

# COMPARACIÓN DE LOS MODELOS HEC-RAS Y MIKE 11 PARA EVALUAR LA EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD BACTERIOLÓGICA DEL AGUA EN EL RÍO URUGUAY INFERIOR

ZABALETT, ALEJANDRO<sup>1</sup>; CARDINI, JULIO C.<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: zabaleta@frcu.utn.edu.ar  
2: e-mail: cardinij@frcu.utn.edu.ar  
3: e-mail: gpsouto@gmail.com

**Resumen.** *La calidad de agua bacteriológica del río Uruguay depende fundamentalmente de las descargas cloacales e industriales de las localidades ribereñas de ambos márgenes. En estudios previos se ha evaluado la incidencia de las descargas de líquidos cloacales crudos de las ciudades de Concordia y Salto en la zona de Colón, ubicada 80 km aguas abajo en el Río Uruguay, a través de una modelación unidimensional de calidad de agua, empleando el Modelo MIKE 11. Se evaluó además el impacto de diferentes niveles de tratamiento de los líquidos cloacales en la concentración de bacterias coliformes en las playas. Se presenta una implementación del Software HEC-RAS para el río Uruguay, el cual fue calibrado hidrodinámicamente y luego se lo empleó para verificar los resultados previamente obtenidos con el modelo MIKE 11, hallándose una adecuada correspondencia.*

**Palabras clave:** Calidad de aguas, Río Uruguay, Modelación matemática.

## 1. OBJETIVOS

El objetivo del estudio consistió en evaluar la incidencia de los vertidos cloacales de las ciudades de Concordia (República Argentina) y Salto (República Oriental del Uruguay) en la calidad del agua del Río Uruguay, y su efecto sobre la ciudad de Colón (República Argentina) varios kilómetros aguas debajo de las descargas, mediante la implementación del modelo unidimensional HEC-RAS, para su comparación con los resultados de estudios previos modelados con el software MIKE 11 [1].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó en primer lugar un compendio de la información existente y pertinente al tramo del río Uruguay, entre Concordia-Salto y Nueva Palmira.

### 2.1. Recopilación de Datos Geométricos

La información topobatemétrica disponible consiste en imágenes satelitales, relevamientos antecedentes y cartas náuticas a partir de lo cual se generó un modelo digital de la superficie del terreno referidas al Cero MOP y georeferenciado a POSGAR faja 6.

## 2.2. Recopilación de datos de Caudales río Uruguay

Se recopiló la serie de caudales diarios erogados aguas abajo de la presa de Salto Grande correspondiente al período 1980-2015, provista por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande y la serie idéntica para caudales erogados por la Presa El Palmar, sobre el río Negro (ROU). Se obtuvo del DINAGUA (Dirección Nacional del Agua, Uruguay) la información limnimétrica en el puerto de Nueva Palmira y Salto correspondientes al mismo período y de la DNVN (Dirección Nacional de Vías Navegables, Argentina) los niveles en Concepción del Uruguay, Boca de Gualeguaychú y Colón.

Se generó una serie caudales y niveles para la calibración del modelo hidrodinámico y para el estudio de descargas cloacales se utilizaron 2 series correspondiente al año 2004; del 26/05/04 al 02/06/04 coincidente con niveles mínimos en Concepción del Uruguay y del 12/11/04 al 18/11/04 coincidente con niveles medios de agua, a los efectos de estudiar la influencia de las descargas de Concordia y Salto sobre la ciudad de Colón como indicador del efecto sobre la zona de intenso uso balneario/turístico del río, que se desarrolla desde dicha ciudad hasta Concepción del Uruguay.

Los datos de caudales medios para los afluentes Gualeguaychú ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de la ribera argentina, y Negro ( $650 \text{ m}^3/\text{s}$  [2]) de la uruguaya se adquirieron a través de la información disponible en Internet. En particular, el caudal del río Gualeguaychú en su desembocadura es muy variable por efecto de la influencia de la marea meteorológica, y el valor utilizado es una aproximación basada en aforos efectuados por el Comité Científico de CARU, en el marco del Plan de Monitoreo de la Planta Orión (UPM – ex Botnia) [3].

## 2.3. Recopilación de datos de Descargas cloacales

Para efectuar la estimación de las descargas cloacales, ante la imposibilidad material de muestrear estadísticamente la calidad de los líquidos descargados se emplearon parámetros de cantidad de conexiones cloacales y dotaciones medias correspondientes, condiciones típicas de variabilidad diaria y anual de las dotaciones de agua y descargas y cierres aproximados de balances de masa de coliformes fecales para las fechas de medición, teniendo en cuenta los valores de base que llegan desde aguas arriba de Colón, y los valores medidos en las diferentes transectas muestreadas.

Se establecieron caudales y descargas de coliformes medios para ambas ciudades con el objetivo de obtener una primera aproximación del fenómeno y poder comparar los resultados con los calculados mediante el MIKE 11.

De acuerdo a la información recopilada de la ciudad de Concordia el caudal cloacal medio diario es de  $0,29 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Según Kiely [4], la calidad bacteriológica de un líquido cloacal crudo, puede estimarse en el siguiente rango:

- Para coliformes totales: entre 100 y  $1000 \times 10^6 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$ ,
- Para coliformes fecales: entre 10 y  $100 \times 10^6 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$  (un orden de magnitud menor).

La carga másica considerada en Concordia, en condiciones medias, es entonces de:  $0,29 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^7 \text{ UFC}/100 \text{ ml} = 2,9 \times 10^6 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$  (coliformes fecales).

Para la ciudad de Salto se estimó un caudal medio igual a  $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Finalmente la carga másica adoptada en condiciones medias, considerando una concentración igual a la asumida para Concordia ( $10.000.000 \text{ UFC}/100\text{ml}$ ) es de  $0,16 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^7 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$ .

Como condición de base inicial de concentración de coliformes fecales se utilizó un valor de  $50 \text{ UFC}/100\text{ml}$ , compatible con los datos medidos.

#### 2.4. Estimación de la Velocidad de decaimiento para los coliformes

El modelo requiere la especificación del coeficiente de decaimiento de coliformes (K) para representar la evolución de la concentración. A partir de valores típicos de K extraídos de bibliografía para diferentes cursos de agua en distintas estaciones climáticas se infirió el valor de  $K = 0,076 \text{ 1/hora}$  para el verano y de  $K = 0,03 \text{ 1/hora}$  para la condición de invierno.

Según los análisis de sensibilidad realizados la influencia del coeficiente de decaimiento en el área de estudio es muy baja, dado que el tiempo de tránsito del agua es generalmente más bajo que las horas de tiempo de decaimiento.

#### 2.5. Implementación y calibración hidrodinámica del modelo HEC-RAS

El programa Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) es un software desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE), diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales en redes de canales naturales o artificiales.

El procedimiento numérico del modelo 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 modelar constituyentes arbitrarios, conservativos o no conservativos de primer orden, según la ecuación (4).

$$A_c = K * C \quad (4)$$

Donde:  $A_c$  = concentración arbitraria (en este caso,  $\text{UFC}/100\text{ml}$ )  
 $K$  = constante de decaimiento (valor negativo) o crecimiento ( $1/\text{día}$ )  
 $C$  = concentración del constituyente ( $\text{UFC}/100\text{ml}$ )

Se aplicó el modelo a toda la extensión de río Uruguay desde aguas abajo de la represa de Salto Grande hasta Nueva Palmira, abarcando un total de  $340 \text{ Km}$  aproximadamente. El mismo se encuentra representado mediante  $113$  secciones transversales, con distancias entre ellas de entre  $2500$  y  $6500 \text{ m}$  aproximadamente. Se realizaron  $2$  conexiones con los afluentes Gualaguaychú y Negro con secciones transversales cada  $10 \text{ km}$ . Ver Figura 1.

Para la calibración hidrodinámica se forzó al modelo a partir de una serie de caudales horarios determinados mediante una ley Altura - Caudal en Concordia (descarga de la represa Salto Grande), entre el  $01/07/12$  y el  $30/06/13$ . Para la condición de borde aguas abajo se utilizaron niveles horarios medidos en la localidad de Nueva Palmira.

Se compararon los niveles medidos y calculados en las estaciones de Concepción del Uruguay, Colón y boca del Gualaguaychú, variando el coeficiente de Manning.

En la Figura 2 se presentan los niveles medidos y calculados de las estaciones de Concepción del Uruguay y Boca del Gualaguaychú.



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

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

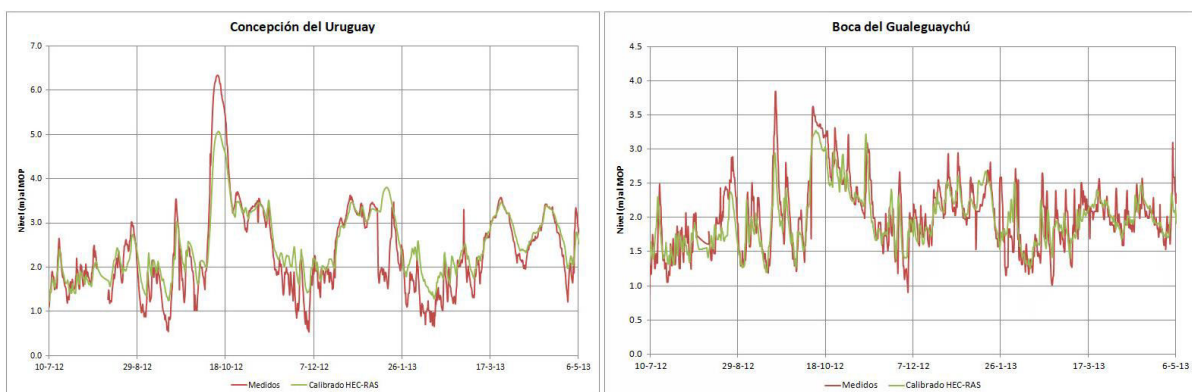


Figura 2. Niveles medidos y calculados en Concepción Del Uruguay y en la boca del Gualeguaychú

En la Figura 5 se presenta el ajuste del modelo para los intervalos de tiempo que se modelaron en la etapa de explotación, y que coinciden con un nivel mínimo (1 m) y medio (3 m) de agua en la ciudad de Concepción del Uruguay.

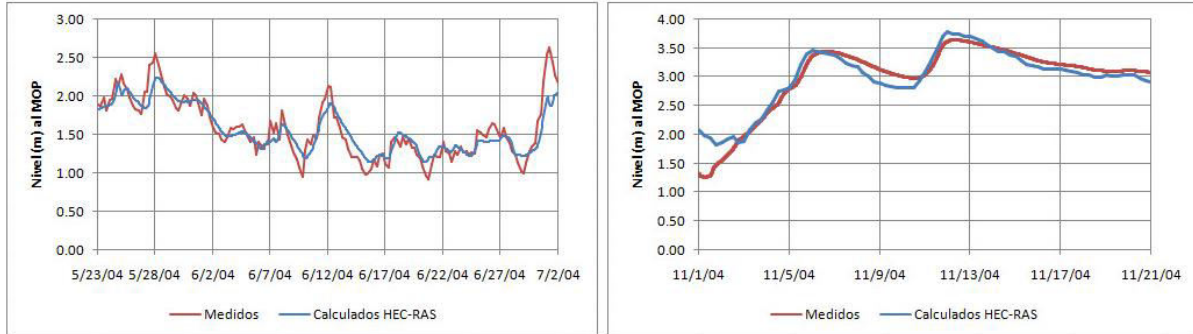


Figura 5. Niveles medidos y calculados en Concepción del Uruguay, para los períodos de explotación

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Escenarios simulados

Se realizaron diversas simulaciones con distintas condiciones hidrodinámicas a los efectos de analizar la influencia de las descargas sobre la ciudad de Colón, como indicador del efecto sobre la zona de intenso uso balneario/turístico del río, que se desarrolla desde dicha ciudad hasta Concepción del Uruguay. Se estudió la variación espacial y temporal de la contaminación analizando diferentes condiciones de base iniciales de concentración de bacterias coliformes y coeficientes de decaimiento según la época del año en consideración. En la Tabla 1 se presentan los escenarios simulados, considerando descargas máscicas en Concordia y Salto de  $0,29 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^7$  y  $0,16 \text{ m}^3/\text{s} \times 10^7$  UFC/100 ml respectivamente.

Nivel de agua en Conc. del Uruguay	Aguas bajas		Aguas medias	
Período simulado	26/05/2004 - 02/06/2004		12/11/2004 - 18/11/2004	
Concentración de base inicial (millones UFC/100ml)	0,00005	NO	0,00005	NO
Velocidad de decaimiento (1/hora)	0,030	0,030	0,076	0,076

Tabla 1. Parámetros de las descarga utilizadas en la modelación de explotación

Se realizo un estudio de sensibilidad para los coeficientes de dispersión del modelo, obteniendo que los resultados del HEC-RAS que mejor se aproximan a los del MIKE 11 se obtienen al utilizar un valor de  $15 \text{ m}^2/\text{s}$ , el cual se encuentra dentro del intervalo que según la literatura se encuentra entre  $5$  y  $20 \text{ m}^2/\text{s}$  para ríos.

#### 3.2. Evolución espacial de concentración de bacterias coliformes entre Concordia y Colón y comparación con los resultados de MIKE 11

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos a lo largo del río Uruguay entre la represa

de Salto-Grande y la ciudad de Concepción del Uruguay, para aguas bajas en invierno y con distintas concentraciones de base inicial para los coliformes fecales, y en la Figura 8 los resultados para aguas medias en verano.

Se puede apreciar que si bien las concentraciones en el río por dilución son del orden de los miles de UFC/100ml, empleando condiciones realistas de decaimiento bacteriano a la altura de Colón las mismas descienden a valores del orden de 300 UFC/100ml en condiciones de aguas bajas en invierno (con menor decaimiento y mínima dilución) hasta 45 UFC/100ml en condiciones de aguas medias (mayor decaimiento y dilución).

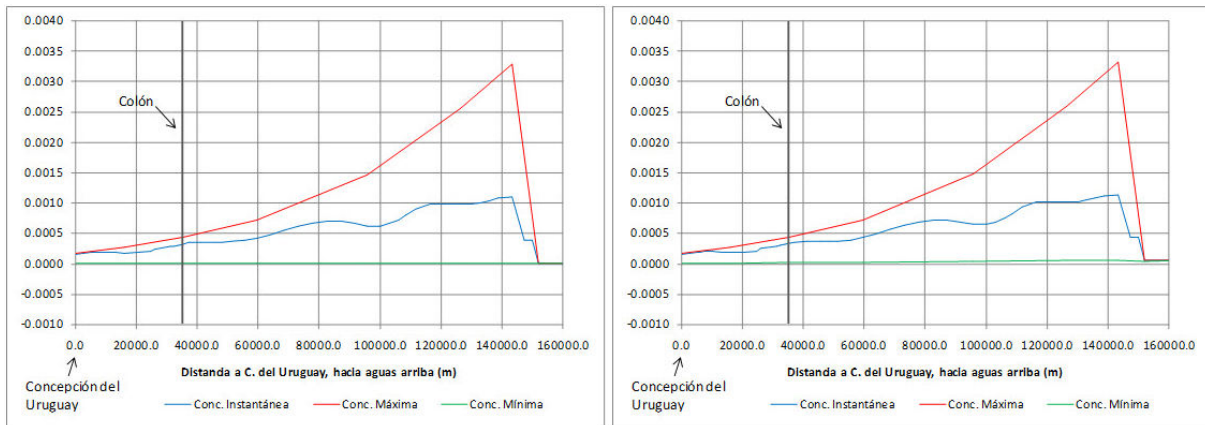


Figura 4. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, SIN y CON concentración de base inicial y con un coeficiente invernal de decaimiento. Aguas bajas

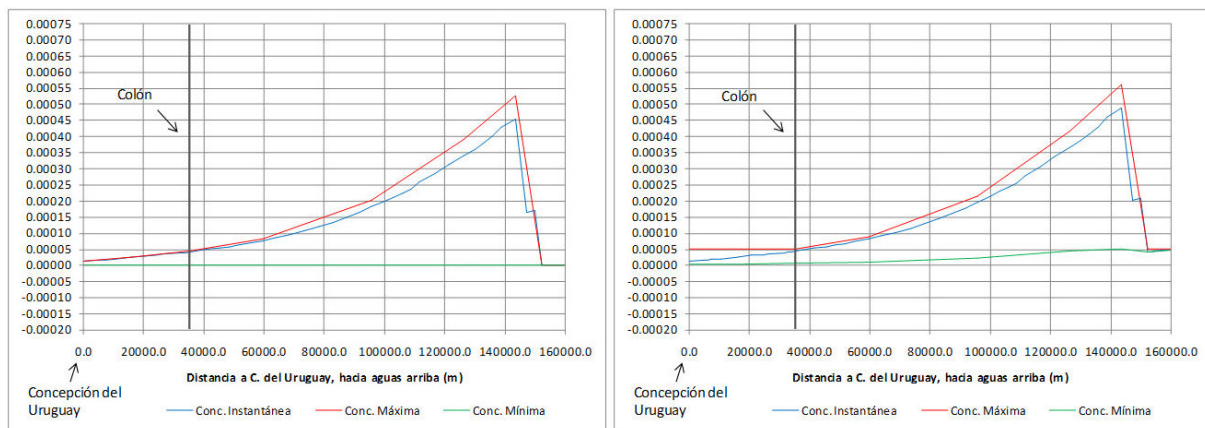


Figura 5. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, SIN y CON concentración de base inicial y con un coeficiente estival de decaimiento. Aguas medias

Estos resultados implican que gran parte de la contaminación bacteriológica a la altura de Colón, está causada por las descargas de las ciudades de Concordia y Salto que se vuelcan a más de 80 km de distancia, que en condiciones de aguas medias aportan unas 45 UFC/100ml acercándose los valores de base del río, al límite de balneabilidad (200 UFC/100ml).



En condiciones de aguas bajas, debido a la menor dilución, las concentraciones que arriban a la zona de Colón pueden llegar a exceder el límite de balneabilidad fijado por la CARU. No hay diferencias significativas en los escenarios con y sin concentración de base inicial. A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el MIKE 11 en dónde las variables están representadas con los mismos colores que para el HEC-RAS, es decir en rojo la concentración máxima de coliformes (millón UFC/100 ml), en verde la mínima y en azul la instantánea todos representados en el eje derecho del gráfico.

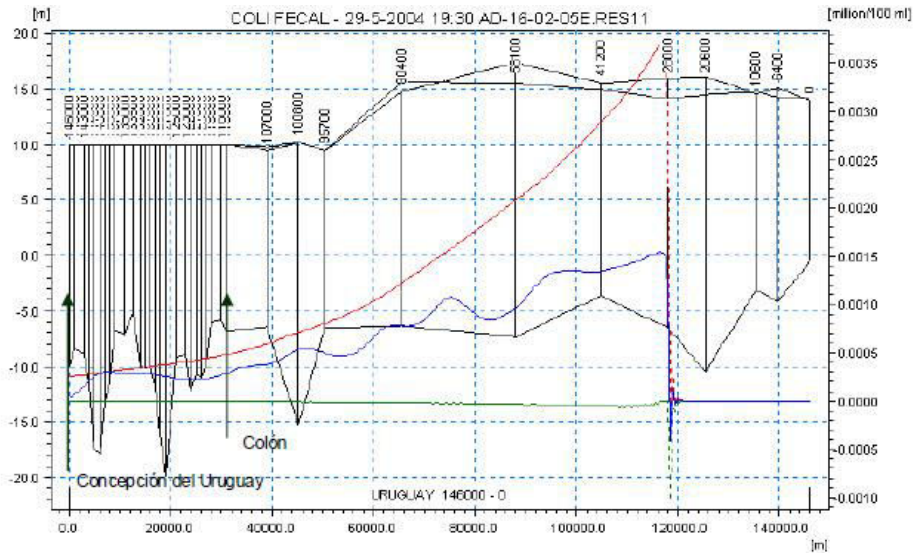


Figura 6. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, SIN concentración de base inicial y con un coeficiente invernal de decaimiento. Aguas bajas

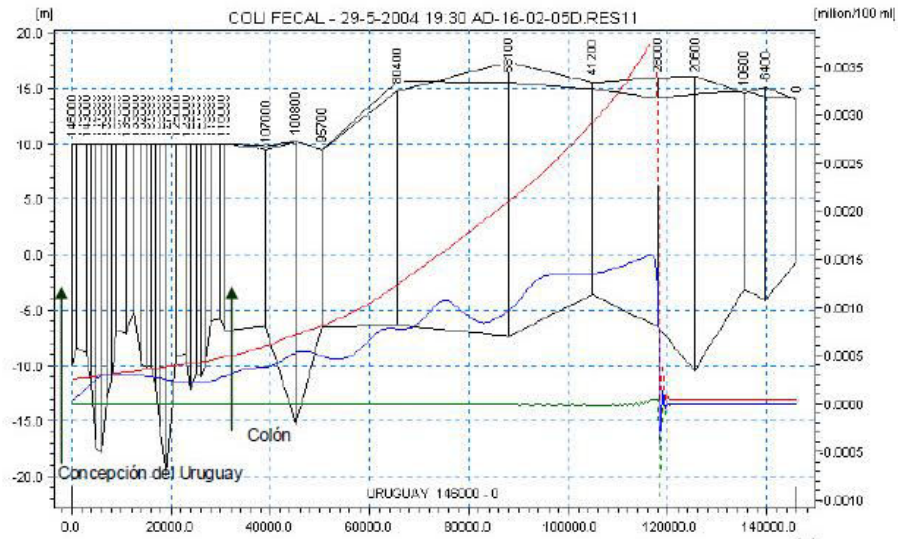


Figura 7. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, CON concentración de base inicial y con un coeficiente invernal de decaimiento. Aguas bajas

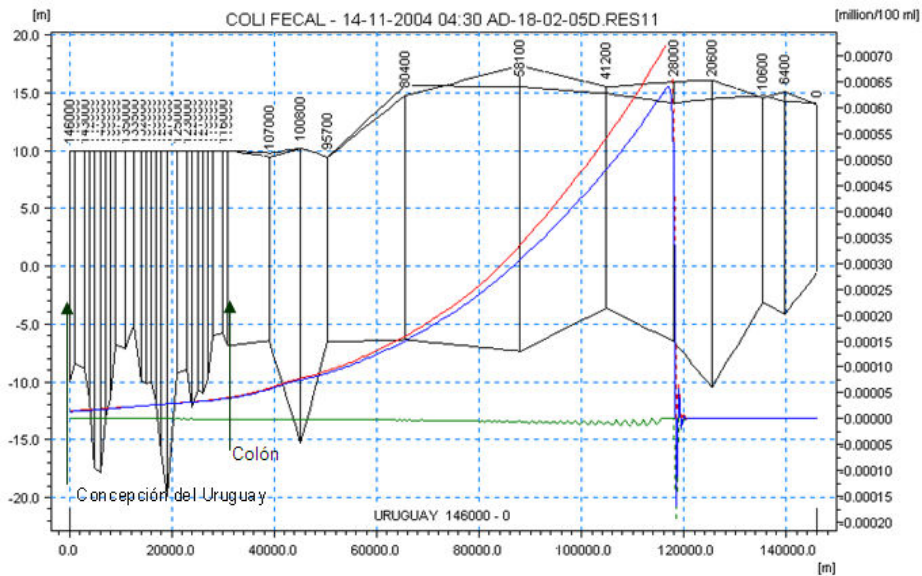


Figura 8. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, SIN concentración de base inicial y con un coeficiente estival de decaimiento. Aguas medias

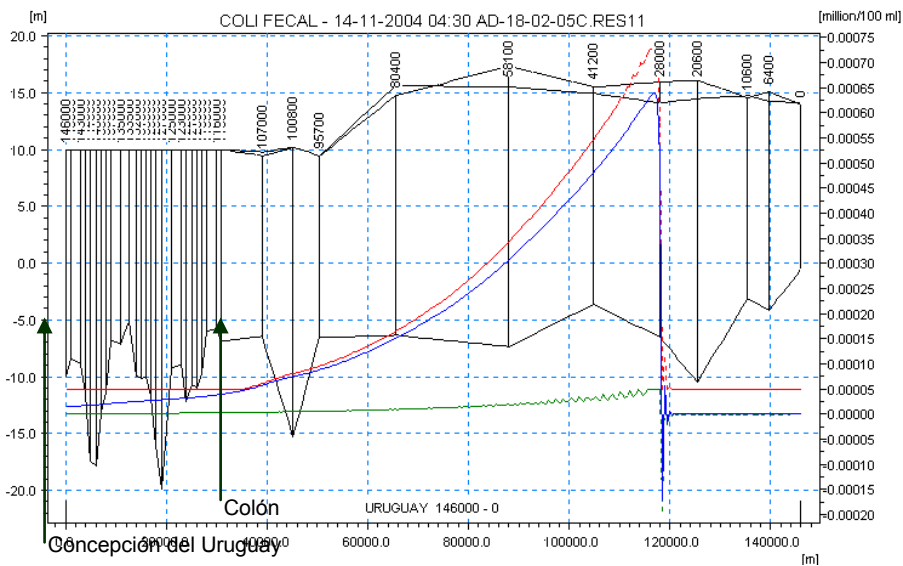


Figura 9. Concentración modelada de Coliformes fecales (millón UFC/100ml) a lo largo del río Uruguay, CON concentración de base inicial y con un coeficiente estival de decaimiento. Aguas medias

Al comparar los resultados de concentraciones máximas para la condición de invierno se observa que el pico para el modelo MIKE 11 alcanza los 0,0040 millón UFC/100 ml mientras que con el HEC-RAS no llega a 0,0035 millón UFC/100 ml. Ocurre lo mismo con los valores máximos de concentración instantánea de coliformes, es menor para la modelación con HEC-RAS. Para los resultados estivales la diferencia es un poco mayor, aproximadamente de 0,0010 millón UFC/100 ml. Sin embargo a la altura de la ciudad de



Colón, zona de interés para el estudio, los resultados son comparables. La diferencia entre ambos modelos es principalmente la dilución inicial y al no tener mediciones en la zona de los vertidos, no se pueden ajustar correctamente los coeficientes de dispersión. No obstante la correspondencia entre ambos modelos es correcta principalmente aguas abajo de la descarga.

### 3.3. Evolución temporal de coliformes en Colón y comparación con el MIKE 11

A continuación se presentan las variaciones de coliformes fecales en la cercanía de la ciudad de Colón para niveles de agua bajo y medio, considerando el decaimiento estacional correspondiente. Se puede observar que la concentración con decaimiento invernal oscila en Colón entre 250 y 450 UFC/100ml y alrededor de los 45 UFC/100ml para aguas medias y decaimiento estival.

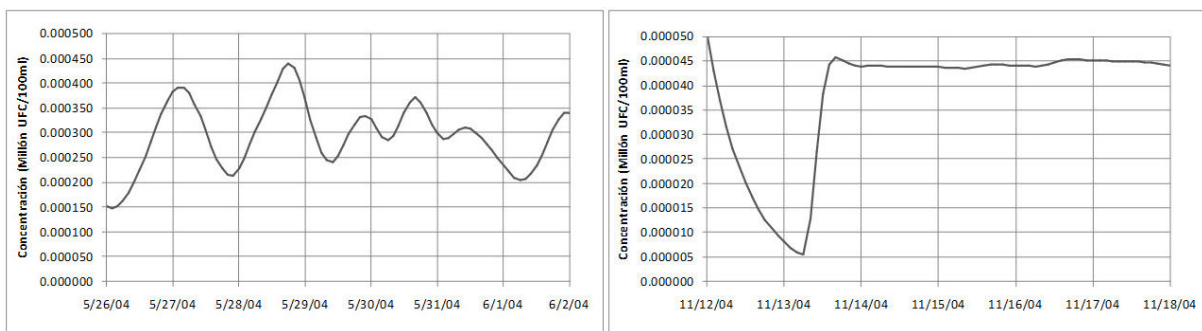


Figura 10. Variación de la concentración de coliformes fecales a la altura de la ciudad de Colón, para un nivel de aguas bajas y decaimiento invernal a la izquierda y nivel de aguas medias y decaimiento estival a la derecha, calculada con el modelo HEC-RAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la modelación con MIKE 11 sólo para la condición de aguas medias y decaimiento estival pues no se cuenta con el gráfico correspondiente a la condición de estiaje.

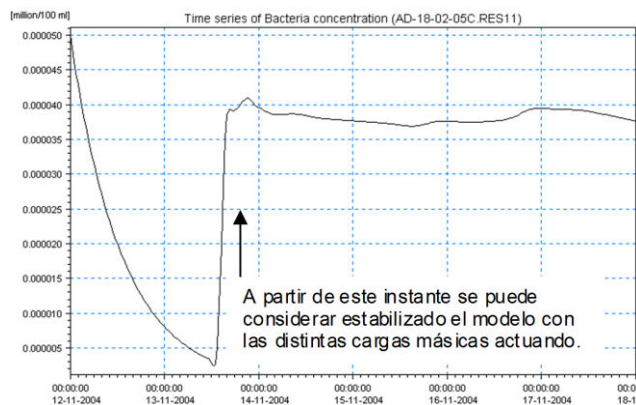


Figura 11. Variación de la concentración de coliformes fecales a la altura de la ciudad de Colón, para un nivel de aguas medias y decaimiento estival, calculada con el modelo MIKE-11.

Se puede observar que para la condición de estiaje la influencia de la marea meteorológica es evidente en la variabilidad de la concentración de coliformes. La misma oscila alrededor de 300 UFC/100 ml que es el valor obtenido a partir del MIKE 11. Para la condición estival coincidente con aguas medias se observa que la concentración calculada con HEC-RAS es superior a la del MIKE 11 en 5 UFC/100 (0,000005 millón UFC/100 ml), inversamente a lo que resulta del gráfico espacial de concentración de coliformes en cercanías del punto de descarga, donde la concentración calculada por MIKE 11 es superior.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de la información recopilada se calibró el modelo HEC-RAS permitiendo obtener resultados continuos de concentración de coliformes fecales, asociando los módulos hidrodinámico y de calidad de agua, a lo largo del tramo del río Uruguay estudiado.

La concentración total de bacterias coliformes en la zona de la ciudad de Colón resultante de la modelación con HEC-RAS, debido a la influencia directa de las descargas cloacales de las ciudades de Concordia y Salto, es del orden de 300 UFC/100ml en condiciones de aguas bajas en invierno (con menor decaimiento y mínima dilución), y de hasta 45 UFC/100ml en condiciones de aguas medias en verano (mayor decaimiento y dilución).

Los resultados obtenidos muestran que el modelo HEC-RAS es ligeramente más conservativo que el modelo MIKE 11 para la zona de Colón, mientras que en inmediaciones de los puntos de descarga cloacal aguas arriba ocurre lo opuesto. No obstante, los resultados de ambos modelos son muy similares.

Mediante la modelación se concluye, al igual que para el estudio previo con MIKE 11, que la descarga cloacal afecta a la ciudad de Colón, incrementando los niveles de base en el curso fluvial, alcanzando valores próximos al nivel Guía para uso recreativo con contacto directo.

Por lo tanto, se concluye que la implementación del HEC-RAS verificó los resultados previamente obtenidos con el modelo MIKE 11, hallándose una adecuada correspondencia.

#### REFERENCIAS

- [1] Zabalett, Alejandro, Tesis presentada para el grado de Magíster en Ingeniería Ambiental “*Impacto del tratamiento de aguas residuales sobre la calidad bacteriológica de las aguas del río Uruguay en el tramo Concordia-Concepción del Uruguay*”. Concepción del Uruguay, Octubre de 2012.
- [2] <http://www.montevideo.com.uy/enciclopedia/riosn.htm>
- [3] 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. <http://www.caru.org.uy>
- [4] Kiely, Gerard, *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*, Interamericana de España, pp. 678, (1999).