

Monitoreo y modelado hidrodinámico del embalse San Roque, provincia de Córdoba

Jonathan Muchiut¹, Gabriela Ponce¹, Mayco Dagatti¹, Federico Prystupczuk¹, Reinaldo González Reyes¹, Andrés Rodríguez¹, Mariano Corral¹, Santiago A. Rodríguez², María I. Rodríguez³, Ana L. Ruibal³ y Marcia Ruiz³

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

²Centro de Investigaciones Aplicadas, Fuerza Aérea Argentina

³Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida

Fecha de recepción del manuscrito: 31/08/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 20/03/2019

Fecha de publicación: 29/03/2019

Resumen—La calidad de cuerpos de agua ha recibido una creciente atención en los últimos años y ha llegado a reformular el concepto de escasez que sólo tenía en cuenta la cantidad o volumen del recurso hídrico, junto a los recientes estudios del efecto de la variabilidad climática. Los estudios de los procesos de mezcla, las mediciones pertinentes y la creación de una base de datos para la generación de diversos escenarios resultantes posibles debe ser el apoyo para la futura toma de decisiones por parte de los organismos pertinentes en la temática.

Este trabajo se compone de dos partes. La primera es el diseño, construcción e instalación de un sistema de monitoreo automático (EML) en embalses, comenzando por el San Roque, a partir de la cual se completará la base de datos existente. La segunda corresponde a la validación de dos modelos numéricos modernos a partir de la simulación del evento de floración algal del año 2017. Ambas tareas son el comienzo de un proyecto de mayor escala, que permitirá el diagnóstico de los lagos y embalses de la provincia de Córdoba en tiempo real.

Palabras clave—Calidad del agua, monitoreo, simulación hidroambiental, floración algal, lagos y embalses.

Abstract—The quality of water bodies has received increasing attention in recent years and has come to reformulate the concept of scarcity that only took into account the quantity or volume of water resources, together with recent studies of the effect of climate variability. The studies of the mixing processes, the pertinent measurements and the creation of a database for the generation of various possible resulting scenarios should be the support for the future decision making by the pertinent organisms in the subject.

This work is made up of two parts. The first is the design, construction and installation of an automatic monitoring system (EML) in reservoirs, starting with San Roque, from which the existing database is completed. The second corresponds to the calibration of modern numerical models from the simulation of the algae bloom event of 2017. Both tasks is the beginning of a larger-scale project, which allows the diagnosis of the lakes and reservoirs of the Province of Córdoba in real time.

Keywords—Quality, monitoring, hidro-environmental simulation, algae bloom, lakes and reservoirs.

INTRODUCCIÓN

Una gran cantidad de cuerpos de agua como lagos y reservorios son a diario usados para diversos fines, tales como el desarrollo de actividades recreativas, producción hidroeléctrica de energía, como fuentes de agua para consumo humano, riego e industrial, o como un dispositivo amortiguador de los efectos causados por crecidas. Para cada uno de estos usos, el agua debe ser tenida en cuenta

como un recurso escaso bajo dos enfoques complementarios, como lo son la cantidad y la calidad. Estos dos caracteres hacen a los requisitos con los que los usuarios demandan el recurso según el tipo de actividad que se necesite desarrollar, alcanzando incluso a generar escenarios totalmente adversos. El agua es, bajo este enfoque, un recurso finito que debe ser gestionado sustentablemente de forma tal de garantizar su disponibilidad al medio ambiental en general y a la sociedad en particular.

En cuanto a la calidad de agua, se puede determinar a través de las mediciones de concentraciones de diversas sustancias, sean éstas de origen orgánico como inorgánico. En muchos países los distintos usos que existen se encuentran normados, estableciendo los parámetros de calidad óptimos para sus correctos desarrollos, por lo que la

Dirección de contacto:

Jonathan Muchiut, Av. Filloy s/n Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 4334446 , jonathan_muchiut@hotmail.com

regulación de estas sustancias resulta necesaria y se encuentra reflejado en controles de sus ingresos a la cuenca de aporte. Una vez en el cuerpo de agua, estas sustancias sufren los denominados procesos de mezcla, resultado de la hidrodinámica, meteorología, reacciones físicas, biológicas y químicas.

En particular, los ciclos de nitrógeno y fósforo ofrecen una base de nutrientes disueltos que, junto a propicias condiciones hidrometeorológicas –como temperatura, radiación solar y el fenómeno de estratificación asociado-, generan un escenario sustentable donde se produce el crecimiento de fitoplancton en el cuerpo de agua, que conlleva a la pérdida de calidad estética del reservorio, disminución de la capacidad de transporte en ciertos puntos, inconvenientes en el proceso de potabilización de agua para consumo y el consiguiente incremento potencial de riesgo a la salud de la población expuesta (Thomann y Muller, 1987). Cuando este crecimiento se acentúa rápidamente en el tiempo, se da paso al fenómeno conocido como desarrollo masivo de algas, floración algal o bloom algal, proceso que continúa hasta que el escenario deje de ser el propicio, a partir de donde comienza la muerte de la masa fitoplanctónica y su decantación hacia las profundidades del reservorio. La descomposición de las algas se lleva a cabo mediante el consumo del oxígeno disuelto, generando hipoxia –que de continuar lleva a un estado de anoxia- y con ello la muerte de aquellas especies acuáticas que no cuentan con la resiliencia suficiente para sobrevivir a este proceso. Se dice que un cuerpo de aguas bajo estas condiciones se encuentra eutrofizado (Schindler y Vallentyne, 2008).

Debido a que el único recurso necesario para el crecimiento descontrolado del fitoplancton capaz de ser regulado de forma directa por el hombre es el aporte de nutrientes –sea mediante el tratado eficiente del agua residual, cambios en las prácticas agrícolas, o bien la modificación de algún proceso de mezcla-, es allí donde deben radicar los estudios necesarios para implementar técnicas de remediación que eviten la formación de este escenario, generando medidas de control en las zonas de captación de lagos y reservorios (Klapper, 1991).

El problema de la 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 su biomasa, generando inconvenientes para ciertos usos y usuarios de dicho recurso.

Numerosos embalses de la provincia de Córdoba presentan niveles de eutrofización elevados (Corral, 2006), teniendo como principal causa la falta de saneamiento 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 sin el tratamiento previo necesario. En particular, el Embalse San Roque (ESR), que constituye una de las dos fuentes de suministro de agua potable para la Ciudad de Córdoba, junto al Embalse Los Molinos (ELM), también fuertemente eutrofizado (Bazán, 2002), experimenta problemas de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas como *Microcystis aeruginosa* y *Dolichospermum spp.*, y de los dinoflagelados *Ceratium*

hirundinella y *Ceratium furca*, con concentraciones de clorofila-a que superan los 50 $\mu\text{g L}^{-1}$ durante los meses de verano y otoño (Rodríguez, 2017).

La remediación del estado hipertrófico que presenta este cuerpo de agua comenzó a principios del año 2001, mediante desarrollos llevados a cabo por el *Centre for Water Research*, de la *University of Western Australia* (Imberger, 2004), que ha diseñado estaciones denominadas LDS –*Lake Dyagnostic 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 de agua. 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 floraciones 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 933 l.s^{-1} de aire comprimido en la base del reservorio. La ventaja de contar con una estación LDS es que la misma 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.

En este trabajo se plantean el diseño, construcción, calibración e instalación de una estación de medición análoga a la desarrollada por los australianos (Dagatti, 2017), y resultados de los modelos numéricos Delft 3D (Deltares (2013)) y MIKE 21 (DHI (2016)) que tendrán como finalidad plantear diversos escenarios posibles y la posterior evaluación de las respuestas hidrodinámicas, biológicas y químicas del Embalse San Roque y, como objetivo último, generar información base para la toma de decisiones por parte de organismos competentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Estación de Monitoreo de Lagos (EML)

La Estación de Monitoreo de Lagos –ver **Fig. 1**- 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 datos para ser transmitidos de forma inalámbrica a un servidor remoto donde serán procesados.

La configuración del sistema de anclaje se encuentra constituida por dos anclas ubicadas a cada lado de la boya principal. En cuanto a la señalización de la estación, la misma se encuentra en el centro de un perímetro de 4 m de radio que cuenta con boyas inflables.

Los parámetros físicos que se miden en la superficie del lago son la 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 y disponible en parte para el crecimiento de las algas-.

Por debajo de la superficie se cuenta con una cadena de 18 sensores térmicos, distribuidos de forma regular en 12 m. Asimismo, se cuenta con una sonda multiparamétrica Aqua Troll 400, capaz de medir pH, conductividad, salinidad, sólidos totales disueltos, resistividad, densidad, presión hidrostática, oxígeno disuelto, potencial redox y temperatura.

El desarrollo electrónico del sistema incluye un módulo GPS que suministra con precisión la fecha y hora en que los sensores registran los datos. Toda esta información es almacenada en una memoria no volátil –tarjeta micro SD–, para luego ser transmitidos al servidor de manera inalámbrica mediante un módulo GPRS incluido en la estación, permitiendo utilizar la red de telefonía existente para establecer una conexión por Internet. 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 y permitiendo su acceso desde cualquier terminal conectada a Internet.



Fig. 1: Estación de Monitoreo de Lagos (EML) instalada en el embalse San Roque, frente a la costa de Piscicultura (Febrero 2018).

Modelación Hidrodinámica y de Calidad de Agua: DELFT 3D y MIKE 21.

La modelación del lago San Roque representa una herramienta útil para plantear diversos escenarios y estudiar el comportamiento del cuerpo de agua como respuesta a variadas condicionantes -como ser físicas, químicas, biológicas, meteorológicas, hidrológicas e hidráulicas-, con el objetivo de tomar las decisiones necesarias y ejecutar un plan de acciones orientado a la resolución de la problemática actual del lago concerniente a la calidad del recurso y el sistema de abastecimiento en cuanto a la cantidad del mismo. Dicha modelación corresponde a la primera de un conjunto de cuerpos de agua de Córdoba.

El comportamiento de las variables físico-químico-biológicas del lago es un resultado de la superposición de diversos agentes sobre un comportamiento hidrodinámico característico del cuerpo de agua. La validación del modelo hidrodinámico a través de la simulación de un evento resulta esencial, ya que resulta de la misma una base para la generación de diversos escenarios posibles.

Se utilizan dos softwares reconocidos internacionalmente (DELFT 3D-Deltares[2013] y MIKE-DHI[2016]) para

simular el evento de Bloom Algal del año 2017 con el objetivo de calibrar ambos modelos numéricos. Se estudian los patrones de flujo y los campos de velocidades asociados, optimizándose numéricamente el modelo y estableciendo el tamaño de las celdas de la malla hidrodinámica y el paso de tiempo necesarios para satisfacer la condición de Courant-Friedrichs-Levy.

Ambos softwares permiten lograr un enfoque multidisciplinario integrado y en tres dimensiones permitiendo simulaciones en ríos, costas, estuarios y lagos, contando con gran flexibilidad en lo referido a la entrada de datos y modelación del cuerpo de agua.

En lo que modelos se refiere, MIKE 21 trata de un modelo de diferencia finita con grilla constante mientras que DELFT se basa en un modelo de diferencias finitas. En ambos casos se resuelven ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo casi horizontal y se definen las condiciones de contorno, en donde la dirección del flujo en lo posible debe ser perpendicular a éste.

A su vez, resulta necesario incluir no sólo el área de interés -cuerpo de agua- Lago San Roque- sino también un área de mayor extensión que permita tener en cuenta el comportamiento de variables como el viento.

El módulo hidrodinámico simula las variaciones y flujos de nivel de agua en respuesta a una variedad de agentes forzantes. Se considera como agente determinando el viento, el mismo genera una tensión en la superficie de agua y en el modelo se lo tiene en cuenta como variado en el tiempo pero constante en el espacio.

En cuanto a calidad de agua, se busca simular un escenario típico que se presenta en el lago San Roque, en el cual el río San Antonio es la fuente principal que proporciona nutrientes necesarios al cuerpo de agua para la proliferación de ciertos grupos de algas. El viento proveniente del sur es el que origina la advección necesaria para que éstas se distribuyan en el lago. En esta primera instancia, y de manera exploratoria, se analiza la evolución de la distribución de un contaminante conservativo distribuido uniformemente a lo ancho del río San Antonio de manera constante, y sometido sólo al proceso de transporte anteriormente mencionado. A tal fin, además, se ha considerado un coeficiente de dispersión horizontal en ambas direcciones de $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ y vertical nulo, para así lograr simular el comportamiento de un trazador.

Para la modelación actual se plantea analizar la ventana de tiempo correspondiente a los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2017, periodo donde se registró el Bloom Algal como se observa en la **Fig. 2**.

Características de los modelos

El Delft 3D cuenta con un sistema de malla numérica horizontal totalmente definida por el usuario. La misma tiene una resolución de 10×10 metros. La resolución vertical varía según la definición de la coordenada σ , es decir, cada elemento tiene un espesor proporcional a la profundidad total local. A tal fin se han utilizado 10 capas verticales, cada una de las cuales abarca, desde la superficie hasta el fondo, un 1, 2, 5, 10, 15, 30, 20, 10, 5 y 2 % de dicha dimensión. Por otro lado, la resolución temporal es de 6 s.



Fig. 2: Imagen satelital del Embalse San Roque. Se puede apreciar la mancha generada por el bloom algal de febrero del año 2017, originándose principalmente en los tributarios del sur (río Los Chorrillos y San Antonio).

manera, se genera una nueva topo-batimetría (ver Fig. 3 y Fig. 4) que representa toda la zona de estudio.

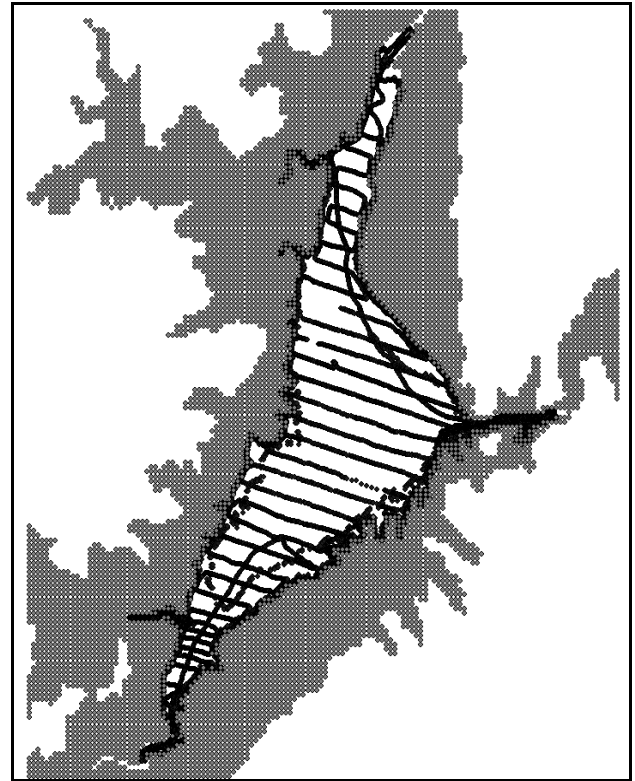


Fig. 3: Topo-Batimetría 2018 obtenida suplementando a los datos de la transectas de la nueva Batimetría 2016 las curvas de nivel hasta los 95 m (cota local).

El MIKE 21, por su parte, cuenta con un sistema de malla numérica horizontal automática, donde el usuario impone ciertas restricciones. Para este caso, se han utilizado triángulos de área de 200 m². No es posible realizar un análisis tridimensional, por lo que cada elemento tiene como espesor la profundidad total local, arrojando así resultados promediados en altura. Dadas estas características, la resolución temporal es de 60 s.

Batimetría del escenario de estudio: lago San Roque

La batimetría generada, y luego utilizada para la modelación, se llevó a cabo durante el año 2016 (Gómez E.A., Raniolo L.A., Pierini J.O. y Pons J.C. Batimetría y Perfilado Sísmico en el lago San Roque- Córdoba. Informe técnico Instituto Argentino de Oceanografía – Conicet) y fue brindada por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba, y actualiza la antigua batimetría de la década de 1980.

Dicha batimetría presenta un límite demarcado por la última curva de nivel (cota 35,35m) apenas 5 cm por encima de la cota del labio del vertedero. Ante un aumento de nivel por encima de ese máximo, el modelo resuelve el problema creando paredes verticales de altura infinita y rugosidad nula (paredes lisas). Para evitar esta condición de borde, donde resulta sensible el cambio de altura con respecto al cambio de volumen embalsado, se obtienen curvas de nivel topográfico hasta los 95 m que abarca más allá del límite del espejo de agua del lago. Mediante interpolación lineal se define una serie de puntos que se anexan a la batimetría original del año 2016. De esta

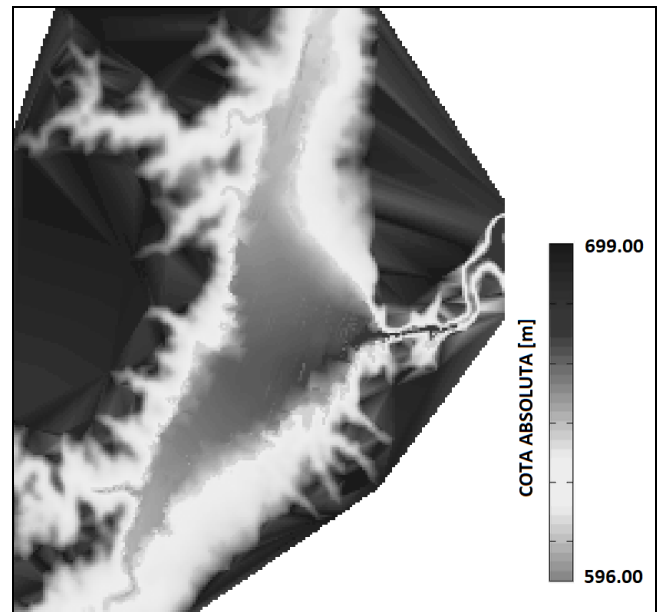


Fig. 4: Raster del área de estudio (Color oscuro a claro, menores profundidades a mayores profundidades).

Balace de masa en el lago San Roque

Se plantea la simulación de caudales entrantes y salientes al lago San Roque a fin de verificar los niveles resultantes con los medidos por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba.

La ecuación de balance resulta:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{entrante} - Q_{saliente} + F - S \quad (1)$$

Donde:

$$\frac{\partial V}{\partial t}$$

es el cambio de volumen del lago por unidad de tiempo, es decir, el almacenamiento.

$Q_{entrante}$ es el caudal que ingresa al dominio a través de los cuatro tributarios (San Antonio-SA, Los Chorrillos-LC, Las Mojarras-LM y Cosquín-C).

$Q_{saliente}$ es el caudal que es eliminado del sistema a través de válvulas, toma para generación de energía hidroeléctrica (turbinado) y vertedero.

F es el término correspondiente a otras fuentes como ser precipitación o flujo subterráneo (no se tiene en cuenta en este análisis).

S es el término correspondiente a otros sumideros, como ser evaporación o flujo subterráneo (no se tiene en cuenta en este análisis).

Entonces:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{entrante} - Q_{saliente} \quad (2)$$

En el periodo de tiempo analizado, los ríos más caudalosos SA y C cuentan con un sensor capaz de medir el tirante de agua local. Junto a mediciones de caudales y tirantes llevadas a cabo por la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia, por el Instituto Nacional del Agua y relevamientos del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, que permitieron la calibración de curvas H-Q, los datos de estos sensores son transformados en caudales estimados -Ver Fig. 5 y Fig. 6-. Si bien estos caudales corresponden a puntos alejados de las condiciones de borde del modelo correspondientes (por unos 4 km), se supone que estos valores se mantienen relativamente constantes, no habiéndose considerado el tránsito del mismo.

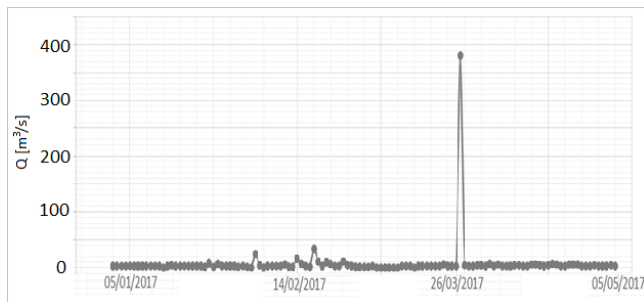


Fig. 5: Serie de caudales observados en el río San Antonio.

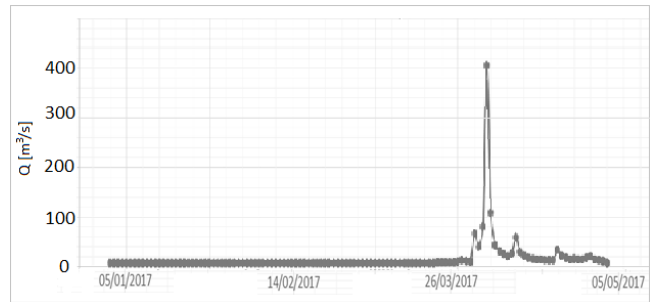


Fig. 6: Serie de caudales observados en el río Cosquín.

En cuanto a LC y LM, no cuentan con un registro continuo de mediciones. Según estudios realizados por Silber (1985) se asocian caudales de $0,69 \text{ m}^3/\text{s}$ para LC y de $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ para LM, por lo que se tomarán estos valores durante toda la simulación.

En lo referido al caudal saliente, el caudal pasante a través de las válvulas es función del nivel de agua en el momento de apertura como así también del porcentaje de apertura. El caudal turbinado es obtenido directamente de la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC). Y finalmente el caudal del vertedero (tipo Morning GLORY) es función del nivel sobre el labio del mismo.

Para el vertedero se usan las curvas ajustadas por Sebastián Morillo (2002):

$$\text{Para un tirante } h < 1,6 \text{ m} \longrightarrow Q = 0,07519(100h)^{1,5874} \quad (3)$$

$$\text{Para un tirante } h > 1,6 \text{ m} \longrightarrow Q = 176,606(100h)^{0,07465} \quad (4)$$

Donde h es la diferencia en metros entre el pelo de agua y la cota del labio del vertedero. Todos estos caudales erogados conocidos forman parte de una condición de borde del modelo numérico (ver Fig. 7).

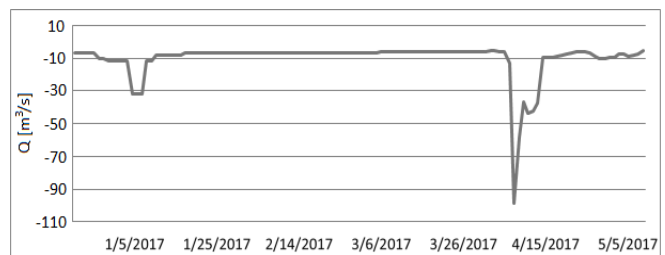


Fig. 7: Serie de caudales erogados hacia el río Suquía (turbinado, válvulas y vertedero).

Finalmente, los niveles del lago son medidos diariamente por la SRH de la Provincia, observando en la Fig. 8 lo medido en el periodo de interés. A partir de esta base de datos es posible realizar una calibración del modelo, permitiendo una mejor representación de la realidad y una gran herramienta para el modelado de calidad de agua, a su vez para poder tomar los recaudos necesarios para el futuro en base a los resultados obtenidos.

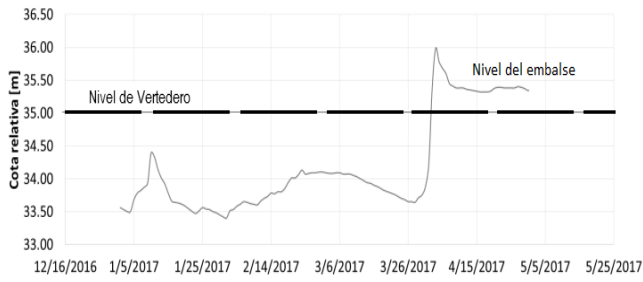


Fig. 8: Serie de niveles medidos por SRH de la provincia.

RESULTADOS

Mediciones de la EML

La estación envía periódicamente las variables medidas por cada sensor a un servidor FTP de la Universidad Nacional de Córdoba de forma continua. La radiación solar neta [$W.m^{-2}$], radiación directa [$W.m^{-2}$], la temperatura del aire [$^{\circ}C$], la humedad del aire [%] y la velocidad del viento [m/s] pueden verse en la **Fig. 9**, **Fig. 10**, **Fig. 11**, **Fig. 12** y **Fig. 13**, respectivamente, medidas durante una ventana de tiempo de 7 días de junio del 2018, de tal manera que resultan apreciables las variaciones diurnas de dichas variables.

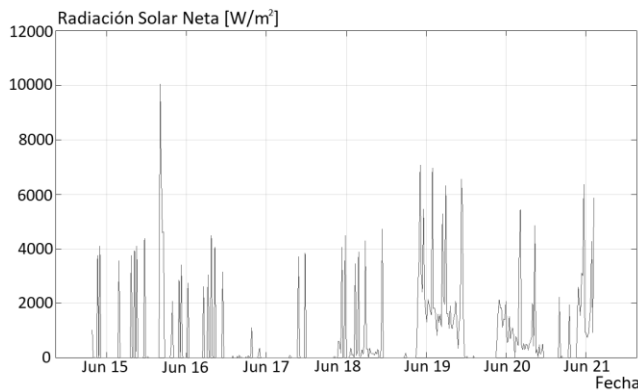


Fig. 9: Registro de radiación solar neta entre los días 15 y 21 de junio.

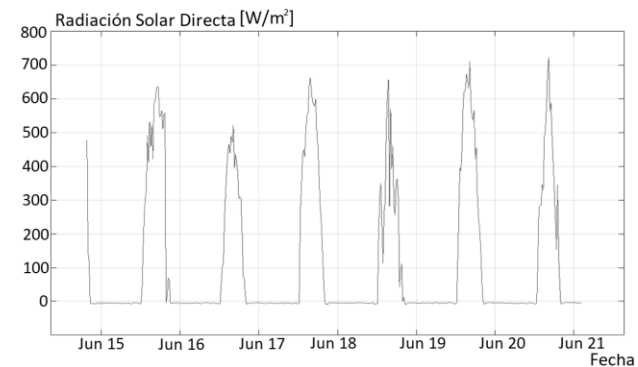


Fig. 10: Registro de radiación solar directa entre los días 15 y 21 de junio.

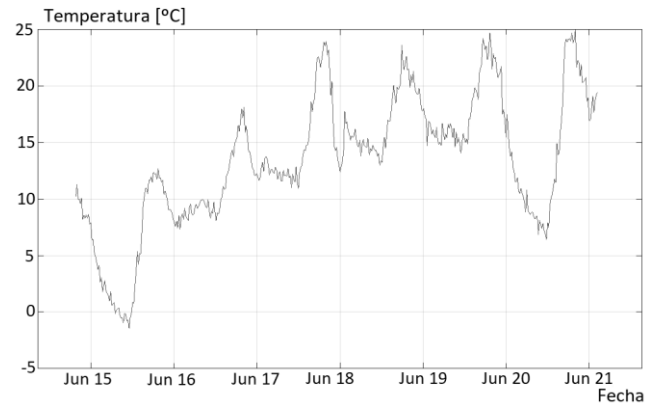


Fig. 11: Registro de temperatura del aire entre los días 15 y 21 de junio.

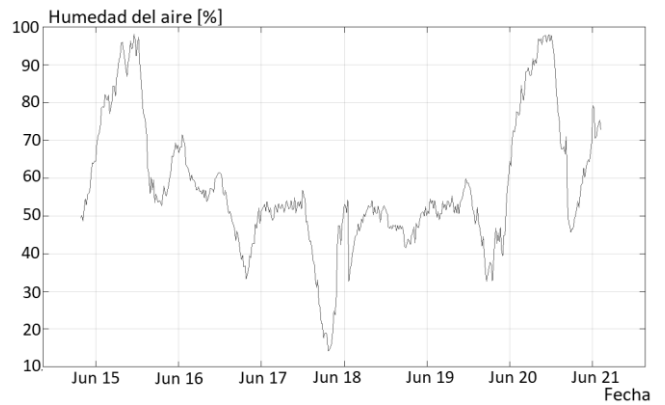


Fig. 12: Registro de humedad del aire entre los días 15 y 21 de junio.

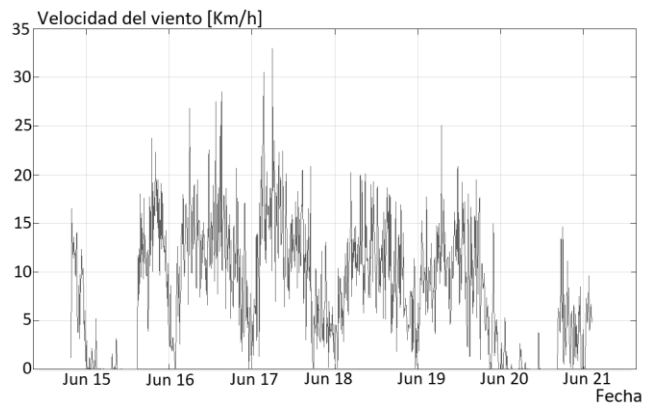


Fig. 13: Registro de velocidad del viento entre los días 15 y 21 de junio.

En cuanto a la temperatura en la columna de agua, la **Fig. 14** muestra un mapeo del valor que toma la variable a través del tiempo, con una resolución de $0.2^{\circ}C$, donde se observa la caída de temperatura en una serie de 7 días y el perfil de la misma, estabilizándose para el enfriamiento del 21 de junio.. Por su parte, en la **Fig. 15** se visualiza la variación diurna en la profundidad del lago el día 18 de junio, con el claro aumento de la temperatura de la capa superficial, provocando una estratificación leve diurna –notar que el gradiente de temperatura es aproximadamente de $1^{\circ}C$ por metro de profundidad-.

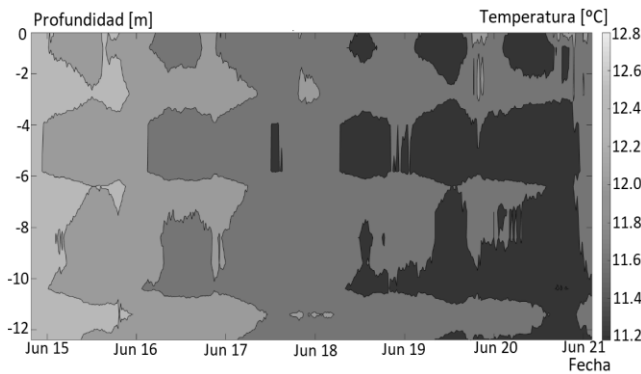


Fig. 14: Mapeo de la temperatura del agua entre los días 15 y 21 de junio.

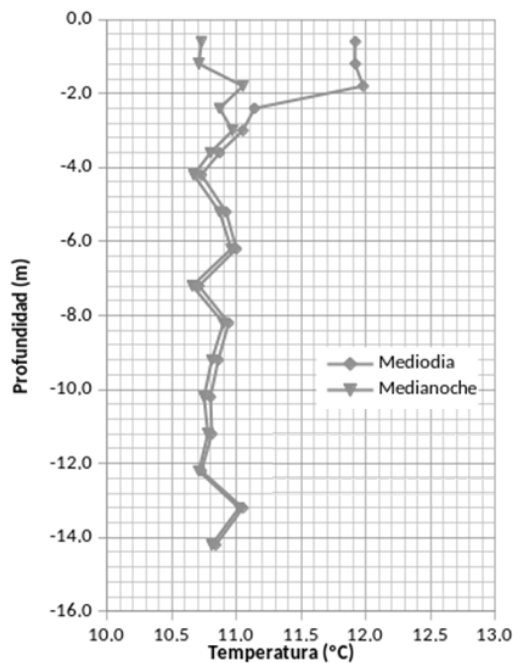


Fig. 15: Registro de temperatura en la columna de agua (18 de junio de 2018).

Modelo Hidrodinámico

En Delft3D, la distribución de velocidades en el lago, causadas por el viento, presenta una distribución no uniforme con velocidades bajas en la zona central del orden de $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en la zona costera alcanzan velocidades de $0,07 \text{ m/s}$ y en la zona de la garganta (cercana al cierre del embalse) se define como zona muerta, sin velocidades -sólo se logra ver que se activa con vientos en sentido Este-Oeste. Durante un evento de crecida estos valores alcanzan hasta 2 órdenes de magnitud mayor.

A su vez, se observan diversos resultados según la capa en la que se esté trabajando -en la Fig. 16 se tiene el campo de velocidades en la capa superior-. Para las capas superficiales todos los vectores presentan el mismo sentido, siempre que el viento sea el agente forzante dominante. A medida que se gana profundidad en el cuerpo de agua, los vectores cambian de sentido, siendo el opuesto al que se tienen en las capas superiores, de manera de cumplir con la conservación de masa en el mismo, como se puede ver en la Fig. 17.

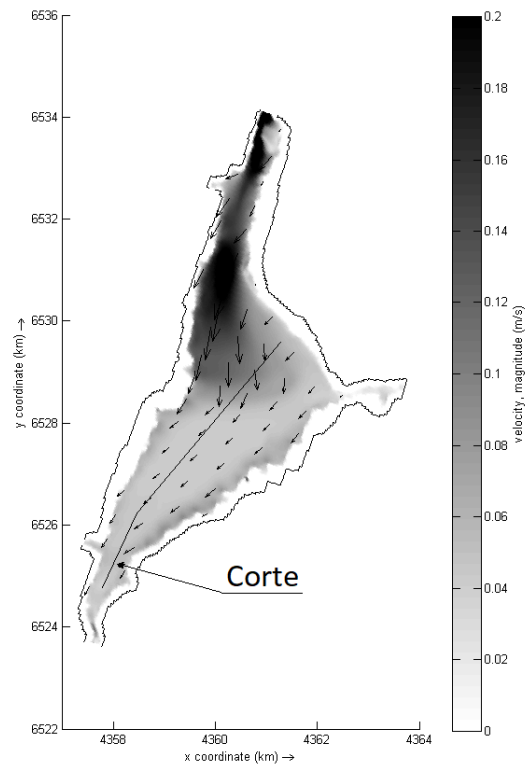


Fig. 16: Campo de velocidades de la capa superficial con Delft3D. Día 01 de Abril del 2017.

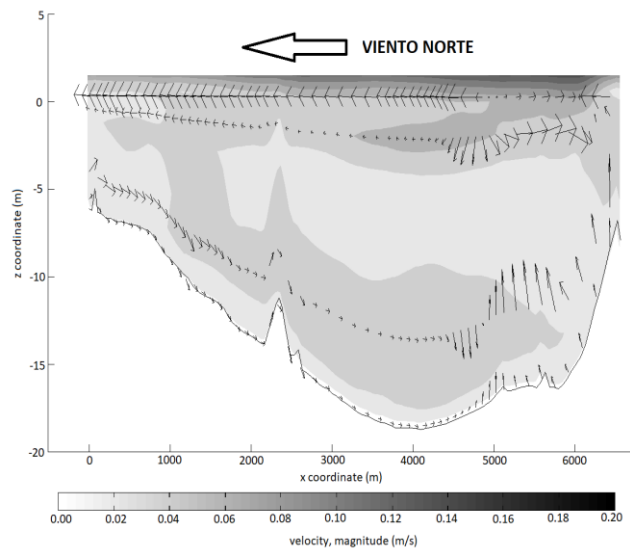


Fig. 17: Campo de velocidades en profundidad con Delft3D, según el corte de la Fig. 16. La coordenada $x = 0 \text{ m}$ se corresponde con la desembocadura del río San Antonio. Día 01 de Abril del 2017.

Por su parte, el MIKE 21 presenta campos de velocidades de magnitud significativamente menores, como resultado de tener un vector promedio en la profundidad total en la celda considerada. En la Fig. 18 puede verse el resultado en el mismo instante que en la Fig. 16, donde los valores máximos alcanzados son del orden de 3 mm/s . Esto evidencia la implicancia de la utilización de un modelo bidimensional frente a un modelo tridimensional.

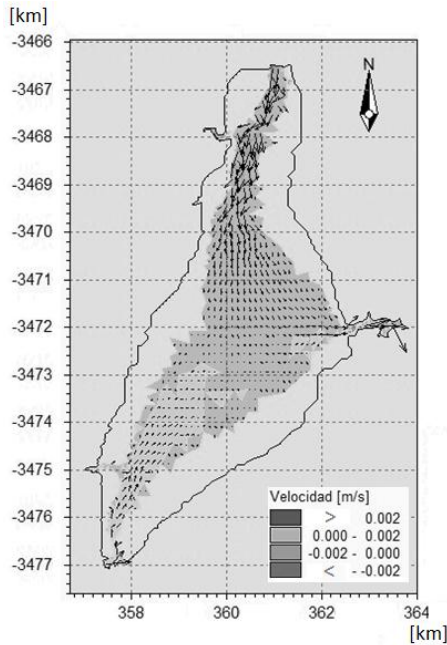


Fig. 18: Campo de velocidades con MIKE 21. Día 01 de Abril del 2017.

Los niveles alcanzados en la simulación en ambos modelos son semejantes a los medidos por la SRH de la provincia. La activación del vertedero se produce de forma análoga a la real, como se puede ver en la **Fig. 19**. Las diferencias subestimadas observadas se corresponden posiblemente a la suposición de caudales constantes en los ríos LC y LM, donde hay cierta correlación entre eventos de crecidas con respecto a los ríos San Antonio y Cosquín, respectivamente. Por otro lado, la sobrestimación luego de la superación del nivel de vertedero refleja la necesidad de verificar los valores de los caudales erogados por los órganos aliviaderos (vertederos y válvulas).

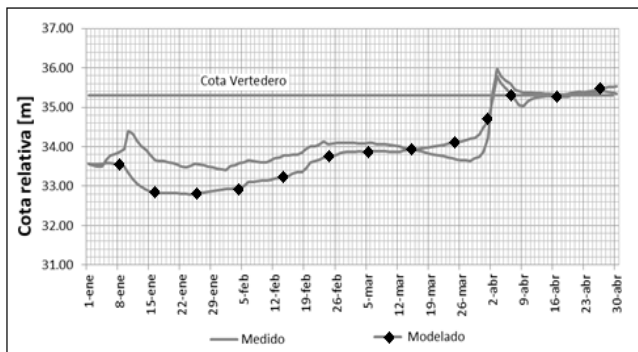


Fig. 19: Comparación entre nivel medido por SRH (círculos) y nivel modelado con Delft3D y MIKE 21 (triángulos). En línea horizontal se aprecia el nivel de vertedero.

El modelo hidrodinámico nos proporciona una base para posteriores cálculos realizados en los módulos ambientales como el de calidad de agua.

Modelo de Calidad de Agua

En cuanto a calidad se refiere, se ha modelado sólo a partir de Delft3D un trazador conservativo liberado a través de fuentes puntuales en lo ancho del río San Antonio. Como se puede observar en la **Fig. 20**, la mancha generada es

advectada hacia la garganta del lago a través de la zona costera.

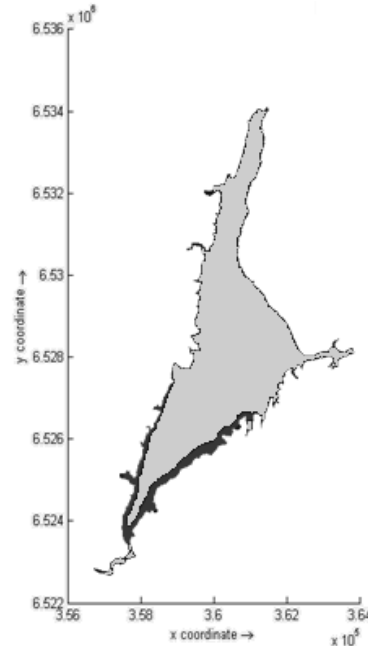


Fig. 20: Desarrollo de la mancha de un trazador liberado en el río San Antonio (Delft3D). Día 31 de Marzo del 2017.

Por otro lado se han modelado en Delft3D las variaciones de temperatura en la columna de agua, mediante el método de *exceso de energía*, que incorpora uniformemente a la capa superficial la energía total recibida. En la figura **Fig. 21** se comparan estos resultados con los medidos por el Instituto Nacional del Agua durante el mes de Marzo del 2017. Se destaca que, en la ventana de tiempo analizada, tanto las mediciones del INA como los resultados del modelo no evidenciaron la formación del fenómeno de estratificación.

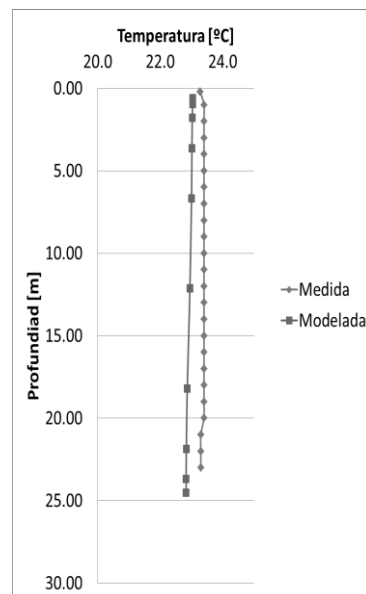


Fig. 21: Comparación del registro de temperatura medido (INA) y el modelado (Delft3D) en Marzo del 2017.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo, que forma parte de un proyecto ambicioso en cuanto a las escalas en las que se trabaja, se ha conseguido implementar un sistema de medición como la Estación de Monitoreo de Lagos único en la provincia de Córdoba, que será de vital importancia para la toma de datos y transformación de los mismos en información necesaria para la futura toma de decisiones.

Requisito es, para poder realizar esta transformación, la generación de modelos capaces de exponer de manera sencilla los tan complejos procesos hidráulicos, hidrológicos, químicos y biológicos que ocurren dentro de un lago. Se ha conseguido, para tal fin, presentar dos modelos base para la futura simulación de eventos de blooms algales. El promediado en altura del MIKE 21 arroja campos de velocidades contrastantes con respecto a los propios del Delft3D, debido a la falta de los procesos de transporte -tanto para masa, como para momentum, energía, constituyentes, entre otros-, por lo que los parámetros de calibración en este modelo bidimensional deberán ajustarse para alcanzar en el modelo tridimensional. Este último contratiempo, sin embargo, está compensado por los tiempos de simulación: mientras en MIKE 21 fue de 4 hs, el necesario para Delft3D fue de 14 días.

Se prevé para un mediano plazo la extensión de estas tareas a otros cuerpos de agua de la provincia de Córdoba.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece en primer lugar a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en forma particular y a la Universidad Nacional de Córdoba en general por el espacio brindado, como así también a la Secretaría de Ciencia y Tecnología como fuente financiadora.

Se agradece especialmente al Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la provincia de Córdoba, junto a la Secretaría de Recursos Hídricos y a la Administración Provincial de Recursos Hídricos, con quienes se han realizado los convenios correspondientes para la realización de estas tareas.

Por último, y no menos importante, gran parte del trabajo se ha hecho mediante el desempeño eficiente y desinteresado del Cuerpo Especial de Policía y a Patrulla de Ríos de Carlos Paz y la provincia.

REFERENCIAS

- [1] Bazán, R. (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.
- [2] Corral, M. (2006), "Modelación de la calidad del agua del Embalse Los Molinos", Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos hídricos, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- [3] Dagatti, M. et al (2017), "Desarrollo de un Sistema de Monitoreo Hidro-Meteorológico y Calidad de Agua", CONAGUA 2017, Córdoba, Argentina.

- [4] Deltares (2013) *Delft3D: Functional Specifications*, Deltares 3.14 ed. 2.
- [5] DHI (2016). *MIKE 21: Flow Model. Hydrodynamic Module. User Guide*. Denmark: Danish Hydraulic Institute.
- [6] Imberger, G. (2004), *A Lake Diagnostic System for Managing Lakes and Reservoirs*, *Water Resources Impact*, vol. 6.
- [7] Klapper, H.(1991) *Control of Eutrophication in Inland Waters*, Ellis Horwood, England.
- [8] Morillo, Sebastián (2002): "Evaluación de parámetros de calidad en el embalse San Roque mediante la utilización de un modelo unidimensional DYRESM-CAEDYM", *Informe interno*. CIRSA-INA - Córdoba, Argentina.
- [9] Rodriguez, M.I. et al. (2017), "Evento extremo de Floración de Cianobacterias en el Embalse San Roque". *VI Taller sobre Cianobacterias Toxigenas en Argentina*, Mar del Plata, 23 y 24 de noviembre 2017.
- [10] Schindler, D. W. y Vallentyne, J.R. (2008), *The Algal Blow: Overfertilization of the World's Freshwaters and Eestuaries*. Earthscan, Londres, Inglaterra.
- [11] Silber, M. L. (1985), "Desagregación Regional de los Aportes de la Cuenca Alta del Río Primero", *Informe interno*. C.I.H.R.S.A., Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- [12] Thomann, R.V. y Muller, J.A. (1987), *Principles of Surface Water Quality Modelling and Control*, Harper&Row Publishers, New York.