

# Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó

**Lino Valcárcel Rojas<sup>1</sup>, Jorge Borroto Portela<sup>2</sup>, Nancy Alberro Macías<sup>1</sup>, José Griffith Martínez<sup>3</sup>, Milagros Derivet Zarzabal<sup>3</sup>, Pedro Flores Juan<sup>3</sup>, Jaime Cuesta Borges<sup>3</sup>, Maydel Rodríguez González<sup>1</sup>, Zahilys Herrero<sup>1</sup>, Anel Rodríguez Garcez<sup>2</sup>, Judith Domínguez Catusus<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

Calle 30, No 502 e/ 5ta y 7ma, Miramar, Ciudad de La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC)

<sup>3</sup>Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ)

lino@ceaden.edu.cu

## Resumen

Se presentó la metodología seguida para la modelación de tres parámetros que caracterizan la calidad del agua: demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto y amonio en un tramo del río Luyanó, empleando el software RIOSep® v.2.0. Durante el trabajo se combinaron acertadamente las técnicas de radiotrazadores para estimar los parámetros hidrodinámicos de la corriente del río con las técnicas de análisis fisicoquímico para determinar sus parámetros básicos. El levantamiento de los parámetros hidrodinámicos en la corriente se realizó con el empleo del <sup>99m</sup>Tc. Simultáneamente con la determinación de caudales se muestreó en cinco estaciones en el cauce principal y dos tributarios, para determinar los parámetros físico-químicos de interés. Como resultado se obtuvo un modelo que describe en más del 90% el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno y del oxígeno disuelto y en más del 65% el comportamiento del amonio, por lo que caracteriza adecuadamente los procesos de autodepuración y el balance de oxígeno en las aguas del río.

## MODELING WATER QUALITY IN THE MIDDLE SEGMENT OF THE LUYANO RIVER

### Abstract

The methodology for the modelling of three parameters that characterize water quality: biochemical oxygen demand, dissolved oxygen and ammonium in a Luyanó river stretch using the RIOSep® v.2.0 software. The procedure combined the use of radiotracer techniques for estimating the hydrodynamic parameters of the stream with physicochemical techniques to determine its basic parameters. The survey of hydrodynamic parameters in the stream was conducted with the use of <sup>99m</sup>Tc as a radiotracer. Simultaneously with flow determination, water was sampled at five stations in the main channel and two tributaries, in order to determine the physical and chemical parameters of interest. The result was a model that describes accurately the biochemical oxygen demand and dissolved oxygen behaviour (more than 90%), and showed a good result for ammonium, so it adequately characterizes the purification and oxygen balance processes in water.

**Key words:** simulation, water quality, tracer techniques, physical chemistry, purification

## Introducción

El río Luyanó se identifica como una corriente superficial en las Alturas de Vista Alegre. Desde su nacimiento colecta aguas residuales domésticas y en su cuenca se han inventariado numerosas fuentes contaminantes. A partir de su unión con el río Hondo atraviesa zonas densamente pobladas, mostrando una degradación notable de la calidad de sus aguas, con ausencia marcada de flora y fauna, condición que mantiene hasta su desembocadura en la bahía de La Habana [1].

La modelación matemática de un río es muy importante cuando se diseñan las estrategias para la recuperación de ecosistemas afectados. Los modelos permiten simular condiciones actuales y futuras, de manera que es posible simular escenarios (especialmente con condiciones desfavorables) los cuales ayudan a anticipar las variaciones que sufrirán los diversos parámetros de calidad de aguas en el cuerpo acuático en estudio [2, 3].

Un modelo que intente simular la calidad del agua de un río debe ser capaz de representar adecuadamente los fenómenos físicos, químicos y biológicos que ocurren en él. Esto es una tarea bien difícil y el problema suele simplificarse, representando la calidad del agua a través de uno o dos parámetros, como es el caso del modelo de oxígeno de Streeter y Phelps que solo simula la materia orgánica (DBO5) y el oxígeno disuelto (OD) [4].

El objetivo del trabajo fue obtener un modelo que permita conocer comportamiento del OD, la DBO y el amonio en un segmento del río Luyanó.

## Materiales y Métodos

Para obtener un modelo de calidad del agua se siguió la «Metodología para la Evaluación y Planificación de Estrategias de Saneamiento de Ríos empleando el Modelo Expandido de Streeter & Phelps» propuesta por [5].

La metodología considera tres aspectos fundamentales que tributan con igual importancia a la obtención del modelo:

1. definición del modelo conceptual o físico que describe al sistema y garantiza la validez de la hipótesis de cálculo del modelo,
2. determinación de los parámetros y variables del modelo y los parámetros hidromorfológicos válidos para cada tramo definido en el modelo conceptual y,
3. determinación de las constantes que describen el proceso de autodepuración.

### Modelo conceptual

Se seleccionó en el río Luyanó el segmento comprendido entre el Puente de la Viga hasta la confluencia del arroyo Pastrana, ver figura 1. La ubicación y definición de las fuentes puntuales de DBO, OD y  $\text{NH}_4$  se realizó con la ayuda de imágenes de *Google Earth* y la inspección visual. Se identificaron tres fuentes puntuales significativas: el arroyo Luyanó que confluye con el río Hondo a la altura del Km 3,558, el Colector Marginal que recolecta las aguas residuales albañales del Reparto Juanelo y descarga sus aguas a la altura del Km 2,350 y el arroyo Pastrana (Km 1,850). Este último no se incluyó en el modelo pues hasta escasos metros aguas abajo de ese punto llega la influencia de la marea y salinidad, y el río no satisface la hipótesis de transporte unidimensional.

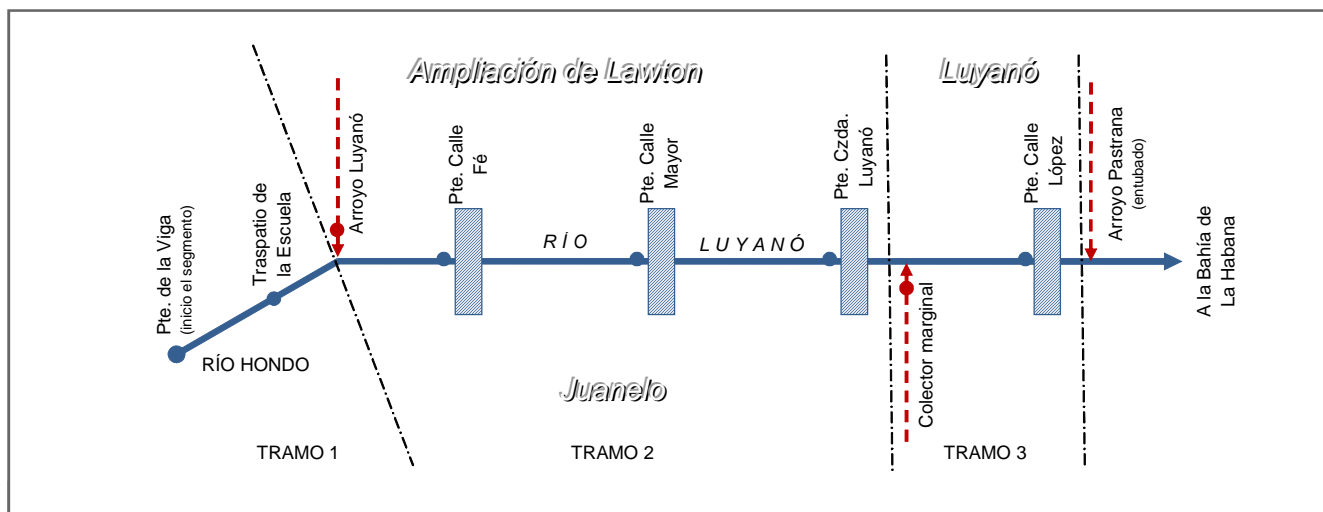


Figura 1. Diagrama lineal del segmento modelado del río Luyanó.

Para satisfacer la hipótesis de régimen estacionario para el modelo de Streeter & Phels modificado, el segmento se dividió en tres tramos cuidando que no existiera más de una fuente puntual o dispersa por cada uno, ni cambios bruscos en la morfología de la corriente. Adicionalmente, la inspección visual recomendó la inclusión de una descarga dispersa uniforme de DBOC y  $\text{NH}_4$ , ya que en las márgenes del segmento se asienta una población de aproximadamente 3200 personas que generan drenes los cuales fluyen hacia el cauce del río.

Para la modelación se seleccionó el período comprendido entre la segunda quincena de marzo y la primera de abril del 2009, para realizar tres campañas los días 24 y 31 de marzo y 14 de abril. El muestreo de las aguas para determinar los parámetros físico-químicos de calidad se simultaneó con las determinaciones de caudal y velocidad.

### Red de estaciones de aforo y muestreo

Se estableció una red de siete estaciones de aforo y muestreo: dos ubicadas en los tributarios principales del segmento, una en el cauce principal del río Hondo y cuatro en el cauce principal del río Luyanó. Estas estaciones se utilizaron para medir los índices hidrodinámicos, morfológicos y de calidad de las aguas en el cauce principal, así como las cargas en términos de OD, DBOC y DBON (expresada como  $\text{NH}_4$ ) de los tributarios introducidas al modelo

### Determinación de parámetros hidrodinámicos y morfológicos

El levantamiento de todos los parámetros hidrodinámicos en la corriente se realizó con el empleo del  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  como radiotrazador por su probada efectividad en estudios del transporte en aguas superficiales y residuales [6].

Para determinar los tiempos de tránsito y velocidades en el cauce principal de los ríos Hondo y Luyanó se obtuvieron las DTR al final de cada tramo tras una inyección instantánea ( $\delta$ -Dirac) del radiotrazador en las estaciones iniciales de cada tramo.

Los caudales se estimaron según la metodología descrita en la norma ISO 555/3-1982 [7] para medir flujos en canales abiertos por el método de inyección a velocidad constante usando radiotrazadores.

El caudal de los tributarios se determinó: para el arroyo Luyanó, como la diferencia entre los caudales determinados en las estación  $E_2$  y  $E_1$ ; para el colector marginal, según el procedimiento descrito en la norma británica [8]; para medir el flujo en canales abiertos por

el método de velocidad-área con un correntímetro (Z6 - *Seba Hydrometrie*, Alemania).

El ancho promedio de los tramos se estimó utilizando imágenes de *Google Earth* y mediciones in situ con una cinta métrica. El área de la sección transversal promedio en los tramos se calculó como

$$A (m^2) = \frac{Q (m^3 / s)}{\bar{U} (m / s)}$$

y las profundidades como

$$H (m) = \frac{A (m^2)}{W (m)}$$

### Muestreo y determinación de parámetros físicoquímicos

Simultáneamente con la determinación de caudales se muestreó en las cinco estaciones y los dos tributarios, tratando de seguir la misma masa de agua que contenía el trazador en su recorrido hacia la rada habanera, y considerando los tiempos de tránsito en cada tramo determinados con trazadores. Cada muestreo se realizó antes de la entrada de la fuente puntual considerada en cada segmento del modelo conceptual, de manera que:

$$A_0 = \frac{A_{1(x_1)}Q_1 + A_2Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

donde  $A_0$  (mg/L) es la  $\text{DBOC}_0$ , la  $\text{DBON}_0$  o el  $\text{OD}_0$ ,  $A_2$  (mg/L) es la concentración del índice de calidad en la descarga puntual incorporada,  $Q_2$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) es el caudal de la descarga puntual,  $Q_1$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), es el caudal del río y  $A_{1(x_1)}$  (mg/L), es la concentración del índice de calidad en la posición  $x_1$ , al final del segmento anterior, justo antes de la entrada de la descarga.

Los parámetros físicoquímicos determinados para la modelación fueron: in situ, la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el OD (mg/L), empleando una sonda multiparamétrica, y en el laboratorio, la  $\text{DBO}_5$  (mg/L) y el contenido de  $\text{NH}_4$  (mg/L), empleando un espectrofotómetro Shimadzu con kits reactivo.

## Resultados y discusión

La tabla 1 resume los parámetros hidrodinámicos y morfológicos estimados para los tres tramos y las siete estaciones del segmento.

**Tabla 1.** Parámetros hidrodinámicos y morfológicos

Tramo	Nº	Estación / Tributario	Km	Parámetros					
				TT (h)	U (m/s)	Q (m³/s)	W (m)	A (m²)	H (m)
1	E1	Traspatio de la Escuela	3,642	0,32	0,17	0,32	4,17	1,85	0,44
2	T1	Arroyo Luyanó	3,558	?	?	0,14	3,00	?	?
	E2	Puente Calle Fé	3,397	0,23	?	0,41	5,27	?	?
	E3	Puente Calle Mayor	2,939	0,69	0,23	0,48	5,27	2,08	0,39
	E4	Puente Calzada Luyanó	2,356	1,38	0,26	0,45	5,81	1,7	0,3
3	T2	Colector Marginal	2,350	?	0,14	0,08	1,80	0,59	0,33
	E5	Puente Calle López	1,876	0,56	0,25	0,53	5,81	2,12	0,36

TT- tiempo de tránsito, V- velocidad, Q-caudal, W- ancho promedio, A área sección transversal, H- profundidad.

En la tabla 2 se presentan los valores y el promedio de los parámetros fisicoquímicos en cada una de las estaciones y tributarios.

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos en cada estación y tributario del modelo

Tramo	Nº	Estación / Tributario	Km	Parámetros físico químicos			
				T (°C)	OD (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)
1	E1	Traspatio de la Escuela	3,642	26,47	3,22	10,23	5,41
2	T1	Arroyo Luyanó	3,558	26,63	2,18	17,73	9,08
	E2	Puente Calle Fé	3,397	25,23	2,52	11,23	7,24
	E3	Puente Calle Mayor	2,939	24,67	2,18	14,03	5,79
	E4	Puente Calzada Luyanó	2,356	25,57	1,71	15,23	6,03
3	T2	Colector Marginal	2,350	25,83	2,68	32,57	14,42
	E5	Puente Calle López	1,876	25,33	2,32	16,83	7,53

Los valores reportados son el promedio de las determinaciones en las tres campañas.

## Calibración del modelo

Como aproximación para estimar la demanda de oxígeno de los sedimentos (DOS) en el tramo 2 se asumió que los coeficientes cinéticos del modelo se determinan con suficiente nivel de confianza para definir su valor DOS = 16,0 g/m<sup>2</sup>·día por ajuste de los datos experimentales al modelo teórico.

Según los datos de población presentados por el Centro Nacional para la Promoción de la Salud en Ciudad de La Habana, en su informe «Estrategia educativa de saneamiento ambiental del río Luyanó» se estimaron descargas dispersas uniformes de 93 kg/día·km de DBOC y de 5 kg/día·km de DBON (NH<sub>4</sub>).

Según Chapra [9], las constantes de remoción se determinan gráficamente como las pendientes de las rectas:

$$\ln(DBOC) = \ln(DBOC)_o - Kr \cdot x$$

y,

$$\ln(DBON) = \ln(DBON)_o - Krn \cdot x$$

y asumen valores de 0,54 día<sup>-1</sup> y 0,32 día<sup>-1</sup> para el tramo 2, respectivamente. En los tramos 1 y 3 las constantes se mantuvieron en los valores: Kr = 0,9 día<sup>-1</sup> y 0,01 día<sup>-1</sup>, respectivamente.

Las constantes de desoxigenación por la DBOC y DBON en los tramos se asumieron con valores iguales

a las constantes de remoción. Las constantes de reaeración ( $K_a$ ) para los tres tramos se calcularon según O'Connor & Dobbins [10].

En la tabla 3 se presentan los parámetros introducidos para la simulación y en la tabla 4 los parámetros de las fuentes puntuales y dispersas.

**Tabla 3.** Parámetros de los tramos del río introducidos para la modelación

Parámetros	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Constante de remoción de la DBOC, $K_r$	0,90	0,54	0,90
Constante de desoxigenación por la DBOC, $K_d$	0,90	0,54	0,90
Constante de remoción de la DBON, $K_{rn}$	0,01	0,32	0,02
Constante de desoxigenación por la DBON, $K_n$	0,01	0,32	0,02
Constante de decaimiento anaerobio, $K_{an}$			
Demanda de Oxígeno de los Sedimentos ( $g/m^2 \cdot día$ )		16,00	
Tasa de Fotosíntesis / Respiración			
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	26,47	25,16	25,33
Profundidad (m)	0,44	0,35	0,36
Área de la sección transversal ( $m^2$ )	1,85	1,90	2,12
Final segmento (km)	3,56	2,35	1,63
Altitud sobre el nivel del mar (m)			
Constante de reaeración, $K_a$ (calculada según O'Connor-Dobbins)	5,64	9,62	9,25

**Tabla 4.** Parámetros de las fuentes (puntuales y dispersas) introducidos para la modelación

Parámetros	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Fuentes puntuales			
Caudal ( $m^3/s$ )	0,32	0,14	0,08
Oxígeno Disuelto (mg/L)	3,22	2,18	2,68
DBOC (mg/L)	10,23	17,73	32,57
Razón $DBO_{20}/DBO_5$	1,43	1,43	1,43
$NH_4$ (mg/L)	5,41	9,08	14,42
Fuentes dispersas			
DBOC ( $kg/día \cdot km$ )		93,13	
Razón $DBO_{20}/DBO_5$	1,43	1,43	1,43
$NH_4$ ( $kg/día \cdot km$ )		4,76	

Para el ajuste del modelo se utilizó el software RiosEP® v2.0. En las figuras 2, 3 y 4 se presentan los ajustes al modelo de calidad del agua de Streeter & Phelps expandido.

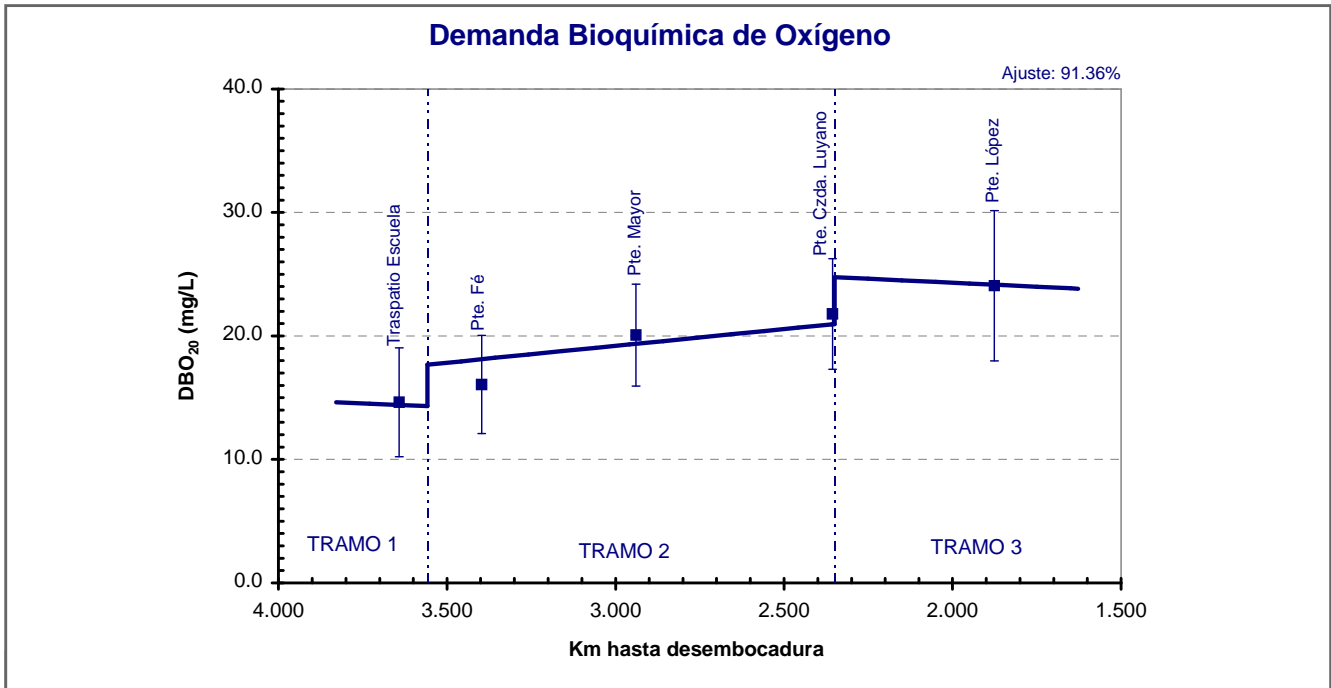


Figura 2. Ajuste del modelo para DBO<sub>20</sub>.

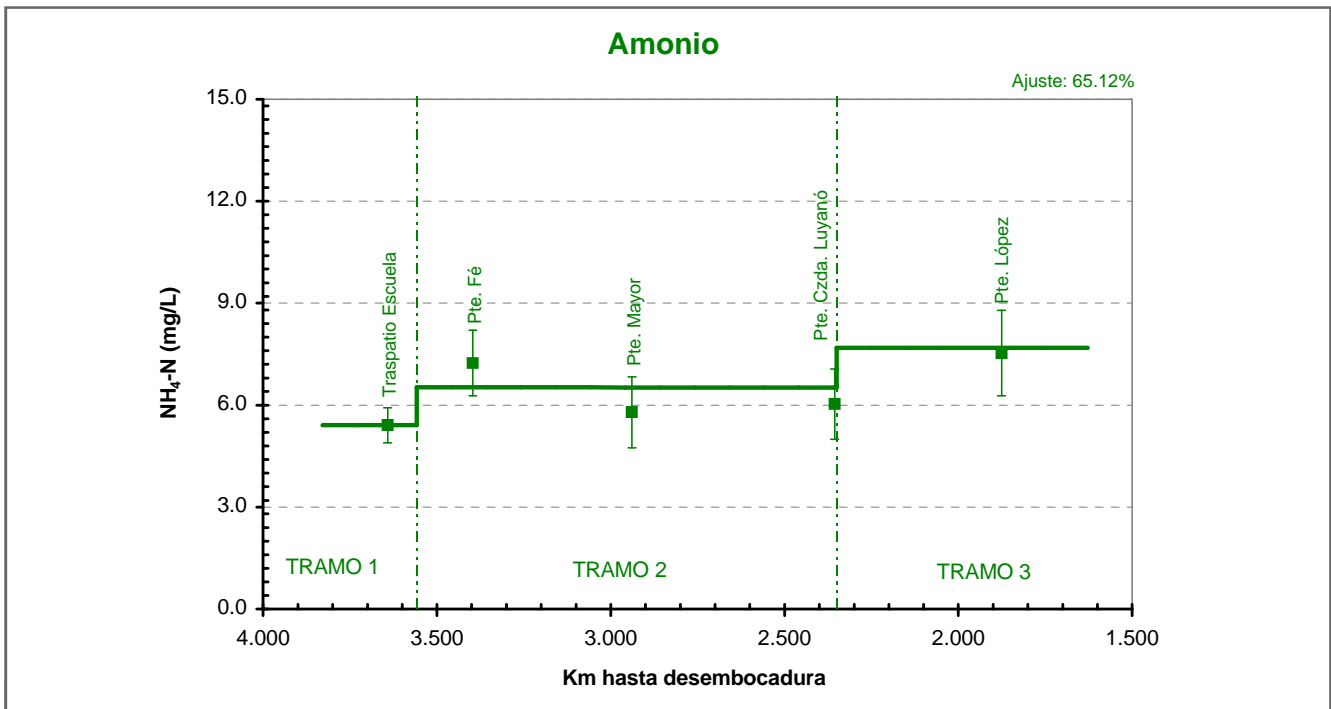


Figura 3. Ajuste del modelo para amonio (NH<sub>4</sub>).

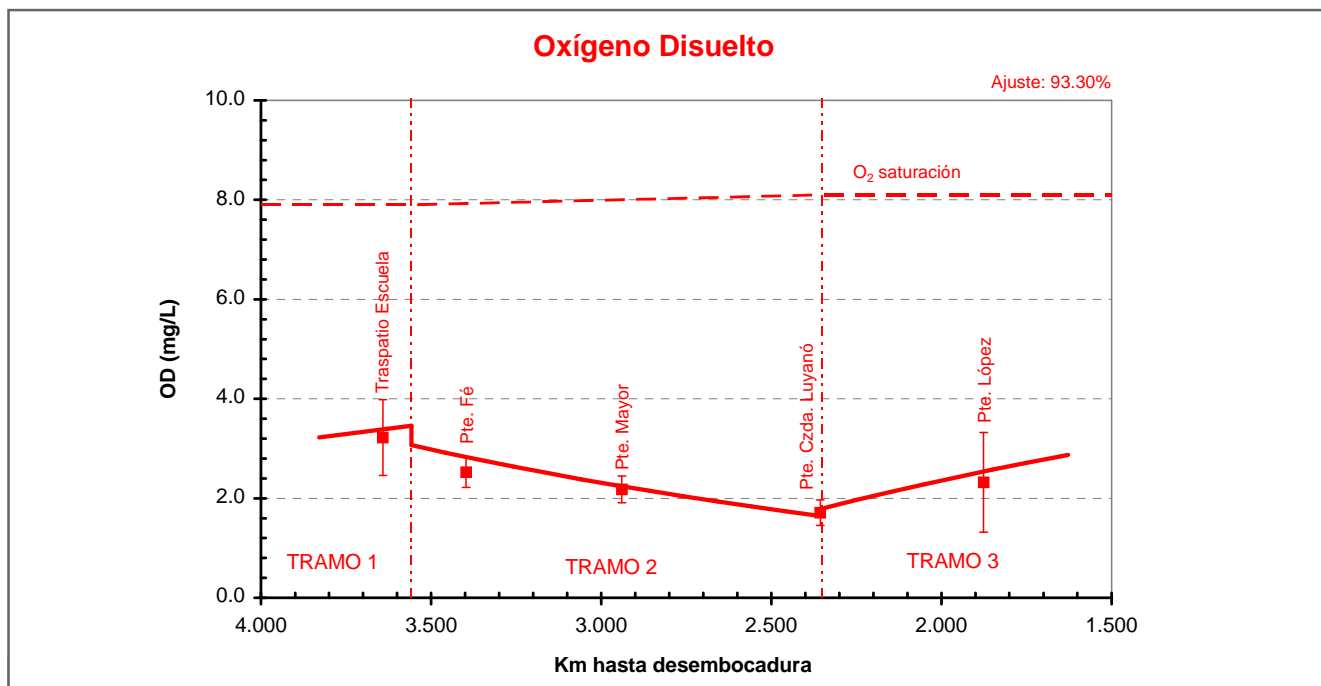


Figura 4. Ajuste del modelo de oxígeno disuelto.

La DBOC (expresada en términos de  $DBO_{20}$  o  $DBO_{última}$ ) se incrementa escalonadamente a lo largo de todo el segmento, ya que las aguas (ver las constantes de remoción y los tiempos de tránsito) no pueden asimilar la carga que se incorpora a través de los dos tributarios (el arroyo Luyanó y el Colector Marginal). Tampoco pueden asimilar la carga de DBON (expresada en términos de  $NH_4$ ), ya que los procesos de denitrificación sólo se inician una vez «concluida» la remoción de la DBOC y para muy bajas concentraciones de oxígeno. Igualmente se observa un incremento escalonado de este parámetro en el tránsito de las aguas hacia el estuario del río y la bahía de La Habana.

Ambos procesos provocan una disminución del oxígeno disuelto en las aguas llegando a condiciones prácticamente anaerobias ( $< 2,0$  mg/L) al final del tramo 2. Posteriormente el río experimenta una «aparente» y muy ligera recuperación; sin embargo, existen evidencias de que después de la estación del puente de la Calle López, nuevamente se deteriora producto de la entrada del arroyo Pastrana y sus aguas alcanzan el estuario donde se modifica su patrón de flujo unidimensional por la influencia de la marea.

Ello se corrobora por las mediciones realizadas en una estación en el puente de Vía Blanca, situada en la zona estuarina del río y que reporta índices de calidad promedios en período de estiaje de:  $9,25$  mg/L de  $DBO_5$ ,  $9,30$  mg/L de  $NH_4$  y  $2,05$  mg/L de OD.

## Conclusiones

Se calibró la calidad del agua con el modelo expandido de Streeter & Phelps para un segmento de  $2,205$  km del río Luyanó, comprendido entre el Km  $3,829$  en el río Hondo y el Km  $1,624$ , antes de la afluencia del arroyo Pastrana. Este modelo describe en más de 90% el comportamiento de la DBOC (en términos de  $DBO_{20}$ ) y del OD, y en más de 65% el comportamiento de la DBON (en términos de  $NH_4$ ), por lo que caracteriza adecuadamente los procesos de autodepuración y el balance de oxígeno en las aguas. El ajuste de este modelo se realizó con el software RIOSep® v.2.0 de factura nacional y combinó acertadamente el empleo de las técnicas de radiotrazadores para estimar los parámetros hidrodinámicos de la corriente con las técnicas de análisis fisicoquímico de sus parámetros básicos.

Aunque el modelo no se ha validado bajo otras condiciones de flujo, se considera que en las condiciones actuales constituye una herramienta muy útil para alimentar el modelo de calidad del agua en el segmento del estuario del río.

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado por el OIEA, a través del proyecto ARCAL RLA 1010 mediante la donación de equipamiento y participación en actividades de capacitación para el desarrollo de esta investigación.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Grupo de Trabajo Estatal para el saneamiento, conservación y desarrollo de la Bahía de la Habana (GTE) en la República de Cuba. Estudio del desarrollo del alcantarillado y el drenaje pluvial en la cuenca tributaria de la Bahía de la Habana en la Republica de Cuba. Informe de Progreso. 2002.
- [2] Salazar Arias A. Simulación del contenido de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno en el Río Medellín. Revista AINSA. 1981; 1(1): 49-64.
- [3] Domínguez J, Borroto J, Hernández A, Pérez E. Empleo de trazadores en la obtención de modelos de calidad de agua en el río Almendares. Nucleus. 2003; (34): 20-27.
- [4] Domínguez J. Modelación de la calidad del agua del río Almendares. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana: InSTEC, 2005.
- [5] Borroto J. Comportamiento del  $^{99m}\text{Tc}$  como radiotrazador en aguas superficiales y residuales. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Químicas. La Habana: InSTEC, 2003.
- [6] ISO 555/3-1982: Liquid flow measurement in open channels – Dilution methods for measurement of steady flow – Part 3: Constant-rate injection method and integration using radioactive tracers.
- [7] BS 3680-1979: British Standard Method of measurement of liquid flow in open channels – Measurement of flow by velocity-area methods.
- [8] Chapra SC. Water Quality Modelling. New York: McGraw Hill, 1997. p. 502,
- [9] O'Connor DJ, Dobbins A. Simplified Mathematical Modeling of Water Quality. Washington. D.C: Environmental Protection Agency, 1971.

**Recibido:** 17 de febrero del 2010

**Aceptado:** 13 de mayo del 2010