir de ahí se obtuvieron 3 cotas relativas relacionadas con el caudal. Como consecuencia de esto, se obtuvo una curva que relacionaba la cota con el caudal medidos en cada campaña de aforo (Figura 2).

La expresión resultante para determinar el caudal en la sección de aforo de Paso de los Oscares es:

$$Q = 6.20 \times C^{1.99}$$

Donde: Q = caudal (m³/s) y C = cota (m).

Con la ecuación obtenida, se calcularon los caudales en Paso de los Oscares, utilizando los registros del limnómetro. Los resultados se presentan en la Figura 3.

Para la misma sección de aforo se calcularon, también, los caudales medios mensuales (Figura 4).

En el caso de sección de Paso de la Cina, con la misma metodología antes explicada, se definió la relación en base a la cota de 7 metros. La curva obtenida en la sección de aforo de Paso de la Cina se presenta en la Figura 5:

La expresión resultante para determinar el caudal de la sección de aforo de Paso de la Cina fue:

$$Q = 7.04 \times C^{2.02}$$

Donde: Q = caudal (m³/s) y C = cota (m).

Paso de los Oscares		Paso de la Cina	
Fecha	Q aforado (m ³ /s)	Fecha	Q aforado (m ³ /s)
08/12/2009	16,90	08/12/2009	21,20
18/03/2010	86,00	18/03/2010	40,70
23/06/2010	63,00	23/06/2010	42,80

Tabla 1. Resumen de aforos realizados.

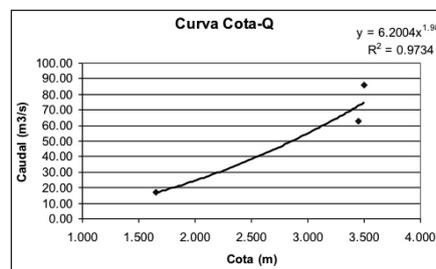


Figura 2. Curva Cota-Q. Sección Paso de los Oscares (m³/s).

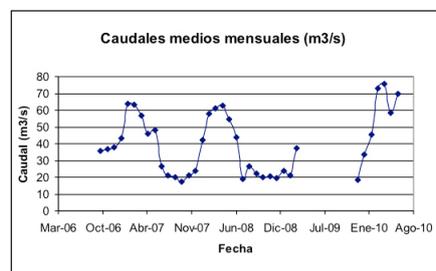


Figura 4. Caudales medios mensuales calculados en Paso de los Oscares (m³/s).

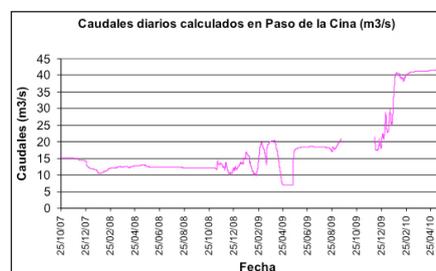


Figura 6. Caudales diarios obtenidos en Paso de la Cina (m³/s).

A partir de la utilización de la ecuación obtenida con la curva cota-caudal, se calcularon los caudales diarios correspondientes a Paso de la Cina que se presentan en la Figura 6.

Los caudales que se obtuvieron según las mediciones en Paso de la Cina no resultaron lógicos debido, posiblemente, a un registro erróneo en el limnómetro. Ante esta situación se intentó realizar una corrección teniendo en cuenta los caudales registrados en Paso de los Oscares para el periodo comprendido entre el 25 de octubre de 2007 y el 6 de marzo de 2009 (Figura 7).



Figura 3. Caudales diarios calculados en Paso de los Oscares (m³/s).

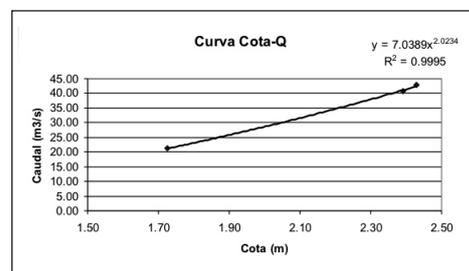


Figura 5. Curva Cota-Q. Sección Paso de la Cina (m³/s).

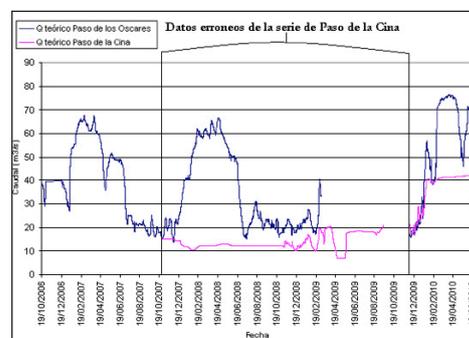


Figura 7. Comparación de caudales en Paso de los Oscares y Paso de la Cina (m³/s).

La corrección de los datos no fue posible, ya que existían varios errores importantes y difíciles de solucionar. El primero de ellos y el más importante es, como se ha dicho anteriormente, el mal registro de los datos en Paso de la Cina por el limnómetro, algo que dificulta totalmente la corrección. El otro error es el nivel de referencia relativo de los datos, en ese periodo es distinto al último, periodo en el cual se hicieron los aforos referentes a este trabajo. En base a esto, se decidió tomar como datos de caudal diario correctos los datos registrados en el periodo que

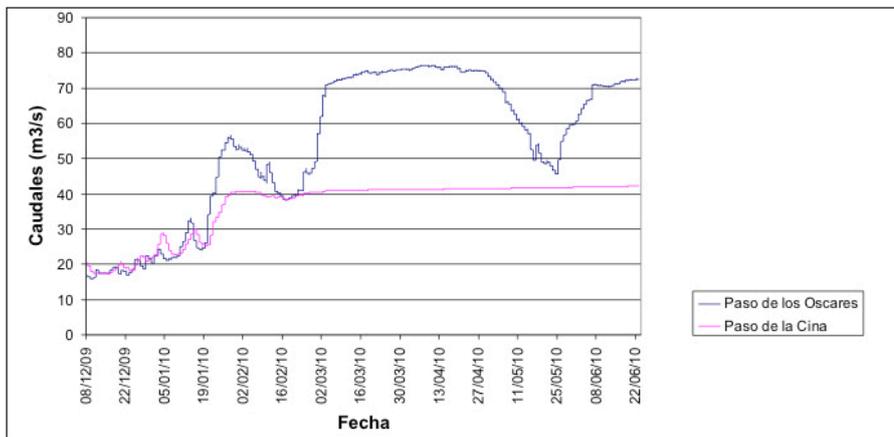


Figura 8. Datos de caudales diarios correctos de Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

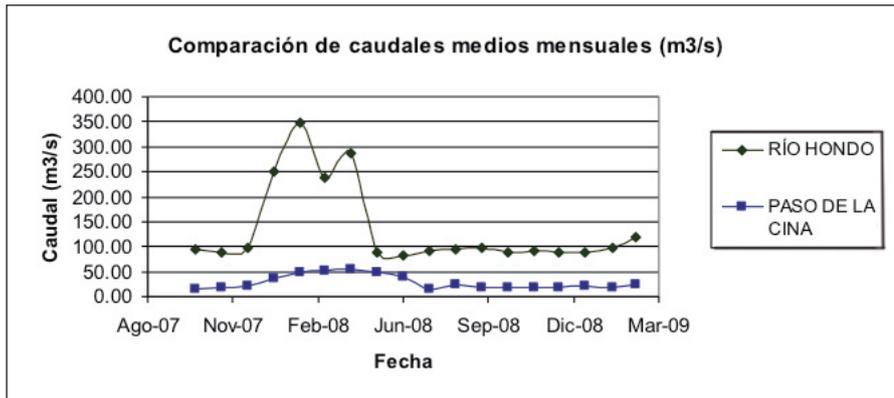


Figura 9. Comparación entre caudales medios mensuales en Paso de los Oscares y caudales erogados por Río Hondo (m^3/s).

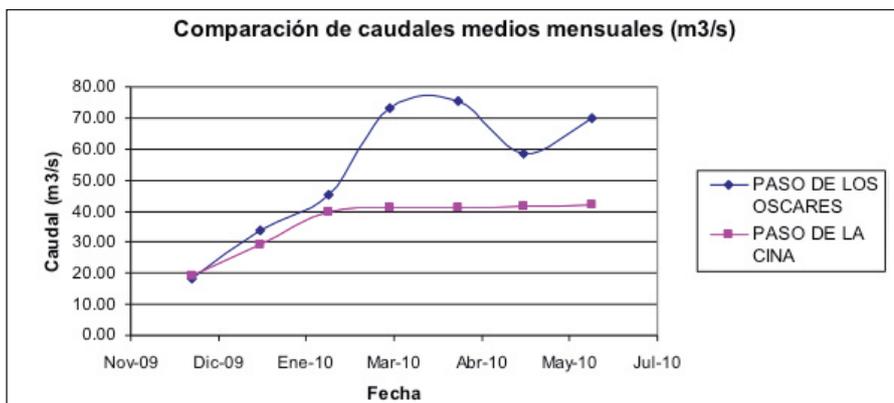


Figura 10. Comparación entre caudales medios mensuales calculados en las secciones de estudio (m^3/s).

comprende desde el 8 de diciembre de 2009 al 23 de junio de 2010. Este periodo se utilizó para trabajar y comparar con los valores de caudal estimados en Paso de los Oscares (Figura 8).

Análisis comparativo de caudales

A continuación se compararon las series de datos de caudales medios mensuales de Paso de los Oscares y caudal erogado en Río Hondo para el periodo que comprende desde octubre de 2007 a marzo de 2009. Además se compararon las series de datos de caudales medios mensuales de Paso de la Cina y Paso de Oscares en el

periodo que comprende de diciembre de 2009 a junio de 2010.

Caudales en Paso de los Oscares vs. caudales en Río Hondo

En este punto se compararon los caudales medios mensuales calculados en la sección de estudio de Paso de los Oscares con los caudales erogados por el embalse de Río Hondo, secciones distanciadas aproximadamente 300 km. Como se observa en la Figura 9 y en la Tabla 2, los caudales son un 20% menor en Paso de los Oscares que los erogados por el embalse de Río Hondo. La diferencia de agua que llega a Paso de

los Oscares desde Río Hondo es una cantidad importante, entre enero del 2008 y abril de 2008. Esta diferencia podría deberse al caudal derivado en el dique compensador Los Quiroga, que es utilizado para riego.

En la Tabla 2 se presentan los valores comparados y las diferencias obtenidas mensualmente.

Caudales en Paso de los Oscares vs. caudales en Paso de la Cina

A continuación se compararon los caudales medios mensuales calculados en las dos secciones de estudio (Figura 10). Como se ha comentado anteriormente, se tomaron como datos de caudal diario correctos, valores relevados desde el 8 de diciembre de 2009 al 23 de junio de 2010. Se calculó la media mensual de los caudales y éstos posteriormente se compararon con los datos calculados en Paso de los Oscares.

Además de realizar la comparación de los valores, se calculó el porcentaje de agua de Paso de los Oscares que llegó a Paso de la Cina en la fecha analizada (Tabla 3).

Como se observa en la Tabla 3, para el mes de diciembre de 2009, el caudal que llegó a Paso de la Cina fue mayor que el de Paso de los Oscares, aunque la diferencia es mínima ($0,69 m^3/s$). En cambio, en el resto de los meses esto no ocurrió, el caudal fue menor en Paso de la Cina que en Paso de los Oscares, en enero y febrero las diferencias entre las dos secciones de estudio no son muy grandes. A partir del 30 de enero de 2010 hasta el 23 de julio de ese mismo año, la diferencia se hace significativa, el caudal aumentó notablemente en Paso de los Oscares, cosa que no ocurrió en Paso de la Cina siendo éste casi constante. Ocurrió cuando el caudal en Paso de los Oscares estuvo por encima de los $50 m^3/s$. En Paso de los Oscares el caudal se estabilizó durante 2 meses, algo poco común en hidrogramas típicos de los ríos (Figura 11).

Para dar una explicación lógica a esta estacionalidad del caudal, se plantearon tres hipótesis, las cuales pueden estar combinadas entre sí:

1ª- Que hubiese almacenamiento del caudal entre las dos secciones, provocado por la menor capacidad de desagüe de la sección de salida y



Fecha	RÍO HONDO	PASO DE LOS OSCARES	% agua de RH que llega a PO
Oct-07	93,44	17,53	18,76
Nov-07	89,98	20,96	23,29
Dic-07	96,29	23,83	24,74
Ene-08	250,73	42,36	16,90
Feb-08	349,07	57,62	16,51
Mar-08	238,34	60,92	25,56
Abr-08	286,62	62,83	21,92
May-08	88,06	54,83	62,27
Jun-08	83,92	43,91	52,32
Jul-08	92,45	19,01	20,57
Ago-08	93,22	26,32	28,24
Sep-08	96,29	21,95	22,80
Oct-08	87,56	20,07	22,92
Nov-08	91,85	20,55	22,37
Dic-08	87,64	19,42	22,16
Ene-09	88,56	23,52	26,55
Feb-09	96,96	21,21	21,87
Mar-09	120,23	37,32	31,04

Tabla 2. Caudales medios mensuales en Paso de los Oscares y erogados por Río Hondo (m_3/s).

Fecha	PASO DE LOS OSCARES	PASO DE LA CINA	% agua de PO que llega a PC
Dic-09	18,51	19,20	103,72
Ene-10	33,69	29,39	87,25
Feb-10	45,18	39,76	87,99
Mar-10	72,96	41,08	56,30
Abr-10	75,52	41,36	54,77
May-10	58,45	41,67	71,29
Jun-10	69,79	42,03	60,22

Tabla 3. Comparación entre caudales medios mensuales disponibles en las secciones de estudio (m_3/s).

este tramo se comporte como una laguna de regulación.
 2^a- Que el caudal medido sobrepasase la capacidad del cauce con lo cual se produzca el desborde del río entre las secciones de estudio, provocando así el bañado de la zona, con lo cual, el caudal en la sección de salida sería casi constante.

3^a- Que existieran puntos de captación clandestinos entre Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

Para intentar confirmar alguna de las hipótesis planteadas, se analizaron imágenes satelitales de los periodos en los que se produjo la estacionalidad de los caudales (marzo y junio de 2010). El objeto fue poder compararlas entre ellas y ver posibles diferencias

cualitativas que expliquen lo anteriormente planteado (Figura 11).

Al comparar las dos imágenes, se apreció que existe un área mayor de bañado en la de junio que en la de marzo (Figura 11). Se aprecia un almacenamiento de agua en la zona, no pudiendo confirmar si el área bañada corresponde a la diferencia de volumen entre las dos secciones. Con ésto, se podría inferir que la estacionalidad del caudal podría ser debido a una combinación de las dos primeras hipótesis planteadas. Podría asumirse que en Paso de la Cina, cuando el caudal es mayor a 40 m^3/s , se producen los bañados. En el caso de Paso de los Oscares, esto sucedería cuando el caudal fuese mayor a 75 m^3/s .

En la Figura 11 se muestra con círculos las diferencias de bañados del Río Dulce entre la sección de Paso de los Oscares y Paso de la Cina en el mes de marzo y de junio de 2010. Además, sobre el gráfico se indican con círculos más pequeños, los aforos realizados.

Con respecto a los análisis realizados sobre la variable caudal, cabe aclarar que este estudio es el inicio de un trabajo que se debe continuar para poder obtener datos cada vez más fiables y completos.

Se conoce el caudal erogado por el Embalse de Río Hondo, y que porcentaje llega a Paso de los Oscares, pero se desconoce el caudal que se deriva del dique Los Quiroga, ubicado aproximadamente a 60 km del embalse de Río Hondo. Sería interesante contar con estos datos para poder hacer un análisis mucho más profundo de las causas por las cuales hay tanta diferencia de caudal entre el embalse de Río Hondo y Paso de los Oscares y considerar en este análisis las derivaciones para el riego realizadas en el tramo próximo a Río Hondo.

Calidad de agua

En cada muestra de agua extraída durante las campañas llevadas a cabo, tres en Paso de los Oscares y tres en Paso de la Cina, se analizó la concentración de aniones y a cationes mayoritarios. Procesando dicha información, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 4.

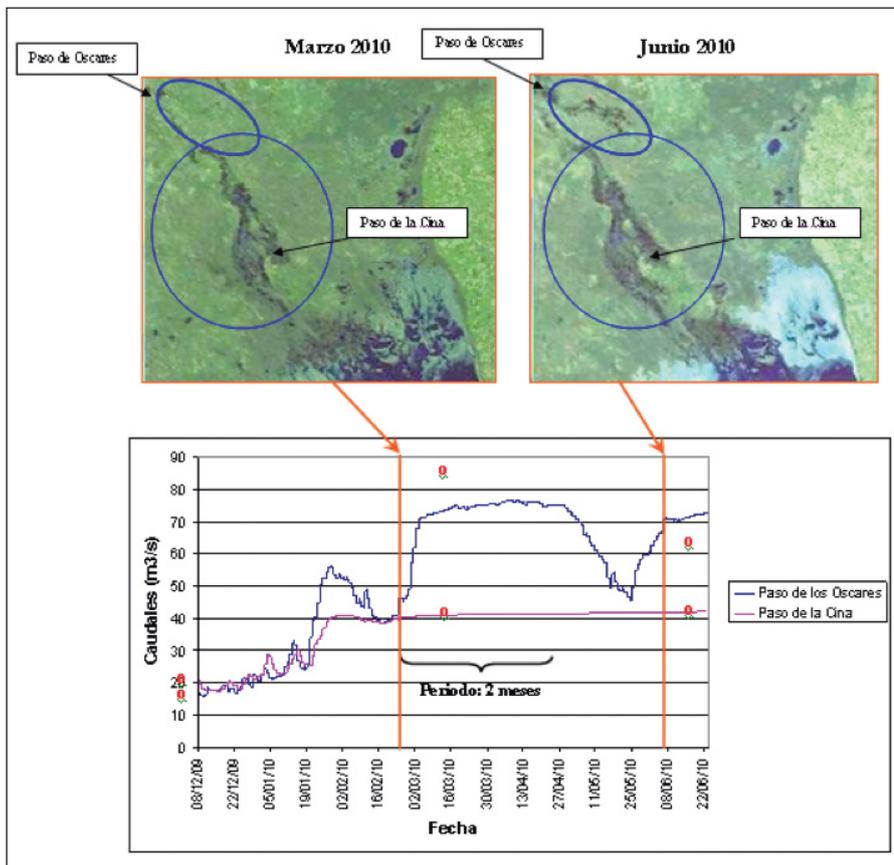


Figura 11. Serie de caudales en Paso de los Oscares y Paso de la Cina para el periodo de marzo a junio de 2010. Imágenes satelitales de la zona.

CARACTERIZACIÓN		
Fechas	Paso de los Oscares	Paso de la Cina
08/12/2009 (Primavera)	Bicarbonatada-sódica	Clorurada- sódica
18/03/2010 (Verano)	Sulfatada- sódica	Sulfatada- sódica
23/06/2010 (Otoño)	Bicarbonatada-sódica	Bicarbonatada-sódica

Tabla 4. Resumen de caracterización del agua.

La característica del agua sufrió variaciones en las diferentes campañas realizadas. Se pudo observar que, en Paso de los Oscares, en dos de las tres campañas (primavera y otoño) el agua resultó ser bicarbonatada- sódica. En la campaña correspondiente al verano, los resultados arrojaron como característica sulfatada-sódica. Cabe aclarar que en esta ocasión los porcentajes de los aniones fueron bastante cercanos (Cl^- : 32,1 %; HCO_3^- : 32,8 %; SO_4^{2-} : 35,0 %). En función de esto, se podría considerar en esta sección, como bicarbonatada- sódica.

En Paso de la Cina, en la campaña de verano, se encontró muy poca diferencia entre los porcentajes de los aniones mayoritarios, los cuales variaron entre un 32,4 % y un 33,9 %. No sucedió lo mismo en la campaña que se realizó en

primavera, donde el porcentaje de cloruro en la muestra fue muy superior al resto (Cl^- : 56,98 %; HCO_3^- : 25,58 %; SO_4^{2-} : 25,58 %) (Snoeyink & Jenkins, 1987). Para la campaña de otoño, los cálculos realizados arrojaron como resultado que el agua fue bicarbonatada sódica. A las diferencias entre las características que presentó el agua en las tres campañas, no se le pudo encontrar una explicación hasta el momento.

En la primera campaña (primavera) se observó una diferencia importante entre la característica del agua en Paso de los Oscares y Paso de la Cina, siendo bicarbonatada-sódica y clorurada-sódica respectivamente. Esta situación no se pudo explicar fehacientemente, aunque podría deberse a que entre ambas secciones, se pudo producir

algún vertido con alto contenido de cloruros en el cauce.

Se decidió calcular la carga de nutrientes que transportaba el río, para cada fecha de monitoreo, con el objetivo de tener una estimación de lo que estaría ingresando a los bañados y Laguna Mar Chiquita. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5. Cabe aclarar que los mismos, corresponden al instante en el que se midió el caudal y se extrajo la muestra de agua, aunque fueron expresados en kg/día para tener un mejor dimensionamiento.

Si bien no se encontraron antecedentes, ni tampoco valores guías referentes a la carga normal de nutrientes en un río de características parecidas a las del Río Dulce, se podría considerar que la carga de fósforo es elevada. Esta conclusión se obtiene en virtud de que las concentraciones de este parámetro, obtenidas en las muestras analizadas, superan los niveles guías adoptados (Zepka Baumgarten, 2001). Como el agua del río tiene como destino final la Laguna Mar Chiquita, esto podría provocar la eutrofización de la misma y como consecuencia perjudicar los organismos existentes en ese cuerpo de agua.

Conclusiones

Se realizaron tres campañas de muestreo sobre el Río Dulce, en dos secciones de control, Paso de los Oscares y Paso de la Cina. En estas campañas se recolectaron los datos necesarios para la realización de un diagnóstico preliminar de la cantidad y calidad del agua del Río Dulce.

Se procesaron y analizaron tanto los datos de calidad como los de cantidad y se obtuvieron una serie de resultados que permitieron avanzar en el conocimiento del sistema estudiado.

Las tres campañas de aforo realizadas, durante diciembre de 2009, febrero y junio de 2010, permitieron asociar los datos de nivel con el caudal, ambos medidos en las secciones de estudio, pudiendo mejorar la calibración de la curva cota-caudal.

El procesamiento y análisis conjunto de datos de calidad y cantidad, permitió concluir que: "el equilibrio natural de las comunidades acuáticas presentes en el Río Dulce, en los Bañados y



Carga de nutrientes (Kg/día)						
Nutrientes calculados	08/12/2009 (Primavera)		18/03/2010 (Verano)		23/06/2010 (Otoño)	
	Paso de los Oscars	Paso de la Cina	Paso de los Oscars	Paso de la Cina	Paso de los Oscars	Paso de la Cina
Fósforo reactivo soluble (PRS)	516,2	663,1	2511,5	2282,2	1589,4	1153,8
Fósforo total (PT)	917,0	1097,2	4079,3	2190,8	2569,2	2303,8
Nitritos (NO ₂)	29,2	36,6	148,6	140,7	108,9	147,9
Nitratos (NO ₃)	730,1	915,8	3715,2	1758,2	5443,2	1849,0

Tabla 5. Resumen de carga de nutrientes estimadas en el Río Dulce.

en la Laguna Mar Chiquita podría verse afectado por la eutrofización de las aguas (de continuar la tendencia observada en los valores relevados).

Recomendaciones

Continuar con un monitoreo durante dos periodos hidrológicos con campañas cuya frecuencia mínima sea de tres meses, para obtener una cantidad de datos que permitan un análisis más preciso sobre la calidad del agua de este recurso hídrico. Además, se recomienda evaluar la posible presencia de metales pesados y plaguicidas, tanto en agua como en el material en suspensión (MES), en virtud de las actividades que se desarrollan en la cuenca del Río Dulce.

Que en estudios futuros se tengan en cuenta aspectos biológicos simultáneamente con los hidrológicos, para poder conocer la magnitud de comunidades acuáticas y poder determinar y definir un indicador ambiental a partir de las variables relevadas y, así, valorar el ambiente en forma conjunta.

Se recomienda la realización de aforos cubriéndose, a ser posible, periodos de bajo, alto y medio caudal, para así cubrir un espectro de variación de caudal mucho más amplio y poder obtener un mejor ajuste de la ecuación cota-caudal, la cual permitirá obtener los caudales a partir de los datos registrados por los limnómetros de las dos secciones de estudio con un menor error.

Se recomienda revisar el limnómetro instalado en Paso de la Cina, ya que se traba en muchas ocasiones, dificultando así el trabajo de procesamiento y análisis de los datos.

Agradecimientos

Al personal técnico del Destacamento de la Reserva de Usos Múltiples Laguna Mar Chiquita y Bañados del Río Dulce y al Laboratorio de Hidráulica por la ayuda prestada para el desarrollo de las tareas de campaña.

Bibliografía

APHA, AWWA, WPCF (1989). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 17a Ed.

Chow, V.T.; Maidment D.R. & Mays L.W. (1994). *Hidrología aplicada*. 1a Ed. Mc Graw Hill Interamericana S.A., Bogotá, Colombia.

Henry, J. & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. 2ª Ed. Pearson. México.

Hillman, G. (1999). *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Marín Galvín, R. (2003). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas*. Díaz de Santos. Madrid.

Navarro Ramos, S. (2010). *Situación Actual en el Río Dulce (Córdoba, Argentina): Evaluación de la Cantidad y Calidad del Agua*. Tesis de Grado de la Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Pagot M. (2003). *Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce*. Tesis de Maestría. F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Plencovich, G. (2006). *Simulación hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital*. Tesis de Maestría (en revisión). F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Pozzi C. (2006). *Simulación hidrodinámica y monitoreo del Sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenusa), Córdoba, Argentina*. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Recursos Hídricos, F.C.E.F. y N., UNC. Córdoba, Argentina.

Snoeyink J. & Jenkins D. (1987). *Química del Agua*. 1a Ed. Limusa S.A. México.

UNC (1998). *Valoración del Impacto Ambiental en la Región de Mar Chiquita y la Cuenca afectada por el Canal Federal*. Informe Final al CFI. Córdoba, Argentina.

UNC, UNSE. (2007). *Estudio hidrológico-Ambiental del sistema Mar Chiquita- Bañados y tramo inferior del Río Dulce*. Informe final para Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Córdoba, Argentina.

Zepka Baumgarten (2001). *Qualidade de aguas. Descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental*. 1 edn. Editora da Furg, Rio grande, Brasil.

* Silvia Navarro Ramos¹, Gerardo Hillman¹, Cecilia Pozzi¹, Claudia Oroná¹, Andrés Rodríguez¹, Matías González¹, Nadia Intra¹, Natalia Biolatto¹, Héctor Zanon¹, Daniel Cabido², Conrado Rosacher²

¹ Laboratorio de Hidráulica. F.C.E.FyN. Universidad Nacional de Córdoba

² Secretaria de Ambiente de la Provincia de Córdoba.

Delimitación de áreas vulnerables a la contaminación difusa del acuífero con nitratos

AMÉRICO DEGIOANNI

Introducción

La producción agropecuaria está considerada como la principal actividad donde el sumidero del nitrógeno que no es utilizado por la producción es el agua subterránea (Adiscott, 1995, Sapek, 2005, Davey *et al.*, 2005). La transferencia de nitratos desde el suelo hacia el acuífero ocurre por el proceso de lixiviación que es parte del flujo de N en el agroecosistema. Las principales variables climáticas y edáficas que regulan el flujo de N y por ende el proceso de lixiviación son: balances hídricos positivos, N orgánico con elevado coeficiente de mineralización (baja relación C/N), mineralización de la materia orgánica durante todo el año e intensificación de la agricultura (aumento de la superficie cultivada, incorporación de fertilizantes y riego) (Andriulo *et al.*, 2000). Por otra parte, la vulnerabilidad del acuífero a ser contaminado con nitrógeno dependerá de su características estructurales (profundidad a la zona saturada, geología de la zona saturada y no saturada, etc.) y dinámicas (transmisividad, almacenamiento, etc.) (Guzik, 2005). Stokmarr and Nyegaard (2005) encontraron una alta correlación entre el incremento en el contenido de nitratos en agua con el incremento en el consumo de fertilizantes nitrogenados para Europa. En este sentido, Argentina incrementó el consumo de fertilizantes nitrogenados en un 87% entre 1993 y 2007 con una eficiencia de uso promedio (kg aplicado vs kg extraído por granos) del 48% (Echeverría *et al.*, 2009). Esta eficiencia implica, además de un menor retorno económico por kg de N aplicado, un elevado riesgo de contaminación del agua subterránea por lixiviación de nitratos. En tal sentido,

y para áreas rurales bajo uso agrícola, Costa *et al.*, (2002) reportan contenidos de nitratos mayores a 5 mg l^{-1} en el sudoeste de Bs. As. y Andriulo *et al.*, (2009) reportan contenidos de nitratos en freática hasta 50 mg l^{-1} en la zona de Pergamino. En el sur de Córdoba, Gómez *et al.* (2006), Blarasin *et al.* (2006) y Matteoda *et al.*, (2008) reportan concentración de nitratos en el acuífero superiores al fondo natural regional ($10,6 \text{ mg l}^{-1}$) atribuible a la contaminación difusa por el uso de fertilizantes. Sin embargo no sólo los fertilizantes nitrogenados son una fuente potencial de nitratos. En la región pampeana argentina se comprobó la transferencia de nitratos del suelo a la freática a partir de N mineralizado de la materia orgánica (Portella *et al.*, 2006; Abril *et al.*, 2007). Por otra parte, la actividad pecuaria es una importante fuente de nitrógeno cuyo excedente puede contaminar el acuífero. Los animales excretan al ambiente entre 60 y 80% del nitrógeno y fósforo que ingieren a través de la orina y las heces y son una fuente de contaminación difusa en sistemas pastoriles o contaminación puntual en sistemas confinados (Herrero y Gil, 2008). Se ha estimado en explotaciones tamberas lixiviación de nitratos entre 119 y 215 kg ha^{-1} (Báez *et al.*, 2006, Producción animal. Com. Pública).

La cuantificación de la lixiviación puede realizarse con medidas directas o indirecta mediante modelos de simulación de base empírica o mecanísticos. Cuando se carece de datos experimentales con suficiente representación geográfica, las estimaciones se pueden realizar mediante modelos empíricos (Roy *et al.*, 2003). Dichos modelos pueden ser utilizados como estimadores potenciales de la lixiviación de N o para evaluar

la eficacia de medidas de mitigación (Cherry *et al.*, 2008).

La actividad agropecuaria extensiva o semiextensiva es una fuente de contaminación difusa tanto de la atmósfera como de la hidrosfera. Ello implica que los procesos contaminantes como la lixiviación de nitratos, se generan en todo el territorio por lo que se trata de una variable con distribución continua en el espacio geográfico. En tal sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas adecuadas para estudios de este tipo y se usan para delimitar áreas vulnerables (Bassam *et al.*, 2010) o categorizar actividades contaminantes en función de la cantidad de nitratos que se transfieren al acuífero (Paz *et al.*, 2009).

Las prácticas agronómicas para minimizar la lixiviación de nitrógeno requieren, en primer lugar, conocer la vulnerabilidad de los ambientes a la contaminación del acuífero por las actividades desarrolladas sobre el mismo. En consecuencia, el objetivo de este trabajo es delimitar áreas vulnerables a la contaminación difusa con nitratos del acuífero en una llanura de uso agropecuario en el sur oeste de la provincia de Córdoba (Argentina).

Materiales y Métodos Área de estudio

El área de estudio es una llanura ondulada de 3210 km^2 localizada en las cuencas del río Cuarto y arroyos menores del sur de Córdoba (Figura 1). Es una llanura relativamente homogénea tanto desde el punto de vista climático (subhúmedo, templado); fisiográfico (paisajes ondulados) como edáfico (suelos Haplustoles, franco arenosos). Es un área donde la principal actividad que se desarrolla es de tipo rural. La estructura productiva la conforman 463 explotaciones agropecuarias (EAP) cuya superficie en



operación ocupa 2800 km². Se cuenta con información primaria sobre uso del suelo, rendimientos y tecnologías de producción agrícola - ganadera de 24 EAP relevada mediante encuestas (de Prada y Penna, 2007).

Cálculo de la lixiviación potencial de nitratos

Para el cálculo de la lixiviación potencial de nitratos se utilizó el modelo propuesto por De Willigen (2000). Dicho modelo se obtuvo de 43 medidas de lixiviación y explica un 67 % de la varianza para una amplia variedad de suelos y climas. Degioanni y Cisneros (2010) encontraron, para condiciones ambientales de Pergamino, que el modelo aproxima resultados aceptablemente en la estimación de la lixiviación para la actividad maíz pero sobrestima el cálculo para el cultivo de soja en el orden del 50%. La expresión matemática se formula en la ecuación [1].

$$N\text{-NO}_3\text{-lixiviados (kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}) = 0.0463 + 0.0037 * P * (C * L)^{-1} * Nf + D * Nom - Nu [1]$$

Donde, P: lluvia anual (mm), C: contenido de arcilla (%), L: profundidad de enraizado (m), Nf: N aportado por el fertilizante y por la mineralización de los residuos orgánicos (kg ha⁻¹año⁻¹), D: tasa anual de mineralización de la MO (%), Nom: contenido de N en la MO (%) y Nu: N exportado en granos y forrajes (kg ha⁻¹).

Para utilizar la ecuación [1], la exportación de N por los cultivos agrícolas (maíz, soja, girasol, trigo) se obtuvo de la planilla de cálculo CalcReq (Inpofos, 2007) utilizando los rendimientos relevados en las encuestas para la campaña 2006/2007. En soja se consideró solo un 50% de N exportado para descontar el N que proviene por fijación biológica. El N aportado por fertilizantes fue tomado de las encuestas para la campaña 2006/2007 siendo la lluvia para este ciclo fue 830 mm. La profundidad de enraizado considerada para todos los cultivos es de 1,5 m. Los datos de arcilla y materia orgánica fueron obtenidos de fuentes cartográficas (Zamora et al., 2006). Los valores promedios de arcilla y materia orgánica encontrados son 13,8% y 1,6% respectivamente. La

densidad aparente (DAP) considerada para expresar los resultados en kg ha⁻¹ es 1,3 Mg m⁻³ (Bongiovanni y Degioanni, 2010). Se asumió un 5% el contenido de N de la MO con una tasa de mineralización anual de la misma del 2,5% (Darwich, 2006) considerando una profundidad de 40 cm de suelo. Para el cálculo del volumen de rastrojos se consideró un índice de cosecha de 0,45 para maíz y 0,35 para el resto de cultivos. El contenido porcentual de N de los mismos fue tomado de Darwich (2006) y la proporción promedio de rastrojo que anualmente se descompone es 55,5 % para soja y 30 % para maíz (Corbella et al., 2004, com. personal). Cuando el rastrojo de maíz se utiliza como forraje se asumió que un 5 % del mismo aporta N por mineralización y un aporte de estiércol por el ganado considerando un período de pastoreo de 90 días. En girasol, se asumió una proporción de rastrojo descompuesto en el año del 45% (Peña Siles et al., 2007, com. pública).

Para la actividad pecuaria, el N exportado por los forrajes se aproximó de manera indirecta a partir de los kg de novillos y vaquillonas engordados anualmente. A tal efecto, se contabilizó 0,16 kg de N por kg de peso vivo (Esminger y Olentive, 1983). Las fuentes de N para el ganado provienen de forrajeras anuales, alfalfa, rastrojo de maíz y suplemento de granos y heno. Como se cuenta con datos de los días y kg de granos suplementados, se estimó el N aportado para una dieta de 3 kg de maíz diario calculando el N aportado por el grano que se descontó al N exportado por carne para ajustar el aporte de N de los forrajes. La superficie ganadera se obtuvo sumando la superficie de pasturas (anuales y perennes) y un 50% de la superficie de los rastrojos de maíz. Para evitar una doble contabilidad del N aportado por la mineralización de la materia orgánica en la superficie cultivada con maíz, ésta no fue contabilizada en la actividad pecuaria. Por otra parte, para la superficie con alfalfa se asume un 50% del contenido de N de la materia orgánica tal como los establece de Willigen (2000). En cuanto a los aportes de N por excretas se consideró 35 kg N promedio por animal vivo (Allen y

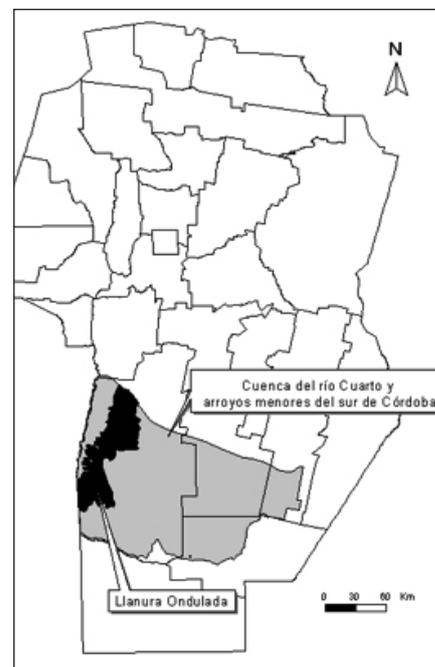


Figura 1. Localización Llanura Ondulada.

Embleton, APA, com. pública). La tasa de descomposición anual de las excretas considerada es del 35% (Pierzynski et al., 2005). No se consideraron aportes por mineralización de residuos de pasturas. Se calculó la lixiviación para cada una de las actividades (agrícolas y pecuarias) de las EAP promediando la lixiviación de cada actividad (agrícola y/o ganadera) ponderada por la superficie que ocupa cada actividad en la EAP. A su vez, se presentó también la lixiviación total de las EAP proyectada a toda la superficie en operación de la llanura.

Determinación de nitratos en el acuífero libre

Se procedió a realizar un muestreo sistemático no alineado georreferenciado de las perforaciones de agua del área de estudio tomándose una muestra cada 110 km² aproximadamente. Se relevaron 30 perforaciones a las que se le determinó el contenido de nitratos mediante el método colorimétrico con tiras de ensayo Merckoquant®. Como este test establece mediciones dentro de rangos de concentración (0-10; 10-25; 25-50; 50-100; 100-150) se procedió a definir 3 rangos de nitratos en agua: normal (< 10 mg l⁻¹) tomándose como referencia el fondo natural regional que es de 10,6 mg l⁻¹ (Blarasin et al., 2006), medio al rango comprendido entre los 10 y 50 mg l⁻¹ tomando como base 45 mg l⁻¹ que es el valor admitido por el Código Alimentario Argentino

para el agua potable, y *alto* para valores mayores a 50 mg l⁻¹. No se incluyeron en los resultados muestras de perforaciones próximas a corrales de engorde (bovinos o cerdos), tambos y galpones de cría aviar ni perforaciones a menos de 5 km de las poblaciones.

Distribución espacial de la lixiviación y concentración de nitratos en el acuífero

Para representar y analizar espacialmente la lixiviación y la concentración de nitratos en el acuífero del área de estudio, se generó una base de datos georreferenciada con la información de las EAPs y los 30 muestreos del acuífero. Para espacializar la lixiviación dado que sólo se conoce la localización de las EAP dentro de los radios censales del Censo Nacional Agropecuario 2002, se procedió primero a la obtención de centroides de dichos polígonos para transferir los valores de lixiviación de las EAP a un punto concreto. Posteriormente, se generó un mapa de distribución de la lixiviación mediante la transformación de los centroides con sus correspondientes valores temáticos a polígonos mediante el procedimiento de interpolación de medias móviles con ponderación por la distancia. Para espacializar la concentración de nitratos en el acuífero se procedió a transferir la localización de las muestras relevadas en un mapa de puntos con su correspondiente valor temático clasificados en cada rango establecido (normal, medio y alto). Posteriormente, se procedió a distribuir ese valor en todo el territorio de la Llanura mediante el interpolador polígonos de Thiessen (Bosque, 1995). Finalmente, se realizó una superposición entre el mapa de lixiviación potencial calculado y el de contaminación del acuífero como forma de verificación del procedimiento desarrollado. Todo este procedimiento fue realizado con ArcView 3.2 (ESRI, 1999).

Resultados

Lixiviación potencial de nitratos

Las características productivas de las EAP encuestadas indican que 17 producen granos y carne bovina (mixtas), 4 producen sólo carne bovina

EAP	kg ha ⁻¹ año ⁻¹	Mg año ⁻¹
Mixtas	22 (±9)	5.641
Ganaderas	23 (±12)	327
Agrícolas	21,6 (±7)	173
Total Llanura	22,6 (±3)	6.141

Tabla 1. Lixiviación potencial anual de nitratos.

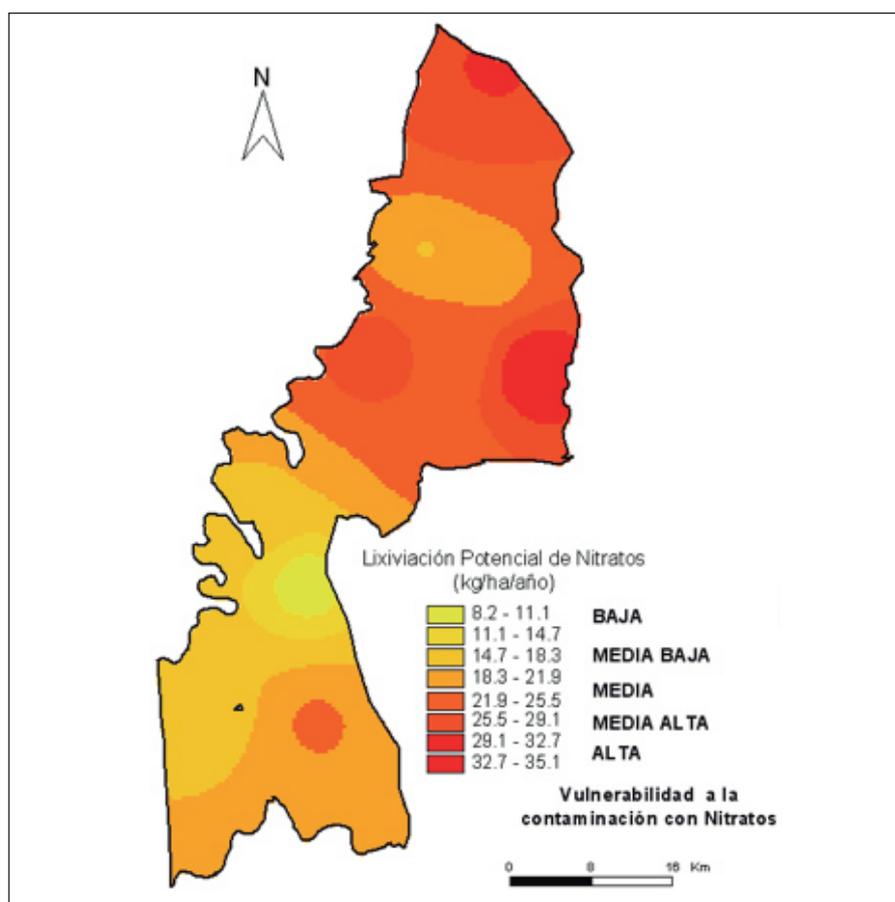


Figura 2. Mapa de lixiviación potencial de nitratos / áreas vulnerables a la contaminación.

(ganadera) y 3 producen granos (agrícolas). La superficie en operación promedio son para las EAP mixtas, 496 ha, las ganaderas: 203 ha y las agrícolas: 245 ha. El 83% de la superficie en operación de las EAP mixtas es de uso agrícola (57% soja, 38% maíz, 2% trigo y 1% girasol) y 17% ganadera (70% verdes y 30% alfalfa). Las EAP agrícolas cultivan 25% de su superficie con soja y el resto maíz. Las EAP ganaderas cultivan 75% de la superficie con verdes anuales y el resto alfalfa. El 75% de la superficie sembrada con maíz, trigo y girasol es fertilizada con N con una dosis promedio de 28 kg ha⁻¹. La carga animal promedio de ganado bovino de 1,8 cabezas ha⁻¹. En la Tabla 1 se presenta la

lixiviación potencial anual promedio por hectárea de las EAP y la lixiviación total de las EAP proyectada al total de la superficie en operación de llanura.

El valor promedio por hectárea que pondera la lixiviación potencial de cada actividad (soja, maíz, girasol, trigo o forrajes) por la superficie que ocupa cada cultivo en la EAP, no muestra diferencias importantes salvo la mayor variabilidad (CV 52%) en los sistemas ganaderos puros (posiblemente este resultado esté asociado a las simplificaciones asumidas en los cálculos). En cambio, el mayor aporte potencial de nitratos (81%) lo hacen los sistemas mixtos que representan el 91% de la superficie en operación de la Llanura



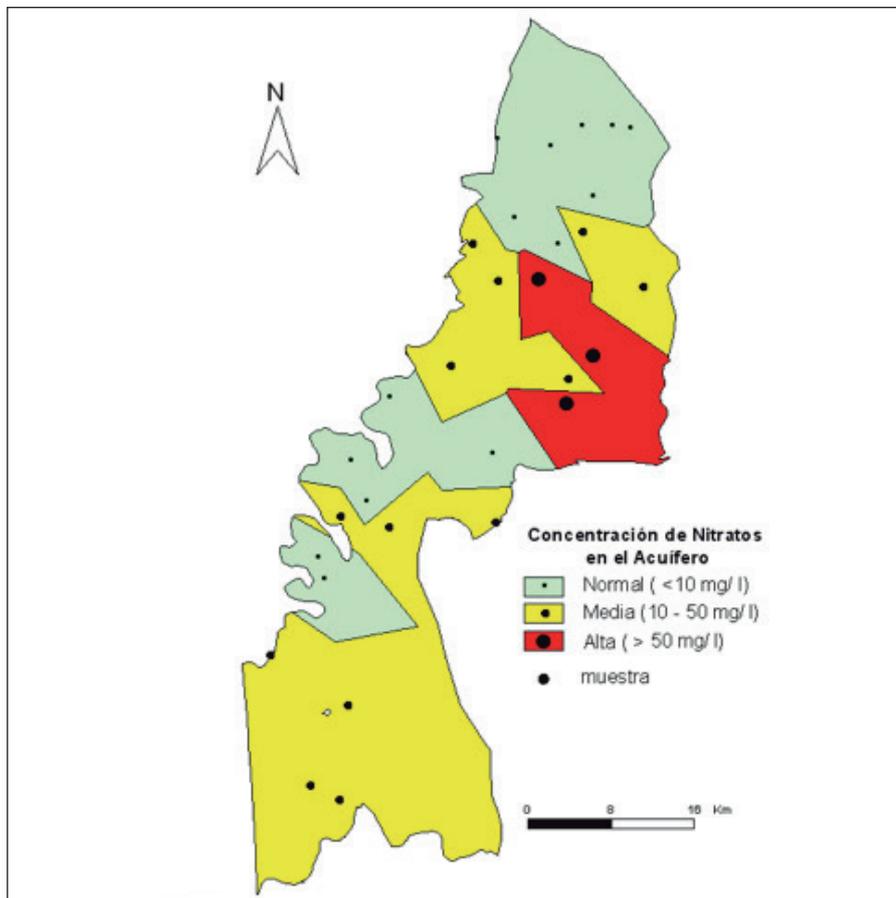


Figura 3. Mapa de concentración de nitratos en el acuífero de la Llanura Ondulada.

Ondulada. La lixiviación promedio para el área analizada y como consecuencia de la actividad agropecuaria es de 22,8 kg de nitratos $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. Cabe recalcar que éste se debe interpretar como un indicador de la producción de nitratos que tienen probabilidad de alcanzar el acuífero, más que una transferencia directa de nitratos del suelo al agua, ya que esto depende de la percolación y profundidad del acuífero entre otros factores.

En la Figura 2 se presenta el mapa de la lixiviación potencial de nitratos promedios por hectárea a partir de las EAP ubicadas en los radios censales correspondientes cuyo rango de valores extremos son 8,2 y 35,1 kg nitrato $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. Los rangos intermedios, obtenidos a partir de desvíos estándar sucesivos del valor medio (hasta alcanzar los valores extremos), indican áreas con diferentes niveles de lixiviación potencial de nitratos por lo que son equivalentes a áreas de con distinto grado (cualitativo) de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

Este mapa explica la distribución territorial de la lixiviación por la relación ambiente - actividad agropecuaria. En tal sentido, se observa que

el sector centro - norte es el de mayor lixiviación potencial, por tanto el área más vulnerable a la contaminación del acuífero. También en este sector de la llanura se ubican áreas de alta vulnerabilidad. En cambio en el sector centro - sur la lixiviación es menor por lo que se localizan las áreas de menor vulnerabilidad. Sin embargo, en el sur de la Llanura se advierte la presencia de áreas de media a media alta vulnerabilidad.

En la Figura 3 se presenta el mapa obtenido de la espacialización de los contenidos de nitratos relevados en el acuífero. Siendo el N que proviene de la actividad agropecuaria la única fuente de contaminación del acuífero, se observa que no todos los sectores de la llanura se comportan homogéneamente frente a la lixiviación. El sector más contaminado corresponde al centro este del área y se advierte también en el sector sur valores de contaminación superiores a lo normal. Este hallazgo de carácter preliminar dada la baja densidad de observaciones y la falta de información sobre el comportamiento hidrogéocímico del acuífero, evidencia que el mismo es vulnerable, en diferente grado, a la

contaminación con nitratos por lixiviación.

En la Figura 4 se presenta el resultado de la superposición entre el mapa de la Figura 2 y 3 donde se puede apreciar visualmente la correlación espacial entre ambos mapas.

De acuerdo a este resultado, se comprueba que existe una aceptable correlación entre el procedimiento teórico desarrollado y la realidad geográfica del acuífero en cuanto a sus niveles de nitratos: hay coincidencia entre áreas calificadas de alta a media alta vulnerabilidad en el sector centro norte con los mayores contenidos -medios y altos- de nitratos en el acuífero (círculo azul, Figura 4). También, se observa coincidencia en el sector sur (círculo negro, Figura 4) con áreas calificadas de media a media alta vulnerabilidad y contenidos medios de nitratos en el acuífero. La zona que no tuvo nada de correlación entre los valores teóricos y las mediciones de nitratos es el norte de la llanura donde se calificó como un área de alta vulnerabilidad y los valores de nitratos en el acuífero son normales.

En virtud de los resultados logrados, se puede concluir que la metodología implementada en este trabajo ha permitido de manera preliminar identificar áreas con diferente grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero libre con nitratos. Esta metodología podría ayudar a establecer áreas prioritarias para profundizar la investigación a los efectos de minimizar incertidumbres sobre las presunciones, estimaciones e interpolaciones efectuadas y realizar una mejor aproximación de los resultados incorporando en el análisis el comportamiento hidrogéocímico del acuífero. Por otra parte, los resultados obtenidos permiten priorizar zonas para promover acciones vinculadas a minimizar la lixiviación de nitratos, como por ejemplo, la adhesión (obligatoria o voluntaria) por parte de los productores agropecuarios a programas de Mejores Prácticas de Manejo de Nutrientes (Ferrari, 2006).

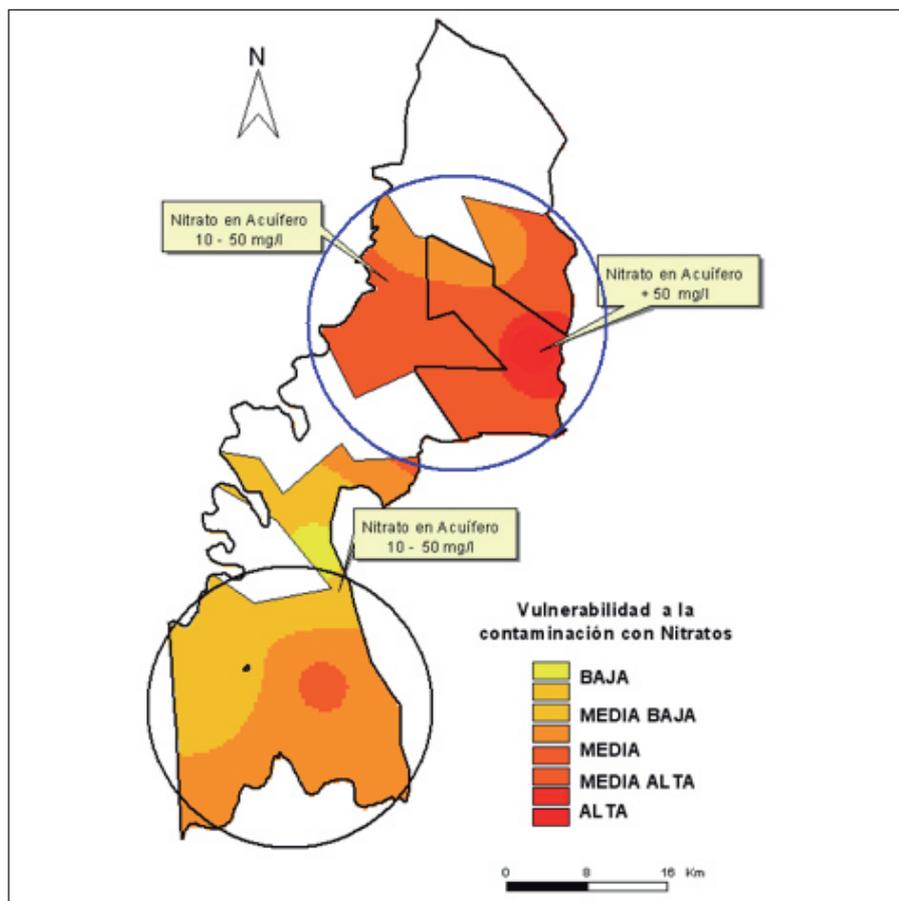


Figura 4. Correlación espacial entre mapa de vulnerabilidad y contenido de nitratos en el acuífero.

Consideraciones finales

A pesar de que se logró alcanzar de manera aceptable el objetivo de este trabajo con la metodología desarrollada, es necesario realizar algunas observaciones que debieran ser tenidas en cuenta a la hora de replicar la misma. La primera observación, es sobre la información primaria y secundaria utilizada. Para un resultado más apropiado, es necesario contar con información con adecuada representatividad espacial sobre las actividades desarrolladas en el área bajo estudio. En este trabajo se utilizó una cantidad de encuestas que no cumplen con este requisito. Por otro lado, la falta de datos de la actividad ganadera obligó a excesivas simplificaciones para estimar la lixiviación. En cuanto a la información secundaria (suelo, clima) se utilizaron fuentes con escala de muy poco detalle lo que implicó generalizaciones espaciales que no son adecuadas para realizar cálculos a mayor detalle. En segundo lugar, otro aspecto observable es el tipo de modelo utilizado para la estimación de la lixiviación.

Como todo modelo empírico, se fundamenta en relaciones cuantitativas simples, estadísticas, por lo que lo hace muy limitado en su extrapolación a sitios donde no ha sido testeado experimentalmente. En tercer lugar, es observable también la manipulación de los datos en el SIG. Si bien los procedimientos de análisis espacial conducen a resultados claros desde el punto de vista cartográfico, las simplificaciones realizadas para espacializar la información de áreas en puntos y viceversa inducen y reproducen errores en la definición de límites espaciales de variables de distribución continua sobre territorio, como la tratada en este estudio. No obstante, estos errores pueden ser significativamente menores si se parte con mejores precisiones espaciales con la información de base. Por último, dado la baja densidad de muestras relevadas y la falta de información sobre características del acuífero en cuanto a sus propiedades, dirección y sentido de escurrimiento, velocidades horizontales y características hidroquímicas del mismo, la validez de los

resultados obtenidos deben considerarse parciales y establecer estudios de mayor detalle incorporando este componente en el análisis.

Bibliografía

Abril, A.; Baleani, D.; Casado Murillo, N. and Noe, L. (2007). *Effect of wheat crop fertilization on nitrogen dynamics and balance in the Humid Pampas, Argentina.* Agriculture, Ecosystems & Environment 119 (1-2): 171-176.

Adiscott T. M. (1995). "Modelling the fate of crop nutrients in the environment: problems of scale and complexity". Eur. J. Agron. 4:4, 413-417.

Andriulo A.; Sasal, C. y Portela, C. (2009). *Impacto ambiental de la agricultura pampeana.* IDIA XXI N° 11 80-84.

Andriulo, A.; Ferreyra, C.; Sasal, C.; Galletto, M. L.; Abrego, F.; Bueno, M.; Rimatori, F.; de la Cruz, M.A.; Venencio, M.V. y Giacosa, R. (2000). *Nitratos en el agua subterránea del partido de Pergamino. Efecto a largo plazo de la agricultura continua extensiva y a corto plazo de la producción intensiva de granos.* XIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Argentina.

Blarasin M.; G. Damilano, A. Cabrera y E. Matteoda. (2006). Hidrogeoquímica del acuífero freático en un agroecosistema y consideraciones sobre el cálculo de la línea de base de la calidad del agua. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Paraguay.

Bongiovanni M. y Degioanni A. (2010). Carbono orgánico en suelos con uso agrícola y ganadero del sur de Córdoba. XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Argentina.

Bassam K.; Al-Fares, W. and Rahman Al Charideh, A. (2010). Groundwater vulnerability assessment for the Banyas Catchment of the Syrian coastal area using GIS and the RISKE method. *Journal of Environmental Management*, 91(5) 1103-1110.



- Bosque Sendra, J.** (1995). *Sistemas de Información Geográfica*. Ed. Rial. Madrid.
- Costa, J. L.; Massone, H., Martínez, D.; Sueroa Vidal, E.; Bedmar, F.** (2002). Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agricultural Water Management*, 57(1): 33-47.
- Cherry, K.A.; Shepherd, M.; Withers, P and Mooneya, S.J.** (2008). Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods. *Science of the Total Environment*, 406 1-23.
- Darwich, N.** (2006). *Manual de Fertilidad de Suelos*. 3ra. Ed. Fertilizar Asociación Civil.
- Davey, I.; Besien, T., Evers, S. and Ward, R.** (2005). Agricultural nitrate contamination in groundwater in England and Wales: an overview. Chap. 22. In *Nitrates in groundwater*. Ed. Razowska-Jaworek, L. and Sadurski A. A.A. Balkema Publishers
- Degioanni, A. y Cisneros, J.** (2010). Lixiviación de nitratos en producciones agrícolas y ganaderas. *XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Argentina.
- De Prada, J y Penna** (2007). *Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el sur de Córdoba, Argentina*. UNRC - INTA. Estudios Socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales. N° 08. Ediciones INTA.
- De Willigen, P.** (2000). An analysis of the calculation of leaching and denitrification losses as practised in the NUTMON approach" Report 18. Wageningen, Plant Research International.
- Echeverría, H; Reussi Calvo, N. y García, F.** (2009). "Mejores prácticas de manejo para nitrógeno". García O, e I. Ciampitti Ed. Simposio de Fertilidad. IPNI - Fertilizar.
- Esminger, M. y Olentine. G.** (1983). *Alimentos y nutrición de los animales*. Ed. El Ateneo. Bs. As.
- Ferrari, M.** (2009). *Las MPM para los cultivos y sistemas de producción de Maíz en la región pampeana central*. García, O., y e I. Ciampitti. Ed. Simposio de Fertilidad. IPNI - Fertilizar.
- Gómez M.; Blarasin, M.; Cabrera, A. y Matteoda, E.** (2006). Variaciones de nivel freático y contaminación del acuífero en la zona de Coronel Moldes. Córdoba. *1º Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*. Argentina.
- Guzik, M.; Liszka, P.; Zembal, M. and Pacholewski, A.** (2005). *Nitrate and nitrite in shallow groundwater*. Chap. 15. In *Nitrates in groundwater*. Ed. Razowska-Jaworek L and Sadurski A. Balkema Publishers.
- Herrero, M y Gil, S.** (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral* 18:273-289.
- Matteoda, E.; Blarasin, M.; Damilano, G. y Cabrera, A.** (2008). Contaminación por nitratos en el acuífero freático: análisis del fondo natural y relaciones con las actividades de uso del territorio. *IX Congreso ALHSUD*. Ecuador.
- Paz, J.; Delgado, J.; Ramos, C.; Shaffer, M. and K. Barbarick.** (2009). Use of a new GIS nitrogen index assessment tool for evaluation of nitrate leaching across a Mediterranean region. *Journal of Hydrology*, 365 (3-4) 183-194.
- Pierzynski, G; Thomas Sims, J and Vance, G.** (2005). *Soils and Environmental Quality*. Taylor and Francis Ed.
- Portela, S.; Andriulo, A.; Nasal, M.; Mary, B. and Jobbágy, E.** (2006). "Fertilizer vs. Organic matter contributions to nitrogen leaching in cropping systems of the Pampas." *Plant Soil* 289:265-277
- Roy, R.; Misra; R. Lesschen, J. and Smaling, E.** (2003). "Assessment of soil nutrient balance. *Approaches and methodologies*". FAO Fertilizer and Plant Nutrition. Bulletin 14.
- Sapek, A.** (2005). "Agricultural activities as source of nitrates in groundwater." Chap. 1. In *Nitrates in groundwater*. Ed. Razowska-Jaworek L and Sadurski A. A.A. Balkema Publishers.
- Stockmarr, J. and Nyegaard, P.** (2005). "Nitrate in Danish groundwater" Chap. 19. In *Nitrates in groundwater*. Ed. Razowska-Jaworek L and Sadurski A. A.A. Balkema Publishers.
- Zamora, E.; Gorgas, J. A.; Sanabria, J. y Bustos, V.** (2006). "Mapa de Suelos del sur de Córdoba. Escala 1:250.000." Informe del PICTOR 002 - Bases de un plan estratégico de manejo sustentable de los recursos hídricos.

* Américo Degioanni, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Regionalización paramétrica de curvas de duración de caudales

PATRICIA M. LÓPEZ
 JORGE A. MAZA
 VICTOR H. BURGOS
 ADRIÁN VARGAS ARANIBAR
 LUÍS A. FORNERO
 JORGE BONILLA

Introducción

Para una cuenca la Curva de Duración de Caudales (CDC) representa la relación entre la magnitud y la frecuencia de caudales diarios, semanales, mensuales, etc. permitiendo realizar estimaciones del porcentaje de tiempo en el cual un caudal determinado es igualado o excedido en el período de registro.

La obtención de curvas empíricas es simple si se cuenta con observaciones, pero en muchas regiones las mediciones sistemáticas de caudales son escasas o inexistentes. La necesidad de realizar estimaciones en cuencas sin mediciones o de mejorar las estimaciones realizadas con registros de corta longitud originó el desarrollo de numerosos métodos de regionalización de CDC.

Quimpo *et al.* (1983) y Mimikou y Kaemaki (1985) proponen una metodología que se basa en representar las CDC a través de expresiones analíticas cuyos parámetros se relacionan con características morfológicas y climáticas de las cuencas mediante modelos regionales de regresión, permitiendo

la determinación de las curvas en sitios sin observaciones.

Con el objeto de proveer al Gobierno de la Provincia de Catamarca de una herramienta operativa, la metodología anterior fue aplicada a la región comprendida por las provincias de Catamarca y La Rioja, que actualmente no cuenta con estaciones hidrométricas.

El propósito de este trabajo es presentar los modelos seleccionados y demostrar su desempeño en la estimación de curvas sintéticas en cuencas sin observaciones que verifiquen la condición de homogeneidad regional.

Región estudiada y datos utilizados

En la región comprendida por las provincias de Catamarca (C) y La Rioja (LR) se realizaron observaciones hidrométricas en diferentes períodos comprendidos entre 1917 y 1984.

Del análisis de la información disponible (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2004) se seleccionaron nueve cuencas para realizar la estimación de CDC con series de caudales medios mensuales (CMM). En la Tabla 1 se

	Río	Sitio	Período de observación
(a)	Abaucán	Tinogasta (C)	1919/56
	Belén	Playa Larga (C)	1946/83
	Andalgalá	Andalgalá (C)	1920/60
	Chañarmuyo	Chañarmuyo (LR)	1967/81
	Famatina	Famatina (LR)	1940/81
	Santa María	Pie de Médano (C)	1970/84
	Vinchina	Vinchina (LR)	1966/80
	Del Valle	Pomancillo (C)	1917/59
	Tala	La Reja (C)	1936/60
(b)	Miranda	Miranda (LR)	1967/80
	Durazno	Chilecito (LR)	1940/44-1952/81

Tabla 1. Cuenas utilizadas en el estudio.



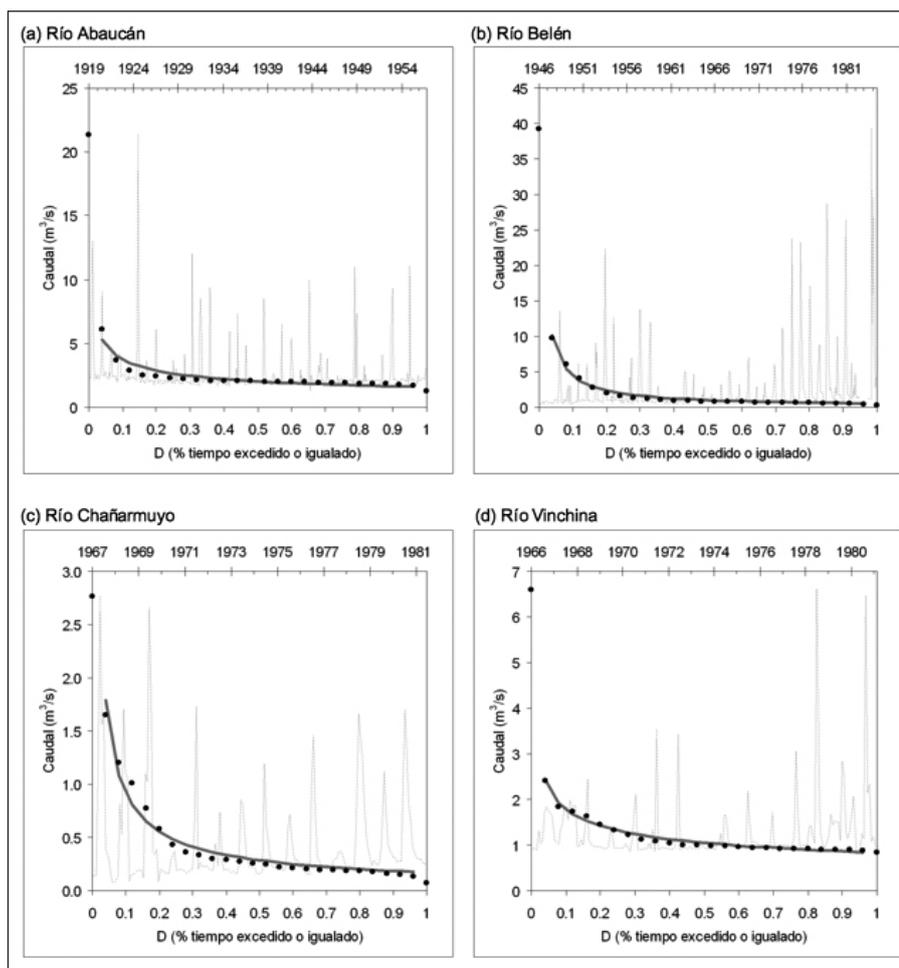


Figura 2. Serie de CMM (línea cortada), CDC observaciones (puntos) y CDC modelo (línea continua).

Cuenca	AREA (km ²)	DH (m)	L (km)	PEND (m/m)	PRIM (km)	IC	A/L (km)	PMA (mm)	Parámetros CDC	
									a	b
Abaucán	15945.5	4532.3	271.0	0.017	891.5	1.977	58.8	246.7	1.555	0.380
Belén	5961.3	3640.7	172.2	0.021	625.3	2.268	34.6	322.8	0.542	0.910
Andalgalá	220.1	4062.6	29.8	0.136	86.2	1.627	7.4	256.1	0.502	0.425
Chañarmuyo	573.0	3395.1	53.6	0.063	167.8	1.962	10.7	281.0	0.172	0.728
Famatina	465.3	4347.8	51.0	0.085	130.7	1.696	9.1	170.1	0.500	0.339
Santa María	4112.6	3128.0	117.2	0.027	525.8	2.296	35.1	234.9	0.743	0.839
Vinchina	7709.8	4734.5	177.5	0.027	635.4	2.026	43.4	124.5	0.836	0.330
Del Valle	1493.4	1948.6	96.9	0.020	289.8	2.100	15.4	569.4	1.502	0.813
Tala	151.4	3606.1	35.6	0.101	86.7	1.973	4.3	550.4	0.170	0.692

Tabla 2. Valores variables explicativas y parámetros.

(AREA), diferencia de cota máxima y mínima (DH), longitud cauce más largo (L), pendiente (PEND), perímetro (PRIM), índice de compacidad (IC) y la relación área/longitud del cauce más largo (A/L).

Estimación de características climáticas y morfológicas

La información pluviométrica examinada se caracterizó por la baja densidad de estaciones, la disparidad de los períodos de registro y sus interrupciones.

Se analizaron precipitaciones mensuales obtenidas del extracto de los

datos publicados en estudios ambientales específicos generados por la Secretaría de Minería de la Nación, en el marco del Programa de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino (<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>).

En las cuencas de los ríos Del Valle y Tala se utilizaron series suministradas por la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de la Provincia de Catamarca correspondientes a un período de observación de precipitaciones más reciente, que no concuerda con el de observación de caudales.

Las series fueron procesadas según el año hidrológico (septiembre-agosto), a fin de obtener valores totales anuales. La baja densidad de estaciones por cuenca no permitió la construcción de mapas de isoyetas, en consecuencia la PMA se calculó como promedio de los valores medios observados.

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se generaron distintos mapas derivados mediante el geoprocésamiento y el análisis espacial con el objetivo de determinar, para cada cuenca estudiada, el área de aporte y cuantificar sus características morfológicas.

Los valores de las variables explicativas y de los parámetros se resumen en la Tabla 2.

La matriz de coeficientes de correlación (Tabla 3) se empleó para seleccionar el conjunto de variables explicativas que mejor representan la relación con los parámetros a y b.

Previsiblemente, la matriz muestra una alta asociación entre las características morfológicas. El alto coeficiente de correlación entre DH y PMA demuestra que la variación de la variable climática con la diferencia de altitudes de las cuencas es importante y su signo indica que la relación es inversa. Esta situación, observada en regiones montañosas tropicales y subtropicales, es descrita en la bibliografía (Barry y Chorley, 1985) y en estudios regionales (<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>).

Se probaron diferentes combinaciones de variables explicativas evitando incluir simultáneamente aquellas que



estuvieran una correlación alta, seleccionándose los siguientes modelos:

$$a = 0.04853 \text{ AREA}^{0.3352} \quad (R^2 = 0.422) \quad (4)$$

$$b = 0.00943 \text{ IC}^{1.9827} \text{ PMA}^{0.4868} \quad (R^2 = 0.698)$$

Si bien los modelos anteriores proporcionaron un mayor coeficiente de determinación (R^2) con parámetros significativos al 95%, se observa que los valores son modestos.

Verificación de los modelos regionales

Con el propósito de verificar el desempeño de los modelos regionales, se estimaron las CDC sintéticas (q) en las cuencas de los ríos Miranda y Durazno (Tabla 1) y se compararon con las curvas estimadas (q) con series de CMM. El ajuste se evaluó con la raíz cuadrada del % de error cuadrático medio (e). Estos valores y los de las variables utilizadas en los modelos regionales se muestran en la Tabla 4, mientras que en la Figura 3 se presentan las curvas estimadas.

Si bien los resultados (Tabla 4 y Figura 3) muestran que los modelos regionales presentan un mejor ajuste para la cuenca del río Durazno, se considera, teniendo en cuenta la baja densidad de estaciones hidrométricas y pluviométricas utilizadas en su determinación, que el desempeño general de los mismos es satisfactorio. Por lo tanto podrían ser usados en la estimación de CDC en cuencas sin observaciones que verifiquen homogeneidad.

Conclusiones

Se desarrolló una metodología paramétrica regional para la estimación de CDC sintéticas en sitios sin observaciones, cuyo objetivo fue proveer al Gobierno de la Provincia de Catamarca de una herramienta operativa.

Actualmente, la región comprendida por las provincias de Catamarca y La Rioja no cuenta con estaciones hidrométricas, sin embargo existen observaciones en diferentes ríos en el período comprendido entre 1917 y 1984.

El análisis de series de caudales medios mensuales observadas en nueve cuencas permitió seleccionar el

	AREA	DH	L	PEND	PRIM	IC	A/L	PMA	a	b
AREA	1.000									
DH	0.130	1.000								
L	0.989	0.092	1.000							
PEND	-0.915	0.254	-0.940	1.000						
PRIM	0.995	0.068	0.988	-0.936	1.000					
IC	0.610	-0.410	0.638	-0.760	0.687	1.000				
A/L	0.992	0.161	0.961	-0.878	0.983	0.576	1.000			
PMA	-0.365	-0.722	-0.276	0.020	-0.305	0.239	-0.435	1.000		
a	0.703	-0.156	0.691	-0.723	0.672	0.213	0.701	-0.175	1.000	
b	-0.057	-0.728	-0.029	-0.223	0.034	0.683	-0.081	0.702	-0.230	1.000

Tabla 3. Matriz de coeficientes de correlación.

Río	Variables explicativas	Medida ajuste		
	AREA (km ²)	IC	PMA (mm)	e (%)
Miranda	270.7	2.034	256.7	38
Durazno	374.5	1.945	283.9	12

Tabla 4. Valores estimación y ajuste

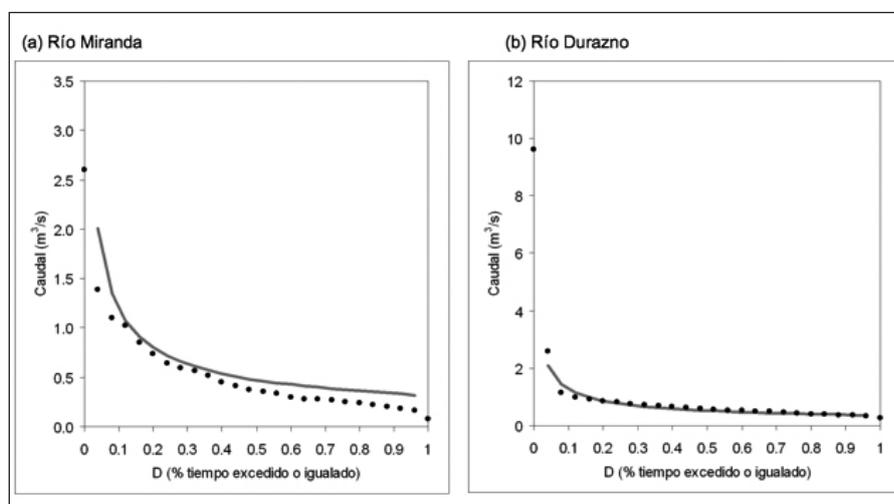


Figura 3. CDC estimada con observaciones (puntos) y modelo (línea continua).

modelo matemático que mejor describe las CDC de la región. Los parámetros de este modelo se relacionaron con características morfológicas y climáticas de las cuencas mediante modelos regionales de regresión.

La variable climática utilizada, precipitación media anual, fue estimada con la información pluviométrica disponible, caracterizada por la baja densidad de estaciones, la disparidad de los períodos de registro y sus

interrupciones. El número de estaciones hidrométricas empleado en este estudio es bajo y esta situación condicionó la estructura de los modelos de regresión, que fueron diseñados de forma tal de emplear el menor número posible de variables explicativas para evitar una pérdida excesiva de grados de libertad.

Pese a las dificultades mencionadas, la evaluación del desempeño de los modelos regionales de regresión

muestra que pueden ser aplicados para obtener curvas sintéticas en cuencas sin observaciones que verifiquen la homogeneidad regional.

La instalación de estaciones hidrométricas en la región, prevista por la Subsecretaría de Recursos Hídricos en el programa de Ampliación y Mejoramiento de la Red Hidrológica Nacional, proveerá información que podrá utilizarse para realizar una nueva estimación de los modelos presentados a fin de mejorar su desempeño.

Agradecimientos

Se agradece a la Dirección de Hidrología y Evaluación de Recursos Hídricos de la Provincia de Catamarca por el suministro de información para la realización de este trabajo y por permitir la difusión de sus resultados.

Bibliografía

Barry, R. G. y Chorley, R. J. (1985). *Atmósfera, tiempo y clima*. Ediciones Omega S.A. Barcelona.

Birsan, M. V.; Molnar, P.; Burlando, P. y Pfaundler, M. (2005). Streamflow Trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*. Vol. 314, pp. 312-329.

Hamed, K. H. y A. R. Rao (1998). A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*. Vol. 204, pp. 182-196.

Mimikou M. y Kaemaki S. (1985). Regionalization of Flow Duration Characteristic". *Journal of Hydrology*. Vol. 82, pp. 77-91.

Minetti, J. L.; Vargas, W. M.; Poblete, A. G.; Acuña, L.R. y Casagrande, G. (2003) Non-linear Trends and Low Frequency Oscillations in Annual Precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera*. Vol. 16, pp. 119-135.

Quimpo, R. G.; Alejandrino, A. A y McNally, T. A. (1983) Regionalised Flow Duration Curves for Philippines". *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*. Vol. 109, N° 4, pp. 320-330.

Secretaría de Minería de la Nación. *Inventario de Recursos Naturales* [en línea]. Disponible en: <<http://www.mineria.gov.ar/estudios/inicioIRN.asp>>. [Consulta: 27-08-2009].

Seoane, R. S.; López, P. M.; Moyano, M. C.; Tomazin, N. y Koutsovitis, M. E. (2005). "Análisis estadístico de series hidrológicas en la cuenca del río Limay Argentina".

Libro de Resúmenes del XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, pp. 334 y en CD (ISBN 987-22143-0-1).

Subsecretaría de Recursos Hídricos (2004). *Estadística Hidrológica de la República Argentina*. [CD-ROM]. 3-3.

Westmacott, J. R. y Burn, D. H. (1997). Climate changes Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*. Vol. 202, pp. 263-279.

Yue, S.; Pilon, B. y Phinney, B. (2002). The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series. *Hydrological Processes*. Vol. 16, pp. 1807-1829.

Yue, S.; Pilon, B. y Phinney, B. (2003). Canadian Streamflow Trend Detection: Impacts of Serial and Cross-correlation. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 48, N° 1, pp. 51-63.

* Patricia M. López, Jorge A. Maza, Victor H. Burgos, Adrián Vargas Aranibar, Luís A. Fornero, Jorge Bonilla.
Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino.



Transferencia de sedimentos de una microcuenca de Resistencia a la red de drenaje

GUILLERMO MÉNDEZ
CARLOS DEPETTRIS
OSCAR ORFEO
ALEJANDRO RUBERTO
JORGE V. PILAR

Introducción

Los principales agentes dinámicos externos de erosión son el agua, el viento, la gravedad, el hielo, agentes biológicos y, también, la acción humana. Ellos pueden actuar separadamente o combinados (Carvalho, 1994). En un ambiente natural, los procesos de erosión hídrica se inician tras el impacto de las gotas de lluvia sobre el terreno, provocando la separación de las partículas constituyentes del suelo y el lavado de este último, removiendo así la camada superficial. Estando una partícula suelta, puede ser transportada por la escorrentía hacia los cursos de agua, o introducirse en los surcos del terreno.

La acción antrópica puede acentuar los procesos erosivos. En zonas urbanas, las principales causantes de pérdidas de suelo son las que se citan a continuación (Almeida, 2008):

- implantación de ciudades en terrenos arenosos, con relieve ondulado y pendiente acentuada, sin planeamiento adecuado;
- retiro del suelo vegetal y construcción de edificaciones, causando la disminución del tiempo de concentración y el aumento del escurrimiento superficial,
- falta de pavimentación y trazado hidráulicamente deficiente de calles y sistemas de drenaje.

Dada la complejidad del proceso de erosión urbana es difícil identificar las fuentes de generación de sedimentos. En efecto, el ambiente urbano crea

una gran y compleja mezcla de sedimentos que pueden ser provenientes de las cercanías, o bien ser importados de otras áreas próximas, o inclusive lejanas. Además, los materiales de construcciones civiles son fuentes importantes de sedimentos urbanos: estudios demostraron que altas concentraciones de calcio en lagos son debidas a este tipo de sedimento (Poletto *et al.*, 2008).

Los sedimentos se acumulan en las calles, independientemente del tipo de uso del terreno, principalmente junto al cordón: se estima que 80% de los sedimentos se depositan a 15cm del mismo, mientras que 95% en una faja de 1m de ancho junto al mismo (Novotny y Chesters, 1981; *apud* Porto, 2001).

La escorrentía genera fuerzas que pueden provocar el arrastre de sedimentos acumulados en calles y zonas con suelo desprotegido, y los transportan a los conductos del sistema menor del drenaje urbano, de forma tal que la carga de lavado del efluente pluvial está constituida, no sólo de partículas de suelo de la cuenca, sino que también puede incluir sedimentos importados de áreas próximas.

A diferencia de las cuencas rurales, los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son exigüos. Este hecho no se debe solamente a la complejidad del fenómeno en sí, sino especialmente a su variabilidad (Ramos, 1995). Usualmente la carga de sedimentos está relacionada con el volumen de escorrentía que depende

directamente de la impermeabilidad, estudios realizados en los Estados Unidos, en zonas urbanas de 1016 mm anuales de precipitación, indican que las cuencas comerciales presentan una carga de sedimento anual 2,28 veces superiores a una cuenca residencial (Tabla 1), esto se debe a que en Estados Unidos las zonas comerciales presentan áreas impermeables mayores a las residenciales (EPA, 1983).

Estudios realizados en una cuenca del centro de la ciudad de Rosario – Argentina de 11 ha indicaron que una precipitación de 45mm, con intensidades máximas de 35 mm/h generó 301,3 kg (Baud, 2002).

Luego del lavado, los sedimentos, principalmente en cuencas de escasa pendiente, pueden generar depósitos que obstruyan los conductos del sistema menor, además de aumentar la turbidez del agua escurrida, lo que modificará el lecho del cuerpo receptor reduciendo su capacidad de flujo (aumento de la rugosidad) y pudiendo, además, afectar la vida acuática de este. Además, la fracción más fina de los sedimentos es susceptible de transportar contaminantes adsorbidos, tales como metales pesados, amoníaco, fertilizantes, pesticidas y policlorobifenilos (PCBs), entre otros. (Porto, 2001).

La ciudad de Resistencia, capital de la provincia del Chaco, no escapa a esta problemática. En efecto, en el sector sur de esta ciudad, donde los efluentes pluviales son transportados por conductos cerrados y cuneteros hacia el canal de la Av. Soberanía, el sistema

Uso	Residencial	Comercial	Urbano en general
Coefficiente de Escorrentía	0,3	0,8	0,35
Sólidos Suspendidos Totales (kg/ha.año)	550	1460	640

Tabla 1. Cargas de sedimentos anuales transportada por la escorrentía urbana.

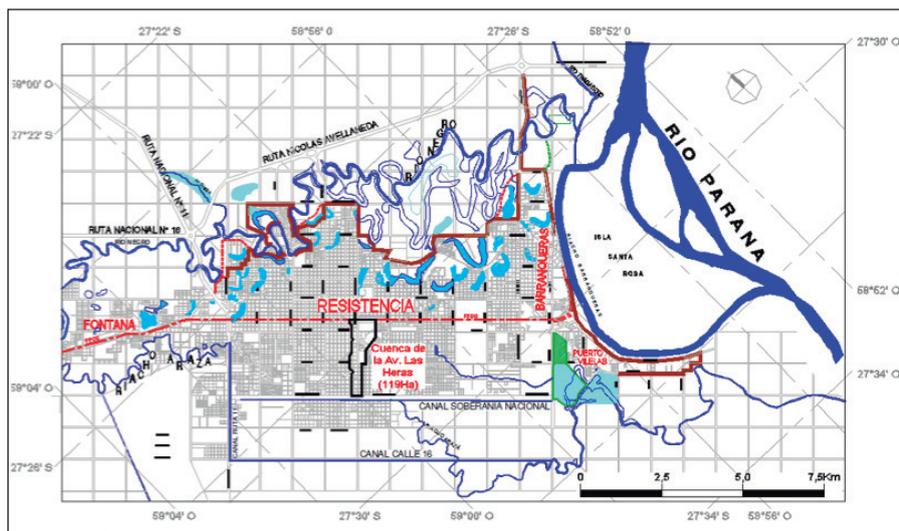


Figura 1. Ubicación de la cuenca de Av. Las Heras.

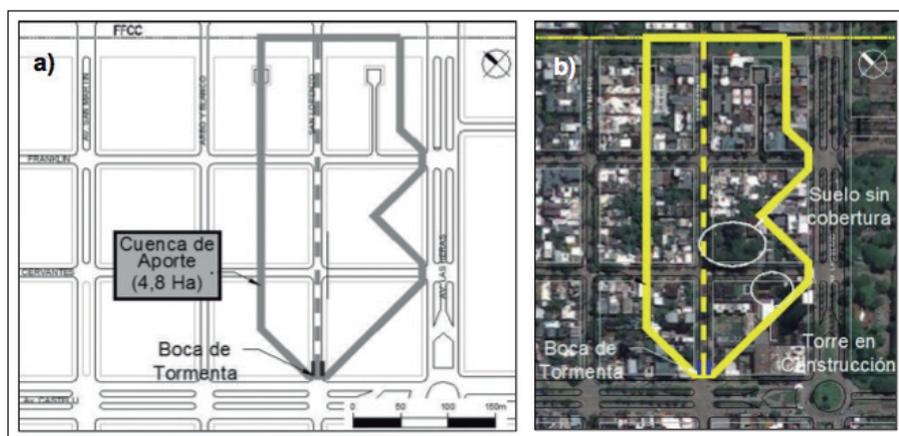


Figura 2. Microcuenca de los sumideros de la calle San Lorenzo y Av. Castelli. a) Área de Aporte. b) Imagen Satelital.

Concepto	Margen Derecha	Margen Izquierda	Total				
			[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]
Área Permeable		0.293	14	0.464	17	0.757	16
Área Impermeable		1.7290	86	2.2780	83	4.007	84
Área Total		2.02	100	2.74	100	4.764	100

Tabla 2. Distribución de áreas de la microcuenca de estudio.

presenta deposición de sedimentos en los conductos y en el mencionado canal, generando la reducción en su capacidad de flujo.

En este artículo son investigados tres aspectos importantes: (1) la tasa anual de sedimento que genera una microcuenca del sector sur de la ciudad de Resistencia durante los 3 años que duró el presente estudio, (2) qué precipitaciones son las que generan mayores valores de carga de sedimento, y (3) cómo afectan las condiciones hidrológicas antecedentes de la cuenca en la carga de lavado del efluente

pluvial. Un mejor entendimiento de estos aspectos será un subsidio importante que ayudará a conocer la calidad de la escorrentía urbana y propiciará un mejor diseño de sistemas de drenaje en áreas de llanura.

Este estudio fue realizado por el grupo de investigación del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), con la colaboración de investigadores del Centro de Ecología del Litoral –CECOAL–, CONICET, en el marco del proyecto de “Hidrología Urbana del Nordeste Argentino”,

financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

Área de estudio

Se adoptó como área de estudio la microcuenca que descarga a los sumideros ubicados en la calle San Lorenzo de la ciudad de Resistencia, Chaco, aguas arriba de su intersección con la Av. Castelli (Figura 2). La elección de la misma respondió a una serie de factores: (I) presenta facilidad de acceso y supervisión; (II) constituye un área de aporte cerrada; (III) permite mediciones de flujo en calzada; (IV) presenta reducido estacionamiento de vehículos sobre la zona de medición; y (v) las bocas de tormenta son representativas a las usadas en la región y están ubicadas en tramos rectos.

Esta microcuenca presenta un uso de tipo residencial y pertenece a la cuenca de la Avenida Las Heras. Su superficie total es de 119 ha, presenta pendiente muy baja ($< 0,1\%$) y descarga mediante conductos cerrados y abiertos al canal de Av. Soberanía Nacional (Figura 1), emisario receptor y conductor de todas las descargas de dicho sector de la ciudad (CFI - AFIN, 1995).

Los sumideros a los que aporta la cuenca de estudio están ubicados sobre las márgenes derecha e izquierda de la calle San Lorenzo (Depettris *et al.*, 2009). Considerando al eje de dicha calle como divisoria de aguas, puede asumirse que a esos sumideros descargan dos cuencas bien diferenciadas. La cuenca de la margen izquierda, en la que se construyeron tres edificios en torre durante la etapa de recolección de datos de campo (Figura 2.b), presenta mayor grado de impermeabilidad que la opuesta (Tabla 2; Depettris *et al.*, 2009).

Materiales y Métodos

Periodo de análisis:

El periodo de análisis correspondió a los años hidrológicos 2007/08, 2008/09 y 2009/10. En la región, los años hidrológicos se inician en el mes de septiembre y finalizan en el mes de agosto del año calendario siguiente. La ciudad de Resistencia presenta una precipitación anual media de 1350 mm



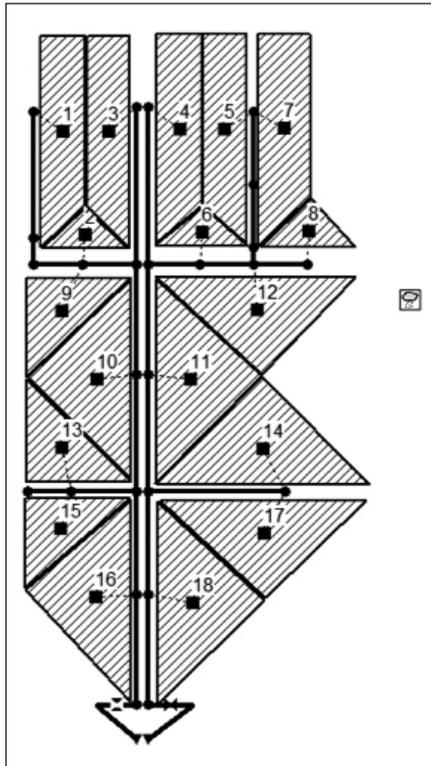


Figura 3. Modelo utilizado para analizar la microcuenca de la calle San Lorenzo.

(APA-AFIN, 2001), en tanto que la precipitación diaria máxima media anual es de 116,8 mm (Mendez *et al*, 2009). Los dos primeros años de análisis coincidieron con un periodo seco, con precipitaciones anuales por debajo de la media (Tabla 3), en tanto que en el último año esta situación se revirtió a partir de noviembre del 2010, cuando precipitan 351 mm en 7 días, evento que se estima tiene un tiempo de recurrencia de 20 años (Mendez *et al.*, 2010 a).

Determinación de caudales líquidos:

La determinación de los caudales líquidos se realizó mediante la utilización de un modelo de transformación lluvia – escorrentía, utilizando el programa SWMM (Stormwater Management Model), versión 5.0, de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos.

El SWMM se puede utilizar para un único evento de precipitación o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular, tanto la cantidad, como la calidad del agua evacuada, especialmente en drenaje urbano (James y James, 2001).

Año	Panual [mm]	Tiempo de Recurrencia [años]	Pmax [mm]	Fecha	Tiempo de Recurrencia [años]
2007/2008	870	0,9	82.5	27/12/2007	1.2
2008/2009	935	0,9	86.5	05/02/2009	1.3
2009/2010	1347.3	2,3	155	19/01/2010	6.6

Tabla 3. Precipitaciones anuales y máximas diarias anuales del periodo de análisis y sus correspondientes tiempos de recurrencia de excedencia.

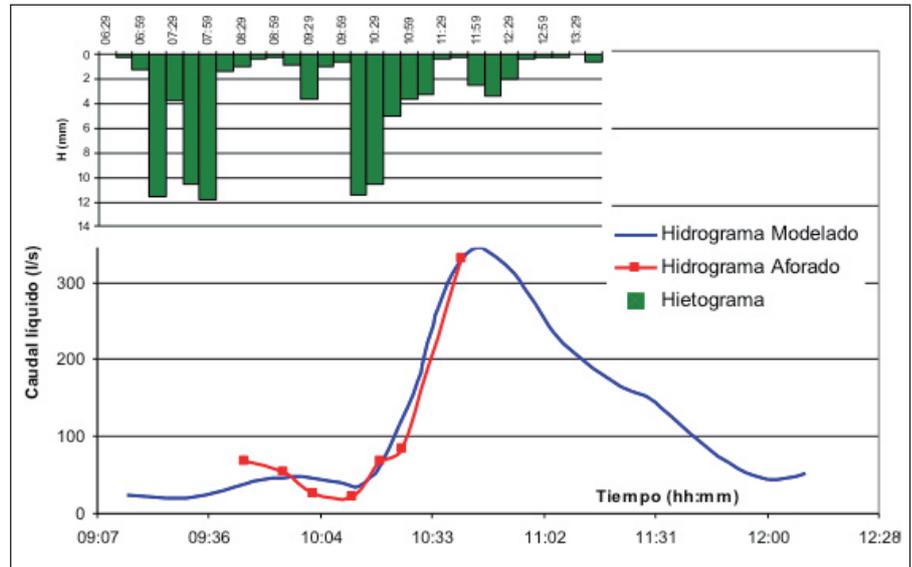


Figura 4. Histogramas e Hidrogramas del evento del 20/11/2009.

Se realizó una modelación continua durante los 3 años hidrológicos del período de análisis. Se utilizaron datos de precipitación registrados cada 15 minutos y de evaporación diaria. Los datos de precipitación del año 2009/10 son los registrados por el pluviógrafo de la Administración Provincial del Agua - Chaco, instalado en cercanías a la laguna “Los Lirios”, ubicada a unos 2 km al este de la microcuenca estudiada. La estación “Los Lirios” presenta registros incompletos durante los años 2007/08 y 2008/09, por lo que se utilizaron los datos del pluviógrafo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Colonia Benítez, ubicado a 15 km al norte de la microcuenca. Los datos de evaporación fueron los registrados en el tanque de la Estación Meteorológica de Capacitación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, ubicada a 300 m de la microcuenca.

Se dividió al área de estudio en 18 subcuencas que aportan a las respectivas calles, que son consideradas como conductos de sección irregular (Figura 3). Como se analizaron por separado

las cuencas de margen izquierda y las de margen derecha, se consideró a la calle San Lorenzo como si fuesen dos conductos seccionados a partir de su eje central.

Para la calibración de los parámetros se utilizaron 5 aforos, correspondientes a las precipitaciones de los días 14/10/2009, 06/11/2009, 20/11/2009, 08/02/2010 y 22/02/2010, detalladas por Mendez *et al* (2010 b). Para realizar los aforos de caudales se utilizaron las escalas hidrométricas materializadas sobre la calzada a los efectos de este estudio (Depettris *et al.*, 2009). La conversión del ancho mojado en la sección de control a caudales se realizó a través de la fórmula de Manning, adoptando 0,013 como valor de rugosidad para el hormigón (Chow, 1983).

Se logró un ajuste adecuado del modelo para caudales extremos, tal el caso de la precipitación del 20/11/2009. El ajuste de ese evento (Figura 4) se realizó considerando a ambas cuencas trabajando en conjunto, teniendo en cuenta que durante el mismo se registraron tirantes de agua que superaron el parteaguas de la calle San Lorenzo.

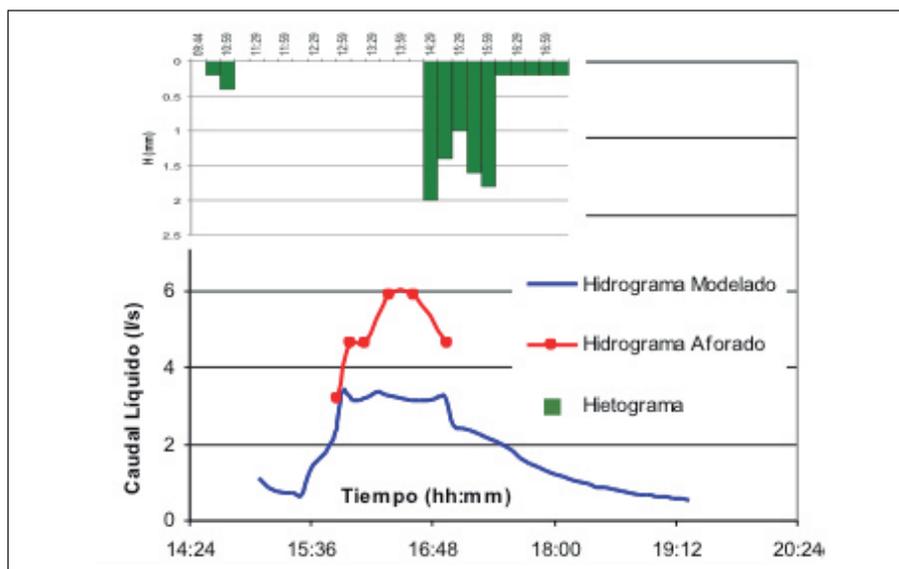


Figura 5a. Histogramas e Hidrogramas de la cuenca del margen derecho del evento del 08/02/2010.

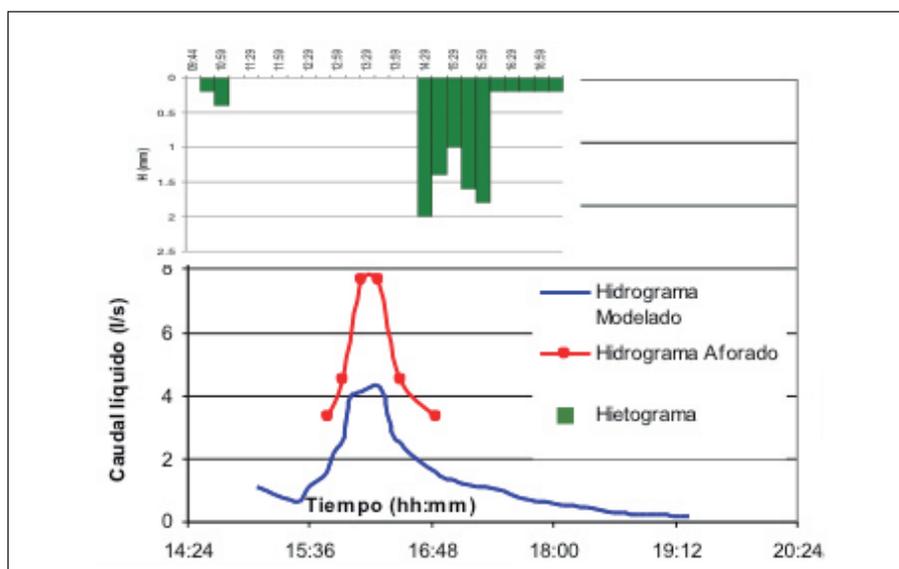


Figura 5b. Histogramas e Hidrogramas de la cuenca del margen izquierdo del evento del 08/02/2010.

Para caudales bajos el modelo arrojó valores menores que los aforados; tal el caso de la precipitación del 08/02/2010 (Figura 5a y 5b). Es importante indicar que la metodología utilizada para la medición de los caudales líquidos es imprecisa para caudales menores a 10 l/s, especialmente por la variabilidad que presenta el ancho de escurrimiento en una sección con muy bajos tirantes y flujo marcadamente subcrítico.

Determinación de la carga de sedimentos:

La carga de sedimentos transportada en cada precipitación se obtuvo mediante dos curvas de regresión, una correspondiente a la cuenca de margen

izquierdo y la otra a la de margen derecho. Las variables predictoras utilizadas fueron: (1) el caudal líquido del escurrimiento y (2) la precipitación antecedente de 42 días al evento.

La utilización de estas variables se justifica en que la remoción de contaminantes en una cuenca urbana depende del volumen de escurrimiento directa, o sea, la precipitación efectiva. Por ello, la cantidad de contaminantes posibles de ser transportados en una lluvia depende de los escurrimientos generados precedentemente. Dada la dificultad en obtener la precipitación efectiva y considerando que las variables predictoras deben ser fácilmente medibles, se optó por utilizar la precipitación total

antecedente, que está directamente relacionada a la primera.

Porto (2001) sugiere que la concentración media del evento puede ser obtenida utilizando la ecuación 1:

$$CME = \frac{\sum Qi \cdot Ci}{\sum Qi} \quad (1)$$

siendo:

CME: concentración media del evento,
 Q_i : caudal líquido,
 C_i : concentración de sólidos suspendidos.

Para la microcuenca de estudio se encontró una buena correlación entre la precipitación antecedente de 42 días con el CME del evento (Figura 6).

Se consideró que la relación lineal entre el caudal líquido y el sólido representa razonablemente la correlación de valores, lo que coincide con lo presentado por Vanonni (1975) *apud* James y James (2001).

El ajuste de las curvas de regresión se realizó a partir de 89 muestras del agua de escurrimiento en la calzada, que fueron analizadas en laboratorio para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos; la misma se realizó a través de filtrado, empleando discos de acetato de celulosa de 0,45 μm de porosidad. La descarga sólida se obtuvo relacionando el caudal líquido y la concentración de sólidos suspendidos (Mendez *et al*, 2010 b). Se trazaron las curvas de regresión para las cuencas de margen izquierdo y derecho (ecuaciones 2 y 3, respectivamente).

$$Q_s = 2,62 + 0,325 \cdot Q - 0,0163 \cdot P_{A42d} \quad (2)$$

$$Q_s = 1,53 + 0,277 \cdot Q - 0,00758 \cdot P_{A42d} \quad (3)$$

en las que:

Q_s : carga de sedimento (g/l),

Q : caudal líquido (l/s),

P_{A42d} : Precipitación antecedente de 42 días (mm).

El ajuste mostrado por las ecuaciones 2 y 3 fue aceptable y el valor de "p" de



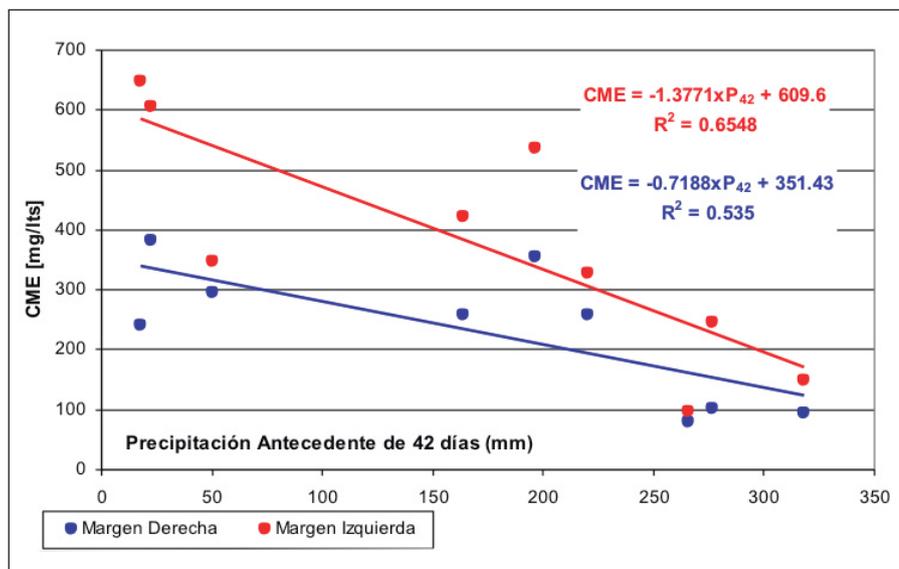


Figura 6. Variación del CME con respecto a la precipitación antecedente de los últimos 42 días.

Margen	R ²	Variable	Valor de p
Izquierda	95.5%	Q	0,000
		P _{A42d}	0,005
Derecha	99,1	Q	0,000
		P _{A42d}	0,000

Tabla 4. Ajuste de las ecuaciones de regresión de las cuenca de margen izquierda y derecha.

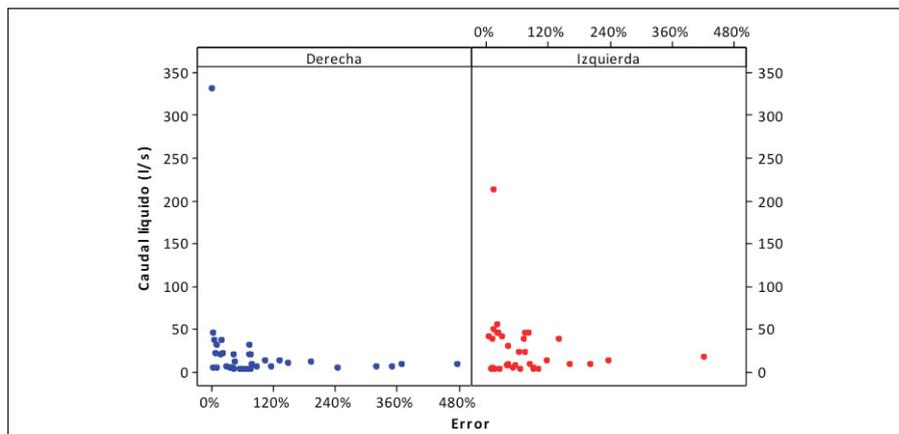


Figura 7. Gráfica de dispersión Caudal líquido versus error porcentual.

las distintas variables explicativas indica que éstas son significativas, según los datos disponibles. En la Tabla 4 se indican los valores de R² y valores de p de las variables explicativas del modelo.

Se consideran válidas las ecuaciones planteadas para valores de caudal líquido mayores a 1 l/s, para los cuales la carga de sedimentos es prácticamente despreciable. Para caudales

líquidos inferiores a 1 l/s es posible una relación del tipo exponencial entre los caudales líquidos y los sólidos, apartándose de la relación lineal planteada en las ecuaciones 2 y 3.

Los caudales sólidos, obtenidos mediante la metodología detallada, han presentado diferencias medias ponderadas respecto a los valores medidos de 21,38% y 45,43% para las cuencas de

margen derecho e izquierdo, respectivamente. Estos errores en los resultados son debidos a las deficiencias del modelo hidrológico para simular valores de caudales líquidos bajos, tal como puede apreciarse en la gráfica de la Figura 7, que muestra el caudal líquido versus error porcentual.

Resultados

Tasa anual de sedimentos

Con los datos de precipitaciones y de evaporación se obtuvieron los caudales líquidos generados por la microcuenca para los años 2007/08, 2008/09 y 2009/10. Posteriormente, se determinó, a partir de las curvas de regresión (Ecuaciones 2 y 3), la carga de sedimentos (caudal sólido) transportados por la escorrentía urbana para todo el horizonte de análisis.

Los resultados de la modelación indican que las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen izquierdo han sido superiores a las del margen derecho. Sin embargo, las tasas de sedimentos anuales, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, indican valores levemente superiores de la cuenca del margen derecho respecto del izquierdo, para los tres años de análisis (Tabla 5). Por esto se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas de anuales de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar caudales líquidos y por tanto mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Condiciones antecedentes:

De la observación de la Figuras 8, 9, 10 y 11 es posible constatar que las mayores cargas de sedimento se registran en el periodo de septiembre a diciembre de cada año. En efecto, en estos meses se inicia el periodo húmedo, por lo que se presentan dos condicionantes que propician la generación y transporte de sedimentos: el escurrimiento de caudales líquidos altos y precipitaciones antecedentes escasas. En esta época se produce el lavado de la cuenca, generando el 60% del sedimento transportado en el año (Tabla 6).

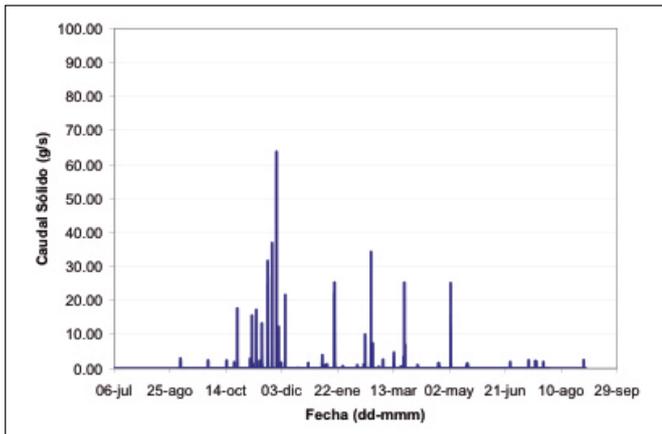


Figura 8. Caudales sólidos - Margen derecha - 2009/10.

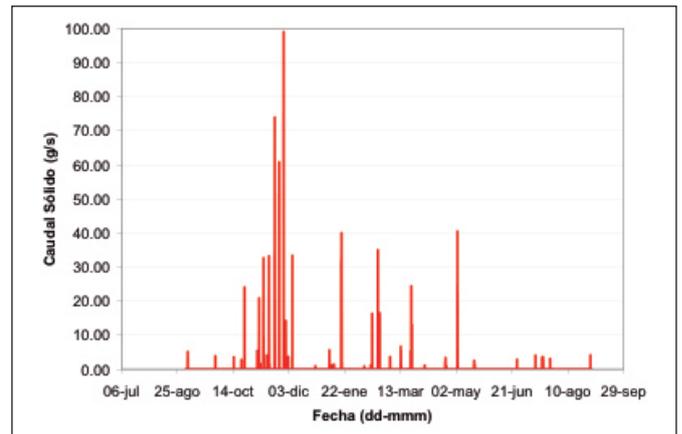


Figura 9. Caudales sólidos - Margen izquierda - 2009/10.

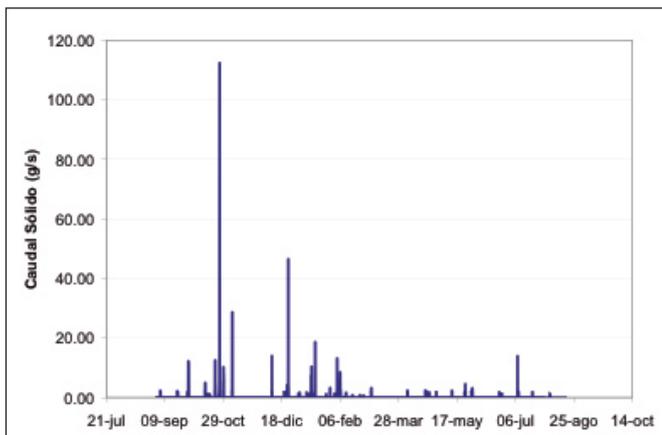


Figura 10. Caudales sólidos -Margen Derecha- 2008/09.

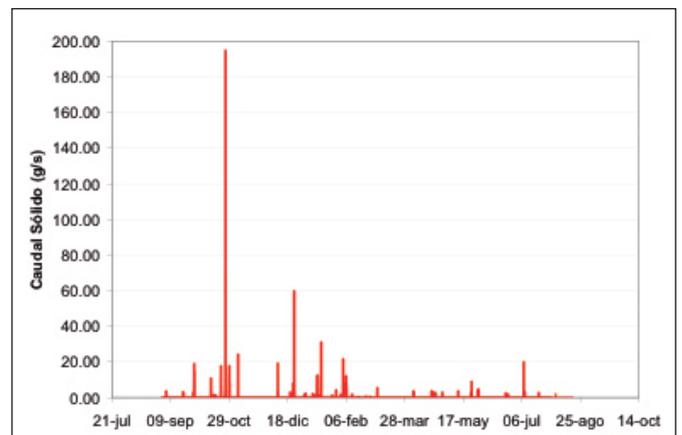
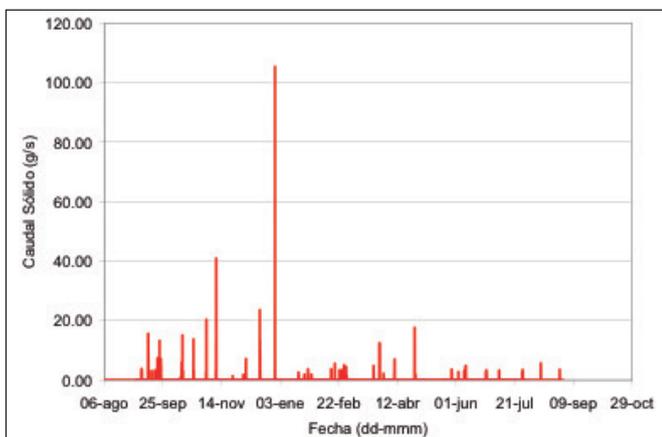


Figura 11. Caudales sólidos - margen izquierda - 2008/09.



Margen	Área [ha]	Área Permeable [ha]	Carga de Sedimentos Anual 2007/08 [tn]	Tasa de Sedimentos				
				2008/09 [tn]	2009/10 [tn]	2007/08 [tn/ha]	2008/09 [tn/ha]	2009/10 [tn/ha]
Derecha	2.03	12%	1.75	2.26	2.98	0.86	1.12	1.47
Izquierda	2.96	16%	2.16	2.98	4.17	0.73	1.01	1.41
Total	4.99	14%	3.91	5.24	7.16	0.78	1.05	1.43

Tabla 5. Carga de sedimentos anuales.

Año	Derecho	Izquierdo
2007/08	62%	66%
2008/09	58%	60%
2009/10	58%	55%

Tabla 6. Porcentaje de Sedimento transportado durante septiembre a diciembre.

Eventos máximos:

Los eventos que transportaron mayor cantidad de sedimento por año se detallan en la Tabla 7. Se destaca que un solo evento puede transportar, por el escurrimiento superficial, más del 20% del sedimento transportado en todo el año.

Conclusiones y Recomendaciones

Se han obtenidos resultados de la carga sólida de sedimentos a lo largo de los años hidrológicos 2007/08,

2008/09 y 2009/10 para una microcuenca del sector sur de Resistencia, utilizando el modelo SWMM y curvas de regresión de la relación entre la descarga líquida y la sólida. Los resultados de caudal sólido, obtenidos mediante la metodología detallada, han presentado diferencias respecto a los valores medidos, las que serían atribuibles a las deficiencias del modelo hidrológico simular valores bajos de caudales líquidos.

Cabe destacar que la metodología planteada se ajustó a condiciones de uso residencial de la microcuenca, sin considerarse alteraciones en el uso del suelo producidas durante la construcción de obras civiles.

Las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen derecho oscilaron entre 1,75 tn y 2,26 tn, en tanto que para la cuenca de margen izquierdo los resultados mostraron valores que van de 2,16 tn a 4,17 tn. Las



Margen	Fecha	Precipitación antecedente de 42 días	Volumen de Escorrentamiento del Evento	Caudal Pico	Carga de Sedimentos del Evento	Respecto al total erogado en el año
	[dd/mm/aaaa]	[mm]	[m ³]	[l/s]	[Tn]	[%]
Derecha	29/12/2007	101	488	211.04	0.14	8%
	25/10/2008	262	2418	404.36	0.49	22%
	28/11/2009	418	1527	317.28	0.39	13%
Izquierda	29/12/2007	101	744	324.33	0.24	11%
	25/10/2008	262	1812	598.73	0.76	25%
	28/11/2009	418	1527	235.95	0.53	13%

Tabla 7. Cargas de Sedimentos máximas generadas en un evento.

tasas de sedimentos anuales de ambas cuencas, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, son similares para los tres años de análisis, presentando valores que van de 0.8tn/ha a 1,40 tn/ha.

Se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas de anuales de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar caudales líquidos y por tanto mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Las mayores cargas de sedimento se registraron en el periodo de septiembre a diciembre de cada año, período en el que se transporta el 60% del total anual. Se destaca que un solo evento puede transportar, por el escurrimiento superficial, más del 20% del sedimento transportado en todo el año.

Bibliografía

Almeida, G. S. (h). (2008). *Ambiente Sedimentos*. Associacao Brasileira de Recursos Hídricos. Cap. 2, pp. 39-62. Porto Alegre, Brasil.

APA - AFIN (2001) *Línea de ribera de las gunas ubicadas en el sistema Hídrico del río Negro*. Informe final. Resistencia, Argentina.

Baud, L. (2002). *Caracterización del escurrimiento pluvial en cuencas urbanas*. Trabajo de Investigación del Carrera de Posgrado de Especialización en Ingeniería Sanitaria - Universidad de Rosario. Rosario, Argentina.

Carvalho N.O. (1994) *"Hidrossedimentología Práctica"*. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. pp. 372. Rio de Janeiro, Brasil.

Chow V.T. (1983). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Editorial Diana. México D.F., México

Consejo Federal de Inversiones, Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería de la UNNE. (1995). *Estudio de los desagües pluviales del sector sur de Resistencia*. Resistencia. Argentina.

Depettris, C.A.; Kutnich, E.J.; Ruberto, A.R. (2009). *Hidrología urbana: instrumentación y evaluación del escurrimiento superficial en una microcuenca de Resistencia, Chaco. XXII Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Argentina.

Environmental Protection Agency (1983). *Results of the Nationwide Urban Runoff Program*. Vol. I. pp. 6-64. Washington DC, Estados Unidos.

James, W., James, R.C. (2001). *Water Systems models - Hidrology - User's guide SWMM4 Runoff an supporting modul*. Editado por Computational Hydraulics International (CHI). Ontario, Canada.

Mendez, G.J.; Depettris, C.A.; Orfeo, O.; Ruberto, A.R.; Pilar, J.V. (2010 b) *Curva Clave de Sedimentos de una Microcuenca en Resistencia, Chaco, Argentina. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Punta del Este, Uruguay.

Mendez, G. J.; Ruberto, A. R.; Pilar, J. V. (2009). *Regionalización de Precipitaciones para las Provincias de Chaco, Formosa y Santiago del Estero. Congreso Nacional del Agua*, Trelew, Chubut.

Mendez, G.J.; Ruberto, A.R.; Pilar, J.V.; Depettris, C.A. (2010 a). *Regionalización de Precipitaciones Máximas Acumuladas de 7, 15 y 30 días para las Provincias de Chaco y Formosa". I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. Azul, Argentina.

Novotny, V. y Chesters, G. (1981). *Handbook of Non-point Pollutio: Source and Management*, Van Nostrand Reinhold. New York, Estados Unidos.

Poleto, C. y Zuleica, C. C. (2008). *Ambiente Sedimentos*. Cap. 6, pp. 193-227. Associacao Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, Brasil.

Porto, M. F. A. (2001). *Urban drainage in Specific Climate*. UNESCO - Technical Documents in Hydrology. Vol. I, N°40, Cap 4, pp 103-124. Paris, Francia.

Ramos, C. (1995). *Drenagem Urbana*. Editora de la UFRGS. Cap.6, pp. 249-250. Porto Alegre, Brasil.

Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering*. Ed. ASCE, Nueva York, Estados Unidos.

* Guillermo Méndez; Carlos Alberto Depettris; Oscar Orfeo; Alejandro Ruberto, Jorge; Víctor Pilar, Jorge Victor.

1 Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNNE

2 Centro de Ecología Aplicada del Litoral.

Depósitos sedimentarios modernos y antiguos del Río Paraná (Corrientes, Argentina): un análisis comparativo

OSCAR ORFEO
SERGIO M. GEORGIEFF
KARINA B. ANÍS
GUSTAVO E. RIZO

Introducción

El río Paraná integra una cuenca de 2 600 000 km² de superficie, la mayor parte de la cual se distribuye entre Brasil y Argentina. El canal de escurrimiento tiene una longitud de 4 000 km y un caudal medio anual frente a la ciudad de Corrientes igual a 17.000 m³ s⁻¹ que permite exportar aproximadamente 150 000 000 tn de sedimentos por año. Por ello el Paraná se encuentra entre los tres ríos más importantes de Sudamérica y entre los diez más destacados del mundo. En Argentina este río constituye el límite entre las provincias geológicas Mesopotamia y Llanura Chaco-Pampeana, donde sus depósitos antiguos y actuales tienen amplio desarrollo espacial y son claramente reconocidos en diversos sectores tanto en superficie como en subsuelo.

Los sedimentos depositados por el río Paraná a partir del Plioceno hasta la actualidad (Iriondo, 1991) integran la Formación Ituzaingó (De Alba, 1953). En la provincia de Corrientes puede observarse sobre la margen izquierda de dicho curso desde unos 30 km al este de la ciudad de Ituzaingó (Figura 1) hasta el límite con la provincia de Entre Ríos, donde continúa. Aflora asimismo en lomas elongadas con orientación NE-SW ubicadas en la porción septentrional de la provincia de Corrientes, como también en barrancas de ríos y arroyos. Los depósitos modernos del Paraná pueden apreciarse en las numerosas islas y barras que ocupan el 35% de la superficie del canal principal (Orfeo, 1996).

La confrontación de sedimentos depositados por un mismo agente de transporte fluvial en diferentes momentos de su historia geológica permite evaluar cambios sucedidos en los factores que condicionan su régimen hidrosedimentológico, y con ello

considerar potenciales analogías entre ambos que permitan mejorar la percepción evolutiva de la cuenca.

El objeto de este trabajo consiste en realizar comparaciones entre los procesos de erosión, transporte y sedimentación en ambientes antiguos y actuales análogos del río Paraná, a fin de validar escenarios paleoambientales y tendencias evolutivas propuestas en estudios previos.

Como área representativa para realizar dichas comparaciones se seleccionó un tramo del río Paraná ubicado en la provincia de Corrientes (desde los 27°30"S hasta los 28°00"S), donde se aprecian buenas exposiciones actuales y antiguas de los depósitos sedimentarios del mencionado curso en sus islas y barrancas, respectivamente.

Marco geológico

El nombre de Formación Ituzaingó fue introducido por De Alba (1953), definiéndola en la localidad homónima situada al noroeste de la provincia de Corrientes. Se trata de arenas y areniscas friables, de grano fino hasta grueso, con clastos bien redondeados de coloración variable y escasos niveles conglomerádicos. Su grado de cementación es en general pobre y está determinado por la presencia de cemento limonítico ligeramente arcilloso. El porcentaje de limonita determina no solo su coloración sino también su grado de compactación, llegando a formar intercalaciones muy duras (De Alba, 1953).

La composición mineralógica de las arenas está integrada mayoritariamente por cuarzo (99 %), con una fracción liviana comprendida por feldespato potásico y plagioclasa ácida. La fracción pesada corresponde en su mayoría a opacos y en orden decreciente de abundancia circón, turmalina, cianita, estauroilita, epidoto, rutilo



y granate (Herbst y Santa Cruz, 1985). Dicha asociación de minerales es igual a la descrita para el curso superior del Paraná en las cabeceras de la cuenca, aunque allí los depósitos equivalentes a la Formación Ituzaingó son fragmentarios debido al constante retrabajo de los materiales, dificultando o imposibilitando una adecuada correlación estratigráfica (Dos Santos, 1997).

El espesor de la Formación Ituzaingó en territorio argentino es bastante variable, pero en general disminuye hacia el sur. En el subsuelo de las provincias geológicas Mesopotamia y Llanura Chaco – Pampeana tiene una potencia promedio del orden de los 300 metros (Torra, 2001).

En la localidad tipo y sus alrededores, dicha Formación apoya sobre los basaltos y/o areniscas del Grupo Solarí – Serra Geral (Cretácico) (perforación Concepción N°1, INCYTH, 1977), aunque hacia el centro de la provincia de Corrientes asienta en discordancia sobre la Formación Fray Bentos. En una franja que acompaña el río Paraná (desde la latitud de la ciudad de Corrientes hacia el Sur) apoya sobre la Formación Paraná (Mioceno medio – superior). Se le sobreponen los sedimentos Pleistocenos de la Formación Toropí en discordancia de erosión, la cual subyace del mismo modo a la Formación Yupoí, aunque a veces esta última se halla ausente.

La edad asignada a la Formación Ituzaingó ha sido objeto de discusión fluctuando entre Mioceno (Castellanos, 1965), Plioceno (Herbst, 1971; Herbst y Santa Cruz, 1985; Chebli *et al.*, 1989) y Cuaternario (Reig, 1957) entre otros. En base a su posición estratigráfica Herbst (2000) propone que la edad máxima de esta Formación no es más antigua que Plioceno, por su relación discordante con la Formación Paraná (Mioceno) y el notable cambio de facies que representan entre sí.

Cabe tener en cuenta que por sus facies, paleocorrientes, composición mineralógica y ubicación topográfica, Dos Santos (1997) considera como fuente de clastos para el comienzo del río Paraná en territorio brasileño a depósitos psefíticos oligomícticos de edad probable Mioceno-Plioceno,

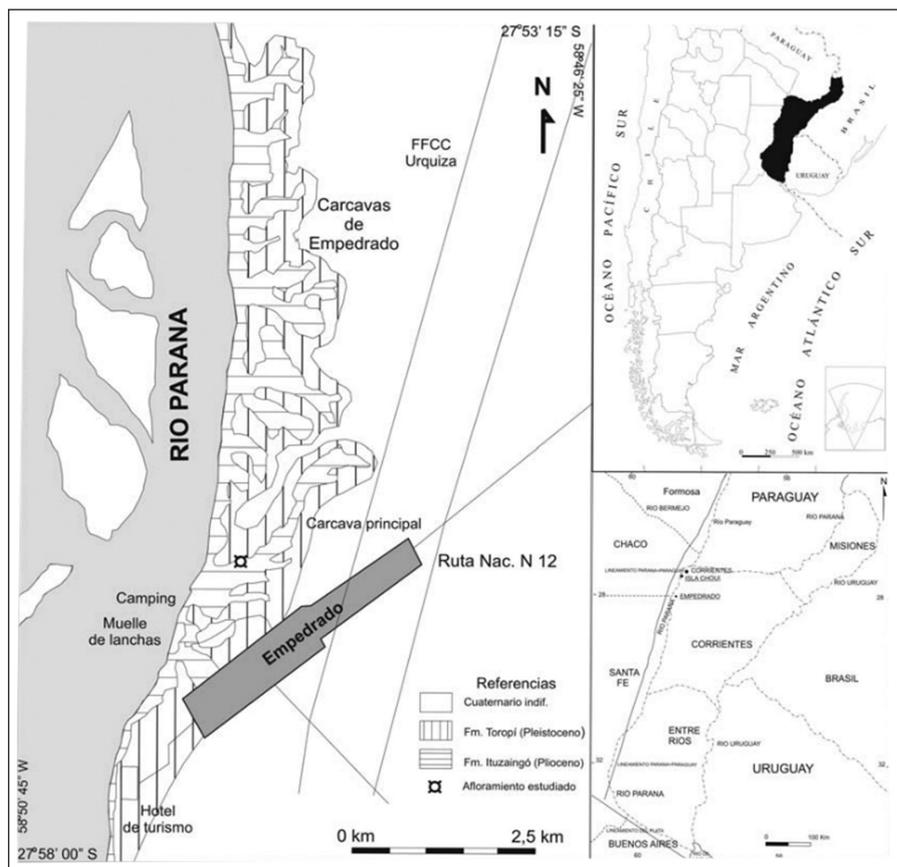


Figura 1. Área de estudio (Adaptado de Anís et al., 2005).

provenientes del retrabajo de pavimentos detríticos más antiguos. En dicha región de la alta cuenca, diversos autores sostienen que el canal de escurrimiento del Paraná comenzó su actividad alrededor del límite Plioceno/Pleistoceno (Suguio *et al.*; 1984; Stevaux, 1993, entre otros).

En base a estudios paleomagnéticos, Bidegain (1993) ubica a la Formación Paraná (de origen marino) dentro del Plioceno y en consecuencia a la Formación Ituzaingó (de origen fluvial) cerca del límite Plio-Pleistoceno.

Métodos

Para los estudios de arquitectura fluvial se comenzó con una limpieza de los afloramientos mediante pala ancha, espátula y pincel para poder identificar los tipos y las jerarquías de contactos, y las estructuras internas. El relevamiento realizado con la estación total (Leica 307, rayo infrarrojo y mini-prisma) de la base y techo del afloramiento estudiado permitió volcar en un plano la extensión y orientación del mismo, además de los datos de paleocorrientes que se utilizaron para

realizar el diagrama de migración de barras y dirección del flujo.

Las mediciones de paleocorrientes fueron realizadas en artesas, bordes de canales y en superficies de acreción lateral, para determinar la elongación general de los canales y sentidos de migración de las barras. La realización de fotomosaicos a color (en copia papel y digital) permitieron registrar las variaciones de las facies, contactos y direcciones de paleocorrientes en los sectores entre los perfiles en la Formación Ituzaingó y en las barrancas actuales de las islas del Río Paraná.

El análisis de diseños de escurrimiento se llevó a cabo mediante imágenes satelitales.

Análisis de modelos de escurrimiento

A escala regional, el análisis de modelos de escurrimiento surge como una de las primeras comparaciones a tener en cuenta entre los depósitos modernos y antiguos del río Paraná. Ello ofrece la posibilidad de abordar aspectos determinantes de la evolución ambiental porque permite analizar

cambios en el clima, la pendiente, la oferta sedimentaria, entre otros.

Durante el período de aguas bajas, el área estudiada del río Paraná presenta actualmente más de 50 barras con superficie variable entre menos de 1 km² y más de 35 km², las cuales ocupan aproximadamente 35% de la superficie del cauce (Orfeo, 1996). De tal forma, a pesar que se ha mencionado para este tramo del Paraná la existencia de un modelo anastomosado (Herbst, 2000), estudios geomorfológicos y sedimentológicos realizados en la zona estudiada (Orfeo y Stevaux, 2002) demuestran que este segmento de río tiene índice de sinuosidad promedio igual a 1,1 y relación de entrelazamiento (Friend y Sinha, 1993) variable entre 1,75 y 6,28, lo cual corresponde a un diseño de escurrimiento típicamente entrelazado. Como mecanismo de control primario para este modelo, caracterizado por el desarrollo de múltiples canales de baja sinuosidad (<1,5) que rodean islas y barras, se menciona la variabilidad de la descarga (Miall 1977; 1997). Sin embargo, Bridge (2003) al discutir la génesis y evolución de los ríos entrelazados no le atribuye mayor influencia a la mencionada fluctuación en el caudal, asumiendo que la geometría de los ríos aluviales multicanalizados está controlada principalmente por las crecientes estacionales.

Si se circunscribe el análisis del ciclo hidrológico al período de creciente, cabe esperar durante las inundaciones de poca intensidad una tasa de transporte de sedimentos baja y un ajuste reducido a dichas condiciones de flujo. En cambio, durante las crecientes extraordinarias, la magnitud del incremento del caudal y del transporte de sedimentos permite prever cambios drásticos en el diseño de escurrimiento (Baker, 1994), pudiendo demandar la estabilización del nuevo modelo varios períodos subsecuentes de inundación. Por lo tanto, al abordar el estudio de los controles hidráulicos (e indirectamente climáticos) que actúan sobre un estilo de escurrimiento, surge como elemento de juicio significativo la adecuada consideración de las crecidas de mayor magnitud tanto en términos de su descarga como también del

intervalo estadístico de su recurrencia (Bridge, 2003).

Al estudiar las variaciones hidrológicas del río Paraná en Corrientes durante un período de dos décadas (diciembre 1983 – abril 2004), Neiff *et al.* (2005) encontraron un rango de fluctuación de la cota del nivel del agua entre 43 y 51 m.s.n.m. (es decir, variaciones de caudal entre 10.000 y 50.000 m³ s⁻¹ aproximadamente). El lapso mencionado incluye el efecto del fenómeno climático ENOS en dos ocasiones (mayo a julio de 1992 y noviembre de 1997 a octubre de 1998), lo que significa haber considerado uno de los procesos fluviales con mayor importancia morfogenética del siglo pasado por su capacidad de incrementar el tamaño de las crecientes y la duración del período de inundación (Latrubesse *et al.*, 2005). Pese a ello, el diseño de escurrimiento del curso estudiado no varió significativamente tomando en cuenta los antecedentes que permiten realizar dicha comparación.

Una reconstrucción geomorfológica llevada a cabo en el Norte de Corrientes (Popolizio, 1977) permitió identificar fuera del territorio ocupado actualmente por el río Paraná, claras evidencias de un antiguo modelo de escurrimiento multicanalizado de baja sinuosidad, que se interpreta como un paleoambiente fluvial semejante al Paraná actual, ligado a la migración lateral de dicho curso (Orfeo, 2005), que concuerda con los afloramientos de la Formación Ituzaingó en ese sector. Tales depósitos representan un paleorío arenoso con diseño entrelazado debido al efecto de barras transversales (Jalfin, 1988) similares a las actuales (Orfeo, 1996b).

En la alta cuenca localizada en Brasil y durante el clima predominantemente seco del Pleistoceno se habría iniciado el relleno del incipiente valle fluvial del Paraná con un modelo de escurrimiento entrelazado que fue posteriormente sepultado debido a condiciones climáticas más húmedas, por un sistema fluvial meandroso asociado a una amplia llanura aluvial (Stevaux, 1994). Reactivaciones tectónicas posteriores generaron la exposición de los antiguos depósitos trenzados, liberando

gran cantidad de arena que abastece al curso actual (Stevaux, 1994).

Con los mencionados elementos de juicio se acepta que el diseño entrelazado del río Paraná ha sido un carácter conspicuo en la evolución de su diseño de drenaje, lo que permite asumir en determinados momentos de su historia una adecuada oferta de lluvias y sedimentos en el marco de los cambios climáticos globales del Cuaternario (Iriondo, 1994) y de los eventos morfogenéticos recientes de gran magnitud que afectaron la cuenca actual.

De lo anterior, se desprende también una considerable estabilidad de la pendiente regional, donde los movimientos neotectónicos que determinaron la migración lateral del canal en la zona estudiada no modificaron su modelo de escurrimiento no obstante el notable control estructural que evidencia el cauce en el presente.

Esto lleva aparejado que a pesar de las marcadas diferencias en la precipitación ocurridas durante las oscilaciones climáticas del Cuaternario (Iriondo, 1994), el suministro de agua durante las inundaciones fue suficiente para transportar sedimentos como carga de fondo en una proporción superior al 11 % de la carga total (Schumm, 1981), para sostener en el tiempo el modelo entrelazado de escurrimiento que caracteriza al Paraná actual en el área estudiada. Aquí la carga de fondo alcanza el 25% de la carga total, lo que circunscribe el desarrollo de un río esencialmente tractivo (Orfeo, 1997). La proporción de limo y arcilla en los sedimentos de fondo (valor M de Schumm, 1977) del río Paraná es inferior al 5% (Orfeo, 1996), confirmando la evolución de un diseño de escurrimiento entrelazado comparable a los descritos por Schumm (1981) y Schumm y Meyer (1979). En tal sentido, la elevada relación ancho/profundidad del Paraná (> 300) ratifica lo antedicho.



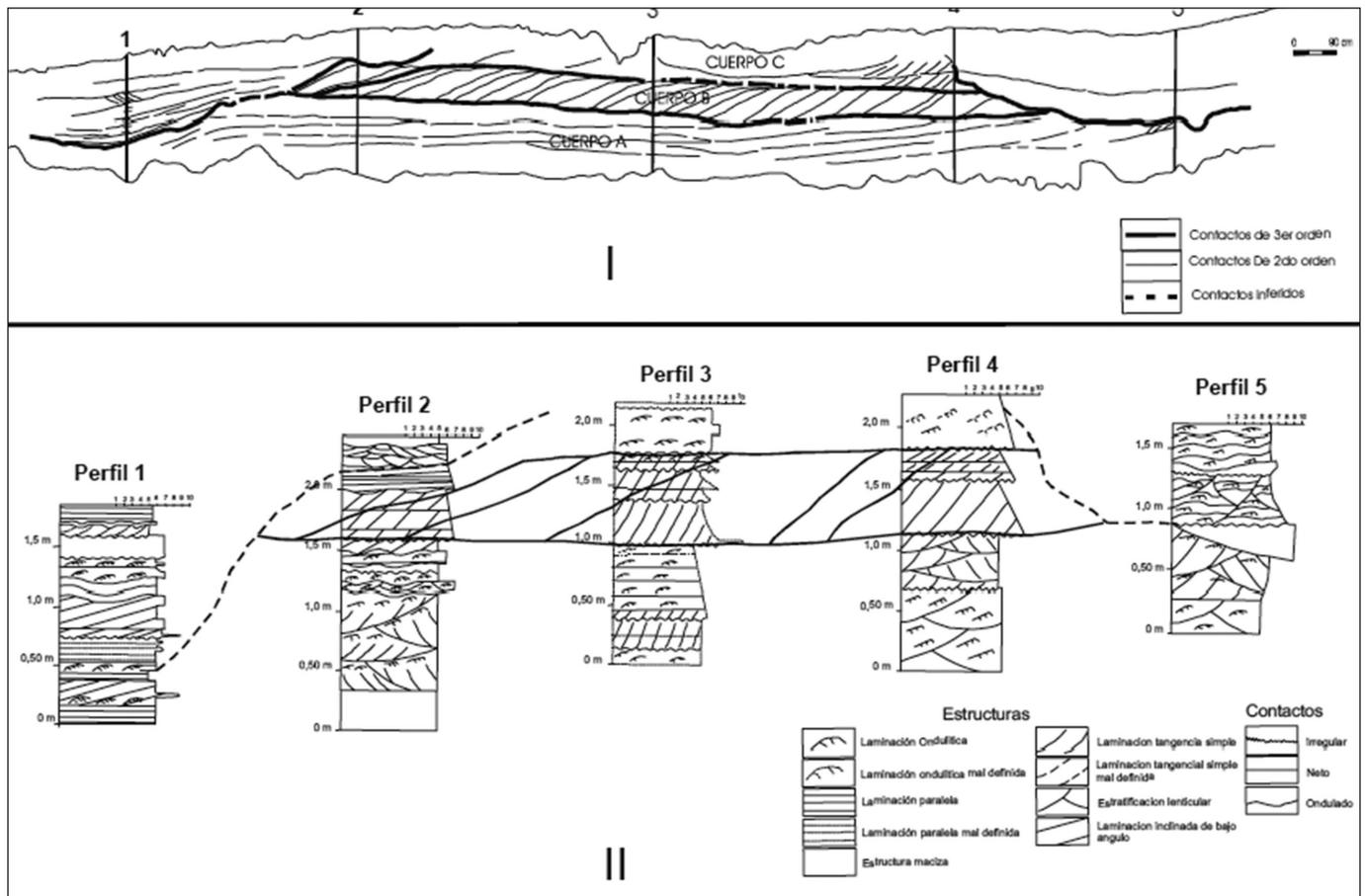


Figura 2. Análisis arquitectural de la Fm. Itzaingó. I) distribución de las principales discontinuidades y cuerpos identificados (escala horizontal:vertical 1:1). II) perfiles sedimentológicos de detalle y su distribución lateral en el afloramiento (escala horizontal exagerada para su mejor visualización). (Tomado de Anís *et al.*, 2005).

Análisis de las barras

La recurrencia en el tiempo del modelo de escurrimiento entrelazado que tiene el río Paraná durante su historia geológica conduce al análisis de las unidades de sedimentación que determinan dicho diseño. En este sentido los depósitos sedimentarios asociados a barras antiguas y actuales brinda la posibilidad de comparar tanto las características del agente de transporte como de los materiales detríticos movilizados.

En un relevamiento de 10 perfiles estratigráficos realizados en sendas barras actuales del río Paraná en el área estudiada, Neiff *et al.* (2005) describen afloramientos de 2 a 4 m de potencia con variación individual de cada estrato entre 0,1m y 2,5 m de espesor, integrados predominantemente por arena fina y limo. Para los sedimentos arenosos se menciona estratificación horizontal, diagonal de bajo ángulo, cruzada planar,

en artesa y masiva (en estratos tabulares no gradados), presentando las secciones más altas de cada perfil edafogénesis incipiente. Las pelitas se presentaron en depósitos masivos y también con laminación paralela, en secuencias que alcanzaron hasta 1m de potencia aunque en la mayoría de los casos constituyeron intercalaciones delgadas.

Mediante análisis estadístico Neiff *et al.* (2005) analizaron la relación entre el número de estratos de cada perfil y algunos atributos de los pulsos de inundación del río (como amplitud, frecuencia e intensidad máxima promedio de la fase de aguas altas) durante dos décadas que incluyen el momento de la génesis de las barras. Dicho criterio asume que la intensidad de un pulso pondera el caudal del río, en tanto que la frecuencia indica el número de oportunidades en que se produjeron aportes de las aguas de inundación y la amplitud señala

la duración de la fase de creciente en cada estrato estudiado.

Los resultados obtenidos (Neiff *et al.*, 2005) sugieren que la cantidad de estratos que tienen las barras está fuertemente relacionada con la frecuencia de las fases de inundación. Esta frecuencia, debido a la diferente topografía que tienen las islas, ejerce una incidencia particular en cada una de ellas y permite encontrar también una secuencia depositacional distinta en cada perfil. Con dicho análisis, al conocido efecto modelador que tienen las crecientes sobre el paisaje fluvial, se agrega la intensidad máxima de cada período de inundación la cual genera estratos en diferente número y potencia, dependiendo de la posición topográfica de las barras.

El análisis arquitectural de una isla actual del río Paraná en el área investigada (Anís *et al.*, 2005; Georgieff, *et al.*, 2005), representativa de las islas agradacionales discutidas con anterioridad (Neiff *et al.*, 2005), mostró en su porción cuspidal depósitos correspondientes a canales de relleno complejo y barras laterales con buen desarrollo

de superficies de acreción lateral que se cortan entre sí, inclinando entre 28° y 32°. En dicha isla se identificaron cuatro cuerpos acrecionales principales y varios cuerpos internos de menor magnitud con espesores variables entre 0,5 a 0,7 m compuestos por arenisca fina a mediana. La estratificación predominante fue tangencial simple con óndulas y laminaciones de bajo ángulo en el tope del depósito. El relleno del canal quedó conformado principalmente por estratificación cruzada en artesa indicando hasta cinco episodios de relleno.

La Formación Ituzaingó expuesta en Empedrado (Figura.2) brinda la posibilidad de realizar comparaciones con unidades de sedimentación semejantes a las actuales. En un afloramiento con extensión lateral de 40 m y 2,5 a 3 m de altura, Anís *et al.* (2005) reconocieron una barra lateral con tres episodios principales de migración por expansión y uno de traslación aguas abajo. La granulometría dominante corresponde a arenisca mediana (variable entre fina y muy gruesa), ocasionalmente con sábulos de ópalo, sobre todo en la base de los cuerpos principales, en los planos de la estratificación cruzada tangencial simple y en los planos de avalancha de las ondulitas. Se menciona también la presencia de paraclastos de arcillas y finas capas de arcilla limitando los cuerpos tabulares.

La principal estructura sedimentaria reconocida es la estratificación cruzada tangencial simple. En forma subordinada se indica la presencia de artesa y estratificación planar, reconociéndose laminaciones paralelas de bajo ángulo y ondulíticas hacia el techo de los cuerpos. El arreglo granodecreciente observado en los perfiles sedimentológicos, sumado a los datos de paleocorrientes, sugieren migración de la barra por expansión lateral con predominio de acreción vertical y progradación en el sentido de la corriente.

Conclusiones

Los depósitos estudiados del río Paraná en su etapa actual presentan características sedimentológicas similares a las descritas para los afloramientos de la Formación Ituzaingó en Empedrado. En general, la escala de tamaño de las estructuras y espesores de los estratos de estos últimos es menor que la descrita para el presente río Paraná, por lo que se asume que los depósitos del tope de las barras actuales del Paraná son los análogos modernos de los depósitos pliocenos.

Con dicho esquema es posible aceptar que el río Paraná en el área analizada tuvo durante su evolución un conspicuo diseño de escurrimiento entrelazado (multicanalizado de baja sinuosidad) y una considerable estabilidad de la pendiente regional, donde los movimientos neotectónicos que determinaron la migración lateral del canal en la zona estudiada no modificaron dicho modelo de escurrimiento a pesar del notable control estructural que evidencia el cauce actual en la zona considerada.

Bibliografía

- Anís, K., Georgieff, S., Rizo, G., y Orfeo, O. (2005). Arquitectura de la Formación Ituzaingó (Plioceno), una comparación con los depósitos del río Paraná, Argentina. *XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, Resúmenes
- Baker, V. R. (1994). Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology*, 10, 139-156.
- Bidegain, J. C. (1993). Primeros análisis paleomagnéticos en sedimentos del Cenozoico tardío en las márgenes del Río Paraná. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 48 (3-4): 247-256.

Bridge, J. (2003). *Rivers and floodplains: forms, processes and sedimentary record*. Blackwell Science, 491 p.

Castellanos, A. (1965). *Estudio fisiográfico de la provincia de Corrientes*. Instituto de Fisiografía y Geología. Universidad Nacional del Litoral. Publicación número 49:1-222

Chebli, G. A., Tófaló, O. R. y Turzzini, G. E. (1989). Mesopotamia." En: *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Serie Correlación Geológica. Instituto Superior de Correlación Geológica. Universidad Nacional de Tucumán. Publicación 1430, 6: 79-100.

De Alba, E. (1953). "Geología del Alto Paraná, en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 8 (3): 129-161.

Dos Santos, M. (1997). *Estratigrafía e evolução do sistema siliciclástico do rio Paraná no seu curso superior: ênfase à arquitetura dos depósitos, variação longitudinal das fácies e processos sedimentares*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 146 pp.

Friend, P. and R. Sinha, 1993. Braiding and meandering parameters. In: *Braided Rivers* (J. Best and C. Bristow, Eds.). Geological Society Special Publication N° 75, 105-112.

Georgieff, S., Anís, K., Orfeo, O., y Rizo, G., 2005. Architecture of Ituzaingó Formation (Pliocene), a comparison with deposits of Paraná River, Argentina." *8th International Conference on Fluvial Sedimentology*, Delft, The Netherlands, Abstracts, 107.



- Herbst, R.**, (1971). Esquema estratigráfico de la provincia de Corrientes, República Argentina. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 24 (2): 221- 243.
- Herbst, R.**, (2000). La Formación Ituzaingó (Plioceno). Estratigrafía y distribución. En: *El Neógeno de Argentina* (Aceñolaza, F. y Herbst, R., Eds.). Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica 14: 181-190.
- Herbst, R. y Santa Cruz, J. N.**, 1985. Mapa litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes. *Revista D`Orbignyana*, 2: 1-51.
- Iriondo, M.**, 1991. "El Holoceno en el Litoral." Comunicación del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino" (Nueva Serie), Santa Fe, 3 (1), 40 p.
- Iriondo, M.** (1994). "Los climas cuaternarios de la región pampeana." Comunicación del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino" (Nueva Serie), Santa Fe, 4 (2): 48 p.
- Jalín, G. A.** (1988). Formación Ituzaingó (Plio-Pleistoceno) en Empedrado, Provincia de Corrientes: Un paleorío arenoso entrelazado tipo Platte. *II Reunión Argentina de Sedimentología*. Actas 1: 130-135. Buenos Aires.
- Latrubesse, E., Stevaux, J. and Sinha, R.** (2005). Tropical rivers. *Geomorphology*, 70: 187-206.
- Miall, A. D.**, (1977). "A review of the braided river depositional environment." *Earth Science Review* 13: 1-62.
- Miall, A. D.** (1996). *The Geology of Fluvial Deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. Springer-Verlag, 582 p.
- Neiff, J., S. Casco y O. Orfeo.** (2005). Método para la medición de la conectividad entre procesos hidrológicos y geomorfológicos en ríos entrelazados. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6 (1): 75-83.
- Orfeo, O.** (1996). Criterios para la clasificación de barras en grandes ríos entrelazados de llanura subtropical. *Sexta Reunión Argentina de Sedimentología*, Asociación Argentina de Sedimentología, Bahía Blanca, Resúmenes: 231-236.
- Orfeo, O.** (1997). Comparación sedimentológica y geomorfológica de los ríos Paraná y Paraguay en su área de confluencia. *Primer Congreso Latinoamericano de Sedimentología - 8º Congreso Geológico Venezolano*. Sociedad Venezolana de Geólogos - International Association of Sedimentologists, Memorias II: 129-133.
- Orfeo, O.** (2005). Historia Geológica del Iberá, provincia de Corrientes, como escenario de biodiversidad. En: *Temas de la Biodiversidad del Litoral fluvial argentino II* (F.G.Aceñolaza, Coordinador). INSUGEO, Miscelánea, 14: 71-78.
- Orfeo, O. and J. Stevaux.** (2002). Hydraulic and morphologic characteristics of middle and upper reaches of the Paraná River (Argentina and Brazil), *Geomorphology*, (Elsevier, Holanda), 44 (3/4): 309-322.
- Popolizio, E.**, (1977). *Contribución a la geomorfología de la Provincia de Corrientes*. Centro Geociencias Aplicadas, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia (Chaco, Argentina), 7, 45 p.
- Reig, O. A.**, (1957). *obre la posición sistémica Zygolestes con una reconsideración de la edad y correlación del Mesopotamiense*". *Holmbergia* 5: 12-13
- Schumm, S.**, 1981. *Evolution and response of the fluvial system: sedimentological implication*. SEPM Special Publication 31, 19-29.
- Schumm, S. and D. Meyer**, 1979. "Morphology of alluvial rivers of the Great Plains." Great Plains Agricultural Council, 91, 9-14.
- Suguio, K.; Martin, L.; Bittencourt, C.; Domínguez, J.; and Flexor, J.**, (1985). Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, 15 (4), 273-286.
- Stevaux, J.** (1993). *Sedimentação e morfogênese dos depósitos associados à calha do rio Paraná, região de Porto Rico (PR)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 200 pp.
- Stevaux, J.** (1994). "The Upper Paraná River (Brazil): geomorphology, sedimentology and paleoclimatology". *Quaternary Internacional*, 21: 143-161.
- Torra, R.** (2004). *Sedimentología de las arenas de la Formación Ituzaingó entre Itatí y Empedrado, Provincia de Corrientes, con algunas observaciones adicionales en áreas aledañas*. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (inédito), Tucumán, 229 p.

* Oscar Orfeo^{1,2}, Sergio M. Georgieff^{1,3}, Karina B. Anís³, Gustavo E. Rizo³

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET

2 Universidad Nacional del Nordeste - UNNE

3 IESGLO - Universidad Nacional de Tucumán

Clasificación trófica de una Laguna de Agua Salada: Laguna del Plata Mar Chiquita, Córdoba

CLAUDIA ORONÁ
GERARDO HILLMAN
CECILIA POZZI
NEVOR PAJÓN
MARIANA PAGOT
MARIANO CORRAL
ANDRÉS RODRÍGUEZ

Introducción

Los lagos salados están geográficamente extendidos en numerosa y significantes partes de los ecosistemas acuáticos interiores del mundo. Ellos son recursos naturales importantes con considerables valores estético, cultural, económico, recreativo, científico, de conservación y ecológicos.

Los lagos salados son conocidos también como lagos atalásicos (del griego *a*, no y *thalassa*, mar) es decir “no marino”. Aunque originalmente el término atalásico se refería a los cuerpos de agua no conectados con el mar, la tendencia actual es restringir esa denominación a aquellos con un grado de salinidad suficiente como para diferenciarlos de los lagos y lagunas de agua dulce. Se considera que un cuerpo de agua es salino cuando su salinidad es superior al 30%. El criterio más difundido para clasificar el grado de salinidad de las aguas es el propuesto por Hammer (1986) que incluye la siguientes categorías: hiposalina: 3-20 g/L; mesosalina 20-50 (el agua de mar tiene aprox. 35); hipersalina 50-100 g/L; hipersalina extrema >100 g/L (Bucher, 2006).

En general, la mayoría de los lagos salinos son receptores finales de sus cuencas de drenaje endorreico, es decir, sin salida al mar. Dado que el flujo de agua que ingresa contiene sales, pero no así el agua que se evapora, la sal se acumula en el lago. Los mismos suelen ser muy diversos en cuanto a su profundidad, tamaño y forma lo que,

a su vez, produce variaciones marcadas en la salinidad del agua (Hammer, 1986).

La Laguna del Plata, de agua salada, se encuentra en la zona Sur-Oeste de la Mar Chiquita, al noreste de la provincia de Córdoba (Figura 1). Forma parte de un sistema hidrológico cerrado y del mayor lago salado de América del Sur y quinto a nivel mundial, constituyendo un área de importante valor biológico. Los Bañados del Río Dulce y la laguna Mar Chiquita, incluyendo la Laguna del Plata, fueron declarados Reserva de uso Múltiple por la provincia de Córdoba (1994). En el plano internacional, han sido denominados Sitio de Valor Hemisférico por la Red de Aves Playeras (1991), forman parte de la red internacional de Living Lakes y declarado “Humedal de importancia internacional” por la convención RAMSAR (2002).

En general los datos existentes sobre la composición del agua de la Laguna del Plata son escasos y se caracterizan fundamentalmente por poseer una gran variabilidad en tiempo, al tipo de parámetros analizados y en cuanto a los métodos utilizados, tanto en la toma de muestras como en la determinación de los mismos. Por lo cual, su grado de estudio o nivel de conocimiento es muy inferior al deseado teniendo en cuenta su importancia como recurso regional, ambiental y económico.

Objetivo

El objetivo del presente trabajo fue realizar una clasificación trófica de la Laguna del Plata, con énfasis en que no hay registros anteriores al respecto, lo que generaría una base para futuros estudios.

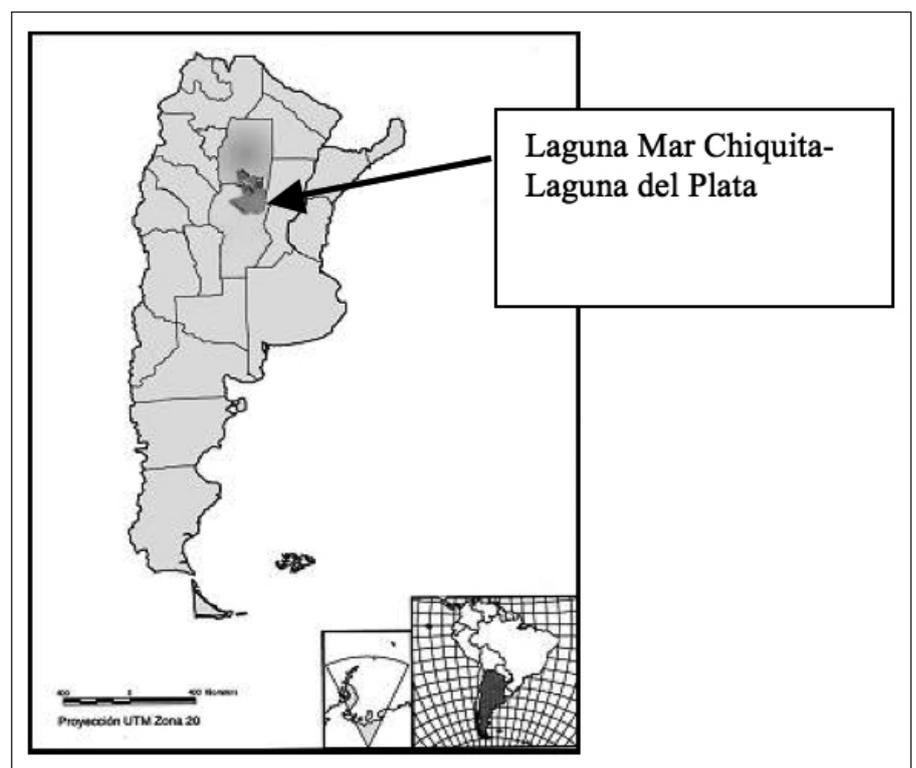


Figura 1. Ubicación de la Laguna Mar Chiquita - Laguna del Plata.

Área de estudio

La Laguna del Plata, en el período estudiado, mantenía una superficie de aproximadamente 20 km². Su único afluente es el Río Primero o Suquía. En periodos secos (década del '70), no tenía conexión hidrológica con la laguna Mar Chiquita, y entre ellas existían diferencias significativas en términos de salinidad. En periodos húmedos, la Laguna del Plata, se transforma en una bahía (Figura 2). En su entorno existe poca actividad antrópica, sólo dos campings en la costa sur y cultivos de soja en algunos campos aledaños. Actualmente sólo se permite la pesca deportiva, realizándose, además, actividades recreacionales.

El río Primero (Suquía) tiene nacimiento en el Dique San Roque. En su paso por la ciudad de Córdoba recibe las aguas del arroyo La Cañada por la margen derecha, continuando, posteriormente, con un recorrido de aproximadamente 40 km, dentro de la mencionada ciudad. Al salir de la misma recibe los aportes de la Estación Depuradora Bajo Grande y el canal industrial. En este tramo actúa básicamente como receptor de descargas pluviales, industriales y de plantas depuradoras de líquidos cloacales.

El río sufre un deterioro leve pero progresivo a su paso por la zona más densamente poblada. Los efluentes provenientes de la planta de tratamiento de residuos cloacales urbanos lo afectan seriamente (Wunderlin, D. *et al.*, 1997; Gaeiro D. *et al.*, 1997; Wunderlin, D. *et al.*, 1999; Wunderlin, D. *et al.*, 2000; INA, 2004). La extensión del río desde el embalse San Roque hasta la laguna Mar Chiquita es de aproximadamente 200 km (Vázquez *et al.*, 1977).

Metodología

Para realizar el monitoreo se establecieron cuatro puntos sobre la Laguna del Plata (LP1, LP2, LP3 y LP4), uno sobre el río (RS2) y uno en la Laguna Mar Chiquita (LMC), todos ellos ubicados de acuerdo a las características morfológicas del sistema estudiado (Figura 3). Se llevaron a cabo campañas estacionales durante los años 2006 -2007. Los parámetros físico-químicos medidos,



Figura 2. Imagen Landsat donde se señala el área de estudio.

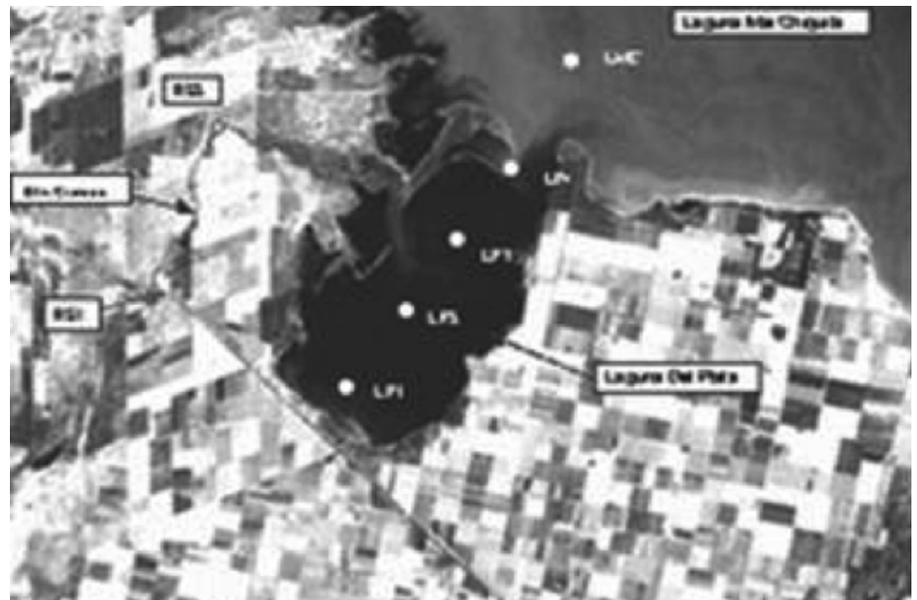


Figura 3. Ubicación de los puntos de monitoreo. Imagen Satelital LANDSAT 7.

en agua, fueron: iones mayoritarios; pH; salinidad (por medio de la conductividad); fósforo total (PT); fósforo reactivo soluble (PRS); serie de nitrógeno; material en suspensión (MES); profundidad de disco Secchi; clorofila-a y fitoplancton.

La metodología, así como las técnicas de análisis utilizadas para agua, son las recomendadas por APHA, AWWA (1995).

Para la clasificación trófica de la laguna se utilizaron los siguientes parámetros: clorofila - a; profundidad de disco Secchi, nitrógeno total y fósforo total.

Resultados

Se realizó el análisis de la composición iónica de las muestras de agua de la Laguna del Plata (Figura 4) y Laguna Mar Chiquita (Figura 5). A través de este análisis se pudo clasificar al agua de ambas lagunas como clorurada - sódica.

El pH se mantuvo homogéneo en las distintas estaciones de monitoreo, registrando valores entre 8, 5 y 9,5.

Por medio de las conductividades medidas se pudo calcular la salinidad en cada punto de muestreo, obteniéndose algunas concentraciones menores a 30 g/L en LP1 y LP2, nivel a partir del cual el agua se considera salada. La menor salinidad podría deberse a la

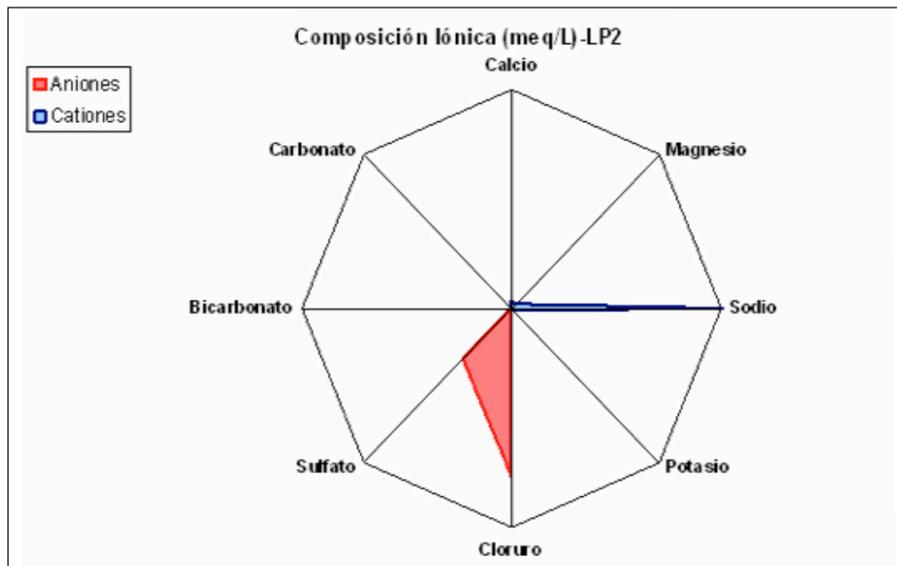


Figura 4. Composición iónica de Laguna del Plata.

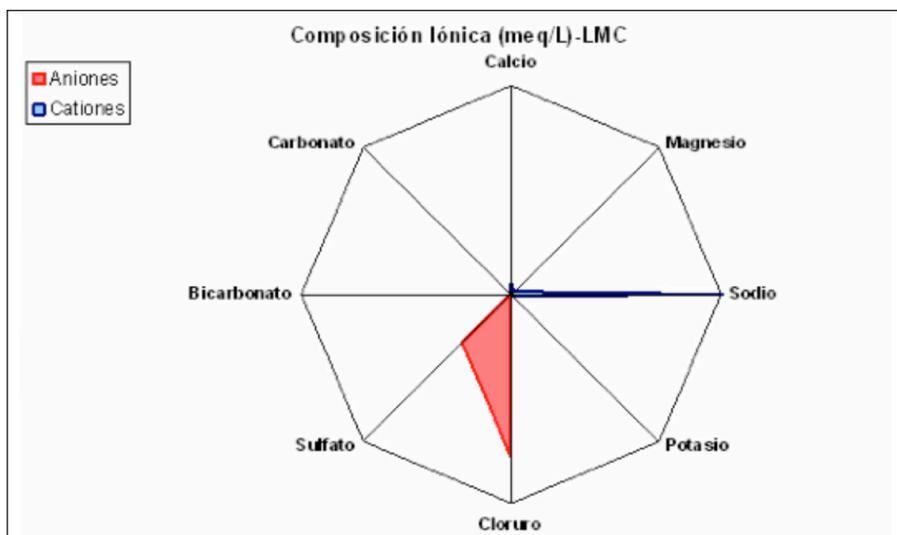


Figura 5. Composición iónica de laguna Mar Chiquita.

existencia de surgentes de agua dulce en la zona sur de la Laguna del Plata y de la Mar Chiquita. En el resto de la laguna se observaron valores superiores, dando un promedio (entre los 3 sitios de muestreo) de 33,6 g/L, con un máximo de 48,1 g/L en LP3. En la figura 6 se muestra la variación temporal y espacial de este parámetro.

Prácticamente, en todas las campañas realizadas se observó, en el análisis espacial, que la salinidad sufrió un leve aumento desde el sitio LP1 hacia el LMC.

La concentración de PT registrada en el agua de la Laguna del Plata, durante el periodo estudiado, varió entre un máximo de 395 $\mu\text{g/L}$ y un mínimo de 40 $\mu\text{g/L}$ (Figura 8). La concentración promedio fue de 174,5

$\mu\text{g/L}$. Para el PRS los valores oscilaron entre 238 $\mu\text{g/L}$ y mínimos de 40 y <13 $\mu\text{g/L}$ (Figura 7).

La profundidad de disco Secchi medida, se mantuvo prácticamente homogénea, tanto espacialmente como temporalmente, con valores entre 0,25 y 0,40 m.

La clorofila-a presentó, en todas las campañas y puntos de muestreo, concentraciones elevadas (Figura 9). Se obtuvo el promedio de todos los valores registrados dando como resultado 138,9 $\mu\text{g/L}$.

En todas las muestras de agua extraídas para su análisis se determinó la serie de nitrógeno (amonio, nitrito y nitrato). Para encontrar el valor promedio de nitrógeno total inorgánico (NTI), se sumaron las concentraciones

de las especies citadas, dando como resultado 0,4 $\mu\text{g/L}$.

Los productores primarios, para su crecimiento, deben extraer del agua nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo, en relaciones estequiométricas. Al comparar la relación de estos dos nutrientes, presente en las células con la hallada en el agua, se puede establecer cual de ellos se convierte en "limitante" en ese cuerpo de agua.

En el presente trabajo se calculó la relación entre el valor promedio de nitrógeno total inorgánico (0,4 $\mu\text{g/L}$) y el promedio de fósforo reactivo soluble (39,5 $\mu\text{g/L}$) que representa al fósforo total inorgánico. El resultado obtenido fue 0,01. Según Toman y Mueller (1987), para aguas marinas el valor de referencia de NIT/PI es 2. Como el valor obtenido es menor al de referencia, implicaría que el nutriente limitante, durante el periodo estudiado, fue el nitrógeno

A partir de la información recopilada durante el monitoreo realizado, se calcularon los valores promedio de: clorofila-a; profundidad de disco Secchi, nitrógeno total y fósforo total, obteniéndose los siguientes resultados: 138,9 $\mu\text{g/L}$; 0,32 m; 0,4 $\mu\text{g/L}$; y 174,5 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Éstos se compararon con las concentraciones de la tabla de clasificación (Tabla 1) propuesta por Hakanson, *et al.* (2007), modificada de OECD (1982), Hakanson and Jansson (1983) y Wallin *et al.* (1992).

Los valores de PT; clorofila -a y disco Secchi encuadrarían a la Laguna del Plata, dentro de esta clasificación, como hipereutrófica.



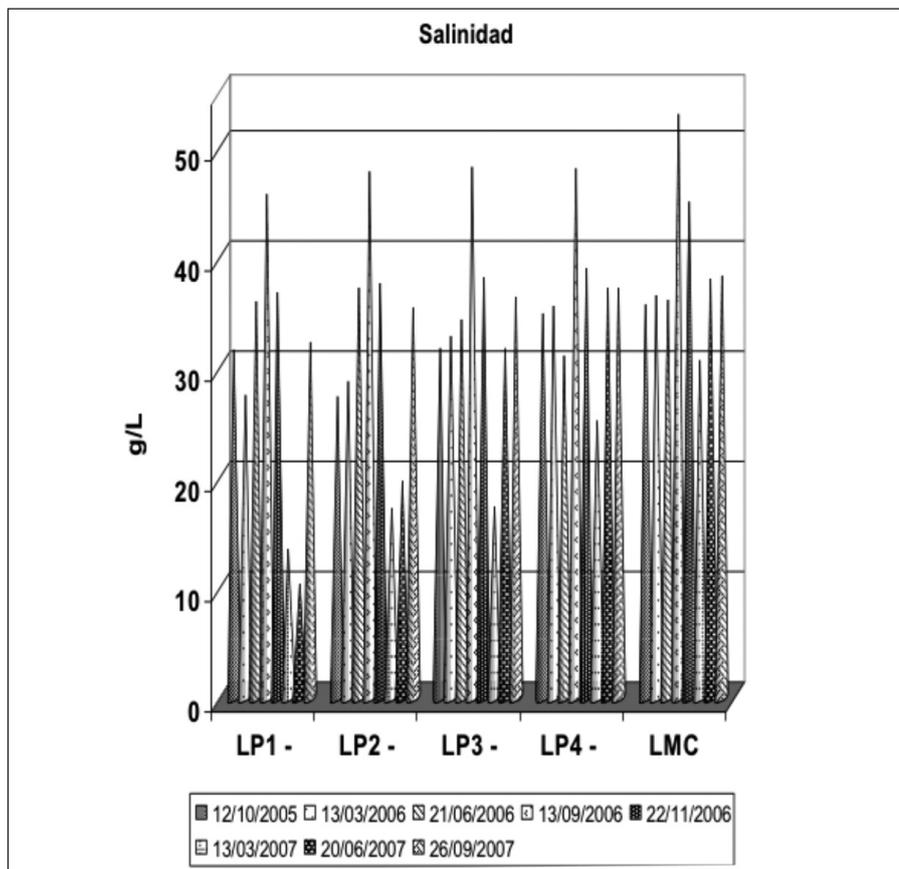


Figura 6. Variación temporal y espacial de la salinidad.

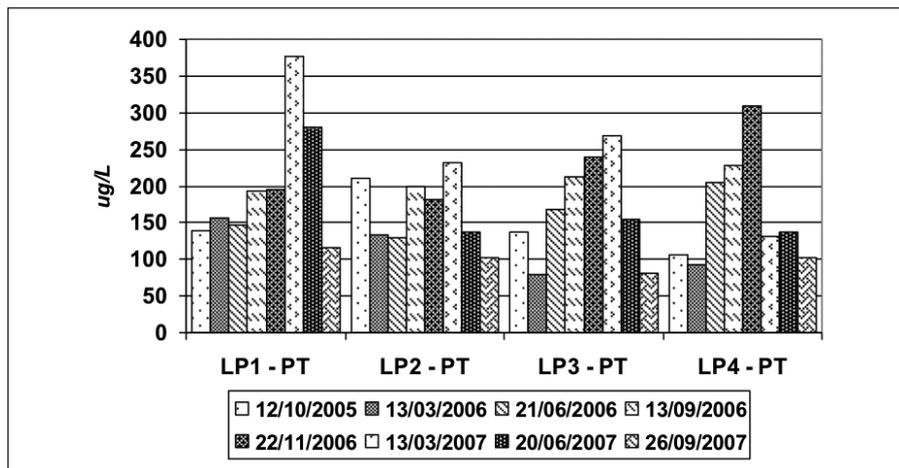


Figura 7. Concentración de PT en la laguna.

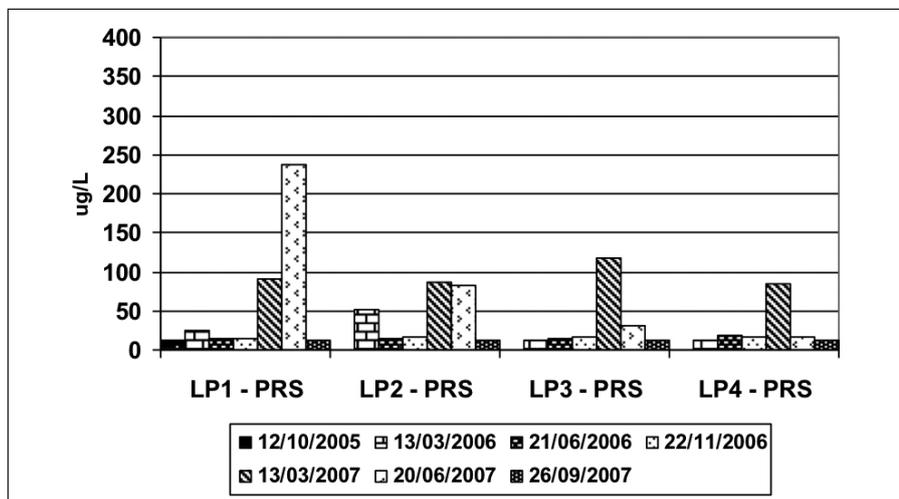


Figura 8. Concentración de PRS en la laguna.

Conclusiones

El análisis de los iones mayoritarios resultó de interés para la caracterización química del agua de la Laguna del Plata, a través del mismo se la puede clasificar como clorurada sódica. Los valores de conductividad encontrados permitieron clasificarla como salada.

De toda la información recolectada durante el monitoreo, los valores promedio calculados para determinar su estado trófico, fueron: PT 174,5 µg/L, NT 0,4 µg/L, clorofila-a 138,9 µg/L, disco Secchi 0,32m. Esto daría como resultado que, en el periodo estudiado, la Laguna estuvo hipereutrófica. A partir de la relación N/P se concluye que el nutriente limitante fue el nitrógeno.

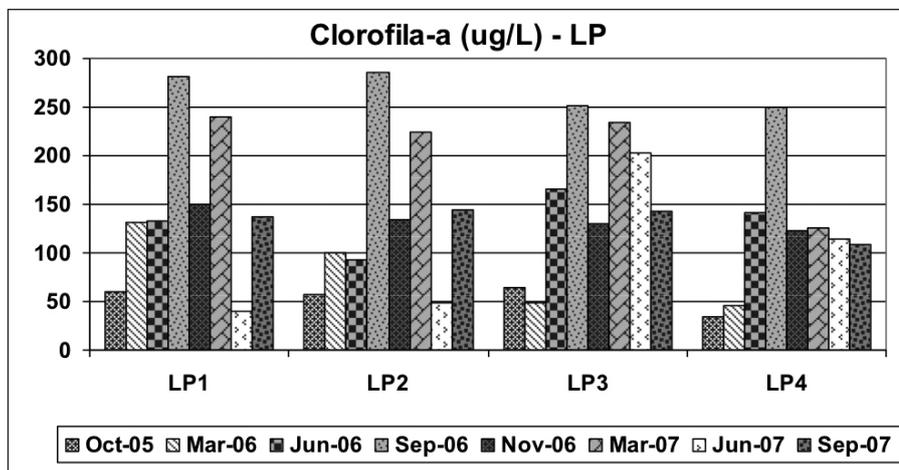


Figura 9. Variación temporal y espacial de clorofila-a.

Valores de referencia para Sistemas marinos con salinidad > 20 o/oo				
Nivel trófico	Clorofila-a $\mu\text{g/L}$	Secchi m	N- Total $\mu\text{g/L}$	P Total $\mu\text{g/L}$
Oligotrófico	< 12	> 28	< 220	< 9
Mesotrófico	2 - 6	> 7,5	220 - 470	9 - 27
Eutrófico	6 - 20	> 2	470 - 1090	27 - 90
Hipertrófico	> 20	> 0,9	> 1090	> 90

Tabla 1. Valores de referencia para la clasificación trófica de sistemas marinos.

Bibliografía

APHA, AWWA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17^o Edición.

Bucher E. (2006). *Bañados de Río Dulce y Laguna Mar Chiquita*, Córdoba. Argentina. Editorial Academia Nacional de Ciencias, Córdoba Argentina.

CADNE (Ed.). (1982). *Laguna de Mar Chiquita (Mar de Ansenusa). Recopilación y evaluación de los conocimientos existentes sobre factores físicos y biológicos del área (2^a Aproximación)*. Banco de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Gaeiro D. M. et al. (1997) "Spatial and temporal variability of total non-residual heavy metals content in stream sediments from the Primero (Suquia) River System, Córdoba, Argentina", Water, air and soil pollution, 93:303.

Golterman, H. L. and Booman, A. (1988) "Sequential extraction of iron - phosphate and calcium - phosphate from sediments by chelating agents" Verh. Internat. Verein. Limnol, 1988, 23: 904 - 909.

Hakanson, L. and Jansson, M. (1983). *Principles of lake Sedimentology*, Springer, Berlin, 316 pp.

Hakanson, L; Bryhn, A.C; Blenckner, T. (2007). Operational effect variables and functional ecosystem classification- a Review on empirical models for aquatic systems along a salinity gradient. *International Rev. Hydrobiologia*, 92:3, 326 - 357.

Hummer, U. T. (1986) *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dr. W Junk Publishers Boston.

Kanter, H., (1935). *La cuenca cerrada de la Mar Chiquita en el norte de la Argentina*. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias. Córdoba 32.

Insa, C. M. (2000). *Recopilación bibliográfica y análisis de los principales*

parámetros de la calidad del agua en la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Informe de beca del Programa internacional PROMOE entre la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia (España) y F.C.E.Fy N. - UNC.

Martínez, D. E. (1991). *Caracterización Geoquímica de las Aguas de la Laguna Mar Chiquita, Prov. de Córdoba*. Tesis Doctoral, UNC.

OECD (1982). *Eutrophication of water Monitoring, assesment and control* OECD Paris, 154 pp.

Reati, G. J., Florin, M., Fernadez, G. J. Y Montes, C., (1997). The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): a little know, secularly fluctuating, saline lake. *International Journal of Lake Research*, Vol. 5.

Wallin, M. Hakanson; L and Persson, J.,(1992). Load models for nutrients in coastal areas, especially from fish farms (in Swedish with English summary) - Nordiska ministerradet, 502. *Copenhagen*, 207 pp.

Wunderlin, D. A. et al. (1997). *Programa de monitoreo del Río Primero (Suquia)*, Ciudad de Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba.

Wunderlin, D. A. et al. (1999). *Use of Water Quality Indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Primero (Suquia) River*, Water Research.

Wunderlin, D. A. et al. (2000). Pattern Recognition Techniques for the Evaluation of Spatial and Temporal Variations in *Water Quality*. A case Study: Suquia River Basin (Córdoba - Argentina).

* Claudia Oróná¹, Gerardo Hillman², Cecilia Pozzi², NevorPajón¹, Mariana Pagot², Mariano Corral², Andrés Rodríguez²

1 Departamento de Química Industrial y Aplicada.

2 Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

