

MODELACIÓN DE LA DESCARGA DE LA LAGUNA LA PICASA AL RÍO PARANÁ

**María Alejandra Bustamante¹, Leticia Tarrab¹, Leonardo di Paolo¹, Juan Weber²,
Jorge Haspert¹ & Carlos Martín Angelaccio¹**

¹Centro de la Región Semiárida (CIRSA) - Instituto Nacional del Agua (INA)
Ambrosio Olmos 1142- X5000JGT- Córdoba- Argentina-Te: 0351-4683015
E-mail: alejandrabustamante@argentina.com

²Dep. de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional
Maestro Torres esq. Cruz Roja – Ciudad Universitaria – C.P. 5000 – Córdoba, Argentina
E-mail: jweber@civil.frc.uth.edu.ar

RESUMEN

La laguna La Picasa, ubicada en el sur de la provincia de Santa Fe, funciona actualmente como receptor final de los excesos de escorrentía afectando parte del sur de Córdoba y de la propia provincia de Santa Fe. Debido al incremento de la precipitación media en la región, especialmente en los últimos años, el sistema natural comenzó a saturarse provocando grandes inundaciones que llegaron a afectar campos y rutas que hasta hace algún tiempo se encontraban ajenos al inconveniente, perjudicando seriamente la producción agrícola y la comunicación regional.

Como posible solución de este problema se proyectó un sistema de canales no revestidos que vincularía la laguna con el Río Paraná, con el fin de bombear parte de los excedentes desde la laguna La Picasa hacia el Río Paraná.

El objetivo del presente trabajo fue cuantificar el impacto que introducirán las condiciones específicas de calidad de la laguna La Picasa sobre el resto del sistema de canales y lagunas interconectadas, a través del uso de modelos de calidad de agua.

Se analiza el impacto de la descarga mediante el estudio de los parámetros OD, temperatura, DBO y TDS y su comparación con los datos medidos en campo. Algunas de las diferencias observadas entre los valores estimados y los medidos se atribuyen a que las estimaciones se realizaron considerando la geometría nueva del proyecto, es decir un sistema de lagunas conectadas distinto al existente.

Los resultados obtenidos muestran en general que el sistema será altamente dependiente de la calidad del agua de la laguna La Picasa. Los valores estimados por modelación de cada parámetro están comprendidos dentro de la variabilidad natural del sistema, con excepción de aquellos relacionados con la salinidad, los cuales aumentarán significativamente.

Palabras clave: modelación de la calidad de agua, hidrodinámica, salinidad, impacto.

INTRODUCCIÓN

La cuenca de la laguna La Picasa esta situada en el sudoeste de la provincia de Santa Fe. Actualmente funciona como laguna de retención de los excesos de escorrentía que afectan el sur de Córdoba y Santa Fe. El incremento de la precipitación media en la región, especialmente en los últimos años, provocó grandes inundaciones afectando la utilización de campos y rutas y seriamente la producción agrícola, la comunicación entre distintas localidades de la región como sumarte de su actividad económica. La superficie se incremento sensiblemente de 8000 ha a 35000 ha aproximadamente, inundando una extensión de 27000 ha de campos aledaños.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos recibió el requerimiento de la provincia de Santa Fe para promover las acciones necesarias que garantizaran el manejo ordenado de los excedentes y la solución definitiva a dicho problema. Como solución se proyectó un sistema de canales no revestidos (artificiales y naturales) el cual vincularía la laguna con el Río Paraná y desde la cual, las aguas serían bombeadas con un caudal medio de 10 m³/s.

El objetivo del estudio fue evaluar el comportamiento del sistema en términos de calidad de agua y cuantificar el impacto que se producirá debido a las condiciones específicas observables la laguna La Picasa.

AREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

La traza de la obra se extiende desde el sector Noreste de la Laguna La Picasa hasta el Río Paraná (Figura 1). El canal conecta la Picasa con diferentes lagunas que actúan como áreas de almacenamiento y laminación. El tramo inicial esta comprendido entre la laguna La Picasa y la Laguna Los Patos. Se adecuará para la canalización de aproximadamente 42 km enlazado las lagunas la Picasa, la Larga, Tuerto Venado, la Infinita y Martín García hasta la Laguna de los Patos. El canal proyectado de evacuación de las aguas se encuentra parcialmente construido en el tramo laguna La Picasa – laguna Los Patos y esta obstruido en algunos tramos para que dicho flujo no llegue a la última laguna. La laguna Los Patos es importante ya que los excedentes pluviales de toda el área comprendida entre La Picasa y Los Patos son conducidos hacia los distintos cuerpos de agua y finalmente hacia Los Patos. En la laguna Los Patos se proyecta construir una obra de regulación constituida por dos vertederos y compuertas verticales; un vertedero constituye la salida hacia el canal que la vincula con la Laguna Quirno y el otro permite la salida hacia el canal que se dirige hacia la laguna el Chañar. El canal que vincula la Laguna Los Patos con Quirno consiste en un canal excavado en terreno natural de una extensión de 49 km aproximadamente. En la laguna Quirno también se proyecta una estructura de control compuesta por un vertedero con compuerta vertical. A partir de Quirno, continúa con una canalización conectando el Canal del Pelao, el Canal Juncal, el Canal Alcorta y finalmente el Arroyo Pavón hasta su desembocadura en el río Paraná. Dicha traza esta ubicada en su totalidad en territorio santafesino, en el Departamento López.

Luego de la laguna Quirno se proyecta un canal que conecta la mencionada laguna con el canal Juncal que finaliza con dos obras de derivación compuesta por dos vertederos con compuertas verticales uno que deriva aguas hacia el canal Alcorta y el otro hacia el canal Juncal y este finaliza en el Arroyo del Medio.

La laguna Quirno ocupa en la actualidad un área de unos 53 km² para una cota de inundación de 94,50 m IGM, siendo la totalidad del área de aporte directa de unos 138 km² (incluido el cuerpo de agua). Todos los excedentes pluviales del área confluyen a este cuerpo receptor.

El arroyo Pavón fue la alternativa elegida para la conducción de las aguas de la laguna La Picasa hacia el río Paraná. Nace a partir de dos canales artificiales, el canal Alcorta y el Arroyo Pavón. El Canal San Urbano le aporta aguas provenientes de la Laguna Melincué, el cual vuelca sus aguas al Arroyo del Sauce siendo este su afluente principal, por margen izquierda. El arroyo Cabral es el otro afluente importante sobre su margen derecha.

El uso de las tierras de la cuenca presenta un amplio predominio de la agricultura sobre la ganadería, siendo los cultivos principales: trigo, soja y maíz entre otros. La zona de la desembocadura en el Paraná se caracteriza por cultivos de tipo hortícola y la ganadería queda restringida a las zonas bajas en las cuales predominan los pastizales.



Figura 1. Ubicación y esquema de la traza del proyecto.

METODOLOGÍA

Programa de monitoreo

En el período 2001-2003, la Subsecretaría de Recursos Hídricos encomendó al Laboratorio LECA, del Centro de Tecnología y Uso del Agua (CTUA), perteneciente al INA, la realización de una serie de campañas mensuales y estacionales para el monitoreo de la calidad de agua, en distintos puntos de la cuenca de la Laguna La Picasa.

Se seleccionó de dicho período, 6 campañas en las cuales se muestrearon puntos de interés para la modelación, como es el caso de las lagunas y puntos sobre arroyo Pavón. El programa de muestreo esta formado por 10 sitios ubicados en las principales lagunas y cursos fluviales, Laguna La Picasa (S1), Laguna La Larga (S2), Laguna La Infinita (S3), Laguna Martín García (S4), Laguna Los Patos (S5), Laguna Quirno (S6) y puntos ubicados en el arroyo Pavón (S7-S10) (Figuras 2 y 3). Las muestras se tomaron a nivel subsuperficial (0.2m) con muestreador de frascos múltiples y en

profundidad con muestreador tipo Van Dorn (lagunas La Picasa y Quirno).

Se midieron *in-situ* el pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Temperatura y la Salinidad del agua, mediante el empleo de sensores portátiles (Tabla 1).

Tabla 1 Métodos empleados para medir los parámetros *in-situ*

Parámetro	Equipo	Unidad
pH	Orion 290 A Plus	
Oxígeno Disuelto*	YSI 95	mg/l
Salinidad	YSI 30 M	Ppt
Temperatura	YSI 30 M / YSI 95	° C
Conductividad Específica	YSI 30 M	mS/cm

*También se efectuó la determinación en campo, del parámetro OD, mediante el método Winkler

Se determinaron en las muestras las concentraciones de D.B.O y Sólidos Disueltos Totales según APHA (1992)



Figura 2. Localización de los puntos de muestreo en el tramo Laguna La Picasa – Laguna Quirno. S1: Laguna La Picasa, S2: Laguna La Larga, S3: Laguna La Infinita, S4: Laguna Martín Gracia S5: Laguna Los Patos y S6: Laguna Quirno



Figura 3. Localización de los puntos de muestreo en el tramo Laguna Quirno – Río Paraná. S6: Laguna Quirno, S7: Unión Alcorta con el A° Pavón, S8: A° Pavón aguas arriba del A° el Sauce, S9: A° Pavón aguas abajo del A° Cabral, y S10: A° Pavón en la desembocadura del Paraná

Se realizó complementariamente una campaña de muestreo en el mes de Noviembre del 2003 para verificar posibles aumentos de las concentraciones debido al reducido volumen de agua en las lagunas en esa época.

Se midieron *in situ* con una Sonda Multiparamétrica HORIBA U-23: la salinidad (ppt), conductividad (mS/cm), TDS (g/l), OD (mg/l) y pH del agua. Además se tomaron muestras de agua para la determinación en laboratorio de algunas concentraciones de iones, de manera de analizar la composición de la salinidad resultante.

MODELACION

La estimación de las variables: TDS, OD, DBO y temperatura en el canal y lagunas se realizó mediante el empleo de herramientas de simulación hidráulica y de parámetros de calidad de agua.

Se realizó una simplificación de la traza en la cual se consideró para la modelación el canal y su paso por las Lagunas Larga, Infinita, Martín García, Los Patos y Quirno con su respectiva batimetría.

Para la aplicación de un modelo de análisis de calidad de agua resulta imprescindible conocer características hidráulicas como la hidrodinámica del problema, particularmente en este caso: la velocidad, pendientes, profundidades de flujo, la geometría para distintos caudales debido a que la difusión y transporte de la materia dependen de la hidrodinámica del flujo.

En la traza laguna La Picasa-Paraná, existe un sistema de canales interconectados con

lagunas por lo cual el flujo no es uniforme. Se producen cambios en la superficie del agua a causa de remansos, rápidas, etc., por lo que al ser un flujo gradualmente variado, la ecuación de Manning no es válida. Entonces, se necesitó determinar distintos coeficientes de descarga para poder ingresarlos a los modelos de calidad. Para eso se utilizó un modelo para análisis de cursos fluviales el HEC-RAS 3.1.1 (HEC, 2001), con el cual obtuvimos perfiles de velocidad, perfiles longitudinales de la superficie del agua, curvas altura-caudal y velocidad-caudal asociadas a los distintos tramos.

El modelo utilizado para el análisis de la componente calidad, fue el modelo CEQUAL-W2 (Cole, 2002) bidimensional, (longitudinal y vertical) siendo utilizado para ríos, lagos, estuarios, o combinación entre ellos. Este último tiene la capacidad de evaluar procesos hidrodinámicos y de calidad de aguas en dos dimensiones tanto para sistemas estratificados como no estratificados, conectar diversos grupos de calidad de aguas, como grupos de algas, epifiton/ perifiton, CDBO, modelado dinámico de conductos internos, estructuras como vertederos, bombas y compuertas, evaluación del cono de sombra basado en la cubierta topográfica y vegetativa. Para la aplicación del modelo se consideró mezcla homogénea en sentido lateral, siendo importante el paso longitudinal y menos significativo el vertical.

Finalizada la etapa de calibración de los modelos en función de distintos escenarios de diseño se realizó una estimación de las concentraciones de las variables químicas representativas del cambio esperable, por presencia del canal en el sistema.

Escenarios de modelación

Las variables de calidad fueron modeladas considerando un régimen estacionario con un caudal de 10 m³/s desde la Picasa hacia el río Paraná. En su traza se incorporó el aporte de los tributarios Pavón (0.5 – 4 m³/s), Cabral (2 – 8 m³/s) y el Sauce (5 – 20 m³/s) con caudales variables según la época del año. Se realizaron corridas simulando un ciclo anual con los datos del año 2002 y comenzando por el día 1 de Noviembre debido a que en ese año se cuenta con información obtenida durante las campañas de monitoreo.

En la laguna Los Patos se tuvo en consideración la proyección de las dos obras de regulación compuesta por dos vertederos uno que descarga hacia la laguna El Chañar y el otro hacia el canal proyectado que se dirige a la laguna Quirno.

Por otro lado, se simuló una precipitación para analizar el comportamiento del sistema frente al aporte de caudal a la traza. Para ello, se estudio el aporte de una lluvia de recurrencia de 10 años en la cuenca de aporte a la Laguna Los Patos. Este evento aporta un caudal pico de 23.5 m³/s en un total 18 días de duración, eligiendo también arbitrariamente el día 1 de Noviembre como inicio. El caudal de ingreso a la laguna Los Patos se lo considera en forma distribuida con un contenido de sales de 1000 g/m³.

Se realizaron distintas corridas para estimar la variación de los distintos parámetros medidos en el sistema como respuesta a las fluctuaciones de la temperatura del aire utilizando los datos meteorológicos correspondientes al año 2002. Se estimó el comportamiento del sistema en tres escenarios meteorológicos, es decir, considerando temperaturas mínimas, medias y máximas mensuales, con sus correspondientes valores de humedad, viento, nubosidad y presión atmosférica.

Datos Meteorológicos

Para la aplicación de los modelos se procesaron las siguientes variables cuyos datos fueron obtenidos de los registros meteorológicos del INTA de la localidad de San Pedro (Tablas 2, 3 y 4)

Tabla 2. Datos meteorológicos correspondientes a la temperatura máxima de cada mes en el año 2002

MES	Temperatura bulbo seco(°C)	Humedad (%)	Temperatura bulbo húmedo(°C)	Punto de rocío Rocio(°C)	Velocidad viento(m/s)	Dirección viento vto(rad)	Nubosidad
Enero	34.9	81	31.9	31.0	2.5	5.2	0.4
Marzo	34.2	92	33.0	32.7	2.7	5.0	0.4
Abril	26.8	96	26.2	25.9	3.0	5.1	0.4
Mayo	26.5	97	26.1	25.9	2.9	5.2	0.4
Julio	21.2	100	21.2	21.2	2.2	4.9	0.4
Agosto	21.2	100	21.2	21.2	2.2	4.9	0.4
Septiembre	28.2	94	27.4	27.1	3.4	5.0	0.4
Octubre	32.3	94	31.4	31.1	3.9	5.2	0.4
Noviembre	33.2	97	32.8	32.7	2.6	5.2	0.4
Diciembre	32.4	93	31.3	30.9	2.3	5.0	0.4

Tabla 3. Datos meteorológicos correspondientes a la temperatura mínima de cada mes en el año 2002

MES	Temperatura bulbo seco(°C)	Humedad (%)	Temperatura bulbo húmedo(°C)	Punto de rocío Rocio(°C)	Velocidad viento(m/s)	Dirección viento vto(rad)	Nubosidad
Enero	10.5	32	4.2	-7.2	1.1	5.2	0.4
Marzo	6.5	57	3.2	-2.6	1.8	5.2	0.4
Abril	5.0	45	1.0	-7.8	0.9	4.9	0.4
Mayo	2.4	64	0.1	-4.6	3.0	4.9	0.4
Julio	0.5	38	-3.2	-14.0	1.9	5.0	0.4
Agosto	0.9	34	-3.1	-14.9	0.6	4.8	0.4
Septiembre	1.7	50	-1.4	-9.1	1.7	5.0	0.4
Octubre	4.6	48	0.9	-7.2	2.1	5.1	0.4
Noviembre	7.1	47	2.9	-5.1	2.2	5.2	0.4
Diciembre	11.1	39	5.4	-4.4	2.6	5.2	0.4

Tabla 4. Datos meteorológicos medios mensuales en el año 2002

MES	Temperatura bulbo seco(°C)	Humedad (%)	Temperatura bulbo húmedo(°C)	Punto de rocío Rocio(°C)	Velocidad viento(m/s)	Dirección viento vto(rad)	Nubosidad
Enero	21.0	67	19.6	15.2	2.9	5.2	0.4
Marzo	22.0	83	19.6	16.1	2.1	5.2	0.4
Abril	23.9	83	14.3	17.1	2.3	5.2	0.4
Mayo	21.6	85	14.1	18.5	2.3	5.2	0.4
Julio	16.1	83	8.7	12.8	2.2	5.2	0.4
Agosto	15.7	83	10.0	12.8	2.2	5.2	0.4
Septiembre	10.1	75	11.8	7.1	2.2	5.2	0.4
Octubre	10.1	78	16.4	9.9	2.2	5.2	0.4
Noviembre	14.3	71	17.5	9.5	2.3	5.2	0.4
Diciembre	18.9	71	18.4	14.4	2.7	5.2	0.4

Datos limnológicos

La variación de los parámetros en la Laguna La Picasa se consideró variable de mes a mes pero constante para cada período de 30 días. Se realizaron corridas bajo distintas condiciones, de tal manera de observar y estimar posibles comportamientos futuros. La Tabla 5 muestra los valores medidos en la Laguna la Picasa en las distintas campañas de muestreo, estos datos fueron utilizados en la modelación como valores de salida desde la Laguna la Picasa. En la Tabla 6 se detallan los valores iniciales en el sistema adoptados para la modelación los cuales fueron medidos en los diferentes puntos en el mes de Noviembre del 2002.

Tabla 5 Parámetros de calidad de agua medidos en la laguna La Picasa

		Abr 2002	Jun 2002	Ago 2002	Oct 2002	Nov 2002	Ene 2003
Temperatura	°C	17.3	7.9	9.9	19.5	24	31.8
OD	mg ^l ⁻¹	10.97	10.60	7.98	9.30	6.80	9.21
DBO	mg ^l ⁻¹	6.9	6.5	7	8.5	5.5	5.8
TDS	mg ^l ⁻¹	4455	4498	4637	4504	4622	4599

Tabla 6 Parámetros de calidad de agua medidos en los sitios de muestreo en el mes de Noviembre del 2002

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Temperatura	°C	24	27.2	27	20.4	22.6	23.9	19.4	23.4	21.6	20.7
OD	mg ^l ⁻¹	6.80	9.86	10.80	9.26	8.34	10	ND	12.4	8.10	7.78
DBO	mg ^l ⁻¹	5.5	7.6	5.1	8.2	9.4	11.4	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0
TDS	mg ^l ⁻¹	4622	4049	3692	3103	2851	1027	1549	2421	2188	2097
pH	-	9.0	9.9	9	9.3	9.2	9.2	8.8	8.8	8.7	8.8
Profundidad	m	6	1	0.5	1	2	4	1.5	1.5	1.5	1.5

Aplicación del modelo HEC-RAS

Se aplicó el modelo HEC-RAS en todo el tramo comprendido entre la Picasa y el Paraná, para lo cual se subdividió la traza en tramos de iguales características hidráulicas es decir, con la misma pendiente de talud (z), pendiente longitudinal (i), ancho de fondo (Bf) y rugosidad del cauce (n).

Considerando la geometría de la traza se ingresaron las secciones transversales correspondientes a cada progresiva totalizando 147 secciones transversales, donde 12 corresponden a secciones de cauce natural y las restantes corresponden a tramos del canal proyectado. Los perfiles transversales se relevaron cada 250 y 500 m. El tramo de cauce natural, corresponde al arroyo Pavón el cual en todo su recorrido varía notablemente sus características hidráulicas. Las características geométricas de los tramos considerados en el estudio y correspondientes al canal proyectado se encuentran detalladas en la Tabla 7.

Tabla 7 Características hidráulicas de los tramos considerados por el canal proyectado

Designación	Longitud	Profundidad media	Pendiente longitudinal	Ancho Bf	Pendiente del talud	Velocidad media
	(m)	(m)	(m / m)	(m)	(m/m)	(m / s)
Laguna La Picasa - La Larga	9.34	1.00	0.00011	29.40	2.00	0.41
La Larga - Tuerto Venado	1.80	1.00	0.00013	26.90	2.00	0.45
Tuerto Venado - La Infinita	1.70	1.00	0.00034	27.05	2.00	0.45
La Infinita - Martín García 1	6.36	1.00	0.00026	19.05	2.00	0.62
La Infinita - Martín García 2	3.04	1.00	0.00026	29.60	2.00	0.61
La Infinita - Martín García 3	5.44	1.00	0.00066	18.15	2.00	0.99
Martín García - Los Patos	2.40	1.00	0.00002	24.05	2.00	0.77
Los Patos- Quirno	47.82	2.00	0.00010	9.30	2.25	0.51
Quirno- Juncal-Pelao	44.83	1.50	0.00016	13.40	2.25	0.60

Se consideró como condiciones de borde del modelo el tirante aguas abajo siendo el mismo el tirante crítico, ya que en la desembocadura del arroyo Pavón en el Paraná hay un salto de aproximadamente 3 m de alto. Esto es una ventaja desde el punto de vista de la modelación ya que al tener en este punto tirante crítico es un punto de control y además, las aguas del Paraná no interfieren por esta condición con el arroyo Pavón.

El coeficiente de rugosidad (n de Manning), se adoptó igual a 0.025 en el canal proyectado, ya que el mismo va a ser excavado, y 0.035 en el arroyo Pavón (Chow, 1959).

Aplicación del modelo CE-QUALW2

Para la implementación del modelo de calidad de agua se subdividió la traza en tramos de tal manera que la longitud de cada tramo se pueda discretizar en elementos computacionales de 1 km siendo el máximo número de elementos por tramo no mayor a 20. Se modeló las concentraciones de oxígeno disuelto, DBO, temperatura y sólidos disueltos totales.

El modelo a partir de soluciones numéricas define las características hidrodinámicas del medio a estudiar. Esta solución dependerá de la definición de la grilla computacional. Esta grilla discretiza a los distintos cuerpos de agua mediante celdas de longitud, ancho y profundidad definidas cuya dimensión esta dada por segmentos y capas.

Coefficientes hidráulicos

Los datos hidráulicos que requiere se calcularon para cada tramo con los resultados del modelo HEC-RAS. El coeficiente de rugosidad n se adoptó de la misma manera que en la modelación de HEC-RAS.

El coeficiente de dispersión es un parámetro adimensional que tiene en cuenta la turbulencia, difusión molecular y efectos del gradiente de velocidad vertical, que producen la mezcla en el río. En este caso se adoptó un coeficiente de dispersión teórico en función de datos experimentales según la geometría y la hidrodinámica del cauce (Fischer et al., 1979), igual a 210 para todos los tramos.

Coefficientes de reacción

Los datos requeridos por el modelo fueron colectados durante las campañas de muestreo y las tasas y coeficientes se estimaron teóricamente (Chapra, 1997), el coeficiente de degradación de la DBO se adoptó igual a 1 como un valor promedio para todos los tramos. El coeficiente que considera la sedimentación de la DBO se asumió igual a 0.

En cuanto a los coeficientes de reaireación, para los tramos de canal se utilizó la relación de O' Connor-Dobbins la cual se adoptó teniendo en cuenta las profundidades y velocidades del canal

proyectado. Por otro lado, en las lagunas se adoptó un coeficiente de reaeración un poco mayor que estimado para los tramos de canal, ya que en las mismas el factor predominante es el viento. Se utilizó en los cálculos la relación de Broecker et al. (1978) (1):

$$K_2 = 0.864 U_w \quad (1)$$

Donde U_w es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie del agua.

La velocidad del viento media anual en San Pedro para el año 2002 fue de 2.5 m/s por lo que el coeficiente de reaeración en las lagunas dió como resultado un valor de 2.16. La tasa de consumo de oxígeno de los sedimentos se adoptó en función del tipo de fondo, tomando un valor de 0.5.

RESULTADOS

Caracterización química del sistema

Las aguas de la Laguna Picasa registraron una elevada salinidad en términos de sólidos disueltos totales (entre 4455-4700 mg/l de TDS y salinidad 3,9-4,1 g/l y conductividad 7300-7600 umho/cm). Estos valores estarían asociados a mecanismos de mineralización que se dan como resultado de la interacción agua-suelo y al fenómeno de concentración en las lagunas.

La variación de los distintos parámetros relevados en las campañas del año 2002 (excepto la temperatura), en general no presentan grandes variaciones de concentración el tiempo. El oxígeno disuelto es alto en todo el año notándose un pequeño aumento en los meses más fríos. La capacidad de reaeración, y consecuentemente las concentraciones de OD en la laguna, son elevadas ya que al ser una laguna poco profunda, la velocidad media del viento en la zona de 3 m/s, se produce una alta turbulencia que favorece la oxigenación de las aguas.

La demanda bioquímica de oxígeno supera los 3 mg/l, el cual es igual al valor guía de OSN, Río de la Plata, Calidad de las aguas, franja costera sur (1994).

En S6, los valores de los sólidos disueltos totales representan aproximadamente la quinta parte de las concentraciones medidas en la Picasa, entre 1000 - 1200 mg/l. Se considera una laguna de agua dulce con respecto a las características mostradas por la laguna La Picasa. Esto se debe a los importantes aportes superficiales de numerosos canales que actualmente finalizan en ella.

Los datos muestran en general que en todas las lagunas (excepto S6) la salinidad es alta y similar a la de la laguna la Picasa, en contraste con los valores medidos en la misma época del año anterior (Noviembre del 2002). Una de las causas de este incremento de salinidad se puede deber al aumento de la precipitación total en el período Octubre -Noviembre del año 2002 la cual fue 3 veces mayor que la registrada para el mismo período en el año 2003 elevando la concentración de sólidos disueltos totales (Figura 4).

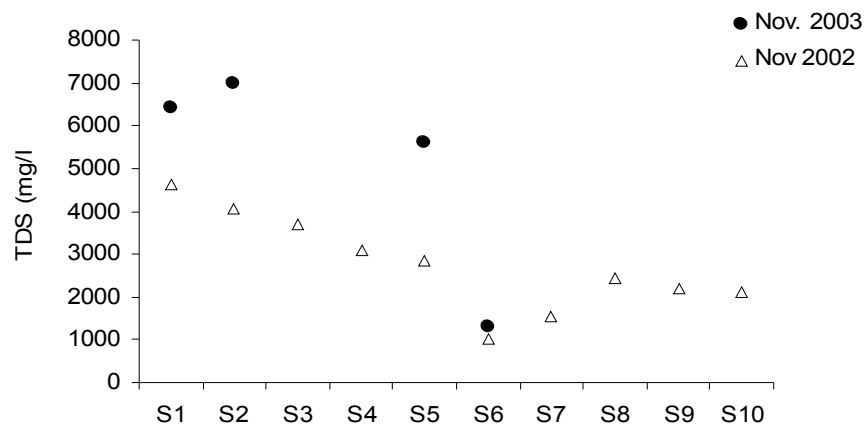


Figura 4. Comparación de los TDS medidos en distinta campañas

Resultados de HEC-RAS

El programa se corrió usando distintos caudales y se obtuvieron curvas H-Q y V-Q , las cuales fueron utilizadas como dato de entrada en el programa CE-QUALW2. Las velocidades estimadas con HEC-RAS fueron en los tramos correspondientes al canal, mayores a 0.5 m/s en todos los tramos. En los puntos correspondientes a las lagunas, las velocidades son casi nulas como es el caso de Quirno. En cuanto a las profundidades máximas de flujo, las mismas presentan una variación en un rango de 0.8- 1.5 m dependiendo del tramo considerado.

Resultados de CEQUAL-W2

Los resultados de las corridas (en marco de los escenarios de máxima, media y mínima) muestran comparativamente las diferencias obtenidas entre las estimaciones en el caso de la temperatura del agua y del OD. Las Figuras 5 y 6 muestran además los resultados de las estimaciones y su contrastación con los valores reales obtenidos en campo

Estimación de la variación temporal de la calidad de agua en la traza del proyecto

Temperatura

Los resultados de las corridas bajo distintas condiciones meteorológicas muestran que el sistema es muy sensible a las variaciones climáticas, y en particular la temperatura varía en 20°C según el mes analizado (Figura 5 a y b).

Los valores medidos en campo tanto en verano (enero, Figura 5 a) como en invierno (agosto, Figura 5 b) se encuentran dentro del rango de variación de los valores estimados, por lo cual no habría diferencias significativas en el sistema al variar el comportamiento morfológico e hidrológico del mismo.

Oxígeno Disuelto

Los valores estimados reflejan las características morfológicas y aumentan en coincidencia con valores reales favorecidos por la aireación del sistema, la cual es elevada en el canal por las altas velocidades y otras características hidráulicas como la pendiente, sección, etc. En las lagunas las concentraciones de OD son menores debido que en estos cuerpos lénticos la reaireación es favorecidos por el efecto del viento en las capas superficiales.

En la laguna de Quirno un menor valor se relaciona con un mayor volumen de agua y por lo tanto una menor aireación. De todas maneras en el sistema lacustre las concentraciones superan los valores admisibles (5 mg/l).

En el punto S9, ubicado aguas abajo de la confluencia del arroyo Pavón con el arroyo Sauce, el OD disminuye debido a la carga de DBO y niveles de OD menores aportados por el arroyo Sauce y el arroyo Rica.

Otro aspecto importante es que la solubilidad del oxígeno disuelto disminuye significativamente cuando la salinidad aumenta coincidiendo con lo reportado por Williams (1998), en consecuencia los valores reales de OD serán menores debido a la presencia de las sales luego de un determinado tiempo de bombeo en el canal. Los valores medidos en campo están comprendidos dentro de la variabilidad predecida por el en marco de los tres escenarios meteorológicos (Figura 5 c y d).

Demanda bioquímica de oxígeno

Los valores de DBO decaen casi instantáneamente en el primer tramo por la alta capacidad de remoción que el sistema presenta y por la renovación del oxígeno debido a sus características hidrodinámicas. En este análisis no se consideraron aportes externos exceptuando el aporte de los tributarios presentes aguas abajo de la Laguna de Quirno. El aumento de la DBO a partir de S8 depende del caudal medio de cada tributario en el período considerado, como así también de la calidad de agua de los mismos.

La variación de la DBO no presenta diferencias apreciables en los distintos meses llegando a un valor casi nulo en la laguna la Infinita en todos los casos (Figura 5 e y f). Los altos valores de DBO medidos en las lagunas intermedias se relacionan con el tipo de sedimento limo-arcilloso, asociado a un alto contenido de materia orgánica (biomasa del sistema) el cual se espera su disminución durante el bombeo. Los altos valores de materia orgánica presente se corresponderían con las altas densidades de fitoplancton y con la alta productividad del sistema, INALI (2002).

Los valores de DBO registrados en los puntos de muestreo correspondientes al arroyo Pavón fueron en todas las campañas menores que 5 mg/l, y los estimados menores que 3 mg/l. La variación de la DBO en función de la progresiva no muestra sensibilidad a los distintos escenarios.

Sólidos Disueltos Totales (TDS)

La concentración de TDS en el trayecto del canal tiende a estabilizarse alcanzando el mismo valor de salida de la Laguna La Picasa. Los resultados de la modelación (iniciada en Noviembre) muestran que en abril el sistema tendrá la misma salinidad del agua de La Picasa y solo se observan diluciones en los puntos en donde ingresan los tributarios.

Si consideramos el funcionamiento del sistema a largo plazo, se sugiere que el sistema tendrá una salinidad menor que la medida en la laguna la Picasa en los muestreos del año 2002-2003.

Los altos valores de TDS registrados en la laguna la Picasa se deberían a que las salidas del sistema son por evaporación y/o infiltración, procesos en los cuales los TDS no son eliminados acumulándose por lo tanto en la laguna.

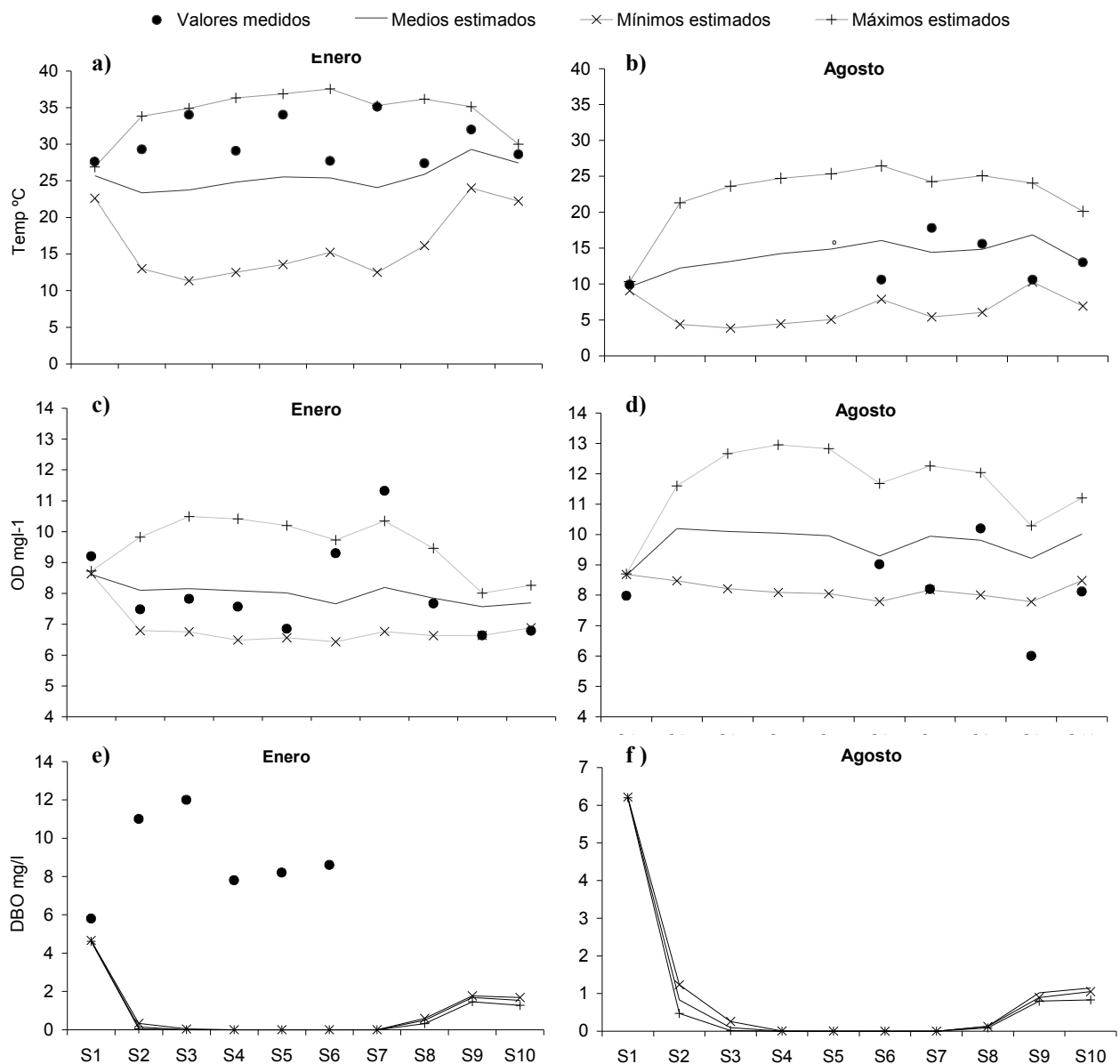


Figura 5. Comparación entre los parámetros de calidad de agua medidos y estimados en distintos puntos del proyecto a) y b) Temperatura c) y d) OD e) y f) DBO

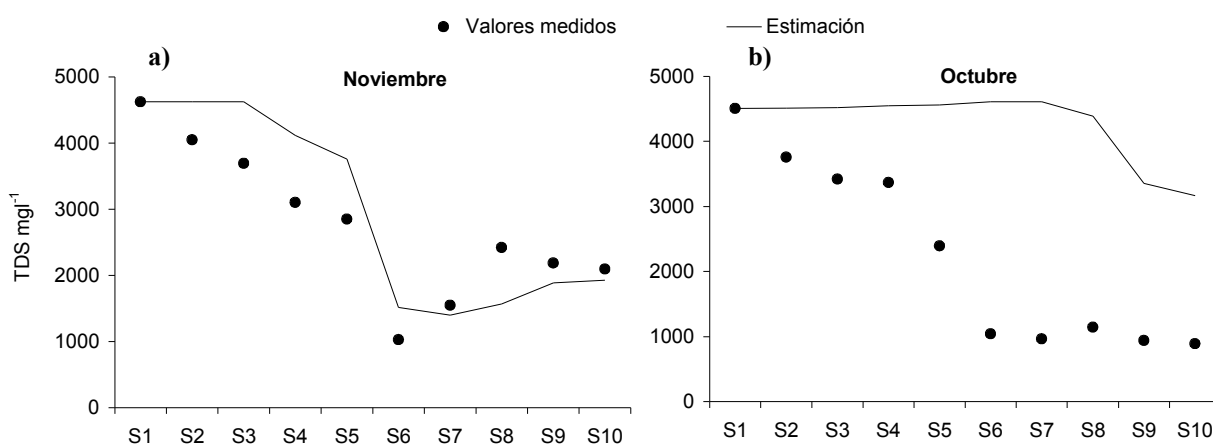


Figura 6. Comparación entre los TDS medidos y estimados en distintos puntos del proyecto

Análisis de la variación de los parámetros en el tiempo

La Figura 7 muestra comparativamente los resultados de la modelación (día 1 de Noviembre como inicio) de las concentraciones de TDS y OD teniendo un 1 pulso de precipitación en la laguna Los Patos (S5), laguna Quirno (S6), y en la estación de muestreo S10 (antes de la desembocadura en el Paraná).

La precipitación ocurrida aproxima los valores de TDS a los valores medidos en campaña (Figura 7 a, b y c). Si no se consideran aportes, en la laguna de Los Patos y en la de Quirno los TDS se estabilizan e igualan su concentración con la de la Laguna La Picasa a los 65 días en la primera y a los 150 días en la segunda.

La entrada de agua por precipitación afecta temporalmente a parámetros como la DBO y el OD. El aporte de agua por precipitaciones aumenta la DBO (debido a un incremento por lavado de material de cuenca) y aumenta también la concentración de OD por la alta aireación que produce la entrada del agua durante un corto período de tiempo.

Puntualmente se destaca en una situación de precipitaciones una mayor dilución en la Laguna Los Patos debido a que el ingreso del aporte de lluvia se produce en ella. El pulso se traslada luego a Quirno y al punto S10 observándose una dilución menor que la ocurrida primeramente.

Los sólidos disueltos totales se incrementan a lo largo del tiempo en la laguna Los Patos, pudiendo su concentración disminuir un 75% si se considera la entrada de una precipitación.

La entrada de un pulso de precipitación no afecta notablemente el comportamiento de OD Y DBO. Esta dilución estima una menor concentración de TDS en Quirno que aquella proveniente desde los Patos debido a la precipitación caída y drenada hacia ese sistema lacustre. En el caso del punto S10 el comportamiento de los parámetros analizados responde a las variaciones estacionales de los tributarios considerados en la modelación.

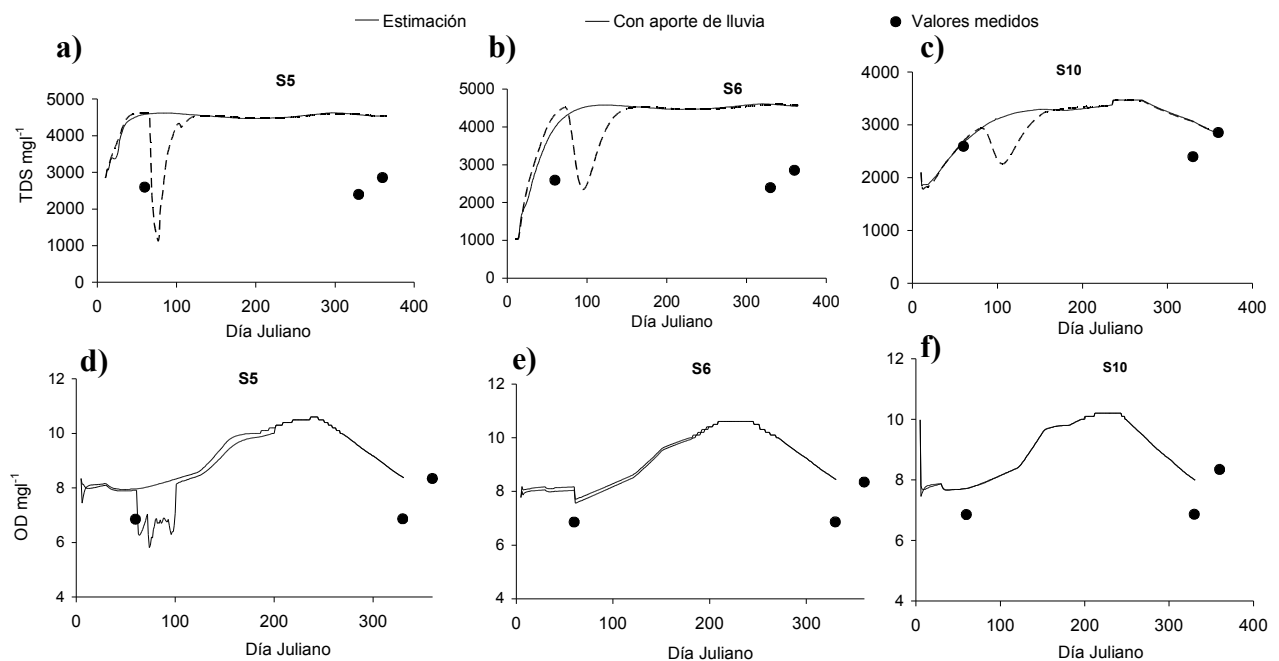


Figura 7. Variación temporal de los TDS y del OD considerando una precipitación en la cuenca de la laguna Los Patos. a) y d) efectos en S5 b) y e) efectos en S6 y c) y f) efectos en S10.

CONCLUSIONES

Mediante el uso de modelos de calidad se pudieron estimar los comportamientos de algunas propiedades del agua de la Laguna La Picasa sobre el sistema de descarga proyectado.

Los resultados obtenidos muestran en general que el sistema será dependiente de la calidad del agua de la laguna La Picasa como de las características hidráulicas que definen la hidrodinámica del problema.

En general los valores estimados de cada parámetro se encuentran dentro de los rangos de variación de los valores medidos con excepción de aquellos relacionados con la salinidad los cuales aumentarán significativamente con respecto a los valores medidos en campaña del 2002. Sin embargo en el 2003 se observaron en campo valores tan altos como los estimados atribuibles en ese momento a las escasas precipitaciones.

Si no se consideran aportes externos y se bombean de manera constante $10\text{m}^3/\text{s}$ los valores en la laguna de Quirno se incrementarán con un valor final igual al valores de salida de la laguna la Picasa 100 días después del comienzo del inicio del bombeo. Una vez que el sistema se encuentre estabilizado la variabilidad en la salinidad del canal se hallará sujeto a la variabilidad de la salinidad propia de la laguna La Picasa y como esta aparentemente no varía en el tiempo, la salinidad en el sistema será constante y elevada durante todo el año. Por analogía, se sugiere que la concentración de cualquier compuesto conservativo como arsénico, conductividad, metales, etc. será igual a la concentración de la laguna La Picasa.

La canalización de las lagunas interceptadas por la traza del proyecto, tiene como consecuencia

impactos positivos y negativos en el sistema, debido a que se modifican en parte las características de los cuerpos de aguas. Este cambio, produce efectos no solamente a nivel hidrológico, sino también en las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo como la disminución del tiempo de residencia, cambios de la temperatura del agua y del proceso de estratificación. El aumento de la turbulencia eleva las concentraciones de OD en el sistema. Estos efectos, se pueden calificar como impactos positivos ya que colaboran con la mejor calidad de agua del sistema.

Por otro lado existen algunos impactos negativos debido a que la velocidad del flujo en el sistema aumenta, se incrementará la turbidez y el transporte de las partículas en suspensión ya que las mismas no logran sedimentar como antes. Esto trae aparejado un aumento del coeficiente de extinción de luz y por lo tanto una disminución de la capacidad de producción autótrofa. Otro factor se relaciona con la exportación de nutrientes la cual se realizará junto con el material transportado hacia el río Paraná afectando posiblemente en el futuro los ciclos naturales del carbono, metales y nutrientes.

BIBLIOGRAFÍA

- APHA** (1992) Standard Methods for the Examination of Water and Weastwater, 18 ed., Washington, DC.
- Broecker, H. C., Petermann, J. and Siems, W.** (1978) “*The Influence of Wind on CO2 Exchange in a Wind-Wave Tunnel, J. Marine Res*”. 36(4):595-610
- Chapra, S. C.** (1997) *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw Hill, USA.
- Chow, V. T.** (1959) *Open- Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, USA.
- Cole, T. M. and Wells, S. A.** (2002) CE-QUAL-W2: *A two dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model*, Version 3.1, Instruction Report EL-2002-1, US Army Engineering Research Development Center, Vicksburg, MS.
- Fischer, H. B.; List, E. G.; Koh, R. C. Y.; Imberger, J. and Brooks, N. H.** (1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, USA.
- Hydrologic Engineering Center (HEC)** (2001), *HEC – RAS Hydraulic Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- INALI** (2002) *Muestreo Limnológico Arroyo Pavón*. Informe técnico. Instituto Nacional de Limnología. CONICET
- OSN, AGOSBA y SIHN** (1994) *Río de la Plata. Calidad de las aguas, franja costera sur*. 115 páginas y 53 páginas de Anexo, Buenos Aires.
- Williams, W. D.** (1998). *Management of Inland Saline Waters. Guidelines of Lake Management*. Vol. 6. International Lake Environment Committee United Nations Environment Programme.