

## ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE CONDICIONES DE EUTROFIZACIÓN EN EL RÍO URUGUAY AGUAS ABAJO DE LA REPRESA DE SALTO GRANDE MEDIANTE HEC-RAS

CARDINI, JULIO C.<sup>1</sup>; ZABALETT, ALEJANDRO<sup>2</sup> Y REGUERO, GIMENA P.<sup>3</sup>

Grupo de Estudio de la Contaminación del Río Uruguay (GECRU)  
Facultad Regional Concepción del Uruguay (FRCU) - Universidad Tecnológica Nacional,  
Ingeniero Pereira 676 (CP 3260)  
1: e-mail: cardinij@frcu.utn.edu.ar  
2: e-mail: zabaleta@frcu.utn.edu.ar  
3: e-mail: gpsouto@gmail.com

**Resumen.** *Se presentan los avances alcanzados en una investigación sobre la evolución de nutrientes y concentración algal, en el tramo del río Uruguay aguas abajo de la represa de Salto Grande, teniendo en cuenta la concentración en la descarga de la represa más descargas puntuales provenientes de aguas residuales que son vertidas al sistema acuático. Se trata de la continuación de una investigación sobre la eutrofización del río, apoyada en modelación matemática mediante el software MIKE 11 para la hidrodinámica y WASP para la calidad de aguas, la cual fue publicada previamente. En esta etapa se implementó el software HEC-RAS para el río Uruguay, con el cual se puede evaluar con mayor detalle la problemática, calibrando el módulo hidrodinámico con datos medidos de nivel del río, y se estimó la respuesta a variaciones de parámetros tales como concentración algal en el embalse y temperatura del curso de agua, mediante el módulo de calidad de agua del mismo software. Se concluyó que la problemática de floración algal registrada en algunas zonas balnearias puede estar exacerbada por aportes locales por lo que se están implementando modelos bidimensionales y planes de monitoreo en tramos de interés para explorar el fenómeno.*

**Palabras clave:** Eutrofización, Floración algal, Río Uruguay, Modelación matemática.

### 1. INTRODUCCIÓN

El río Uruguay constituye un importante recurso hídrico para los poblados entrerrianos que se fundaron en la ribera de éste, de manera que el mismo les proveyera de agua potable y posibilitara la evacuación de los desagües primarios y secundarios, municipales e industriales, además de brindar ámbitos para la recreación y el turismo. Resulta entonces de vital importancia mantener la calidad de agua y evitar la contaminación, pues es uno de los factores más importantes que condicionan la vida de éstas poblaciones.

En el marco de estudio del impacto ambiental que la actividad humana genera en la región, el Grupo de Estudio Contaminación del Río Uruguay (GECRU) investigó previamente la calidad de agua durante sucesos extraordinarios de crecimiento, multiplicación y acumulación algal (floraciones algales o “blooms”), mediante los software MIKE 11 para la hidrodinámica y WASP para la calidad de aguas, como primera aproximación. Luego se implementó el modelo HEC-RAS para analizar la evolución algal a través del módulo de calidad de aguas.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo del estudio fue tratar de responder preguntas sobre la evolución algal bajo diferentes alternativas de caudales, de temperatura del agua, de concentraciones de nutrientes y de fuentes de algas (clorofila "a") a través de la implementación del modelo HEC-RAS, calibrado hidrodinámicamente con datos de campo para el tramo del río Uruguay que se extiende aguas abajo del embalse Salto Grande hasta la localidad de Nueva Palmira (Uru).

La ausencia de episodios relevantes de crecimiento algal "Blooms" durante el periodo de estudio no permitió efectuar una calibración estricta del modulo de calidad de aguas, el cual se encuentra operativo para ser calibrado en caso de ocurrir un episodio de este tipo, sino únicamente una validación de que el mismo produce resultados compatibles con los datos estadísticos proporcionados por la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Sin embargo las conclusiones que fueron alcanzadas mediante su aplicación se consideran válidas como primera aproximación a la problemática, y a partir de los resultados obtenidos se propone a futuro, un análisis mediante modelación bidimensional de sectores críticos del río, para analizar la dispersión y la evolución algal en zonas balnearias.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudió el comportamiento algal en un tramo del río Uruguay implementando el programa HEC-RAS desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE). El procedimiento numérico del modulo hidrodinámico resuelve la ecuación de Bernoulli para el flujo permanente gradualmente variado y las ecuaciones de Saint Venant para flujo impermanente. El módulo de calidad de agua permite realizar un análisis de calidad utilizando el esquema numérico QUICKEST-ULTIMATE para resolver la ecuación (1) de advección - dispersión.

$$\frac{\partial(V\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\phi)}{\partial t} \Delta x = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \Delta x + S \quad (1)$$

Donde,  $T$  = temperatura del agua (°C) o concentración (OD, DBO, Algas, etc.)  
 $V$  = volumen del segmento considerado (m<sup>3</sup>),  $Q$  = Caudal (m<sup>3</sup>/s)  
 $A$  = Área superficial del segmento considerado (m<sup>2</sup>)  $S$  = fuente/sumidero (kg/s)  
 $\Gamma$  = coeficiente de dispersión longitudinal (m<sup>2</sup>/s)

El modelo organiza los constituyentes y las fuentes y sumideros en tres grupos principales: modelado de temperatura, el cual calcula las fuentes y los sumideros de energía y la temperatura del agua; modelado de nutrientes, calcula fuentes, sumideros y concentración de nutrientes y algas y modelado de constituyentes arbitrarios, como trazadores simples configurados por el usuario (ej. bacterias coliformes).

Para la implementación del HEC-RAS, que abarca la extensión de río Uruguay desde aguas abajo de la presa de Salto Grande hasta Nueva Palmira a lo largo de unos 340 Km, se utilizó la información topobatemétrica adquirida a partir de imágenes satelitales, cartas del IGN, relevamientos y cartas náuticas que permitieron generar un modelo digital de la superficie del terreno. El río se representa mediante 113 secciones transversales con distancias entre ellas de entre 2500 y 6500 m, dependiendo de la existencia de cambios en la configuración fluvial, referidas Cero MOP y georeferenciadas al sistema POSGAR faja 6

(Ver Figura 1).



**Figura 1. Red hídrica implementada para el estudio del río Uruguay**

Para la calibración hidrodinámica del río Uruguay, se forzó al modelo a partir de una serie de caudales horarios determinados mediante una ley Altura - Caudal a la altura de la ciudad de Concordia (descarga de la represa Salto Grande), entre el 01/07/12 y el 30/06/13 a partir de la serie de datos provista por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande y la información limnimétrica en Salto obtenida del DINAGUA (Dirección Nacional del Agua, Uruguay). Ésta última también proporcionó los niveles horarios de agua en Nueva Palmira, condición de borde aguas abajo del modelo, para el mismo período de tiempo.

El río Uruguay, entre Concordia-Salto y Nueva Palmira tiene dos afluentes principales considerados en la modelación, el río Guleguaychú (Arg.) y el río Negro (Uru.). Las estimaciones de caudales medios para el afluente de la ribera argentina (Guleguaychú,  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y de la ribera uruguaya (Negro,  $650 \text{ m}^3/\text{s}$ ) se obtuvieron de información secundaria. En particular, el caudal del río Guleguaychú en su desembocadura es muy variable por efecto de la influencia de la marea meteorológica, por lo que el valor utilizado es una aproximación basada en los aforos efectuados por el Comité Científico de CARU, en el marco del Plan de Monitoreo de la Planta Orión (UPM – ex Botnia) [1].

#### Parámetros para modelar la temperatura del agua

La temperatura del agua es uno de los parámetros físicos más importantes, pues afecta la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas que intervienen en los procesos de tratamiento del agua. Para realizar la calibración de la temperatura se obtuvieron datos cada 6 hs, entre 21/06/2013 hasta 22/05/2014 en las localidades argentinas de Concordia y Concepción del Uruguay y las uruguayas de Fray Bentos y Nueva Palmira que fueron suministrados por la CARU.

El modelo también necesita datos meteorológicos para simular dicho parámetro. A partir de la información pública disponible en la página Web de la Dirección Hidráulica de Entre Ríos, se obtuvieron datos de presión atmosférica, temperatura del aire, humedad, radiación solar y velocidad del viento en las estaciones de San Salvador, Gualeguaychú y Concepción del Uruguay (Figura 1), para el 2013 y 2014. Se completó la información de nubosidad necesaria con datos mensuales publicados por el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) para las ciudades de Concordia y Gualeguaychú.

#### Parámetros para modelar la evolución algal

La población de las algas en la columna de agua es el parámetro de calidad de agua más comúnmente simulado y es importante para comprender el proceso de eutrofización. El fitoplancton está formado por algas, que a su vez están constituidas por una serie de pigmentos, entre los cuales el más representativo es la clorofila “a” (Chl-a). Es posible estimar la biomasa de algas planctónicas mediante la cuantificación de la Chl-a.

La respiración y crecimiento de las algas afecta las concentraciones de nutrientes ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$  OrgN y OrgP en el HEC-RAS), de algas y de oxígeno disuelto (OD). Durante el día la fotosíntesis produce OD y durante la noche en la respiración se consume oxígeno. Las algas utilizan fósforo y nitrógeno en sus formas inorgánicas disueltas y las mismas son fuentes de las formas orgánicas de éstos nutrientes.

Debido a que durante el periodo de estudio no se produjeron episodios relevantes de crecimiento algal se utilizó información de fuentes secundarias para el presente informe.

A partir de 62 reportes de la CARU en donde se presentan concentraciones de Chl-a obtenidas del análisis de imágenes satelitales disponibles en CONAE, realizados entre el 2014 y 2016, se observa que la concentración media en el río Uruguay aguas abajo del embalse es de  $13 \mu\text{g/l}$ , con un máximo de  $90 \mu\text{g/l}$  hacia la zona de la desembocadura.

Las imágenes empleadas son SPOT 5, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI y abarcan una longitud aproximada de 460 km entre las ciudades de Monte Caseros (Arg.) - Bella Unión (Uru.) hasta Nueva Palmira (Uru.) repartida entre 5 zonas. Las dos primeras se encuentran aguas arriba del embalse y las tres restantes entre Concordia y Nueva Palmira. Cabe destacar que la CONAE cuenta con el desarrollo de un software propio y de uso libre para el procesamiento de este tipo de imágenes satelitales: el SOPI que se puede descargar desde este sitio <https://2mp.conae.gov.ar/index.php/software/softprosimag>. La metodología de interpretación de las imágenes para determinar la concentración algal se presenta en diferentes trabajos patrocinados por CONAE [2].

Cada uno de los reportes considerados contiene datos de concentraciones medias y máximas por zona. A partir de su análisis se observó que los valores medios de concentración de clorofila “a” no superan los  $20 \mu\text{g/l}$  en ninguna zona y que las concentraciones máximas ( $2000 \mu\text{g/l}$  en el embalse y  $90 \mu\text{g/l}$  en la zona de la desembocadura) son máximos locales, es decir registrados en pequeñas superficies generalmente cercanos a la costa y a las desembocaduras de afluentes. También se encontró que no hay relación entre la concentración de algas en el embalse y aguas abajo del mismo.

La CARU también realizó muestreos de calidad de agua, durante los meses de enero a abril de 2013, a lo largo de 14 estaciones ubicadas sobre el río Uruguay, entre la ciudad de Concordia

y la localidad de Nueva Palmira. Las concentraciones de clorofila no superan en ningún caso los resultados obtenidos a partir de las imágenes satelitales, y se advierte una tendencia al aumento de concentración de algas hacia la desembocadura del río.

El informe bienal de la CARU [3] donde se presentan los resultados de los estudios realizados en el río Uruguay durante el período 2013-2014, para el cual se realizaron 105 campañas en 37 sitios entre Bella Unión-Monte Caseros y Nueva Palmira, con una frecuencia semanal en verano y mensual el resto del año, también se utilizó para el presente estudio. A partir del mismo se verificó que la concentración de clorofila “a” aumenta hacia la desembocadura del río y presenta una diferencia entre las concentraciones en invierno y en verano. Asimismo los valores medios no superan en general los 5  $\mu\text{g/l}$ ; sin embargo hay datos mayores obtenidos mediante imágenes satelitales, en promedio 13,4  $\mu\text{g/l}$  y máximos locales de 90  $\mu\text{g/l}$ .

Debido a la ausencia de floraciones algales en la etapa de estudio se realizaron simulaciones con concentraciones de Chl-a, ingresantes al río desde el embalse, iguales a 90, 50, 15 y 5  $\mu\text{g/l}$  tanto para la estación de invierno como la de verano y para distintos caudales del río.

Si bien se observa de las imágenes que los ríos Gualaguaychú y Negro aumentan la concentración de Chl-a en el río Uruguay, no se advierte un salto en la distribución espacial en las mediciones de la CARU. Se determinó entonces realizar un análisis de sensibilidad, ingresando a los afluentes los mismos datos que para el cauce principal.

La información de nutrientes necesaria para correr el módulo de calidad de aguas se obtuvo a partir de las muestras tomadas y analizadas por la CARU entre enero y abril de 2013, que muestra una tendencia al aumento de concentraciones hacia la desembocadura del río, y una relación entre N total y P total en promedio de 7.6 que determina que la limitación de crecimiento algal es por fósforo.

De las conclusiones del informe bienal realizado por la CARU surge que la concentración de OD superficial presentó diferencias estacionales significativas, siendo mayores los valores de otoño e invierno (alrededor de 9,0  $\text{mg/l}$ ) respecto al verano y primavera (7,5  $\text{mg/l}$ ), y la concentración promedio del fósforo total fue similar en las 4 estaciones del año (0,1  $\text{mg/l}$ ), al igual que para el fosfato (0,2  $\text{mg/l}$ ) y el nitrógeno total (1,0  $\text{mg/l}$ ), éste último con un amplio rango en invierno. Estacionalmente, la concentración de amonio fue en promedio mayor en verano (0,5  $\text{mg/l}$ ), mostrando un incremento desde el otoño al verano. Una de las posibles causas de esta tendencia podía vincularse con el aumento de turistas en las ciudades costeras, lo que podría causar un mayor aporte de desechos cloacales en el curso del río. Finalmente, la concentración del nitrato fue similar entre las estaciones del año, promedio (0,5  $\text{mg/l}$ ), pero mostró rangos amplios en verano y primavera, respecto al otoño e invierno.

Los nutrientes que presentan amplios rangos respecto del promedio son el  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  y  $\text{PO}_4$ , pero como los dos primeros no influyen directamente sobre la concentración de Chl-a se realizó un análisis de sensibilidad para el  $\text{PO}_4$ , considerando el valor máximo alcanzado en una de las mediciones realizadas en la zona de aguas abajo (Ñandubaysal, Gualaguaychú), igual a 0,26  $\text{mg/l}$ . Cabe mencionar que excepcionalmente se detectaron valores incluso mayores aguas arriba, como por ejemplo en una muestra superficial tomada en Belén (canal) en octubre de 2011.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

##### Calibración Hidrodinámica

Se calibró el modelo comparando los niveles medidos y calculados en las estaciones de Concepción del Uruguay y boca del Gualeguaychú, variando el coeficiente de Manning (Figura 2).

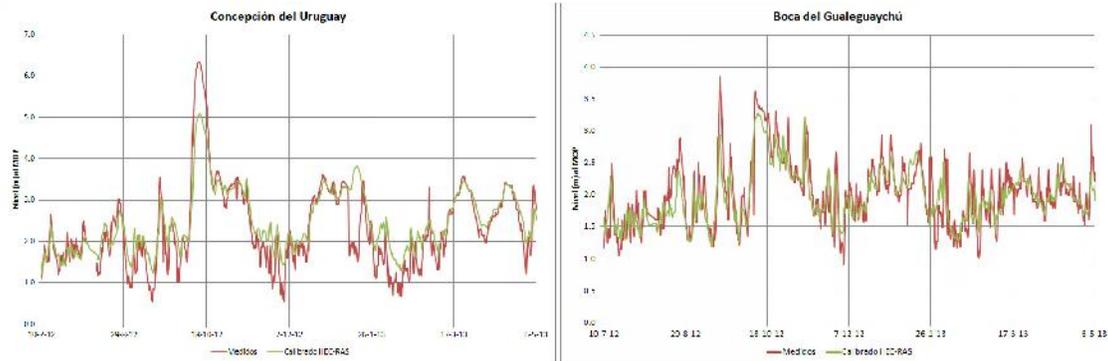


Figura 2. Niveles medidos y calculados en Concepción Del Uruguay y en la boca del Gualeguaychú

El modelo representa adecuadamente las principales fluctuaciones del nivel del río, con excepción de situaciones de crecidas excepcionales como la ocurrida en octubre de 2012. Esto indica que el mismo debe ser aún calibrado para condiciones de desborde fluvial generalizado, tarea que será objeto de un próximo paso de la investigación, pero que no tiene influencia práctica en la representatividad del mismo en condiciones hidrológicas normales, que son las que se analizan en relación con la calidad del agua. Por otro lado, se puede apreciar que existen oscilaciones de alta frecuencia cuya amplitud el modelo no alcanza a representar en detalle. Este efecto identificado previamente se debe a la influencia del viento, mejorándose la representación cuando se incluye este parámetro.

##### Calibración de la temperatura del agua

Los parámetros ajustados para la calibración fueron los de viento. La variable del modelo que está relacionada con la turbulencia en la vertical fue aumentada un 50% del valor sugerido. En la Figura 3, se presentan las temperaturas de agua medidas y calculadas en Concepción del Uruguay y Fray Bentos, pudiéndose apreciar un razonable ajuste.

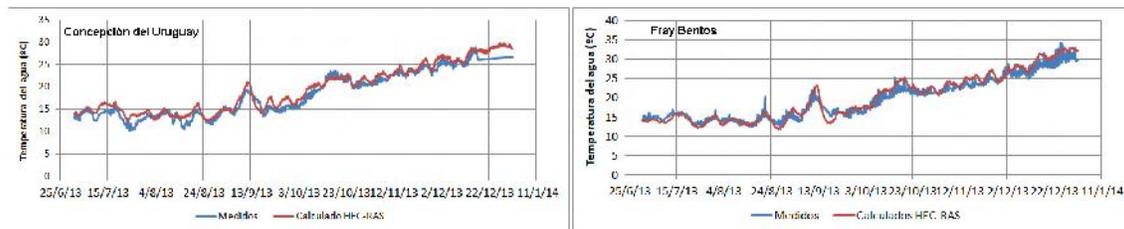


Figura 3. Temperatura del agua medida y calculada en Concepción del Uruguay y Fray Bentos

##### Validación de parámetros el módulo de calidad de aguas

La validación del módulo de calidad de aguas consistió en ajustar las constantes y coeficientes del modelo de manera tal que sea capaz de reproducir las tendencias observadas a partir de la información recopilada de concentraciones de nutrientes y algas, con un grado de confiabilidad aceptable. Se realizaron corridas estacionarias para las cuales se definieron valores de estiaje (1.500 m<sup>3</sup>/s), crecida (8.000 m<sup>3</sup>/s) y condición media de caudal (5.000 m<sup>3</sup>/s) como forzantes del modelo y se establecieron temperaturas del agua (invierno, 16 °C y verano, 28 °C) y datos meteorológicos estacionales.

La validación se realizó para la condición media de caudal y valores constantes estacionales de temperatura del agua, nutrientes y Chl-a. Se ajustaron los parámetros del modulo de calidad de agua obteniéndose, en la Figura 4 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los resultados para una concentración de Chl-a de 15 µg/l ingresante por el extremo norte del modelo.

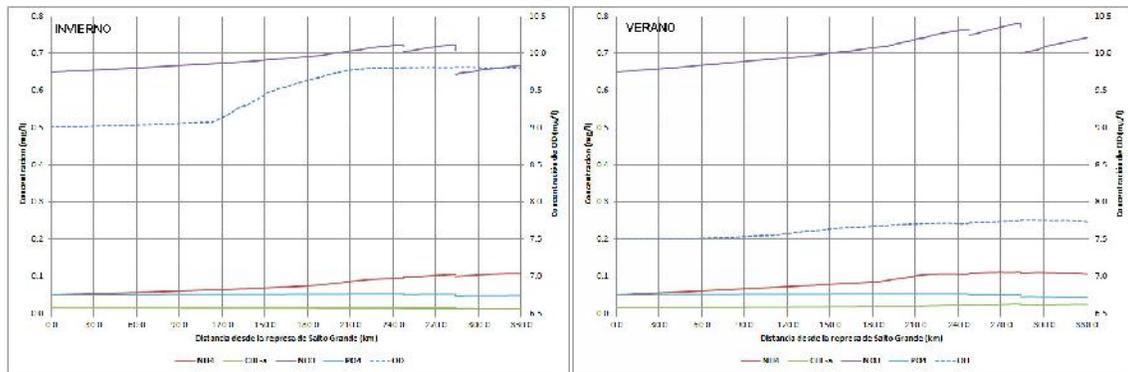


Figura 4. Concentraciones calculadas de NH<sub>4</sub>, Chl-a, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub> y OD para las estaciones de invierno y verano, a lo largo del río Uruguay.

Si bien las condiciones de borde para la concentración de OD superficial se asignaron de manera estacional, la tendencia es al aumento cuando estamos en la estación de invierno y a mantenerse alrededor de 7,5 mg/l en verano, manteniendo la diferencia estacional significativa observada. El fosfato soluble, PO<sub>4</sub>, se mantiene, al igual que lo analizado, similar en las 4 estaciones del año. Estacionalmente, la concentración de amonio tiene una tendencia a ser mayor en promedio en verano. La concentración del nitrato fue similar entre las estaciones del año, pero mostró un mayor crecimiento en la estación estival, que coincide con las observaciones de los informes de CARU que muestran rangos amplios de variabilidad en verano y primavera, respecto al otoño e invierno. La concentración de clorofila tiene un leve aumento hacia la desembocadura del río para la estación de verano y una disminución en el período invernal. Las discontinuidades en las líneas se corresponden con el ingreso de los afluentes río Negro y Gualaguaychú, donde no se consideró ingreso de nutrientes ni clorofila. De esta manera, quedaron establecidos los parámetros del modulo de calidad de agua para el análisis de la evolución de la concentración algal en diferentes escenarios, lo cual si bien no es una calibración para un conjunto de mediciones, se considera representativo de los parámetros deducidos de los informes de mediciones y de detección satelital provistos por la CARU.

### Simulaciones realizadas con el módulo de calidad de aguas

Se realizaron 24 simulaciones para tres condiciones de caudales (medio, de estiaje y de crecida), 4 concentraciones de clorofila "a" como condición de borde (90, 50, 15 y 5  $\mu\text{g/l}$ ) y dos estaciones del año. Además se efectuó un análisis de sensibilidad para estudiar cómo cambia la concentración de algas al agregar descarga de nutrientes y Chl-a en los afluentes Gualeguaychú y Negro, y al aumentar la concentración ingresante por el borde superior del modelo de ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ) a 0,26  $\text{mg/l}$  (valor máximo registrado en los datos consultados). Las condiciones hídricas consideradas para estos análisis son las medias.

Se analizó la sensibilidad con respecto a la influencia de las descargas cloacales urbanas, considerando como ejemplo una descarga cloacal de la ciudad de Paysandú (a 140 km de la presa), con un caudal de 0,45  $\text{m}^3/\text{s}$  [4]. Se consideraron concentraciones características de los nutrientes de las aguas residuales y concentraciones de 15  $\mu\text{g/l}$  y 90  $\mu\text{g/l}$  de Chl-a.

### **3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS**

En la Figura 5 se presentan 4 gráficos en función de la condición de borde de concentración de Chl-a. Se grafica con línea punteada las concentraciones modeladas para el escenario estival, y con línea continua las correspondientes al período invernal. La discontinuidad de concentraciones en los kilómetros 248 y 284 se debe a ingresos de caudal de los ríos Gualeguaychú y Negro respectivamente, dado que no se incluyeron nutrientes ni clorofila "a" (análisis de sensibilidad) y por lo tanto se observa en la Figura 5 un efecto de dilución.

Cuando la concentración de clorofila "a" que ingresa desde el embalse es de 90  $\mu\text{g/l}$ , la misma tiende a disminuir diferenciadamente según el caudal del río, de forma similar para ambas estaciones. Para una concentración de borde de 50  $\mu\text{g/l}$  se observa la influencia de la temperatura del agua en el desarrollo algal; es decir, el término de crecimiento algal comienza a ser más relevante que el de decaimiento en la ecuación de concentración. El escenario no es propicio para el desarrollo de algas, pues en todos los casos la concentración disminuye respecto a la que ingresa desde la represa de Salto Grande. La concentración de Chl-a ingresante para la cual el modelo predice mayor desarrollo de algas que la cantidad ingresante, sólo en verano, es la de 15  $\mu\text{g/l}$ . Para esta condición, el crecimiento es inversamente proporcional al caudal, al igual que el decrecimiento en invierno.

En el gráfico con concentración de borde mínima de 5  $\mu\text{g/l}$ , se aprecia que aumenta la concentración de algas respecto a la ingresante, en ambas estaciones. La variable con mayor influencia en el crecimiento algal es la temperatura del agua, debido a que cuando la misma es máxima la concentración de Chl-a también lo es. La segunda variable en importancia es el caudal de agua, pues cuando la tendencia es de crecimiento, a menor caudal mayor incremento, y cuando es de decrecimiento, a menor caudal mayor reducción.

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos para la descarga de nutrientes y Chl-a en los afluentes, como así también los obtenidos debido al incremento del  $\text{PO}_4$  ingresante. La concentración de algas resultante de descargar nutrientes y Chl-a en los afluentes muestra un pequeño aumento hacia la desembocadura, menor a 5  $\mu\text{g/l}$  en invierno y a 10  $\mu\text{g/l}$  en verano y no genera un cambio en la tendencia crecimiento. Por el contrario el  $\text{PO}_4$  tiene una influencia significativa en el desarrollo algal.

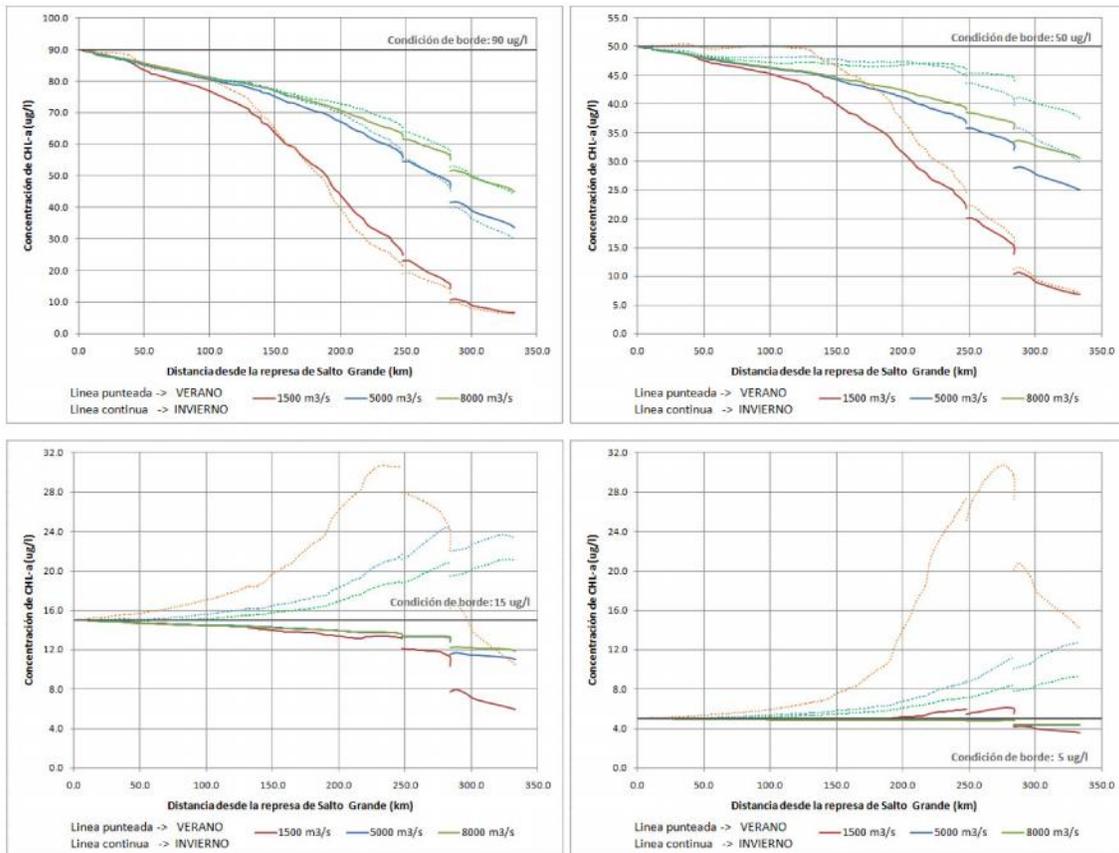


Figura 5. Concentraciones modeladas de Chl-a (µg/l) a lo largo del río Uruguay

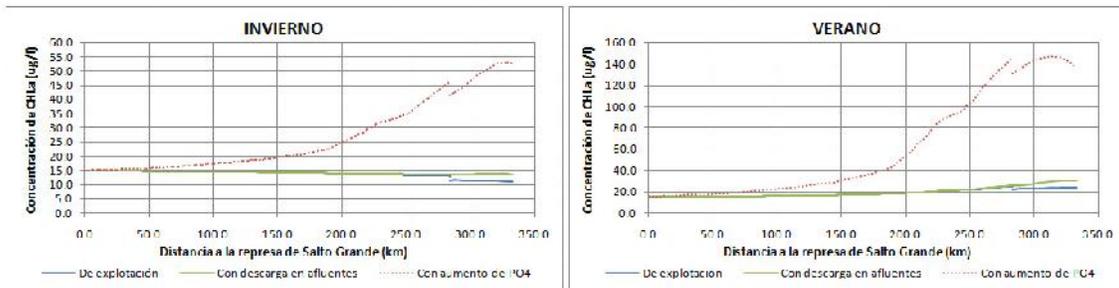


Figura 6. Concentraciones resultantes con aumento de PO4 y con descarga de los afluentes, comparadas con las concentraciones resultantes correspondientes (antes simuladas), para invierno y verano

#### 4. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

A partir de la información recopilada se calibraron los módulos hidrodinámicos y de temperatura del agua del modelo HEC-RAS y se validó la representatividad el módulo de calidad de aguas. Dicho modelo permite asociar los módulos hidrodinámico y de calidad de

agua, a lo largo trayecto del río Uruguay estudiado, lo cual es una mejora significativa a la metodología de cálculo previo con el modelo matemático WASP.

Se verificó que una vez que ingresa en el río Uruguay un caudal de agua con concentraciones altas de clorofila "a" (90  $\mu\text{g/l}$ ), el efecto del aumento de la temperatura del agua no induce un mayor el crecimiento algal a lo largo del río. Para una situación de estiaje, pero con una concentración de clorofila "a" menor de 15  $\mu\text{g/l}$  y 5  $\mu\text{g/l}$ , la influencia del incremento de la temperatura del agua fue de 48% y 65% respectivamente.

Por otro lado, se verificó que en el escenario de crecida cuando hay un incremento de clorofila "a" a lo largo del río, el mismo es inferior al del escenario de estiaje, lo cual se debería al menor tiempo de residencia del agua en crecida dentro del cauce modelado.

Se detectó una importante sensibilidad de los resultados con respecto a la concentración de fosfato disuelto  $\text{PO}_4$ , no obstante los datos registrados en el embalse no son elevados, por lo que un escenario con  $\text{PO}_4$  muy alto parece improbable. Se verificó que el ingreso de nutrientes y Chl-a desde los ríos afluentes contribuye sólo marginalmente a incrementar las concentraciones de Chl-a en el río Uruguay aguas abajo.

Se advirtió también que la descarga de nutrientes, especialmente de  $\text{PO}_4$ , de manera constante a través de las descargas cloacales puede generar un aumento de la Chl-a en el río aguas abajo (que es menor a 0,5  $\mu\text{g/l}$  para el caso del vertido de la ciudad de Paysandú), sobre todo en verano. Este efecto muy probablemente se produzca también en las demás ciudades ribereñas que no cuenten con plantas de tratamiento de efluentes, siendo acumulativo en el río.

Se concluyó que la problemática de floración algal registrada en algunas zonas balnearias puede estar exacerbada por aportes locales, y como su influencia en el cauce principal es poco relevante e independiente a las descargas de la represa, se decidió implementar, en la próxima etapa de la investigación, modelos matemáticos bidimensionales hidrodinámicos y de calidad de aguas en tramos de interés por el uso del agua recreativo con contacto directo en cercanías de la costa, o captación para potabilización, a los efectos de explorar el fenómeno sin promediar en la sección del río. Para realizar estudios detallados de tramos fluviales seleccionados, se está preparando un plan de muestreo y determinación de los principales parámetros necesarios a los efectos de calibrar la modelización matemática.

## REFERENCIAS

- [1] Informes correspondientes al monitoreo del Comité Científico en la planta Orión (UPM-Ex Botnia) y el río Gualeguaychú en su desembocadura en el río Uruguay.
- [2] Compagnucci, Marina Valeria. Utilización de tecnología espacial asociada a floraciones algales y presencia de Vibrios. Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. UNC. IG - CONAE/UNC (2012)
- [3] León Lizet et al. "Estudio de la calidad del agua en el Río Uruguay en el bienio 2013-2014: vigilancia de playas y estado trófico." Informe de actividades de investigación de la subcomisión de medio ambiente y uso del agua. CARU. (2016).
- [4] CSI Ingenieros. "Estudio de Impacto Ambiental de la Planta de Pretratamiento y Emisario de Efluentes de la Ciudad de Paysandú", Informe Ambiental Resumen (2011).