



El Centro de Estudios y Tecnología del Agua, dependiente de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, tiene el propósito fundamental de potenciar y consolidar la actividad científica y tecnológica vinculada a los recursos hídricos de esta Universidad articulando nexos con otras instituciones provinciales, regionales y extranjeras.

El CETA reúne equipos de investigación de extensa trayectoria y experiencia en el campo de los recursos hídricos. Sus líneas de trabajo y su compromiso de gestión apuntan a desarrollar proyectos de I+D+i que favorecen la innovación y contribuyen a dar respuesta a múltiples problemáticas relacionadas al uso y consumo del agua, como también, a la conservación y protección de los recursos hídricos en el contexto local y regional.

Con este propósito el CETA pretende aportar nuevos conocimientos que ayuden desde una perspectiva estratégica a la gestión integrada de los recursos hídricos, posibilitando optimizar de manera sustentable el uso del agua, y a promover el manejo eficiente de este recurso.

En el CETA la formación de recursos humanos es una política prioritaria; y con el Laboratorio de Hidráulica ofrecen un espacio académico de grado y postgrado donde asisten numerosos estudiantes, becarios e investigadores nacionales y extranjeros.



Universidad Nacional de Córdoba

RECTOR

Dr. Hugo 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 Ceratto

SECRETARIO GENERAL

Ing. Daniel Lago

SECRETARIO ACADÉMICO (ÁREA INGENIERÍA)

Dra. Magalí Evelin Carro Perez

SECRETARIA ACADÉMICA (ÁREA BIOLOGÍA)

Biol. Analía González

SECRETARIO ACADÉMICO (ÁREA GEOLOGÍA)

Geol. Raúl Eduardo Paredes

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

Dr.a Marcela Cioccale

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

Dr. Federico Pinto

PROSECRETARÍA ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN Y POST-GRADO (ÁREA DE INGENIERÍA)

Dr. Jorge Finochietto

PROSECRETARÍA ACADÉMICA ÁREA INGENIERÍA

Ing. Lisandro Capdevila

PROSECRETARÍA DE VINCULACIÓN TECNOLÓGICA

Ing. Fernando Bianco

SECRETARÍA DE EXTENSIÓN

Ing. Agr. Luis Bosch

Centro de Estudios
y Tecnología del Agua
Facultad de Ciencias
Exactas, Físicas y Na-
turales, UNC.

DIRECCIÓN

Dr. Carlos M. García

SECRETARÍA

Mg. Gerardo Hillman

Revista del CETA

DIRECTOR

Dr. Andrés Rodríguez

EDICIÓN CIENTÍFICA

Dr. Carlos M. García

COORDINACIÓN CIENTÍFICA

Ing. Ricardo Ingaramo

COORDINACIÓN EDITORIAL

Lic. Zusana Boneu

DISEÑO

Agustina Sastre

Vol. 1, N° 3 - 2017

ISSN 2525-0582



Sumario

7 Editorial

9 Observatorio Meteorológico de Córdoba (OMHM) de Córdoba. Integración de sensores hidro-meteorológicos para monitoreo y alerta en la Región Centro de Argentina

15 Recursos humanos e integración

17 Aniversario. 80 años de gestión del agua en la Provincia de Córdoba

19 XXVI Congreso Nacional del Agua 2017

20 Premio INA en CONAGUA

Artículos científicos de CONAGUA 2017

21 Coeficientes de decaimiento areal de la lluvia en el gran San Miguel de Tucumán según la escala de la tormenta.

F. BAZZANO, G. CAAMAÑO NELLI, J. L. MINETTI, G. RAJMIL

28 Evaluación de wetlands de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de efluentes de un tambo robot.

M. C. SCHIERANO, M. A. MAINE, M. C. PANIGATTI

36 Análisis de estadística inferencial de información pluviométrica histórica en presencia de efectos de cambio y variabilidad climática.

M. M. BARAQUET, N. F. GUILLÉN, C. M. GARCÍA

46 Efecto de la afluencia incremental de la chi en la planificación de sistemas hidrotérmicos.

L. ACOSTA ZUÑIGA, R. J. DE ANDRADE

53 Detección y caracterización de floraciones algales en el Embalse San Roque a partir de sensores remotos.

A. GERMÁN, A. FERRAL, D. ROMERO ARIJON, I. BERNASCONI

59 VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.

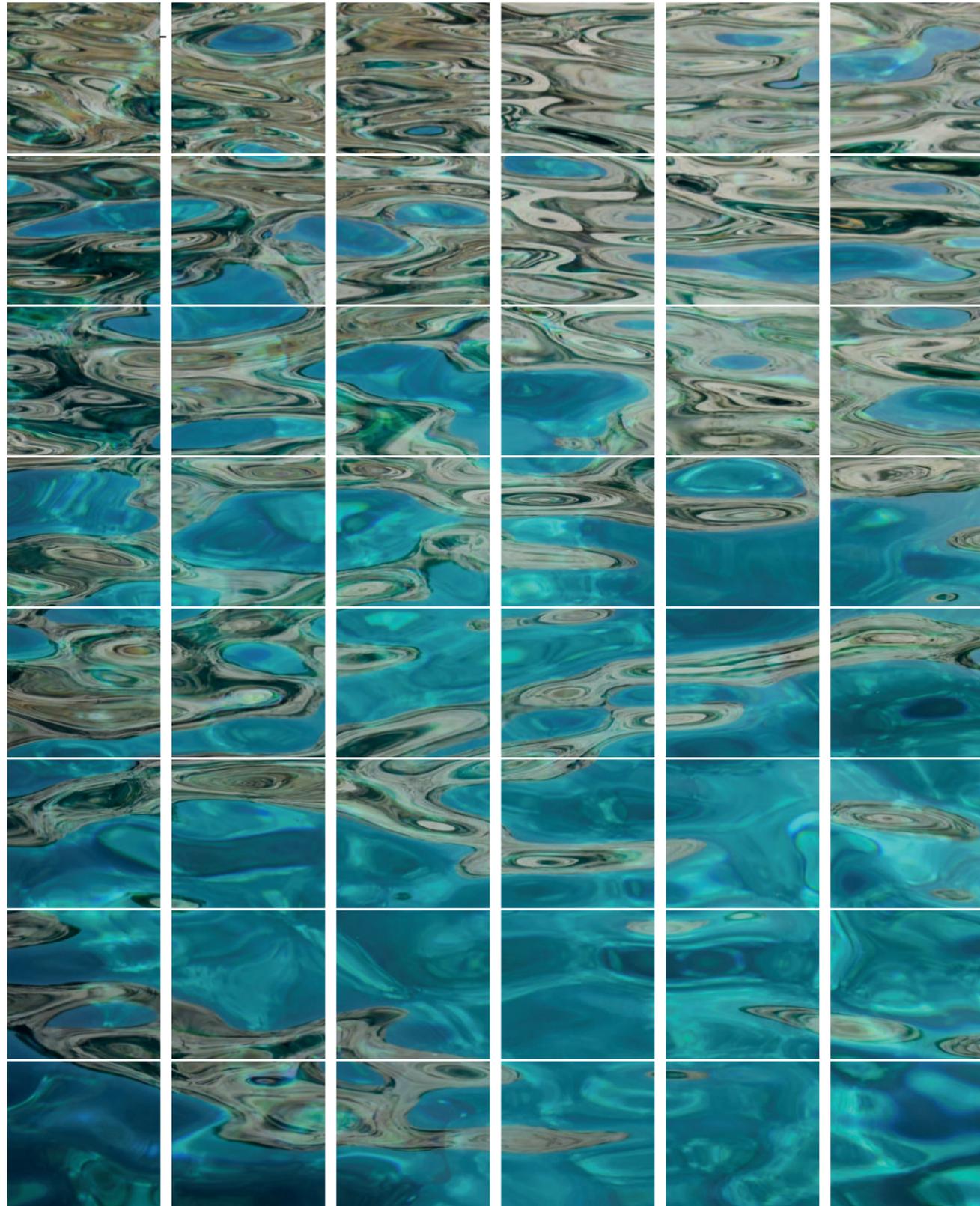
60 Premio Fundación INMAC

Artículos científicos Ríos 2017

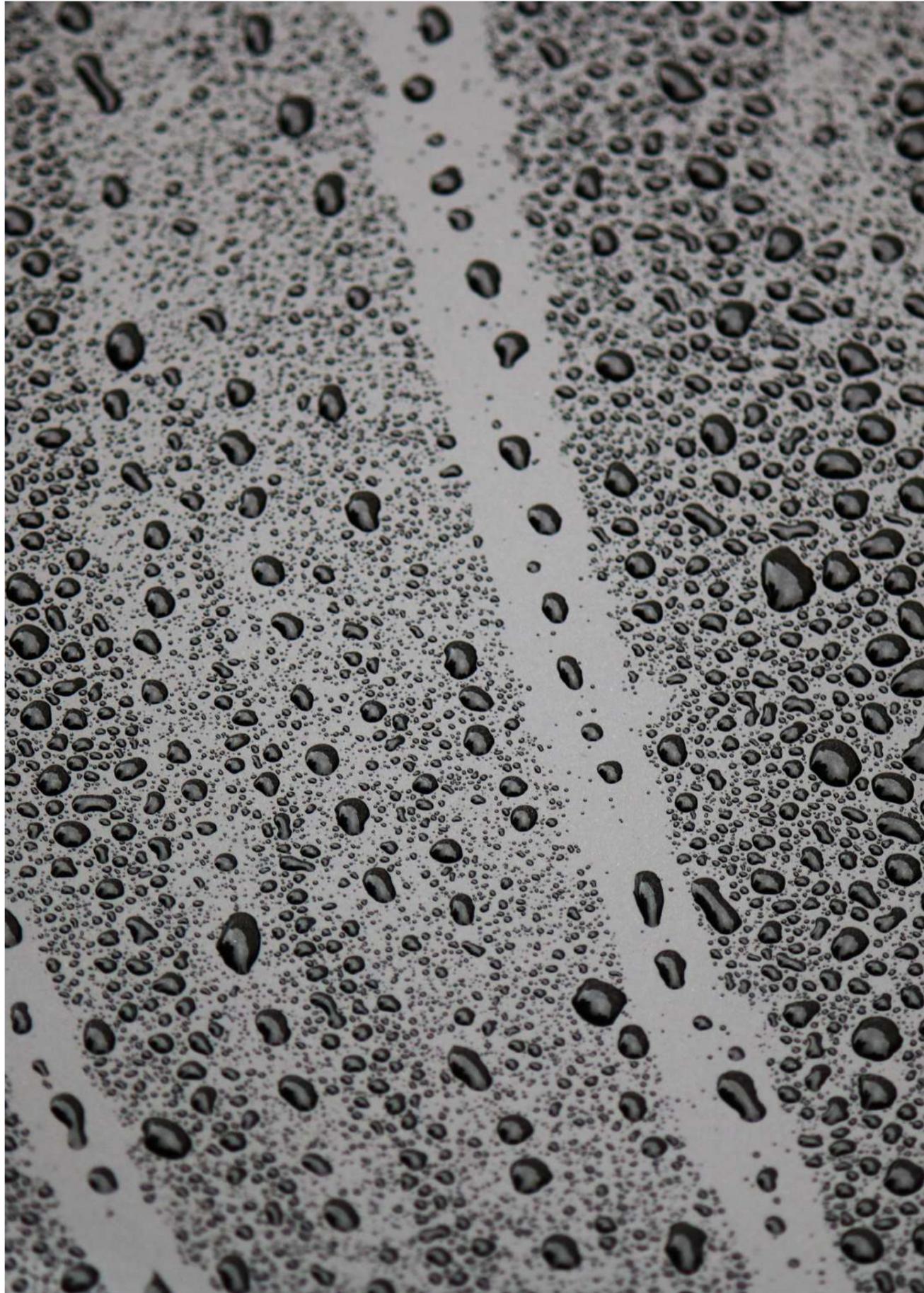
61 Influencia de las corrientes secundarias sobre el sedimento suspendido en meandros de un grande cauce.

Validación de modelo numérico Telemac 2D.

R. DOMÍNGUEZ, R. SZUPIANY, P. TASSI, G. PETKOVSEK



- 65** **Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná.**
F. PERUZZO, G. RICCARDI, P. A. BASILE, M. GARCÍA
- Artículos científicos del CETA*
- 67** **Modelo físico del vertedero de descarga del dique Los Alazanes**
M. EDER, Y. FERRER LÓPEZ, J. MUCHIUT, I. M. RAGESSI, C. JOAQUÍN, M. DAGATTI, L. TARRAB, A. RODRÍGUEZ, A. PATALANO, L. MASSO, C. MONTANARI, H. MURATORE, G. MOYA, M. PAGOT, A. DÍAZ, R. ROMERO, G. PLENCOVICH, E. CASTELLÓ, F. LÓPEZ
- 73** **Bases del Plan Director del Carcarañá.**
P. GYSSEL, C. M. GARCÍA, J. ÁLVAREZ, M. M. BARAQUET, J. M. DÍAZ LOZADA, S. GRANDE, E. JORQUERA, S. MENAJOVSKY, M. PACHER, A. PATALANO, G. PETROLI, C. POZZI, L. TARRAB, A. TESTA TACCHINO, T. VASCHALDE, G. MOYA, R. BAZÁN, A. MONTESINO, O. BARBEITO, S. AMBROSINO, A. L. RYDZEWSKI, M. BONANSEA, M. J. G. ALBO, A. CABRERA, E. MATTEODA, F. BECHER QUINODOZ, L. MALDONADO, V. LUTRI, K. ECHEVARRÍA, H. HERRERO
- 77** **Estudio integral de la Laguna Mar Chiquita.**
M. PAGOT, P. GYSSELS, A. RODRÍGUEZ, C. POZZI, L. TARRAB, A. PATALANO, A. TESTA, G. HILLMAN, C. VARGAS, S. GRANDE, M. PACHER, C. M. GARCÍA, J. M. DÍAZ LOZADA, H. MURATORE, G. MOYA, C. MONTANARI, E. DÍAZ, I. BORNASCONI, G. PLENCOVICH.
- 82** **Cazadores de crecidas.**
A. PATALANO, C. M. GARCÍA, N. F. GUILLÉN, L. MASSO, J. LE COZ
- 85** **Avances en el monitoreo y modelado hidroecológico de embalses en Córdoba: caso Lago San Roque.**
J. MUCHIUT, M. DAGATTI, F. PRYSTUPCZUK, R. GLEZ. REYES, S. RODRÍGUEZ GLEZ, A. RODRÍGUEZ, M. CORRAL, P. GYSSELS, L. A. MURGIO, H. HERRERO, N. GUILLÉN, M. I. RODRÍGUEZ, L. MENGÓ, D. S. ARÁN, A. L. RUIBAL CONTI, M. RUÍZ
- 91** **Implementación operativa de un pronóstico numérico de alta resolución del Laboratorio de Hidráulica.**
A. LIGHEZZOLO, E. NIEVAS LIO, G. ZIGARÁN, I. ASINARI, I. MONTAMAT, A. MARTINA, J. SAFFE, A. PÉREZ HORTAL, M. SCAVUZZO, A. RODRÍGUEZ
- 95** **Calibración del Radar Meteorológico RMA-1**
I. MONTAMAT, J. SAFFE, D. POFFO, A. MATINA, G. CARANTI, A. RODRÍGUEZ, R. COMES, P. SONNA, S. RODRÍGUEZ GLEZ., T. HARTMAN, C. LACUNZA
- 100** **Calibración Hidrológica del Radar Meteorológico Argentino (RMA-1).**
G. PETROLI, R. INGARAMO, C. FURBATO, A. RODRIGUEZ, I. MONTAMAT, A. MARTINA, J. SAFFE, D. POFFO, R. COMES, G. CARANTI, S. RODRÍGUEZ GLEZ., J. C. BERTONI, S. MENAJOVSKY, L. VICARIO, A. VILLA URÍA, C. DASSO
- Extensión académica y de investigación*
- 105** **Regata de medición de caudales de flujo en Córdoba, Argentina.**
C. M. GARCÍA, K. OBERG, R. SZUPIANY, A. PATALANO, J. M. DÍAZ LOZADA, A. HEREDIA LIGORRIA
- 106** **Articulación con diferentes niveles educativos.**
C. M. GARCÍA, J. DÍAZ LOSADA, J. ALVAREZ, BIBILONI, P. FERRARIS, M. BARAQUET, F. FLORES NIETO, A. I. HEREDIA, A. LIGORRIA



Editorial

Este tercer número de la revista del CETA renueva el propósito de difundir temáticas vinculadas a proyectos de investigación y de gestión del centro, ampliando tópicos y enfoques relacionados a la actividad hídrica de nuestra región.

Los trabajos que integran el contenido de la publicación hacen foco principalmente en temas estratégicos relacionados a la Provincia de Córdoba y a la Región Centro. En particular, se incluyen 8 artículos sobre proyectos de investigación del CETA que han sido seleccionados considerando que representan líneas de trabajo prioritarias para la provincia de Córdoba.

Es un honor para la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de nuestra Universidad tener el privilegio y la responsabilidad de llevar adelante estas inversiones. Lograr que el financiamiento del Estado, sostenido por políticas públicas, se traduzca en proyectos, tesis, contratos y publicaciones, es decir, en hechos concretos, conlleva el cumplimiento de nuestra misión como institución pública. Esto implica también una muy grata sensación de realización profesional.

Desde la perspectiva de la proyección científica del CETA nuestro horizonte continúa siendo la defensa del recurso hídrico ante su escasez y su amenaza, producto de su uso intenso y el deterioro de su calidad. Por cierto, es un recurso escaso y vulnerable.

La Región Centro, en general, y Córdoba, en particular, no están exentos de períodos de severas sequías, períodos que muchas veces no forman parte de la agenda de los tomadores de decisiones políticas.

Las sequías se mueven en oscilaciones de décadas y arrasan civilizaciones teniendo consecuencias históricas catastróficas. No tenemos memoria reciente de esto. El Imperio Maya cayó por una intensa y persistente sequía de 25 años y el Imperio Mongol se desplazó hasta las puertas de China y de Europa por una sequía severa en sus estepas.

En nuestro país no somos conscientes de los efectos de la sequía. Vivimos muy pendientes de una coyuntura exigente, destacada por los medios de comunicación, y no advertimos la gravedad de este problema, ni escuchamos la reflexión académica al respecto.

Esta revista es un medio de difusión del CETA, resultado del trabajo de muchas personas, que pretende contribuir a esa reflexión.

Andrés Rodríguez
Director



Observatorio OMHM de Córdoba. Integración de sensores hidro-meteorológicos para monitoreo y alerta en la Región centro de Argentina

A. RODRÍGUEZ (*)
F. LÓPEZ
E. CASTELLO
C. VIGNETTA
R. INGARAMO
G. CARANTI
R. COMES
J. BERTONI
A. MARTINA
J. SAFFE
I. MONTAMAT
D. POFFO
A. LIGHEZZOLO
G. ZIGARÁN
G. PETROLI
S. RODRÍGUEZ GLEZ

* **Coordinador OMHM CBA, GRC, LH UNC e IDIT Conicet, Argentina**

Introducción

La Cuenca del Plata en general, la República Argentina y su Región Centro en particular (integrada por las Provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos) carecen aún de una adecuada coordinación de acciones tendientes al monitoreo de variables hidrometeorológicas y ambientales y su integración con pronósticos a las distintas escalas espaciales involucradas. En los países desarrollados, los sistemas modernos e integrados de alerta existen desde hace varios años (ver e.g. ejemplo europeo en <http://anywhere-h2020.eu/>). En la cuenca del Plata, los 5 países integrantes se reunieron en septiembre 2012 en Buenos Aires para comenzar a explorar una integración regional bajo el auspicio del Programa

Marco del CIC (<http://www.sinarame.gov.ar/www/549/20878/simposio-2012>). En Argentina el programa SiNaRaMe (Sistema Nacional de Radares Meteorológicos) creados por la Sub Secretaría de Recursos Hídricos y el Servicio Meteorológico Nacional fue un inicio pionero de esta integración a nivel país e. g. (Rodríguez & Ciappesoni, 2011 y Rodríguez et al., 2017a), pero aún resta su federalización a los 5 centros regionales previstos en su Segunda Etapa. En este sentido la Región Centro tomó la iniciativa y ya ha realizado 3 Talleres Regionales de integración de sus Sistemas de Alerta, llevados a cabo en Rosario (Santa Fe 2016), Córdoba (Córdoba 2016) y Oro Verde (Entre Ríos 2017); estando previsto para 2018 el IV en Rafaela. En Córdoba recientemente el 31 de marzo de 2017 por iniciativa del Ministerio de Agua Ambiente y Servicios Públicos se creó el Observatorio de Monitoreo Hidrometeorológico, conjuntamente con las instituciones referidas en la Figura 1, (Rodríguez et al. 2017b).

Estos esfuerzos compartidos con los organismos e instituciones que lo integran actualmente (UNC,

SMN, INA, INTA, CONAE, IAAEMG, FAA, INVAP, SGR-CyC Cba., GRC y UNSJ) son sin dudas cada vez más de gran utilidad para la elaboración de pronósticos y alertas en esta zona de gran importancia demográfica y económica del país. Su falta se traduce en un ineficiente tratamiento de las emergencias hidro-meteo-ambientales, con un alto costo en vidas humanas y recursos materiales, cada vez con mayor frecuencia por efecto de la Variabilidad Climática que caracteriza en la actualidad a los fenómenos relacionados con el clima. Además de tormentas e inundaciones es necesario el monitoreo de otros fenómenos ambientales presentes en Córdoba y la región, como son: las floraciones (blooms) algales en embalses destinados al turismo y suministro de agua potable; las tormentas de polvo intensas en la autopista Rosario-Córdoba; las descargas por rayos y los incendios forestales. El propósito de artículo es divulgar y difundir precisamente la novedosa implementación en el OMHM CBA de un Sistema Integrado de Monitoreo Hidro Meteorológico y Ambiental (HMA), que considere los datos de numerosas varia-



Figura 1. Instituciones que integran a 2017 el OMHM CBA.

bles de interés relacionados con la amplia temática hidro-meteo y ambiental (Figura 2), que son relevados por diversos organismos provinciales y nacionales en las tres provincias de la Región Centro. Así se genera información de utilidad para alertar a la población ante la ocurrencia de eventos extremos y contribuir a reducir y mitigar sus impactos.

Objetivos

Los objetivos de un Sistema de estas características son muy amplios y variados:

- Fortalecer el Nodo de la Región Centro del SiNaRaMe y promover la interdisciplinariedad de los grupos integrantes del mismo y su vinculación sinérgica con otros grupos de la Región y el País.
- Contribuir a la Calibración y puesta a punto del primer radar de la serie de SiNaRaMe, RMA1 desarrollado por INVAP (Radar meteorológico Doppler en Banda C con doble polarización simultánea) más moderno de la República Argentina, (ver artículos específicos en la presente revista).
- Facilitar la integración de los Sis-

temas de Monitoreo Hidro-Meteorológicos y Ambiental (actuales y futuros) de la Región Centro, entre los que se cuentan los Radares de Córdoba y Paraná (hoy existentes) y futuros RMA (e.g. Termas de Río Hondo, Corrientes, etc.), las estaciones hidrometeorológicas EMA terrestres existentes y futuras (hoy en Cba. son cerca de 140, y aproximadamente 100 en Santa Fe y Entre Ríos), la incorporación de dos Disdrómetros a las EMA, los sensores de detección de descargas eléctricas (3, con posibilidades de ampliar a 10), los sensores de detección de incendios (en desarrollo), los sensores de monitoreo de lagos (1 en desarrollo, con posibilidades de ampliar a 10), la cuantificación experimental del escurrimiento superficial en los ríos de la región, mediante el uso de modernas técnicas de medición (ADCP y PTV), otros sensores: drones y cámaras remotas sobre red de fibra óptica (1 y 5 cámaras a ampliar), los productos de satélites (los que hoy productos recibe la CONAE, a ampliar con los que ANA/INPE de Brasil están integrando en la Región Centro como

Mar Chiquita y los ríos Paraná y Uruguay, como parte del Proyecto ABC-FOAR), y la optimización de las comunicaciones entre las redes de sensores y el CPR 1. Un objetivo adicional pero no menos relevante es contribuir a la formación de Recursos Humanos especializados en áreas de vacancia a nivel de Maestría y Doctorado (hidro-meteorología y tecnologías avanzadas de comunicación, sensores remotos, medio ambiente y recursos hídricos), así como la difusión de resultados científico-tecnológicos alcanzados en el marco de esta propuesta. En definitiva, se propone el desarrollo de nuevos servicios de alerta específicos a las demandas presentes y futuras en la Región Centro necesarios ante la Variabilidad Climática, hoy no disponibles, para lo cual se van a integrar equipos disciplinares de distintos organismos como Defensa Civil, Universidades, INA, SMN, CONAE, entre otros.

Materiales y Métodos

Para fortalecer el Nodo de la Región Centro del SiNaRaMe y promover la I+D+i interdisciplinaria

de los grupos integrantes del mismo y su vinculación sinérgica con otros grupos de la Región, se realizarán reuniones y talleres ad hoc, la publicación conjunta de resultados y la codirección de becarios y tesistas.

Para permitir la integración de los sistemas de monitoreo se aspira a concretar el primer Centro de Operación de Emergencias (COE) de la Región Centro (un núcleo de información para el manejo de emergencias ambientales y el pronóstico a corto plazo de alta especificidad para la región), incluyendo el Centro Regional de Procesamiento de datos hidrometeorológicos del País, el CPR 1. Este último recibirá, a tiempo real, la información proveniente tanto de las redes regionales de sensores existentes, e.g. estaciones hidrometeorológicas EMA del INA y las de la provincia de Córdoba, Radares Meteorológicos de Córdoba y Paraná, imágenes satelitales, etc., así como de las futuras redes, e.g. nuevas estaciones EMA con Disdrómetros del SiNaRaMe, estaciones de descargas eléctricas de Córdoba, detección de incendios de CBA, estaciones LDS en lagos de CBA como la del San Roque (presentada en un artículo específico de la presente revista), nuevos radares en otras bandas y localizaciones complementarios en su cobertura al RMA1, etc.

Para la Calibración Electrónica y puesta a punto del RMA1, es necesario trabajar sobre los subsistemas del radar: el transmisor (TX) que origina el pulso de microondas, receptor analógico (PRX) que recibe el eco devuelto a la antena, lo acondiciona filtrando ruidos electromagnéticos no deseados y lo amplifica a través de etapas de frecuencia intermedia que tiene incorporadas, y el receptor digital (DRX) el cual digitaliza la señal

y finalmente la deriva al último subsistema involucrado en el sistema de medición constituido por la Unidad de Procesamiento. Al completar la calibración de cada una de estos subsistemas, es posible determinar luego de transmitir un pulso de radar a un blanco meteorológico, por ejemplo, la clase de precipitación y su cuantía al relacionar la potencia del haz transmitido con la intensidad del eco devuelto, este es presentado en mayor detalle en la presente revista en un artículo específico.

La Calibración Hidrológica ya se encuentra en una fase inicial, vía GRC como Nodo Córdoba del SiNaRaMe, y busca caracterizar las funciones de transformación Reflectividad-Precipitación, en función del tipo de meteoro, altura del evento, y corrección por viento, etc. Este proceso se debe realizar contrastando los datos de reflectividad medidos por el radar con datos de lluvia registrados por una red de pluviógrafos en superficie con una alta resolución espacial y temporal. Con el fin de mejorar la calibración y complementar las observaciones de las redes meteorológicas convencionales, resulta conveniente incorporar además mediciones de disdrómetros, que permiten cuantificar la distribución de la precipitación proporcionando el tamaño real de gotas. En la zona de influencia del RMA1, más específicamente dentro de la Provincia de Córdoba, existe una red de cerca de 140 estaciones meteorológicas de superficie que brinda una alta densidad y los datos necesarios para la calibración hidrológica del radar, situación que no es común en el resto del país, esto también es presentado específicamente en Comes et al. (2016) y en otro artículo de la presente revista.

Con respecto a la formación de

recursos humanos especializados, la Universidad Nacional de Córdoba a través de la FAMAf y en el Instituto Universitario Aeronáutico están graduando la segunda cohorte de Especialistas y Magister en Sistemas de Radar e Instrumentación. Por esta razón estas carreras están siendo apoyadas no sólo por medio de la provisión de becas, infraestructura y docentes desde las instituciones involucradas, sino además a través de la creación de un Laboratorio de Microondas y la adquisición de material bibliográfico y digital para el afianzamiento del conocimiento adquirido a través de la práctica profesional. Por su parte la FCEfyN a través del Departamento de Hidráulica puso en marcha en 2016 un Programa de cursos de Postgrado en Hidro-Meteorología para el OMHM, integrado con profesores locales y prestigiosos especialistas del área contando con el valioso apoyo del MAAySP de Cba.

Resultados Preliminares

En la actualidad en la Región Centro se encuentran operativos los radares de Paraná (operado por el INTA) y el de Córdoba (que será operado por el SMN). En la Figura 3 se puede ver un primer ejemplo de integración de ambos radares, en el monitoreo del evento del 10/11/2015. Como se puede apreciar, la complementación de ambos radares permite una mejor descripción de las tormentas mediante su adecuado seguimiento espacial y temporal.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de un producto más completo, denominado WebMet del Grupo Radar Córdoba (GRC), desarrollado para el OMHM CBA, donde se presenta una imagen de la red actual del SiNaRaMe (tormentas el 20/01/2018).

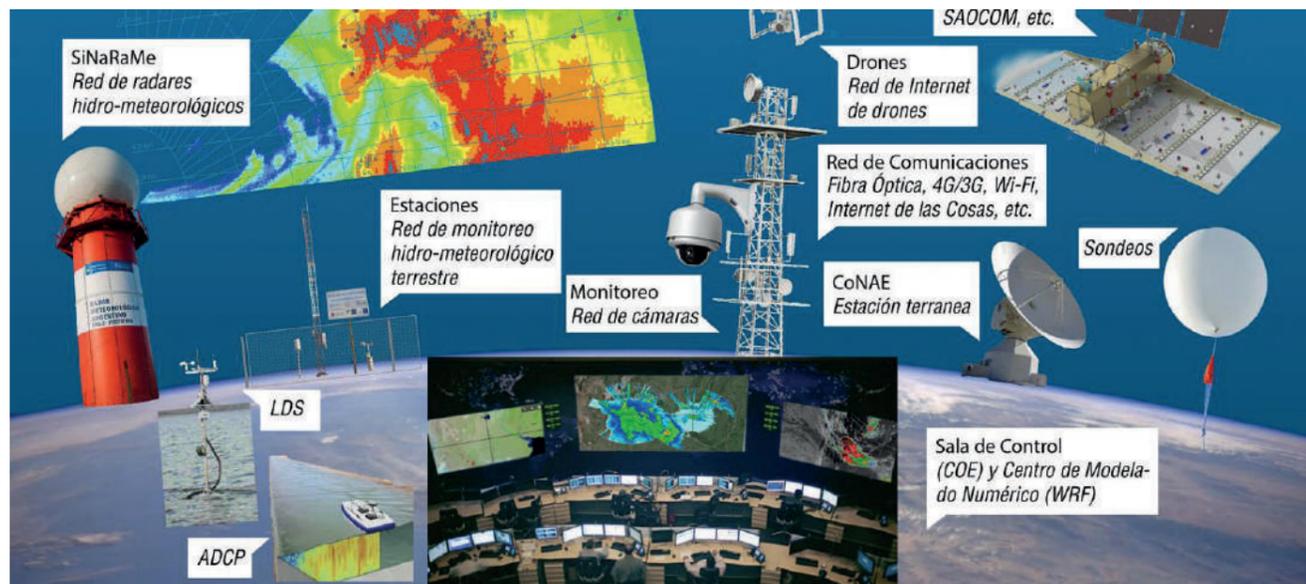


Figura 2. Esquema conceptual del sistema integrado de Monitoreo Hidrometeorológico del OMHM CBA.

Para la calibración hidrológica de los radares se dispone de una amplia red de estaciones meteorológicas de superficie dentro de la Región Centro. Actualmente se está realizando la incorporación de dos disdrómetros (OTT Parsival2) dentro del área de influencia del RMA1 en Córdoba, uno en San Clemente y el otro en Falda del Cañete (ya operativo), ver figura 5.

Para este radar se han relevado y procesado los datos de precipitación registrados por las estaciones meteorológicas automáticas para las tormentas monitoreadas por el RMA1 desde que inició su operación, y se han realizado las primeras experiencias de integración de datos de reflectividad medidos por el radar con esos datos de lluvia. Ver ejemplo de una tormenta intensa en una pequeña cuenca al sur de la ciudad de Córdoba en la Figura 6.

Consideraciones finales

Las mediciones de radar son gran utilidad y amplia aplicación a distintos tipos de eventos, por ejemplo:

- i. la medición de cenizas volcánicas por erupción del volcán Calbuco, medidas por el RMA0 (Bariloche) presentada por Vidal et al (2015),
- ii. la puesta en marcha del RMA1 presentada por Bertoni et al (2015), y la medición de un evento hidrológico severo mediante RMA1 presentada por Comes et al. (2016),
- iii. la comparación de algoritmos de atenuación con datos del radar de Paraná presentada por Poffo et al (2017a),
- iv. y el seguimiento de migraciones de insectos mediante mediciones del RMA1 de Córdoba por Poffo et al. (2018).

La integración del monitoreo de variables hidrometeorológicas y ambientales en la Región Centro del país constituye una iniciativa novedosa, de compleja implementación, pero que permite disponer de una valiosa herramienta para la elaboración de alertas y la prevención de eventos extremos en esta zona del país, los cuales están potenciados en los últimos años por efecto de la Variabilidad Climática.

Se cuenta también con la importante ventaja de disponer de una amplia red de sensores de monitoreo ya disponibles y de recursos humanos altamente calificados, como demuestran los trabajos de calibración electrónica e hidrológica del RMA1, y la simulación numérica detallada mediante WRF para la Región Centro, que acompañan este artículo en el presente número de la Revista CETA.

Finalmente se menciona que este proceso de integración no tiene fecha de finalización, sino que es un proceso de permanente modernización y más teniendo en cuenta los modernos aportes desde la Hidrometeorología satelital (e.g. Saulo y Rodríguez, 2015).

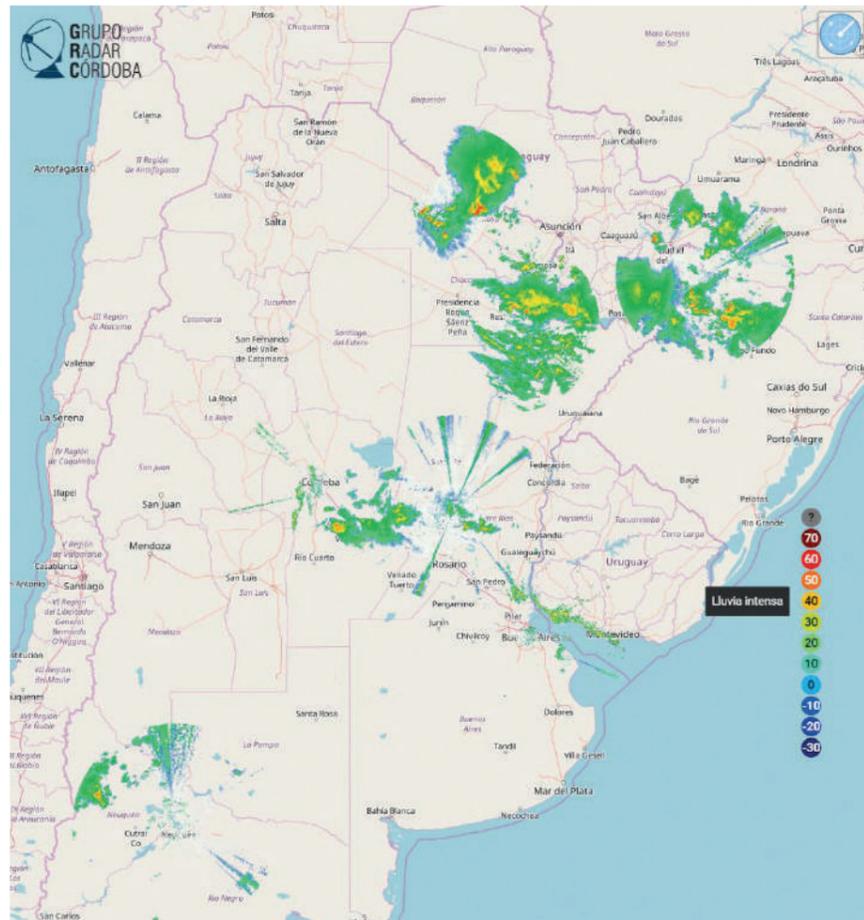


Figura 4. Red actual del SiNaRaMe, visualizada con WebMet desarrollada por el GRC, para el OMHM CBA.

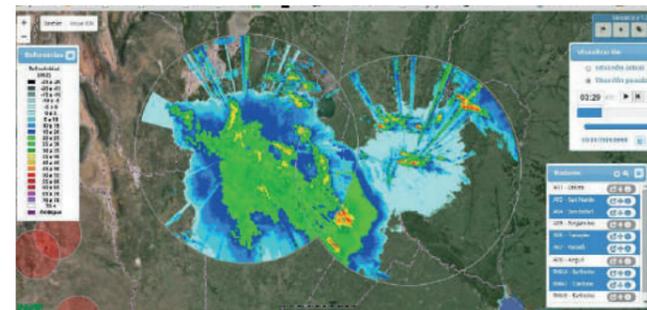


Figura 3. Monitoreo simultáneo de un evento en la Región Centro mediante los radares de Paraná (Gematronics) y de Córdoba (RMA1 INVAP), en mosaico SiNaRaMe.

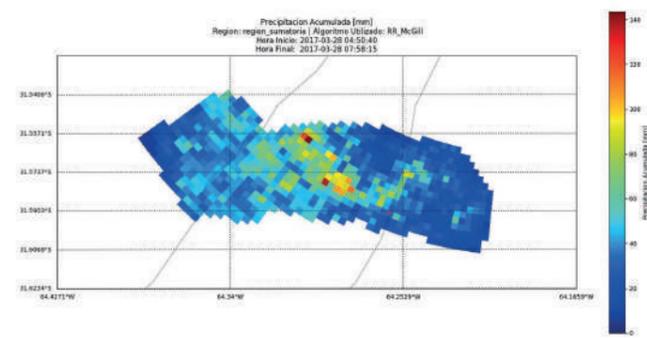


Figura 6. Tormenta medida por RMA1, 28/03/17



Figura 5. Disdrómetro OTT Parsival 2 a ser instalado en la EMA de Bosque Alegre (San Clemente, CBA.), y 5b) Estación EMA de Falda del Cañete.

Referencias Bibliográficas

Bertoni, J. C., et al. (2015). Puesta en marcha del primer Radar Meteorológico Argentino RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba, *XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2015*.

Comes R, et al. (2016). Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo, *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*, Lima, Perú.

Poffo, D., Saffe J., Caranti, G., Comes, R. and Rodríguez, A. (2017). Comparison between two attenuation models and precipitation evaluation with ground validation, *IEEE JSTAR Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 10, No.2, Feb., pg. 417-427, ISSN 1934-1404.

Poffo, D., Beccacece, H., Caranti, G., Comes, R., Drewniak, M., Martina, A., Zapata, A., Rodríguez, A. and Saffe, J. (2018). Migration monitoring of *Ascia monuste* (Lepidoptera) and *Schistocerca cancellata* (Orthoptera) in Argentina using RMA1 weather radar, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier*, (en prensa).

Rodríguez, A. y Ciappesoni, H. (2011). Red Nacional de Radares Meteorológicos, *Rev. Hydria*, Agosto, Año 7, Nro. 36, pg. 18-21, ISSN 1669-5119, Bs. As.

Rodríguez, A., Lacunza, C., Serra, J., Saulo, C., Ciappesoni, H., Caranti, G., Comes, R. y Martina, A. (2017a). SiNaRaMe: El Primer Sistema Integrado de Radares Hidro-Meteorológicos de Latinoamérica. *Rev. de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Na-*

turales, UNC, Arg., Vol. 4, Nro.1, Pg. 41-48, ISSN 2362-2539.

Rodríguez, A., López, F., Castello, E., Vignetta, C., Ingaramo, R., Caranti, G., Comes, R., Bertoni, J., Martina, A., Saffe, J., Montamat, I., Poffo, D., Nievas, E., Lighezzolo, A., Furbatto, C. y Petrolí, G. (2017b). OMHM Cba. para Integración de Sensores Hidrometeorológicos para Monitoreo y Alerta en la Región Centro de Argentina, *XXVI CONAGUA, Córdoba*, pg. 145-146, ISBN 978 987 4029 23 2.

Saulo C y Rodríguez, A. (2015). Los avances en la información hidrometeorológica, *Rev. Hydria*, Año 11, Nro. 54, pg. 32-35, ISSN 1669-5119, Bs. As.

Vidal, L., Nesbitt, S., Salio, P., Osorio, S., Farías, C., Rodríguez, A., Serra, J. and Caranti. (2015). *C-Band Dual-Polarization Observations of a Massive Volcanic Eruption in South America*, Radar Conference of American Society of Meteorology (AMS), Norman (OK), USA.

Formación, capacitación e integración

El Observatorio de Monitoreo Hidrometeorológico, OMHM, promueve la formación y capacitación, de recursos humanos abarcando una diversidad de actividades formales e informales.

En el marco de las actividades formales se incluyen la **Especialidad y Maestría en Sistemas de Radar e Instrumentación**, organizadas conjuntamente por la FAMAFA de la UNC y el IUA de la UNDEF (Figura 1). La Maestría se inició en el año 2012 con el apoyo de INVAP SE, siendo pionera y única en su tipo en Argentina. Actualmente continúa exitosamente con su segunda y tercera cohorte y cuenta con becas de los organismos académicos responsables y del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba (MAAySP). De estos postgrados han egresado destacados profesionales que hoy colaboran desde sus instituciones con el OMHM CBA.

Figura 1. Convocatoria 2018 Postgrado Sistemas Radar e Instrumentación.

Otra de las actividades realizadas es el **Programa de Cursos de Postgrado en Hidrometeorología**, iniciada en 2016 por el Departamento de Hidráulica y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC, contando desde su comienzo con el apoyo activo del MAAySP de Córdoba. Mencionamos algunos de los cursos dictados entre 2016 y 2017:

Variabilidad y Cambio Climático: sus impactos en los Recursos Hídricos de la Región, organizado por el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba y CETA-UNC. Dictaron el curso numerosos expertos del país, entre ellos la Dra. Inés Camilloni (UBA), el Dr. Oscar Dölling (UNSJ) y el In. Rodolfo Iturraspe (UNTF) y docentes de la UNC.

Dinámica de Flujos de la Atmósfera, dictado por los Doctores Raúl Comes y Giorgio Caranti y organizado por la FCFyN y FAMAFA de la UNC.

Meteorología General, Sequías y Sensores Remotos.

Tres cursos dictados por el Dr. Walter Vargas (UBA) y Juan Minetti (UNT- Laboratorio Climatológico Sudamericano). Estuvieron destinados a alumnos de grado y postgrado y de Ingeniería y docentes de la FCFyN y FAMAFA y CONAE.

Se prevé en esta línea temática, para el 2018, los cursos de *Meteorología Sinóptica*, *Estadística Aplicada a la Meteorología* e *Introducción a la Meteorología*.



Curso de sequías.

Otros cursos dictados:

Introducción al modelado meteorológico con WRF (2017) a cargo de Msc. A. Lighezzollo y Lic. A. Pérez Hortal, dirigido a graduados en Ingeniería, Física, Química, Matemática, Astronomía, Ciencias de la Computación, Agrimensura, Geología, Oceanografía, Veterinaria, Meteorología.

Capacitación básica en Radares Meteorológicos (2017) por Mg. Dennis Poffo, (Grupo de RADAR-Laboratorio de Hidráulica FCFyN –UNC) organizado por la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático y Catástrofes.



Taller de capacitación de procesamiento de datos radar.

Simposio

A nivel internacional, se realizó en Córdoba (2016) el *III Simposio de Radarización de la Cuenca del Plata*, y está previsto para septiembre de 2018 la realización de su cuarta edición, con participación de prestigiosos investigadores de los países del Cono Sur y España.

Talleres:

Durante el año 2017, se realizaron tres Talleres: *Procesamiento de Datos Radar*, *Introducción al Modelado con WRF*, *Capacitación Básica en Radares Meteorológicos*.

Está programado para su concreción durante el 2018 el *Taller de estimaciones Satelitales de Precipitación*, organizado por el OMHM y el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la P. Provincia de Córdoba. Será dictado por el Dr. Sergio Masuelli (CONAE), Msc. Andrés Lighezzollo (CONAE) y el Ing. Juan Salva (University Applied Sciences- Cologne) Figura 2.

Taller de Estimaciones Satelitales de Precipitación

Dictado por:
Dr. Sergio Masuelli (CONAE)
Msc. Andrés Lighezzollo (CONAE)
Ing. Juan Salva (University Applied Sciences - Cologne)

Martes 27 de marzo - 9:00 a 13:00hs
Aula SECyT - UNC
ENTRADA LIBRE Y GRATUITA

Logos: CETA, UNC, Observatorio Hidro-Meteorológico, Laboratorio de Hidráulica, Grupo de Usuarios WRF, Grupo Radar Córdoba.

Figura 2. Convocatoria al Taller de estimaciones Satelitales de Precipitación.

Conjuntamente con las actividades de capacitación se organizaron también tres **Talleres de Integración de Sistemas de Alerta en la Región Centro**, en las provincias de Santa Fe en 2016, Entre Ríos y Córdoba en 2017.

Está previsto el VI Taller de Integración de la Región Centro en abril de 2018 en, Santa Fe.



Taller de Integración de Sistema de Alerta de la Región Centro, Córdoba 2017.

80 años de Gestión del Agua en la Provincia de Córdoba

Desde la historia miramos un futuro sustentable

Hoy celebramos los 80 años de los inicios institucionales del organismo rector de la gestión de los Recursos Hídricos en la Provincia de Córdoba, sucesivamente conocido por sus siglas DGH, DPH, DAS, DiPAS, SSRH, SRH, y más recientemente APRHi.

Podemos afirmar con legítimo orgullo que han sido años pioneros en nuestro país en lo concerniente a la gestión integrada de este vital recurso, a su marco legal de aplicación y a la ejecución de innumerables obras que han acompañado el desarrollo de nuestra provincia, tanto en lo referido a la provisión de agua potable y saneamiento, como a la generación hidroeléctrica, la sistematización de cuencas, la expansión de los sistemas de riesgo, de fuentes superficiales como subterráneas, y también al uso recreativo y turístico de los espejos de agua. Asimismo, destacamos el apoyo al desarrollo científico-tecnológico sustentado en el trabajo conjunto con las universidades e institutos con sede en Córdoba.

Sin dudas, nuestra querida provincia no sería lo que hoy es sin la gestión de los recursos hídricos que durante estos 80 años acompañó y apuntaló la pujante y dinámica propia de la economía cordobesa, gestión que actualmente sigue mostrando su empuje y visión con políticas de estado que son acompañadas y seguidas por las jurisdicciones hermanas del Consejo Hídrico Federal.

Pero hoy debemos pararnos sobre la historia y mirar al futuro que nos confronta con nuevos desafíos que nos obligan a continuar con esta gestión integrada pero en el marco de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático, incorporando nuevas tendencias y paradigmas que nos propone la Ingeniería sustentable (verde) y modernas tecnologías como las que se conjugarán en el nuevo Observatorio Hidrometeorológico de Córdoba, pionero en el país y la región.

Mi profundo respeto y reconocimiento a todos los que durante estos 80 años han contribuido al engrandecimiento de nuestra Córdoba a través de la gestión de sus Recursos Hídricos, así como mis fervientes votos de que sigamos honrando ese esfuerzo y dedicación con el trabajo cotidiano renovado detrás de nuevos paradigmas tecnológicos que apuntan a modernas y sustentables políticas públicas.

Ing. Fabián Lopez, Ph.D.

Ministro de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba

XXVI Congreso Nacional del Agua

Hacia una gestión integral

La palabra “iniciativa” significa “acción de adelantarse a los demás” tal como la define la Real Academia Española. Los cordobeses en particular llevamos en nuestro ADN esta cualidad.

En el año 2018 el Día Nacional del Agua tiene un aditamento especial, porque se cumplen 80 años de la creación del modelo de gestión de los recursos hídricos de la provincia de Córdoba, matriz que otras provincias argentinas replicaron.

Las diferentes administraciones que heredaron la labor avanzaron de manera paulatina con significativos aportes, considerando las etapas socio-política y económica del país que debieron atravesar.

La iniciativa de aquellos profesionales que nos precedieron en la Administración de los Recursos Hídricos sentaron las bases para el progreso de nuestra provincia, en el sentido de dimensionar la necesidad de gestionar de manera responsable un recurso vital que trasciende fronteras, razas, e ideologías, el agua.

Los conocimientos e investigaciones como así también los avances tecnológicos son –y han sido– un eslabón imprescindible para aquel modelo. Entre otros aportes, la construcción de la torre del Radar Meteorológico RMA1 en 2007 y su instalación en el 2014, y la creación de un sistema nacional de radares encarado en 2009 (también por iniciativa de cordobeses), constituyen una usina tecnológica de primer nivel y a su vez, el desafío de afianzar un Observatorio de Monitoreo Hidrometeorológico de Córdoba.

El próximo paso será integrar la comunidad cordobesa a través de la educación en el uso responsable del agua. Creando una cultura de respeto sobre nuestros recursos naturales que, para que su ciclo de vida siga vigente, es preciso que los utilicemos de manera eficiente.

La evolución hacia una gestión integral de los recursos hídricos necesita el esfuerzo conjunto de las instituciones, de la academia y de la sociedad en su conjunto. Es este el desafío que nos proponemos en adelante y en el que trabajamos porque de ello depende el futuro de las siguientes generaciones.

Ing. Edgar CASTELLÓ, Mg.
Secretario de Recursos Hídricos

Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba

Gracias, Ing. Italo Chini

Recordar al Ing. Italo Chini y su trayectoria en esta Universidad supone hoy para sus discípulos hacer presente una intensa y riquísima experiencia que los une, tanto en la vida académica y científica, como en la personal.

Italo Chini, Ingeniero Civil de la UNC, largo camino vinculado a la docencia y a la Ingeniería Hidráulica. Se desempeñó en la FCEFN de la UNC como Profesor, Consejero y Director del Departamento de Hidráulica, finalizando como Profesor Titular de Hidrología y profesor de la Maestría en Recursos Hídricos. Fue también director de numerosos estudios y proyectos en Ingeniería Hidráulica, entre los que se destaca la Valoración del Impacto Ambiental del Proyecto Canal Federal en el Sistema de la Laguna de Mar Chiquita. Asimismo, supo entrelazar con coherencia su labor docente, profesional y de gestión como Director de la Empresa Provincial de Obras Sanitarias de Córdoba y de la Dirección Provincial de Hidráulica de Córdoba.

Si consideramos que los maestros tienen un papel muy importante en la formación de sus discípulos y su influencia es fundamental para proyectar el futuro de cada uno de ellos, el Ing. Chini fue un gran maestro para muchos. Por esto no sólo apreciamos la calidad de su aporte ingenieril y la huella docente que trazó en la FCEFN, sino también agradecemos su enorme generosidad y humildad.

Italo Chini será una persona inolvidable y como

dijo alguna vez José Martí: “La muerte no es verdad cuando se ha cumplido bien la obra de la vida”.



Italo Chini con ex discípulos de la FCEFN-UNC cuando recibiera su distinción como “Profesional Destacado” el 31/3/17, de parte del Ministro de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de Córdoba, Dr. Fabián López.

Ing. Claudio Laboranti, Ing. Andrés Rodríguez, Ing. Santiago Reyna, Ing. Italo Chini, Ing. Fabián López, In. Edgar Castelló (delante).

Ing. Luis Toselli, Ing. Antonio Federico, Dr. Raúl Lopardi, Ing. Jorge Saravia, Ing. Juan Carlos Bertoni, Geól. Osvaldo Barbeito, Dra. Celeste Saulo (detrás).



XXVI CONGRESO NACIONAL DEL AGUA

Siguiendo con la tradición expresada a través de más de cinco décadas de presencia ininterrumpida en los Congresos Nacionales del Agua, se celebró en la ciudad de Córdoba, entre los días 20 y 23 de septiembre de 2017, el XXVI Congreso “CONAGUA 2017”.

Las temáticas abordadas en el encuentro abarcan tópicos variados, atravesando un amplio espectro de aspectos relativos a la cuestión del agua en sus diferentes facetas, contribuyendo a mejorar el conocimiento de múltiples y complejas problemáticas asociadas con el uso eficiente y gestión sustentable de los recursos hídricos, en sus diversas escalas espaciales y temporales.

Más de 700 profesionales, docentes, investigadores, planificadores, técnicos y tomadores de decisiones vinculados a la temática de uso, gestión, control y

preservación de los recursos hídricos, participaron a través de la presentación de trabajos y ponencias. Las conferencias magistrales estuvieron a cargo de los ingenieros Víctor Ponce (Estados Unidos), Javier Tomasella (Brasil) y Julián Báez (Paraguay). Asimismo, un importante elenco de panelistas y profesionales especialistas del país integraron las mesas redondas en donde se debatieron y analizaron: las Inundaciones en la Pampa Deprimida, Eventos Hidrometeorológicos Severos ante la Variabilidad y Cambio Climático, y la Energía Hidroeléctrica como Política de Estado en un contexto de sustentabilidad.

En el Congreso además se programaron espacios de debate y análisis, a partir de los trabajos presentados por diversos profesionales, quienes expusieron proyectos e investigaciones que nutrieron las sesiones técnicas, enriqueciendo este encuentro técnico-científico.

Complementariamente, se instaló EXPOAGUA, un despliegue de tecnología donde las principales empresas y entidades del sector presentaron sus desarrollos y novedades.

Las instituciones organizadoras del Congreso han sido: la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, el Comité Permanente del Congreso del Agua y EPEC, Empresa Provincial de Energía de Córdoba.



Premio INA en el CONAGUA 2017

En el marco de este Congreso, el 22 de septiembre, se entregó el premio INA (Instituto Nacional del Agua) a los jóvenes investigadores que se inician en el área de los Recursos Hídricos, su preservación y gestión. La selección se hizo sobre más de 300 artículos científicos de excelente calidad presentados por autores de menos de 35 años en los distintos ejes temáticos que abordó este encuentro. Participaron del acto de premiación, los Ingenieros Daniel Bacchiega y Carlos Catalini representando al Instituto Nacional del Agua, así como autoridades de la Provincia de Córdoba y Santa Fe y la Junta Directiva del Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua.

En esta ocasión, se entregó un primer premio y 4 menciones especiales:

FLAVIA BAZZANO de la Universidad Nacional de Tucumán, fue la ganadora del 1er. Premio con su trabajo en hidrología urbana y rural, “*Hietogramas para diseño hidrológico: Contraste de técnicas aplicadas en San Miguel de Tucumán*”.

Las 4 menciones especiales fueron para: **MARIA CELESTE SCHIERANO** (CONICET, UTN Rafaela), por su trabajo “*Evaluación de Wetlands de flujo superficial horizontal para el tratamiento de efluentes de un tambo robot*”; **MARIA MAGDALENA BARAQUET** (Centro de Estudios y Tecnología del Agua, UNC), por su proyecto “*Análisis de estadística inferencial de información pluviométrica histórica en presencia de cambio y variabilidad climática*”; **LORENA ACOSTA ZUÑIGA** (UNILA), por su investigación “*Efecto de la afluencia incremental de la CHI en la planificación de la operación de sistemas hidrotérmicos*”; y **ALBA GERMAN** (SRGCba-Gulich), por su trabajo “*Detección y caracterización de floraciones algales en el embalse San Roque a partir de sensores remotos*”.



Coefficientes de Decaimiento Areal de la Lluvia en el Gran San Miguel de Tucumán según la Escala de la Tormenta

FLAVIA BAZZANO
GABRIEL CAAMAÑO NELLI
JUAN L. MINETTI
GERMÁN RAJMIL

Introducción

La modelación de la crecida de proyecto a partir de la lluvia de diseño es un procedimiento frecuente ante la falta de series históricas de caudal, que posibilite su evaluación directa. La lámina puntual estimada, según la función intensidad – duración – recurrencia (i-d-T), es representativa de un área pequeña alrededor de la estación de medición (2,5 a 25 km² según las condiciones locales). Esto es así, porque la lluvia no se presenta, en general, en forma uniforme si no que decae al alejarse de su núcleo máximo, con lo cual será necesario determinarla. Precipitación Media Areal (PMA) en la cuenca de aporte para alimentar el modelo de transformación lluvia-caudal.

El procedimiento corriente para evaluar la PMA consiste en afectar la precipitación puntual con un Coeficiente de Decaimiento Areal (CDA), que representa un porcentaje de la lluvia local a tomar como promedio superficial. Dichos coeficientes aumentan al incrementarse la duración, puesto que tormentas más largas tienden a solaparse con otras provocando una mayor uniformidad espacial del suceso (Catalini y Caamaño Nelli, 2003). Por el contrario, varían en forma

inversa al área, producto de su decaimiento a partir del núcleo. La dependencia de los CDA con la recurrencia también ha sido demostrada (Allen y De Gaetano, 2005; Pavlovic et al., 2016), aunque para dicho análisis se requiere largas series de registros simultáneos.

La incidencia de la escala de la tormenta en los CDA ha sido materia de trabajos antecedentes (Skaugen, 1997), donde se evidencia un decaimiento más pronunciado para tormentas reducidas en comparación con las de mayor escala. La escala espacial de un suceso determina en gran medida su magnitud, en vista de que define el volumen de agua arrojado sobre el territorio. Es así como una intensa tormenta que abarca sólo unos pocos kilómetros cuadrados no tendrá la misma relevancia que una que abarque por completo la cuenca de aporte y aún más la supere. Lo mismo sucede al analizar las duraciones de los fenómenos: si una tormenta sólo dura algunos minutos por alta que sea su intensidad no precipita sobre la cuenca una cantidad de agua considerable.

El empleo de factores de reducción areal determinados en sitios alejados es frecuente (Omelayo, 1993), debido a que las técnicas de obtención resultan laboriosas y demandan registros de alta frecuencia simultáneos, rara vez disponibles. En este sentido, los resultados publicados por el U.S. Bureau (1958) en Estados Unidos de América y los posteriores logrados por el

NERC (1975) en el Reino Unido se utilizan frecuentemente, a pesar de que las curvas de reducción a real no tienen validez universal, y por el contrario, se encuentran fuertemente influenciadas por las condiciones locales. Esto se verifica en los resultados obtenidos en las provincias de Córdoba (García et al., 2000), Santa Fe (Zimmermann et al., 2000) Mendoza (Fernández et al., 1999) y en el Gran San Miguel de Tucumán (Lazarte Sfer, 2005), que presentan tanto diferencias entre sí como con los resultados mencionados anteriormente.

El modelo CoDA (García et al., 2000), desarrollado en una cuenca de montaña en la zona central del país, expresa analíticamente los CDA como una función continua de la duración y el área. El presente trabajo emplea dicha metodología para estudiar el decaimiento areal con series de corta duración, mediante la selección de tormentas severas registradas en la red dispuesta en el Gran San Miguel de Tucumán. Se verifica, además, la influencia de la escala de las tormentas utilizadas en la calibración, sobre las curvas de abatimiento del modelo.

Análisis de la información

El sistema de estudio involucra la ciudad capital de la provincia de Tucumán (26°49'59"S, 65°13'00"W) y ciudades satélites, incluyendo parcialmente los departamentos de Tafi Viejo, Yerba

Buena, Lules y Cruz Alta. Este gran conglomerado que concentra cerca del 50 % de la población tucumana, sufrió un acelerado crecimiento sin un adecuado planeamiento de los desagües pluviales, provocando un aumento de las inundaciones urbanas, con el consecuente deterioro de la calidad de vida de la población.

El régimen regional de lluvias es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta concentración estival de la precipitación, ocurriendo entre noviembre y marzo entre el 50 % y el 80 % de las lluvias anuales, seguidas de una estación invernal seca. La variabilidad espacial de la precipitación se encuentra fuertemente influenciada por el importante cordón montañoso al oeste y las sierras del norte que, aunque son de menor altura, inciden en la conformación de los intensos episodios pluviales.

La base de datos utilizada se origina en octubre del año 2000 al disponer el Laboratorio de Construcciones Hidráulicas (LCH) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) 7 estaciones meteorológicas automáticas en la zona del Gran San Miguel de Tucumán. Las mismas fueron complementadas con otras operadas por el Instituto de Estudios Geográficos (IEG) y la Facultad de Agronomía y Zootecnia (FAZ) de la misma Universidad, el Laboratorio Climatológico Sudamericano (LCS), la Dirección de Recursos Hídricos de Tucumán (DRRHH) y varias provistas por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), cuyo registro en las cercanías de la ciudad capital abarca todo el período estudiado y constituye una referencia para el estudio. La ubicación de cada una de las estaciones se presenta en la junto con el intervalo de medición y la institución que la opera.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas

N	Estación	Latitud	Longitud	Cota (msnm)	Intervalo (min)	Fuente
1	EEAOC	-26° 47' 16"	-65° 11' 41"	462	30 / 15	EEAOC
2	San Javier	-26° 49' 39"	-65° 22' 16"	1363	5	I.E.G.
3	Yerba Buena	-26° 48' 37"	-65° 18' 18"	531	5	LCH
4	La Sevillanita	-26° 49' 23"	-65° 07' 58"	482	5	LCH
5	Ingeco	-26° 53' 0"	-65° 13' 39"	433	5	LCH
6	Zona Franca	-26° 52' 14"	-65° 09' 56"	430	5	LCH
7	La Cartujana	-26° 47' 25"	-65° 15' 16"	556	15	LCH
8	Citromax	-26° 44' 29"	-65° 16' 8"	681	5	LCH
9	Los Nogales	-26° 44' 37"	-65° 13' 2"	574	5	LCH
10	Centro 1	-26° 49' 36"	-65° 12' 47"	436	5	LCH
11	El Manantial	-26° 50' 13"	-65° 16' 21"	451	30	FAZ
12	Parque 9 de Julio	-26° 49' 30"	-65° 11' 10"	471	15	I.E.G.
13	Centro 2	-26° 49' 17"	-65° 11' 59"	460	30	Flia W.
14	LCS	26°49'55"S	65°13'5"W	430	30	L.C.S
15	Lules (La Bomba)	26°54'34"S	65°21'7"W	440	15	EEAOC
16	Banda del Río Sali	26°50'59"S	65° 8'10"W	439	30	EEAOC
17	San Pablo	26°51' 27"S	65°17' 39"W	423	60	EEAOC
18	DRRHH	26°50' 30"S	65°11' 46"W	426	60	DRH

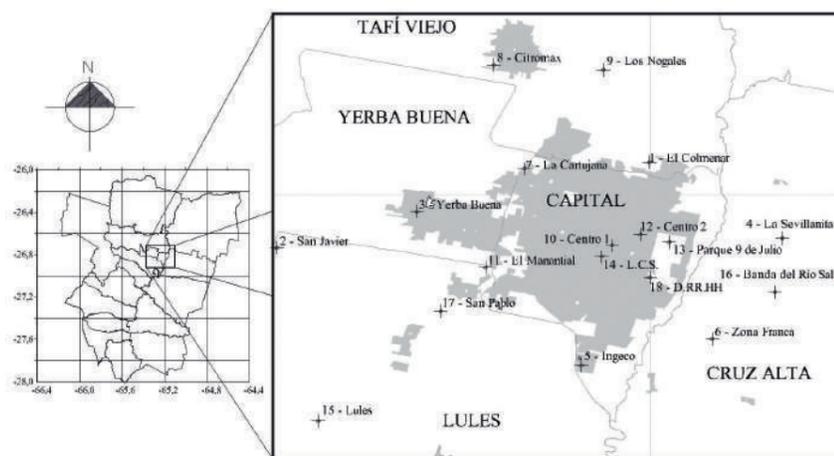


Figura 1. Localización de las estaciones de medición en la zona del gran San Miguel de Tucumán.

Selección de tormentas: Análisis de la escala espacial y temporal

La corta longitud de las series temporales registradas y el hecho que ciertos años presenten varios episodios lluviosos superiores al máximo encontrado en otros años derivó en la utilización de series parciales, estableciendo como umbral la lámina estimada para un periodo de retorno de 5 años, recurrencia utilizada en el diseño de desagües urbanos. Se extraen dichos montos de la relación i-d-T local (Bazzano et al., 2015), correspondientes a las duraciones 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos (Tabla 2), y se seleccionan del registro de cada estación aquellos episodios lluviosos que superan dicho umbral para alguna de las duraciones.

Las escalas espacial y temporal de los sucesos pluviales, se encuentran estrechamente relacionadas, hecho que se manifiesta con el gran desarrollo espacial de los fenómenos meteorológicos prolongados y viceversa (Markowski y Richardson, 2010). La calibración del algoritmo de atenuación sin mediar análisis de dichas escalas puede derivar en un excesivo decaimiento, al considerar cortos episodios lluviosos locales sin gran desarrollo espacial.

Según Minetti y Vargas (2005), los frentes fríos y la actividad prefrontal, son los mecanismos generadores de las precipitaciones de mayor volumen en el noroeste argentino. Los mismos se encuentran asociados a fenómenos de meso escala que abarcan longitudes horizontales mayores a 20 km y duraciones superiores a 1 hora (Orlansky, 1975).

Para deducir la escala de las tormentas seleccionadas se tiene

en cuenta su duración y cobertura espacial. Para lo último, se trazan isohietas de los totales acumulados en los días correspondientes a las tormentas seleccionadas, mediante información aportada por la red pluviométrica provincial. Se considera el área cubierta por la isohieta de 50 mm/día como la zona receptora de una precipitación de gran volumen. La clasificación de las tormentas distingue aquellas consideradas de Gran Escala (GE), por su extensa cobertura y persistencia, de otras de Pequeña Escala (PE), evidenciadas como

Tabla 2. Lámina máxima estimada en San Miguel de Tucumán para un período de retorno de 5 años.

H (mm)	Duración (min)							
	15	30	60	120	180	360	720	1440
H (mm)	31,3	43,9	58,5	74,2	83,5	98,6	111,4	120,9

este supuesto, es de esperar que el algoritmo de decaimiento areal sea calibrado con eventos equivalentes, y no con las tormentas utilizadas tradicionalmente, ya que son estos montos los que se desea atenuar.

Al trabajar con series parciales se altera la condición de máxima anual por los Intervalos de Máxima de cada Tormenta (IMT) seleccionada, con duraciones de 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720 y 1440 minutos. La mínima persistencia se justifica por tratarse de una cuenca urbana, con altas pendientes y, por lo tanto, breves tiempos de concentración. El límite superior viene dado por el tamaño de la cuenca y porque los fenómenos pluviales en la región no prevalecen, por lo general, para duraciones mayores, con lo que un intervalo más largo no aportaría información al algoritmo. Las lluvias caídas en estos lapsos, sobre toda la superficie del sistema, constituyen los eventos bajo estudio. La elección de la estación núcleo se realiza para cada

núcleos de precipitación aislados de corta duración. La calibración del modelo se realiza para ambos tipos en forma diferenciada, a fin de estudiar su incidencia en el decaimiento areal de la lluvia.

Procedimiento

La calibración de los modelos de predicción de lluvias máximas se realiza sobre los Intervalos de Máxima intensidad Anual de Lluvia (IMA) (Caamaño Nelli y García, 1999), que no requieren de umbrales de lámina e intensidad y tiempo máximo entre lluvias. Bajo

IMT, de forma que el decaimiento areal de la precipitación resulta siempre decreciente desde el núcleo asumido.

El área cubierta por la red de medición no corresponde a una cuenca de aporte específica, por lo que el análisis se realiza sobre una poligonal sujeta a las estaciones que registraron simultáneamente. La red de pluviómetros de alta frecuencia presentó importantes modificaciones a lo largo del período de estudio: mientras algunos dejaron de funcionar se incorporaron otros que permitieron analizar eventos recientes. Además, los faltantes de información durante las tormentas escogidas provocaron variaciones aún en el período de funcionamiento de algunas estaciones. Es así como, se impone un mínimo de 6 estaciones para que la tasa de decaimiento areal estimada sea confiable, y se plantea para cada configuración los correspondientes polígonos de Thiessen. Para la traza del límite externo del sistema se une las esta-

ciones exteriores con un poligonal y se extrapola cada segmento, conservando su forma original, a una distancia igual a la máxima entre una estación exterior y la frontera del polígono propio a su estación vecina. Este criterio asume que, si la estación es representativa hacia adentro en una dada distancia, de igual forma lo será para su recíproca distancia exterior. Se elige adoptar la máxima distancia de forma de abarcar la mayor superficie razonable.

Para cada evento, se define una serie de círculos centrados en la estación núcleo, con un radio incremental de 3 km hasta abarcar por completo la poligonal definida anteriormente. Esta disposición permite analizar la variación espacial mediante incrementos sucesivos de área. Se calculan, para las superficies progresivas, coeficientes de peso propios a cada estación, en función de la participación de su polígono de Thiessen en el área total inscrita en el círculo. En la Figura 2 se presenta un ejemplo de la configuración adoptada, según las estaciones activas en la tormenta del día 25 de febrero de 2001.

La PMA se determina sumando los registros de las estaciones, afectados por su respectivo coeficiente de peso. Luego, si llamamos P_0 a la precipitación en la estación núcleo, el CDA para cada IMT, se calcula como el cociente de la ecuación (2).

$$CDA = \frac{PMA}{P_0} \quad (1)$$

Los cocientes calculados se grafican por duración en vista que su comportamiento varía según esta variable. Investigaciones previas sugieren que el CDA es una función potencial o exponencial del área, A. Se utiliza en el presente artículo la expresión obtenida por García et al. (2000), tras eva-

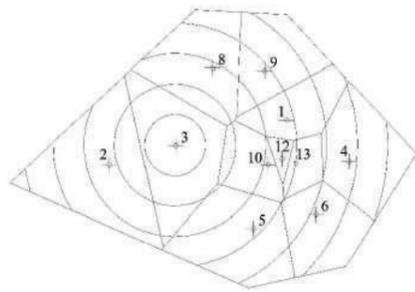


Figura 2. Esquema de análisis correspondiente a la tormenta del día 25/02/2001 según las estaciones activas.

luar el ajuste de los cocientes a las funciones mencionadas:

$$CDA = 25^{-k} A^k \quad \ln CDA = k \ln A - k \ln 25 \quad (2)$$

La expresión es válida cuando $A > 25 \text{ km}^2$ y $k < 0$, porque asume que el estimador local de lámina es válido para áreas menores a 25 km^2 , con lo que el CDA es unitario. Para mayores valores de área, este coeficiente decae en forma potencial.

Una vez obtenidas las curvas para cada duración, se condensan las funciones definiendo analíticamente la variación de k con la duración según una función potencial, de la forma:

$$-k = a \times d^{-b} \quad (3)$$

Se completa así la calibración del modelo CoDA (Catalini y Caamaño Nelli, 2003) que representa

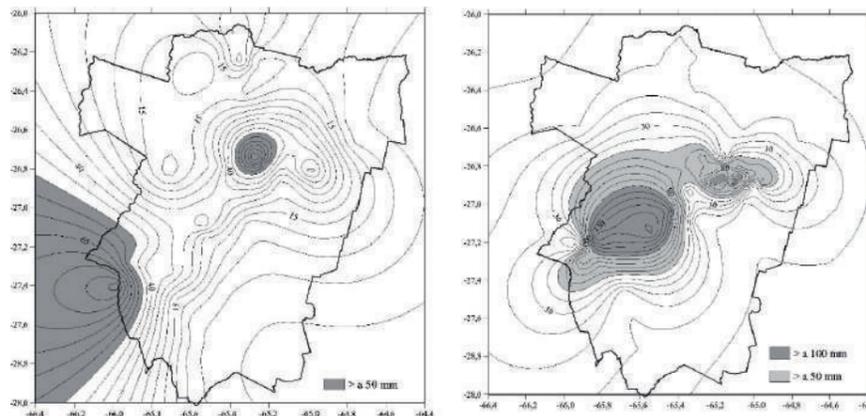


Figura 3. Isohietas diarias para los días 4 de enero de 2001 (a la izquierda) y 2 de enero de 2006 (a la derecha).

una familia tridimensional de curvas de donde valorar el CDA, aún para duraciones no analizadas.

Resultados y discusión

Las tormentas que superaron la lluvia de 5 años de período de retorno fueron 25, aunque 7 fueron descartadas, por no existir un registro simultáneo de 6 estaciones (Tabla 3). Las gráficas de isohietas diarias coincidentes con los 18 intensos episodios lluviosos restantes permitieron evaluar su área de cobertura. Dos de ellas se presentan en la Figura 3 en correspondencia con los días 2 de enero de 2006 y 04 de enero de 2001. En la primera se observa que la superficie receptora de un gran volumen de agua se extiende en la zona serrana y pedeserrana del oeste y abarca gran parte de la región llana del este. La extensión de dicha zona se encuentra limitada hacia el oeste por la divisoria de aguas representada por las sierras del Aconquija y hacia el norte por las sierras de La Ramada y Medina, lo que denota la influencia del factor orográfico en la precipitación, ya evidenciado en trabajos antecedentes (Minetti y Vargas, 2005). Por su parte, el campo de isohietas propio a la segunda mencionada representa, a diferencia de la an-

terior, una tormenta de escala reducida sobre la capital provincial, que ocurre simultáneamente con una de mayor escala ubicada en la región suroeste de la provincia.

En la Tabla 3 se aprecia el vínculo entre la escala espacial y temporal de las tormentas analizadas, donde aquellas que persisten más de 10 horas abarcan siempre longitudes horizontales, LH, mayores que 70 km con excedencia de 50 mm de precipitación diaria. Dichas tormentas, fueron designadas cualitativamente como de Gran Escala y se diferenciaron de aquellas que se presentan como núcleos aislados de tormentas intensas, con duraciones que oscilan entre 3 a 8 horas, clasificadas como de Pequeña Escala. La clasificación propuesta atiende sólo a verificar la influencia del volumen de la tormenta en el decaimiento areal de la lámina, aunque podría tener relación con su mecanismo generador, análisis que excede el presente trabajo.

El ajuste de los CDA observados, diferenciados según la escala de la tormenta se hizo para duraciones de 15, 180 y 1440 minutos (Figura 4). El resultado obtenido para 15 minutos es idéntico en ambos casos indicando que para duraciones cortas el decaimiento no se altera por la escala de la tormenta. Por el contrario, la diferencia es notable para 1440 minutos. La lluvia caída se presenta más uniforme en mayores escalas de tormenta, alcanzando un valor de 0,70 para

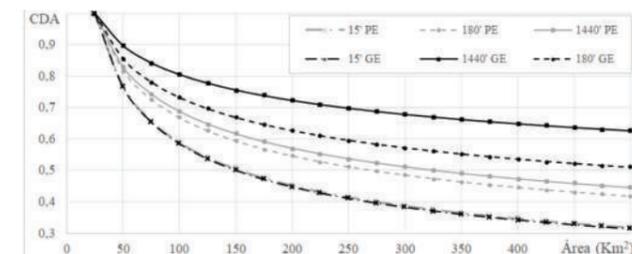


Figura 4. Trazas de la superficie de atenuación areal según la escala de la tormenta.

un área de 250 km^2 que supera al 0,54 obtenido para las tormentas de escala reducida. En el caso de los intervalos de 180 minutos se evidencia la disparidad de resultados entre ambas tipologías y el hecho que las tormentas de gran escala presentan menor decaimiento para esta duración que las de pequeña escala con la máxima persistencia. Este resultado pone de manifiesto la importancia de estudiar la escala de las tormentas, principalmente cuando son de interés las lluvias prolongadas.

Modelar la reducción areal de la lluvia considerando solo eventos pluviales de gran escala significa asumir la situación más extrema, y en consecuencia, alterar la recurrencia de la lámina futura estimada. Dado que la recurrencia ya ha sido escogida (según la envergadura del proyecto) al estimar la lluvia puntual, corresponde afectarla lo menos posible, adoptando la condición de decaimiento

más probable. Teniendo en cuenta esto, se emplearon ambas categorías para ajustar el algoritmo, aunque sólo para aquellas duraciones menores o iguales a la persistencia real de la lluvia ocurrida en cada evento. Es decir que sólo se consideraron aquellos IMT donde se registró precipitación a lo largo de toda su duración y se descartaron aquellos donde la lluvia abarca tan sólo una porción del evento. Esta forma de proceder contempla la escala temporal de la tormenta y por su intermedio la escala espacial, dado que ambas se encuentran relacionadas y se ha observado que aquellas con gran cobertura espacial presentan, a su vez, largas duraciones. Por otra parte, aquellas tormentas con intervalos de registro de 1 hora, sólo se utilizaron para IMT de duraciones mayores o iguales a dicho lapso, por no poder inferir su distribución temporal para persistencias menores. El número de eventos utilizados

Tabla 3. Clasificación de las tormentas según su escala.

N°	Fecha de Inicio	LH (km)	Duración (h)	Tipo	N° de estaciones
1	28/11/2000	123,9	21,7	GE	10
2	04/01/2001	26,4	7,25	PE	8
3	11/02/2001	144,14	14,3	GE	9
4	25/02/2001	6,74	6	PE	11
5	04/03/2001	54,5	4,6	PE	10
6	18/03/2001	161,0	34,17	GE	8
7	14/04/2001	157,3	17,25	GE	7
8	31/12/2004	45,1	4	PE	7
9	02/01/2006	145,9	14,58	GE	8
10	16/01/2006	155,6	11,42	GE	6
11	05/01/2007	72,6	25,42	GE	8
12	03/01/2008	52,6	8,42	GE	8
13	18/02/2008	107,0	10	GE	7
14	21/02/2008	23,0	4,5	PE	8
15	11/01/2014	6	29,08	GE	7
16	29/01/2015	18,0	3,33	PE	6
17	15/02/2015	74,0	21,67	GE	6
18	25/02/2015	159,8	42,83	GE	6

por duración resultó variable, con un mínimo de 8 eventos para 1440 minutos.

El ajuste para cada duración por separado evidenció una gran dispersión en los resultados. Se observa en la Figura 5, los CDA obtenidos para los eventos de 180 y 1440 minutos de duración. El menor decaimiento es notable en los eventos más duraderos aunque ambas abarcan un amplio rango de valores.

Las curvas para cada duración representan una tendencia media y se extrajo los valores del coeficiente k de cada una de ellas para estudiar su variación con respecto a la duración, y así generar un modelo de carácter general que represente una superficie tridimensional continua, y por lo tanto permitavaluar los coeficientes para duraciones no ensayadas. La variación del parámetro k según la duración del evento se presenta en la Figura 6.

Finalmente, el modelo CoDA calibrado para el presente sistema experimental genera la familia de curvas presentada en la Figura 7, que responde a las expresiones^{(1),(4)}:

$$k = -0,662 d^{-0,191} \quad (4)$$

Se aprecia en la gráfica resultante que la traza para 1440 minutos es similar a la presentada anteriormente para tormentas de gran escala, resultado esperable en vista de que sólo éstas aportan información para dicha duración. La curva para 180 minutos presenta un valor intermedio entre las resultantes del análisis anterior.

Comparando los resultados con los obtenidos en la cuenca del río San Antonio, en la provincia de Córdoba, donde se utiliza el mismo modelo, se observa para 1440 minutos que el decaimiento es más pronunciado en la capital tucumana, siendo el CDA para 500 km² superior a 0,85, mucho mayor que

0,61 obtenido en el presente. Sin embargo, para duraciones cortas los resultados presentan mayor proximidad, alcanzando en ambos casos valores de 0,35 en igual extensión para 30 minutos. Si bien existen diferencias metodológicas en ambos estudios, se manifiesta la dependencia de los CDA a condiciones propias a la región, lo que evidencia la problemática de transponer este tipo de algoritmos a regiones apartadas del sitio de calibración.

Conclusiones

- La utilización de series parciales aumenta el número de eventos de análisis otorgando mayor confiabilidad a los resultados, allí donde

las series de medición son demasiado cortas. El umbral fijado, asociado a una recurrencia, evita el uso de un valor arbitrario.

- La variación del área de estudio, según los datos disponibles, permite abarcar todo el periodo de registro a pesar de las alteraciones sufridas en la red y asegura una cobertura espacial de datos suficiente en todos los eventos analizados.

- Las isohietas diarias visualizan la cobertura de las tormentas y, junto a su duración, permiten caracterizar a las tormentas en pequeña o gran escala.

- La diferencia de escala existente en los eventos pluviales tiene gran influencia en el volumen de lluvia que arrojan sobre el territorio ana-

lizado y en su distribución espacial

- El vínculo existente entre la escala temporal y espacial de las tormentas se pone de manifiesto al coincidir aquellas de larga duración con las que abarcan grandes superficies. Las mismas se diferencian notablemente de los fenómenos locales caracterizados por su gran intensidad, aunque pequeño desarrollo espacio-temporal.

- La incidencia de la escala de las tormentas en las curvas de abatimiento areal diverge según la duración estudiada, siendo despreciable para 15 minutos e incuestionable para 1440 minutos, donde se evidencia la mayor uniformidad que presentan las tormentas de gran escala.

- Se contempla la diversidad de escalas involucrando en la calibración del algoritmo solo aquellas duraciones menores o iguales a la persistencia de la tormenta de origen. Se obtiene una gráfica de carácter general a utilizar en el diseño de obras hidráulicas.

- Aún para duraciones fijas, los CDA presentan gran dispersión. Las curvas generadas representan las condiciones medias de su variación en función del área.

- La expresión de k como función de la duración permite evaluar los coeficientes para duraciones no ensayadas

- La comparación con los resultados obtenidos en Córdoba sugiere que los CDA varían según las condiciones fisiográficas y climáticas de la región, por lo que su transposición debe ser considerada con mucha precaución en cada caso.

Referencias bibliográficas

Allen, R. J. y De Gaetano, A. T. (2005). Areal Reduction Factors for Two Eastern United States Regions with High Rain-Gauge Density. *Journal of Hydrologic Engineering* © ASCE, 10, 4,327-335

Bazzano, F., Caamaño Nelli, G. E.

y Rajmil, G. (2015). Predicción de lluvias máximas en Tucumán con el Modelo DIT. *XXV Congreso Nacional del Agua*. Paraná, Argentina.

Caamaño Nelli, G. y García, C. M. (1999). Relación Intensidad-Duración-Recurrencia de Lluvias Máximas: Enfoque a través del Factor de Frecuencia, Caso Lognormal. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 14, 3, 37-44.

Catalini C. y Caamaño Nelli, G. (2003). Lámina de Lluvia a Escala de Cuenca. Cáp. 9 en *Lluvias de Diseño. Conceptos Técnicos y Experiencias*. Ed. Universitas.

Fernandez, P. C., Fattorelli, S., Rodríguez S. y Fornero, L. (1999). Regional Analysis of Convective Storm. *Journal of Hydraulics* Division ASCE, 4, 4, 217-325.

García, C. M.; Catalini, C. G. y Caamaño Nelli, G. (2000). Distribución Espacial de la Lámina de Diseño en una Cuenca de Montaña. *XIX. Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Tomo II, 309-318. AIH. Córdoba, Argentina.

Lazarte Sfer, R. (2005). Factor de Reducción Areal para Lluvias de Diseño en el Gran S. M. de Tucumán. *XX Congreso Nacional del Agua*. Mendoza, Argentina.

Markowski, P. y Richardson Y. (2010). *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Ed. Wiley-Blackwell.

Minetti, J. L. y Vargas W. M. (2005). Circulación Regional en el Noroeste Argentino y Condiciones del Tiempo Asociadas. Cáp. 4 en *El Clima en el NOA*. Ed. Magna.

Natural Environment Research Council (NERC). (1975). *Flood Studies Report, 2*.

Omelayo, A. S. (1993). On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. *Journal of Hydrology*, 145, 1-2, 191-205.

Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Meteorology Society*, 56, 527-530.

Pavlovic, S, Perica S., Laurent, M. y Mejía, A. (2016). Intercomparison of selected fixed-area areal reduction factor methods. *Journal of Hydrology*. 537, 419-430.

Prohaska, F. (1976). The Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. In *Schwerdtfeger, W.* (ed.), *Climates of Central and South America*. World Survey of Climatology, Elsevier.

Skaugen, T. (1997). Classification of rainfall into small- and large-scale events by statistical pattern recognition. *Journal of Hydrology*. 200, 40-57.

United States Weather Bureau. (1958). *Rainfall intensity-frequency regime*. Part 1 - The Ohio Valley. U.S. Department of Commerce, U.S. Weather Bureau Tech. Pap. No. 29, Engineering Division, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Zimmermann, E., Riccardi, G., Pieroni, H. y Arraigada, M. (2000). Curvas de Abatimiento Areal de Tormentas. Región Pampa Ondulada (Santa Fe, Argentina). *CUADERNOS del CURIHAM*.

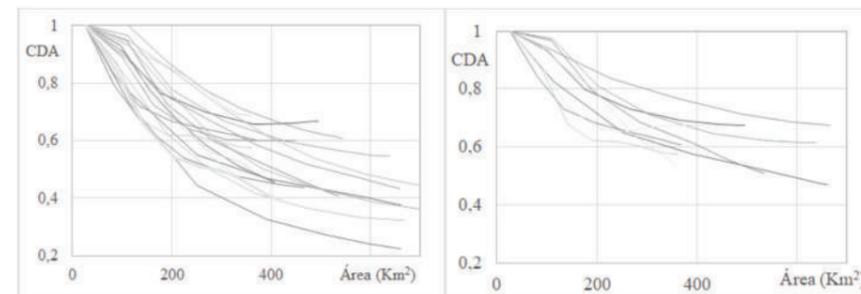


Figura 5. Dispersión del CDA para 180 minutos (izq.) y para 1440 minutos (der.).

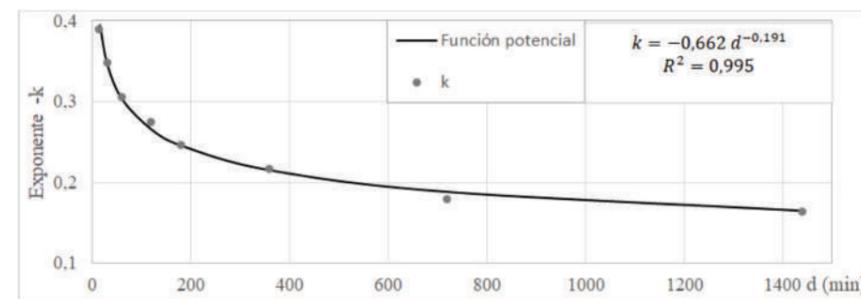


Figura 6. Exponente -k en función de la duración.

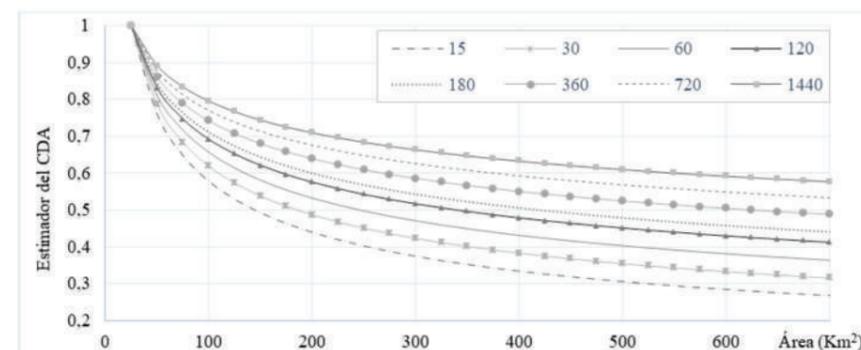


Figura 7. Gráfica de los coeficientes de atenuación areal de lámina del modelo CoDA.

* Flavia Bazzano^{1,2}, Gabriel Caamaño Nelli³, Juan L. Minetti^{2,4} y Germán Rajmil¹

¹ Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

³ Ex Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

⁴ Laboratorio Climatológico Sudamericano, Fundación Caldenius, San Miguel de Tucumán.

Evaluación de wetlands de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de efluentes de un tambo robot

MARÍA CELESTE SCHIERANO
MARÍA ALEJANDRA MAINE
MARÍA CECILIA PANIGATTI

Introducción

Argentina cuenta con numerosas cuencas lecheras y una de las más importantes en cuanto a extensión y producción se encuentra en la Región Pampeana. Específicamente en la ciudad de Rafaela, se encuentra operando desde el año 2015 el primer tambo totalmente robotizado. Esta instalación no sólo es la primera de sus características en el país, sino que también es la única y produce en la actualidad 1300 litros de leche por día.

Países como Argentina, que en los últimos años han intensificado su producción agrícola y ganadera sin considerar conjuntamente la sustentabilidad del sistema se enfrentan en la actualidad a una doble problemática. Ciertas prácticas asociadas a este tipo de explotaciones producen el deterioro de las fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas. Los efluentes generados en las instalaciones de ordeño constituyen un riesgo potencial para el ambiente, la salud humana y animal y un manejo inadecuado de los mismos puede contaminar el agua disponible para la operación y limpieza del tambo. Por otro lado, ciertas tendencias (incremento de la concentración de los efluentes, sistemas semi estabulados, etc.) hacen que cada vez sea

necesario utilizar más cantidad de agua para la operación y limpieza de estos predios (Herrero, 2009). Como respuesta a esta doble problemática, se plantea reutilizar el efluente tratado para la limpieza de pisos de corral y sala de ordeño.

El tambo robot en estudio descarga diariamente alrededor de 40 m³ de efluente a un sistema de tratamiento constituido por lagunas de estabilización (laguna anaeróbica + laguna facultativa) (Figura 1). Sin embargo, la calidad que se obtiene en el efluente tratado no permite que el mismo pueda ser reutilizado, especialmente para la limpieza de los pisos del tambo, por lo que es necesario realizar un tratamiento adicional que permita una mejora en los parámetros indicadores de contaminación. Una al-

ternativa sería utilizar un wetland construido (WC) como tratamiento terciario de estos efluentes.

Los WCs son sistemas diseñados y construidos por el hombre para utilizar los procesos naturales que eliminan los contaminantes del agua en condiciones controladas para optimizarlos. Estos sistemas han tenido un gran desarrollo a nivel mundial para la depuración de efluentes domiciliarios y sanitarios de pequeñas comunidades. En los últimos años, su aplicación se ha expandido para el tratamiento de diferentes tipos de efluentes (Vymazal, 2007, 2013; Headley y Tanner, 2012; Fonder y Headley, 2013; Rossmann et al., 2013; Sukumaran, 2013; Verlicchi y Zambello, 2014; Zhang et al., 2014), sin embargo, en Ar-



Figura 1. Ubicación del tambo robot y del sistema de lagunas

gentina no se han implementado masivamente para el tratamiento de efluentes (Maine et al., 2017) a pesar de que las condiciones para su implementación son ideales.

La eficiencia en la depuración de un efluente dado está vinculada al tipo de humedal utilizado, a las especies de plantas empleadas, a los diferentes sustratos y a los mecanismos de depuración. El tipo de wetland adecuado para el tratamiento de este efluente es del tipo de flujo subsuperficial horizontal (WFSSH) en el que el agua a tratar fluye por debajo de la superficie (Kadlec y Wallace, 2009) atravesando un lecho conformado por un sustrato en particular y macrófitas enraizadas (Figura 2).

Para este estudio se plantea utilizar Leca como sustrato, ya que fue estudiada en investigaciones previas obteniéndose eficiencias satisfactorias (Schierano, 2017) y evaluar el empleo de las macrófitas *Typha domingensis* y *Phragmites australis*. La totora (*T. domingensis*) fue elegida para el estudio debido a que es una especie de amplia distribución en los humedales naturales del Litoral Santafesino. El carrizo (*P. australis*), fue evaluada debido a que es una de las especies más estudiadas y utilizadas en wetlands construidos en el mundo (Vymazal, 2013).

Objetivos

Los objetivos de la presente investigación fueron:

- (1) Evaluar y comparar la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes en el tratamiento de efluentes de un tambo robot, utilizando wetlands sub superficiales de flujo horizontal a escala laboratorio.
- (2) Comparar el desempeño del sistema utilizando la macrófita *T. domingensis* o *P. australis*.

Materiales y Métodos

Diseño experimental

En un invernadero se dispusieron doce reactores de tipo batch, simulando wetlands sub superficiales de flujo horizontal. Las dimensiones de los mismos eran: 0,25 m de ancho, 0,60 m de largo, 0,40 m de profundidad. Cinco reactores fueron plantados con *T. domingensis* y cinco con *P. australis*. Se dispusieron dos reactores control sin plantas, que sólo contenían sustrato, con el objeto de evaluar la influencia de las macrófitas sobre las eficiencias de remoción. En todos los casos se utilizó el mismo sustrato: Leca (10/20), un árido cerámico de gran ligereza, también conocido como arcilla expandida.

Aclimatación y monitoreo del crecimiento de las macrófitas

Todas las especies, luego de ser plantadas, fueron aclimatadas durante dos meses, regándolas en una primera etapa (tres semanas) con

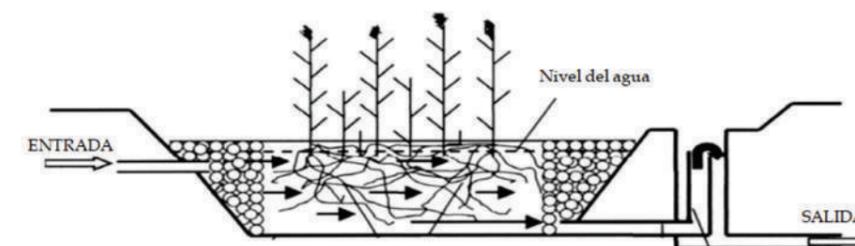


Figura 2. Esquema de un wetland horizontal de flujo subsuperficial (WSFH) (Vymazal, 2009).

agua de red y luego con efluente diluido en una proporción (1:2). El efluente empleado fue extraído a la salida del tratamiento secundario llevado a cabo en el tambo robot, el cual consiste en una secuencia de Laguna Anaeróbica + Laguna Facultativa.

Tanto en el período de aclimatación como en del experimento se monitoreó el crecimiento de las plantas midiendo las alturas en los ejemplares de cada reactor y verificando el desarrollo de biomasa. La evapotranspiración fue medida y cuando fue necesario, compensada con agua destilada, a los efectos de mantener un balance de masas adecuado.

Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos

Una vez concluido el período de aclimatación, se llevaron a cabo 3 experiencias. Cada una de ellas, consistió en medir la concentración de diversos contaminantes del efluente al inicio y al final del tratamiento en las réplicas ensayadas, luego de un tiempo de residencia de 7 días.

Los parámetros fisicoquímicos analizados fueron: pH, sólidos suspendidos totales, fósforo total, amonio, nitrato y demanda química de oxígeno (DQO). Para todos los análisis se siguió la metodología propuesta por APHA (2012). En cuanto a contaminantes microbiológicos, se evaluó bacterias Coliformes totales (NMP/100 ml (37 °C- 48 hs) en caldo Mc Conkey) y fecales (fermentación en tubos múltiples (44.5 °C- 24 hs) en caldo Verde Brillante Bilis). La presencia de *Escherichia coli* se determinó, por aislamiento en agar EMB con identificación IMVIC.

Utilizando las concentraciones iniciales y finales en cada una de las tres experiencias, para cada

contaminante, se determinaron eficiencias de remoción, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

C_i : concentración inicial del contaminante.

C_f : concentración final del contaminante.

Análisis estadístico

De acuerdo al diseño experimental, se utilizó ANOVA a fin de evaluar la influencia del factor "ESPECIE" con 3 niveles (*T. domingensis*, *P. australis*, Sin plantas) y en una variable de interés (eficiencia de remoción de los diferentes parámetros fisicoquímicos). Se chequeó a priori homocedasticidad de varianzas y normalidad de datos y se aplicó el Test de comparaciones múltiples de Duncan cuando las medias fueron diferentes. Se utilizó el software Statgraphics Plus 5.0.

Evaluación de resultados

Crecimiento de las macrófitas

Todos los reactores evaluados presentaron buenos desarrollos de biomasa y la altura de los ejemplares evolucionó satisfactoriamente. En todos los tratamientos evaluados, se pudo comprobar que la velocidad de crecimiento aumentó considerablemente cuando se comenzó a regar a las macrófitas con el efluente en estudio. Esto es debido al aporte de nutrientes por parte del líquido residual, el cual permitió que la altura de los ejemplares sea el triple que la inicial, al concluirse el estudio, tal como puede apreciarse en la Figura 3.

Caracterización del efluente inicial

En la Tabla 1 se pueden observar las características del efluente ini-



Figura 3. Evolución en el crecimiento de las macrófitas.

Tabla 1. Características del efluente inicial.

PARÁMETROS	RANGO DE VALORES (n=3)
pH	8,00-8,18
Sólidos Suspendedos Totales (mg/l)	295-316
Amonio (mg NH ₄ ⁺ /l)	117-130
Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /l)	24,1-24,5
DQO (mg O ₂ /l)	736-833
Fósforo total (mg P/l)	14,7-21,5
Coliformes totales NMP/100 ml	6,4 x10 ⁹
Coliformes fecales NMP/100 ml	1,4 x10 ⁹
<i>E. coli</i> (en 100 ml)	Presencia

n = experiencias llevadas a cabo.

cial utilizado durante la experiencia, expresadas como rangos de los parámetros medidos.

Se puede observar la elevada concentración de DQO del efluente utilizado, lo cual es una característica típica en este tipo de líquidos residuales. Este parámetro, además, es normalmente utilizado como indicador de riesgo ambiental para evaluar la incidencia del vertido de efluentes a cursos de aguas superficiales.

El alto valor de sólidos suspendidos es una de las causas de la turbiedad y el color característico de los efluentes de tambo. El rango de valores observado para este contaminante es alto, a pesar de que el sistema de tratamiento

cuenta, previo a la entrada a las lagunas, con un tamiz cuya función es eliminar sólidos del líquido residual. Sin embargo, los procesos de crecimiento bacteriano que se desarrollan en las lagunas de estabilización contribuyen al aumento de la turbidez del líquido residual.

Los valores hallados de amonio y fósforo, exceden los límites permitidos por la legislación provincial (Ley 11220, 1994) para vertido de efluentes líquidos: los valores permisibles son 25 y 2 mg/L, para cada parámetro respectivamente. Estos contaminantes son críticos ya que en exceso, producen la eutrofización de cursos de agua superficiales.

En cuanto a los contaminantes

microbiológicos, los valores de entrada son de 9 órdenes de magnitud, tanto para Coliformes totales, como para Coliformes fecales. En todos los casos, también se detectó presencia de *E. coli*. Todos estos parámetros son indicadores de contaminación fecal, ya que provienen del tracto gastrointestinal de los bovinos y nos advierten sobre la posible presencia de microorganismos patógenos.

Los valores hallados muestran la falta de eficiencia del sistema de lagunas para producir un efluente apto para vertido, ya que no poseen capacidad para la degradación de toda la materia orgánica presente y para la eliminación de contaminantes críticos.

Caracterización del efluente final. Eficiencias de remoción

A lo largo del experimento, el pH se mantuvo entre 7,35 y 7,81, es decir en un rango cercano a la neutralidad y levemente inferior al efluente inicial, donde los valores hallados estuvieron entre 8,00 y 8,18.

En la Figura 4 se pueden observar las eficiencias de remoción obtenidas luego de los tratamientos para sólidos suspendidos. Estos porcentajes fueron altos y significativamente superiores ($p < 0,05$) en los reactores con plantas. En particular para la especie *T. domingensis* el porcentaje de remoción fue superior al 95 %, mientras que para *P. australis*, esta valor fue del 89,5%. En los reactores sin plantas, la eficiencia fue significativamente inferior, en torno al 68%, lo cual corrobora el rol de las macrófitas en la remoción de este parámetro: la velocidad del efluente al atravesar el lecho se ve reducida por la presencia de la vegetación (Kadlec y Wallace, 2009), facilitándose ciertos procesos de filtra-

ción y sedimentación en el sustrato (Kadlec y Knight, 1996).

Si bien el principal objetivo del tratamiento terciario evaluado es obtener un efluente que sea apto para ser reutilizado en el mismo predio lechero, es importante señalar que en caso de que el objetivo sea el volcado, el efluente cumple con el límite de sólidos suspendidos establecido por la legislación. Al comparar las concentraciones de este parámetro en el efluente en estudio con las de salida en cada uno de los tratamientos, puede observarse en la Figura 5 que en el caso del tratamiento que utilizó la macrófita *T. domingensis*, la remoción obtenida permitió lograr una valor que se encuentra por debajo del límite de volcamiento determinado por la legislación provincial, el cual es de 30 mg/l. (Resolución

1089, 1982). En cuanto al tratamiento que utilizó *P. australis*, las concentraciones finales halladas fueron levemente superiores a este límite.

Al evaluarse las eficiencias de remoción de amonio (Figura 6), puede concluirse que los sistemas con plantas presentaron mejor desempeño que los reactores control ($p < 0,05$). Las dos especies evaluadas tuvieron eficiencias del 95%, obteniéndose concentraciones finales de este contaminante menores a 6 mg/l.

La disminución de amonio en el efluente puede ser explicada a través del fenómeno conocido como nitrificación, en el que el nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) es oxidado por vía aeróbica a nitrato (NO₃⁻), seguido de una desnitrificación, en el que este nitrato es reducido por

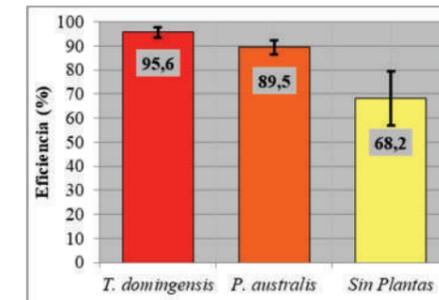


Figura 4. Sólidos suspendidos: eficiencias de remoción.

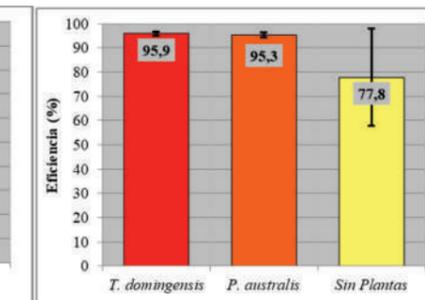


Figura 6. Amonio: eficiencias de remoción.

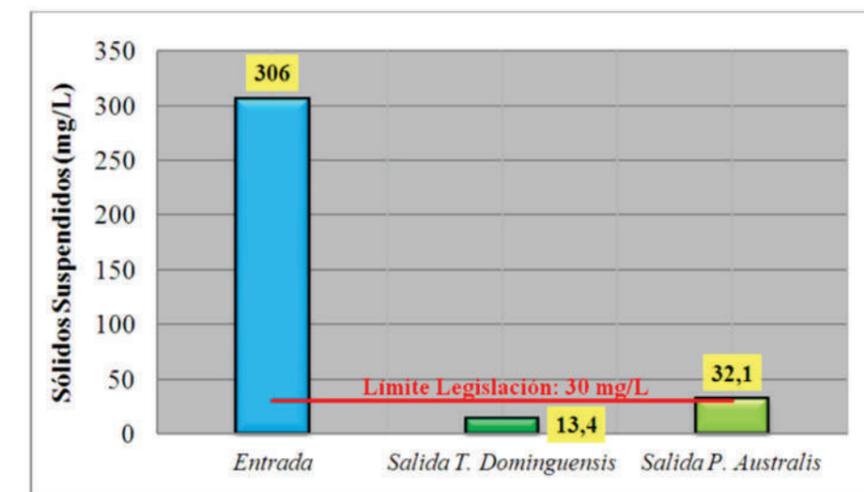


Figura 5. Concentraciones de sólidos suspendidos (mg/L) a la entrada y a la salida de cada tratamiento.

bacterias anaerobias a nitrógeno gaseoso (N_2) (Vymazal, 2007). En el tipo de wetlands utilizados para el presente estudio, el proceso de nitrificación se produce en microzonas aeróbicas que se localizan en los alrededores de las raíces. Esta podría ser una de las razones por las cuales, la remoción de amonio fue inferior en los sistemas sin plantas.

Las concentraciones de amonio obtenidas luego del tratamiento con ambas macrófitas en estudio, permiten al igual que en el caso de sólidos suspendidos, volcar el efluente cumpliendo con la legislación vigente. La misma estipula un límite de volcado de 25 mg de NH_4^+/l y tal como puede observarse en la Figura 7, ambos tratamientos resultaron satisfactorios en este aspecto, ya que las concentraciones finales fueron de entre 5,1-5,8 mg/l.

Las remociones de nitrato fueron inferiores a las de amonio (Figura 8), probablemente debido a un proceso de desnitrificación incompleto. En los reactores sin plantas, la concentración de nitrato fue incluso superior a la salida que a la entrada al tratamiento, por lo que el porcentaje de eficiencia resulta negativo.

A partir de estas eficiencias puede inferirse, por un lado, que en los reactores con plantas la desnitrificación no ha sido tan importante como para remover todo el nitrato disponible y en segundo lugar, que en los reactores sin plantas prácticamente no fue llevado este proceso, ya que se acumuló no sólo el nitrato que ya se encontraba presente en el efluente sino también el que pudo haberse generado en el proceso de nitrificación.

Los porcentajes de eliminación de DQO también fueron significativamente superiores en los siste-

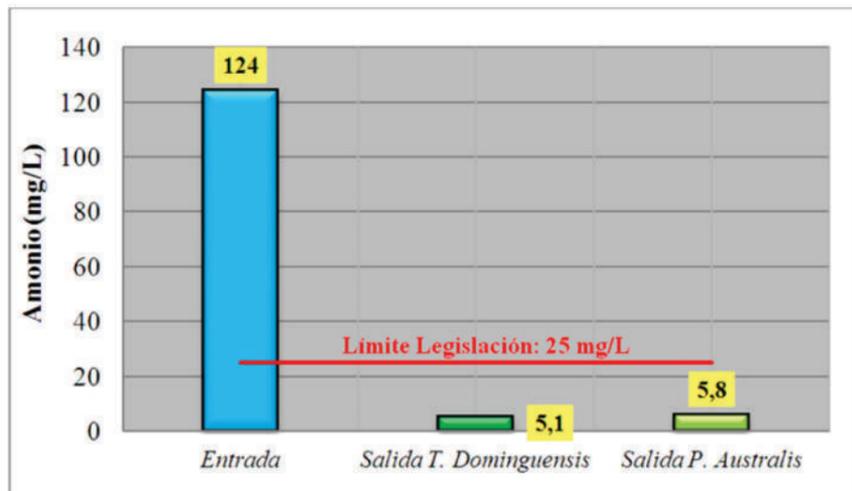


Figura 7. Concentraciones de amonio (mg/L) a la entrada y a la salida de cada tratamiento.

mas con plantas ($p < 0,05$), superando el 70 % en ambas especies (Figura 9). En los sistemas wetland la eliminación de DQO se relaciona principalmente con la degradación microbiológica llevada a cabo en las microzonas aeróbicas alrededor de la zona de las raíces (Sawaitayothin y Polprasert, 2007). Debido a las altas tasas de crecimiento y al gran desarrollo de biomasa que presentaron las macrófitas a lo largo del experimento, sería factible un alto desarrollo microbiológico en la zona de raíces que permitió la degradación de la materia orgánica presente en el efluente. El sustrato también podría favorecer el desarrollo de un biofilm bacteriano que influiría en la eliminación de materia orgánica, reduciendo de esta manera este

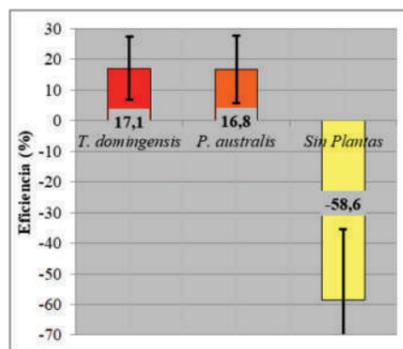


Figura 8. Nitratos: eficiencias de remoción.

parámetro. Sin embargo, y debido a que los microcosmos con plantas presentaron un mejor rendimiento, cabría esperar que el primer mecanismo sea el más relevante.

Las concentraciones de fósforo total en el efluente también disminuyeron a lo largo del experimento (Figura 10) y presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$). Las eficiencias promedio fueron del orden del 77 % en los tratamientos de T. domingensis mientras que en los de P. australis y los blancos, esta eficiencia no superó el 23%. De acuerdo a Vymazal (2007), existen varios mecanismos a través de los cuales el Fósforo puede ser retenido en estos sistemas: la absorción en las raíces de la macrófitas (o en las hojas, en el caso de

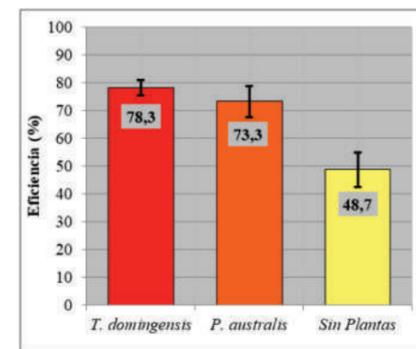


Figura 9. DQO: eficiencias de remoción.

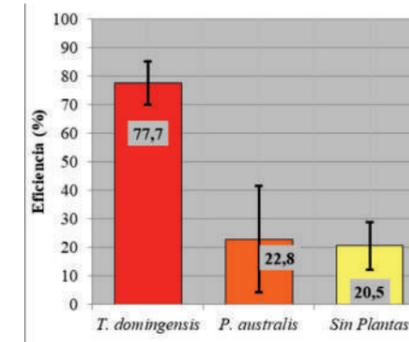


Figura 10. Fósforo total: eficiencias de remoción.

especies sumergidas), la precipitación, la adsorción sobre el sustrato y la captación por parte de la flora microbiana presente en el medio. Debido a que T. domingensis presentó un mejor desempeño que P. australis, puede inferirse que la absorción por parte de las plantas es el mecanismo más importante para la remoción de este contaminante. T. domingensis presenta rizomas y parte aérea de mayor biomasa que P. australis, lo que podría contribuir a una mayor acumulación de fósforo en tejidos vegetales (Haddad y Maine, 2007; Di Luca et al., 2015).

En cuanto a los contaminantes microbiológicos, los valores de entrada y salida de los mismos se muestran en la Tabla 2.

Las bacterias Coliformes fecales decrecieron en ocho órdenes de magnitud en los dos tratamientos que utilizaron plantas y en cuatro en los reactores blancos. Se detectó presencia de la bacteria E. coli tanto a la entrada como a la salida de los reactores sin plantas, mientras que en aquellos sistemas utilizando las macrófitas en estudio, esta bacteria no fue hallada en el efluente tratado.

Varios autores han focalizado sus estudios en la capacidad de los wetlands construidos para eliminar bacterias indicadoras de contaminación fecal. Los resultados obtenidos sugieren que la eliminación de estos agentes es llevada a cabo por procesos fisicoquímicos y biológicos (Wu et al., 2016; Boutilier et al., 2009; García y Bécares, 1997; Ottová et al., 1997). En muchos estudios específicos sobre wetlands subsuperficiales de flujo horizontal, se ha demostrado que la presencia de vegetación afecta positivamente a la remoción de bacterias, lo cual concuerda con los resultados hallados en el presente estudio.

Decamp y Warren (2000) obtuvieron eficiencias de remoción de E. coli superiores en wetlands plantados con P. australis que en aquellos sin plantas. Rivera et al. (1995), arribaron a las mismas conclusiones pero evaluado la especie Typha además de Phragmites pero no halló diferencias significativas entre ambas especies. Otra variable correlacionada positivamente con la eficiencia

Tabla 2. Resultados de los contaminantes microbiológicos.

Parámetro	Entrada	Salida		
		T. domingensis	P. australis	Sin Plantas
Coliformes totales NMP/100 ml	$6,4 \times 10^9$	$1,5 \times 10^2$	$2,1 \times 10^3$	$3,5 \times 10^5$
Coliformes fecales NMP/100 ml	$1,4 \times 10^9$	$4,0 \times 10^1$	$2,0 \times 10^1$	$4,5 \times 10^5$
E. coli (en 100 ml)	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia

de remoción de bacterias es el tiempo de residencia hidráulica (TRH). En concordancia con los resultados obtenidos en esta investigación, Tanner et al. (1995), comprobaron que un TRH de siete días fue doblemente efectivo para la remoción de coliformes que trabajando con un TRH de dos días. Autores como Khatiwada y Polprasert (1999), Solano et al., (2004a, 2004b) obtuvieron resultados similares evaluando a Typha angustifolia y Phragmites australis respectivamente.

Conclusiones

Los wetlands sub superficiales de flujo horizontal son eficientes para el tratamiento terciario de efluentes de un predio lechero. T. domingensis y P. australis son especies adecuadas para ser utilizadas en estos sistemas de tratamiento,

ya que ambas presentaron aumentos significativos de biomasa y de altura de plantas. Asimismo, los sistemas con macrófitas resultaron significativamente más eficientes en la remoción de contaminantes que aquellos que sólo contenían sustrato. Esto demuestra el importante rol de las macrófitas en los sistemas wetland.

Las remociones obtenidas para sólidos suspendidos y amonio fueron superiores al 95% en el tratamiento que utilizó T. domingensis y por encima del 89 % en los sistemas plantados con P. australis. Con estas eficiencias se ha alcanzado una calidad tal en el efluente final, que además de permitir su reuso dentro del mismo predio, posibilita su descarga cumpliendo con la legislación provincial.

Para DQO se obtuvieron porcentajes de eliminación entre el

73 %-78 % para ambas macrófitas, mientras que para Fósforo total estas eficiencias fueron significativamente superiores en los wetlands plantados con *T. domingensis* (77,7 %). Las eficiencias de remoción de nitrato fueron inferiores al resto de los parámetros, y en el caso particular de los sistemas sin plantas, se halló una concentración superior de este contaminante a la salida del tratamiento.

Las bacterias Coliformes fecales decrecieron en ocho órdenes de magnitud en los dos tratamientos que utilizaron planta, no detectándose presencia de *E. Coli* a la salida de los ambos sistemas.

Utilizando un sistema WFSSH plantado con *T. domingensis* como tratamiento terciario o de afino, se ha logrado mejorar notablemente la calidad del efluente, haciendo posible su aprovechamiento para la limpieza de la instalación de ordeño. Por lo tanto, se continuará evaluando la eficiencia de la macrófita autóctona en la remoción de otros contaminantes, y se profundizará en el estudio de los mecanismos por los cuales los mismos son eliminados del agua residual.

Referencias bibliográficas

APHA. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Amer. Publ. Health Assoc. New York.

Boutilier, L., Jamieson, R., Gordon, R., Lake, C., Hart, W. (2009). Adsorption, sedimentation, and inactivation of *E. coli* within wastewater treatment wetlands. *Water Res.* 43 (17): 4370–4380.

Decamp, O., Warren, A. (2000). Investigation of *Escherichia coli* removal in various designs of subsurface flow wetlands used for was-

tewater treatment. *Ecol. Eng.* 14 (3): 293–299.

Di Luca, G.A., Maine, M.A., Mufarrege, M.M., Hadad, H.R., Bonetto, C.A. (2015). Influence of *Typha domingensis* in the removal on high P concentrations from water. *Chemosphere*, Elsevier, 138: 405–411.

Fonder, N., Headley, T. (2013). The taxonomy of treatment wetlands: a proposed classification and nomenclature system. *Ecol. Eng.* 51: 203–211.

García, M., Bécares, E. (1997). Bacterial removal in three pilot-scale wastewater treatment systems for rural areas. *Water Sci. Technol.* 35 (11): 197–200.

Hadad, H. & Maine, M.A. (2007). Phosphorous amount in floating and rooted macrophytes growing in wetlands from the Middle Paraná River floodplain (Argentina). *Ecological Engineering.* 31: 251–258. ISSN 0925-8574.

Headley, T., Tanner, C. (2012). Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: an innovative stormwater treatment technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 42: 2261–2310.

Herrero, M.A., Korol S.E., Charlon, V., Salazar, F., La Manna, A. (2009). Informe internacional “Uso del agua, manejo de efluentes e impacto ambiental en el tambo”. Memorias de las III *Jornadas Internacionales para la calidad de leche* (JICAL III), Buenos Aires, Argentina, pp. 27–57.

Kadlec, R.H. & Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetland*. USA: Boca Raton: Lewis Publishers, pp. 893.

Kadlec R.H. & Wallace, S.D. (2009). *Treatment Wetlands*, 2da. ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Khatiwada, N.R., Polprasert, C. (1999). Kinetics of fecal coliform removal in constructed wetland. *Water Sci. Technol.* 40 (3): 109–116.

Ley 11220. Transformación del sector público de agua potable, desagües cloacales y saneamiento. (1994). Anexo 1.2.2. Normas de calidad de agua potable y efluentes cloacales. Provincia de Santa Fe.

Maine M.A., Hadad H.R., Sánchez G.C., Di Luca G.A., Mufarrege M.M., Caffaratti S.E., Pedro M.C. (2017). Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecol. Eng.* 98: 372–377.

Ottová, V., Balcarová, J., Vymazal, J. (1997). Microbial characteristics of constructed wetlands. *Water Sci. Technol.* 35 (5): 117–123.

Resolución 1089/82. Reglamento para Control de Vertimiento de Líquidos Residuales. (1982). Título C; teniendo en cuenta una dilución menor de 360. Provincia de Santa Fe.

Rivera, F., Warren, A., Ramirez, E., Decamp, O., Bonilla, P., Gallegos, E., Calderon, A., Sánchez, J. T. (1995). Removal of pathogens from wastewaters by the root zone method (RZM). *Water Sci. Technol.* 32 (3): 211–218.

Rossmann, M., Matos, A.T., Abreu, E.C., Silva, F.F., Borges, A.C. (2013). Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. *J. Environ. Manag.* 128: 912–919.

Sawaitayothin, V. & Polprasert, C.

(2007). Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate. *Bioresour. Technol.* 98 (3): 565–570.

Schierano, M. C., Maine, M. A., & Panigatti, M. C. (2017). Dairy farm wastewater treatment using horizontal subsurface flow wetlands with *Typha domingensis* and different substrates. *Environmental technology*, 38(2): 192–198.

Solano, M., Soriano, P., Ciria, M. (2004a). Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. *Biosyst. Eng.* 87 (1): 109–118.

Solano, M.L., Soriano, P., Ciria, M.P. (2004b). Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. *Biosyst. Eng.* 87 (1): 109–118.

Sukumaran, D. (2013). Phytoremediation of heavy metals from industrial effluent using constructed wetland technology. *Appl. Ecol. Environ. Sci.* 1: 92–97.

Tanner, C.C., Clayton, J.S., Upsdell, M.P. (1995). Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters — I. Removal of oxygen demand, suspended solids and fecal coliforms. *Water Res.* 29 (1): 17–26.

Verlicchi, P., Zambello, E. (2014). How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. *Sci. Total Environ.* 470: 1281–1306.

Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Sci. Tot. Environ.* 380: 48–65.

Vymazal, J. (2009). Review: The use

constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering.* 35: 1–17.

Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. *Ecol. Eng.* 61: 582–592.

Wu, S., Carvalho, P. N., Müller, J. A., Manoj, V. R., & Dong, R. (2016). Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment*, 541, 8–22.

Zhang, D.Q., Jinadasa, K.B., Richard, M.G., Liu, Y., Ng, W.J., Tan, S.K. (2014). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries: A review of recent developments (2000 - 2013). *J. Environ. Manag.* 141: 116–131.

* María Celeste Schierano^(1,2); María Alejandra Maine⁽¹⁾ y María Cecilia Panigatti⁽²⁾.
⁽¹⁾ CONICET (Consejo Nacional Investigaciones Científicas y Técnicas).
⁽²⁾ GEM (Grupo de Estudios de Medio Ambiente). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Argentina.

Análisis de estadística inferencial de información pluviométrica histórica en presencia de efectos de cambio y variabilidad climática

MARÍA MAGDALENA BARAQUET
NICOLÁS F. GUILLÉN
CARLOS M. GARCÍA

Introducción

Generalmente el análisis de estadística inferencial de la información pluviométrica histórica se utiliza, en ausencia de información histórica de caudales escurridos superficialmente, para definir las medidas estructurales y no estructurales requeridas para mitigar el riesgo hídrico. Sin embargo, la presencia de efectos de cambio y variabilidad climática en el régimen pluviométrico afecta las predicciones realizadas a través del análisis de estadística inferencial. El cambio climático se define como una variación del estado del clima, identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo. Por otro lado, el concepto de variabilidad climática denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos (IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]). A continuación, puede verse un ejemplo de una distribución de temperaturas, que a menudo se asemeja a una distribución normal, donde la no estacionariedad de la distribución implica cambios en la media o varianza.

Hasta no hace mucho tiempo, muchos de los usos de la informa-

ción climática, se basaba en la premisa que el clima era estacionario, al menos en la escala de décadas, y que por lo tanto el clima futuro sería igual al del pasado inmediato. Así, las series de los elementos climáticos y de sus derivados hidrológicos eran tratadas estadísticamente como estacionarias.

Hoy, la hipótesis de que las series climáticas o de sus derivados son estacionarias no siempre es apropiada. Las acciones antropogénicas generan y han generado variaciones en los parámetros climáticos que hacen que la hipótesis casi siempre implícita de que las estadísticas del clima pasado pueden representar las del clima futuro ya no siempre sea válida. Esto hace que todas las metodologías basadas en la presunción de estacionariedad para el cálculo de parámetros de diseño de infraestructuras, la planificación del uso de los recursos hídricos, del te-

rritorio, de la actividad forestal o de la agricultura a mediano plazo deben ser revisadas. A la hora de estimar alguna o varias características del clima futuro para algún requerimiento de planificación se debe ser cuidadoso antes de emplear a priori la hipótesis de que el clima es estacionario y por lo tanto se requieren de nuevos métodos tanto para la detección de la existencia de estacionariedad como para el análisis de los datos no estacionarios. A pesar de esta necesidad, no hay aún una metodología totalmente desarrollada y segura para estimar el clima futuro. En rigor, el gran desafío para la climatología mundial durante los próximos años será desarrollar los métodos que permitan anticipar el clima de las próximas décadas en el contexto del intenso cambio climático en curso.

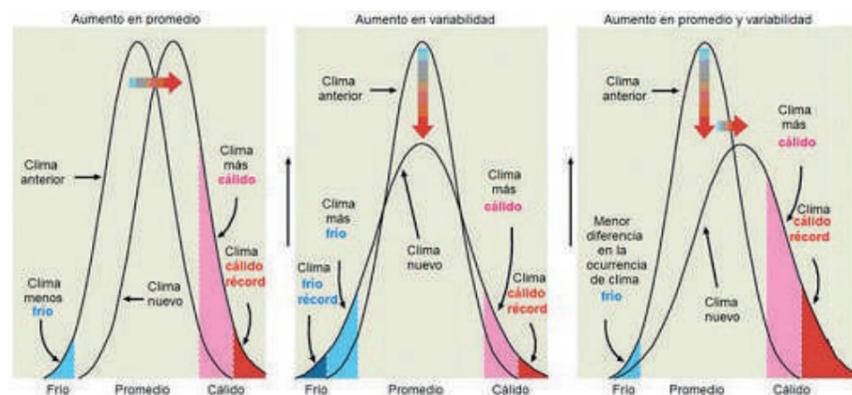


Figura 1. Izquierda: Ejemplo de cambio en la media de la variable temperatura; Centro: Ejemplo de cambio en la varianza de la variable temperatura; Derecha: Ejemplo de cambio en la media y la varianza de la variable temperatura. (Fuente: Tercer Informe IPCC, 2001).

Objetivos

Objetivo general

En este trabajo, se evalúa en primera instancia la presencia de efectos de cambio y variabilidad climática sobre el régimen pluviométrico en diferentes regiones de Argentina analizando variables que se extraen de información pluviométrica histórica, tales como lluvia máxima diaria anual, lluvia total anual, días lluvioso al año, días lluviosos al mes y días consecutivos con lluvia. Finalmente se implementa una metodología de análisis de estadística inferencial para series estacionarias y para series no estacionarias (con efectos de cambio y variabilidad climática).

Objetivos particulares

- Profundizar sobre los conceptos de cambio y variabilidad climática.
- Profundizar sobre conceptos básicos de estadística hidrológica, haciendo hincapié en la distinción entre el análisis que se debe hacer sobre una serie estacionaria (análisis de frecuencia clásico) y una serie no estacionaria (nuevo paradigma de análisis de frecuencia).
- Recopilar información pluviométrica actualizada de distintas zonas de Argentina para ser analizada al detalle.
- Analizar la evolución temporal de diferentes variables para determinar la existencia de patrones que demuestren la presencia o no de variabilidad climática en diferentes zonas de Argentina.
- Analizar los casos particulares en que se presenten series no estacionarias para definir una metodología de trabajo que pueda ser aplicada al diseño hidrológico de infraestructura hídrica.

Materiales y Métodos

A continuación, se detalla la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar los objetivos citados. El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

1. Recopilación y pre-procesamiento de series pluviométricas de distintas estaciones en diferentes regiones de Argentina. Se recopiló información actualizada de la lámina de lluvia diaria de la base de datos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar>).
2. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas pre-seleccionadas.
3. Determinación del año hidrológico para cada región.
4. Generación de la serie hidrológica de cada una de las variables que serán analizadas (lluvia máxima diaria anual, lluvia total anual, días lluvioso al año, días lluviosos al mes y días consecutivos con lluvia).
5. Verificación de hipótesis estadísticas de las series seleccionadas tales como independencia, estacionariedad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las diferentes series. El análisis de estacionariedad tiene relevancia para este estudio ya que proveerá información sobre la presencia de efectos del cambio y variabilidad climática en las series.

6. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
7. Análisis de estadística inferencial mediante el ajuste de distribución de probabilidad. El objetivo de la estadística inferencial es relacionar la variable en estudio con el período de retorno. En este estudio, se aplican dos metodologías: a) la primera cuando se está en presencia de series estaciona-

rias: este es el caso del análisis de frecuencia clásico en el cual se relaciona la variable analizada con una recurrencia dada; es decir para cada tiempo de retorno existe un valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza y; b) cuando existen series no estacionarias, a diferencia del caso anterior, el análisis arroja para un tiempo de retorno, el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza, pero esto es variable para distintos horizontes de tiempo, es decir, que la recurrencia de un evento ya no es estática en el tiempo, sino que es una variable dinámica.

Evaluación de resultados

A continuación, en este resumen se presentan los principales resultados alcanzados en una estación pluviométrica de la provincia de Salta y otra correspondiente a la provincia de Córdoba.

Estación Iruya Poscaya – Salta

Esta estación se encuentra en la provincia de Salta a una latitud de -22.46 y a una longitud de -65.08. Cuenta con registros históricos de precipitación diaria desde el año 1984 hasta el año 2014 sin datos faltantes (31 años de datos).

A continuación, se presentan cada uno de los análisis realizados sobre las diferentes variables de interés.

1. Precipitación Máxima Diaria Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones máximas diarias anuales analizada es la que se muestra en la Figura 2.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 15 mm el año 1992 y un máximo de 66 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 37 mm y posee un desvío estándar de 12 mm.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 15 mm en el año 1992. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 30 datos, con un mínimo de 25 mm en el año 1995 y un máximo de 66 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 38 mm y posee un desvío estándar de 12 mm.

Por otro lado, se verificó la hipótesis de independencia, pero no se verificaron las hipótesis de estacionariedad y homogeneidad.

Luego de que la serie rechazó el test de estacionariedad de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de

verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta. Tanto la prueba de Mann-Kendall modificada como la técnica de pre-blanqueo indicaron que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 3 se muestra la variación de los valores medios de las diferentes recurrencias en el tiempo al realizar el análisis no estacionario de la serie.

En la Figura 3 se puede ver con una línea negra la misma serie histórica de precipitaciones máximas diarias anuales que la mostrada en la Figura 2. Además, se ve cómo se va modificando el valor medio del período de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 50 mm tenía un período de

retorno de 25 años en el año 1985; mientras que en el año 2010 la recurrencia de este valor bajó a 5 años.

A continuación, en la Figura 4 se muestran para 2 horizontes de tiempo dados como varía la relación entre la variable y el tiempo de retorno con su respectivo intervalo de confianza.

De la última figura se puede ver que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de precipitación máxima diaria anual de 76 mm, mientras que para el año 2050 se espera que este valor aumente a 103 mm. Es decir, para un mismo período de retorno el valor de precipitación máxima diaria anual aumenta.

2. Precipitación Total Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones totales anuales analizada es la que se muestra en la Figura 5.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 248 mm en el año 1992 y un máximo de 1115 mm en el año 2011. El valor promedio de la serie es de 575 mm y posee un desvío estándar de 191 mm.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de estacionariedad Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es Gumbel por el método de máxima verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 6 que se muestra a continuación.

Al analizar la relación existente

entre la recurrencia y la precipitación total anual se puede ver que la FDP Teórica Gumbel por el método de máxima verosimilitud arroja valores de precipitación menores a los de la FDP empírica de Weibull para tiempos de retorno mayores a los 10 años. Esto puede deberse a que el valor máximo de la serie (1115 mm) es muy probable que corresponda a una recurrencia del 100 años o aún mayor; y por razones de falta de muestreo (extensión de la serie) al aplicar la fórmula de Weibull aparece erróneamente asociado a 32 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo sobre el medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 23 %, para 50 años es del 21 %, para 25 años es del 20 %, para 20 años es del 19 %, para 10 años

es del 17 %, para 5 años es del 15 % y para 2 años es de 11 %.

3. Días lluviosos al año.

La serie hidrológica de los días lluviosos al año analizada es la que se muestra en la Figura 7.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 29 días en el año 1997 y un máximo de 98 días en el año 1990. El valor promedio de la serie es de 57 días y posee un desvío estándar de 15 días.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de estacionariedad de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es Gumbel por el método de máxima verosimilitud. Se puede

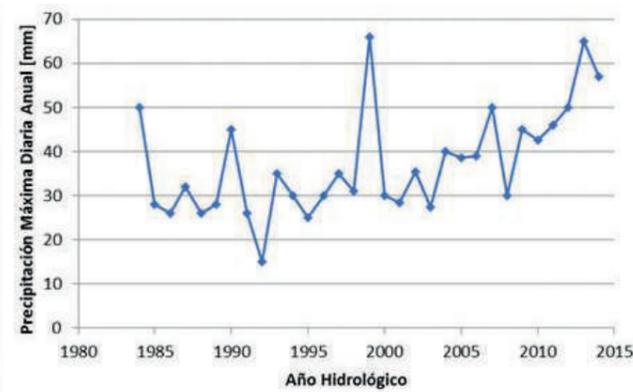


Figura 2. Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, Iruya Poscaya.

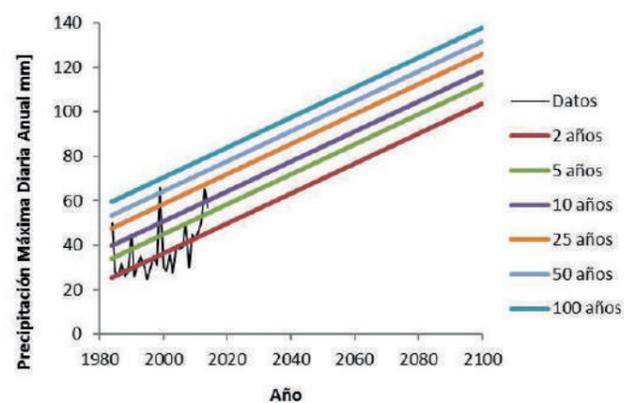


Figura 3. Relación entre precipitación máxima diaria anual y período de retorno a lo largo del tiempo, Iruya Poscaya.

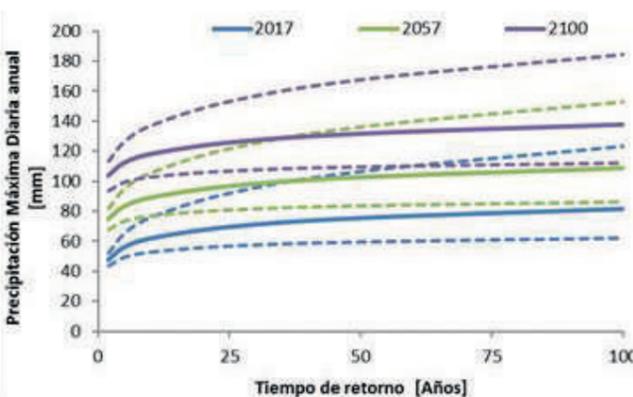


Figura 4. Relación entre precipitación máxima diaria anual y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, Iruya Poscaya.

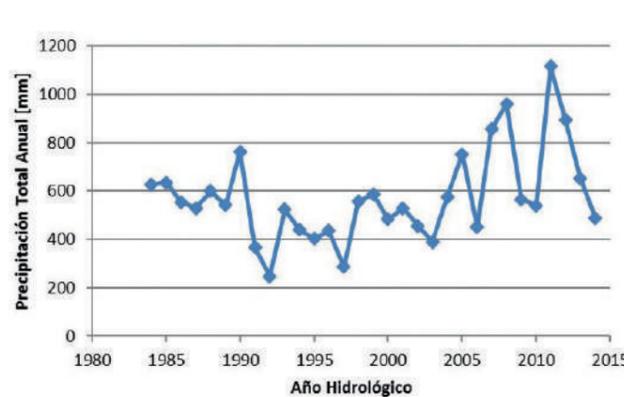


Figura 5. Serie de precipitaciones totales anuales, Iruya Poscaya.

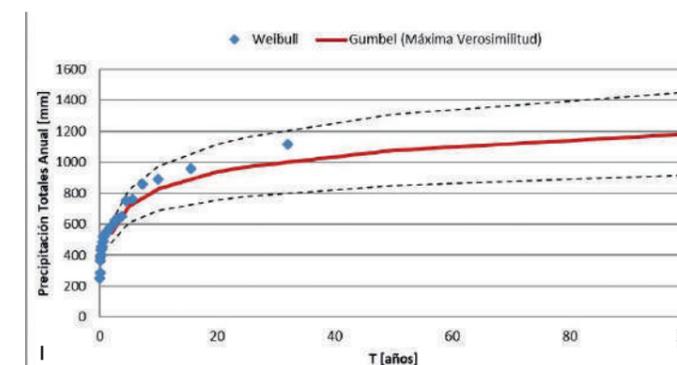


Figura 6. Distribución de probabilidades de precipitación total anual, Iruya Poscaya.

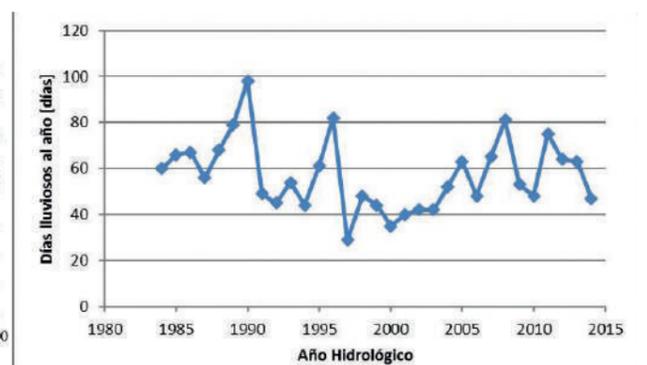


Figura 7. Serie de días lluviosos al año, Iruya Poscaya.

ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 8.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días lluviosos al año se puede ver que la FDP Teórica Gumbel por el método de máxima verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo (98 días) tiene una recurrencia del orden de los 25 a 50 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95 %) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre

relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo sobre el medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 17 %, para 50 años es del 17 %, para 25 años es del 15 %, para 20 años es del 15 %, para 10 años es del 14 %, para 5 años es del 12 % y para 2 años es de 10 %. 4.Días lluviosos al mes.

La serie hidrológica de días lluviosos al mes analizada es la que se muestra en la Figura 9.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 8 días en el año 1997, y un máximo de 27 días en el año 1989. El valor promedio de la serie es de 16 días y posee un desvío estándar de 5 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no encontraron datos atípicos, se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de estacionariedad de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es Gumbel por el método de máxima verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 10.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días lluviosos al mes se puede ver que la FDP Teórica Gumbel por el método de máxima verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo (27 días) tiene una recurrencia del orden de los 20 a 30 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95 %) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud

de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo sobre el medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 22 %, para 50 años es del 21 %, para 25 años es del 19 %, para 20 años es del 19 %, para 10 años es del 17 %, para 5 años es del 14 % y para 2 años es de 11 %.

5.Días consecutivos con lluvia

La serie hidrológica de días consecutivos con lluvia es la que se muestra en la Figura 11.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 1 día en los años 1998 y 2000, y un máximo de 18 días en el año 1989. El valor promedio de la serie es de 6 días y posee un desvío estándar de 4 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico, pero

no se verificó la hipótesis de independencia. Por lo tanto, esta serie se descartó y no se llevó a cabo el análisis.

Estación El Durazno - La Florida Córdoba

Esta estación se encuentra en la provincia de Córdoba a una latitud de -32.23 y a una longitud de -64.78. Cuenta con registros históricos de precipitación diaria desde el año 1958 hasta el año 2015 con datos faltantes en los años 1963, 1968, 1984, 1985, 1988, 1989, 1990, 1991 y 1992 (49 años de datos).

A continuación, se presentan cada uno de los análisis realizados sobre las diferentes variables de interés.

1.Precipitación Máxima Diaria Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones máximas diarias anuales analizada es la que se muestra en la Figura 12.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 34 mm en el año 2004 y un máximo de 178 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 89 mm y posee un desvío estándar de 33 mm.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de estacionariedad de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la GEV por el método de máxima verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 13.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y la precipitación máxima diaria anual se puede ver que la FDP Teórica GEV por

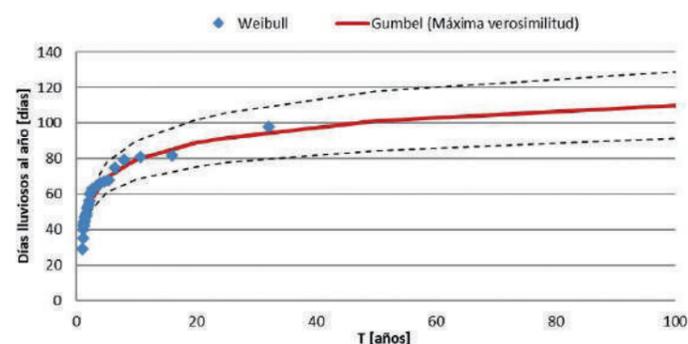


Figura 8. Distribución de probabilidades de días lluviosos al año, Iruya Poscaya.

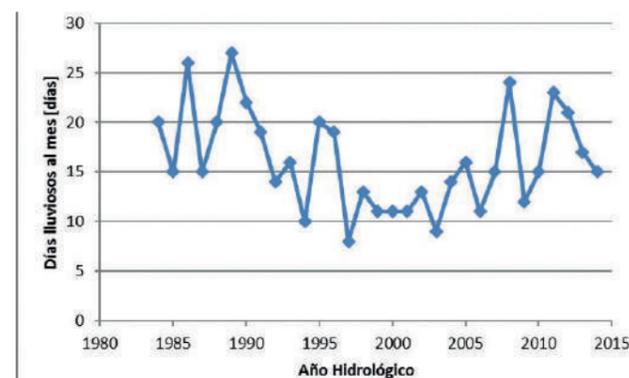


Figura 9. Serie de días lluviosos al mes, Iruya Poscaya.

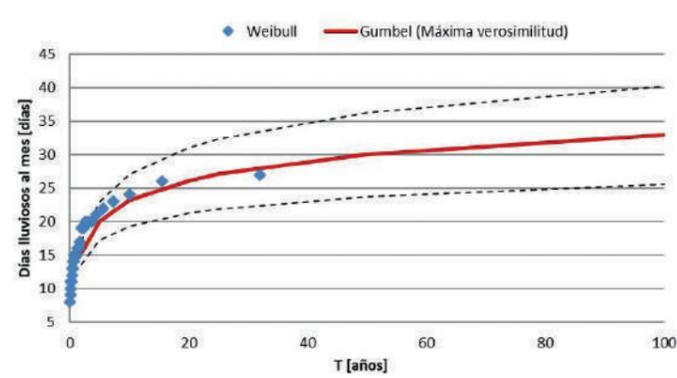


Figura 10. Distribución de probabilidades de días lluviosos al mes, Iruya Poscaya.

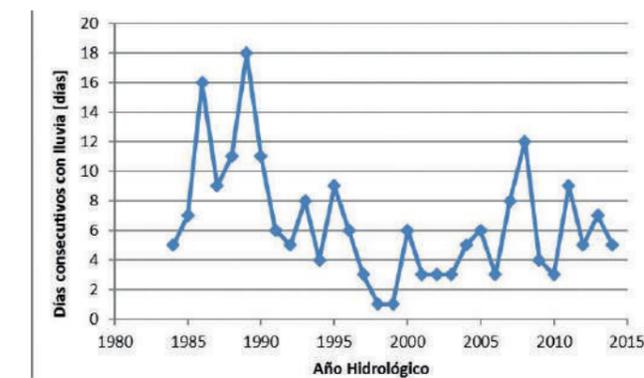


Figura 11. Serie de días consecutivos con lluvia, Iruya Poscaya.

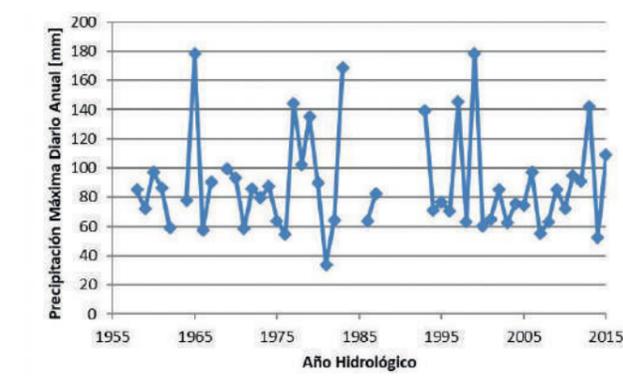


Figura 12. Serie de precipitaciones máximas diarias anuales, El Durazno-La Florida.

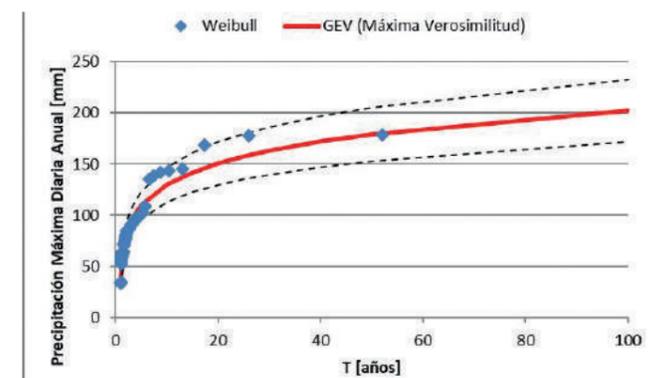


Figura 13. Distribución de probabilidades de precipitación máxima diaria anual, El Durazno-La Florida.

el Método de los Máxima Verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (178.3 mm) tiene una recurrencia del orden de los 50 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 18%, para 50 años es del 17 %, para 25 años es del 16 %, para 20 años es del 15 %, para 10 años es

del 14 %, para 5 años es del 12 % y para 2 años es de 9 %.

2. Precipitación Total Anual.

La serie hidrológica de precipitaciones totales anuales analizada es la que se muestra en la Figura 14.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 517 mm en el año 1962 y un máximo de 1727 mm en el año 1999. El valor promedio de la serie es de 998 mm y posee un desvío estándar de 238 mm.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia y homogeneidad, pero no se verificó la hipótesis de estacionariedad.

Luego de que la serie rechazó el test de estacionariedad de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta.

Tanto la prueba de Mann-Kendall modificada como la técnica de pre-blanqueo indicaron que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 15 se muestra la variación de los valores medios de las diferentes recurrencias en el tiempo al realizar el análisis no estacionario de la serie.

En la Figura 15 se puede ver con una línea negra la misma serie histórica de precipitaciones totales anuales que la mostrada en la Figura 14. Además, se ve cómo se va modificando el valor medio del período de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 1500 mm tenía un período de retorno de 50 años en el año 1975, mientras que en el año 2002 el período de retorno de este valor bajó a 25 años.

A continuación, en la Figura 16 se muestran para 3 horizontes de tiempo dado como varía la relación entre la variable y el tiempo de confianza.

De la última figura se puede ver que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de 1680 mm, mientras que para el año 2050 se espera que este valor aumente a 1815 mm y para el año 2100 llegue

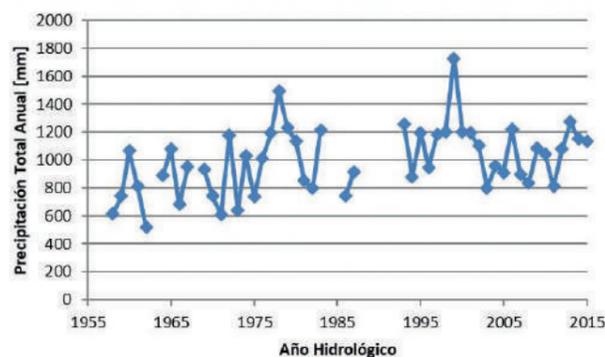


Figura 14. Serie de precipitaciones totales anuales, El Durazno-La Florida.

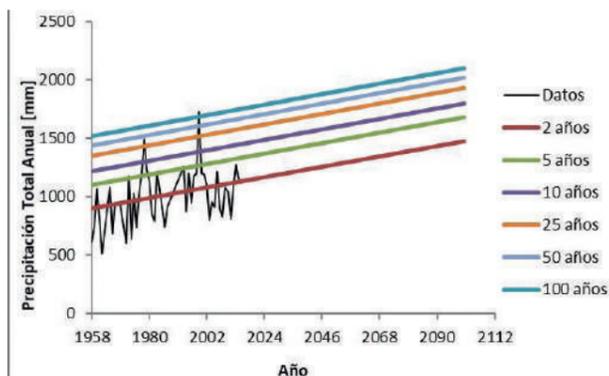


Figura 15. Relación entre precipitación total anual y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.

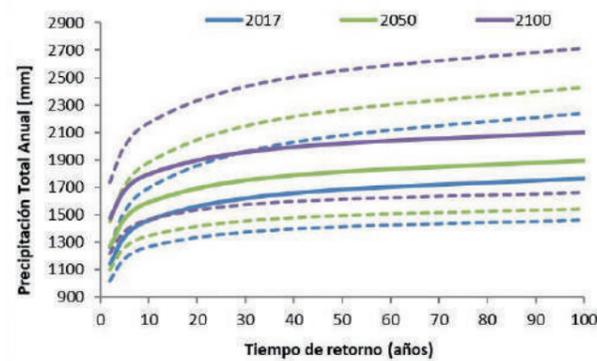


Figura 16. Relación entre precipitación total anual y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.

a 2020 mm. Es decir, para un mismo período de retorno el valor precipitación total anual aumenta.

3. Días Lluviosos al año.

La serie hidrológica de días lluviosos al año analizada es la que se muestra en la Figura 17.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 22 días en el año 1962 y un máximo de 90 días en el año 1974. El valor promedio de la serie es de 59 días y posee un desvío estándar de 14 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie se encontró un dato atípico correspondiente a 22 días en el año 1962. Este último dato fue eliminado de la serie y se aplicó nuevamente el test el cual no arrojó ningún otro dato atípico. En base a esto último, la serie que finalmente fue analizada contaba 48 datos, con un mínimo de 33 días en el año 1959, y un máximo de 90 días en el año 1974. El valor promedio de la serie es de 60 días y posee un desvío estándar de 13 días. Por otro lado, se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en

relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabilidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la GEV por el método de Máxima Verosimilitud. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 18.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días lluviosos al año se puede ver que la FDP Teórica GEV por el Método de los Máxima Verosimilitud ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (90 días) tiene una recurrencia del orden de los 100 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcula-

ron los intervalos de confianza (95 %) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio y dividir esa diferencia por el valor medio) es del 63 %, para 50 años es del 53 %, para 25 años es del 44 %, para 20 años es del 42 %, para 10 años es del 34 %, para 5 años es del 27 % y para 2 años es de 20 %.

4. Días Lluviosos al mes.

La serie hidrológica de días lluviosos al mes analizada es la que se muestra en la Figura 19.

Los valores de esta serie varían

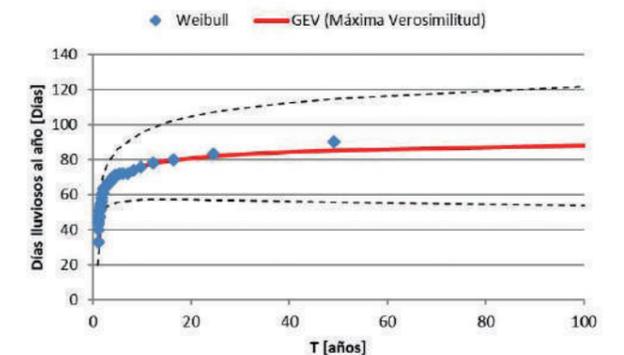


Figura 18. Distribución de probabilidades de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.

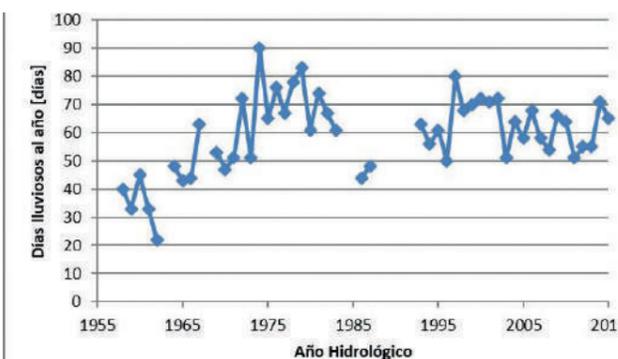


Figura 17. Serie de días lluviosos al año, El Durazno-La Florida.

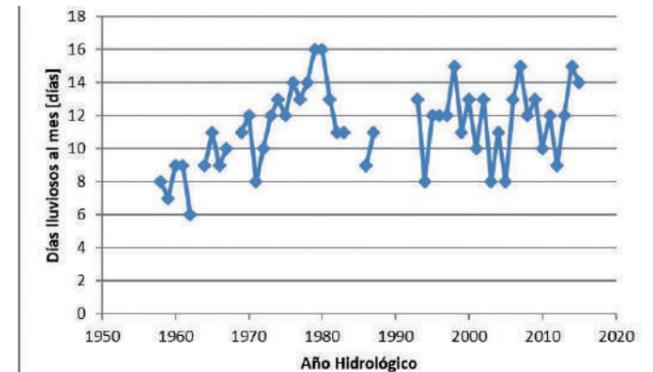


Figura 19. Serie de días lluviosos al mes, El Durazno-La Florida.

entre un mínimo de 6 días en el año 1962, y un máximo de 16 días en los años 1979 y 1980. El valor promedio de la serie es de 11 días y posee un desvío estándar de 2 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia y homogeneidad, pero no se verificó la hipótesis de estacionariedad.

Luego de que la serie rechazó el test de estacionariedad de Mann-Kendall, se sometió a la misma a la prueba de Mann-Kendall modificada y a la técnica de pre-blanqueo de manera tal de verificar si la no estacionariedad arrojada por Mann-Kendall era correcta. Tanto la prueba de Mann-Kendall modificada como la técnica de pre-blanqueo indicaron que existe una tendencia en la serie analizada, por lo tanto, se procedió a realizar el análisis de serie no estacionaria

mediante la utilización del Software NEVA.

En la Figura 20 se muestra la variación de los valores medios de las diferentes recurrencias en el tiempo al realizar el análisis no estacionario de la serie.

En la Figura 20 se puede ver con una línea negra la misma serie histórica de días lluviosos al mes que la mostrada en la Figura 19. Además, se ve cómo se va modificando el valor medio del período de retorno a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, un valor de 14 días lluviosos al mes tenía un período de retorno de 25 años en el año 1960, mientras que en el año 2010 el período de retorno de este valor bajó a 5 años.

A continuación, en la Figura 21 se muestran para 3 horizontes de tiempo dado como varía la relación entre la variable y el tiempo de retorno con su respectivo intervalo de confianza.

De la última figura se puede ver que en la actualidad (año 2017) para un período de retorno de 50 años se asocia un valor de 15 días lluviosos al mes, mientras que para el año 2050 se espera que este valor aumente a 18 días lluviosos al mes y para el año 2100 llegue a 20 días lluviosos al mes. Es decir, para un mismo período de retorno el valor de días lluviosos al mes aumenta. 5.Días consecutivos con lluvia.

La serie hidrológica de días consecutivos con lluvia analizada es la que se muestra en la Figura 22.

Los valores de esta serie varían entre un mínimo de 2 días en los años 1959, 1962, 1988, y un máximo de 8 días en el año 2002. El valor promedio de la serie es de 5 días y posee un desvío estándar de 2 días.

Al aplicar las diferentes pruebas estadísticas a la serie no se encontró ningún dato atípico y se verificaron las hipótesis de independencia, estacionariedad y homogeneidad. Por lo tanto, no se encontró ningún patrón que muestre variabilidad en el tiempo.

Debido a que se detectó que la serie era estacionaria mediante la prueba de Mann Kendall, se procedió al análisis de estadística inferencial clásico, que consiste en relacionar los diferentes valores de la variable con un período de retorno. En primer lugar, se aplica la función de distribución de probabi-

lidad empírica de Weibull y luego a partir de los datos obtenidos se determinó que la función de distribución de probabilidad teórica que mejor ajusta es la LogNormal. Se puede ver la relación entre la variable y las diferentes recurrencias con su respectivo intervalo de confianza en la Figura 23.

Al analizar la relación existente entre la recurrencia y los días consecutivos con lluvia se puede ver que la FDP Teórica Log Normal ajusta bien a los datos empíricos (Weibull). Se observa que el valor máximo de la serie (8 días) tiene una recurrencia del orden de los 50 años.

Otra aclaración que vale la pena realizar es que además se calcularon los intervalos de confianza (95%) y los mismos se muestran en la figura anterior. Se observa que a medida que la recurrencia crece la incertidumbre también lo hace y este grado de incertidumbre también tiene que ver con la longitud de la serie de la muestra (a más datos siempre es menor el intervalo de confianza). Se puede ver que para 100 años la incertidumbre relativa (que surge de calcular la diferencia entre el valor del intervalo y el valor medio) es del 17%, para 50 años es del 15%, para 25 años es del 14%, para 20 años es del 13%, para 10 años es del 12%, para 5 años es del 10% y para 2 años es de 8%.

Conclusiones

Se implementó en este trabajo una metodología de análisis de estadística inferencial para series tanto estacionarias (análisis clásico de datos) como para series no estacionarias (con efectos de cambio y variabilidad climática). Cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie estacionaria, para cada tiempo de retorno el análisis arroja el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza. A diferencia del caso anterior, cuando se realiza estadística inferencial sobre una serie no estacionaria, el análisis arroja para un tiempo de retorno, el valor de la variable con su respectivo intervalo de confianza, pero para distintos horizontes de tiempo; es decir que la recurrencia de un evento ya no es fija en el tiempo, sino que es variable. Es importante destacar esta conclusión para el análisis de estadística inferencial de variables pluviométricas requeridas para el diseño hidrológico en casos de que se utilicen series históricas afectadas por variabilidad y cambio climático.

Actualmente se está aplicando este análisis sobre toda la provincia de Córdoba, con el objetivo de verificar si existen o no efectos que puedan asociarse al cambio y a la variabilidad climática. Además, se prevé analizar si los casos de no es-

tacionariedad se presentan en ciertas zonas o son casos aislados en el espacio.

Referencias bibliográficas

Rudolf, Juan Emilio. (2017). *Análisis de información pluviométrica y estudio de variabilidad climática en la provincia de Salta*. Práctica Supervisada de la carrera de grado Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2001b). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. J. J. Mc Carthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, & K.S. White (editors). Cambridge University Press, United Kingdom.

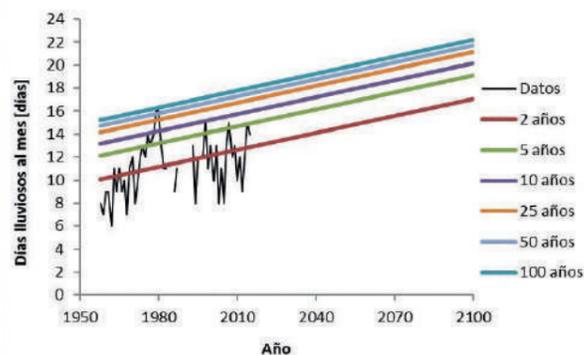


Figura 20. Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno a lo largo del tiempo, El Durazno-La Florida.

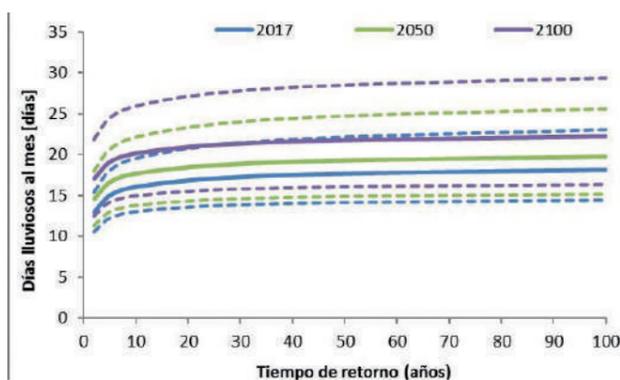


Figura 21. Relación entre días lluviosos al mes y período de retorno para diferentes horizontes de tiempo, El Durazno-La Florida.

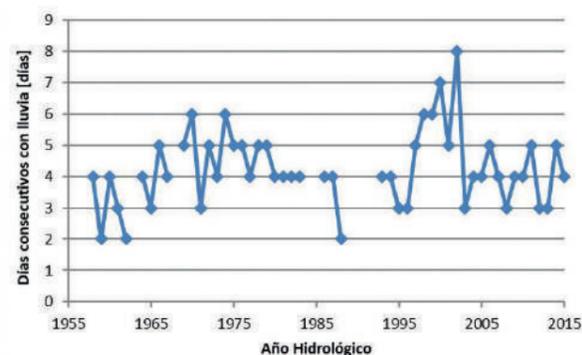


Figura 22. Serie de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.

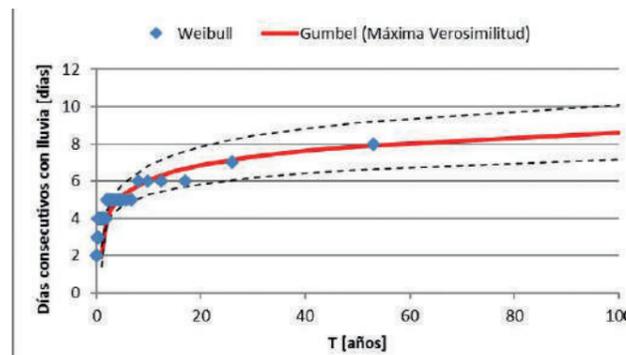


Figura 23. Distribución de probabilidades de días consecutivos con lluvia, El Durazno-La Florida.

* María Magdalena Baraquet, Nicolás F. Guillén, Carlos M. García

CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua-Laboratorio de Hidráulica-Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Universidad Nacional de Córdoba-Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Efecto de la afluencia incremental de la chi en la planificación de sistemas hidrotérmicos

LORENA ACOSTA ZUÑIGA
RAFAEL JOSÉ DE ANDRADE

Introducción

Brasil posee un sistema de generación eléctrica que utiliza principalmente recursos hídricos, los cuales representan cerca del 74 % de la generación de energía eléctrica. Estas centrales hidroeléctricas están dispuestas en serie en las diferentes cuencas hidrográficas, por lo que la operación de una central afecta ONS, directamente aquellas que estén aguas abajo, haciendo que el sistema sea altamente interdependiente (2016a).

Adicionalmente, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) está constituido por cuatro subsistemas: Sur, Sudeste Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste y Norte; los cuales están conectados por medio de una malla de transmisión que propicia la transferencia de energía entre subsistemas y permite la obtención de ventajas sinérgicas, al aprovechar la diversidad hidrológica de las cuencas que lo conforman, atendiendo al mercado con seguridad y economía (ONS, 2017a).

La interdependencia de las centrales generadoras del sistema no es sólo de índole geográfica, sino también temporal, ya que las decisiones operativas tomadas en el presente afectan la disponibilidad de recursos en el futuro. Este problema es aún más complejo, si son consideradas las incertezas hidrológicas asociadas.

Debido a esta condición de interdependencia, existe la necesidad de coordinar la operación del sistema cuidadosamente, de forma que sea eléctricamente seguro al mismo tiempo que los recursos disponibles sean aprovechados de forma eficiente tanto en el presente como en el futuro.

Con el intento de determinar la mejor estrategia de operación y dar soporte en las actividades de planificación de la operación del sistema hidrotérmico brasileño, el Centro de Investigaciones de Energía Eléctrica, CEPEL, por sus siglas en portugués—, ha desarrollado los Modelos de Planificación de la Operación de Sistemas Hidrotérmicos Interconectados a Medio y Corto Plazo: NEWAVE y DECOMP, respectivamente.

El NEWAVE es un modelo de optimización basado en Programación Dinámica Dual Estocástica (PDDE), aplicado en un horizonte de hasta 5 años. Su objetivo es determinar la estrategia de generación hidráulica y térmica que minimice el valor esperado del costo de operación durante todo el horizonte de planificación. Los resultados de este modelo incluyen la Función de Costo Futuro, que proporciona información a los modelos con un horizonte inferior (DECOMP) sobre el impacto de la utilización del agua almacenada en los embalses (CICOGNA, 2003).

El DECOMP es un modelo de optimización aplicado en un horizonte de corto plazo (hasta dos

meses), representando el primer mes en base semanal. Su objetivo es determinar el despacho de las centrales hidroeléctricas y térmicas que minimiza el valor esperado del costo de operación dado el conjunto de informaciones disponibles (carga, caudales, disponibilidades, límites de transmisión entre subsistemas y la Función de Costo Futuro del modelo NEWAVE) (CICOGNA, 2003).

A la salida de ambos modelos son obtenidos entre otros resultados, los despachos de generación por central hidroeléctrica y térmica, así como el Costo Marginal de Operación (CMO) en cada subsistema durante el período en estudio.

A pesar que el SIN está compuesto por iniciativas de tipo hidroeléctrica, termoeléctrica, eólica y fotovoltaica, las centrales que entran en el modelado realizado por el NEWAVE y el DECOMP sólo incluye las dos primeras. Las centrales restantes, denominadas no simulables, entran en el modelo abasteciendo la carga del sistema de forma directa antes de la simulación. Esto es realizado con el objetivo de reducir la complejidad del problema, considerando que las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas tienen mayor peso en la oferta interna de energía eléctrica en Brasil.

En síntesis, la predominancia de centrales hidroeléctricas condiciona la planificación de la operación a corto, medio y largo plazo, la cual debe considerar el

comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas para prever con mayor precisión la mejor estrategia operativa que establezca las metas de generación para cada central del modelo hidrotérmico atendiendo la demanda y minimizando el valor esperado del costo de operación a lo largo del horizonte de planificación (MARCATO, 2010).

Las alteraciones y actualizaciones realizadas en los archivos de entrada de los modelos NEWAVE y DECOMP son realizadas en base mensual y semanal respectivamente. Dichas modificaciones, están fundamentadas en las directrices establecidas en el Programa Mensual de Operación Energética (PMO) elaborado por el Operador Nacional del Sistema (ONS) en conjunto con los agentes del sistema.

El PMO tiene como objetivo principal establecer las directrices energéticas de corto plazo de la operación coordinada del Sistema Interconectado Nacional (SIN) optimizando los recursos de generación disponibles. Es elaborado por el ONS en base mensual, dividido y revisado en igual número a las semanas operativas correspondientes al mes en estudio. Donde cada semana operativa es definida como el período que inicia a las 00:00 horas del sábado y termina a las 24:00 horas del viernes subsecuente, conteniendo todos los días del mes al que se refiere el estudio y pudiendo contener días de los dos meses adyacentes (ONS, 2016b).

En la composición del parque generador hidroeléctrico brasileño se destaca la Central Hidroeléctrica Itaipú Binacional perteneciente al subsistema Sudeste/Centro-Oeste, la cual es responsable de suministrar alrededor del 17 %

de la energía consumida a nivel nacional. Itaipú se encuentra ubicada en el cauce del río Paraná entre los países Brasil y Paraguay, formada por 20 unidades generadoras y 14.000 MW de potencia instalada (ITAIPU BINACIONAL, 2017). La energía generada por Itaipú depende, entre otros factores, del monitoreo constante de los ríos de la cuenca del Paraná; información determinante para prever el volumen de agua que llegará al embalse y así optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En los modelos de planificación es posible alterar diversas variables de entrada, de forma a analizar el comportamiento del sistema hidrotérmico brasileño. En el caso que aquí nos atañe, fueron objeto de análisis las variables: histórico de afluencia natural e incremental de la Central Hidroeléctrica Itaipú, así como la afluencia incremental de la cuenca hidrográfica del río Paranapanema, uno de los principales afluentes del río Paraná.

El caudal natural (también denominado caudal total) es usado en el sector eléctrico para identificar el caudal que fluiría en una sección del río, si no existiesen acciones de origen antrópica en su cuenca contribuyente, tales como regularización de caudales realizadas por embalses, desvíos de agua y usos consuntivos. El caudal natural es obtenido por medio de un proceso de reconstitución, que considera el caudal observado en los locales de medición y las informaciones relativas a las acciones antrópicas de la cuenca (ONS, 2017b).

El ONS, facilita el acceso al banco de datos que contiene el histórico de caudales o régimen fluvial de todas las centrales hidroeléctricas que componen el SIN. Cada puesto de medición

es representado por un código, el cual es utilizado para acceder a la información del registro histórico de caudales naturales de cada central hidroeléctrica en el banco de datos. Los datos corresponden a las medias mensuales, cuyo primer registro es referente al mes de enero de 1931 y está consolidado hasta diciembre de 2015.

A partir del concepto de caudal natural puede introducirse el concepto de caudal incremental, el cual es calculado a partir del caudal natural de un puesto de medición, descontando los caudales naturales de las centrales con embalse inmediatamente aguas arriba (CEPEL, 2012).

El caudal incremental no es afectado por la estrategia operativa de los embalses situados aguas arriba, y por eso es denominada caudal no controlable. Además, para el caso de centrales hidroeléctricas situadas en el nacimiento de un río, el caudal incremental es igual al caudal natural.

Objetivos

Evaluar el impacto de la alteración del histórico de afluencia natural de la Central Hidroeléctrica Itaipú en los modelos de planificación de la operación NEWAVE y DECOMP.

Evaluar el impacto de la afluencia incremental de la Central Hidroeléctrica Itaipú y de las centrales hidroeléctricas de la bacía del Río Paranapanema en el modelo de planificación de la operación a corto plazo DECOMP.

Justificativa

Al analizar el histórico de caudales naturales consolidado asociado al puesto de medición de la Central Hidroeléctrica Itaipú, fue posible apreciar diferentes tendencias en el comportamiento de la serie

entre los períodos 1931-1970 y 1971-2015, siendo este último caracterizado por un crecimiento más acentuado. La discrepancia en el crecimiento entre ambos períodos incentivaron la realización de un estudio de forma a verificar se la eventual corrección del histórico generaría un impacto significativo en los resultados de los modelos NEWAVE e DECOMP.

La segunda parte del estudio surge de las diferencias significativas presentadas entre los valores de la previsión de la afluencia incremental del ONS y los valores efectivamente realizados; particularmente para la afluencia incremental de la Central Hidroeléctrica Itaipú y de las hidroeléctricas localizadas en la cuenca del río Paranapanema.

Metodología

En la parte inicial del estudio, fue analizada la serie histórica del caudal natural de la hidroeléctrica Itaipú entre los años 1931 y 2015, correspondiente al período consolidado por el ONS y utilizado para el cálculo del MLT (caudal medio mensual histórico, por sus siglas en portugués). A partir de estos datos, fue identificado un comportamiento dispar entre los períodos comprendidos entre 1931 a 1970 y 1971 a 2015, derivada de la fracción correspondiente a la afluencia incremental (Figura 1).

Para evaluar la influencia del histórico de caudales en un horizonte de medio y corto plazo, fueron definidos tres escenarios elaborados a partir del deck del PMO de enero de 2017 proporcionado por el ONS para los modelos NEWAVE y DECOMP: el escenario base (Caso 1.0), en el que se mantuvo inalterado el deck de entrada; y dos casos adicionales en los cuales fue alterado el histórico

de caudal incremental en el período comprendido entre 1931 y 1970, en base a dos metodologías descritas a seguir.

Para el escenario 2 (Caso 1.1) el ajuste de los datos del período indicado, fue realizado considerando el factor calculado como la razón entre los promedios de los períodos 1971-2015 y 1931-1973; en la metodología del tercer escenario (Caso 1.2) los datos fueron ajustados de forma que la línea de tendencia del período 1931-1970 fuese semejante a la del período 1971-2015, manteniendo la dispersión de los datos originales.

El histórico de la afluencia incremental del período 1931-1970 para los tres casos considerados son presentados en la Figura 2. Los valores de afluencia incremental del período entre 1971 y 2015 fueron mantenidos sin alteración en los tres escenarios definidos.

En el modelo de planificación a medio plazo NEWAVE, la alteración del histórico de caudales de la Central Hidroeléctrica Itaipú es representada en el archivo binario VAZOES.DAT, el cual contiene el registro del histórico de caudales naturales de todas las centrales hidroeléctricas consideradas en el modelo del sistema hidrotérmico.

En el modelo de planificación a corto plazo DECOMP, la alteración del histórico de caudales es representada por medio de la Función de Costo Futuro obtenida del modelo NEWAVE (archivos CORTES.P01 y CORTESH.P01), así como por la modificación de los archivos de entrada: MLT.DAT y VAZOES.RVX.

El archivo MLT.DAT contiene el histórico del caudal medio mensual del período comprendido entre 1931 a 2015. Ya el archivo VAZOES.RVX, representa

los conjuntos de escenarios de caudales generados para todas las centrales hidroeléctricas de la configuración; con revisión semanal. Este último archivo es creado utilizando el programa auxiliar GEVAZP, que genera escenarios sintéticos de afluencias como una combinación lineal de las afluencias de los meses anteriores.

En la segunda parte del estudio, que comprende la influencia de la afluencia incremental de la Central Hidroeléctrica Itaipú y de las hidroeléctricas situadas en la cuenca del río Paranapanema en el horizonte de corto plazo, también fueron definidos tres escenarios: sin alterar los archivos originales del deck del ONS (Caso 2.0); modificando solamente la afluencia incremental de la CHI (Caso 2.1); y modificando la afluencia incremental de la CHI y de las centrales de la cuenca del río Paranapanema (Caso 2.2).

En el Caso 2.1, la afluencia incremental de la CHI fue modificada del valor propuesto por el ONS para el valor previsto por el Departamento de Hidrología de la CHI con base en un modelo lluvia-caudal, de 3.345 m³/s a 7.741 m³/s respectivamente. En el Caso 2.2, el ajuste de la afluencia incremental y natural de las centrales hidroeléctricas de la cuenca del río Paranapanema y de la CHI fue realizado a partir de los datos hidráulicos del Informativo Preliminar Diario de la Operación (IPDO) del día 22 de mayo de 2017, Tabla 1 (ONS, 2017e).

Los escenarios descritos anteriormente, fueron simulados utilizando los archivos de entrada del deck del PMO de mayo de 2017, tercera revisión (cuarta semana operativa), proporcionados por el ONS para el modelo de corto plazo DECOMP.

Tabla 1. Afluencias incrementales y naturales de las hidroeléctricas de la cuenca del Río Paranapanema, Caso 2.2

Código del Puesto de Medición	Central Hidroeléctrica	Afluencia Incremental (m ³ /s)	Afluencia Natural (m ³ /s)
47	A. A. Laydner†	481	727
48	Piraju*	481	735
49	Chavantes†	1060	1468
249	Ourinhos*	1060	1473
50	L. N. Garcez*	1060	1618
51	Canoas II*	1060	1529
52	Canoas I*	1060	1652
57	Mauá†	523	744
61	Capivara†	1456	2804
62	Taquarucu*	1456	2904
63	Rosana*	2224	3901
266	Itaipu*	2224	16938

†Central con embalse
*Central de agua fluyente

En el modelo DECOMP la modificación de la afluencia incremental de la cuarta semana operativa especificada para los casos 2.1 y 2.2, es representada en el archivo de entrada VAZOES.RV3 generado por el programa auxiliar GEVAZP.

Resultados

El Costo Marginal de Operación (CMO) obtenido en el modelo NEWAVE para los casos modificados 1.1 y 1.2, presentó una reducción durante todo el horizonte

de planificación (2017-2021) y en todos los subsistemas cuando comparado con el caso original (Caso 1.0), Figura 3 a Figura 4.

En el Caso 1.1, la mayor reducción del CMO fue de 44,91%, observado en el subsistema Nordeste para el año 2019; En el caso 1.2 fue de 13,14% en el Subsistema Sur también en 2019.

En términos de la variación de la generación hidroeléctrica de la CHI, se observa que en los casos con corrección del histórico del caudal es favorecido el aumento

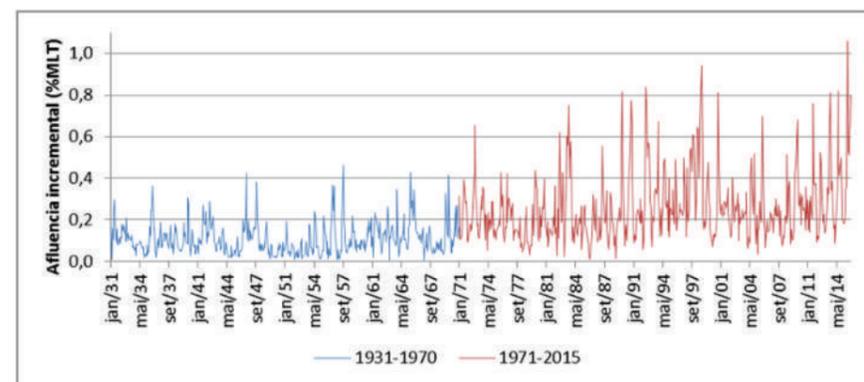


Figura 1. Histórico de afluencia incremental de la CHI (1931-2015).

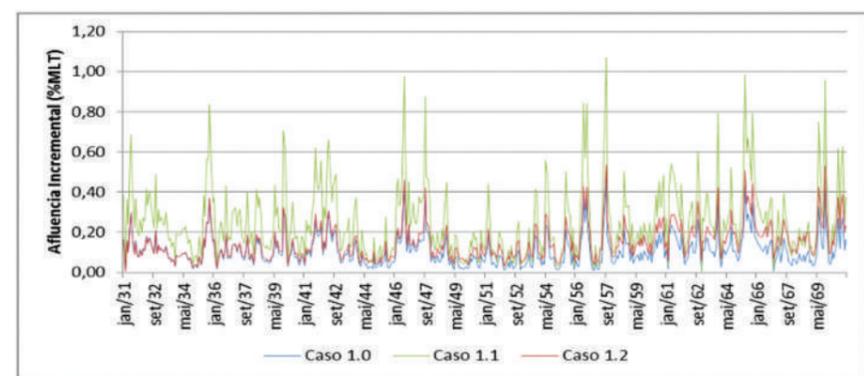


Figura 2. Escenarios de afluencia incremental de la CHI (1931-1970).

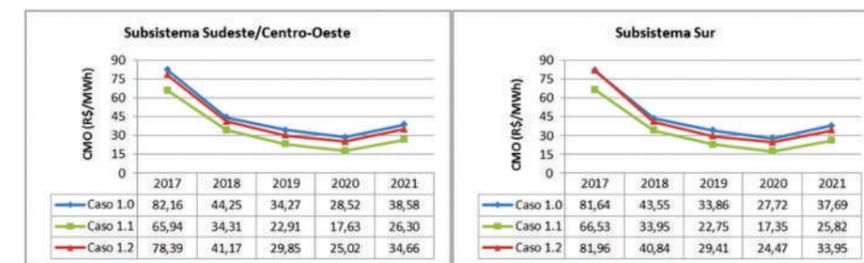


Figura 3. Costo Marginal de Operación Subsistema Sudeste/Centro-Oeste y Subsistema Sur (horizonte 2017-2021)

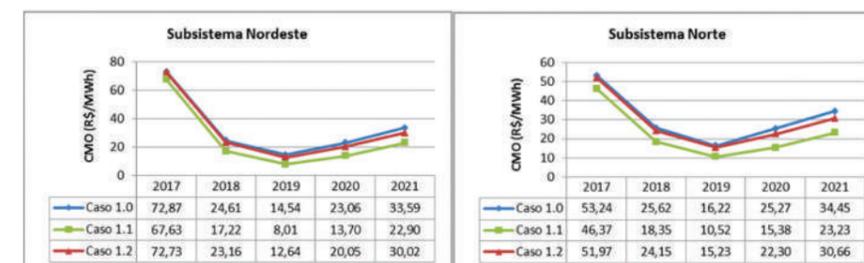


Figura 4. Costo Marginal de Operación Subsistema Nordeste y Subsistema Norte (horizonte 2017-2021).

de la generación durante la mayor parte del horizonte de planificación. La diferencia de generación promedio adicional entre el Caso 1.0 y el 1.1 fue de 424,4 MWmedio; en el Caso 1.2 fue de 81,1 MWmedio.

El modelo a corto plazo DECOMP posee un horizonte de planificación de dos meses, donde el primer mes es dividido en etapas semanales (Semana 1 a Semana 4). El Costo Marginal de Operación (CMO) obtenido para el Caso 1.1 presentó una reducción durante todo el horizonte de planificación y en todos los subsistemas cuando comparados con el caso base (Caso 1.0), Figura 6 y Figura 7.

La mayor reducción del CMO fue de 5,7%, observado en la semana 1 en todos los subsistemas. Para el Caso 1.2, los resultados del CMO por subsistemas fueron superiores a los del caso original (Caso 1.0) durante todo el horizonte de planificación.

Contrario al comportamiento en el largo plazo, la generación hidroeléctrica de la CHI en el corto plazo se vio disminuida durante todo el horizonte de planificación. La diferencia entre el Caso 1.0 y el 1.1 fue de 89 MWmedio; en el Caso 1.2 fue de 130 MWmedio.

Los resultados del CMO del modelo DECOMP para los casos 2.0, 2.1 y 2.2, relacionados con el análisis de la influencia de la afluencia incremental en el corto plazo, son presentados en las Figuras 8 y 9 para la Semana 4 y el Mes 2 respectivamente. Este caso sólo abarca la última semana del mes de mayo y todo el mes de junio, porque el deck utilizado en las simulaciones corresponde a la Revisión 3 del mes de mayo de 2017.

En la Semana 4 y Caso 2.1, la reducción del CMO en los Subsistemas Sudeste y Sur fue de 21,2 % y en los Subsistemas Nordeste y

Norte fue de 15,4%. En la misma semana para el Caso 2.2, la reducción fue aún mayor: 27,4 % para los Subsistemas Sudeste e Sur, y 17,6 % en los Subsistemas Nordeste y Norte.

Para el mes 2 (junio de 2017), en el Caso 2.1 la reducción del CMO en los Subsistemas Sudeste, Sur y Nordeste fue 5,1% y en el Subsistema Norte fue 5,5%. Para el mismo mes y Caso 2.2, la reducción fue 12,6% en los Subsistemas Sudeste, Sur y Nordeste, y 12,9% en el Subsistema Norte.

En términos de la variación de la generación hidroeléctrica de la CHI, es favorecido el aumento de

la generación durante la mayor parte del horizonte de planificación. La diferencia de generación promedio adicional entre el Caso 1.0 y el 1.1 fue de 424,4 MWmedio; en el Caso 1.2 fue de 81,1 MWmedio.

En términos de la variación de la generación térmica del SIN, se observa que en los casos con corrección del caudal incremental es favorecida la disminución de este parámetro durante todo el horizonte de planificación. Comparando los Casos 2.0 y 2.1, la reducción fue de 8,1 % en la semana 4 y 1,0% en el mes 2; en el Caso 2.2 la reducción fue de 9,2 % en la semana 4 y 7,1 % en el mes 2.

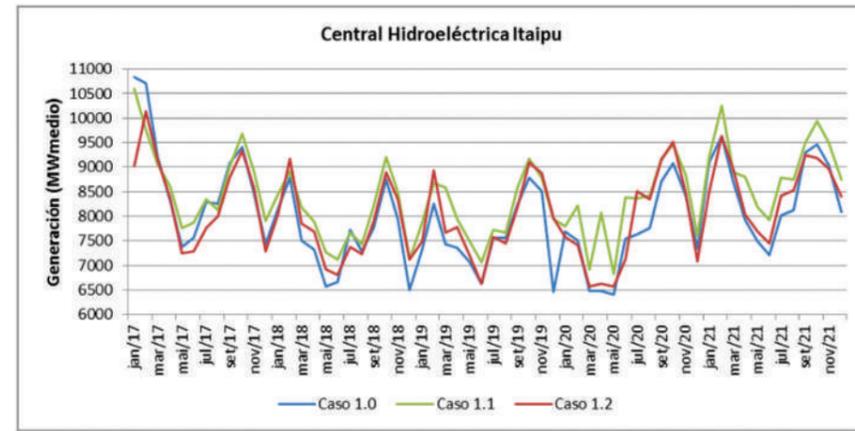


Figura 5. Generación Central Hidroeléctrica Itaipú (horizonte 2017-2021)(horizonte 2017-2021).

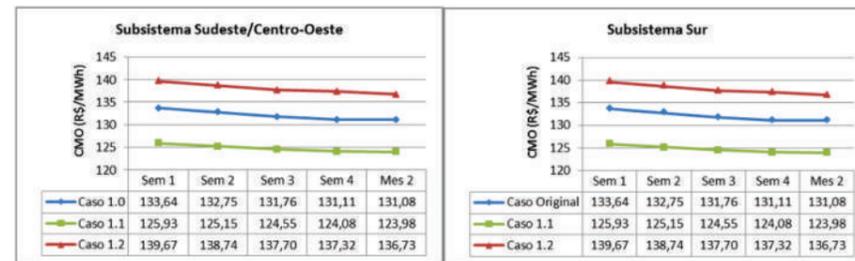


Figura 6. Costo Marginal de Operación Subsistema Sudeste/Centro-Oeste y Subsistema Sur (Mes 1-Me2).(horizonte 2017-2021).

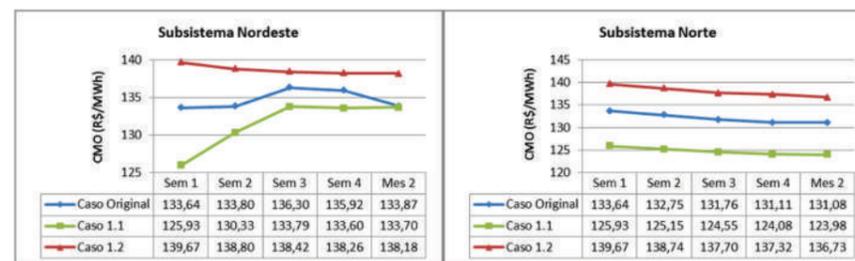


Figura 7. Costo Marginal de Operación Subsistema Nordeste y Subsistema Norte (Mes 1-Mes 2) (horizonte 2017-2021).

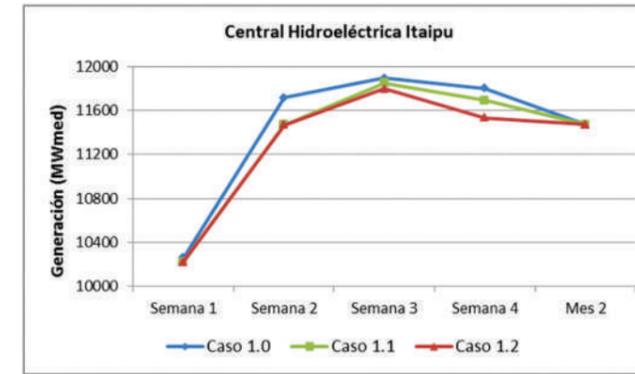


Figura 8. Generación Central Hidroeléctrica Itaipú (Mes 1-Mes 2).

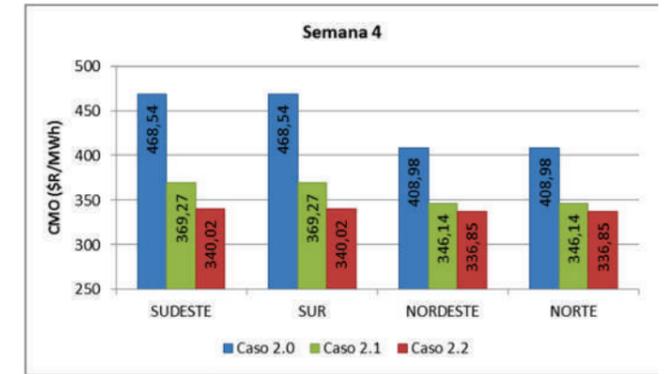


Figura 9. Costo Marginal de Operación por Subsistema (Semana 4)

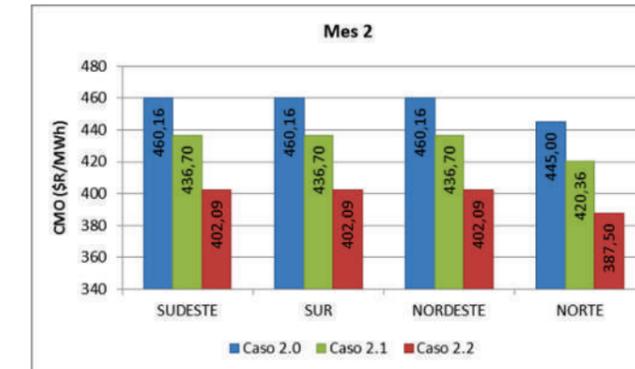


Figura 10. Costo Marginal de Operación por Subsistema (Mes 2)

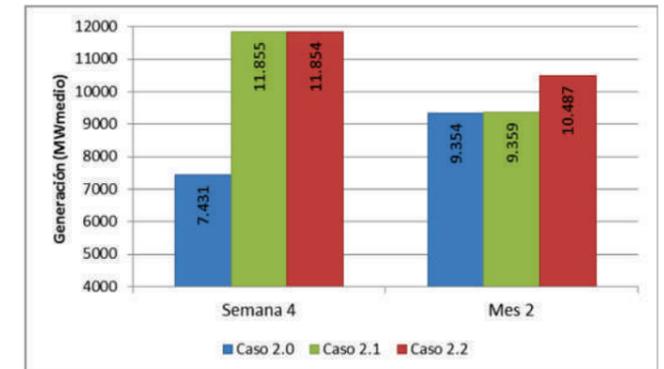


Figura 11. Generación de la Central Hidroeléctrica Itaipú (Semana 4-Mes 2)

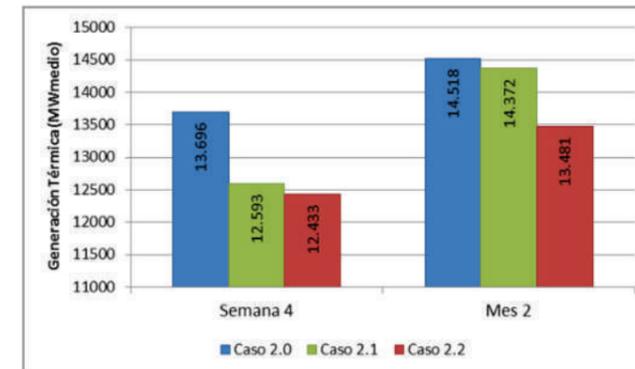


Figura 12. Generación Térmica Total del SIN (Semana 4-Mes 2)

Conclusiones

El problema de la planificación de la operación energética tanto a medio como a corto plazo, se caracteriza por su alta complejidad debido a las incertezas presentes en los datos de entrada. Los resultados aquí obtenidos demuestran la sensibilidad de los Modelos de Planificación de la Operación de Sistemas Hidrotérmicos Interconectados de Medio y Corto Plazo,

NEWAVE y DECOMP, a las variables histórico de caudal y afluencia incremental.

De ahí la importancia de la confiabilidad de los datos recolectados en campo que son utilizados para realizar la previsión de afluencias, y afectan directamente la política operativa a implementar en el despacho de la plantas generadoras hidroeléctricas y térmicas.

Agradecimientos

A Itaipú Binacional por proporcionar los programas necesarios para realizar las simulaciones.

Lista de siglas:

CHI: Central Hidroeléctrica Itaipú
 CMO: Costo Marginal de Operación
 IPDO: Informativo Preliminar Diario de la Operación
 MLT: Caudal medio mensual histórico.
 ONS: Operador Nacional del Sistema.
 PMO: Programa Mensual de Operación Energética
 SIN: Sistema Interconectado Nacional.

Referencias bibliográficas

CEPEL. (2012). *Manual de Referencia Modelo NEWAVE*. Empresa do Sistema Eletrobrás, Brasil.

Cicogna, M. A. (2003). *Sistema de Suporte a Decisão para o Planejamento e Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica*. Monografía presentada para obtener el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica, UNICAMP, Brasil.

ITAIPU BINACIONAL. (2017). *Preguntas Frecuentes*. Recuperado en: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>>. Consultado en: Mayo de 2017.

Marcato, A. (2010). Capítulo II – *As Usinas Hidrelétricas*. Material de Apoyo de la disciplina Planificación de Sistemas de Potencia, UFJF, Brasil.

ONS. (2016a). *Treinamento nos modelos NEWAVE/DECOMP: DECOMP*. Exercícios Práticos. Recuperado en: <http://www.ons.org.br/download/agentes/pmo/treinamentoPMO/06-ONS_CCEE_DECOMP_PRATICO_mai2016.pdf>. Consultado en: Mayo de 2017.

----- (2016b). *Treinamento nos modelos NEWAVE e DECOMP: O SIN e os modelos de Planejamento da Operação Energética*. Recuperado en: <http://www.ons.org.br/download/agentes/pmo/treinamentoPMO/01-Apostila_Treinamento_modelos_NEWAVE-DECOMP_2016.pdf>. Consultado en: Mayo de 2017.

----- (2016c). *DECK NEWAVE*. Enero de 2017.

----- (2016d). *DECK DECOMP*. Enero de 2017, Revisión 0”.

----- (2016e). *DECK GEVAZP*. Enero de 2017”.

----- (2017a). *O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional*. Disponible en: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx>. Consultado en: Mayo de 2017.

----- (2017b). *Séries Históricas de Vazões*. Disponible en: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>. Consultado en: Mayo de 2017.

----- (2017c). *DECK DECOMP*. Mayo de 2017, Revisión.

----- (2017d). *DECK GEVAZP*. Mayo de 2017, Revisión 3”.

----- (2017e). *IPDO: Informativo Preliminar Diário de la Operação*, 22 de Mayo de 2017. Disponible en: <http://www.ons.org.br/publicacao/ipdo/Ano_2017/M%C3%AAAs_05/IPDO-22-05-2017.pdf>. Consultado en: Mayo de 2017.

* Lorena Acosta Zuñiga¹, Rafael José de Andrade²

¹. Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA)

². Itaipú Binacional.

DetECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FLORACIONES ALGALES DEL EMBALSE SAN ROQUE A PARTIR DE SENSORES REMOTOS

ALBA GERMÁN
ANABELLA FERRAL
DANIELA ROMERO ARIJON
INÉS BERNASCONI

Introducción

La eutrofización es el proceso por el cual la producción primaria aumenta, ya que se ve potenciada por un mayor aporte de materia orgánica y nutrientes a un ecosistema. Este enriquecimiento de las aguas con nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, si se produce a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno disuelto, que puede producir efectos tales como la mortandad de peces. Las masas de agua eutrofizadas tienen un alto nivel de productividad y de biomasa en todos los niveles tróficos. Es así, que los procesos de eutrofización producen cambios cuantitativos y cualitativos en la comunidad del fitoplancton. En casos severos, este proceso puede llevar a grandes floraciones algales, es decir un rápido aumento de la población de algas en un sistema acuático (Wetzel, R. G., 2001).

Este fenómeno afecta a muchos cuerpos de agua en todo el mundo y el Embalse San Roque no es ajeno a éste. Situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía en la provincia de Córdoba, el Embalse San Roque es la

principal fuente de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Córdoba. Frente a esto el estudio de la calidad de agua del mismo es clave.

Las floraciones algales son generalmente monitoreadas con medición de biomasa, examinando las especies presentes. Una medida ampliamente usada es la concentración de clorofila-a. Valores pico de esta última para un lago oligotrófico son de alrededor de 1 a 10 µg l⁻¹, mientras que en un lago eutrófico puede alcanzar 300 µg l⁻¹. El agua del Embalse San Roque ha presentado valores medidos que en ocasiones pueden llegar a 1000 µg l⁻¹.

Ha sido mostrado (Rantajarvi et al., 1998) que las frecuencias temporales y espaciales de los programas de muestreo de agua convencionales no son adecuados para reportar cambios en la biomasa del fitoplancton, especialmente durante condiciones de floración, donde la variabilidad espacial y temporal en la densidad del fitoplancton es particularmente alta.

La teledetección es una herramienta fundamental para complementar los monitoreos tradicionales y comprender los procesos que ocurren en los cuerpos de agua. Consiste en medir alguna propiedad de un objeto de interés desde la distancia, desde un sensor a bordo de un satélite, por ejemplo, lo que nos permite extrapolar una característica de un área particular relevada por mediciones locales a

una escala más grande, en menor tiempo y costo (Kutser T., 2004).

Específicamente, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, puestos en órbita en el año 1999 y 2002, muestra mucho potencial para monitorear calidad de agua ya sea terrestre u oceánica. Estos dos satélites proveen información diaria y disponible de forma libre y abierta. MODIS está equipado con varias bandas de reflectancia de la superficie de la tierra de resolución media y además genera productos en distintas resoluciones espaciales. Estos últimos son productos de suelo, productos de índices de vegetación y productos de Albedo (<https://modis.gsfc.nasa.gov>).

Particularmente, para este trabajo se utilizó el producto MOD-09GQ - MODIS Reflectancia de Superficie Diaria L2G Global de 250 metros de resolución espacial, que contiene dos bandas de información espectral que se centran entre los 645 nm y los 858 nm del espectro electromagnético.

La información provista por este sensor es de mucho interés, ya que provee datos diarios y gratuitos, que permiten realizar un monitoreo constante. Para el caso de las floraciones algales, este punto es muy importante, ya que son de explosión muy rápida y para detectar su aparición es esencial contar con una resolución temporal alta.

Por otro lado, para aprovechar

las distintas resoluciones de los sensores que proveen imágenes libres, se trabajó además con el satélite Landsat 8 que transporta al sensor OLI (*Operational Land Imager*). El mismo consiste en nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los 0,433 μm a los 1,390 μm , con una resolución espacial de 30 m x 30m. El satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y es parte del proyecto Landsat operado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que provee datos desde 1972.

En este trabajo se presenta la implementación del monitoreo de floraciones algales en el Embalse San Roque a través de sensores remotos. El objetivo principal de este método implementado es controlar la calidad del agua del embalse con métodos complementarios al monitoreo tradicional y así caracterizar las floraciones algales y estado trófico del cuerpo de agua de estudio. Se muestran aquí los resultados pertenecientes a la temporada primavera – verano 2016 – 2017 (octubre de 2016 hasta abril de 2017).

Área de estudio

El Embalse San Roque, con su baricentro superficial con coordenadas 31° 22' 56" S, 64°27' 56" O, está situado aproximadamente a 600 msnm en el Valle de Punilla en la alta cuenca del Río Suquía (provincia de Córdoba). El clima de la región es templado con una temperatura media anual de 14° C y vientos predominantes del cuadrante sur y norte, con precipitaciones estivales en el rango de 400 a 1000 mm y una media anual aproximadamente de 720 mm (Rodríguez et al., 2006).

El área de drenaje del Embalse comprende una superficie de 1750

km², recibiendo el aporte de cuatro tributarios: los ríos San Antonio, Cosquín y Los Chorrillos junto con el arroyo Las Mojarras sumados al pequeño aporte debido al perillago que conforman las fuentes de agua por escorrentía superficial. A su vez cuenta con un único emisario, el Río Suquía (Figura 1).

Un primer dique fue construido en el año 1888 el cual fue reemplazado por el actual paredón en 1944 para aumentar el volumen de almacenamiento.

Materiales y Métodos

Para este trabajo, se utilizó un algoritmo de teledetección de cl-a desarrollado en German, A. et al., (2017) elaborado a partir de datos del sensor MODIS y datos de campo recolectados y generados en el contexto del plan de monitoreo que realiza la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba.

El diseño del monitoreo in situ se elaboró considerando los tér-

minos de referencia del convenio firmado oportunamente con la Secretaría de Ambiente de la Nación (Bernasconi et al., 2009). Esta metodología es coherente con el modelo propuesto por la EPA (Environmental Protection Agency) para el monitoreo de lagos con sistemas de aireación artificial (EPA, 1990).

Para la elaboración del algoritmo, se utilizaron los valores de concentración de cl-a medidos en laboratorio, pertenecientes solo al punto de monitoreo denominado centro (con coordenadas - 31.3753, -64.4693) ya que en Ferral (2013) se muestra que el mismo es estadísticamente representativo de todo el cuerpo de agua. Además, este punto es el único que en todas las cotas del Embalse durante el año, está cubierto por agua y no tiene influencia de la reflectancia de la superficie terrestre.

El Instrumento MODIS provee imágenes en 36 bandas espectrales de alta sensibilidad radiométrica (12 bit), en un rango de longitudes de onda que van desde los 0.4

μm a los 14.4 μm . Dos bandas son tomadas a una resolución espacial nominal de 250 m en el nadir, cinco bandas a 500 m y las remanentes 29 a 1km. El patrón de escaneo a ± 55 grados en la órbita EOS de 705 km, obtiene un barrido de 2330 km y provee una cobertura global cada uno o dos días. Se obtienen diversos productos a partir de las bandas espectrales, de los cuales se utilizó para la elaboración del algoritmo el denominado MOD09GQ (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09gq). El mismo es un producto de reflectancia superficial, que provee un estimado de la reflectancia espectral superficial como si fuera medida al nivel del suelo en ausencia de dispersión atmosférica o absorción. Los datos de nivel bajo son corregidos para gases y aerosoles atmosféricos, de forma flexibles para generar una base de nivel 2 para varios productos grillados de mayor orden de procesamiento, como productos L2G y de Nivel 3. MOD09GQ provee las bandas 1 y 2 a 250 m de resolución en un producto grillado diario L2G, en proyección Sinusoidal. Se trabajó con el pixel que corresponde a las coordenadas del punto de monitoreo centro.

Por el otro lado, se calcula con las imágenes Landsat 8 - OLI el índice espectral Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse, J. W. et al., 1973). Éste se utiliza comúnmente para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. En nuestro caso de estudio, las masas de algas son tan abundantes durante los eventos de floración que pueden ser detectadas con este índice de verdor. El mismo aprovecha la absorción que realizan las células fotosintéticas en la región del espectro electromagnético perteneciente al visible

– rojo y la reflexión que existe en la región del infrarrojo cercano. Al ser un índice normalizado, sus valores van del -1 al 1, representando los valores positivos y cercanos a 1 mayor vigor en la vegetación. Éste se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = (\text{IR cercano} - \text{Rojo}) / (\text{IR cercano} + \text{Rojo})$$

Respecto al instrumento utilizado para calcular el índice nombrado a bordo del Landsat 8, el Sensor OLI es del tipo multiespectral y cuenta con nueve bandas espectrales en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio (Vermote E. et al., 2016). La resolución espacial de cada una de las bandas es de 30 metros. Se aprovecha aquí la mayor resolución espacial con respecto al sensor MODIS para generar mapas que permitan analizar cómo varía el verdor observado en el espejo de agua.

Resultados

A partir de la implementación del algoritmo desarrollado en German, A. et al. (2017), se generó una serie diaria de valores de concentración de cl-a en el agua del embalse San Roque, excluyendo las fechas que se registró presencia de nubes (Figura 2) para el período correspondiente a la temporada primavera – verano de 2016-2017 (octubre de 2016 hasta abril de 2017).

En la Figura 3 podemos ver el gráfico de caja que representa la distribución de las concentraciones de cl-a calculadas. La mediana de los valores representada por la línea de la caja es de 92.52 $\mu\text{g/l}$. Se observan valores identificados como outliers que llegan hasta 614 $\mu\text{g/l}$.

En la Figura 4 es posible observar la distribución por mes de los valores de concentración de Cl-a, calculada desde satélite. Los valo-

res más altos se presentan en los meses de enero, febrero y marzo.

Por otro lado, se presenta un análisis del estado trófico del embalse en estas fechas analizadas. Para esto se calcula el índice TSI (Trophic State Index) de Carlson (1977) a partir de la concentración de cl-a, según la ecuación:

$$\text{TSIc} = 30.6 + 9.81 * \ln(\text{Cl-a})$$

Así se clasifica un cuerpo de agua según la siguiente escala: los valores de TSI menores a 20 corresponden a un lago ultraoligotrófico, entre 20 y 40 a uno oligotrófico, entre 40 y 50 a uno mesotrófico, entre 50 y 70 a uno eutrófico y superiores a 70 a un lago hipereutrófico.

El resultado del cálculo de este índice para cada fecha estimada en la serie de tiempo de cl-a satelital, se muestra en la figura 5 que presenta un gráfico de torta de los porcentajes de cada estado trófico para la totalidad de las fechas. Se observa claramente que el embalse fue clasificado mayormente como hipereutrófico (79%) para este período de tiempo.

Finalmente, se utilizó la serie de cl-a para determinar qué fechas se identificaban como eventos de floración y cuáles eran las características de las mismas. Para esto se utilizó el umbral desarrollado en German, A. et al. (2017), que se logró a partir de un modelado de la serie calculada en el mismo trabajo citado, utilizando el algoritmo de HANTS. Éste es un algoritmo desarrollado para tratar series de tiempo de observaciones irregularmente espaciadas (Roerink et al., 2000). En la reunión ICES (1984) se concluye que las floraciones de fitoplancton excepcionales deben ser definidas en términos de la desviación del ciclo normal de la biomasa fitoplanctónica (Parker,

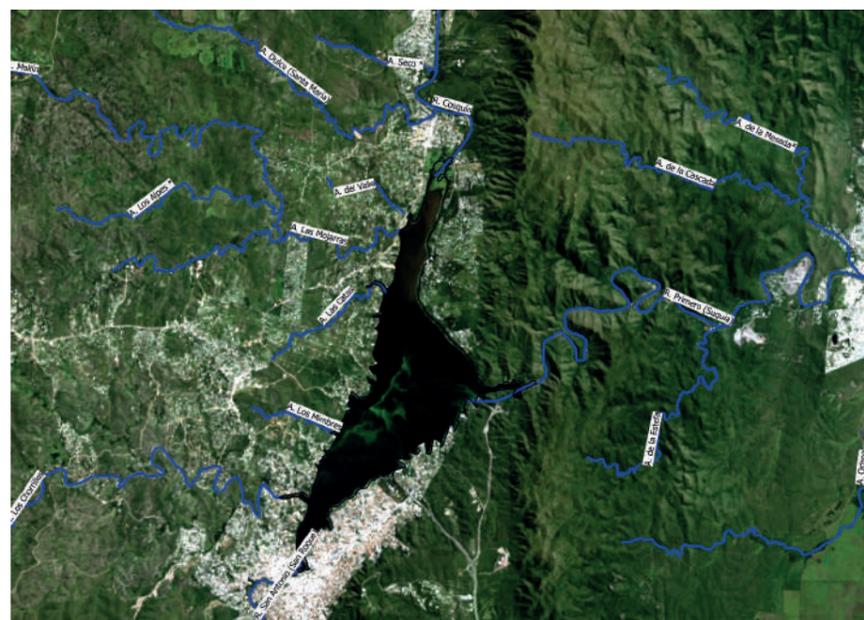


Figura 1. Imagen Landsat 8 del día 22/2/2017. Combinación de bandas RGB: 4, 3 ,2 (Color Real). Se observan los cursos de agua de la región en azul.

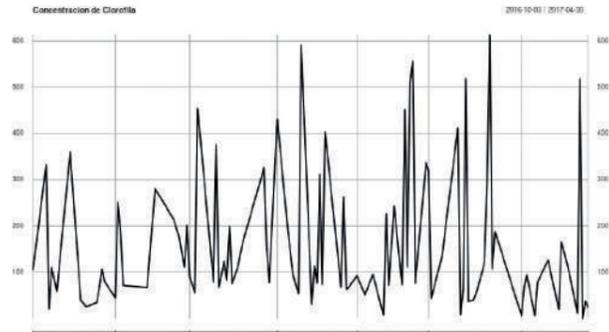


Figura 2. Gráfico de la serie de tiempo diaria (a excepción de fechas con nubes) de octubre de 2016 hasta abril de 2017 de concentración de cl-a estimada desde satélite con el algoritmo nombrado.

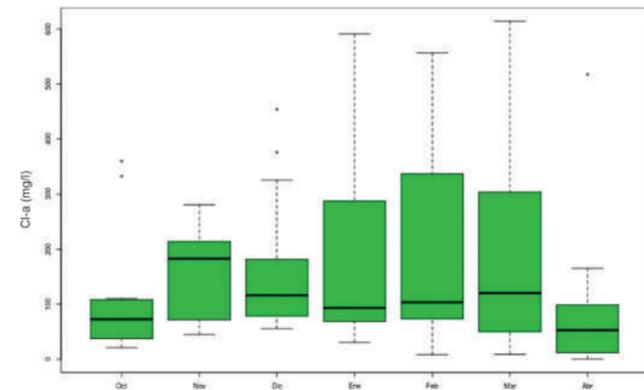


Figura 4. Gráficos de caja que representan la distribución de los valores de concentración de cl-a por mes en el Embalse San Roque.

1987). En nuestro caso, utilizamos como el ciclo normal de la biomasa en el agua del embalse esta serie modelada, construida a partir de 14 años de datos (2001 – 2014) de concentración de cl-a estimada en el agua del Embalse (Figura 6).

A partir de este análisis podemos cuantificar la cantidad e intensidad de los eventos de floración y caracterizarlos estadísticamente. En primer medida, 59 fechas fueron clasificadas por encima del umbral de un total de 96, es decir un 61 % del período de estudio. El valor máximo de concentración de cl-a registrado fue de 614.15 µg/l, mientras que el mínimo fue de 58.73 µg/l con una media de 232.12 µg/l. Estos valores caracterizan las floraciones específicas del embalse, mostrando que el

rango es muy amplio dependiendo de la época del año, ya que el mínimo se da en octubre (12-10-2016) y el máximo en marzo (24-03-2017). Además, si analizamos las floraciones por mes (Figura 7) podemos ver que en diciembre ocurrieron las mayores cantidades de eventos (10), seguido por noviembre y marzo (9), mientras que el resto de los meses se mantuvo aproximadamente constante entre 7 y 8 fechas por mes.

Por otro lado, se observa en la Figura 8 el resultado de calcular el índice espectral NDVI (Índice Diferencial Normalizado de Vegetación) en el cuerpo de agua de estudio a partir de todas las imágenes Landsat 8 OLI sin nubes disponibles en el lapso de tiempo analizado. Los valores de verdor

alto en las costas del Embalse corresponden a presencia de vegetación terrestre que no está cubierta por agua en algunos momentos del año según la cota del Embalse.

Observando la figura anterior, se detectan valores más altos en algunas fechas, principalmente el 22 de Febrero de 2017, mostrando la distribución de mayores concentraciones de organismos fotosintéticos en el espejo de agua. Esto coincide con evidencias tomadas in situ por personal calificado de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, durante una fecha de muestreo que se realizó (Figura 9).

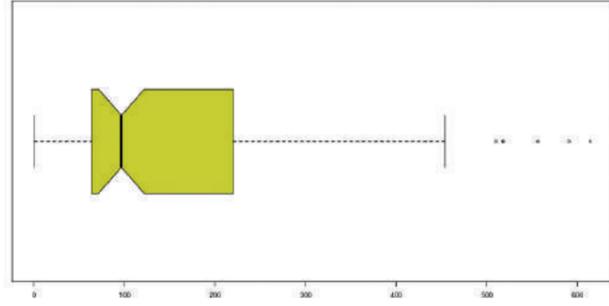


Figura 3. Gráfico de Caja que representa la distribución de los valores de concentración de Cl-a en el Embalse San Roque.

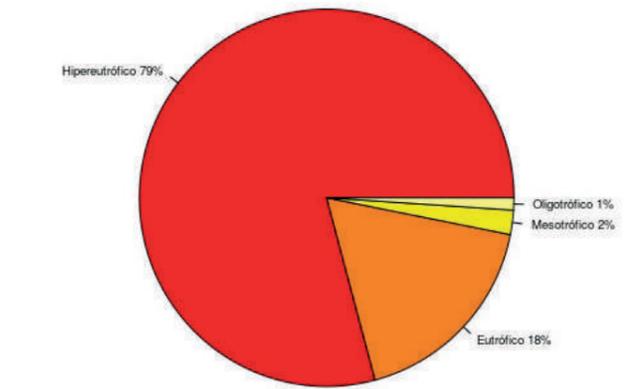


Figura 5. Gráfico de torta que representa los porcentajes de fechas según estado trófico para el lapso de tiempo de estudio.

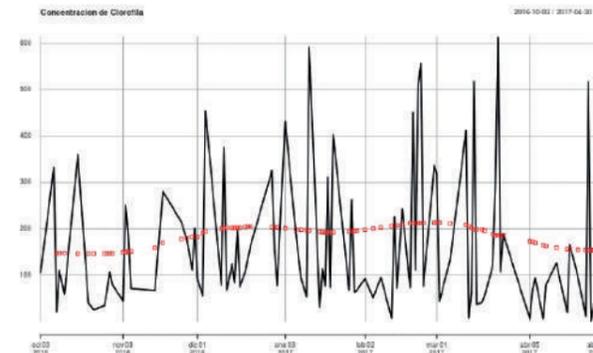


Figura 6. Gráfico que representa la concentración de Cl-a en el centro del embalse para todos los días sin nubes en la temporada primavera-verano 2016-2017.

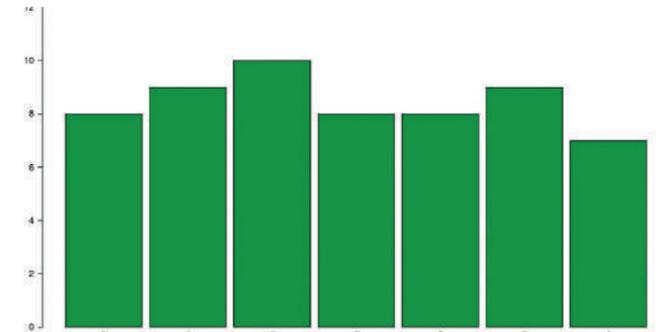


Figura 7. Gráfico de barras que representa la cantidad de floraciones ocurridas por mes en el período de estudio.

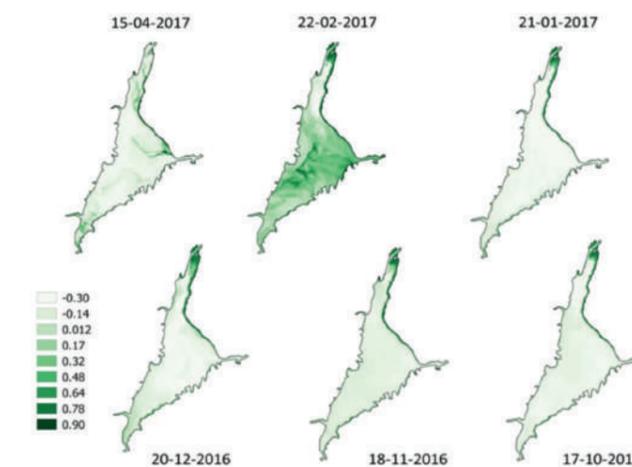


Figura 8. Figuras que muestran los resultados del cálculo del NDVI para distintas fechas en el Embalse San Roque.



Figura 9. Fotografías tomadas el día 22/2/2017 durante actividades de monitoreo por personal calificado de la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, pudo describirse y caracterizarse la variabilidad temporal de las floraciones algales en el Embalse San Roque para el período de octubre 2016 a abril de 2017. Podemos concluir que las concentraciones de cl-a han sido altas durante gran parte de tiempo estudiado, lo que ha generado que el umbral desarrollado con datos hasta 2014 haya quedado inferior al comportamiento medio que ha tenido el embalse en este último período analizado, detectando de esa manera múltiples fechas como eventos de floración. Esto denota no solo una situación de empobre-

cimiento en la calidad del agua del embalse con respecto a su tendencia anterior, sino que según el índice de Carlson el cuerpo de agua debería ser clasificado actualmente como hipertrófico. Esto tiene como consecuencia que las floraciones algales provoquen cada vez más problemas para los usos que se le da al Embalse. Para los usos recreativos, el olor, color y posible producción de toxinas por parte de las cianofíceas, que se saben predominan en la composición del fitoplancton del Embalse (Rodríguez et. al., 2008) son consecuencias directas de este fenómeno. Además, el alto consumo de oxígeno por parte de las algas, genera fenómenos de mortandad de peces. Otro problema es la

decañación de las masas de algas muertas que contribuyen al fenómeno de colmatación del embalse. Por otro lado, el proceso de potabilización también se complejiza generando mayores costos.

Otra conclusión que se desprende de los resultados presentados, es que frente al uso de sensores para monitorear fenómenos tan dinámicos como son las floraciones algales la resolución temporal de los mismos se vuelve primordial frente a la resolución espacial que se suele priorizar para entender dinámicas dentro del cuerpo del embalse.

Se pudo observar *in situ* y a través de ambos sensores utilizados el evento de floración extraordinaria que sufrió el embalse

VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, 2017



RIOS 2017

VIII SIMPOSIO REGIONAL SOBRE HIDRAULICA DE RÍOS

Han pasado 18 años desde el primer Taller Regional sobre Tópicos Básicos y Avanzados de la Hidráulica Fluvial celebrado en Santa Fe, Argentina, en 1998. A partir de ese evento se han desarrollado cada dos años y en forma ininterrumpida los Simposios Regionales sobre Hidráulica de Ríos en Ezeiza, Neuquén, Córdoba, Salta, Santiago del Estero, y Santa Fe, todos ellos en Argentina, mientras que la edición 2015 se desarrolló en Montevideo, Uruguay.

Entre el 8 y 10 de noviembre de 2017, el Simposio se realizó en Córdoba, organizado por el Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) de la Universidad Nacional de Córdoba, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), y el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (MAAySP). El CETA (Centro de estudios y Tecnología del Agua) colaboró activamente en la organización de este evento.

El Simposio se desarrolló en el Anfiteatro de EPEC, ubicado en Boulevard Mitre 343, de la ciudad de Córdoba, Argentina. Los días previos al evento se desarrollaron cursos pre-Simposios a cargo de reconocidos especialistas en la temática del Simposio.

Los ejes temáticos abordados se vincularon al uso, gestión, control y preservación de los recursos hídricos en sistemas fluviales: morfología y procesos fluviales: erosión y sedimentación, ingeniería fluvial y manejo de corredores fluviales.

Participaron de este evento más de 100 científicos, profesionales y estudiantes de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Estados Unidos de Norteamérica, Perú y Uruguay. Los investigadores destacados que brindaron charlas magistrales fueron el Dr. Marcelo H. García, (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois at Urbana-Champaign, Estados Unidos), Dr. Yarko Niño (Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Chile), Dr. Jorge D. Abad, (Centro de Investigación y Tecnología del Agua – CITA, Perú), Dr. Wernher Ariel Brevis Vergara (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental y Departamento de Ingeniería de Minerías. Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile) y el Magister Ing. Héctor Daniel Farías (Director del Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE). Se realizaron además más de 50 ponencias técnicas y científicas.

durante el 22 de Febrero de 2017. Pero según la detección realizada con el algoritmo de MODIS, en el período Noviembre - Enero se desarrollaron eventos aún más severos que no hubiesen sido detectados de otra manera, ya que las imágenes sin nubes disponibles en ese período para Landsat 8 – OLI no muestran este comportamiento. El muestreo in situ demanda muchos insumos de tiempo, personal y gasto económico como para realizarlo en forma tan periódica, por lo que se vuelve necesario un monitoreo más constante como el aquí presentado que complementa los monitoreos tradicionales.

Referencias bibliográficas

Bernasconi I, Alensinko A, Fuster M, Herrera M, Orueta A, Plomer E, Montachini G, Cossavella A, Brito R, Ferreyra N, Hunziker L, Echeverría F, Melian J., and Bresciano J.C. (2009). Desestratificación térmica del embalse San Roque por el método de circulación-aireación artificial. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, pp. 1-37.

Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22 (2), 361- 369.

Ferral, A. (2013). Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el Embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales. FAMA - UNC.

German A., Tauro C., Andrea V., Bernasconi I., Ferral A. (2017). “Detección y caracterización de floraciones algales en un embalse eutrófico a partir de una serie temporal de clorofila-a obtenida de imágenes MODIS.” Libro de Actas de XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Informa-

ción Geográfica; editado por Walter F. Sione [et al.]. - 1ª. ed. - Luján: Ed. UnLu, 2017. Libro digital, PDF: <https://selperargentina2016.org/actas/>

Kutser, T. (2004). Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2179-2189.

Parker, M., & Tett, P. (1987). Exceptional plankton blooms.

Rantajarvi, E., Olsonen, R., Hallfors, S., Leppanen, J. M., & Raateoja, M. (1998). Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: unattended high-frequency measurements on board ferries in the Baltic Sea. *ICES Journal of Marine Science: Journal du conseil*, 55(4), 697-704.

Rodríguez, M. I., Bustamante, M. A., Ruibal, A. L., Ruíz, M. A., & Busso, F. (2008). Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque (Cba). In *IV Congreso Argentino de Limnología* (Vol. 27).

Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Vilchez, G., Crema, N., Ruibal Conti, A. L., Bustamante, M. A., & López, F. (2006). Monitoreo integral de un cuerpo de agua eutrófico Embalse San Roque (Córdoba, Argentina). En *I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua*.

Roerink, G. J., Menenti, M., & Verhoef, W. (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1911-1917.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering (1973) ‘Monitoring vegetation systems in

the Great Plains with ERTS’, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.

U.S. EPA.(1990) Monitoring Lake and Reservoir Restoration. *Office of Water* (WH-553), 440(4- 90-007).

Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46-56.

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf Professional Publishing.

* German Alba^{1,2}, Ferral Anabella², Daniela Romero Arijon¹, Inés Bernasconi¹

¹. Secretaría de Recursos Hídricos, Córdoba, Argentina.

². Instituto Mario Gulich, Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Córdoba, Argentina.

Premio Fundación INMAC

Desde el año 2007 se entrega el premio Fundación INMAC al mejor trabajo sobre Control de Erosión y Sedimentos presentado por jóvenes profesionales o jóvenes investigadores en cada una de las ediciones de los **Simposios Regionales sobre Hidráulica de Ríos** que se realizan cada dos años. El premio nace con el objetivo de apoyar a estudiantes y jóvenes profesionales para incentivar la investigación y la excelencia en la actividad.

En la edición del Simposio Regional de Ríos 2017 hubo trabajos de excelente nivel, los cuales no solo presentaron avances científicos sino también tecnológicos y metodológicos en la hidráulica de ríos. Como cierre de este Simposio, se hizo entrega del Premio Fundación INMAC, en su sexta edición a **LUCAS DOMINGUEZ RUBEN** de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina., por el trabajo *“Influencia de las corrientes secundarias sobre el sedimento suspendido en meandros de un gran cauce. Validación de modelo numérico Telemac 2D”*.

Además se hizo entrega de una mención especial a **FLORENCIA PERUZZO** del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA - UNR) por el trabajo *“Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal Del Río Paraná”*.

El ganador del premio INMAC obtuvo una inscripción para el congreso internacional sobre la temática que organiza la Asociación Internacional para el Control de la Erosión en el año 2018, en California, Estados Unidos, el hospedaje y una ayuda para costear el pasaje aéreo. Se entregó además un Diploma alusivo a los ganadores del premio y de la mención especial.



Influencia de las corrientes secundarias sobre el sedimento suspendido en meandros de un grande cauce. Validación de modelo numérico TELEMAC 2D

L., DOMINGUEZ RUBÉN
R., SZUPIANY
P., TASSI
G., PETKOVSEK

Introducción

Los cauces meandriiformes se caracterizan por desarrollar una estructura de flujo de tipo helicoidal, en donde la velocidad se descompone generalmente en una componente primaria (u) y otra secundaria o transversal (v). Esta estructura particular del flujo generada en curvas es producto de la acción conjunta de la fuerza centrífuga y el gradiente de presión transversal, provocando de esta manera un flujo hacia la margen externa en superficie y otro hacia la margen convexa o interna en las cercanías del fondo (Fig. 1) (Engelund, 1974).

Rouse (1938) describió el perfil vertical de concentraciones (C) como una curva que toma un valor mínimo en la superficie incrementándose a medida que se acerca al fondo del cauce (Fig. 1). Esta aproximación fue ampliamente verificada con datos de campo y laboratorio (e.g. García, 2008).

Nótese que si se vinculan los conceptos hidráulicos y sedimentológicos presentados anteriormente se desprende que la componente secundaria producto del movimiento helicoidal produce un flujo transversal de sedimentos suspendidos, debido a que la concentración de sedimentos no es uniforme en la vertical. Por lo

tanto, mientras que el promedio en la vertical de flujo secundario se aproxima a cero (Rozovskii, 1957), el flujo de sedimentos promedio no lo es (Fig 1).

Este fenómeno ha sido poco estudiado debido a la complejidad en la cuantificación del mismo en cauces naturales. En este sentido, recientemente la tecnología acústica se ha aplicado con éxito para la cuantificación del material suspendido, lo que ha producido avances significativos en la comprensión de los fenómenos hidro-sedimentológicos actuantes en grandes cauces naturales (Szupiany et al., 2009).

En el presente trabajo se analiza la influencia del flujo secundario sobre el sedimento suspendido en un gran cauce meandriiforme (río Colastiné, Argentina), a través de aproximaciones numéricas (modelo TELEMAC 2D), validando los resultados con datos observados en campo mediante la cuantificación del flujo y sedimento con tecnología acústica.

Metodología y marco teórico

El tramo de estudio sobre el río Colastiné (brazo secundario del río Paraná en su tramo medio) abarca unos 20km de longitud desde su embocadura (Fig. 2). En este tramo se presentan curvas de diferentes sinuosidades, generándose corrientes secundarias de diferentes intensidades.

Para cada ápice, se relevó la sección transversal con un perfilador acústico Doppler Teledyne RDI de 1200 KHz de frecuencia. Posteriormente se transformó las intensidades acústicas de retorno en concentraciones de sedimentos suspendidos utilizando la metodología propuesta por Szupiany et al. (2016).

Para la modelación numérica se utilizó el modelo TELEMAC 2D (Hervouet, 2007), acoplado con el módulo sedimentológico Sisyphé (Tassi, 2017).

Es necesario indicar que el módulo sedimentológico Sisyphé resuelve

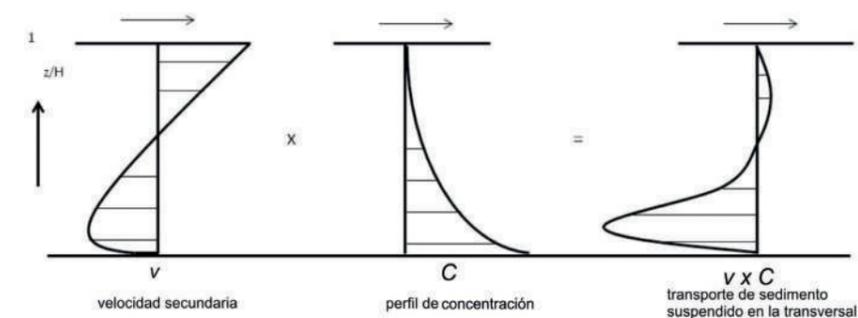


Figura 1. Diagramas de perfiles de velocidad, concentraciones y flujo de sedimento suspendido transversales. Modificado de Olensen (1987).

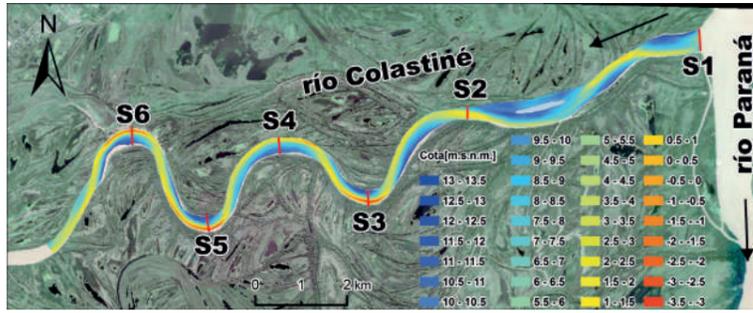


Figura 2. Tramo en estudio y morfología del río Colastiné.

la ecuación del transporte de sedimento suspendido integrada en la vertical, de la siguiente manera:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D \quad (1)$$

donde U y V son las velocidades advectivas (en el sistema cartesiano x, y , respectivamente), C la concentración media en la vertical, ϵ_s coeficiente de difusión del sedimento y $E-D$ flujo neto en la vertical sobre un plano a la altura de referencia.

Particularmente para corregir las corrientes secundarias TELEMAC 2D permite optar por un corrector desarrollado por Finie et al. (1999). Este módulo resuelve la ecuación de transporte para la vorticidad en la dirección del flujo y la convierte en aceleraciones debido a corrientes secundarias. Este efecto reduce las velocidades promediadas en la profundidad en el interior de las curvas y las aumenta en el exterior.

Petkovsek (2015) por otra parte propone otro módulo de corrección de corrientes secundarias, calculando las velocidades advectivas (U, V) por la acción del movimiento helicoidal del flujo y la influencia que tiene el perfil de concentraciones sobre la misma (Fig. 1). El esquema resolutivo de Petkovsek (2015) consta de dos pasos. El primero es la determinación de radio de curvatura

para cada nodo de la malla. Para ello utiliza el desarrollo de Shimizu y Itakura (1991) que se define como:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{3/2}} [u(uv_x - vu_x) + v(uv_y - vu_y)] \quad (2)$$

Siendo r radio de curvatura, u y v las velocidades promediadas en la vertical en un sistema cartesiano (x,y) y u_x, u_y, v_x, v_y las derivadas de las velocidades respecto x e y . Una vez obtenido el radio de curvatura, el segundo paso consiste en corregir la velocidad primaria (u) y transversal (v). Para esto último se utiliza el perfil desarrollado por Olsen (1987), en donde el flujo neto de la componente v es igual a cero (ver Fig. 3). Este ajuste simplificado de las corrientes transversales asume que v/u es bajo y que la relación radio de curvatura/profundidad es baja. Cabe aclarar que el costo computacional requerido para el cálculo de v por Olsen (1987) es elevado, por lo que Petkovsek (2015) propone un ajuste propio para esto (Fig.3).

Con u y v corregida por el ajuste propuesto por Petkovsek (2015), se incorpora la influencia del perfil de concentraciones, utilizando la aproximación de Lane y Kalinske (1942). De esta manera transformamos nuestras velocidades medias en la vertical corregidas (u, v) en velocidades advectivas (U, V). Esto se logra mediante el siguiente cálculo:

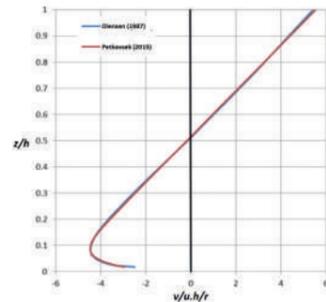


Figura 3. Perfil vertical de corrientes secundarias propuestos.

$$V = \frac{\int_a^h C(z)v(z)dz}{\int_a^h C(z)dz} \quad (3)$$

Donde $C(z)$ y $v(z)$ es la concentración y velocidad a una elevación z del fondo.

Por último se incorpora U y V en Ec. 1 para la resolución de la conservación de masa.

Resultados

En la Figura 4 se presentan los resultados preliminares sobre la sección 3 (ver ubicación en Fig. 2) de la distribución transversal de concentraciones en la vertical obtenida de la modelación 2D para los tres casos analizados: sin corrección de corrientes secundarias, con la corrección de Finnie et al. (1999) y con la corrección propuesta por Petkovsek (2015). Estos resultados se comparan con las mediciones de concentraciones a través de la transformación de la intensidad acústica obtenida con el ADCP.

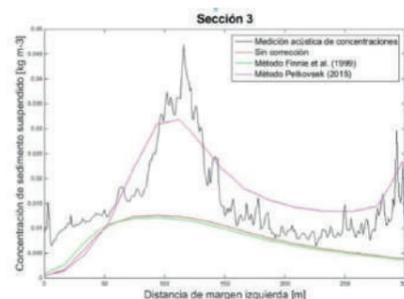


Figura 4. Concentraciones [kg/m³] promediadas en la vertical de la sección S3.

Conclusión

El trabajo presenta resultados preliminares de la estimación de las concentraciones promediadas en la vertical obtenidas por distintas metodologías, i. e. en campo y a través de modelación numérica, en esta última considerando la influencia de las corrientes secundarias sobre el sedimento suspendido. Se utilizó para esto el modelo numérico TELEMAC 2D acoplado al módulo sedimentológico Sisyphay, un módulo que permite la corrección por efectos del flujo secundarios helicoidales.

En los resultados (Fig. 4) se observa claramente que el mejor ajuste es el logrado mediante el módulo de Petkovsek (2015), validando y corroborando el efecto del flujo secundario en la redistribución y cuantificación de las concentraciones del sedimento en suspensión. Nótese además que los resultados de este método alcanzan discrepancias menores al 10% comparados con los datos medidos si se evalúa cada una de las concentraciones por vertical.

Referencias bibliográficas

- Engelund, F. (1974). Flow and Bed Topography in Channel Bends. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 100, No HY11, pp. 1631-1648.
- Finnie, J., Donnell, B., Letter, J. y Bernad, R. (1999). Secondary flow correction for depth-averaged flow calculations. *J. Eng. Mech.*, 125(7), p 848-86.
- García, M. H. (2008). *Sediment transport and morphodynamics*. Chapter 2, Sedimentation engineering: Processes, measurements, modelling and practice, M. H. García, ed., ASCE, Reston, VA, 111-114.
- Hervouet, J.M., (2007). *Hydro-*

namics of free surface flows, modelling with the finite element method, Editions Wiley & Sons, 342 pp.

Lane, E. W. y Kalinske, A.A. (1942). Engineering calculations of suspended sediment, Trans Am Geophysical Union, 22.

Olesen, K. W. (1987). *Bed topography in shallow bed rivers*. PhD Thesis, TUDelft, 265 p.

Petkovsek, G. (2015). Modelling suspended sediment transport due to helical flow, XX II TELEMAC-MASCARET User Conference, p 101-106.

Rouse, H. (1938). Experiments on the mechanics of sediment suspension, *Proceedings, 5th International Congress for Applied Mechanics*, vol. 55, 550-554, John Wiley & Sons, New York.

Rozovskii, I. L. (1957). Flow of Water in Bends of Open Channels, 233 pp., Acad. Sci. Ukraine, Kiev

Shimizu, Y. Itakura T. (1991). Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, C-2, pp.41-48.

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

Szupiany R., C. Lopez Weibel, F. Latosinski, L. DominguezRuben, M. Amsler M. Guerrero (2016). Sediment concentration measurements using ADCPs in a large river. Evaluation of acoustic frequency and grain size. *8th. International Conference on Fluvial Hydraulics*.

July, Saint Louis, EEUU.

Tassi, P (2017). *Sisyphay release 7.2-User manual*. Available online at www.opentelemac.org.

* Dominguez Rubén, L.^{1,2}, Szupiany, R.^{1,2}, Tassi, P.³ y Petkovsek, G.⁴

¹. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina.

². Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

³. EDF R&D and Laboratory for hydraulics Saint-Venant, France.

⁴. HR Wallingford, Wallingford, UK.

Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del Río Paraná

FLORENCIA PERUZZO
GERARDO RICCARD
PEDRO A. BASILE
MARINA GARCÍA

Introducción

Los grandes ríos aluviales de llanura representan un recurso natural de inestimable valor ambiental para un territorio, por ello la sustentabilidad de tales ambientes fluviales resulta de vital importancia. El río Paraná, río aluvial que recorre la zona litoral de nuestro país, forma parte de la Cuenca del Plata, junto con los ríos Paraguay y Uruguay, sus afluentes y varios humedales como los Esteros del Iberá y el Bañado la Estrella. Las aguas superficiales de dicha cuenca son recolectadas principalmente por el denominado Corredor Fluvial Paraná - Paraguay, que se destaca por la presencia de grandes extensiones de humedales. La magnitud de los volúmenes de escurrimiento y la longitud de su recorrido hacen que el mismo se encuentre entre los ríos de llanura más importantes del mundo. El río Paraná tiene usos múltiples entre los que se destacan el aprovechamiento hidroeléctrico, el abastecimiento de agua, el uso como vía de comunicación para navegación comercial y recreacional, entre otros. En este contexto la modelación hidrodinámica se ha convertido en una herramienta esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos como también para cuan-

tificar el impacto de las actividades humanas para la protección de los mismos y del medio ambiente. El tramo del río Paraná que se estudia en el presente trabajo abarca desde el km 452 hasta el km 410 de la ruta de navegación troncal Santa Fe – Océano. Existen antecedentes de simulaciones con modelos matemáticos aplicados satisfactoriamente en el tramo, tales como modelos bidimensionales completos (FICH, 2006; Guerrero y Lamberti, 2013; Basile et al., 2015) y modelos cuasi-bidimensionales de baja complejidad (Peruzzo et al., 2016). También, en lo que respecta a modelación cuasi-2D se ha realizado una aplicación desde la ciudad de Diamante hasta la ciudad de Ramallo, sector que incluye el tramo en estudio, se realizó una modelación unidimensional del cauce principal y cuasi-2d de la planicie de inundación (García et al., 2013).

Objetivos

El objetivo del trabajo es indagar acerca de las potencialidades de uso de un modelo con grilla triangular irregular en la simulación bidimensional para caracterizar la hidrodinámica de un tramo del río Paraná Inferior comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano. Se contrastaron los resultados obtenidos con los de un modelo bidimensional completo aplicado por Basile et al. (2015) y con los de un modelo cuasi-2D implementado por Peruzzo et al. (2016) constitui-

do también en el tramo. Además, se realizó un análisis de sensibilidad variando el tamaño de grilla y el intervalo de integración temporal. Se analizaron 2 tamaños de grilla y se realizaron simulaciones con 3 diferentes pasos de tiempo, para flujo impermanente.

Materiales y Métodos

El modelo de simulación implementado es el TELEMAC-2D (Hervouet, 2000) acoplado a la plataforma de pre y posprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas Blue Kenue©. TELEMAC-2D es un modelo bidimensional de uso gratuito basado en el método de resolución numérica por elementos finitos para resolver las ecuaciones bidimensionales completas para aguas poco profundas.

La aplicación del modelo, se inició con la definición topobatiométrica del cauce principal. Para esto, se constituyó el modelo digital del terreno del fondo del río, las márgenes e islas a partir de datos existentes recopilados de relevamientos realizados por FICH (2004 y 2006). El Riacho Paraná Viejo se completó con datos relevados entre los años 2010 y 2012 (DNVN-DPI, 2014). Se digitalizaron las curvas de nivel del fondo georeferenciadas al sistema de coordenadas POSGAR 94 Faja 5 Datum WGS 1984 con cotas referidas al cero IGN. Se ajustó la base espacial del área de modelación mediante un mosaico construido a partir de 3 cartas náuticas provis-

tas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN, 2014) (Figura 1a). Luego se crearon dos representaciones espaciales del fondo del cauce principal utilizando mallas computacionales de distinto tamaño. Mediante el software Blue Kenue©, se construyeron dos grillas triangulares, una con una distancia entre nodos igual a 100 metros (M100) y otra con una distancia de 50 metros (M50), ambos niveles de detalle permitieron capturar toda la información disponible de relevamientos existentes del fondo del cauce principal. La constitución M100 quedó conformada por 10361 nodos y 19788 elementos, mientras que la constitución M50 por 40712 nodos y 79501 elementos. En la Figura 1b se presenta una imagen de la constitución M50 donde se observan los niveles del lecho expresados en m referidos al cero IGN.

El modelo fue calibrado y validado en ambas constituciones para estados de flujo permanente en un rango de aguas bajas a altas comprendiendo caudales entre 11640 m³/s hasta 28600 m³/s. Los caudales empleados en las simulaciones corresponden a caudales aforados por FICH (2004 y 2006) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-Timbúes. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de rugosidad de Manning η y las variables de ajuste fueron los niveles observados en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416). Asimismo, se realizaron simulaciones en flujo impermanente reproduciendo la serie de niveles observada en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 con intervalos de tiempos de cálculo igual a 5, 10 y 30 s.

Evaluación de resultados

En flujo permanente, el rango de valores del coeficiente de rugosidad de Manning que proporcionó el mejor ajuste en términos de niveles estuvo comprendido entre 0.023 para aguas bajas y 0.022 para aguas altas para la constitución M100, mientras que, para la constitución M50 estuvo entre 0.025 y 0.024 respectivamente. El error relativo porcentual medio entre niveles observados y simulados es de 0.61 % para M100 y 0.59 % para M50. Se observa que el modelo distribuye adecuadamente los caudales en las bifurcaciones que presenta el tramo de río en estudio para ambas constituciones. El valor medio de los errores relativos porcentuales entre porcentajes de caudales derivados por el brazo derecho observados y modelados es de 2.74% para la constitución M100 y de 2.12% para la modelación M50. En las cuatro secciones analizadas el brazo derecho corresponde al curso principal. En la Figura 2 se presenta la comparación entre caudales unitarios aforados con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudales $Q=14310$ m³/s y $Q=19570$ m³/s en una de las secciones estudiadas ubicada en el km 440. La calidad del ajuste fue evaluada con el coeficiente de correlación R^2 el cual quedó comprendido entre 0.74 y 0.96 para la constitución M100 y 0.77 y 0.96 para M50. En régimen impermanente, el modelo reproduce adecuadamente las series de niveles observados en PSM y ROS. Para la constitución M100 se clasifica entre buena y muy buena la aproximación para intervalos de tiempos de cálculo de 5 y 10 s, y entre satisfactorio y muy bueno para 30 s. Mientras que para la constitución M50 el ajuste resultó entre bueno y muy

bueno, para los tres intervalos de tiempos de cálculo utilizados en las simulaciones.

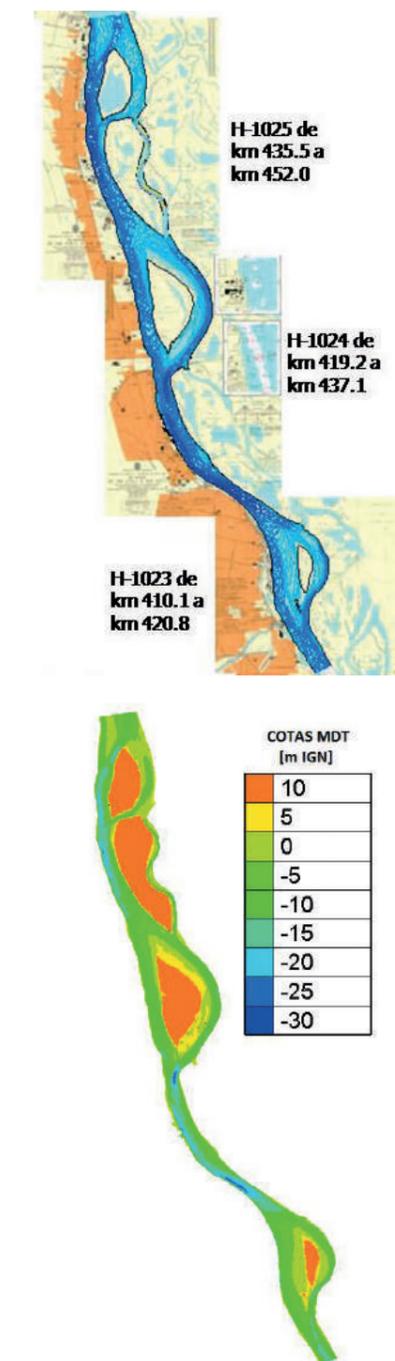


Figura 1. (a) Curvas de nivel digitalizadas según relevamientos de FICH (2004) junto con las cartas náuticas del SHN; (b) Constitución del modelo M50 y MDT.

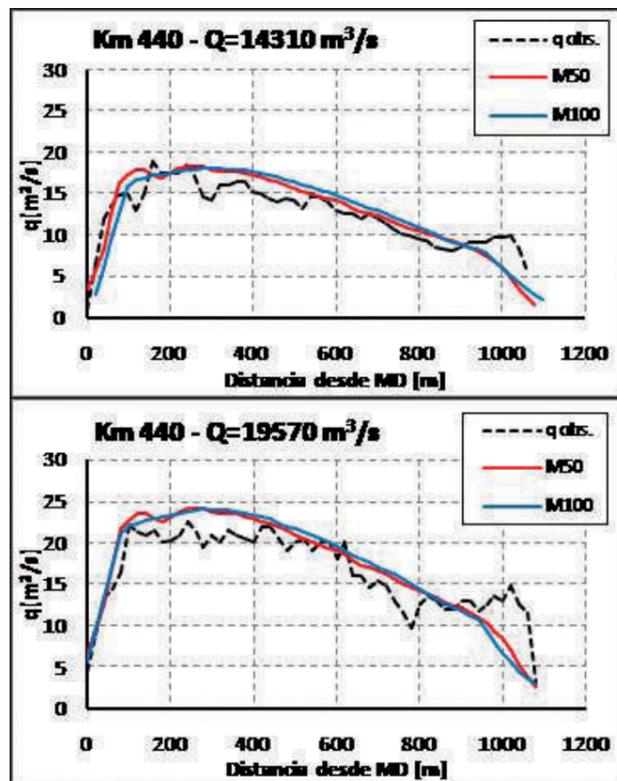


Figura 2. (a) Simulación $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$; (b) Simulación $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparación de la distribución de caudales unitarios calculados y observados en el km 440.

Conclusiones

El modelo bidimensional TELEMAC-2D fue implementado para simular la hidrodinámica en régimen permanente e impermanente de un tramo del río Paraná Inferior. A partir del grado de aproximación obtenido entre niveles y caudales observados versus calculados se concluye que los resultados han sido aceptables. En lo que respecta al tamaño de la grilla, se observa que los resultados alcanzados para ambas constituciones presentan diferencias poco significativas. Se recomienda trabajar con un tiempo de cálculo de 10 s para la constitución M100 y de 30 s para la constitución M50, ya que resultaron los mejores ajustes para régimen impermanente.

Referencias bibliográficas

Basile, P. A., Riccardi, G., Peruzzo, F. y Trivisonno F. (2015). Modelación Hidrodinámica de un tramo del Río Paraná Inferior, *Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Montevideo, Uruguay.

DNVN-DPI - Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior (2014). Datos topobatimétricos tramo km 232 – 480. Rosario.

FICH - Facultad de Ingeniería y

Ciencias Hídricas (2004). *Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada*, Río Paraná. Informe final. FICH, UNL.

FICH - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (2006). *Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada*. Informe final. FICH, UNL.

García, M., Basile, P. A., Riccardi, G. y Rodríguez, J. F. (2013). Modelling Hydrodynamic and Sedimentation Processes in Large Lowland Rivers: An Application to the Paraná River (Argentina), *35th IAHR World Congress*, Chengdu, China.

Guerrero, M. y Lamberti, A. (2013). Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paraná, *International Journal of Sediment Research*, 28 (4), pp. 458–469.

Hervouet, J. M. (2000). TELEMAC modelling system: an overview. *Hydrological Processes*, 14(13), 2209-2210.

Peruzzo, F., Riccardi, G., Basile, P. A. (2016). Modelación cuasi-bidimensional de escurrimiento superficial en cauce principal del tramo Paraná inferior km 410-452, *Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos IFRH 2016*, Ezeiza, Argentina.

SHN – Servicio de Hidrografía Naval (2014). *Base de Datos Digital de Cartas Náuticas de Río Paraná Inferior*. Disponible en: <http://www.hidro.gov.ar/cartas/cartasnauticas.asp>

* Florencia Peruzzo⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾, Gerardo Riccardi⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾⁽²⁾, Marina García⁽¹⁾⁽²⁾

¹. Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR

². Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR

³. Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

⁴. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Rosario, Argentina.

Modelo físico del vertedero de descarga del dique Los Alazanes

* MATÍAS EDER
YARIELIS FERRER LÓPEZ
JONATHAN MUCHIUT
I. MATÍAS RAGESSI
CANDELARIA JOAQUÍN
MAYCO DAGATTI
LETICIA TARRAB
ANDRÉS RODRÍGUEZ
ANTOINE PATALANO
LEANDRO MASSO
CRISTIAN MONTANARI
HECTOR MURATORE
GONZALO MOYA
AUGUSTO DÍAZ
RUBÉN ROMERO
GONZALO PLENCOVICH
EDGAR CASTELLÓ
FABIÁN LÓPEZ
MARIANA PAGOT

Introducción

El dique Los Alazanes se encuentra ubicado entre los cerros Uritorco y Las Gemelas, aguas arriba de la localidad de Capilla del Monte en el departamento de punilla a 110 km de la ciudad de Córdoba (Figura 1).

Fue construido entre los años 1939 y 1944 para abastecer de agua potable a la localidad de Capilla del Monte. El dique consiste en una presa de arco de 71 m de longitud y 25 m de altura desde el lecho del río hasta su coronamiento (ver Figura 2 (a)). Cuenta con dos vertederos para evacuar crecidas: el primero se ubica sobre la margen derecha de la presa y se activa para eventos ordinarios (ver Figura 2 (b)), mientras que el segundo se encuentra sobre la presa de arco y sólo trabaja para eventos extraordinarios.

Las intensas lluvia registradas en el verano del año 2015 produjeron la rotura por erosión del material que protegía la fundación del extremo izquierdo de la rápida del vertedero y la fundación del muro lateral de la margen izquierda del arroyo (ver Figura 3).

Como consecuencia se proyectaron obras de reparación y readecuación tanto de la rápida como del muro ya mencionado, junto a un azud aguas abajo del vertedero con el fin de generar un colchón de agua capaz de aumentar la disipación de energía. Para verificar y optimizar el diseño de esta última estructura se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba un modelo físico.



Figura 1. Dique Los Alazanes.

* Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

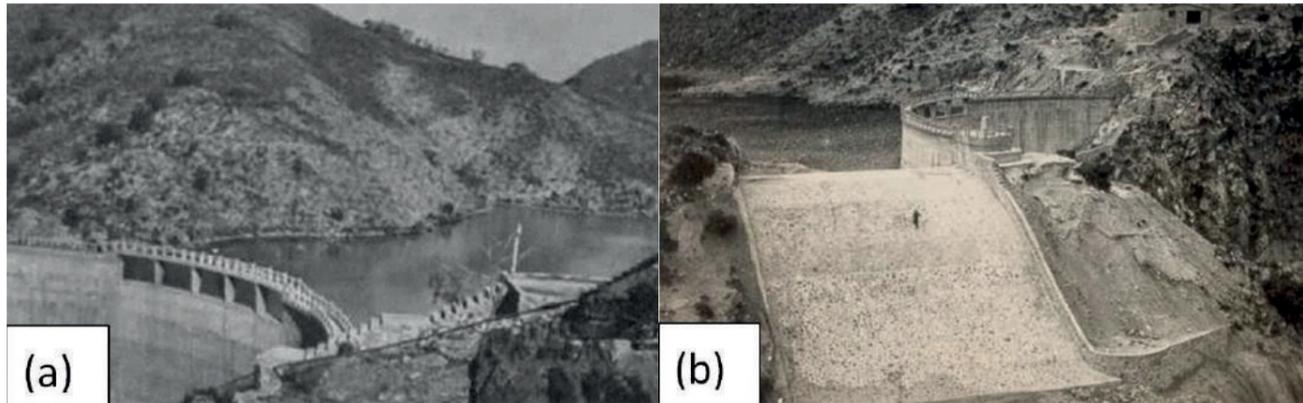


Figura 2. (a) Presa de arco del Dique Los Alazanes, (b) Vertedero de descarga lateral.

Objetivos

El presente estudio tiene como **objetivo general** verificar y optimizar el diseño hidráulico de las obras propuestas en el proyecto de reparación y adecuación del vertedero del dique Los Alazanes.

Para lo cual se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- Caracterizar hidráulicamente el vertedero de descarga lateral del dique Los Alazanes y el flujo de aproximación aguas arriba de la estructura,
- Analizar el comportamiento hidráulico aguas abajo del vertedero de descarga considerando dos posiciones del azud (Figura 4).

Materiales y Métodos

Modelo Físico

El modelo físico en el cual se realizaron los estudios experimentales tiene las siguientes características:

- Similitud de Froude,
- Modelo físico a fondo fijo,
- Escala de longitudes no distorsionada $EL = 1:35$,
- Área de modelación $8000m^2$ (en prototipo).

La escala de longitudes seleccionada permite reproducir el fenómeno con rangos de los números de Reynolds y Weber lo suficientemente grandes como para desprestigiar los efectos de la viscosidad y la tensión superficial, salvando de



Figura 3. Vista de la rotura de la rápida del vertedero lateral del Dique Los Alazanes.

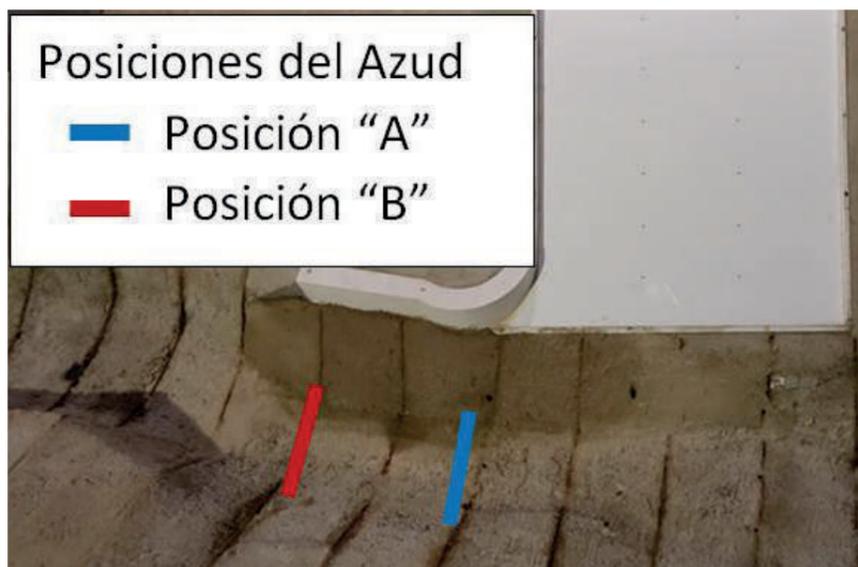


Figura 4. Vista en planta de las posiciones analizadas del azud en el Modelo Físico.

este modo el problema denominado “paradoja de la imposibilidad” (Fuentes, 2002).

Medición de velocidades

Para caracterizar el flujo de aproximación al vertedero se aplicó la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV por sus siglas en inglés). Y se validaron los resultados obtenidos con LSPIV con mediciones realizadas con un velocímetro acústico doppler (ADV) y Flow-Tracker.

A continuación se describen las bases de cada una de las técnicas utilizadas.

Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV).

La velocimetría por seguimiento de partículas permite determinar el campo de velocidades medio del flujo y de manera instantánea con un alto grado de resolución espacial a partir del desplazamiento de partículas que se desplazan en el flujo.

La técnica PIV consiste en un análisis euleriano (es decir, estudia los cambios producidos en una superficie de control). El resultado de este análisis es una imagen base con vectores que caracterizan el

sentido y magnitud de la velocidad promedio de todas las imágenes.

En general la dinámica de todas las frecuencias bajas (grandes vórtices) puede ser capturada sin problemas con esta técnica de medición, mientras que para obtener información de los pequeños vórtices se deben usar partículas de diámetros muy pequeños (y baja inercia), lo cual trae algunas restricciones respecto al tamaño del área de flujo que se puede muestrear.

Velocímetro Acústico Doppler (ADV).

El ADV es un instrumento versátil de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad del agua. Específicamente el instrumento utilizado en este trabajo es un ADV SonTek de 50 MHz de frecuencia acústica, con una un volumen de medición de aproximadamente $0,5 cm^3$. Este instrumento utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado a 5 cm del instrumento. El rango de velocidad que el instrumento es capaz de monitorear es programable por el usuario, y varía desde ± 3 a ± 250 cm/s. Los datos pueden ser adquiridos con frecuencias de registro de hasta 50 Hz. Mediciones prelimi-

nares indicaron que las condiciones experimentales (niveles de partículas en suspensión) resultan adecuadas para el uso de tecnología acústica. Diversos artículos técnicos y científicos fueron publicados en los últimos quince años evaluando la capacidad del ADV para caracterizar experimentalmente la turbulencia en flujos. Estos estudios están relacionados principalmente a la resolución temporal del instrumento como así también con los niveles de ruido Doppler presentes en las señales registradas con ADV (García et al., 2005).

Flow-Tracker

El FlowTracker mide velocidades de un rango tan bajo como 0.001 m/s (0.003 ft/s) y tan alto como 4.5 m/s (15 ft/s). Combinado con una vara vadeadora, puede usarse para medir el caudal total de una sección transversal de un río.

Utiliza la tecnología exclusiva ADV de SonTek para medir velocidades en 2-D en un pequeño punto de medición situado a 10 cm del transmisor acústico. Esto permite medidas de corrientes naturales libres de cualquier alteración causada por el instrumental.

Medición de presiones fluctuantes

El análisis de las presiones fluctuantes se realizó mediante el software PASCO Capstone, a través de mediciones de presiones absolutas en 9 tomas ubicadas aguas abajo del vertedero (Ver Figura 5). Las mediciones se realizaron con un sensor PASCO Wireless-Pressure PS-3203, cuyo rango de trabajo oscila entre los 0 y 400 kilopascales (KPa) con una frecuencia de muestreo de hasta 1000 Hz.



Figura 5. Ubicación de tomas de presión.

Ensayos

Caracterización hidráulica del vertedero y flujo de aproximación

Para caracterizar la hidráulica del vertedero y el flujo de aproximación se ensayaron diez y siete (17) caudales.

En cada ensayo se midió el tirante de agua (H) sobre la cresta del vertedero del modelo y el caudal (Q) que ingresa al modelo físico con un vertedero triangular (90°) de pared delgada previamente calibrado. En función de los resultados se determinó la curva de descarga (H-Q) del vertedero.

Además, se aplicó la técnica de LSPIV para caracterizar el flujo de aproximación aguas arriba del vertedero para cada caudal. En todos los ensayos se filmaron videos de un minuto de duración y se utilizó viruta de madera como trazador del flujo, como se puede ver en la Figura 6 (a) y 6 (b).

Para contrastar y validar las mediciones de velocidad obtenidas con LSPIV se realizaron mediciones puntuales de velocidad con ADV (ver Figura 7 (a)) y con el FlowTracker (ver Figura 7 (b)).

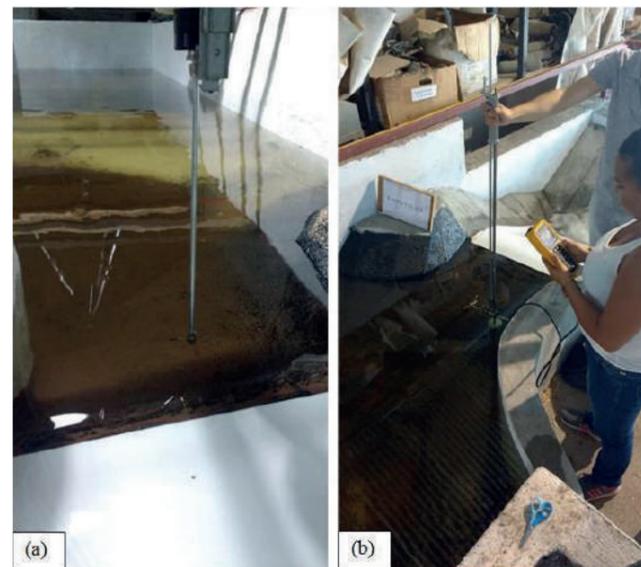


Figura 7. (a) Ubicación de ADV Son Teck (b) Ubicación de Flow Tracker.

Comportamiento hidráulico aguas abajo del vertedero

Para analizar el comportamiento hidráulico aguas abajo del vertedero de descarga se realizaron tres ensayos:

Ensayo N° 16 – Q_{modelo} : 6 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 44 m³/s

Ensayo N° 17 – Q_{modelo} : 11 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 83 m³/s

Ensayo N° 18 – Q_{modelo} : 8 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 57 m³/s

estos ensayos analizaron las siguientes condiciones:

• Con azud en la posición “A” (ver Figura 4)

• Con azud en la posición “B” (ver Figura 4)

• Sin azud

Para cada una de estas alternativas se midieron presiones fluctuantes en las 9 tomas indicadas en la Figura 5.

Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos. En primer lugar se presenta la caracterización del flujo de aproximación al vertedero y la curva de descarga (H-Q) ajustada. Finalmente se presenta una caracterización cualitativa del flujo aguas abajo del vertedero.

Flujo de aproximación

En la Figura 8 y Figura 9 se presentan las curvas de trayectorias medias (a) y un perfil de velocidades ubicado 15 cm aguas arriba del vertedero (b) correspondiente al Ensayo N° 7 (Q_{modelo} : 2 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 12 m³/s) y Ensayo N° 11 (Q_{modelo} : 13.5 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 98 m³/s) respectivamente.

Se observa, para todas las condiciones ensayadas, que el flujo ingresa a la estructura en dirección



Figura 6. (a) Sembrado de partículas para LSPIV (b) Ubicación de la cámara y zona de medición.

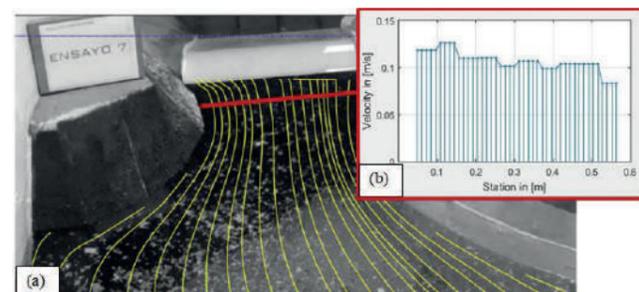


Figura 8. (a) Líneas de trayectorias medias del flujo (b) Perfil de velocidades aguas arriba del vertedero- Ensayo N°7 – Q_{modelo} : 2L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 12m³/s .

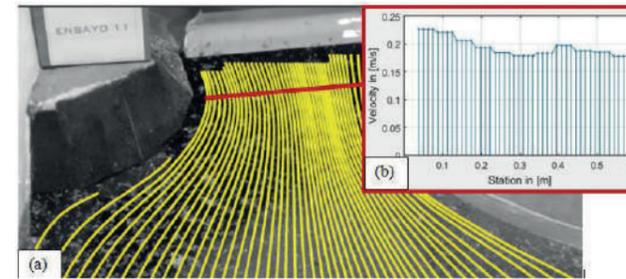


Figura 9. (a) Líneas de trayectorias medias del flujo (b) Perfil de velocidades aguas arriba del vertedero- Ensayo N°11 – Q_{modelo} : 13.5 L/s – $Q_{\text{prototipo}}$: 98m³/s .

perpendicular al eje del vertedero y que la distribución de velocidades aguas arriba del mismo es estrictamente uniforme: se observan mayores velocidades del flujo sobre la margen opuesta a la presa de arco.

Curvas de descarga

A partir de los resultados experimentales en el modelo físico se ajustó la curva de descarga H-Q del vertedero (Figura 10). Cabe aclarar que las alturas H fueron medidas sobre la cresta del vertedero.

El ajuste obtenido por regresión con una ecuación polinómica de segundo orden tiene un coeficiente de correlación con los datos experimentales de $R^2 = 0.9919$.

Comportamiento del flujo aguas abajo (sin azud, con azud “A”, con azud “B”)

A continuación se presenta una descripción cualitativa del flujo aguas abajo del vertedero para las tres condiciones ensayadas:

• Sin Azud (Figura 11)

• Con Azud en posición “A” (Figura 12): Al colocar el azud se observa un incremento del nivel del agua en la zona de disipación de energía por efecto de remanso, lo cual eleva la presión media y reduce la probabilidad de que se produzcan presiones de succión.

Para esta condición se observó la formación de los mismos vórtices que para la condición “Sin

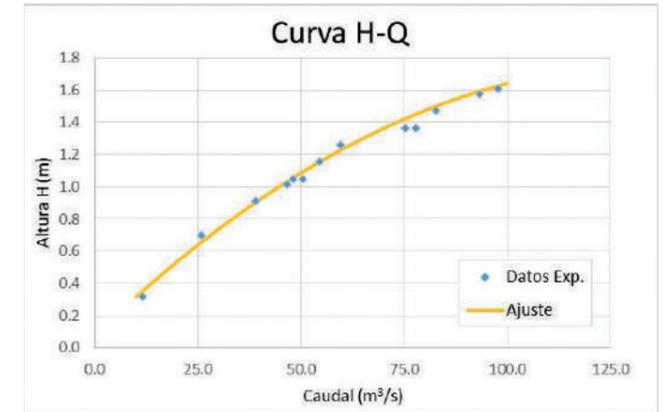


Figura 10. Curva de descarga H-Q del vertedero lateral del Dique Los Alazanes.

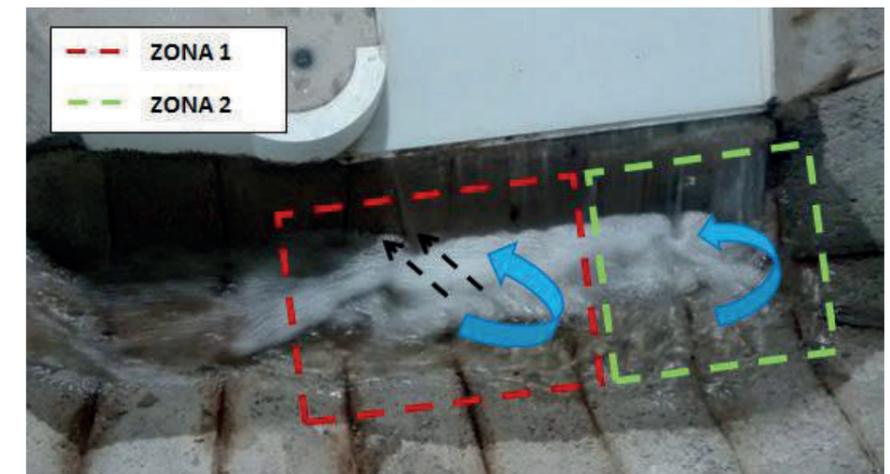


Figura 11. Imagen del flujo aguas abajo del vertedero – Ensayo N° 17 – Sin Azud.

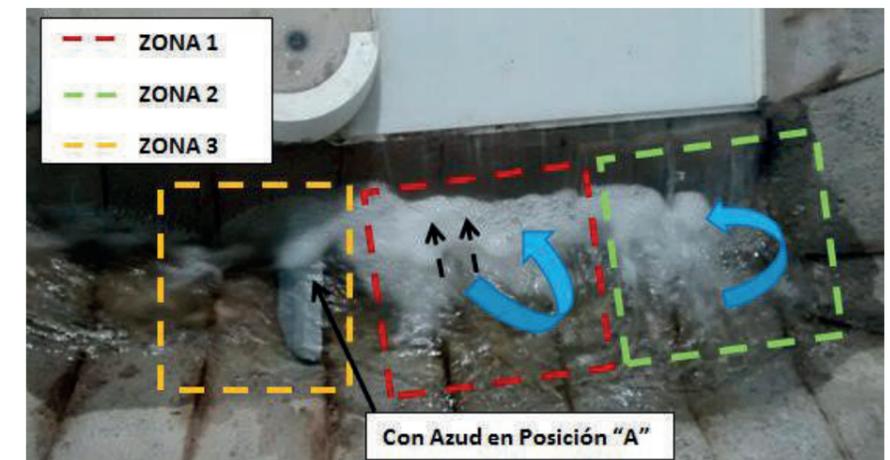


Figura 12. Imagen del flujo aguas abajo del vertedero – Ensayo N° 17 – Con Azud “A”.

Azud”. La principal diferencia observada es que el vórtice de eje horizontal se desplaza hacia aguas abajo un ángulo menor a 45° e impacta en el talud del vertedero en dirección cuasi perpendicular.

Finalmente, se observa que aguas

abajo del azud “Zona 3” el flujo se concentra e impacta en el lecho del cauce lo cual puede producir erosiones locales a considerar.

• Con Azud en posición “B” (Figura 13): Al colocar el azud en la posición “B” se observa un funcionamiento

similar al observado con el azud en la posición “A” para la zona 1 y 2. La principal diferencia se presenta en la “Zona 3” donde se observan menores fluctuaciones en el flujo.

Presiones fluctuantes

En la Figura 14 se presentan las series de presiones medidas con el sensor PASCO en el Ensayo 18 en la toma 25 (ver Figura 5) para las tres situaciones ensayadas (con azud “A”, “B” y “Sin Azud”).

En la Tabla 1 se presentan los valores de la presión media, mínima y máxima registradas, el valor del desvío estándar y los intervalos de confianza superiores e inferiores (con un valor de significancia del 99%) para las tomas T20, T21, T23, T24 y T25.

Se puede observar que en ninguna de las tomas se midieron presiones menores a cero, por lo cual no se espera que existan presiones de succión en el lecho del río. Al colocar el azud se observó por un lado, un aumento de las presiones medias debido al incremento del nivel del agua por efecto de remanso en la zona de disipación y por otro lado una reducción de las amplitudes de las fluctuaciones de presión.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba y a la empresa IMBAL S.A.

Referencias bibliográficas

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

Fuentes, R.(2002). *Modelos hidráulicos: teoría y diseño*. Edición: Lilian Salinas Ayala, Chile.



Figura 13. Imagen del flujo aguas abajo del vertedero – Ensayo N° 17 – Con Azud “B”.

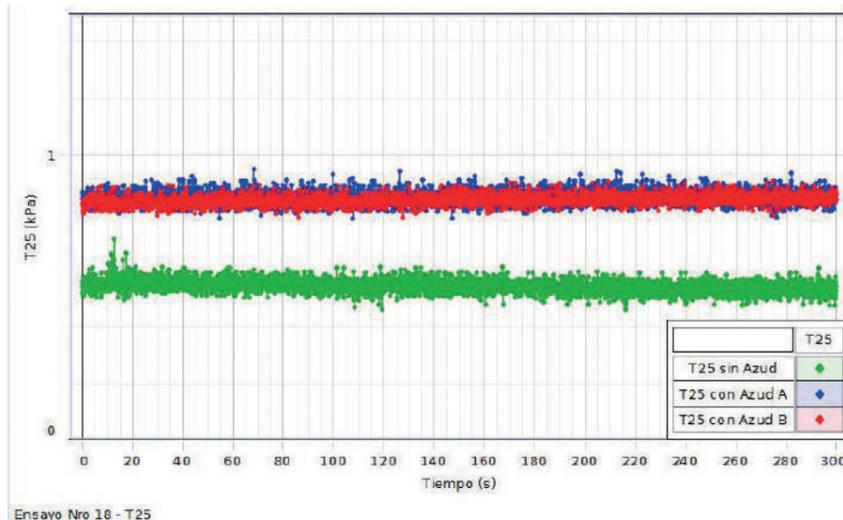


Figura 14. Presiones medidas en la toma 25 – Ensayo N° 18.

Tabla1. Presiones medidas en la toma 20 - Ensayo N° 18.

		Presión (KPa)			Intervalo de confianza		Desvío Estándar
		Media	Max.	Min.	Superior	Inferior	
Toma 20	Sin Azud	0.87	1.28	0.55	1.12	0.62	0.084
	Azud A	1.10	1.28	0.90	1.23	0.97	0.043
	Azud B	1.02	1.22	0.80	1.17	0.87	0.050
Toma 21	Sin Azud	1.05	1.19	0.85	1.17	0.92	0.042
	Azud B	1.12	1.28	0.95	1.22	1.02	0.034
Toma 23	Sin Azud	0.93	1.40	0.50	1.18	0.67	0.085
	Azud B	1.09	1.32	0.83	1.26	0.92	0.056
Toma 24	Sin Azud	0.73	0.84	0.54	0.79	0.67	0.021
	Azud B	0.99	1.08	0.82	1.05	0.94	0.019
Toma 25	Sin Azud	0.54	0.71	0.46	0.60	0.48	0.021
	Azud B	0.84	0.91	0.78	0.90	0.79	0.017

Bases del plan director del Carcarañá

- *1. PABLO GYSSELS PAOLO (COORDINADOR DEL TRABAJO POR LA FCFEYN)
- CARLOS M. GARCÍA
- JAVIER ÁLVAREZ
- MARÍA M. BARAQUET
- JOSÉ M. DÍAZ LOZADA
- SEBASTIÁN GRANDE
- ELIANA JORQUERA
- SERGIO MENAJOVSKY
- MICAELA PACHER
- ANTOINE PATALANO
- GASTÓN PETROLI,
- CECILIA POZZI
- LETICIA, TARRAB
- ALEJO TESTA TACCHINO
- TOMÁS VASCHALDE
- GONZALO MOYA
- HORACIO HERRERO
- 2. RAQUEL BAZÀN
- ANDREA MONTECINO.
- 3. OSVALDO BARBEITO
- SILVIO AMBROSINO
- ANA LAURA RYDZEWSKI
- 4. A. MATIAS BONANSEA.
- 4. B. M. BLARASIN M.
- M. J. GIULIANO ALBO
- A.CABRERA, E. MATTEODA
- F. BECHER QUINODOZ
- L. MALDONADO
- V. LUTRI
- K. ECHEVARRÍA

*1. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Laboratorio de Hidráulica. Centro de Estudios y Tecnología del Agua (LH-CETA). Universidad Nacional de Córdoba (UNC).
 2. Departamento de Química Industrial y Aplicada. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC).
 3. CIRSA-INA (Córdoba).
 4. CONICET - Universidad Nacional de Río Cuarto.
 a. Facultad de Agronomía y Veterinaria.
 b. Dpto. Geología.

Introducción

Las Bases del Plan Director se enmarcan en los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) que promueve la SSRH de la Nación y que propone el logro de una cuenca territorialmente integrada que promueva la cooperación para un desarrollo sustentable, gestionando el riesgo hídrico en escenarios de Cambio Climático. A tal efecto, en estas Bases se propone el desarrollo de las siguientes etapas:

1. Inventario y Caracterización.
2. Diagnóstico.
3. Estudios Básicos y Propuesta de Acciones.

Principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, la tierra y otros recursos relacionados con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de una manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP; Technical Advisory Committee, 2000).

En definitiva, es cambiar la naturaleza de la gobernabilidad del agua definida como el abanico de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos vigentes para desarrollar y gerenciar los recursos hídricos y la provisión de servicios de agua, en diferentes niveles de la sociedad (GWP, 2007):

Gestión

Es un proceso que se sustenta en un conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, derechos, atribuciones y responsabilidades para coordinar la participación en la toma de decisiones de los grupos representantes del gobierno y la sociedad organizada, interesados en promover e instrumentar los acuerdos tomados que permitan lograr el desarrollo sustentable en beneficio de la humanidad.

Integrada

Significa considerar la suma de todas las partes que forman los sistemas sociales y naturales para alcanzar el máximo de los beneficios sin alterar el equilibrio de los ecosistemas vitales que puedan comprometer las necesidades de las actuales y futuras generaciones.

En conclusión, la GIRH es un proceso de múltiples dimensiones de compromiso entre intereses diversos: usos del agua, usuarios del agua, fuentes de agua (aguas arriba y abajo), cantidad y calidad de agua, nacional, provincial, municipal y local, los recursos hídricos compartidos.

El enfoque de “toda la cuenca” permite la evaluación de un impacto a nivel de sistema. En otras palabras, las políticas nacionales, así como también los acuerdos internacionales y los convenios regionales para aguas transfron-

rizas, se aplican en cuencas naturales. La relación que existe entre la gestión de los recursos hídricos dentro de un país y la gestión del agua en cuencas se vuelve, de esta manera, dinámica y más sensible a las circunstancias cambiantes, sean estas ambientales, sociales o económicas (GWP, 2009).

Área de estudio

La cuenca del río Carcarañá (Figura 1) se encuentra ubicada en la región central de la República Argentina con un área de aporte actual de 73.640 km² (resultado preliminar obtenido en los trabajos realizados para este informe). El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, por la confluencia de los ríos Tercero o Ctalamochita, del cual es directa continuación, y del río Saladillo, nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava, que a su vez recibe las aguas provenientes del canal Devoto aproximadamente 30 km aguas abajo de la localidad de La Carlota (Córdoba). El río Carcarañá recibe además los aportes del arroyo Tortugas, que es el límite entre las provincias de Córdoba y Santa Fe, y de un sistema de depresiones endorreicas y alineadas que conforman el sistema de bajos de laguna Las Mojaras. Luego, el río Carcarañá, ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que atraviesa de oeste a este, desembocando junto a la localidad de Gaboto en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná (Figura 1).

Objetivos

El objetivo principal que promueve un Plan Director de Cuenca es lograr la Gestión Integrada del Recurso Hídrico de la Cuenca, promoviendo un uso integrado y sustentable de los recursos de la cuenca como un sistema único e

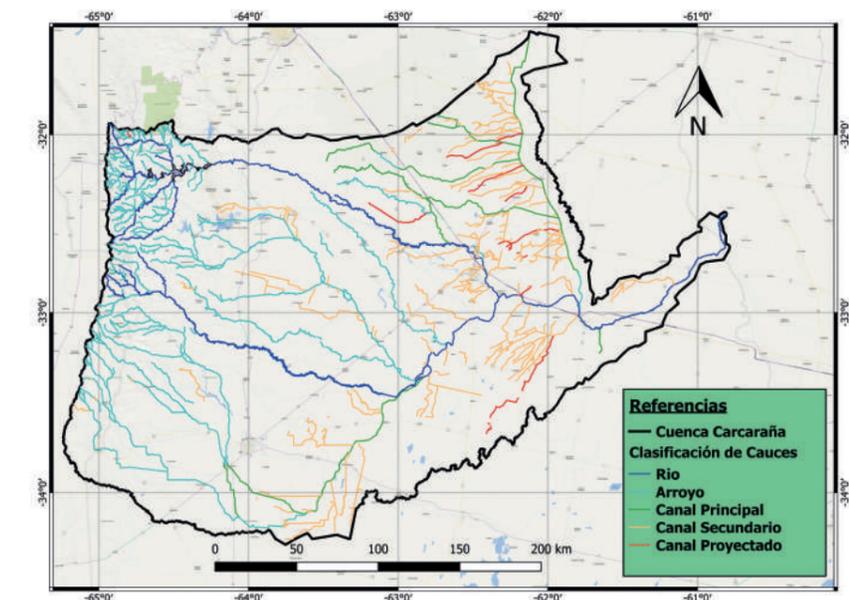


Figura 1: Área de estudio delimitada por la cuenca del Carcarañá y principales ríos y canales, entre las Provincias de Santa Fe, Córdoba y San Luis.

indisoluble, contemplando factores hídricos, ambientales y socio-productivos. En general un Plan Director de Gestión de los Recursos Hídricos de una cuenca, desde un enfoque de GIRH, tiene que contemplar medidas estructurales y no estructurales, para distintas etapas y ejes temáticos, como por ejemplo:

1. Identificar y evaluar aptitudes y restricciones actuales o futuras de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca, sus usos actuales y previstos, la afectación por inundaciones, anegamientos y sequías, incluyendo escenarios de variabilidad y cambio climático.
2. Identificar las necesidades de ajuste del marco normativo que reglamenta el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos y cuenca de aporte.

Con estas premisas, en este trabajo de redacción de las Bases del Plan Director de la Cuenca del Carcarañá, se plantean los siguientes objetivos particulares:

Objetivo 1: disponer de un Inventario completo con la caracte-

rización de cada aspecto (Hídrico, Ambiental, Obras Hidráulicas, Energía, Uso de suelo, Hidro-Geomorfología, Hidrológico, Meteorológico, Climático, etc.).

Objetivo 2: realizar un diagnóstico ajustado de los problemas hídricos de la cuenca del Carcarañá.

Objetivo 3: plantear esquemas alternativos de soluciones (estructurales y no estructurales) para la atenuación de efectos negativos sobre la cuenca: inundaciones, anegamientos, disponibilidad y calidad del recurso, planificación y gestión, etc.

Objetivo 4: implementar la modelación hidrológica distribuida de la sub-cuenca del Canal San Antonio (Arroyo Tortuga) y de la cuenca del Carcarañá por eventos característicos a definir con las autoridades.

Materiales y Métodos

Para conseguir los objetivos especificados, se propone un desarrollo del trabajo en tres etapas:

Etapa I: Inventario, caracterización y base de datos situación actual, desarrollo GIS.

Etapa II: Diagnóstico e identi-

ficación de necesidades de uso y control de recursos hídricos y ambientales.

ETAPA I: Inventario y Caracterización
Esta Etapa está en fase de finalización después de 8 meses de trabajo. Se procedió a recopilar y organizar la información y los datos disponibles en toda la zona delimitada por la cuenca del Carcarañá. Se realizaron visitas de campo y actualmente se están organizando reuniones con las autoridades o actores que puedan participar activamente y brindar la información requerida. Se evaluará la posibilidad de realizar estudios más específicos en otras fases, posteriores a este trabajo.

ETAPA II: Diagnóstico e Identificación. Esta Etapa está en curso desde hace 2 meses. Se está realizando un diagnóstico de la situación actual de la cuenca, se identificarán los problemas hídricos-ambientales, socio-económicos y jurídicos-normativos y se determinará la importancia y los impactos de cada uno de ellos.

ETAPA III: Estudios y Propuestas
Esta Etapa comprende diferentes actividades. En primer lugar, desde el comienzo del estudio se están desarrollando las modelaciones numéricas distribuidas para evaluar el funcionamiento hidrológico – hidráulico de la sub-cuenca del río Tortugas y de la cuenca del río Carcarañá, para distintos escenarios hídricos a definir con el comitente. Esto permitirá determinar el comportamiento hidrológico hidráulico actual del sistema hídrico para distintos estados y en todo el tramo.

En segundo lugar, una vez terminadas las fases de Inventario y de Diagnóstico, se identificarán esquemas alternativos de soluciones

(estructurales y no estructurales) para la atenuación de efectos de inundaciones, para mejorar la gestión del recurso hídrico y ambiental, en todo el tramo.

Las propuestas estructurales y no estructurales se desarrollarán hasta un nivel de idea básica, deberán contemplar la consideración de alternativas ante situaciones críticas originadas por crecidas propias del río Carcarañá, por precipitaciones en toda el área y por escenarios básicos de cambio climático.

Resultados

Los principales resultados obtenidos, se pueden dividir en tres partes. En primer lugar, se realizó una exhaustiva recopilación, ordenamiento y análisis de documentación e información, con recorridos de campo y visitas a instituciones.

Los datos que presentaban una componente espacial fueron sistematizados en un sistema de información geográfica, para ello se trabajó con el software libre QGIS

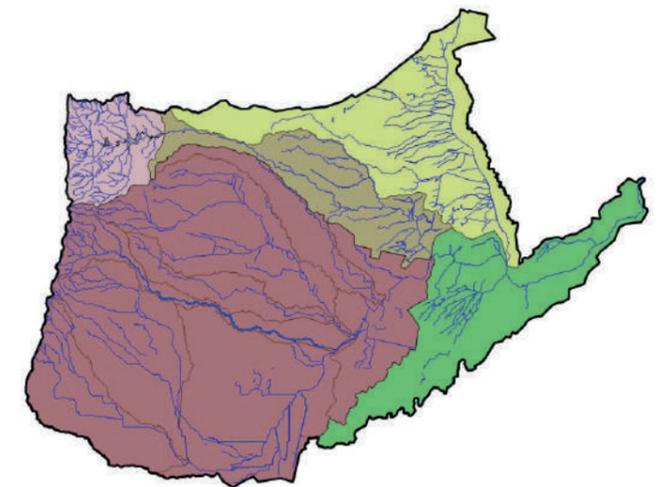


Figura 2. Área de estudio delimitada por la cuenca del Carcarañá y principales ríos y canales, entre las Provincias de Santa Fe, Córdoba y San Luis.

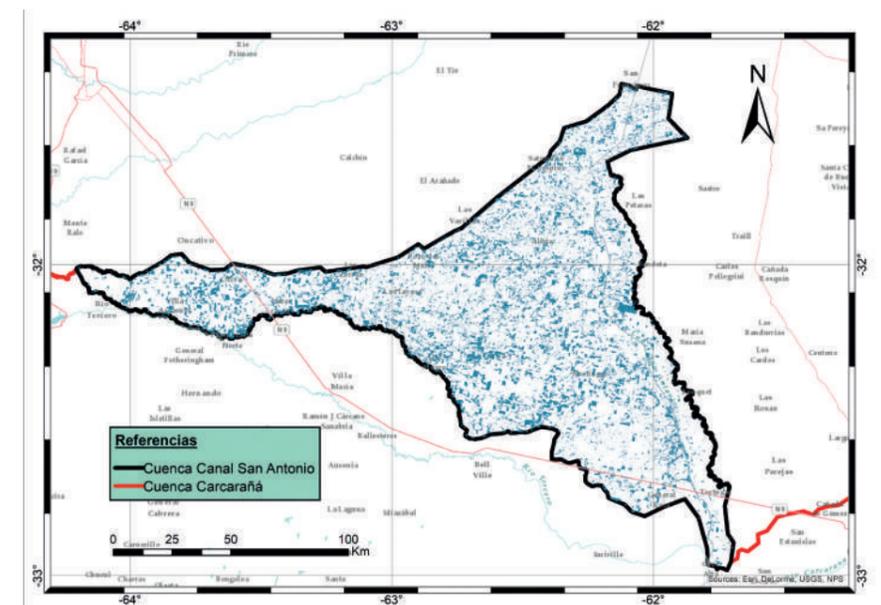


Figura 3. Superficies de agua para el pico de un hidrograma medido.

2.18. Los atributos asociados en cada capa temática, fueron definidos en función de las necesidades de geoprocésamiento posteriores, requeridas para obtener los resultados previstos a partir del cruce de información y análisis multicriterio. (Figura 2).

Entre los principales resultados de esta fase se destaca la determinación de los límites de la cuenca, de las subcuencas y de la red hídrica. A nivel regional se caracterizó la hidrogeomorfología e hidrología subterránea y a nivel de detalle para cada localidad o curso fluvial se determinó la calidad del recurso hídrico, las características del ordenamiento territorial, el uso del agua y del suelo. Por último se clasificaron y caracterizaron las obras hidráulicas con diferentes usos: regulación, evacuación, abastecimiento, sanitarias, energía entre otras.

En segundo lugar se implementó la calibración del modelo hidrológico distribuido de la cuenca del canal San Antonio-Tortugas (Figura 3) con mediciones de caudales y registros de lluvias durante un evento. Se utilizó el modelo de distribución gratuita TREX (*Two-dimensional Runoff, Erosion, and Exportmodel*).

En tercer lugar se realizaron las primeras actividades de diagnóstico de la cuenca, enfocados a los recursos hídricos que terminarían a finales de junio de 2018. Estas actividades incluirán la identificación de necesidades de uso y control de recursos y talleres de diagnóstico, entre expertos y actores sociales. En el diagnóstico se elaborarán propuestas estructurales y no estructurales y se realizará una propuesta de diseño de un monitoreo.

Agradecimientos

A la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH), a la Secretaría de Ambiente y Cambio Climático (SAAC) del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos (MAAySP) de la Provincia de Córdoba, al Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba (MAyG) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Referencias bibliográficas

GWP Technical Advisory Committee. (2000).

GWP CEE. (2007). *Tool Box: Institutional Setting of Water Institutions in Development, Enforcement and Implementation of Future Water Management Plans*. Global Water Partnership Central and Eastern Europe, Bratislava, Slovakia.

GWP (2009). *Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas*. Global Water Partnership.

Estudio integral de la laguna Mar Chiquita

* MARIANA PAGOT
PAOLO GYSSELS
ANDRÉS RODRÍGUEZ
CECILIA POZZI
LETICIA TARRAB
ANTONIO PATALANO
ALEJO TESTA
GERARDO HILLMAN
CONSTANZA VARGAS
SEBASTIÁN GRANDE
MICAELA PACHER
CARLOS MARCELO GARCÍA
JOSÉ MANUEL DÍAZ LOZADA
HÉCTOR MURATORE
GONZALO MOYA
CRISTIAN MONTANARI
ERICA DÍAZ
INÉS BORNASCONI
GONZALO PLENCOVICH

Introducción

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa es una gran laguna endorreica de elevada salinidad, que se encuentra en el noreste de la provincia de Córdoba, en el centro de la República Argentina. Su superficie variable, alcanzó a cubrir unos 6500 km² (en el año 2003), condición que la convierte en la mayor superficie lacustre de la Argentina, ocupando el puesto cuarto a nivel mundial en categoría de lago salado endorreico.

La cuenca de aporte abarca parte de las provincias de Córdoba, Santiago del Estero, Tucumán, Catamarca y Salta, recibiendo los aportes del río Dulce, río Suquia, río Xanaes y arroyos menores. El río Dulce es el principal tributario del sistema, aporta cerca del 80% del caudal total que ingresa a la laguna. Los principales agentes hidrodinámicos actuantes en el sistema son los fenómenos fluviales y los factores meteorológicos.

Además de su atractivo turístico, y de su importancia social y económica para la región, el sistema

formado por la Laguna Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce (Figura 1), constituye una reserva natural de la provincia integrada a la red hemisférica de aves playeras y declarada sitio Ramsar para su conservación como humedal vivo.

El sistema hidrodinámico de la Laguna Mar Chiquita ha manifestado importantes variaciones de nivel. Durante los últimos 60 años, desde la década del '60 a la fecha, se ha logrado medir ambos extremos del ciclo, el valor mínimo de nivel evidenciado en el retroceso de la costa hasta 3 km desde la localidad de Miramar, hasta la inundación de una gran parte de esta ciudad en la década del '80, y nuevamente sobre la zona costera durante el año 2003. Durante el año 2013, la laguna presentó una superficie cubierta por agua de 2500 km², con un nivel cercano a los 67,5 m s.n.m. El máximo nivel medido se observó en el año 2003 con un valor próximo a los 71,9 msnm., lo que corresponde a una profundidad máxima promedio de 12 m.

La premisa fundamental de este



Figura 1. Sistema Bañados – Laguna principales obras hídricas y algunas poblaciones cercanas.

* 1. Laboratorio de Hidráulica-CETA de la FCEyN de la UNC.
*2. Secretaria de Recursos Hídricos, Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos, de la provincia de Prov.

estudio es brindar herramientas técnicas que permitan definir acciones en el ámbito local e interprovincial destinadas a conocer, proteger y asegurar la cantidad y calidad de los recursos hídricos y su uso sostenible en la región de los Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita.

Métodos y Resultados Estudio de la dinámica hídrica del sistema Bañados del río Dulce y su influencia en la Laguna Mar Chiquita.

En el LH-CETA se realiza el análisis y seguimiento del comportamiento hídrico de la Laguna de Mar Chiquita desde el año 1998 (Pagot, 2003; Pozzi et al., 2006; Hillman et al., 2011). Una de las actividades desarrolladas es el monitoreo satelital de la dinámica espacial del sistema Bañados del río Dulce, en la cuenca baja de esta Laguna. Este seguimiento satelital permite establecer alertas tempranas en zonas pobladas, y anticiparse a eventos críticos de inundaciones en terreno ubicados en áreas de bañados.

Se utilizaron datos satelitales de 3 sensores ópticos: MODIS, SPOT y LANDSAT de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) y a la Agencia Espacial Europea (ESA), con los que se logró medir las manchas de inundación con 4 a 30 m de resolución espacial para la crecida del año 2017.

A partir de mediciones de caudal y procesamiento de imágenes satelitales, se generaron mapas satelitales de la dinámica de formación de los Bañados del río Dulce, basados en productos cuyas combinaciones de bandas destacan la presencia de agua en superficie.

En la Figura 2 se presentan los contornos de las áreas de Bañados digitalizados a partir del análisis

de las imágenes adquiridas los días 01, 10, 13 y 26 de abril de 2017.

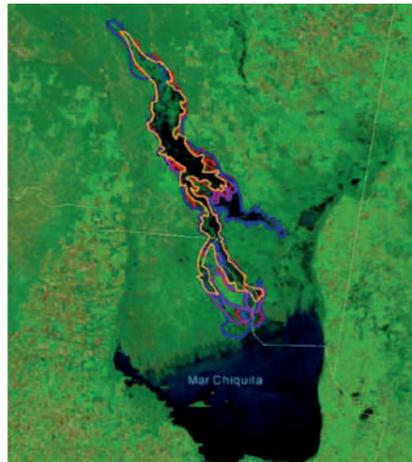


Figura 2. Digitalización de áreas de Bañados para de los días 01, 10, 13 y 26 de abril de 2017.

La velocidad de avance del frente de los bañados se deduce al medir la distancia parcial, entre imágenes secuenciales, de la posición del límite del Bañado. La velocidad promedio de avance del frente del Bañado resultó de 1,5 km/día para el primer semestre de 2017.

Es importante el monitoreo estratégico con estaciones en campo y recorridos por la zona, tal que los trabajos con datos satelitales se dispongan como apoyo frente a la gran escala del sistema hídrico.

Aforos aguas abajo del Dique Río Hondo y del Azud Los Quiroga, en Paso de Oscares y Paso de la Cina. Mediciones de velocidad usando técnicas por imágenes.

Se realizó la cuantificación de los caudales superficiales sobre el río Dulce en dos secciones de aforo: Paso de la Cina y Paso de Oscares. Esta campaña se realizó el día 22 de noviembre de 2017.

Estas secciones corresponden, además, donde actualmente se en-

cuentran instalados dos limnómetros automáticos en la región en estudio.

El instrumental del Laboratorio de Hidráulica – FCFyN de la UNC, que se utilizó para las mediciones de caudales superficiales en las distintas secciones definidas fue un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) “River Surveyor S5” fabricado por la compañía YSI/Son Tek. Este ADCP provee información batimétrica (profundidades del agua) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal generalmente con un error menor al 5%.

La Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LS-PIV) es una poderosa técnica que permite el monitoreo de diversos flujos superficiales de manera remota (Patalano, 2017). Esta técnica se utilizará para medir el flujo a través de puentes y de alcantarillas, como las ubicadas en el camino a Paso de la Cina en el límite entre las Provincias de Santiago del Estero y Córdoba. En las mismas se prevé la colocación de escalas que tendrán por objetivo determinar el nivel de agua en cada alcantarilla para la determinación de caudal a partir de la velocidad superficial.

Modelo Matemático de Balance para la Laguna Mar Chiquita

En un modelo de balance de masa en un lago los componentes del sistema son: los ríos tributarios o afluentes, los ríos que abandonan el lago o efluentes, y la atmósfera. Entre estos componentes se dan los siguientes procesos: a) entrada de agua al lago por los ríos tributarios, b) salida de agua por los ríos efluentes, c) entrada de agua por lluvia y d) salida de agua por

evaporación. En el caso de Mar Chiquita, no hay ríos efluentes (es un sistema endorreico), por lo que toda la salida del agua del sistema es a través de la evaporación (Rodríguez et al., 2006). Todas estas interacciones pueden ser representadas matemáticamente mediante fórmulas que expresan, dentro de un periodo de tiempo determinado, la cantidad de agua que entra al lago, la cantidad que sale y el volumen de agua que hay en él. Estas relaciones quedan, por lo tanto, formalizadas en ecuaciones. Las ecuaciones representan la dinámica del sistema y tienen gran importancia tanto para su conocimiento como para la definición de su manejo. El modelo que se presenta en este trabajo es un modelo simplificado del tipo “balance de caja”. La ecuación dinámica de balance hídrico anual que se aplicó a la Laguna Mar Chiquita presenta la siguiente forma:

$$\Delta V = (Q_{LQ} + Q_{RI} + Q_{RII})\Delta t + A \cdot (P - E)$$

Donde, ΔV = variación de volumen de la laguna; Q_{LQ} = caudal medio a la salida del embalse Los Quiroga; Q_{RI} = caudal medio del río Primero o Suquía; Q_{RII} = caudal medio del río Segundo o Xanaes; P = precipitación total sobre la laguna; A = área de la laguna media; E = evaporación total de la laguna; Δt = Intervalo de tiempo analizado.

Se trabajó con series de datos de precipitaciones, temperatura y evaporación a intervalo de medición diario y mensual, en estaciones ubicadas en las proximidades de la Laguna Mar Chiquita.

En base a los datos hidrometeorológicos disponibles se comenzó con el ajuste de un modelo conceptual de balance de masas para la estimación de volúmenes mensuales en la Laguna Mar Chiqui-

ta. En la Figura 3 se presentan la simulación de los niveles.

Modelación Hidrodinámica y Calidad de Aguas

Utilizando una serie de modelos numéricos de uso libre, perteneciente al software DELFT3D (Deltares, 2014 a y b), se implementó una estructura de gestión para el estudio de las condiciones hidrodinámicas y del impacto de derrames de eventuales contaminantes en la Laguna Mar Chiquita.

En particular esta estructura queda constituida por un ambiente de cálculo donde se pueden utilizar los módulos FLOW (corrientes por viento y transporte de sedimentos por corrientes), WAQ (calidad de agua) y WAVE (oleaje y transporte de sedimentos por oleaje) para poder realizar estudios puntuales en diferentes condiciones climáticas y ambientales, como por ejemplo estudios de patrones de corrientes (2D y 3D) por diferentes condiciones ambientales (Gyssels et al., 2011).

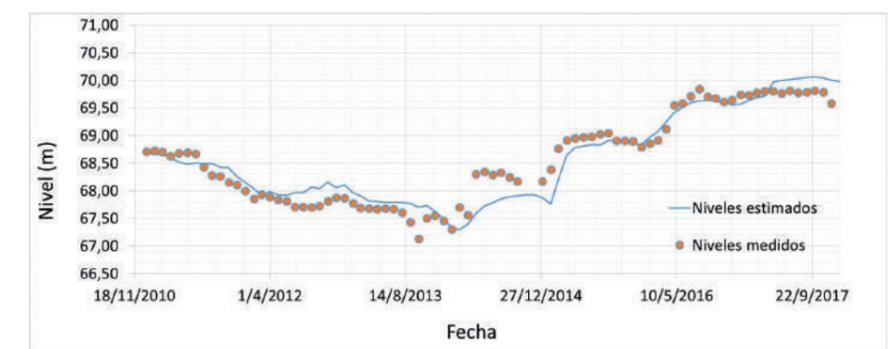


Figura 3. Niveles medios mensuales calculados con el modelo y su comparación con valores medidos.

Diseño de alternativas de unas defensas costeras flotantes

Los rompeolas flotantes son aquellas estructuras marítimas cuya función es la atenuación del oleaje en una determinada área. Los rompeolas flotantes son una alternativa a las obras de protección fijas al tener la posibilidad de ser movilizadas con relativa facilidad y remolcadas a flote. En este trabajo, se realizó un estudio con modelo físico a escala (Figura 4) en

el Laboratorio de Hidráulica de la FCFyN para definir un diseño de una estructura flotante de defensa costera de tipo “caja” para el caso específico de Miramar (en la Laguna de Mar Chiquita).

Diseño de playas de Miramar

Para la localidad de Miramar se plantea una serie de alternativas de playas de dos tipologías: Tipo I) Playas terraza o “solárium”, son playas que no necesitan estudios de hidrodinámica.

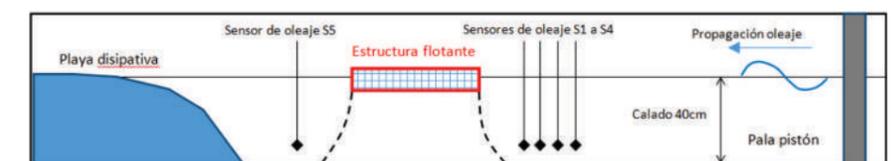


Figura 4. Configuración de las pruebas experimentales en el canal del LH-CETA.

Tipo II) Playas perfil, son playas que se apoyan en el fondo de la laguna, se conforman por una parte emergida y una sumergida. Estas playas para poder mantenerse necesitan el uso de modelos específicos.

Se ha generado el oleaje característico por efecto del viento a escala de la laguna completa y se ha propagado a costa con el modelo SWAN incorporado en el paquete Delft3D. Sucesivamente se han utilizado los resultados del modelo SWAN como condiciones de borde aplicadas al modelo de propagación OLUCA incorporado en el paquete SMC para el cálculo del oleaje a escala muy local con alta resolución. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de diseño de playa en la zona suroeste de la localidad de Miramar.

Diseño de la marina de Miramar

La propuesta de alternativa del nuevo puerto-marina (diseño preliminar) se realiza considerando la marina existente que ha sido construida para ofrecer una mínima protección a las pocas embarcaciones existentes. En este trabajo se propone una ampliación y optimización de la obra existente teniendo en cuenta aspectos de diseño ingenieril propios de estos tipos de estructura.

Conclusiones

Este estudio presenta el registro de eventos hídricos históricos de erogaciones realizadas desde el Dique Río Hondo hacia el río Dulce, principal tributario a la Laguna Mar Chiquita. Como consecuencia, el río Dulce registró una importante creciente cuyo impacto sobre la zona de Bañados del río Dulce se analizó con técnicas de teledetección y se evaluó el creci-



Figura 5. Playas de tipo perfil propuesta en la zona Suroeste de la localidad de Miramar.

miento del nivel de agua de la Laguna Mar Chiquita con un modelo de balance de masa.

Se actualizó la base de datos de registros meteorológicos e hidrológicos en la región. Los datos se disponen en formato digital y se presentan en el marco de este trabajo dentro del Componente denominado Base de Datos que se procesó en el Laboratorio de Hidráulica (FCEFYN - UNC). En la actualidad, se cuentan con mediciones diarias de niveles durante el periodo 2001 hasta la fecha.

Se calibró un modelo simplificado de balance de masa mensual en la Laguna Mar Chiquita en el periodo 2011-2017. En el modelo no se considera la interacción con los bañados con lo cual se simplificó la compleja dinámica de los mismos. Los valores estimados presentan un buen ajuste a los valores medidos.

Se realizó un análisis de la dinámica hídrica de los Bañados del Río Dulce por medio de un seguimiento espacial y temporal de las áreas cubiertas por agua, cubriendo las crecidas registradas a partir de enero de 2017 hasta la fecha. Tanto el desarrollo y ajuste de modelos hidrometeorológicos, como el planteo de políticas tendientes

a mejorar la gestión del recurso hídrico en el noreste de la provincia, requieren del conocimiento y control del recurso hídrico y de las variables que hacen a la respuesta de la cuenca de aporte ante eventos hídrico-climatológicos.

Se desarrolló un Sistema de Modelado Hidrodinámico y de Calidad de Agua de Mar Chiquita. El sistema constituye una herramienta útil en el abordaje eficiente de distintas problemáticas asociadas a fenómenos hidrodinámicos, sedimentarios y de calidad de agua, permitiendo analizar diferentes fenómenos en una misma interfaz de trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a las siguientes instituciones: Secretaría de Recursos Hídricos (SRH) del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos (MAAySP) de la provincia de Córdoba; Municipalidad de Miramar.

Referencias Bibliográficas

Deltares, (2014a). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional Hydrodynamic flow sand transport phenomena, including sediments. User manual.

Deltares, (2014b). D-Water Quality. Versatile water quality modelling in 1D, 2 or 3D system including physical, (bio) chemical and biological processes. User manual.

Gyssels, P., Corral, M., Rodríguez, A., Patalano, A. y Fernández, R. (2011). *Estudio de la Dilución en el Campo Cercano de Vertidos Cloacales para el diseño de un Emisario Submarino en Mar del Plata*. Informe para el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFYN de la Universidad Nacional de Córdoba.

Hillman, G.; Mery, J.; Pagot, M.; Rodríguez, A.; Lips, B. (2011). *Dinámica hídrica de los Bañados del Río Dulce. XXIII Congreso Nacional del Agua*. Resistencia, Chaco, Argentina.

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

Patalano, A., 2017. *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Córdoba.

Pozzi, C., Plencovich, G., Corral, M., Pagot, M., Hillman, G., Rodríguez, A., y otros. (2006). *Bañados del río Dulce y laguna Mar Chiquita*. Capítulo: *Circulación de las aguas superficiales en*

la laguna Mar Chiquita. Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias.

Rodríguez, A., Pagot, M., Hillman, G., Pozzi, C., Plencovich, G., Caamaño, N., y otros. (2006). *Bañados del río Dulce y laguna Mar Chiquita*. Capítulo: *Modelo de simulación hidrológica*. Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias.

Cazadores de crecidas: resultados, crítica y nuevos objetivos

* 1. A. PATALANO
C. M. GARCÍA
N. F. GUILLÉN
L. MASSO
2. J. LE COZ

Introducción

Los ríos montañosos de la provincia de Córdoba, se caracterizan por la ocurrencia de crecidas repentinas con volúmenes muy altos y altas velocidades durante la temporada de lluvias (octubre a abril). Debido a la naturaleza repentina de las inundaciones, es muy poco probable que sea posible aforar varias secciones del río de interés utilizando instrumentos y técnicas adecuadas para registrar el flujo máximo y su evolución temporal durante la crecida. En caso de que sea posible llegar a tiempo a los sitios de estudio, las velocidades del flujo y los objetos flotantes del río se pone en peligro tanto los instrumentos como los operadores. Por ese motivo, investigadores del CETA han desarrollado e implementado el proyecto Cazadores de crecidas (Patalano et al., 2015) para generar una base de datos de videos y fotos digitales de inundaciones repentinas en ríos de la provincia de Córdoba. Estos videos y fotos han sido registrados y compartidos por los ciudadanos utilizando tecnología digital avanzada (teléfonos celulares, cámaras digitales, tabletas, etc.) y están disponibles por la voluntad de la gente de filmar estos eventos hidrológicos extremos para compartir sus imágenes en redes sociales, sitios web, foros, etc. (Le Coz et al., 2016) han ilustrado a través de tres ejemplos diferentes en el mundo que los proyectos de ciencia ciudadana tienen un gran

potencial de iniciativas para mejorar la evaluación del riesgo de inundación en interacción con las comunidades locales.

Los videos de inundación registrados por los ciudadanos se procesan para estimar la velocidad y el caudal del río usando técnicas de velocimetría por imágenes tales como la Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (Detert y Weitbrecht, 2015, Fujita et al., 1998, Le Boursicaud et al., 2015, Le Coz et al., 2010). La implementación de LSPIV (Velocimetría de Imagen de Partículas a Gran Escala), utilizando videos no profesionales, constituyen una mejora significativa al método indirecto alternativo de cuantificación de caudales de flujo y tiene un gran potencial en la provincia de Córdoba, Argentina. Durante la última temporada de lluvias (2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017), ocurrieron eventos hidrológicos extremos en la provincia de Córdoba y, en algunos casos, los datos de caudal obtenidos con esta técnica son la única información disponible para caracterizar los eventos hidrológicos observados (Patalano et al., 2015).

Implementación

El primer paso en el proyecto fue crear un sitio web con dominio de la Universidad Nacional de Córdoba (<http://www.cazadoresdecrecidas.unc.edu.ar/>), realizando luego una intensa difusión de la existencia de esta página web en los principales periódicos y algu-

nos canales de televisión. En la página web del proyecto, las personas pueden subir sus videos de crecida junto con los metadatos (fecha y hora de la grabación, ubicación de la sección del río, etc.). En el caso de que las condiciones de registro sean favorables, los videos son analizados y procesados usando la técnica de LSPIV. El sitio web proporciona indicaciones para los usuarios sin conocimientos previos de hidráulica sobre la mejor manera de hacer contribuciones útiles para cuantificar los caudales de las crecidas.

Los usuarios interesados en participar en el proyecto de Cazadores de Crecidas pueden enviar o subir sus videos usando diferentes plataformas (por ejemplo, Dropbox, Mega y We Transfer) a través de tutoriales básicos generados por los científicos. También existe una página web que enumera todas las inundaciones registradas e incluye los resultados de flujo si el video ha sido adecuado para el análisis.

Las imágenes se analizan siguiendo la metodología descrita por (Patalano et al., 2017) que utiliza herramientas del estado del arte (es decir, que aplican análisis clásicos de PIV / PTV) y los llevan a la caracterización de flujos superficiales de Gran Escala, utilizando las herramientas RIVeR (Rectificación de los Resultados de Velocidad de Imagen). RIVeR se ha desarrollado en el Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba desde el año 2013.

Las secuencias de imágenes de los videos grabados son procesados de la siguiente manera: después de convertir las imágenes en color extraídas de los videos a imágenes en escala de grises, se procesan con la herramienta Matlab PIVlab (Thielicke y Stamhuis, 2014) para calcular el campo vec-

torial de desplazamiento de cada par de imágenes. Se procesa cada uno de estos campos de velocidad instantánea y se calcula el campo de desplazamiento promedio en píxeles por par de imágenes. Los resultados se exportan a la herramienta RIVeR donde los datos de desplazamiento se transforman en datos de velocidad en [m/s] rectificando los resultados de la perspectiva debido a la captura oblicua de los videos con respecto a la superficie del flujo. La rectificación se realiza utilizando distancias entre Puntos de Control fijos (CPs) observados en las imágenes, relevados in situ después del evento de inundación. Combinando el perfil de velocidad superficial, el área de interés con el perfil de batimetría observado posteriormente y una relación entre velocidad media y la velocidad superficial, se puede estimar el caudal de la crecida en el momento del video en una sección transversal definida del río.

La relación del grupo de investigación a cargo del proyecto Cazadores de Crecidas con las autoridades gubernamentales es óptima. El ministro de Agua, Medio Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba es profesor de la Universidad Nacional de Córdoba (en licencia) e interesado en la implementación de la técnica. Los resultados obtenidos en el proyecto están siendo utilizados por el gobierno para evaluar hidrológicamente algunos de los eventos extremos registrados. Debido a este interés, el proyecto ha recibido apoyo del gobierno incluyendo logística para realizar los relevamientos requeridos (topografía, trabajo de campo, etc.). Desde finales de 2016, los líderes del proyecto están capacitando a bomberos y personal de defensa civil que responden inmediatamente cuando ocurre una crecida repentina.

La capacitación consiste en la concientización de la importancia de los datos recolectados durante las crecidas repentinas, una descripción sencilla del proyecto científico ciudadano e instrucciones sobre cómo grabar videos de buena calidad para luego ser procesados. El personal capacitado corresponde a distintas ciudades de diferentes regiones estratégicas de la Provincia de Córdoba donde el riesgo de crecidas repentinas es alto. En cada ciudad se ha definido un sitio de medición, se ha relevado la batimetría de la sección transversal y los puntos de control PCs discernibles, se ha instalado una regla y definido un lugar seguro donde el usuario pueda ubicarse para grabar un video del evento.

Ejemplo de resultados

El 10 de febrero de 2017, los líderes del proyecto recibieron el primer video de Defensa Civil registrado en río Ceballos en la ciudad del mismo nombre. El video representa una crecida de bajo riesgo y se puede ver una imagen instantánea en la Figura 1. Se realizó la grabación con un teléfono celular a 30 fotogramas por segundo (fps). Los marcos de imagen han sido procesados con PIVlab. La sección es parte de un tramo recto de 10 m de ancho que tiene márgenes verticales de hormigón. El video se ha enviado con una foto de la regla para que se conozca en forma precisa el nivel de agua. Los resultados han sido rectificados y el caudal de la sección transversal se ha calculado en RIVeR usando la batimetría conocida y su perfil de velocidad superficial.

El caudal se calcula a partir de la velocidad superficial. Asumiendo una ley logarítmica en el perfil de velocidad vertical, la relación entre la velocidad superficial V_s y la velocidad media V_m , debe seguir

* 1. Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Universidad Nacional de Córdoba, (UNC.).

2. Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Ambiente y la Agricultura (IRSTEA), Lyon-Villeurbanne, Francia.

la siguiente ecuación $V_m = \alpha * V_s$. Los líderes del proyecto eligieron $\alpha = 1$ según su experiencia en la medición en los ríos de Córdoba cuando estos están en condición de crecida. El caudal obtenido durante el evento es de 1.86 m³/s.

El resultado principal aquí es el hecho de que el video de alta calidad (alta definición y centrado en una sección transversal conocida) recibida fue realizada por un trabajador de la Defensa Civil y ahora es parte de su rutina para grabar un video en una ubicación específica cuando ocurre una inundación repentina.



Figura 1. Instantánea del río inundado Río Ceballos y su campo de desplazamiento medio no rectificado.

Conclusión

Cazadores de Crecidas es un proyecto de Ciencia Ciudadana que tiene como objetivo recopilar datos valiosos de colaboración distribuida con el fin de reducir las incertidumbres en la curva de aforo durante los eventos de crecida repentina. El principal problema al que se enfrentaba el proyecto es que muchos de los videos no eran adecuados para su procesamiento porque no cumplían con las condiciones requeridas. Los líderes de Cazadores de Crecidas capacitaron para este proyecto a bomberos y personal de la Defensa Civil que son los primeros en llegar a los ríos cuando ocurren crecidas repentinas. Se ha procesado un ejemplo de un video recibido de la Defensa Civil. Ahora es parte de la rutina del personal que se ha

capacitado grabar videos de alta calidad cada vez que ocurre una crecida repentina. Los líderes del proyecto esperan recibir una cantidad considerable de nuevos videos de los grupos entrenados durante la próxima temporada de lluvias.

Las consecuencias directas en compartir los resultados de esta investigación con los organismos de gestión son: el mapeo de las amenazas del agua y del medio ambiente, las vulnerabilidades y los riesgos que enfrentan los nuevos escenarios climáticos; la propuesta de políticas para la gestión de obras de regulación y explotación en el marco de estos escenarios. Las decisiones basadas en datos medidos impactarán significativamente en la reducción de las pérdidas de vidas y daños materiales causados por estos eventos de crecidas repentinas. Para la comunidad científica la posibilidad de extender las curvas que relaciona altura con caudal, utilizando las mediciones de valores extremos de caudal, disminuirán dramáticamente el error inducido por la extrapolación de estas curvas. Curvas de aforo más precisas implican mejores modelos de pronóstico calibrados en un rango mayor de condiciones de flujo.

Referencias bibliográficas

Detert, M., Weitbrecht, V. (2015). A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept. *J. Hydraul. Res.* 53, 532. doi:10.1080/00221686.2015.1054322.

Fujita, I., Muste, M., Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J. Hydraul. Res.* 36, 397–414. doi:10.1080/00221689809498626

Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W. F., Bradley, A., Asce, A. M., Muste, M., Asce, A. M., Creutin,

J., Wilson, M. (2008). Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method 13, 105–110.

Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J. (2015). Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrol. Process.* n/a-n/a. doi:10.1002/hyp.10532

Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *J. Hydrol.* 394, 42–52. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.049

Le Coz, J., Patalano, A., Collins, D., Guillén, N.F., García, C. M., Smart, G.M., Bind, J., Chiaverini, A., Le Boursicaud, R., Dramais, G., Braud, I. (2016). Crowdsourced data for flood hydrology: Feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand. *J. Hydrol.* 541, 766–777. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.07.036

Patalano, A., García, C. M., Rodríguez, A., 2017. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Comput. Geosci.* 109. doi:10.1016/j.cageo.2017.07.009

Patalano, A., Moreno, L., García, C. M., Guillén, N.F. (2015). Desarrollo E Implementación Del Proyecto “Cazadores De Crecidas” En Ríos De La Provincia De Córdoba, in: *IV Simposio Sobre Métodos Experimentales En Hidráulica*. La Plata, Argentina.

Thielicke, W., Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *J. Open Res. Softw.* 2. doi:10.5334/jors

Avances en el monitoreo y modelado hidroecológico de embalses en Córdoba: caso Lago San Roque

* 1. JONATHAN MUCHIUT
MAYCO DAGATTI
ANDRÉS RODRIGUEZ
FEDERICO PRYSTUPCZUK
REINALDO GONZÁLEZ REYES
SANTIAGO RODRIGUEZ GLEZ.
MARIANO CORRAL
PAOLO GYSSELS
2. LUIS ALBERTO MURGIO.
3. HORACIO HERRERO
NICOLÁS GUILLÉN
4. MARÍA INÉS RODRIGUEZ
LUCIANA MENGÓ
DANIELA SILVINA ARÁN
5. ANA LAURA RUIBAL CONTI
MARCIA RUIZ

Introducción

Una gran cantidad de cuerpos de agua como lagos y reservorios son usados para diversos fines-actividades recreativas, producción hidroeléctrica, fuentes de agua para riego, industria y consumo humano, y control de crecidas-. Los requisitos para cada uno de estos usos difieren, y muchas veces son contrapuestos. Esto hace del agua un recurso que debe ser gestionado como un servicio cuyo usuario final es la comunidad en general, inmerso en un ecosistema que le es propio. Es así que la calidad del agua condiciona el fin que a la misma se le puede dar y al mismo tiempo dicho fin condiciona a aquélla.

La calidad del agua puede determinarse a través de la medición de concentraciones de diversas sustancias tanto de origen orgánico como inorgánico. En muchos países, los distintos usos que existen, están regulados por normas que establecen parámetros de calidad, lo que hace que el control de éstas sustancias sea necesario, sea mediante la regulación y control de los ingresos desde la cuenca de aporte y/o por el aumento y mejora de los procesos de mezcla.

La mezcla es resultado de la turbulencia y la advección diferencial en el agua. En lagos y reservorios tiene como fuentes naturales principales la energía proveniente de los flujos entrantes, flujos salientes, la interface aire-agua y del oleaje, convección y fuerza de Coriolis.

El fitoplancton -o algas microscópicas- presente en los cuerpos de agua aumenta su biomasa debido a la interacción de ciertos factores como temperatura, radiación solar y nutrientes disueltos en los mismos. Debido al aumento de la biomasa fitoplanctónica, el lago o reservorio comienza a perder calidad estética, capacidad de transporte en ciertos puntos, a generar inconvenientes en las plantas potabilizadoras y a presentar un potencial riesgo a la salud de la población expuesta, entre otros inconvenientes. Este crecimiento puede exacerbarse y acentuarse en el tiempo, dando paso al fenómeno conocido como desarrollo masivo de algas, floraciones algales o blooms y continúa hasta que la concentración de los nutrientes en el agua no es la suficiente, la temperatura o luz no es la necesaria, y/o debido a la presencia de predadores -zooplancton-, momento a partir del cual la biomasa comienza a decaer.

La descomposición de las algas consume el oxígeno en las profundidades, provocando hipoxia que puede llevar a un estado de anoxia y resultar en la muerte de aquellas especies sin suficiente resiliencia. Debido a que el único recurso necesario para el crecimiento del fitoplancton capaz de ser controlado o al menos regulado de forma directa por el hombre es el conjunto de nutrientes -principalmente el nitrógeno y fósforo-, es entonces el factor que debe ser limitante. Lo mismo se logra de diversas for-

mas: mediante el tratado del agua residual, cambios de prácticas en actividades humanas como la agrícola, distribución de nutrientes en diferentes cuerpos receptores, modificación de los productos que generan nutrientes, entre otros.

El problema de eutrofización puede entonces definirse como un exceso en el ingreso y acumulación de nutrientes orgánicos e inorgánicos en un cuerpo de agua que, junto a condiciones ambientales y meteorológicas adecuadas, aumentan la producción primaria o estimulan el aumento de biomasa, generando inconvenientes para ciertos usos y usuarios de dicho recurso.

Estado actual de los embalses de Córdoba. Lago San Roque

La mayoría de los embalses de la provincia de Córdoba presentan niveles de eutrofización elevados, teniendo como causa principal la falta de regulación y control de la cuenca de aporte, vinculados a la producción de nutrientes provenientes de residuos urbanos, industriales y agrícolas que llegan de manera directa o indirecta al cuerpo de agua.

El Embalse San Roque (ESR) constituye una de las dos fuentes de suministro de agua potable para la Ciudad de Córdoba. Experimenta floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas verdes-azules *Microcystis aeruginosa* y de los diatomeas *Ceratium hirundinella*, con concentraciones de clorofila-a que superan los 50 µg L⁻¹ durante los meses de verano y otoño (ver Figura 1).

La remediación del estado hipertrofico que presenta este cuerpo de agua comenzó a principios del año 2001, mediante desarrollos llevados a cabo por el *Centre for*



Figura 1. Floración de *Microcystis aeruginosa* del 20 de enero del 2018, próximo al cierre del Embalse San Roque.

Water Research, de la *University of Western Australia*, que ha diseñado estaciones denominadas LDS -Lake Diagnostic System- que operan y funcionan actualmente en lagos de todo el mundo.

Del conjunto de sensores hidrometeorológicos instalados, el de mayor importancia es el de la cadena térmica, capaz de medir temperaturas en toda la columna del ESR. De esta manera es posible predecir y estudiar los procesos de estratificación térmica que producen y agravan los fenómenos de eutrofización, y con ellos la generación de blooms algales.

A la par se ha implementado un sistema de destratificación artificial, que consiste en un conjunto de 7 difusores, cada uno de 925 metros de longitud, que descargan un total de 933 l.s⁻¹ de aire comprimido en la base del reservorio. La ventaja de contar con una LDS es que ésta permite determinar aquellos períodos en los cuales el lago comienza el proceso de estratificación -al tener un registro de mediciones de temperatura a lo largo de toda la columna de agua en tiempo real- y así gestionar y optimizar los momentos de trabajo de las bombas de aire.

Estación de Monitoreo de Lagos (EML)

La estación de monitoreo de lagos, análoga a la LDS (Figura 2), se puede definir como un conjunto de sensores hidrometeorológicos, biológicos y químicos montados sobre una boya que, correctamente anclada en un punto de conveniencia dentro de un lago o reservorio, es capaz de recibir y almacenar los datos, para ser transmitidos de forma inalámbrica a un servidor remoto donde serán procesados.

El diseño propuesto y llevado a cabo en su instalación en el año 2001 en el ESR por parte de la institución australiana CWR con-

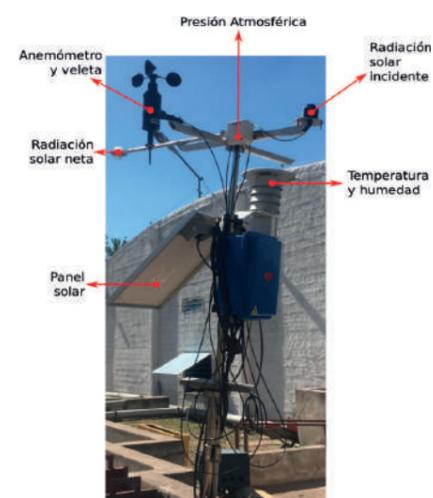


Figura 2. Estación de Monitoreo de Lagos, con los sensores.

sistía en dos lastres -cargas suspendidas-, apartados del eje vertical del instrumento mediante una boya sumergida, y un ancla -carga en el fondo del cuerpo de agua- sobre dicho eje. Para que éste último funcione como tal, era de vital importancia un sistema mecánico -malacate- capaz de ascender o descender el ancla, operación que era realizada manualmente, lo que generaba inconvenientes.

La nueva EML (ver Figura 3) presenta un diseño diferente, similar a una instalada por los italianos en sus lagos, donde se utiliza un lastre sobre el eje del instrumento, y un ancla ubicada a cada costado. El cabo que une estas últimas con la estación se encuentra dividido en tres partes, separadas por dos boyas, la primera sumergida y la segunda flotante. Este sistema permite, dada una elevación de la superficie de agua, tensar las cuerdas de tal manera que las mismas se presenten en forma de línea recta. El objetivo es, por tanto, diseñar estos elementos para que, dado un máximo nivel de agua, los cabos sean sometidos a esfuerzos de tracción menores a su resistencia y menores a aquellos que harían que el ancla se suspenda y comience a trabajar como muerto. Para niveles menores de agua, las cuerdas dejan de trabajar a tracción y permiten un movimiento oscilante de la estación en el plano horizontal relativamente pequeño.

Para aumentar la seguridad en cuanto al sistema de flotación, se colocarán nuevas boyas suspendidas por sobre el nivel de la superficie del lago, que sólo trabajarán en caso de imprevistos. Por último, la boya principal de la estación estará en el centro de un sistema de señalización compuesto por una circunferencia de 8 metros de radio, correctamente señalizada.

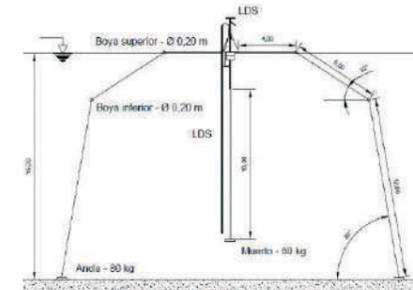


Figura 3. Diseño de la nueva estación, con dos anclas de 80 kg en los costados y un lastre central que cuenta con el mismo peso. La tracción en los cabos se logra con boyas sumergidas de 0,20 m de diámetro.

Los parámetros físicos que se miden en la superficie del lago son: temperatura y humedad del aire, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar incidente, y radiación solar neta -representa la radiación solar incidente menos la reflejada por el cuerpo de agua, es decir, la energía realmente absorbida por el lago, disponible en parte para el crecimiento de las algas-. Por debajo de la superficie, se cuenta con la cadena térmica ya mencionada y un sensor de presión hidrostática a partir del cual se registra la altura del nivel de agua en tiempo real.

Sumado a esto, el diseño de la estación incluye un puerto de comunicación destinado a la conexión de una sonda multiparamétrica (Aqua TROLL 400), que dota al sistema de medición la capacidad de registrar niveles de conductividad, pH, oxígeno disuelto, entre otros.

La transmisión de los datos recolectados se realiza de manera inalámbrica mediante un módulo GPRS incluido en la estación, que permite utilizar la red de telefonía existente para establecer una conexión por Internet. Puede operar con cualquiera de las tres prestadoras del servicio existentes en el país, lo que posibilita seleccionar aquella que presente mayor señal

y mejor calidad del servicio en el lugar de instalación. Para realizar dicha tarea se hace uso del protocolo de transferencia de archivos (FTP), mediante el cual se escriben los datos correspondientes en un archivo existente en el servidor remoto encargado de recibir y almacenar de manera permanente los datos, permitiendo su acceso desde cualquier terminal conectada a Internet.

El desarrollo electrónico del sistema incluye un módulo GPS que suministra con precisión la fecha y hora del momento en que se toman los datos de los sensores. Toda esta información es almacenada en una memoria no volátil -tarjeta micro SD-, para luego ser transmitidos al servidor. La estación cuenta con un sistema de telemetría de respaldo, formado por un transmisor de radiofrecuencia que permite descargar manualmente los datos ubicando un receptor en la costa del lago. La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de todo el sistema es provista mediante un panel solar de 20W, un regulador de carga y una batería de tecnología plomo-ácido de 12V - 7Ah.

Todos los procesos llevados a cabo en la estación -adquisición de datos, procesamiento, almacenamiento, transmisión, etc.- son controlados por la computadora de a bordo (ver Figura 4), basada en un micro controlador con arquitectura ARM Cortex-M3 de 32 bits y procesador de 84 MHz. El software desarrollado y embebido en este microcontrolador permite seleccionar el período de recolección y el período de transmisión de los datos, habilitar o deshabilitar sensores, monitorear el consumo de energía de todo el sistema, entre otras prestaciones. La computadora de a bordo va dentro de un gabinete plástico construido bajo el

estándar IP67, de modo que pueda ser sumergido por debajo de la superficie del lago, situación favorable para la disipación térmica de la electrónica que compone el sistema.

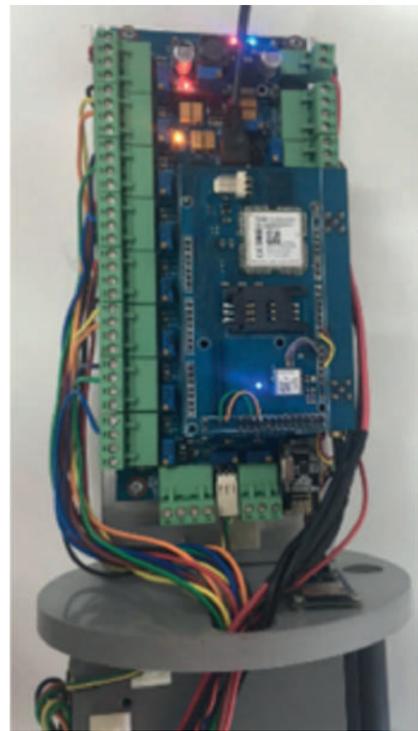


Figura 4. Computadora principal de la EML

Modelación numérica. Sobre Delft 3D y MIKE 21 2D

La necesidad de aplicar herramientas que pronostiquen la variación de la calidad del agua se ha incrementado en los últimos años como consecuencia de los procesos de eutrofización presentes en los cuerpos de agua en el mundo. Las aproximaciones más sencillas se ejemplifican por el desarrollo y aplicación de **modelos input-output** o **estacionarios** que consideran al sistema como perfectamente mezclado.

Una segunda aproximación, referida a menudo como **modelación ecológica** agrega específicamente algunos de los factores químicos y biológicos que se encuentran ausentes en los modelos

estacionarios. Las interacciones entre los procesos físicos y los bioquímicos descritos por estos modelos están representados en forma simplificada.

La tercera aproximación comprende la extensión de **modelos hidrodinámicos**, capaces de resolver las ecuaciones de mecánica de fluidos para luego ser acoplados a modelos ecológicos.

Típicamente, los modelos que representan la variación en el tiempo de los procesos ecológicos intervienen ecuaciones de conservación y transporte con coeficientes que requieren de su calibración mediante la realización de experimentos en campo, toma de muestras, análisis de imágenes satelitales, entre otros.

El software de modelación numérica **Delft 3D** está compuesto por una serie de módulos acopla-

dos entre sí capaces de resolver numéricamente y en tres dimensiones: flujos, transporte de sedimentos, calidad de agua, cambios morfológicos y ecología. Con respecto al fenómeno de eutrofización y estratificación, es posible modelar flujos entrantes y salientes, estratificación inicial del flujo entrante, flujos debido a oleaje y a corrientes de viento, estratificación térmica del cuerpo de agua, intercambio de calor superficial, transporte de contaminantes, proceso de eutrofización ($N - NH_4^+$, $N - NO_3^-$, $P - PO_4^{3-}$ y Si), precipitación y evaporación, transporte de sedimentos y flujos hidrodinámicos internos (*Delft3D, Functional Specifications, 2013. Deltares, 3.14 ed. 2*).

El software, además, presenta gran versatilidad en cuanto al ingreso y egreso de datos, asociados

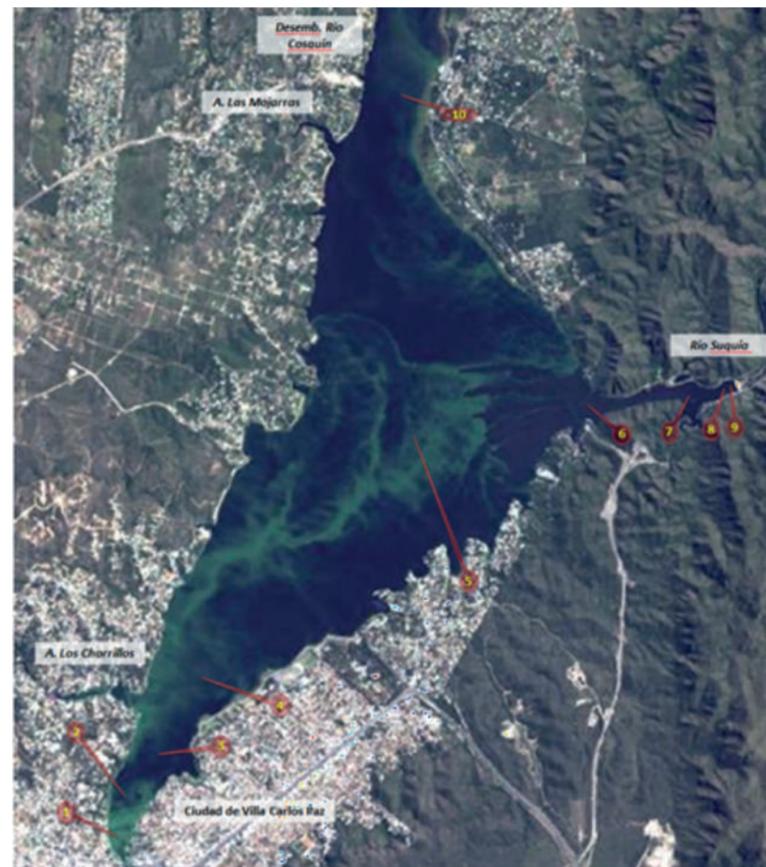


Figura 5. Imagen satelital del Lago San Roque. Se puede apreciar la mancha generada por el bloom algal de febrero del año 2017, originándose principalmente en los tributarios del sur (Los Chorrillos y San Antonio). Además, se encuentran marcados los puntos de muestreo.

a interfaces gráficas, y además posee código abierto. Por otra parte, el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba cuenta con la licencia del software, por lo que se encuentra actualizado y operativo.

La calibración se llevará a cabo a través de mediciones en un total de 10 puntos (ver Figura 5) distribuidos de la siguiente manera: 4 en la zona sur, 1 en la zona central, 1 en la zona norte y los últimos 4 en la garganta. A su vez, se contará con el apoyo de imágenes satelitales, a partir de la cual puede apreciarse la mancha generada por ciertos blooms algales.

Por otra parte, se utilizó otro software de modelación numérica el **DHI MIKE 21 Flow Model 2D** (DHI, 2016). Es flexible y genérico con posibilidades de describir las características hidrodinámicas y ecológicas de distintos tipos cuerpos de agua. Cabe destacar que a través de del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba se accedió a la licencia estudiantil (DHI, 2017).

A modo comparativo, se realizó una corrida preliminar (sin considerar características orográficas en la zona) con viento constante 5,5 m.s-1, dirección 0°. De esta manera se pueden visualizar semejanzas y diferencias entre los softwares y las modelaciones en 2D-3D (ver Figura 6 y 7).

La instalación de la LDS en el lago será, a su vez, un elemento fundamental para lograr la calibración del modelo en cuanto a las predicciones que del modelo numérico puedan obtenerse.

Sobre las futuras EML

Esta experiencia proyectada para el Lago San Roque será replicable a una futura red provincial del orden de 10 cuerpos de agua moni-

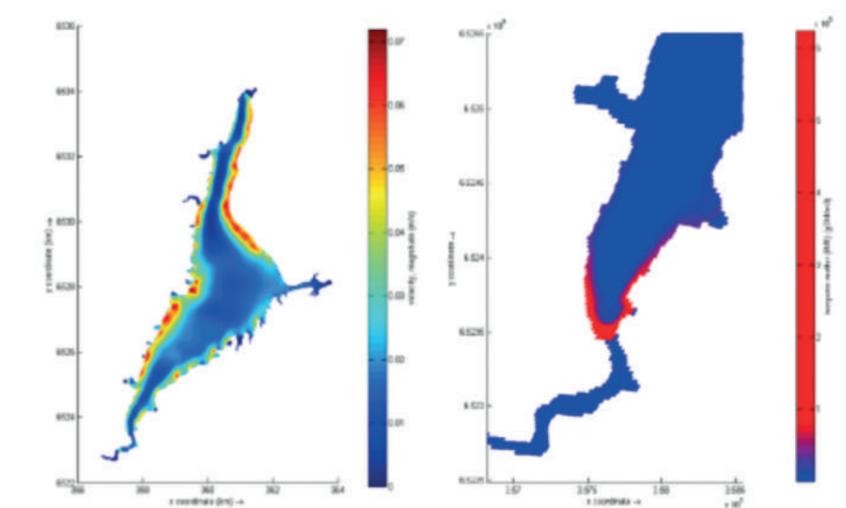


Figura 6. Modelación numérica mediante el software Delft 3D. A la izquierda se presenta el campo de velocidades para un viento constante y no uniforme de 5,5 m/s. A la derecha, la pluma generada por un trazador conservativo, para el mismo escenario hidrodinámico.

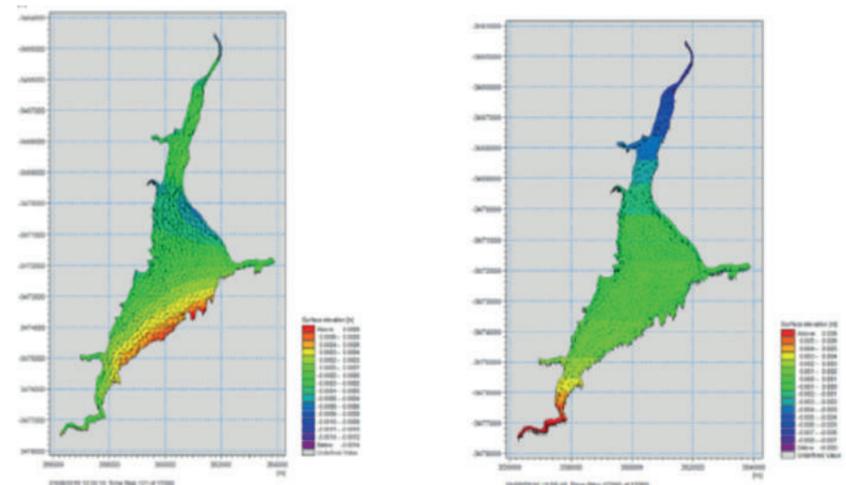


Figura 7. Modelación numérica mediante el software DHI MIKE 21 2D. A la izquierda se presenta el campo de velocidades con viento constante de 5,5 m.s-1, 0° al comienzo de la corrida. A la derecha, al final de la corrida.

toreados, entre ellos Los Molinos, Cruz del Eje, Embalse, La Viña y El Cajón. El sistema de medición se encuentra en constante desarrollo y actualización. Una de las ramas en la que se está trabajando es en migrar al sistema de telefonía 3G, con mejores prestaciones en telecomunicación y conexión a Internet, lo que permitirá establecer una comunicación bidireccional e interactuar con el sistema a distancia.

También se reemplazará el software desarrollado por un RTOS (Real Time Operating System),

sistema operativo de tiempo real, que permitirá, en conjunto con la característica previa, realizar actualizaciones de firmware de manera remota.

Por otro lado, se desarrollarán e implementarán nuevos sensores: un equivalente electrónico al disco de Secchi, un sensor acelerómetro para dimensionar el oleaje, un giróscopo para conocer la posición de la estación, y un magnetómetro para saber la dirección.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba.

Bibliografía

Bazán, R., Oroná, C., Cossavella, A., Corral, M., Rodríguez, M., Busso, F. y Bonfanti, E. (2002). *Análisis y modelado de las características limnológicas del embalse Los Molinos*. Resúmenes Seminario Taller: Calidad de aguas en embalses de la provincia de Córdoba, Argentina, pp. 18.

Chapra, S.C. (1982): A budget model accounting for the positional availability of phosphorus in lakes. *Wat. Res.*, vol. 16 pp. 205-209.

Corral, M. (2006). *Modelación de la calidad del agua del Embalse Los Molinos*. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos. FCE-FyN-UNC.

Delft3D, Functional Specifications. (2013). Deltares, 3.14 ed. 2

DHI. (2016). *MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Module. User Guide.* Denmark: Danish Hydraulic Institute

DHI. (2017). *MIKE Software. Student licensed Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.* Denmark: Danish Hydraulic Institute

Imberger, G. (2004). A Lake Diagnostic System for Managing Lakes and Reservoirs, *Water Resources Impact*, Vol. 6, N. 1, 7-10.

Rodríguez, M. I. and Ruiz, M. (2016). Limnology of the San Roque Reservoir, Chapter 2: in Manual: *The Environmental Han-*

doobok of Chemistry: ISSN: 1867-979X. Springer Berlin Heidelberg.

Rodríguez, M. I.; Mengo, L. Ruiz, M.; Ruibal Conti, A. L.; Arán, D.; Halac, S.; Sada, C.; Pussetto, N.; Dasso, C.; Bonfanti, E. y Busso, F. (2017). Evento Extremo de Floración de Cianobacterias en el Embalse San Roque, 23 y 24 de noviembre 2017 - VI Taller sobre Cianobacterias Toxígenas en Argentina- CEBB-MdP-CIB-FIBA – Mar del Plata – Argentina.

Thomann, R. V. y Mueller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modelling and Control.* Harper & Row Publishers. New York.

Dagatti, M.; Prystupczuk, F.; Corral, M., Rodriguez, A. (2017): Desarrollo de un Sistema de Monitoreo Hidro-Meteorológico y Calidad de Agua. *Conagua 2017.* Córdoba, Argentina.

Implementación operativa de un pronóstico numérico de alta resolución del Laboratorio de Hidráulica

* 1. ESTEFANÍA NIEVAS LIO
GONZALO ZIGARÁN
IVÁN ASINARI
IGNACIO MONTAMAT
AGUSTÍN MARTINA
JORGE SAFFE
ANDRÉS RODRÍGUEZ
2. ANDRÉS LIGHEZZOLO
MARCELO SCAVUZZO
3. ANDRÉS PÉREZ HORTAL

Introducción

La Región Centro en la República Argentina es una asociación política conformada por las provincias de Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe, que posee el tamaño y la escala adecuados para funcionar como una verdadera unidad operativa en la economía internacional. Los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos que se producen en nuestro Planeta provocan múltiples víctimas e importantes daños materiales en los bienes y la infraestructura, que implican consecuencias económicas adversas para las comunidades y que pueden persistir durante muchos años (OMM, 2015).

Sin sistemas de alerta temprana, la sociedad y los sectores productivos están en constante estado de vulnerabilidad.

Los recientes modelos numéricos de predicción del tiempo permiten obtener un conjunto de variables meteorológicas pronosticadas con anticipación de varios días y actualizado diariamente. Por esta razón estos modelos numéricos son el primer eslabón de un sistema de alerta temprana (WMO, 2010).

En este contexto se presenta a continuación una implementación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2005) llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba.

Características generales de los modelos e implementaciones

Desde hace ya varios años existen diversas instituciones en todo el mundo que, si bien no están a cargo de la provisión de pronósticos operativos, corren modelos numéricos con diferentes finalidades. En el año 2009 el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) presentaba un sistema de pronóstico experimental basado en el modelo WRF (Saulo et. al., 2008). Un segundo ejemplo es la implementación lograda en la Unidad de Consultoría de Aplicaciones Espaciales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (CAEARTE) de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), también basada en el modelo WRF (Lighezzolo et. al., 2016).

En la mayoría de los centros operativos se utiliza una combinación de modelos globales y regionales.

El Global Forecast System (GFS) (NOAA/NCEP, 2017) es un modelo global que actualiza cuatro veces al día y pronostica hasta 16 días. El Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2005) en un LAM (Limited Area Model) diseñado para utilizarse tanto en la investigación como para la realización de pronósticos operacionales.

Ambos modelos pueden funcionar en conjunto, anidando WRF en GFS, para producir un pronóstico de mayor calidad.

* 1. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

2. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Córdoba Argentina.

3. McGill University, Montreal, Canadá.

La implementación presentada en este trabajo utiliza la versión de WRF 3.8 utilizando como condiciones iniciales y de contorno el modelo GFS con 0.25° de resolución horizontal. El dominio de trabajo considerado engloba a la región centro (Figura 1) y es calculado con una resolución de grilla horizontal de 270 x 270 puntos de 4 km, 35 niveles verticales. Se realizan pronósticos diarios de 33 hs con los datos de inicio de las 18:00 UTC y de las 06:00 UTC.

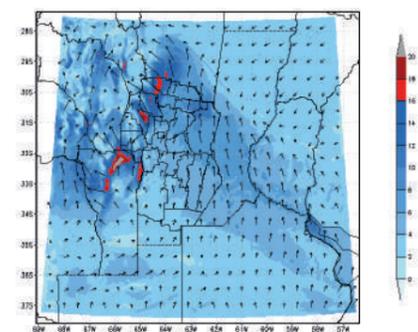


Figura 1. Dominio de cálculo utilizado. 270x270 puntos con resolución horizontal de 4 km. Se muestra como ejemplo la variable viento a 10 metros (Dirección e intensidad).

La componente física dentro del modelo WRF está representada por las parametrizaciones (Saulo et al., 2008). Las parametrizaciones resuelven los procesos de menor escala a la representada por el modelo. En esta etapa del trabajo se utilizó el siguiente conjunto de parametrizaciones. Para la representación de la microfísica se consideró el esquema de Thompson (Thompson, G. et al., 2008). Para la Capa límite se consideró el esquema de Mellor–Yamada–Janjic (Janjic, Z. I. 1994). Respecto a las parametrizaciones de radiación de onda larga y onda corta se utilizaron RRTM (Mlawer, E. J. et al., 1997) y Goddard (Chou, M. D. et al., 1999) respectivamente. El modelo de suelo utilizado fue el de Unified Noah Land Surface

(Tewari, M. et. al., 2004) y para los procesos de superficie el esquema Eta Similarity (Janjic, Z. I. 2002). La convección es explícitamente resuelta.

Información generada

El modelo genera una diversidad de variables meteorológicas, desde las variables de superficie hasta las de altura para cada uno de los niveles verticales con la que fue configurado. Se muestra a continuación un ejemplo de salida gráfica producidas en la etapa de post-procesamiento. Figura 2.

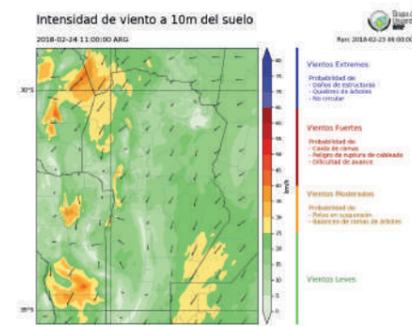


Figura 2. Ejemplo de producto generado. Mapa de intensidad de vientos y riesgo asociado.

Los productos generados son actualmente visualizados en el siguiente link: (<http://200.16.30.253:8030/>)

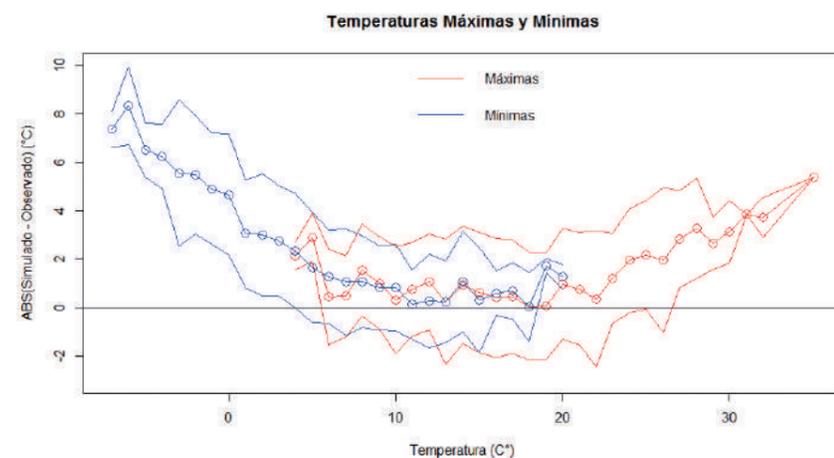


Figura 3. Error absoluto medio y su desviación en función de las temperaturas registradas. Mínimas (Azul) y Máximas (Rojo).

Verificación de variables

Sigue a continuación una verificación básica de las temperaturas (máximas y mínimas) y un evento de precipitación, significativo para la Ciudad de Córdoba.

Para realizar una comparación cuantitativa se trabajó con los datos de un número de estaciones automáticas pertenecientes a la Red de Estaciones de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba. Si bien la densidad de estaciones es baja y no se trata de estaciones homologadas, es de esperar que representen la realidad lo mejor posible.

En el primer caso, se trabajó con la temperatura como variable de superficie, considerando las máximas y las mínimas diarias. El periodo analizado en este trabajo cuenta 46 días (máximo) consecutivos del 7 de mayo de 2017 al 30 de junio del mismo año.

Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia del modelo a subestimar las temperaturas mínimas registradas en prácticamente todas las estaciones exceptuando algunas estaciones sobre las sierras. La mayoría de los valores del error está entre 2 y 5 °C por encima de la mínima registrada.

En cambio para las temperaturas máximas la mayoría de los valores rondan alrededor del cero. La Figura 3 deja ver como para temperaturas más extremas, es decir mayores máximas y menores mínimas, los valores del error tienden a crecer. Esta afirmación es más clara en el pronóstico de las temperaturas mínimas, donde a partir de los 5 °C hacia valores menores el error comienza a aumentar de manera más pronunciada.

Se desprenden de este primer análisis para las temperaturas máximas y mínimas conclusiones sobre cómo el modelo se desempeña a la hora de pronosticar dichas variables en el periodo considerado. El aporte de esta información permite pensar en un post-procesamiento adicional para corregir las desviaciones a los registros de las estaciones meteorológicas.

Primer caso de estudio en eventos de precipitación

Uno de los principales desafíos que se pretende resolver con la implementación del modelo es la de predecir eventos convectivos que afectan social y estructuralmente a una población.

Como un primer caso de estudio se consideró la ocurrencia de un evento convectivo que arribó a la ciudad de Córdoba el día 4 de octubre de 2016.

Pasadas las 10:30 hora local (UTC-3) un frente frío avanzó desde el Sur-Oeste de la provincia de Córdoba, al mismo tiempo una celda individual se formaba sobre las sierras grandes pasando de Oeste hacia el Este.

La Figura 4 (Izquierda) muestra una imagen de temperatura de tope de nube del satélite GOES 13 donde puede verse dicho avance. Entre las 14 y 15 horas frente alcanzó la ciudad de Córdoba. La

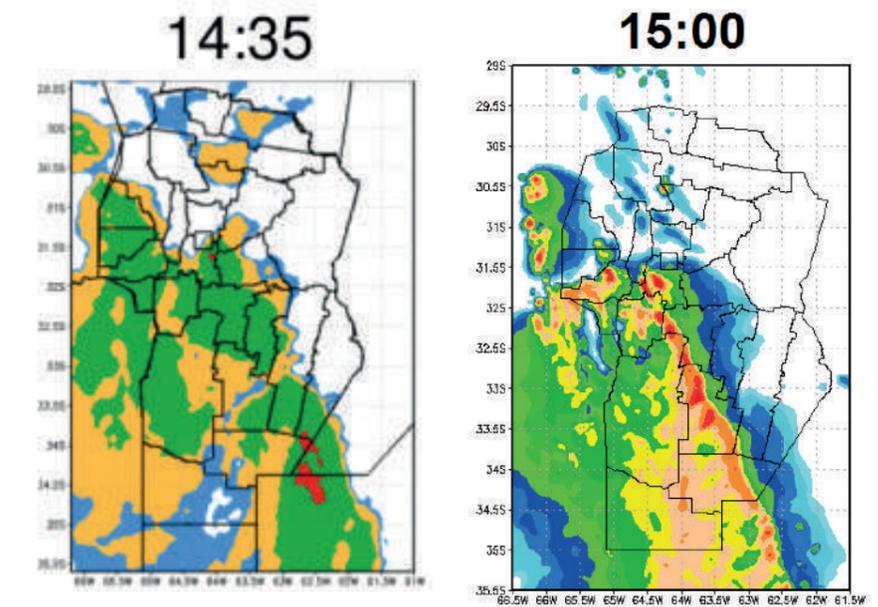


Figura 4. Avance del frente frío por la provincia de Córdoba. Imágenes de temperatura de tope de nube. Satélite GOES 13 (izquierda). Imágenes de reflectividad máxima en altura. Resultado de la simulación con WRF (derecha).

simulación para este día (figura 4 derecha) muestra la evolución del sistema mediante la visualización de la variable reflectividad máxima en altura en unidades dbz.

Si bien el patrón de desplazamiento de las figuras 4 (Izquierda y derecha) visualmente está en buen acuerdo, parece haber un desfase temporal entre ellos.

Sensibilidad a cambios en parametrizaciones

Experimentos anexos se llevaron a cabo con la idea de probar cuán sensible es el modelo, con respecto a cambios en las parametrizaciones, en la predicción de la precipitación. Para este experimento se realizaron cuatro nuevas simulaciones manteniendo las mismas parametrizaciones exceptuando los cambios en: microfísica, Capa límite y capas superficiales. Las diferentes combinaciones están identificadas con letras, donde la A es la correspondiente a la versión operacional descrita anteriormente.

La Figura 5 muestra los resultados de todas las simulaciones,

desde combinación A hasta E. Todas las configuraciones predicen precipitación para la provincia de Córdoba, es decir están en buen acuerdo con lo ocurrido ese día. En general todas muestran una concentración de la precipitación en las zonas Centro-Sur. Sin embargo, puntualmente las diferencias se hacen más notorias.

Si se tienen en cuenta los errores absolutos entre lo simulado y lo registrado para todas las estaciones y todas las configuraciones se obtiene la figura 6.

La Figura 6 muestra un diagrama del tipo boxplot donde es posible ver que los valores medios (círculos negros) y las medianas (líneas horizontales gruesas) no difieren mucho entre las distintas configuraciones. Sin embargo la dispersión de los datos si es diferente, siendo la configuración E con mayor dispersión y la A con la menor dispersión. Es decir, la configuración A parece ser más “estable” que las demás.

Este mínimo análisis deja ver que no existe un pronóstico me-

por que otro, y que si es posible contar con varias simulaciones, la información que se puede brindar tiende a ser más completa en el sentido de que se puede tener una representación media y una incertidumbre en el pronóstico.

Conclusión y líneas futuras

En el marco de la puesta en marcha del Centro de Operaciones y Emergencias Hidrometeorológicas (COEH) para la región centro del País se logró poner operativo el modelo WRF. Adicionalmente el modelo WRF cuenta un sistema de asimilación de datos, con lo cual se planea a futuro integrar la información del RMA1 al mismo y lograr un pronóstico localmente más preciso.

Agradecimientos

Este trabajo se pudo lograr gracias al aporte de información de distintas instituciones como el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, Laboratorio de Hidráulica – Centro de Estudios y Tecnología del Agua UNC. Unidad CAEARTE – CONAE.

Referencias bibliográficas

Chou, M. D., & Suarez, M. J. (1999). A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW) for Atmospheric Studies.

Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-945.

Janjić, Z. I. (2002). Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NCEP office note, 437, 61.

Lighezzolo, A., Lanfri, M., García, F., Clemoveki, K., Bridera, D., & Scavuzzo, M. (2016, June).

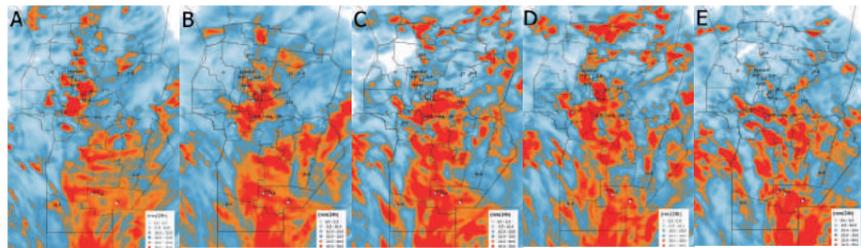


Figura 5. Precipitación acumulada simulada para las distintas configuraciones citadas.

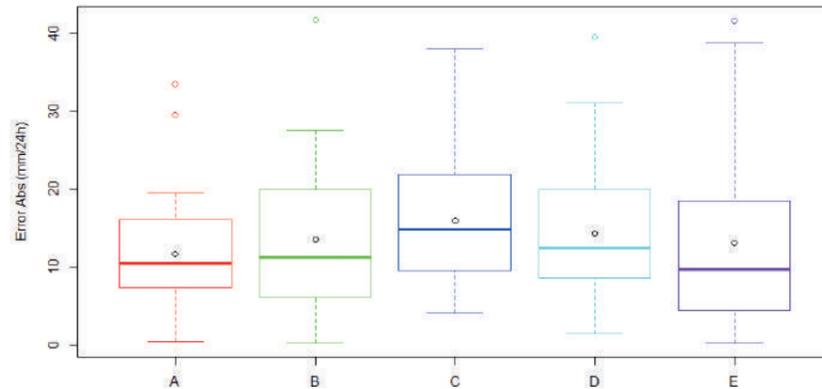


Figura 6. Errores absolutos para cada configuración considerando todas las estaciones.

Sistemas de alerta temprana a emergencias ambientales basados en modelos numéricos de predicción meteorológica. In *Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2016 IEEE (pp. 1-6). IEEE.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.

NOAA/NCEP. (2017).

OMW (2010). Directrices sobre sistemas de alerta temprana y aplicación de predicción inmediata y operaciones de aviso.

OMM (2015). Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos.(2015).

Saulo, C., Cardazzo, S., Ruiz, J., Campetella, C., & Rolla, A. (2008). El sistema de pronóstico experimental del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. *Meteorologica*, 33(1-2), 83-97.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., & Cuenca, R. H. (2004, January). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction* (Vol. 1115).

Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., & Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12), 5095-5115.

WMO (2015). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2015.

Calibración del RMA-1

* 1. IGNACIO A. MONTAMAT
 JORGE N. SAFFE
 DENIS POFFO
 AGUSTÍN MARTINA
 GIORGIO CARANTI
 RAÚL COMES
 TOMÁS HARTMAN
 CARLOS LACUNZA
 1.3. ANDRÉS RODRÍGUEZ
 4. PABLO SONNA
 1.5. SANTIAGO RODRÍGUEZ GLEZ.

El sistema de radar meteorológico, como herramienta, es uno de los instrumentos de pronóstico a tiempo real (*nowcasting*)¹ más modernos y utilizados a nivel mundial. El mismo, en su funcionamiento típico, permite caracterizar las formaciones de tormentas considerando su forma, velocidad, intensidad, tipo de meteoro y severidad.

En Argentina, estamos familiarizados con el impacto que las tormentas severas tienen año tras año. En especial aquellas que ocurren dentro de la región central, desde el norte de San Luis hacia el sur de Santa Fe, pasando por el centro y sur de Córdoba. Las consecuencias de estas van desde pérdidas materiales millonarias (en viviendas, rutas anegadas, cosechas, etc.) hasta pérdidas de vidas.

Para poder adelantarse a estas circunstancias catastróficas y mitigar, en la mayor medida posible, las consecuencias de las mismas, se inició en 2009 el proyecto “Sis-

tema Nacional de Radares Meteorológicos (SiNaRaMe)”. Este proyecto tiene por objetivo principal la radarización completa del territorio argentino e implica, no solo integrar los radares pre-existentes en el País para que brinden servicio de manera coordinada sino también el desarrollo e incorporación a la red de 12 nuevos radares meteorológicos (Doppler de doble polarización simultánea en Banda C) de fabricación nacional: los Radares Meteorológicos Argentinos (RMA) desarrollados por la empresa INVAP SE.

Para esta ambiciosa meta, el Estado nacional contrató por iniciativa del COHIFE a través de la ex Subsecretaría de Recursos Hídricos a INVAP SE para llevar a cabo una parte importante de la implementación completa del plan. La razón de dicha elección se fundó tanto en la infraestructura que INVAP SE posee, como también la experiencia capitalizada por la empresa en

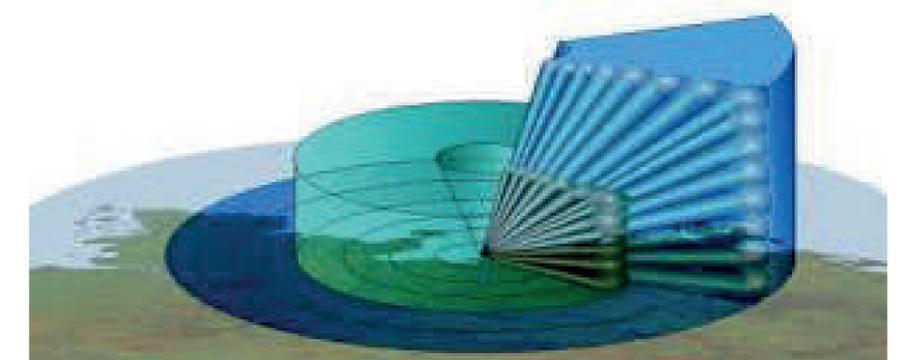


Figura 1. Ilustración de pulsos, barridos y volúmenes emitidos por un radar dentro de una estrategia de escaneo.

* 1: Grupo Radar Córdoba, FCEfyN/ FAMAf UNC y OMHMCA del MAAYSPCba.
 2: SiNaRaMe y Subsecretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Min. del Interior.
 3: IDIT, UNC CONICET.
 4: IUA, UNDEF, Min. de Defensa.
 5: CIA, FAA, Min. de Defensa.

¹Pronóstico de muy corto plazo.

el desarrollo de otros radares de similar tecnología aunque orientados a sensores radar en satélites y a la navegación y vigilancia aérea.

Desde el nacimiento de SiNaRaMe a la fecha, el País ya cuenta con 8 RMA instalados y 7 radares pre-existentes (pertenecientes al INTA, SMN y DACC de Mendoza) funcionando en red. El resto de los 4 RMA, ya fabricados, está a la espera de su pronto emplazamiento en ciertas locaciones ya designadas.

El principio de funcionamiento del radar meteorológico, básicamente, consiste en la transmisión de pulsos de onda de radio al espacio circundante y en el procesamiento de la señal de respuesta a esta energía, emitida por las partículas (hidrometeoros) en suspensión.

Una antena transmisora/receptora parabólica, de unos 4.5m de diámetro, es capaz de concentrar un haz de iluminación de alrededor de 1 grado de apertura. Este haz es el encargado de dirigir la energía de radiofrecuencia transmitida para ir sensando el espacio aéreo de a "pinceladas". Por cada haz de iluminación, un tren de pulsos de radiofrecuencia es transmitido a intervalos constantes de tiempo, dando origen a la frecuencia de repetición de pulsos (PRF). En función de la PRF elegida y de la duración de los pulsos de radiofrecuencia transmitidos, serán las capacidades del sistema de radar meteorológico para resolver el espacio (celda de resolución), velocidad doppler y rango máximo de cobertura². La magnitud típica de medición de este sistema es el factor de reflectividad (Z) e indica la capacidad de retrodispersión de los hidrometeoros en suspensión. Esta magnitud es proporcional al equivalente en cantidad de partículas de agua líquida por unidad de volumen disponibles y al diámetro medio, a la sexta potencia, de dichas particu-

las. Se mide en mm⁶/m³ pero normalmente se expresa en decibeles (dBZ).

Para que un instrumento tan complejo como el sistema de radar meteorológico provea mediciones confiables, se necesita que todos los subsistemas que lo componen estén correctamente caracterizados o, lo que es equivalente, calibrados. Adicionalmente, es necesario contar con la menor contaminación del espectro radioeléctrico posible (interferencias). Desarrollar y mantener una red de radares calibrada y robusta es un proceso largo y complejo que, típicamente en países desarrollados, lleva alrededor de una década. La razón de estos plazos es que las condiciones atmosféricas y, por lo tanto los parámetros de medición del radar, son dependientes de la ubicación, la orografía y la estacionalidad de la zona de medición. A su vez, a medida que se va tomando conocimiento sobre el sistema de radar como herramienta se van puliendo las asperezas encontradas y mejorando, así, el instrumento.

Interferencias de Radar

Antes de explicar en qué consiste la calibración de un sistema

de radar meteorológico debe entenderse cuán importante es que el Sistema de Radar opere en un espectro radioeléctrico lo más limpio posible, libre de fuentes de interferencia. Las imágenes a continuación dan una idea de cómo las interferencias (en su mayoría debidas a transmisores Wi-Fi) afectan a las mediciones del RMA-1 localizado en la Cdad. Universitaria de Córdoba. A la izquierda se muestra cómo debería verse una imagen de radar limpia y, a la derecha, cómo se ve el mismo fenómeno contaminado por interferencias.

No existe una única forma de combatir interferencias sino más bien un conjunto de actividades a realizarse de manera paralela. En primer lugar, el sistema de radar debe contar con mecanismos para mitigar estos efectos, implementando receptores de banda lo más angosta posible y un adecuado rechazo de frecuencia imagen. A su vez, la selección de ancho de pulso y PRF, en el funcionamiento del sistema de radar, debe ser tal que optimice la *performance* de los algoritmos para remoción de ruido con los que cuenta el mismo. Adicionalmente, una serie de campañas de medición en campo debie-

ron ser realizadas, en la periferia del sistema de radar, para asegurarse de que no existen transmisores perjudiciales cercanos y, ante la detección de alguno, solicitar al responsable se lo reconfigure para otra frecuencia de operación. Para esto suele utilizarse, en conjunto, un analizador de espectros y una antena direccional que permita identificar fehacientemente el origen de las señales interferentes. El GRC desarrolló un filtro numérico basado en un filtro de Kalman que discierne entre el ruido de las interferencias y el eco de los hidrometeoros mediante la física del proceso, la cual es extraída de los 3 momentos del espectro más la polarimetría, (Fig. 2).

Por último, se consideran sumamente importantes todos aquellos esfuerzos de concientización de la población acerca del espacio de frecuencias que ocupan los sistemas de radar meteorológicos y la importancia de, entre todos, mantenerlo limpio. Al fin y al cabo, se trata de una moderna herramienta para el beneficio de la sociedad a nivel general.

Para llegar lo antes posible a mediciones de radar confiables se inició, a inicios de 2017, el proceso de calibración del primer RMA fabricado y emplazado en el País: el RMA-1 de Córdoba. Este proceso consta, básicamente, de tres instancias fundamentales:

- Calibración de apuntamiento: correcta medición de posición para los blancos detectados.
- Calibración electrónica: correspondencia entre factor de reflectividad (Z) medido y el real, dentro de ciertos niveles de tolerancia.
- Calibración hidrológica: determinación de relación entre las mediciones del radar y la tasa de lluvia (R) observada.

Calibración de Apuntamiento

Durante el montaje, se efectúa el ajuste inicial del norte del radar respecto al norte magnético utilizando una brújula o una plomada. Cuando el sistema ya está en funcionamiento, se genera una imagen georreferenciada de la topografía circundante a partir de los reflejos en el terreno de los pulsos transmitidos por el radar.

Utilizando herramientas GIS esa imagen se superpone a imágenes satelitales y se rota hasta ajustar la posición de puntos notables, por ejemplo: picos montañosos, costas o edificaciones como torres, puentes, autopistas o canales de riego. De esa manera se ajusta el norte del radar respecto del norte geográfico.

Finalmente, se calibra el apuntamiento radiométrico con la precisión deseada mediante ensayos apuntando la antena hacia el sol.

Las coordenadas de la medición en que se consigue mejor alineación entre el haz principal de la antena y el centro del disco solar se contrastan con la posición calculada para el sol en función a la ubicación del radar y el momento en que se efectuó el ensayo.

Las maniobras de apuntamiento y demás cálculos necesarios para este ensayo los efectúa el radar de manera automatizada, mediante algoritmos desarrollados por INVAP SE desarrollados para la calibración solar específicamente.

Calibración Electrónica

Entre las diversas técnicas y procedimientos actualmente conocidos para la calibración electrónica de radares meteorológicos se optó, para el RMA-1, por la calibración basada en blancos fijos conocidos.

El diseño general de un proceso de calibración utilizando esta técnica implica la realización de una serie de procedimientos preparatorios, previas a la experimentación en sí. Los mismos pueden ser re-

sumidas en:

- Elección y preparación del blanco de calibración.
- Elección y preparación del medio de sustentación.
- Análisis del Mapa de Clutter del Radar.
- Selección del Sitio de Prueba.
- Diagramación General de la Prueba.
- Diseño de la Estrategia de Operación.
- Procesamiento de los Datos.

La calibración electrónica del radar puede llevarse a cabo mediante la utilización de un blanco de prueba cuya superficie de retrodispersión sea conocida. Para el caso de la calibración del RMA-1, se utilizó una esfera de telgopor de 46 cm de diámetro recubierta con una delgada lámina de aluminio. Adicionalmente, es necesario que el blanco de prueba sea suspendido en el aire por un cierto tiempo, a una determinada altura y distancia del radar. Para ello, existen distintos medios de elevación factibles de ser utilizados; cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas. Una alternativa consiste en emplear un sistema de globos cautivos, inflados con gases livianos. La otra implica elevar la carga mediante vehículos aéreos no tripulados (*DRONES*).

En la prueba inicial efectuada para el RMA-1 se optó por la utilización del primer sistema mencionado. A tal fin se inflaron dos globos especiales para radiosondeo con 1,8m³ de Helio. En las siguientes imágenes se muestra tanto la esfera reflectante como los globos de sustentación utilizados.

El proceso de selección del sitio para la prueba implica un análisis previo del mapa de clutter (ecos de terreno) de las zonas circundantes al radar. La decisión final sobre el lugar a utilizar deberá ponderar adicionalmente factores como: ac-

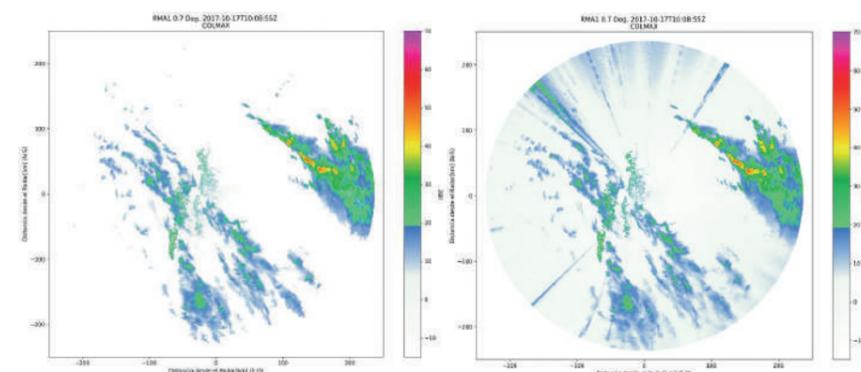


Figura 2. A la izquierda se muestra un gráfico PPI (Indicador de posición en el plano) del RMA1 en cuyo procesamiento se incluyó un filtro de Interferencias y ruido, a la derecha se muestra el mismo PPI sin filtrar. El gráfico PPI es la forma típica de representación del espacio circundante al radar, en coordenadas polares, para un ángulo de elevación fijo.

²Valores típicos para estos parámetros son 300m, 50 m/s y 240 km respectivamente.

cesibilidad, seguridad, altitud del terreno, edificaciones elevadas en las proximidades, arboleda u obstáculos en altura, entre otros. En el caso del RMA1 se eligió una zona ubicada en el Parque Sarmiento de la Ciudad de Córdoba. Dicho sitio está ubicado a 2300 metros del radar en línea recta y 418m snm. Para dicho punto se tiene un registro de clutter de terreno mínimo, coincidente con la depresión de la zona respecto a la altura de la antena del RMA1 (484m).

El diseño general de la prueba debe contemplar todos los factores hasta aquí mencionados, se debe planificar el lugar y altura exacta en donde ubicar el blanco, las velocidades de rotación y elevaciones de la antena del radar, el ancho, número y frecuencia de repetición de pulsos del radar y se deben realizar los cálculos teóricos esperados del Factor de Reflectividad Equivalente en función de las dimensiones del blanco y distancia al radar. Al finalizar el proceso de diseño, debe generarse una nueva estrategia de operación del radar acorde a lo planificado para la prueba.

En la Figura 5 se muestra una de las etapas diseñadas para el proceso de calibración del RMA1. A la elevación referenciada, el blanco de prueba se encuentra en la posición central del lóbulo principal de la Antena.

Finalmente, los datos obtenidos en la prueba experimental son procesados y comparados con los datos teóricos esperados.

Los datos obtenidos en el procedimiento de calibración del RMA1 aún están bajo análisis pero los resultados preliminares indicarían que dicho instrumento presenta actualmente una desviación mínima respecto a los valores teóricos calculados. Próximamente la prueba de calibración será repetida uti-



Figura 3. Blanco utilizado para la prueba de calibración. La imagen central es una foto tomada en el parque Sarmiento de la Ciudad de Córdoba el día de la prueba experimental. En dicho instante el blanco de calibración se encontraba a 130m de altura. A la derecha se observa la esfera reflectante suspendida por uno de los globos utilizados como medios de elevación.

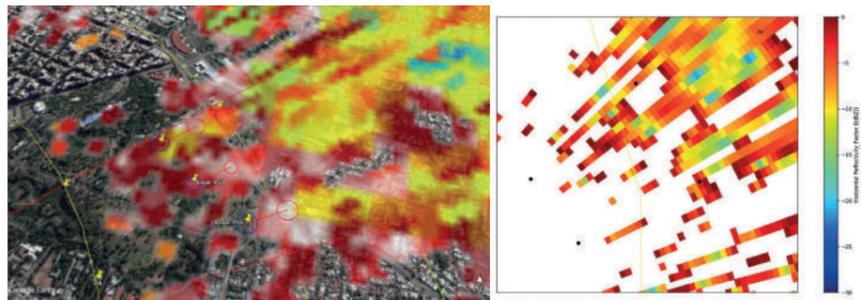


Figura 4. Imagen ampliada del Parque Sarmiento superpuesta a los valores de reflectividad medidos por el RMA1 a una elevación de 0.74°. Sólo se exhiben las celdas con valores comprendidos entre 0 y -30dBZ. A la derecha se muestra un PPI ampliado de la zona del Parque Sarmiento a una elevación de 0.74°. Los puntos negros se corresponden con los Pines 1,2,3 de la imagen georeferenciada. La escala de colores es común para ambas figuras.

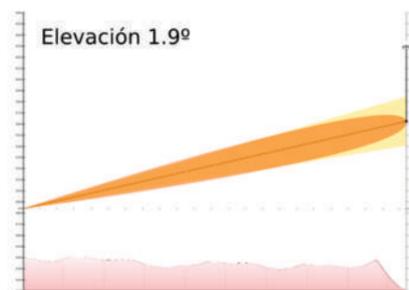


Figura 5. Corte del haz para el ensayo de reflectividad con esfera suspendida por un globo de sondeo meteorológico.

lizando un UAV del Laboratorio de Computación de la FCEFyN. Una vez concluidas las pruebas, y en caso de confirmarse los promisorios resultados preliminares, se deberá realizar el ajuste correspondiente sobre la constante de radar del instrumento. El RMA1 pasará entonces a ser el primer radar me-

teorológico calibrado electrónicamente de Argentina.

Calibración Hidrometeorológica

En la calibración hidrometeorológica del Sistema de Radar se intenta encontrar una caracterización para el factor de reflectividad (o Z) vs tasa de lluvia a nivel de suelo (o R). Tradicionalmente se utiliza, para esta tarea, la conocida relación de Marshall-Palmer³:

$$Z=a R^b$$

En donde los coeficientes a y b son los que se intenta determinar (tomando Z en escala lineal). Esta determinación, aunque parezca

³ Marshall, J.S., Langille, R.C., Palmer, W.M. (1947) "Measurement of Rainfall by Radar" *Journal of Meteorology*, 4, pp. 186-192.

trivial, es por naturaleza bastante compleja ya que son muchas las variables en juego al intentar vincular cuerpos líquidos suspendidos en la atmósfera con aquellos a nivel de suelo. Los errores posibles en esta vinculación están sujetos a las condiciones meteorológicas instantáneas reinantes, las cuales definen la capacidad de evaporación, la energía convectiva disponible y la advección, entre otras magnitudes.

Un paso importante en esta dirección se constituyó a raíz de una importante tormenta ocurrida al sur de la Ciudad de Córdoba, el día 28-03-2017 entre las 01.00hs y las 07.00hs (hora local). Este evento severo tuvo consecuencias de gravedad al sur de la Provincia, en donde se registraron celdas de muy alta precipitación que dieron origen a desbordamientos de rutas, y destrucción parcial de ciertas edificaciones.

Este caso se utilizó para una primera iteración en la calibración hidrológica del RMA-1 ya que, mediante la observación de todas las mediciones registradas y la vinculación de las celdas de resolución del radar y sus proyecciones en tierra, se pudo hacer una serie de inferencias importantes.

Dado que, lamentablemente, para las zona de afectación de esta tormenta se contaba con muy pocas mediciones pluviométricas directas y confiables, para este análisis se utilizaron valores típicos para los coeficientes en (1) para tormentas convectivas, obtenidos por el Servicio Meteorológico de Estados Unidos, perteneciente a la NOAA⁴:

$$a=200$$

$$b=1.6$$

Luego, en función de los valores de Z registrados para una subcuenca de la zona al sur de la Cdad. de Córdoba, se calculó R para

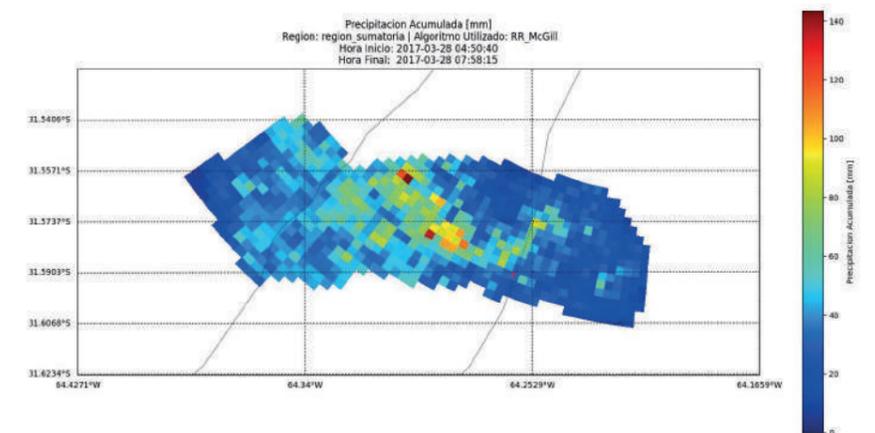


Figura 7. Distribución de la precipitación acumulada en cada una de las celdas de radar para un evento medido al sur de la Cdad. de Córdoba.

cada celda de resolución del radar y se estimó un promedio de lluvia acumulada, para dicha subcuenca, en el lapso de aproximadamente 3 horas que duró la tormenta.

De dicho análisis se identificó una serie de focos de alta R que permitieron explicar algunas de las consecuencias severas de la tormenta dado que, en algunos puntos de esta subcuenca analizada, precipitación acumulada de más de 120 mm en un lapso reducido de tiempo fue el principal responsable de los desbordes e inundaciones observadas. Adicionalmente, se generó valioso conocimiento acerca de cómo cuantificar la cantidad de agua precipitada en función del rango al que se encuentre la tormenta y, también, sobre cómo impactan los distintos ángulos de elevación del radar para la medición de las mismas en función de la elevación de terreno subyacente.

Agradecimientos

Al Sistema Nacional de Radares Meteorológicos SiNaRaMe, al INVAP SE y al Servicio Meteorológico Nacional.

⁴ <https://www.weather.gov/ohrfc/ZRRrelationships>

Calibración Hidrológica del Radar Meteorológico Argentino (RMA1)

- *1. GASTÓN PETROLI
RICARDO INGARAMO
CELINA FURBATO
ANDRÉS RODRIGUEZ
ALBERTO VILLA URÍA
- 2. JUAN CARLOS BERTONI
SERGIO MENAJOVSKY
LETICIA VICARIO
CLARITA DASSO
- 3. RAÚL COMES
GIORGIO CARANTI
- 4. IGNACIO MONTAMAT
JORGE SAFFE
- 2. 4. AGUSTÍN MARTINA
SANTIAGO RODRÍGUEZ GLEZ.
- 4. 5. DENIS POFFO

Introducción

La determinación de la distribución espacial y temporal de la precipitación con un elevado nivel de precisión es un requerimiento clave para numerosas aplicaciones, en particular la modelación hidrológica para el análisis y prevención de eventos extremos en cuencas urbanas y rurales.

Los registros puntuales de lluvias mediante pluviómetros y pluviógrafos, en redes de escasa densidad e irregular distribución, no reflejan adecuadamente la variabilidad espacial de la lluvia. Este tipo de sensores, miden la precipitación a nivel de superficie con bastante precisión (Calheiros y Zawadski, 1986) y en forma puntual, pues el dato es tomado en forma directa (Arkin y Meisner, 1986), pero no permiten obtener un campo continuo de medidas que cubran todo un territorio (German et al, 2006). Los radares meteorológicos en cambio ofrecen la capacidad de generar información espacial detallada, con la posibilidad adicional de integrarla temporalmente. Permiten además cubrir grandes áreas y sus datos son de rápido acceso para aplicaciones hidrológicas a tiempo real. Las ventajas de obtener datos de precipitación mediante radar son múltiples (Collier, 1986), como está ampliamente documentado en la literatura específica.

Córdoba dispone del primer radar meteorológico de origen nacional, denominado RMA1, equipado con tecnología Doppler, en Banda C de

doble polarización simultánea, con un alcance de 480 km en modo vigilancia, 240 Km en Doppler y 120 Km en alta resolución. El radar está ubicado en un predio de la Universidad Nacional de Córdoba desde el año 2015.

En la actualidad se está trabajando en la calibración hidrológica del radar, mediante la integración de los datos medidos por el radar (reflectividad Z) con datos de lluvia registrados en superficie a través de una red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), operadas por distintos organismos provinciales y nacionales, públicos y privados de la Provincia de Córdoba (Ingaramo et al., 2017).

Calibración hidrológica

Para estimar la precipitación en base a la reflectividad medida por el radar, se usa la conocida relación de Marshall y Palmer (Marshall et al, 1947):

$$Z = aR^b$$

La metodología de trabajo propuesta contempla la definición de nueve celdas alrededor de cada estación, a la altura del haz considerado, siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 1.

En la Figura 2 se muestran como ejemplo los datos de reflectividad medidos en las nueve celdas consideradas alrededor de la Estación ubicada en la localidad de Ascochinga, para el evento ocurrido el 8 de marzo de 2016 entre las 1:30 UTC y las 4:20 UTC.

Para establecer la relación en-

tre las variables Reflectividad (Z) e Intensidad de Precipitación (R) contemplando un desfase temporal, se considera que las variables están correlacionadas de la siguiente manera: $\rho[Z_i(t), R(t+\tau)]$. De esta manera se busca el desfase que produce la mejor correlación, valor que está relacionado con la física del fenómeno, en particular el tiempo que demora el volumen de agua medido en la nube en llegar a la superficie.

A su vez se busca la mejor correlación entre la reflectividad medida en las nueve celdas y la precipitación medida en superficie, donde el desfase espacial está relacionado con el movimiento de la tormenta.

De esta manera se llega a establecer la mejor relación Z-R de Marshall y Palmer, donde los coeficientes a y b son estimados a partir de regresión lineal entre la reflectividad del radar y las mediciones de intensidad de precipitación.

La metodología descrita permite analizar un gran número de estaciones automáticas emplazadas en el área de cobertura del RMA1, y eventos de mayor duración al considerado en el ejemplo.

La calibración hidrológica permitirá disponer de una valiosa herramienta para contar con datos más precisos de precipitación y posibilitar la elaboración de alertas confiables.

Red Telemétrica SINARAME

El dato fundamental para la calibración hidrológica del radar es la precipitación, en este caso medida en superficie a través de una red de estaciones meteorológicas automáticas. Estas estaciones permiten medir y registrar diversas variables meteorológicas sin requerir la presencia de un observa-

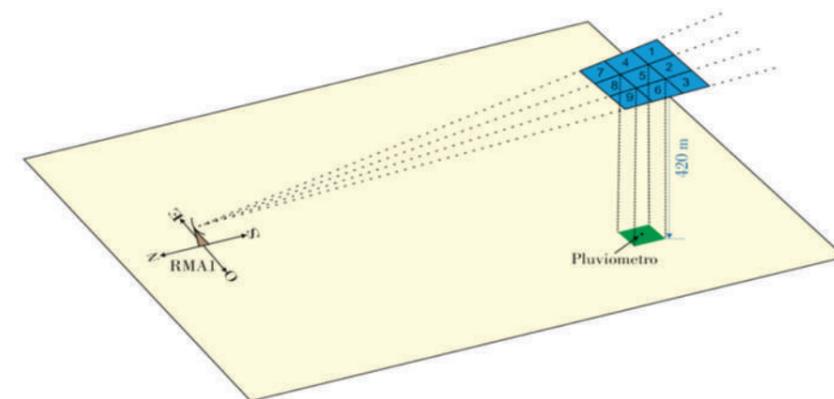


Figura 1. Esquema del emplazamiento relativo de los instrumentos de observación de la precipitación y de las celdas de F.

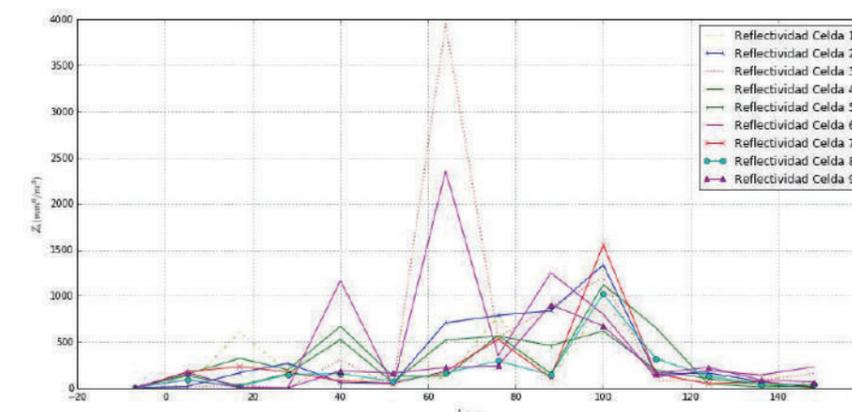


Figura 2. Valores de reflectividades de RMA1 en las 9 celdas asociadas a la estación meteorológica Ascochinga, para una duración de 160 minutos.

dor *in situ* que reporte periódicamente los datos.

Junto con el radar RMA1 se han instalado 5 Estaciones Meteorológicas Automáticas. Las estaciones cuentan con sensores de temperatura, humedad, presión, viento, radiación y obviamente precipitación.

La selección de los sitios para la instalación de las estaciones fue definida a partir del análisis de numerosos factores, entre ellos la proximidad al radar, la infraestructura de comunicaciones y seguridad disponibles, la altitud del sitio y la necesidad de cubrir áreas sin mediciones. Los sitios finalmente elegidos fueron el Observatorio Astrofísico de la Universidad Na-

cional de Córdoba en Bosque Alegre (Figura 3), el Centro espacial Teófilo Tabanera de la CONAE en Falda del Cañete, el Observatorio del Servicio Meteorológico Nacional de la localidad de Pilar, el Aeropuerto de Villa María y la Sede de Guardaparques de la Reserva Natural Provincial Mar Chiquita en Miramar. Estas estaciones comenzaron a transmitir datos en Octubre de 2017.

Una de las estaciones (la de la CONAE) está equipada con un Disdrómetro Óptico, mientras que la Provincia de Córdoba ha adquirido otro más que será instalado a la brevedad.

El disdrómetro es modelo OTT-Parsivel2 (Figura 4), que

emplea un sensor óptico por láser para medir la precipitación. La unidad de emisión del sensor genera un rayo de luz liso y horizontal que la unidad de recepción transforma en una señal eléctrica. Funciona conforme al principio de extinción y mide las partículas de las precipitaciones por medio de la sombra que provocan cuando atraviesan una banda láser en algún lugar del margen de medición (54 cm²). El grado de sombra de la luz es la medida del tamaño de la partícula y la velocidad de caída se deduce de la duración de la señal de la extinción (Löffler-Mang et al. 1999).

El disdrómetro registra el tamaño y la velocidad de caída de cada hidrometeoro y los clasifica dentro de una diversidad de 32 clases, que conduce a una distribución de densidad almacenada como una matriz de dimensión 32 × 32 (Licznar y Krajewski, 2016). Mediante el equivalente integral del volumen de todos los tamaños de partículas clasificados por unidad de tiempo, el aparato calcula la cantidad y la intensidad de la precipitación caída, teniendo asimismo en cuenta ciertos aspectos físicos como los modelos de gotas y las densidades diferenciadas de las precipitaciones (Poffo et al., 2017).

Empleo del disdrómetro

Debido a todas las características mencionadas anteriormente, el disdrómetro es un instrumento fundamental para facilitar la calibración hidrológica del radar.

La medición de la precipitación con radar se basa en la cantidad de energía que retorna al radar reflejada por los hidrometeoros sobre los cuales incidió la radiación emitida a través de la antena. Cuando el pulso de energía choca con un blanco, una parte de la energía in-



Figura 3. Estación Meteorológica-Observatorio Astrofísico de Bosque Alegre.



Figura 4. Disdrómetro OTT-Parsivel2.

cidente es reflejada de vuelta siendo recibida por la antena, donde es detectada y de inmediato enviada a procesamiento (Pardo Gómez y Martínez Rodríguez, 2010). Esta energía recibida es representada por, entre otros parámetros del radar, el denominado Factor de Reflectividad Horizontal (Zh).

Para la lluvia, la interacción de la onda electromagnética emitida por el radar con gotas de agua esféricas, se establece la proporcionalidad: $\sigma \propto D^6$, donde D es el diámetro de las gotas de lluvia en mm y σ representa la sección transversal del rayo reflejado que retorna al radar.

El factor de reflectividad horizontal Zh en mm⁶/m³, puede escribirse como:

$$Z_h = \int_0^{D_{max}} D^6 * N(D) * |f_h(D, \epsilon_r)|^2 dD$$

Donde, D es el diámetro de la gota y N(D) es la distribución de tamaño de gota, es decir, la concentración del número de gotas de lluvia con el diámetro D en un volumen dado de

aire. Debido a los complejos procesos involucrados en la formación de la precipitación, la función N(D) es muy variable y no puede ser especificada de forma simple.

A diferencia de las esferas, para las cuales el factor es puramente geométrico, para las partículas no esféricas, Zh combina geometría con propiedades dieléctricas a través del factor fh (Poffo et al., 2017).

La intensidad de precipitación R (mm/h), puede ser expresada en términos de N(D) y la velocidad terminal de caída la gota v (D), generalmente expresada con $v = KD_c$, como el flujo descendente de agua por unidad de superficie:

$$R = 6\pi * 10^{-4} \int_0^{D_{max}} D^3 * v(D) * N(D) dD$$

Se puede observar una gran dependencia del tamaño de las gotas de lluvias, tanto del factor de reflectividad como la intensidad de precipitación.

El desarrollo de instrumentos capaces de hacer el análisis automático de los tamaños de las gotas de lluvia, en particular el espectrómetro llamado disdrómetro, hizo posible el análisis de un gran número de distribuciones de gotas en varios lugares del mundo. A través de numerosos estudios teóricos y experimentales, se verificó que cuando son ejecutadas medias en un gran número de distribuciones en un minuto, las fluctuaciones causadas por los procesos físicos que varían aleatoriamente en las distribuciones, son eliminadas. La distribución media del tamaño de gotas obtenida refleja solamente los factores físicos que existen persistentemente sobre la lluvia que cae (Pardo Gómez y Martínez Rodríguez, 2010).

En este contexto el disdrómetro empleado para medir gotas de lluvia consiste básicamente de un

transductor, un procesador y un sistema de registro de esos datos. El transductor transforma el momento mecánico del impacto de una gota en un pulso eléctrico. La amplitud del pulso es directamente proporcional al momento mecánico transmitido. La señal así obtenida es procesada suministrando el espectro de las gotas. A partir de este espectro es posible determinar tanto la reflectividad equivalente del radar como la intensidad de lluvia. Seed et. al., (1996) afirman que la calibración hecha con el disdrómetro suministra resultados más consistentes y argumentan que una de las causas sea el hecho de que tanto el disdrómetro como el radar presentan resultados directamente relacionados con el diámetro de las partículas (Pardo Gómez y Martínez Rodríguez, 2010).

Así, a partir de un conjunto de datos de distribución de tamaño de gotas colectadas en un determinado intervalo de tiempo, se puede disponer de la relación Z-R correspondiente a esa lluvia.

Esas relaciones han sido determinadas para varios lugares bajo diferentes condiciones de los sistemas precipitantes y se ha demostrado que son dependientes de la geografía y del tipo de precipitación. De particular relevancia se pueden mencionar las ecuaciones Z-R encontradas por Marshall y Palmer (1948) para lluvias de naturaleza estratiforme en Canadá, clásicos en la meteorología radar.

Conclusiones

La incorporación de toda la tecnología descrita permite un avance importante en el proceso de calibración hidrológica del RMA1 y refuerza el monitoreo hidrometeorológico de la región.

Además de satisfacer la necesidad de contar con información

pluviométrica en la Provincia de Córdoba, las estaciones meteorológicas instaladas junto con el RMA1, debido a su alta tecnología proporcionan una cuantificación confiable de la precipitación líquida sobre la superficie terrestre. Por otro lado, el disdrómetro provee una información valiosa para inferir la relación entre las mediciones del radar y la lámina de agua caída en la superficie, puesto que registra el tamaño de las gotas de lluvia precipitada, factor altamente influyente en las mediciones de reflectividad del radar.

La experiencia internacional indica que la calibración hidrológica de un radar meteorológico es un proceso prolongado, de varios años de duración, a lo largo de los cuales se deben monitorear diferentes tipos de eventos que varían en duración, intensidad y características físicas del fenómeno. Lo expresado en este artículo corresponde a la etapa inicial de este proceso, que se desarrolla de manera ininterrumpida en el LH-CETA para el OMHM-CBA.

Agradecimientos

Al Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, al INVAP Sociedad del Estado y al SiNaRaMe.

Referencias bibliográficas

Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Cioccale, M., Comes, R., Furbatto, C., Ingaramo, R., Martina, A., Menajovsky, S., Poffo, D., Rodríguez, A., Saffe, J., Smrekar, M., Vicario, L. y Villa Uría, A. (2015). Puesta en marcha del primer Radar Meteorológico Argentino RMA1 en la Universidad Nacional de Córdoba. *XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2015*.

Bertoni, J.C., Caranti, G., Comes, R., Furbatto, C., Ingaramo, R., Martina, A., Montamat, I., Menajovsky, S., Petroli, G., Rodríguez, A. y Saffe, J. (2017) Estimación de Precipitación a partir de datos del Radar Meteorológico RMA1-Córdoba, Argentina. *XXV Congreso Nacional del Agua - CONAGUA 2017*. Córdoba, Argentina.

Calheiros, R.V. y Zawadzki, I. (1986). Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 26. pp. 118-132.

Collier, C. (1986) Accuracy of rainfall estimates by radar, Part I: Calibration by telemetering rain gauges. *Journal of Hydrology*. 83. pp 207-223.

Comes, R., Ingaramo, R., Poffo, D., Furbatto, C., Saffe, J., Vicario, L., Dasso, C., Rodríguez, A., Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Martina, A., Menajovsky, S., Montamat, I., Rico, A., Rodríguez González, S., Serra, J. y Villa Uría, A. (2016) Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Perú.

Germann, U., Galli, G., Boscacci, M. and Bollinger, M. (2006) Radar precipitation measurement in a mountainous region. *QJR Meteorol. Soc.* 132. pp. 1669-1692.

Gunn, R. and Kinzer, D.G. (1949) The Terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*. 6. pp. 243-248.

Ingaramo, R., Petroli, G., Mon-

tamat, I., Martina, A., Díaz, E., Menajovsky, S., Montamat, I., Lighezzolo, A., Pagot, M. (2017) Integración de redes de monitoreo hidrometeorológico en la Provincia de Córdoba. *XXVI Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2017)*, Córdoba, Córdoba, Argentina.

Löffler-Mang, M. and Jürg, J. (1999). An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 17.pp. 130-139.

Licznar, P. and Krajewski, W.F. (2016) Precipitation Type Specific Radar Reflectivity-rain Rate Relationships for Warsaw, Poland. *Acta Geophysic*. 64 (5).pp. 1840-1857.

Marshall, J.S., Langille, R.C. and Palmer, W.M. (1947). Measurement of Rainfall by Radar. *Journal of Meteorology*. 4. pp. 186-192.

Marshall, J.S. and Palmer W.M. (1948). Shorter Contributions. *Journal of Meteorology*. 5. pp. 165-166.

Pardo Gómez, R., Martínez Rodríguez, J. (2010). El empleo del radar meteorológico en los sistemas de alerta temprana para la predicción de inundaciones. Centro de investigaciones hidráulicas. Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. ISBN 978 – 959 – 261 – 322 – 5.

Poffo, D., Saffe, J., Caranti, G., Comes, R. and Rodríguez, A. (2017). Comparison Between Two Attenuation Models and Precipitation Evaluation With Ground Vali-

ation. *Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. 10 (2). pp. 417-427.

Extensión académica y de investigación

Regata de medición de caudales de flujo en Córdoba, Argentina

RESPONSABLES

CARLOS MARCELO GARCÍA
KEVIN OBERG
RICARDO SZUPIANY
ANTOINE PATALANO
JOSÉ MANUEL DÍAZ LOZADA
ANA INÉS HEREDIA LIGORRIA

Instituciones organizadoras

- Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (CETA-FCEFYN-UNC).
- Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos (CIEGRI) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral (CIEGRI-FICH-UNL).
- Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (MAAySPCba).
- Colaboran en la organización: Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua (CIRSA-INA).
- Oficina de Agua Superficial del Servicio Geológico (OSW- USGS) de los Estados Unidos. Supervisa las mediciones: Kevin Oberg, Hidrólogo

Desde principios de siglo, paulatinamente se han implementado nuevas técnicas de medición de caudales de flujo en ríos en Argentina. Sin embargo, existen áreas de vacancia tecnológica relacionadas al desarrollo de protocolos de medición estandarizados por todas las instituciones y a los métodos de estimación de incertidumbre de los valores determinados experimentalmente. Para superar esta problemática, en los últimos años se han desarrollado en distintos países regatas de medición de caudales de flujo, las cuales consisten en que diferentes instituciones, con distintos instrumentos, técnicas y operadores, se concentren en un lugar, midiendo bajo las mismas condiciones de flujo, con el objeto de: 1) Capacitar técnicos y profesionales, 2) Generar y forta-

lecer los vínculos interinstitucionales entre los principales organismos que están dedicados a la medición de caudales de flujo, 3) verificar que los instrumentos funcionan correctamente y que los operadores midan adecuadamente, de acuerdo con los demás participantes. En la actividad no se realizó ninguna calibración, ni verificación o validación de conformidad real, pero muchos participantes están felices de pasar la prueba para defender su instrumentación y procedimientos.

Las mediciones se realizaron el 5 de diciembre de 2017 en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita), aguas abajo del Puente Alberdi en la ciudad de Villa María, provincia de Córdoba, Argentina.



Instituciones participantes

- Universidad Nacional de Córdoba (UNC) a través del Centro de Estudios y Tecnología del Agua y el Laboratorio de Hidráulica de la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (CETA-LH- FCEFYN-UNC).
- Universidad Nacional del Litoral a través del Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (CIEGRI-FICH-UNL).
- Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos del Gobierno de la Provincia de Córdoba (MAAySPCba).
- Instituto Nacional del Agua (Centro de la Región Semiárida – CIRSA),
- Instituto Nacional del Agua (Centro de Ezeiza).
- Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (SRH),
- Evaluación de Recursos Hídricos S.A (EVARSA).
- Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) «Dr. Eduardo Jorge Usunoff», centro de investigación y servicios de triple dependencia (Comisión de Investigaciones Científica de la Prov. de Bs. As. -CIC-, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Bs. As. -UNCPBA- y Municipalidad de Azul).
- Instituto de Clima y Agua, CIRN, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)-Castelar.
- Aguas Cordobesas S.A.
- Además participaron de esta jornada alrededor de 40 estudiantes de grado y posgrado de la FCEFYN-UNC.

Articulación con diferentes niveles educativos

RESPONSABLES

CARLOS MARCELO GARCÍA
JOSÉ MANUEL DÍAZ LOZADA
JAVIER ÁLVAREZ
BIBILONI
PATRICIA FERRARIS
MAGDALENA BARAQUET
FEDERICO FLORES NIETO
ANA INÉS HEREDIA
ANDRÈS LIGORRIA

Proyecto educativo: “Adopto un cuerpo de agua como mascota”

En el proyecto educativo denominado “Adopto un cuerpo de agua como mi mascota” se trabaja sobre la hipótesis que es posible mejorar la apariencia y la calidad del agua en distintos cuerpos de agua si lo adoptamos responsablemente, reconociendo y cuidando su cuenca de aporte, monitoreando la cantidad y calidad del agua presente, manteniendo limpias sus zonas de influencia, reeducando y realizando acciones de concientización dirigidas a la comunidad educativa, a los vecinos del lugar y a las autoridades municipales y provinciales.

Este proyecto, que continúa desarrollándose, se inició en el año 2013 entre investigadores del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFYN – UNC) y docentes del área de Ciencias Naturales del segundo ciclo del Nivel Primario de un instituto público de gestión privada: el Instituto Dante Alighieri (IDA) de Villa Carlos Paz. El proyecto, que promueve el cuidado de los recursos naturales, despertó el interés de alumnos que en el año 2013 cursaban el quinto grado A y B del nivel primario de ese instituto. Este proyecto luego contó con el apoyo de distintas instituciones, como el caso del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de

Córdoba; la legislatura de la Provincia de Córdoba; la Municipalidad, el Concejo Deliberante, y el Consejo de Planificación Urbano Ambiental de la mencionada ciudad serrana; la Cooperativa Integral de Villa Carlos Paz (COOPI); Asociación de Amigos del Río San Antonio (ADARSA), entre otros.

El cuerpo de agua adoptado por los alumnos de nivel primario del Instituto Dante Alighieri y la Escuela Isla de los Estados es el arroyo que escurre frente a ambas escuelas: El arroyo Huahuas Mayún (Arroyo de los niños) nombrado de esta forma por la legislatura de la Provincia de Córdoba a través de un requerimiento de los alumnos de ambas instituciones educativas avalado por el Concejo Deliberante de la ciudad de Villa Carlos Paz.

Por otra parte los alumnos del Instituto Provincial de Enseñanza Media IPEM 316 “Eva Duarte de Perón” (nivel secundario) y la Escuela Intendente Grimberg (nivel primario) están trabajando en conjunto adoptado un humedal colindante con ambos establecimientos educativos.

Otras Instituciones participantes

- Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba (MAAySP);
- Instituto Dante Alighieri (IDA) de Villa Carlos Paz.
- Instituto Provincial de Enseñanza Media IPEM 316 “Eva Duarte de Perón” Villa Carlos Paz.
- Escuela Intendente Grimberg (nivel primario).

RESPONSABLES

CARLOS MARCELO GARCÍA
JOSÉ MANUEL DÍAZ LOZADA
CARLOS GASTÓN CATALINI
ANA INÉS HEREDIA LIGORRIA

Proyecto educativo MATTEO: Monitoreo Automático del Tiempo en Escuelas y Organismos

En el proyecto educativo MATTEO se desarrolla el Monitoreo Automático del Tiempo en Escuelas y Organismos. Este proyecto está dedicado a la memoria del estudiante - científico Matteo Ravagli Cáceres, estudiante del Instituto Dante Alighieri de Villa Carlos Paz. A continuación se describe el título de este proyecto.

Monitoreo: En este proyecto se realizan mediciones sistemáticas detalladas con buena resolución espacial y temporal.

Automático: En este proyecto se utilizan estaciones automáticas de medición. Se prevé además que las estaciones reporten la información a tiempo real en un sitio web.

Tiempo: El tiempo es el estado de la atmósfera en un sitio particular durante un corto período, mientras que el clima se refiere al patrón atmosférico de un sitio durante un período largo, lo suficientemente largo para producir promedios significativos.

Troposfera: La tropósfera es la capa de la atmósfera terrestre que está en contacto con la superficie de la Tierra. Tiene alrededor de 17 km de espesor en el ecuador terrestre y solo 7 km en los polos, y en ella ocurren todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos, como los vientos, la lluvia y la nieve. En este proyecto se prevé el monitoreo de variables que caracterizan el tiempo en la Tropósfera.

Escuelas: El proyecto prevé la instalación de estaciones automáticas en escuelas de gestión pública y gestión privada. Los estudiantes participarán activamente en la instalación y mantenimiento de las es-

taciones y del análisis de los datos

Organismos: Además en este proyecto se prevé instalar estaciones en distintos organismos entre los que se pueden mencionar Universidades, instituciones y organismos a cargo de la gestión de los recursos hídricos, etc.

En la primera etapa de este proyecto, que se viene desarrollando desde el año 2014, se han instalado experimentalmente estaciones automáticas de medición de variables meteorológicas en establecimientos educativos de gestión pública y privada de la ciudad de Villa Carlos Paz (Córdoba) y en el CIRSA-INA. Esta etapa contó con el apoyo institucional de la Municipalidad de Villa Carlos Paz. La segunda y tercera etapa del proyecto que se inicia en el año 2018 prevé extender este proyecto a toda la provincia de Córdoba (para ello se está gestionando el apoyo institucional del Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de esta provincia) y en otras provincias. Entre las provincias en las cuales se han iniciado gestiones para apoyos institucionales se pueden mencionar a Salta y Santiago del Estero.

Otras Instituciones participantes

- Siguientes establecimientos educativos de distintos niveles educativos de la ciudad de Villa Carlos Paz: IPEM 190 Dr. Pedro Carande Carro, IPEM 316 “Eva Duarte de Perón” del barrio Colinas, Escuela Carlos Nicandro Paz, Escuela José de San Martín, Instituto Industrial Cristo Obrero, Colegio Costa Azul
- Alcance Regional.



Figura 1. Monitoreo de la calidad de agua y limpieza del arroyo Huahuas Mayún realizado por investigadores del CETA - FCEfyN – UNC con alumnos de nivel primario del Instituto Dante Alighieri que dieron origen a este proyecto. Regata en el Suquia, Marzo 2018.



Figura 2. Acto realizado en la Escuela Isla de los Estados donde los alumnos de nivel primario del Instituto Dante Alighieri y la Escuela Isla de los Estados solicitan a los legisladores provinciales el nombramiento del arroyo como Huahuas Mayún después de haber realizado un proceso de votación entre ambas comunidades educativas y vecinos.



Figura 4. Imágenes registradas durante la visita de científicos del CETA-FCEfyN – UNC al Instituto Provincial de Enseñanza Media IPEM 316 "Eva Duarte de Perón" (nivel secundario).

