

# Empleo del Modelo de Streeter y Phelps modificado para la planificación de estrategias de saneamiento del Río Almendares

Judith Domínguez Catasús<sup>1</sup>, Jorge I. Borroto Portela<sup>1</sup>, Anel Hernández Garcés<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas. Departamento de Radioquímica. Tel: 8775662. judith@fctn.isctn.edu.cu

<sup>2</sup> Centro Nacional de Seguridad Nuclear.

**RESUMEN:** El Río Almendares, cuerpo de agua que atraviesa 6 de los municipios más importantes de la ciudad de La Habana, exhibe un notable deterioro en la calidad de sus aguas. La modelación matemática es empleada a escala mundial en la evaluación del impacto, en la calidad del agua, de sistemas de tratamiento de efluentes industriales y urbanos y en general del manejo de los recursos hídricos. Los modelos son herramientas usadas en la planificación y evaluación de estrategias de saneamiento. En el trabajo se emplea para estos fines, el modelo de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de Streeter y Phelps. Este modelo unidimensional de estado permanente fue calibrado y validado anteriormente por los autores. El modelo conceptual o físico implícito en el modelo matemático divide en 11 segmentos a la sección comprendida entre el punto donde la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) "María del Carmen" vierte al río y el Puente del "Bosque de la Habana". En los límites de cada segmento se consideran constantes los parámetros morfológicos e hidrodinámicos del río. Con ayuda del modelo se valora la influencia en el OD de la DBO de las descargas puntuales y dispersas que el río recibe en la sección estudiada. Así mismo se estudia la influencia del caudal base y del OD con que el Almendares arriba a la sección modelada. Finalmente se exploran tres estrategias de saneamiento de la zona que combinan acciones sobre los residuales que recibe y el caudal base. Quedó establecido que resulta esencial garantizar la calidad aguas arriba de la zona a modelar y que el aumento del caudal base a expensas de la presa "Ejército Rebelde" provocaría una mejora sensible en los niveles de OD. Se comprobó además, que resulta imprescindible eliminar o al menos disminuir la carga de DBO que se incorpora al río como fuentes dispersas por la población que habita sus riberas y que la reareación artificial pudiera ser una vía para mejorar los niveles de OD. El modelo empleado permitió predecir el efecto de estrategias de saneamiento en la calidad del agua del río.

**ABSTRACT:** The river Almendares, which crosses six of the most important municipalities of the Havana City, is very polluted. There is a growing recognition around the world that the water quality models are very useful tools to plan sanitary strategies for the handling of the contamination.

In the present work, the advective, steady-state water quality Streeter and Phelps model was employed. For this purposes, the modeled section of the river, located between the point where the waste water treatment station "Maria del Carmen" discharges to the river and the Bridge "El Bosque" was divided in 11 segments. In each segment is considered that the hydrodynamic river parameters as well as morphologic are constant.

The model was used to simulate the effect of the multiple-point and distributed sources on the biochemical oxygen demand, and dissolved oxygen down stream of the discharged points. It was also studied the influence of the dissolved oxygen level of the arriving to the studied section river water and of the arriving flow rate.

It was established that it is necessary to guarantee the water quality upstream of the modeled section, that the water flow increase provokes a relevant increase on dissolved oxygen levels, that it is necessary to eliminate or diminish the distributed loads and that the artificial reareation most be a way to increase the dissolved oxygen levels. Finally three sanitary strategies were evaluated.

**Palabras claves:** modelo de Streeter y Phelps, "Río Almendares", oxígeno disuelto, demanda de oxígeno carbonosa.

**Key words:** Streeter and Phelps model, "Almendares River", dissolved oxygen, biochemical oxygen demand.

## INTRODUCCIÓN

El río Almendares, uno de los cuerpos de agua más importantes de la ciudad de la Habana, presenta grandes problemas de contaminación en la zona ubicada aguas abajo del punto de descarga de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) "María del Carmen" (Kilómetro 14.45 desde la desembocadura).

A escala mundial la modelación matemática se ha convertido en una herramienta muy empleada y útil en la planificación de estrategias medioambientales para recuperar ecosistemas.<sup>1</sup>

El modelo expandido de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de Streeter y Phelps,<sup>2</sup> es un modelo unidimensional relativamente sencillo, que soluciona por métodos analíticos la ecuación de balance de masa, considerando el estado estacionario.

Los modelos empleados como soporte en la planificación de estrategias de saneamiento han evolucionado para dar respuestas a diferentes condiciones y exigencias de calidad de las aguas. Tomando como punto de partida el modelo de Streeter y Phelps, han surgido modelos complejos de eutrofización, variables en el tiempo y tridimensionales, que incluyen cinéticas completas de algas, nitrógeno y fósforo.<sup>1,3,4,5</sup> Es evidente que la selección del modelo matemático lleva implícito un análisis costo-beneficio que define en última instancia el alcance del ejercicio predictivo.

Para analizar el impacto en el OD y la DBO de residuales que sólo han recibido tratamiento primario, donde la materia orgánica biodegradable es la responsable fundamental de la contaminación, como en el río "Almendares", es suficiente y conveniente la aproximación considerada en el modelo expandido de Streeter y Phelps.<sup>2,6</sup>

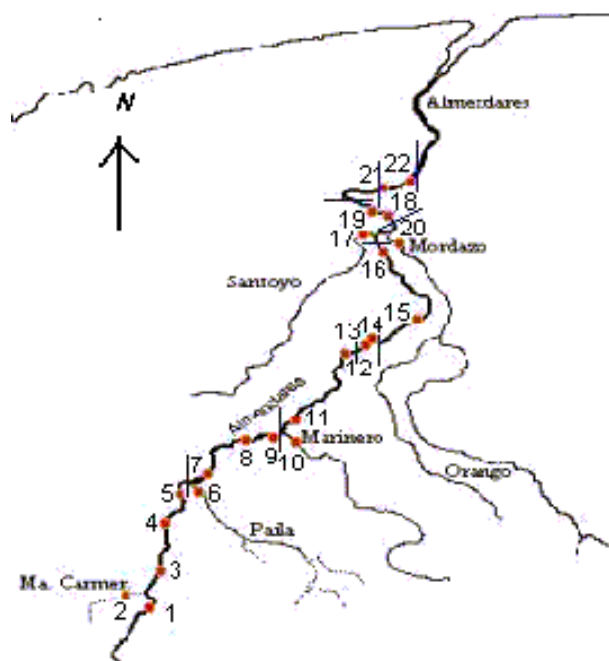
Los autores<sup>7</sup> calibraron y validaron este modelo, para describir el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) y la demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (DBO<sub>C</sub>) y nitrogenada (DBO<sub>N</sub>), en la zona del río "Almendares" comprendida entre el punto de confluencia del canal de vertimiento de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) "María del Carmen" y el puente del "Bosque de La Habana".

Con fines de modelación, la sección estudiada se dividió en 11 segmentos y se estableció una red de 22 estaciones de muestreo (Fig 1, Tabla1)

**Tabla1.** Segmentos del modelo y Fuentes de DBOy/o OD

	Final del seg.(km)	Fuentes de DBO y/o OD
1	14.40	Todas antes "María del Carmen"
2	12.12	Canal "María del Carmen"
3	10.26	Arroyo "Paila"
4	8.2	Arroyo "Marinero"
5	8.13	Rápidos del "Husillo", solo carga de OD
6	5.26	Fuentes dispersas, solo carga de DBO <sub>C</sub> y DBO <sub>N</sub>
7	5.15	Arroyo "Santoyo"
8	4.96	Cascada artificial, solo carga de OD
9	4.77	Arroyo "Mordazo"
10	3.93	Fab. Comp. "Osito", solo carga de DBO <sub>C</sub>
11	3.5	Cervecería "La Tropical", solo carga de DBO <sub>C</sub>

**Fig1.** Esquema de la zona estudiada del río "Almendares". Estaciones de medición.



En el presente trabajo se emplea el modelo validado de *Streeter y Phelps* para realizar ejercicios predictivos y elaborar alternativas de saneamiento de la sección estudiada del río.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Con las constantes cinéticas validadas,<sup>7</sup> se estudió el efecto en el OD, del caudal del río y de las descargas de DBOc que recibe, considerando al “Almendares” como un cuerpo receptor de categoría B (NC 278) propia para ríos utilizados en actividades recreativas que presuponen el contacto directo con el agua, y/o la utilización de esta para regadío de cultivos.

Según se establece en la norma cubana NC 278, la DBOc<sub>5</sub> (DBOc al quinto día de incubación) de las descargas que se incorporan a cuerpos receptores tipo B, a través de fuentes puntuales, no debe sobrepasar los 40 mg/L. Se exploró el impacto en el OD de la disminución, hasta este valor, de la DBOc<sub>5</sub> incorporada a través de los afluentes (excepto el “Santoyo” y el “Mordazo”) y se comparó con la influencia de la DBOc<sub>5</sub> con que arriba el río a la sección modelada.

Las predicciones se conducen para las condiciones de caudal y los parámetros morfológicos de las dos campañas de campo realizadas para la calibración y validación del modelo.<sup>7</sup> Se consideró que las fábricas de computas “Osito” y “La Tropical” autorregulan la calidad de los residuales que vierten.

Se compara el efecto de tres estrategias de manejo de las aguas y los residuales, dirigidas a mejorar la calidad del agua en la zona. La primera presupone que en las condiciones de caudal registradas en la primera campaña (0,39 m<sup>3</sup>/s), se logre un nivel de tratamiento de los residuales tal, que tanto la DBOc<sub>5</sub> con que el “Almendares” arriba a la zona modelada como en todas las descargas puntuales, no supere los 20 mg/L y se eliminen las fuentes dispersas de DBO.

En la segunda estrategia se evalúa el efecto del aumento del caudal en 100 L/s, manteniendo las mismas condiciones de calidad que en la estrategia anterior. Esta premisa puede satisfacerse si la presa “Ejército Rebelde”, ubicada aguas arriba de la zona estudiada, alivia al Almendares. La tercera propone el mismo aumento del caudal y que la DBOc<sub>5</sub> al inicio de la sección, sea la mitad que en las estrategias anteriores, o sea, 10 mg/L. En cuanto a la descarga de la planta de tratamiento “María del Carmen”, que la DBOc<sub>5</sub> de los residuales que vierte se ajuste a la norma de 40 mg/L. En esta estrategia no se prevé tratamiento para las restantes descargas puntuales, cuyo valor se asume como 60 mg/L, tampoco se eliminan las fuentes dispersas de DBO.

Las campañas de medición realizadas (Domínguez. J; Borroto.J y Garces.A, 2003) mostraron que la DBOc<sub>5</sub> en las aguas de los arroyos “Santoyo” (segmento 7) y “Mordazo” (segmento 9), son mucho menores que los pautados en la norma para vertimiento de aguas residuales NC 278, usada como guía en los análisis realizados. A partir de estos resultados se consideró conveniente mantener invariable estos valores durante el estudio.

Para las tres estrategias, se supone que las descargas de OD que el río recibe a causa de los rápidos del “Husillo” y de la cascada artificial de “Puentes Grandes,” tienen la magnitud que corresponde a las condiciones de la primera campaña.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se ilustra el efecto que ejerce en la calidad del río aguas abajo, la DBOc<sub>5</sub> con que el “Almendares” arriba a la sección estudiada. En las curvas de la 1 a la 3 se modela el OD si el caudal inicial es 0,39 m<sup>3</sup>/s (primera campaña), la DBOc<sub>5</sub> en las descargas puntuales es de 60 mg/L, las fábricas de computas “Osito” y la cervecería “La Tropical”, vierten los residuales sin tratamiento, hay fuentes dispersas de DBO en el segmento 6 (Tabla 1) y la DBOc<sub>5</sub> inicial es 10, 20 y 40 mg/L respectivamente. Se aprecia que el oxígeno disuelto puede ser superior a 3 mg/L en casi la totalidad de la zona estudiada, si la DBOc<sub>5</sub> inicial es igual a 10 mg/L (curva 1). Si oscila entre 20 mg/L (curva 2) y 40 mg/L (curva 3), este valor se alcanza en una reducida porción de la sección modelada.

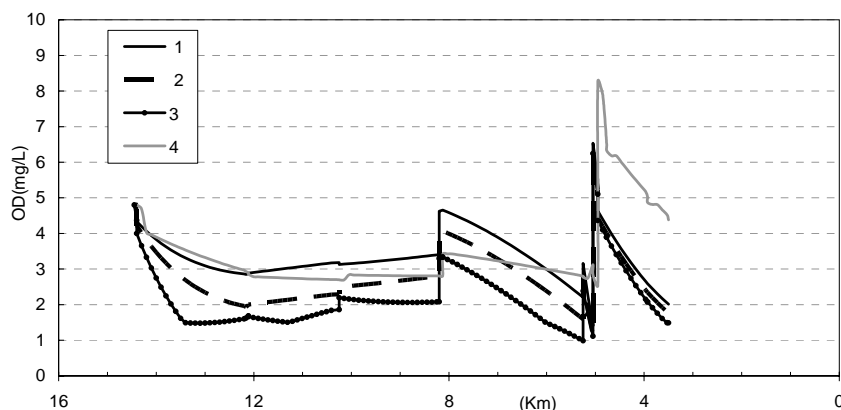


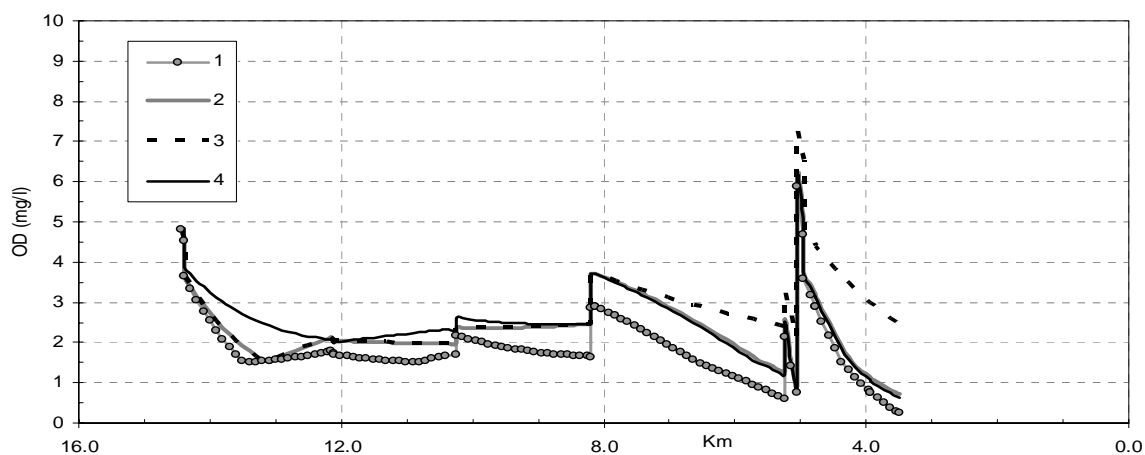
Fig 2. Influencia de la DBOc<sub>5</sub> inicial y del caudal en el OD.

En esta figura también se muestra el efecto del aumento del caudal inicial del río a  $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$  registrado durante la segunda campaña de aforo (luego del paso del ciclón "Irene"). La curva cuatro, es el resultado de modelar el OD con este caudal y las mismas condiciones de  $\text{DBOC}_5$  que en la predicción 3 (curva 3). En algunas zonas de la sección, el efecto positivo en el OD provocado por el aumento del caudal, es incluso superior al observado por la disminución de la  $\text{DBOC}_5$  inicial a  $10 \text{ mg/L}$  (curva 1). Sin embargo, vale destacar que, aplicando una adecuada estrategia ambiental, es posible alcanzar  $\text{DBOC}_5$  de  $10 \text{ mg/L}$  o menos, en las aguas del río "Almendares" que arriban a la zona estudiada, pero es imposible lograr de forma inducida un caudal de  $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la figura 3 se ilustra la influencia de la magnitud de las descargas de  $\text{DBOC}_5$  que recibe el río. Si la  $\text{DBOC}_5$  al inicio de la sección modelada es de  $30 \text{ mg/L}$  y el caudal es  $0,39 \text{ m}^3/\text{s}$ , el efecto de la disminución de la  $\text{DBOC}_5$  en las descargas puntuales de  $60 \text{ mg/L}$  (curva 1) a  $40 \text{ mg/L}$  (curva 2), es significativo sólo entre los kilómetros 13 y 5,25 aproximadamente. Tal comportamiento es de esperar si tenemos en cuenta que durante las predicciones en los segmentos 7 y 9 ubicados aguas abajo, no se varía la DBO, al encontrarse por debajo de la norma NC 27<sup>8</sup>.

La curva tres se diferencia de la segunda en que se han eliminado las fuentes dispersas de DBO consideradas durante la modelación en el segmento seis. Ambas curvas coinciden hasta el kilómetro siete aproximadamente. Aguas abajo, en la curva tres, comienza a observarse un incremento en el OD que alcanza hasta los  $2 \text{ mg/L}$  en las cercanías del puente del "Bosque de La Habana".

Dada la fuerte influencia negativa de las fuentes dispersas de DBO en el OD aguas abajo, es necesario disminuir sustancialmente o eliminar la carga incorporada a través de ellas para mejorar la calidad del agua en los segmentos del seis al once (con excepción del octavo) del modelo.



**Fig. 3.** Impacto en el OD del "Almendares" de la disminución de la  $\text{DBOC}_5$  en las descargas y en el segmento inicial.

Por otra parte, la disminución de la  $\text{DBOC}_5$  inicial del río de  $30 \text{ mg/L}$  (curva 1) a  $10 \text{ mg/L}$  (curva 4) manteniendo la  $\text{DBOC}_5$  de las descargas en  $60 \text{ mg/L}$ , y las fuentes dispersas, provocó un efecto superior en el OD que la disminución de las descargas puntuales de  $60$  (curva 1) a  $40 \text{ mg/L}$  (curva 2). Por tanto, la magnitud de la  $\text{DBOC}_5$  con que el "Almendares" arriba a la sección estudiada puede tener tanta o más influencia en el OD aguas abajo, que el valor de este parámetro en las descargas puntuales.

### Estrategias de saneamiento

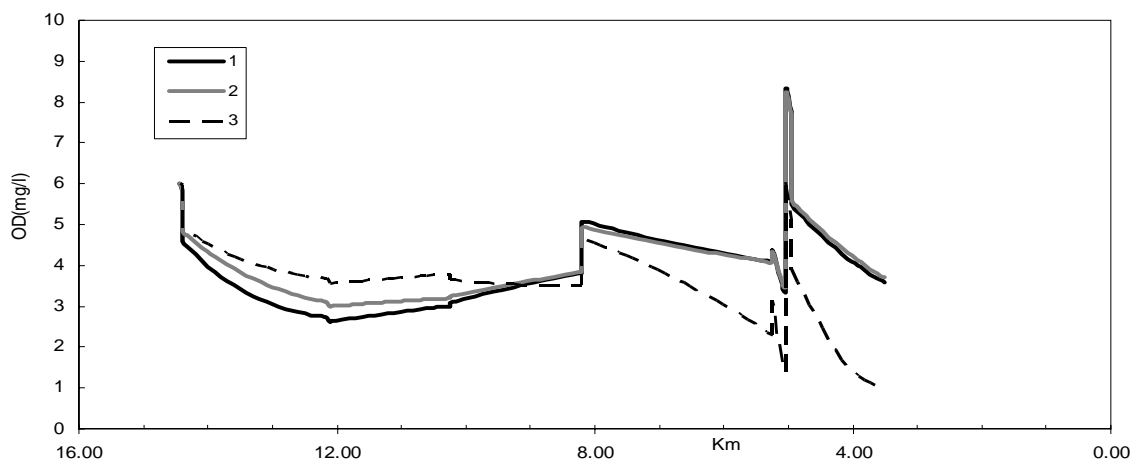
Las estrategias ambientales exploradas corresponden a diferentes grados de tratamientos de los residuales vertidos al río y de alternativas de manejo de las aguas. Como se ilustra en la figura 4, hasta el kilómetro nueve aproximadamente, la tercera estrategia resulta ventajosa. Significa que si se logra disminuir a  $10 \text{ mg/L}$  la  $\text{DBOC}_5$  antes de la confluencia del "María del Carmen", si el caudal se aumenta en  $100 \text{ L/s}$  y la planta de tratamiento vierte según lo establecido en la NC 27<sup>8</sup> ( $40 \text{ mg/L}$ ), el OD en toda esta zona alcanza valores superiores a  $3,5 \text{ mg/L}$ .

Nuevamente se pone de manifiesto la gran influencia de la  $\text{DBOC}_5$  del segmento inicial, en el OD aguas abajo. Nótese que su disminución a la mitad con relación a las dos primeras estrategias donde se supuso en  $20 \text{ mg/L}$ , provoca un efecto mayor que la disminución de la  $\text{DBOC}_5$  con que se incorporan "María del Carmen", "Paila" y "Marinero" (primera y segunda estrategias). En la tercera se combinan positivamente dos de los factores que más influyen en la concentración de OD: el caudal y la  $\text{DBOC}_5$  inicial.

A partir del kilómetro nueve, la tercera estrategia resulta la peor opción. Comienza a reflejarse en la calidad del agua la incorporación, aguas arriba, del "Paila" y del "Marinero" con una  $\text{DBOC}$  de  $60 \text{ mg/L}$ , del propio canal "María del Carmen", que vierte con el doble de la  $\text{DBOC}_5$  ( $40 \text{ mg/L}$ ) con relación a las dos primeras estrategias ( $20 \text{ mg/L}$ ) y sobre todo, de las fuentes dispersas de DBO entre los kilómetros 8,20 y 5,25.

Nuevamente se evidencia que, la eliminación de las descargas que de forma dispersa son incorporadas al "Almendares", resulta imprescindible para mantener la concentración de OD, por encima de 3 mg/L en los segmentos del 6 al 11 del modelo. El segmento ocho constituye una excepción al recibir sus aguas una reaireación adicional provocada por la cascada artificial.

Otras alternativas pudieran valorarse en dependencia de la conveniencia establecida por las autoridades competentes modulada por criterios técnico-económicos.



**Fig. 4.** Estrategias de saneamiento. 1-  $0,39\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\text{DBO}_{\text{C}_5}$  en todas las descargas  $20\text{ mg/L}$ , sin fuentes dispersas. 2-  $0,49\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\text{DBO}_{\text{C}_5}$  en todas las descargas  $20\text{ mg/L}$ , sin fuentes dispersas 3-  $0,49\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\text{DBO}_{\text{C}_5}$  inicial-  $10\text{ mg/L}$ ,  $\text{DBO}_{\text{C}_5}$  en María delCarmen  $40\text{ mg/L}$ ,  $\text{DBO}_{\text{C}_5}$  en el resto  $60\text{ mg/L}$ , con fuentes dispersas.

## CONCLUSIONES

1. Las predicciones del comportamiento del OD realizadas constituyen un ejercicio concreto en el camino de utilizar la modelación matemática en la proyección de estrategias de saneamiento.
2. Quedo en evidencia que es insuficiente controlar la DBO de los tributarios en la zona estudiada para mejorar y/o mantener las condiciones de calidad del río. Resulta necesario además, garantizar la calidad aguas arriba.
3. Para mejorar la calidad río aguas abajo del kilómetro ocho del Almendares (en relación a la desembocadura) es necesario disminuir o eliminar las fuentes dispersas de DBO presentes entre los kilómetros 8.20 y 5.25.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Reichert P., Borchardt D., Henze M., Rauch W., Shanahan P., Somlyódy L. and Vanrolleghem P.A.. River Water Quality Model No. 1 (RWQM1): II. **Wat. Sci. Tech**, **40**, 123, 2000.
2. Chapra, S. C. Water Quality Modeling. New York, Mc Graw Hill , pag 502, 1997.
3. Mortimer C.H. Environmental Status of lake Michigan Region. Argonne National laboratory. IL ANL/Es-40, **2**, 87, 1995.
4. Rocha, F. Eutrophication modelling in rivers. Use of Heuristic Techniques for the Calibration of a simulation Model. Thesis presented at LNEC, Lisbon, Portugal, 579 pp, 1997
5. Pettersson A., Arheimer B. and Joahnsson B. "Nitrogen concentrations simulated with HBV-N: New response function and calibration strategy". Nordic Hydrological Conference, Uppsala, Sweden, **Nordic Hydrology**, **32**, 227, 2001
6. Mooney K.G., Gallagher T.W y Salas H.J. Una Revisión de 30 años de la Aplicación de Modelos Matemáticos de Calidad de Agua en el Río-Estuario de Delaware, Hydroqual, 2000.
7. Domínguez J., Borroto J., Hernández A., Pérez E. Empleo de modelos matemáticos en la predicción de parámetros de calidad del río Almendares". **Contribución a la Protección y Educación Ambiental**, **4**, 2003.
8. NC 27. Norma para el vertimiento de aguas residuales a aguas terrestres, 1999.