

## MODELACIÓN DE LA AUTODEPURACIÓN DEL AGUA EN EL TRAMO MEDIO DEL RÍO SAN CARLOS\*

### Modelation of the autodepuration of the water in the half tract of San Carlos River

Freddy La Cruz <sup>(1)</sup>, Franklin Paredes <sup>(2)</sup> y Edilberto Guevara <sup>(3)</sup>

(1, 2) Programa Ingeniería, Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”, UNELLEZ, Carretera vía Manrique Km. 4. San Carlos, San Carlos, Estado Cojedes 2201. Venezuela.

(3) Escuela de Ingeniería Civil, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.

Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. *e-mail: eguevara@thor.uc.edu.ve*

\*Tesis de maestría Área de Postgrado Unellez

Recibido: 7-04-20056 / Aceptado: 7-05-2006

### RESUMEN

En este estudio se evaluó la autodepuración del río San Carlos en el tramo acotado por las coordenadas UTM: 1.066.210,070 N; 544.020,736 E y 1.054.091,096 N; 537.475,981 E durante el año 2003. Fue una investigación de campo del tipo exploratorio-explicativo. Se escogió este tramo debido a que cerca del 60 % de las aguas cloacales provenientes de la ciudad de San Carlos son vertidas en él. Se ajustaron los valores experimentales al Modelo de Déficit de Oxígeno de Streeter Phelps; las variables incluidas fueron: DBO última del río en la zona de mezcla, déficit de oxígeno disuelto en la zona de mezcla, déficit de oxígeno disuelto del río en la localidad “Caño Hondo” y tiempo de recorrido de la mezcla. Un análisis de regresión no lineal se empleó para obtener las constantes cinéticas del modelo: tasa de desoxigenación y tasa de reaireación. Se realizó un Análisis Factorial de Componentes Principales para determinar las variables que influían la concentración de oxígeno disuelto en el tramo referido. Se encontró que la época de estiaje del río San Carlos se da durante: febrero, marzo y abril; la tasa de desoxigenación en el tramo estudiado fue  $0,016791 \text{ días}^{-1}$ , mientras que la tasa de reaireación fue  $0,661118 \text{ días}^{-1}$ . El modelo de Streeter Phelps generado tuvo un  $R^2$  igual a 47,187 %; no se hallaron zonas anóxicas. El modelo generado estableció que la máxima carga poluente que podía soportar el río San Carlos en dicho tramo durante la época de estiaje, sin poner en peligro la vida acuática presente en Caño Hondo es 131.629,79 kg DBO<sub>5</sub>/día. Se encontró que la concentración de oxígeno disuelto del río San Carlos en el tramo señalado está asociada principalmente a un componente hidroerosivo del río y en segundo lugar a la variación térmica orgánica altitudinal.

**Palabras clave:** autodepuración, Streeter-Phelps, río San Carlos, modelo matemático

### SUMMARY

The autodepuración of the river San Carlos was evaluated in the tract delimited by the coordinated UTM: 1.066.210,070 N; 544.020,736 and and 1.054.091,096 N; 537.475,981 E during the year 2003. It was an investigation of field of the type: exploratory - explanatory. This tract was chosen because near 60 % of the waters cloacales coming from San Carlos'city are poured in him. The experimental values were adjusted to the Model of Deficit of Oxygen of Streeter Phelps; the variables included were: DBO last of the river in the mixture area, deficit of dissolved oxygen in the mixture area, deficit of dissolved oxygen of the river in the town "Caño Hondo" and the time of journey of the mixture. An analysis of non lineal regression was used to obtain the kinetic constants of the model: desoxygenation rate and reaireación rate. A Factorial Analysis of Main Components was carried out to determine the variables that influenced the oxygen concentration dissolved in the referred tract. We find that the time of low water of the river San Carlos is given during: February, March and April; the desoxygenation rate in the studied tract was  $0,016791 \text{ day}^{-1}$ , while the reaireación rate was  $0.661118 \text{ day}^{-1}$ . The pattern of Streeter Phelps generated had a  $R^2$  equal to 47,187 %; we don't find areas anoxics. The model generated established that the maxim loads poluente that could support the river San Carlos in this tract during the low water time, without putting in danger the life aquatic present in Caño Hondo is 131.629,79 kg  $\text{DBO}_5/\text{día}$ . We find that the concentration of dissolved oxygen of the river San Carlos in the signal tract is associate mainly to a component erosive hidrico of the river and in second place to a variation thermal organic altitudinal.

**Key words:** *autodepuración, Streeter -Phelps, river San Carlos, mathematical model*

## INTRODUCCIÓN

Uno de los recursos hídricos superficiales de mayor importancia en el estado Cojedes es el río San Carlos, pues proporciona agua para consumo humano a: San Carlos, Tinaco, Tinaquillo y otras pequeñas comunidades periféricas; sin embargo, desde hace unas tres décadas sus aguas han sido utilizadas intensamente como receptáculo final de las descargas cloacales generadas en la ciudad de San Carlos, tal situación ha traído como consecuencia el deterioro paulatino de la calidad de sus aguas, escenario que se agudiza al considerar la disminución temporal de los gastos medios mensuales del río y el incremento sostenido del caudal de agua servida evacuada.

Dada esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo modelar la autodepuración del agua en el tramo medio del río San Carlos tomando como referencia el Modelo de Déficit de Oxígeno propuesto por Streeter - Phelps. Una vez obtenido el modelo matemático se infirió, entre otras cosas, el comportamiento del déficit de oxígeno disuelto en función de la carga orgánica incorporada por los vertidos domésticos provenientes de la ciudad de San Carlos. Del mismo modo, se evaluó los factores que afectaban la concentración de oxígeno disuelto del río. Este conocimiento constituirá una valiosa herramienta al realizar estudios de impacto ambiental y/o al definir estrategias conducentes a preservar el recurso agua. Es importante resaltar, que el trayecto del río estudiado tiene una longitud aproximada de 24 Km. y esta acotado por las riberas aledañas tanto al Barrio Arizona como a la comunidad Caño Hondo.

## MARCO TEÓRICO

Streeter y Phelps (1925: citado en Kiely, 1999 y Tchobanoglous y Schroeder, 1987) desarrollaron un modelo matemático el cual suponía que cuando un residuo biodegradable se vertía a un curso de agua o río, consumía oxígeno, y éste era únicamente renovado por la aireación atmosférica. Esto es equivalente a no considerar la demanda de oxígeno para la fotosíntesis, la respiración, y la asociada a los sedimentos. En conclusión, el modelo de Déficit de Oxígeno de Streeter -Phelps, se resume a la siguiente ecuación:

$$D(t) = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1 t} - e^{-K_2 t}) + D_0 e^{-K_2 t} \quad (1)$$

Donde:

$L_0$ : demanda de oxígeno en  $t = t_0$  (la DBO),  $M/L^3$

$D_0$ : déficit de oxígeno disuelto en  $t = t_0$ ,  $M/L^3$

$D$ : déficit de oxígeno disuelto saturado en cualquier momento  $t$ ,  $M/L^3$

$K_1$ : velocidad de desoxigenación,  $1/T$

$K_2$ : velocidad de reaireación,  $1/T$

Normalmente se necesita saber el OD mínimo en el río y ver si éste se hace anóxico o peor. También, a veces, es importante saber la distancia agua abajo en que se produce esta condición fatal. El déficit máximo de oxígeno ( $D_c$ ) que tiene lugar a una distancia  $x_c$ , aguas abajo del punto de descarga se puede calcular estableciendo que  $dD/dt = 0$ , es decir (Kiely, 1999):

$$\frac{dD}{dt} = K_1 L o e^{-K_1 t} - K_2 D c \Rightarrow D c = \frac{K_1}{K_2} L o e^{-K_1 t} \quad (2)$$

Donde:

$D_c$ : déficit máximo de oxígeno, M/L<sup>3</sup>

Para determinar el tiempo en el que se produce el déficit crítico de oxígeno, la Ecuación 1 se deriva con respecto a  $t$ , se iguala a cero, y se procede a despejar  $t_c$ :

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K_1 L o}{K_1 + K_2} (K_2 e^{-K_1 t} - K_1 e^{-K_2 t}) - K_2 D e^{-K_2 t} = 0 \Rightarrow t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \left\{ \frac{K_2}{K_1} \left[ 1 - \frac{D c (K_2 - K_1)}{K_1 L o} \right] \right\} \quad (3)$$

Donde:

$t_c$ : tiempo en que se da el  $D_c$ , T

Kiely (1999), afirmó que el Modelo de Déficit de Oxígeno de Streeter - Phelps presentado, está incompleto, si bien sirve para conseguir valores iniciales sobre el comportamiento del OD, no incluye parámetros como: sedimentación, fotosíntesis, resuspensión, advección y dispersión.

Actualmente, los modelos para predecir el déficit de oxígeno en cauces superficiales se fundamentan en modificaciones del modelo general de Streeter - Phelps; obviamente, en la medida que se incluyen nuevas variables de estados se hace necesario recabar mayor cantidad de datos en el campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### A.- Unidad de estudio

La cuenca del río San Carlos está ubicada al noroccidente del país, abarcando porciones importantes de los estados: Yaracuy, Carabobo y Cojedes. La cuenca alta y media se ubica astronómicamente entre las coordenadas 9° 04' 00" a 10° 36' 00" de latitud norte y 68° 12' 00" a 68° 41' 00" de longitud oeste, ocupando un área de 1.497,3 Km<sup>2</sup>, correspondiendo al Estado Cojedes 323,5 Km<sup>2</sup>; que en términos porcentuales equivalen a 21,8 % (Desarrollos Hidráulicos Cojedes, Canagro International y Ministerio del Ambiente y de Los Recursos Naturales Renovables, 1997).

El río San Carlos nace en la confluencia de la fila de Bejuma y la fila de Aguirre, en el cerro San Isidro (≈1480 msnm), llevando el nombre de río Aguirre y luego río Tirgua. Es denominado río San Carlos desde la confluencia del río Oruje y el río Tirgua, al llegar a la frontera política del estado Cojedes con el estado Carabobo. Los principales ríos tributarios del río San Carlos son: Bejuma, Aguirre, Onoto, Oruje, San

Pedro, Cabuy y Mapuey (Ruiz, 1990).

## B.- Fases de la investigación

### Fase 1. Determinación de la época de estiaje del río San Carlos.

En el Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales [MARN] San Carlos, se recabó datos históricos de los caudales medios mensuales del río San Carlos, registrado en la estación hidrológica Paso Viboral. A continuación, se efectuó un análisis de los caudales medios mensuales, que consistió en calcular el promedio y la desviación estándar de los registros mensuales; los tres meses que poseían menores caudales medios, fueron considerados la época de estiaje del río. Se efectuó la investigación en este período, pues se dan las condiciones más desfavorables para los procesos biológicos asociados con la autodepuración del río.

### Fase 2. Determinación de puntos de muestreo.

Haciendo uso de un ortofotomapa escala 1: 25.000 de la cuenca media del río San Carlos, se escogió tres puntos de muestreos. Las dos primeros ubicados a la altura del Barrio Arizona; coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM): 1.066.210,070 Norte, 544.020,736 Este, Cota: 139,781 m; una última situada aguas abajo, en la localidad Caño Hondo; coordenadas UTM: 1.054.091,096 Norte, 537.475,981 Este, Cota: 108,989 m. La longitud del tramo de río evaluada fue de 24.452,96 m. El punto 2 de muestreo, es una descarga de aguas servidas domésticas procedente de la ciudad de San Carlos. Entre la zona de mezcla y el punto 3 de muestreo no se halló fuentes importantes de vertidos domésticos o cauces naturales (información extraída del ortofotomapa).

### Fase 3. Muestreo en campo.

La toma de muestra se realizó la primera y última quincena de cada mes que conformó la época de estiaje del río. La metodología seguida en una sesión de muestreo fue: en los puntos de muestreo 1 y 3 se recogieron tres muestras puntuales a 1,5 m de cada orilla y en el centro del cauce respectivamente, cada una a 15 cm. de profundidad. Con relación al punto de muestreo 2, se captaron dos muestras puntuales en la descarga principal y una en la descarga secundaria. Cada muestra contenía 5.000 cm<sup>3</sup> de líquido, y fueron preservadas en frío hasta su análisis; en la determinación de la concentración de oxígeno disuelto se empleó botellas Winkler de 500 cm<sup>3</sup>; todas las sesiones se llevaron a cabo durante la mañana.

### Fase 4. Determinación de los parámetros del modelo.

Antes de determinar de los parámetros del modelo se realizó varios balances de masa por componente en la zona de mezcla, con el propósito de cuantificar la DBO<sub>5</sub>, el OD, la temperatura y el caudal de la mezcla (vertido cloacal + agua del río). La diferencia entre el OD de la mezcla ([DBO<sub>5</sub>]M) y el OD de saturación del agua en el punto de muestreo 1 corresponde a Do en la Ecuación 1.

A partir de [DBO<sub>5</sub>]M se obtuvo la DBOL (DBO última), que equivale a Lo en la Ecuación 1. Para ello se aplicó la siguiente expresión:

$$Lo = \frac{DBO_5 \text{ de mezcla}}{1 - e^{-5k}} \quad (4)$$

Donde:

Lo: DBO última del agua en la zona de mezcla, M/L<sup>3</sup>

DBO<sub>5</sub> de mezcla: DBO a los 5 días y 20 °C del agua en la zona de mezcla, M/L<sup>3</sup>

k: tasa de desoxigenación del vertido a 20 °C, M/L<sup>3</sup>

A fin de determinar el parámetro k de la Ecuación 4 se recolectó una muestra compuesta de vertido, la cual se incubó a 20 °C. El segundo, cuarto, sexto, octavo y décimo día se midió su DBO; estos datos se ajustaron por el método de mínimos cuadrado al siguiente modelo (LIPESA, 1998):

$$DBO(t) = Lu(1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

Donde:

Lu: DBO última de la muestra, M/L<sup>3</sup>

DBO (t): DBO en cualquier tiempo t, M/L<sup>3</sup>

k: tasa de desoxigenación del vertido a 20 °C, M/L<sup>3</sup>

t: tiempo medido en días, T

Dado que el OD de saturación en los puntos de muestreo 1 y 3 depende de la presión atmosférica, salinidad y temperatura del agua, se desarrolló un modelo usando los datos presentados por Metcalf y Eddy Inc. (1996) y el modelo de atmósfera politrópica propuesto por Masey (1979). Para su generación se empleó la técnica estadística: análisis de regresión múltiple; se usó el módulo Multiple Regresión del Software STATGRAPHIC Plus for Windows (versión 2.1, 1996). El referido modelo permitió determinar el OD de saturación del río en función de la temperatura del agua, salinidad y la altitud del punto muestral en cuestión. A fin de evaluar la calidad predictora del modelo de OD de saturación se determinó: el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el análisis de varianza, la matriz de correlación de los predictores, entre otros; asimismo, se graficó: los valores predichos por el modelo versus los observados y la distribución de los residuales en papel normal (Montgomery, 1991; Bartés et al., 1999).

La diferencia entre el OD de saturación y el OD del agua en el punto muestral 3, corresponde a D(t) en la Ecuación 1. Por otro lado, la variable "t" de la referida ecuación, se estableció dividiendo la distancia entre la zona de mezcla y el punto muestral 3 (24.452,96 m) con la velocidad promedio del río en los puntos muestrales 1 y 3.

Los parámetros del modelo son las constantes K<sub>1</sub> y K<sub>2</sub> de la Ecuación 1. Para calcularlas, se procesó todas las D(t), Lo, t y Do derivadas de cada una de las sesiones de muestreo, utilizando el software estadístico STATISTICA (versión 6.0, 2000); empleando el módulo Nonlinear Regression, en su componente User-Specified Regresión Function, se determinaron los parámetros mencionados. Dado que se partió de un modelo predefinido (Ecuación 1), el programa ajustó la función a través de una función de pérdida [loss function]. Con el propósito de evaluar la calidad predictora del modelo se calculó: el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el porcentaje de la varianza explicada por el modelo, el error estándar de

los parámetros estimados, la matriz de correlación de los parámetros estimados, entre otros; asimismo, se graficó: los valores predichos por el modelo versus los observados y la distribución de los residuales (Montgomery, 1991; Bartés et al., 1999).

A fin de determinar que factores afectan la concentración de oxígeno en época de estiaje en el tramo acotado por las coordenadas UTM: 1.066.210,070 N; 544.020,736 E y 1.054.091,096 N; 537.475,981 E del río San Carlos, se aplicó un Análisis Factorial por Componentes Principales (Bolívar, 2002; Morales, 2003; Sampieri *et al.*, 2002), a las variables medidas en campo, el cual permitió desarrollar un modelo de regresión lineal para predecir la concentración de oxígeno disuelto tanto en el punto muestral 1 como el punto muestral 2.

#### **Fase 5.** Ubicación de posibles zonas anóxicas.

Dado que en esta fase se conocían los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  del modelo de Streeter Phelps, se usó la Ecuación 3 para determinar el  $t_c$ , previa definición de los valores de  $D_0$  y  $L_0$ . Ahora, para determinar a cuanta distancia de la zona de mezcla se presentará el déficit de oxígeno crítico, se multiplicó la velocidad promedio del río en los puntos muestrales 1 y 3 por el  $t_c$ . Sustituyendo  $t_c$  en la Ecuación 2 se determinó el déficit de oxígeno crítico ( $D_c$ ). Restando el OD de saturación aguas arriba de la zona de mezcla al  $OD_c$  se precisó el OD en la zona crítica.

**Fase 6.** Cuantificación de la máxima carga orgánica que el río San Carlos puede soportar sin poner en riesgo la vida acuática presente en la localidad Caño Hondo durante la época de estiaje.

Prefijando valores de  $D(t)$ ,  $D_0$ , y  $t$  y utilizando la Ecuación 1, se determinó los valores máximos de  $L_0$  en el punto de mezcla. Dado que  $L_0$  equivale a la  $[DBO_5]_M$  se halló la carga másica de DBO (o sea, el producto  $Q_v \cdot [DBO_5]_v$ ; caudal del vertido y demanda bioquímica de oxígeno del vertido) para los valores medios de  $Q_r$  (caudal del río), y  $[DBO_5]_r$  (demanda bioquímica de oxígeno del río). La manipulación de las ecuaciones se realizó empleando el software matemático Maple 8.0.

## **RESULTADOS**

Se encontró que los meses donde históricamente se dan los caudales de estiaje son: febrero, marzo y abril. En el caso de febrero y marzo, ostentaron una desviación estándar pequeña en comparación con el resto de los meses, lo que permitió inferir una baja dispersión en los registros; por su parte el mes de abril, presentó una dispersión aproximadamente dos veces mayor a la de febrero y marzo, situación que reveló fluctuaciones importantes en los registros históricos.

El modelo generado para predecir la concentración de oxígeno disuelto de saturación en el agua del río explicó 99,2736 % de la variabilidad de la variable respuesta (logaritmo neperiano de la concentración de oxígeno de saturación); El error estándar de los estimadores, que es la desviación estándar de los residuales fue 0,0216. La media del error absoluto, que representa el valor promedio de los residuales fue 0,0179. Por último, el estadístico de Durbin Watson advirtió la presencia de residuales seriados correlacionados, esta situación confirmó que los datos procesados no se encontraban aleatoriamente distribuidos; en consecuencia, los estimadores pudiesen llegar a ser inestables (Tabla 1).

Para calcular los parámetros del modelo de Déficit de Oxígeno de Streeter Phelps se determinaron las

variables de la Ecuación 1. La primera que se cuantificó fue el déficit de oxígeno disuelto (Do) en la zona de mezcla, restando el oxígeno disuelto en dicha zona, con el oxígeno de saturación del agua en el punto de muestreo 1. Debe resaltarse que el oxígeno de saturación del agua en el punto de muestreo 1 se encontró a través del modelo referido en el párrafo anterior; donde la altitud era 139,781 m. Los valores de sobresaturación (Do negativos) mostrados en la Tabla 2 presumiblemente se deben a la gran turbulencia que tiene el río San Carlos o al desarrollo de poblaciones de algas microscópicas (clorelas, euglenas, entre otras) que en presencia de la luz solar, producen grandes cantidades de oxígeno, haciendo que haya una alta concentración de oxígeno disuelto, hasta llegar a valores de sobresaturación (Suematsu, 1997; Kiely, 1999:426).

**Tabla 1. Parámetros del modelo para predecir el oxígeno disuelto de saturación en el río San Carlos.**

Parámetro	Estimador	Error estándar	t de Student	Valor p
Constante	2,6250	0,0016	1600,0600	0,0000 *
Altitud	-0,0001	0,0000 <sup>A</sup>	-18,1872	0,0000 *
Salinidad	-0,0059	0,0000 <sup>A</sup>	-116,9390	0,0000 *
Temperatura	-0,0198	0,0000 <sup>A</sup>	-303,6400	0,0000 *

*Nota:* \*:  $p < 0,01$ ; <sup>A</sup>: valor inferior a 0,00005.

**Tabla 2. Déficit de oxígeno disuelto (Do) en la zona de mezcla durante la época de estiaje.**

Fecha <sup>A</sup>	OD mezcla (mg/l) <sup>B</sup>	Temperatura (°C) <sup>B</sup>	Salinidad (mg/l)	OD Saturación (mg/l)	Do (mg/l)
14/02/2003	7,765	29,977	2,500	7,377	-0,388
28/02/2003	7,607	29,457	2,894	7,436	-0,171
14/03/2003	7,728	28,624	2,017	7,599	-0,129
28/03/2003	6,889	30,346	1,568	7,363	0,474
20/04/2003	6,608	30,950	1,894	7,261	0,653
30/04/2003	7,413	29,837	2,002	7,419	0,006

*Nota:* A: fecha en la cual se realizó la toma de muestra en el punto 1; <sup>B</sup>: calculado por medio de balances de masa.

Cerca de un 60 % del agua residual generada en la ciudad de San Carlos es vertida en el río del mismo nombre a la altura del Barrio Arizona; específicamente en el lugar con coordenadas UTM: 1.066.210,070 Norte, 544.020,736 Este, Cota: 139,781 m, por dos vías: un canal de tierra y una tubería de concreto de 12 pulgadas (diámetro interno). Ambas descargas se unen para conformar un vertido único, que luego confluye con el río San Carlos. La tasa de desoxigenación del vertido se determinó incubando una muestra



compuesta de agua residual en proporción 50:50 (una parte de la descarga principal versus una de la descarga secundaria). La temperatura de incubación fue 20 ° C, la medición de DBO se realizó a intervalo de dos días. La Tabla 3 resume las lecturas de DBO efectuadas.

**Tabla 3. Análisis de tratabilidad de muestra compuesta del vertido.**

Tiempo (días)	DBO (mg/l)
2	210,070
4	218,000
6	284,980
8	340,981
10	342,206

Los valores indicados en la Tabla 3 fueron ajustados a la Ecuación 5 a través de un análisis de regresión no lineal, para ello se empleó el método de estimación: Quasi - Newton. La función de pérdida [loss function] usada fue:  $(\text{valor observado} - \text{valor predicho})^2$ ; al finalizar las interacciones la función de pérdida se estabilizó en 3.715,8916.

Se encontró que la DBO última de la muestra era 347,7379 mg/l, mientras que la tasa de desoxigenación del vertido a 20 ° C resultó 0,334448 día<sup>-1</sup>. Por otro lado, el modelo logró explicar un 95,431 % de la varianza de la respuesta.

Conocida la tasa de desoxigenación del vertido se calculó la DBO última del agua (Lo) en la zona de mezcla haciendo uso de la Ecuación 4. Para cuantificar la DBO<sub>5</sub> se realizó un balance de masa al componente DBO<sub>5</sub> en el sistema río - vertido.

La variable D(t) o déficit de oxígeno disuelto en el punto de muestreo 3 (refiérase a Ecuación 1), se determinó restando la concentración de oxígeno de saturación en el referido punto muestral con la concentración de oxígeno medida en campo. El oxígeno de saturación del agua en el punto de muestreo 3 fue determinado a través del modelo matemático mencionado con anterioridad; donde la altitud era 108,989 m. Los valores de sobresaturación (D(t) negativos) mostrados en la Tabla 4 presumiblemente se deben a la gran turbulencia que tiene el río San Carlos o al desarrollo de poblaciones de algas microscópicas (clorelas, euglenas, entre otras) que en presencia de la luz solar, producen grandes cantidades de oxígeno, haciendo que haya una alta concentración de oxígeno disuelto, hasta llegar a valores de sobresaturación (Suematsu, 1997, Kiely, 1999:426). El hecho de descubrir sobresaturación en oxígeno en el agua del río San Carlos no es nuevo, pues coincide con lo reportado por Pardi *et al.* (1997).

A fin de determinar el tiempo de recorrido de la mezcla “t” (refiérase a Ecuación 1), se promedió las velocidades media del río en los puntos de muestreo 1 y 3. Se supuso un flujo tipo pistón uniforme con un perfil de velocidades constante a fin de simplificar el cálculo del tiempo de recorrido (Tabla 5).

**Tabla 4. Déficit de oxígeno disuelto [D(t)] en el punto de muestreo 3 durante la época de estiaje.**

Fecha <sup>A</sup>	OD medida (mg/l)	Temperatura (° C)	Salinidad (mg/l)	OD saturación (mg/l)	D(t) (mg/l)
14/02/2003	7,037	31,740	2,908	7,132	0,095
28/02/2003	7,287	32,063	3,035	7,081	-0,206
14/03/2003	7,830	30,553	2,132	7,336	-0,494
28/03/2003	6,903	32,430	2,005	7,073	0,17
20/04/2003	6,347	31,133	2,010	7,257	0,91
30/04/2003	6,833	31,584	2,513	7,171	0,338

*Nota:* <sup>A</sup>: fecha en la cual se realizó la toma de muestra en el punto muestral 3 (Caño Hondo).

**Tabla 5. Tiempo de recorrido de la mezcla para el tramo Barrio Arizona Caño Hondo.**

Fecha <sup>A</sup>	Velocidad (m/s) Punto 1	Velocidad (m/s) Punto 3	Velocidad media (m/s)	t <sup>B</sup> (días)
14/02/2003	0,640	1,600	1,12	0,253
28/02/2003	1,560	1,040	1,30	0,218
14/03/2003	1,530	1,050	1,29	0,219
28/03/2003	1,670	0,560	1,12	0,254
20/04/2003	1,050	0,770	0,91	0,311
30/04/2003	0,870	0,750	0,81	0,349

*Nota:* <sup>A</sup>: fecha en la cual se realizó el vadeo en el Barrio Arizona y Caño Hondo; <sup>B</sup>: tiempo de recorrido de la mezcla considerando un flujo pistón uniforme con velocidad constante y una longitud de tramo igual a 24.452,96 m.

Los valores  $D_0$ ,  $L_0$ ,  $D(t)$  y  $t$  fueron ajustados a la Ecuación 1 a través de un análisis de regresión no lineal, para ello se empleó el método de estimación: Quasi-Newton. La función de pérdida [loss function] usada fue:  $(\text{valor observado} - \text{valor predicho})^2$ ; al finalizar las interacciones dicha función se estabilizó en 0,6108.

Se encontró que la velocidad de desoxigenación era  $0,016791 \text{ día}^{-1}$ , mientras que la velocidad de reaireación resultó ser  $0,661118 \text{ día}^{-1}$ . Por otro lado, un 47,187 % de la varianza del déficit de oxígeno saturado fue explicada por el modelo encontrado.

A fin de determinar que factores afectaban la concentración de oxígeno disuelto en los puntos muestrales 1 y 3 se realizó un Análisis Factorial por Componentes Principales (AFCP) a las variables medidas en el estudio (refiérase al inciso MATERIALES Y MÉTODOS). Se evidenció que en el factor 1

subyace un componente hidroerosivo propio del río San Carlos; en el factor 2 subyace un componente de variación térmica orgánica altitudinal y en el factor 3 subyace un componente atmosférico, y que todos ellos influyen en diferentes grados la concentración del oxígeno disuelto del río.

La concentración de oxígeno disuelto de saturación crítico se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$OD\ crítico = OD\ saturación - 0,0253986429 \cdot 0,Lo \cdot e^{-0,0260605453 \cdot 9 \cdot Ln \cdot 39,37218235 \cdot 1 - 1510,796561 \cdot \frac{Do}{Lo}} \quad (6)$$

A partir de la Ecuación 6 se encontró que la carga poluente proveniente de la ciudad de San Carlos en el período comprendido entre el 14/02/2003 a 30/04/2003 no ocasionó zonas con concentraciones de oxígeno disueltos críticas. Obviamente esta situación se esperaba, pues el tramo estudiado presentó: una tasa de aireación elevada, una tasa de desoxigenación baja y una “Lo” relativamente pequeña. No obstante, debe aclararse que esta situación es circunstancial, ya que una reducción del caudal del río, un aumento de la carga poluente, un aumento de la temperatura en la zona de mezcla y/o un aumento de la salinidad en el río, generaría zona críticas en el tramo.

Haciendo uso de balances de masa en la zona de mezcla se encontró que la carga poluente máxima admisible por el río era: 131.629,7932 Kg DBO<sub>5</sub>/día. Este valor es 51 veces mayor que el valor más alto de carga poluente que recibió el río durante el estudio.

## CONCLUSIONES

Del análisis y discusión de los resultados de esta investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1.- Los meses en que se dan los caudales mínimos o ecológicos en el río San Carlos son: febrero, marzo y abril.
- 2.- El modelo matemático para determinar la concentración de oxígeno saturado en el agua del río San Carlos como una función de la temperatura del agua (medida en grados centígrados), la altitud del punto muestral (medida en metros sobre el nivel del mar) y la salinidad del agua (expresada en mg/l) es ( $R^2 = 99,2736\%$ ):

$$OD_{saturación} = e^{(2,6251 - 0,00012105 \cdot \text{Altitud} - 0,005934 \cdot \text{Salinidad} - 0,01985 \cdot \text{Temperatura})}$$

- 3.- La tasa de desoxigenación del río San Carlos en el tramo acotado por Barrio Arizona Caño Hondo, durante la época de estiaje fue: 0,016791 día<sup>-1</sup>.
- 4.- La tasa de reaireación del río San Carlos en el tramo acotado por Barrio Arizona Caño Hondo, durante la época de estiaje fue: 0,661118 día<sup>-1</sup>.
- 5.- El modelo de déficit de oxígeno aplicado al río San Carlos en el tramo acotado por Barrio Arizona Caño Hondo, durante la época de estiaje fue:

$$D(t) = 0,02605947Lo \cdot (e^{-0,016791t} - e^{-0,661118t}) + Do \cdot e^{-0,661118t}$$

Donde:

Lo: demanda de oxígeno última en la zona de mezcla: río vertido, mg/l

Do: déficit de oxígeno disuelto en la zona de mezcla: río vertido, mg/l

D(t): déficit de oxígeno disuelto saturado del río en Caño Hondo, mg/l

6.- El coeficiente de determinación del modelo de Streeter - Phelps generado fue 47,187 %.

7.- La variación del oxígeno disuelto del río San Carlos en el tramo Barrio Arizona - Caño Hondo durante la época de estiaje se asoció principalmente a un componente hidroerosivo del río (caudal y velocidad del río, y carga de sólidos suspendidos totales) y en segundo lugar a la variación térmica orgánica altitudinal (temperatura y  $DBO_5$  del agua, y la altitud del punto muestral).

8.- El modelo que explicó la variación del OD del río San Carlos en el tramo Barrio Arizona - Caño Hondo en época de estiaje fue ( $R^2 = 81,6877$  %):

$$OD = 4,60059 - 0,001866376.SST + 0,0018884047.Caudal + 0,0019044251.Velocidad + 0,022450878.Temp + 0,0191278236.DBO_5 + 0,025827965.Altitud - 0,016626300.Temp_A + 0,019004520.HR_A$$

Donde:

OD: concentración de oxígeno disuelto del río, mg/l

SST: concentración de sólidos suspendidos totales, mg/l

Caudal: caudal medio del río, m<sup>3</sup>/s

Velocidad: velocidad media del río, m/s

Temp: temperatura media del agua, °C

$DBO_5$ : demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días, mg/l

Altitud: metros sobre el nivel del mar a la que se encuentra el punto muestral, m

Temp<sub>A</sub>: temperatura media del aire en el punto de muestreo, °C

HR<sub>A</sub>: humedad relativa del aire en el punto de muestreo, %

9.- No se encontró zonas anóxicas en el tramo Barrio Arizona - Caño Hondo durante la época de estiaje.

10.- La máxima carga poluente, de acuerdo al modelo de Streeter - Phelps generado, que el río San Carlos puede soportar sin poner en riesgo la vida acuática aerobia en la localidad Caño Hondo durante la época de estiaje es: 131.629,7932 Kg  $DBO_5$ /día.

## RECOMENDACIONES

En función de los resultados y conclusiones que se obtuvieron con este estudio se recomienda las siguientes acciones:

### A.- *En torno al modelo matemático para predecir el déficit de oxígeno disuelto.*

1.- Desarrollar modelos más complejos que el modelo de Streeter - Phelps para predecir el déficit de oxígeno disuelto que incluyan: la reducción de DBO en la sedimentación de los sólidos, la fotosíntesis y

respiración asociada al fitoplancton y la difusión de oxígeno a la zona bentónica.

2.- Evaluar el efecto de los sólidos suspendidos totales en la reducción de los niveles de oxígeno disuelto en el río San Carlos en época de estiaje.

**B.- En torno a la calidad del agua del río San Carlos en el tramo Barrio Arizona - Caño Hondo.**

1.- Tratar las aguas cloacales provenientes de la ciudad de San Carlos con el propósito de minimizar la carga poluyente vertida en el río San Carlos.

2.- Promover la siembra de especies vegetales en las riberas del río San Carlos a fin de reducir la temperatura del agua. Ello elevaría la concentración de oxígeno disuelto en el río.

3.- Analizar los caudales mínimos del río San Carlos a nivel de la estación hidrológica “Paso Viboral” con el propósito de predecir la probabilidad de ocurrencia de sequías extremas que ocasionasen una reducción severa del caudal del río; situación que conllevaría a la formación de zonas anóxicas en el tramo acotado por Barrio Arizona Caño Hondo.

4.- Implementar un sistema de conservación y rehabilitación de la cuenca alta del río San Carlos con el propósito de reducir la concentración de sólidos suspendidos totales asociados al efecto erosivo de las precipitaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bartés, A., LLabrés, X. y Fernández, L. (1999) *Métodos estadísticos: Control y mejora de la calidad*. España: 2000 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. pp. 201 215.
- Bolívar, Carlos (2002) *Instrumentos de investigación educativa: procedimiento para su diseño y validación*. Centro de Investigación y Desarrollo en Educación y Gerencia. Barquisimeto, Venezuela. pp.221 239.
- Desarrollos Hidráulicos Cojedes [DHC], Canagro International y Ministerio del Ambiente y de Los Recursos Naturales Renovables [MARNR] (1997) *Diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales en el Estado Cojedes*. Cojedes: Empresa Regional DHC.
- Kiely, Gerard (1999) *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión* (José Miguel Veza Trad.) Islas Gran Canaria, España: Mc Graw Hill. pp. 411 444 y pp. 1226 1236.
- LIPESA (1998) *Tratamiento químico del agua*. Venezuela: Impegraf. p. 277 304.
- Massey, Bernard (1979) *Mecánica de los fluidos* (Cuarta impresión). México: CIA Editorial Continental SA de CV. pp. 70 72.
- Metcalf y Eddy Inc. (1996) *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (Tercera edición; Juan de Dios Trillo e Ian Trillo Fox Trad.). México: McGraw-Hill. pp. 1353 1383; 1423 1425.
- Montgomery, Douglas. (1991) *Diseño y análisis de experimentos* (Lic. Jaime Delgado Saldivar Trad.) México: Grupo Editorial Iberoamericana. pp. 429 462
- Morales, Pedro (2003). *Métodos estadísticos multivariados. Módulo: Análisis Factorial Componentes Principales*. Manuscrito no publicado, Universidad Nacional Experimental de los Llanos “Ezequiel Zamora”, Cojedes. Venezuela.
- Pardi, P. y asociados (1997) *Documento base para la elaboración del plan maestro para el control y manejo de la calidad de las aguas del sistema río Cojedes desde su nacimiento*. Cojedes: Estudios y Controles en Contaminación Ambiental. p. 94; p.185 y pp. 192 193.
- Ruiz, José (1990) *Principales características morfológicas de cinco cuencas del Estado Cojedes, su correlación e inferencias*

*en el aspecto cualitativo del escurrimiento*. Trabajo de investigación, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, San Carlos.

Sampieri, R., Collado, C. y Lucio, P. (2002) *Metodología de la investigación* (Tercera edición). México: Mc Graw-Hill. pp. 570-572.

Suematsu, Guillermo (1997) *Aspectos Generales y Principios Básicos de los Sistemas de Lagunas de Estabilización*. [Documento en línea]. Seminario Internacional. Lagunas de estabilización: CEPIS. Disponible: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind57/sil/sil.htm> [Consulta: 2003, Enero 15].

Tchobanoglous G. y Schroeder E. (1987) *Water Quality: Characteristic, modelling and modification*. United State of American: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 305-306.