

Modelos de simulación de la calidad del agua de los ríos Nalón, Caudal y Nora (Asturias, España):

I. Establecimiento de premodelos (*)

Por SAINZ BORDA, J. A.; ASCORBE, A.; LIAÑO, A.; PRESMANES, M., y TEJERO, I.

Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente.
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria

Se presenta el método seguido para la elaboración de un modelo de simulación de la calidad de las aguas de diversos ríos de Asturias, de posible aplicación en otras cuencas para la planificación y gestión de los mismos, incluyéndose un análisis de los resultados obtenidos de su aplicación.

1. INTRODUCCION

Dentro de las herramientas existentes hoy día para la gestión técnica de la calidad de las aguas destacan los modelos de simulación de los medios acuáticos naturales. Con ellos se pretende tener la capacidad de predecir la calidad del agua, en términos de concentración de contaminantes o de índices de calidad, en cualquier punto o lugar de un río, embalse, mar litoral, etc., y en cualquier escenario o situación imaginable (especialmente desfavorable).

La Confederación Hidrográfica del Norte de España (CHN), al elaborar el Plan de Saneamiento de la cuenca minera de Asturias (ver figura 1), dentro de un Plan Nacional de Interés Comunitario (PNIC), ha considerado la necesidad de construir un modelo de simulación de la calidad de las aguas de los ríos Nalón, Caudal y Nora, con el fin de disponer de tal herramienta de cara a la planificación y gestión de dicha cuenca.

El presente artículo es el primero de una serie en la que se describe y detalla el procedimiento de modelación seguido así como los resultados obtenidos y las dificultades encontradas. En éste se presenta lo que los autores consideran una adecuada primera etapa de un proceso de modelación, es decir, la construcción de los 'premodelos' (término que se define posteriormente) que constituyen una primera aproximación a la modelización de los ríos. Además, éstos premodelos, aunque no son todavía unas herramientas fiables

de simulación, si se utilizan con las debidas precauciones, pueden ayudar al mejor conocimiento de los ríos, lo que unido a la economía y rapidez de su construcción los puede hacer muy ventajosos. En contrapartida, tienen el peligro de su uso inapropiado al no tener en cuenta sus limitaciones.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS

Un modelo que intenta simular la calidad y contaminación de las aguas de un río tiene que ser capaz de representar adecuadamente los fenómenos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el mismo; o por lo menos, aquellos más significativos e importantes de forma suficientemente aproximada.

La primera simplificación del problema puede consistir en reducir la calidad del agua a uno o dos parámetros, es decir, intentar representar sólo unos pocos índices, parámetros o características de la calidad de las aguas. Este es el caso del modelo de oxígeno de Streeter y Phelps (9), que solamente simula la materia orgánica (DBO5) y el oxígeno disuelto (OD) en casos muy simples.

A partir de estos primeros modelos se han ido desarrollando otros más complejos que llegan a considerar múltiples contaminantes e incluso los elementos bióticos del río, constituyéndose en verdaderos modelos ecológicos. Por otra parte, la mayor complejidad del modelo puede venir dada no sólo por el número de variables a simular sino por el número de instantes a representar. Así, frente a los modelos clásicos de estado estacionario se han desarrollado modelos dinámicos

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1991.

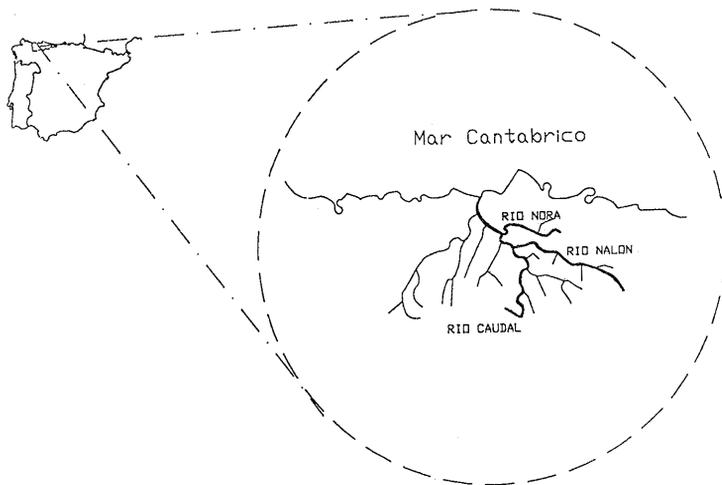


Figura 1.—Ríos de la cuenca minera de Asturias

más o menos complejos. Por último, aunque en ríos es bastante destacable la dimensión longitudinal de los mismos, con lo que el modelo unidimensional es el más clásico, algunos modelos consideran también la variación de la calidad del agua a lo ancho e incluso en profundidad (modelos bi— y tridimensionales).

Ahora bien, la mayor complejidad de un modelo y, por lo tanto, su mayor capacidad de representar cualquier contaminante en cualquier punto del río y en cualquier instante de tiempo, viene acompañada de un mayor trabajo y tiempo de construcción del modelo y de mucho mayor coste. Por lo tanto, la elección del tipo de modelo a elaborar en una situación dada tiene que venir condicionada por los objetivos generales que se persiguen y por la disposición de medios económicos, materiales y personales.

Dentro del término 'modelo' subyacen dos concepciones diferentes que pueden inducir a confusión. Así, al hablar de modelos unas veces se intenta expresar la 'estructura teórica' del mismo, constituida por el programa informático que resuelve las ecuaciones que representan los fenómenos naturales a los que están sometidas las variables de calidad del agua, mientras que otras veces se quiere hacer referencia al 'modelo real' del río, es decir, al resultado de aplicar la estructura teórica del modelo a un caso real, adoptando por tanto los parámetros y constantes valores concretos asignables al río dado.

Con vistas a la planificación del saneamiento y depuración de los vertidos de una cuenca hidrográfica, se han desarrollado diversos modelos o

estructuras teóricas. Quizás el de más amplia difusión, y muy contrastado internacionalmente, es el de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US—EPA) con el nombre de QUAL—II (3). De éste se vienen desarrollando diversas versiones que engloban las correcciones o modificaciones introducidas hasta el momento. Se trata en consecuencia de un modelo vivo, o en continua actualización. Es este modelo, en su versión QUAL2E (NCASI), el que se ha elegido en el presente caso.

En breves palabras puede ser definido como un modelo unidimensional de estado estacionario (principalmente), capaz de representar los siguientes parámetros fijos: Temperatura, DBO, Algas (clorofila A), Fósforo (orgánico y disuelto), Nitrógeno (orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos), Oxígeno disuelto y Coliformes Fecales, con la posibilidad adicional de simular un contaminante reactivo cualquiera más tres contaminantes conservativos en una misma ejecución. El modelo resuelve las ecuaciones planteadas mediante el método de diferencias finitas, considerando discretizado el río en 'elemento de cálculo' con mezcla completa en su seno. Es capaz de simular una red hidrográfica con 25 tramos diferentes, 250 elementos de cálculo y 50 vertidos o captaciones explícitos.

3. METODOLOGIA GENERAL

La aplicación del modelo QUAL2E a un sistema hidráulico formado por un río y sus afluentes lleva consigo un procedimiento laborioso, que comprende, según los autores, las siguientes frases:

- a) Elaboración de un premodelo.
- b) Construcción del modelo inicial mediante calibración y ajuste.
- c) Validación del modelo inicial para la obtención del modelo final.
- d) Seguimiento y actualización del modelo final.

Denominamos 'premodelo' al resultado de la aplicación del modelo QUAL2E a un río concreto, sin la realización de campañas específicas de calibración, utilizando datos disponibles en otros estudios o datos fácilmente obtenibles recogidos al efecto. Este término es el equivalente al de modelo simplificado utilizado por De Andrés y Cubillo (1). Dicha aplicación se pretende hacer

para una situación desfavorable (estiaje, simultaneidad de vertidos, etc) de forma que la simulación resultante constituya la envolvente de los datos disponibles.

El interés que tiene la elaboración de un premodelo estriba, por una parte, en la relativa rapidez con que se pueden obtener por simulación directa unos resultados orientativos y, por otra, en la información que proporciona con vistas al diseño de campañas específicas para la siguiente fase de construcción del modelo inicial.

La elaboración de un premodelo lleva consigo, a su vez, la conceptualización del río y el establecimiento de los valores iniciales de los parámetros.

La conceptualización del río es una representación esquemática del sistema hidráulico (dividido en tramos, que se subdividen en elementos de cálculo de longitud constante), en la que se deben incluir además las condiciones de contorno en las cabeceras del sistema, así como las entradas o salidas de los diferentes elementos.

Para ello, es preciso realizar una serie de estudios previos y de caracterización, tanto geométrica como hidráulica y de vertidos.

Con la caracterización geométrica se trata de determinar el perfil longitudinal, así como la evolución de la anchura y calado del río; la localización de las principales entradas o salidas de agua del sistema.

En cuanto a la caracterización hidráulica, uno de los objetivos es la determinación del perfil de caudales a considerar en el premodelo. Por otro lado, se trata de establecer un modelo hidráulico de circulación que permita obtener los valores de velocidad y calado en tramos de características homogéneas.

Para la determinación de los agentes contaminantes se deben llevar a cabo estudios de caracterización del conjunto de la cuenca, así como otros de mayor detalle en los que se proceda a la localización y caracterización de vertidos puntuales, contemplando tanto aspectos cuantitativos como cualitativos.

En el establecimiento de los valores de los parámetros, aunque en los manuales de utilización del modelo se indica un rango típico de variación para cada uno de ellos, la elección de cada valor concreto depende del criterio del usua-

rio y de la experiencia adquirida en situaciones similares (2).

La metodología a seguir en las frases b), c) y d) se comentará con detalle en artículos sucesivos.

4. CONSTRUCCION DE LOS PREMODELOS

De acuerdo con la metodología general antes expuesta, para la fase de caracterización geométrica de los ríos se ha contado, por una parte con la información cartográfica contenida en planos a escala 1-5000 ó 1-10000 (facilitadas por la CHN) y, por otra, con la obtenida en la campaña de reconocimiento efectuada a tal fin (10), en la que se han identificado y referenciado todos los puntos singulares de los mismos. El resultado se ha reflejado en tablas en las que se indican la distancia, anchura y pendientes entre los diferentes puntos considerados.

Para la definición del perfil de caudales circulantes, se ha pretendido que el premodelo represente la situación de estiaje, por considerarla más desfavorable desde el punto de vista de calidad. En este sentido, se ha considerado como caudal de estiaje el que es igualado o superado durante 360 días el 90% de los años. En esta fase del trabajo ha sido de gran ayuda la información contenida en el 'Estudio Básico de Recursos Hidráulicos de las Cuencas del Norte de España' del Plan Hidrológico Nacional.

En cuanto al modelo hidráulico de circulación, se ha adoptado un tipo Manning, con unos valores de coeficiente de rugosidad deducidos a partir de los resultados de la campaña de medida de velocidades realizada, con la técnica de flotadores, en julio de 1988.

La zona a modelizar de cada río se ha seleccionado de manera que quedarán englobadas las áreas más contaminadas y afectadas por el plan de saneamiento y que las cabeceras del río principal y de los afluentes estuvieran poco contaminadas. La conceptualización del río se ha realizado dividiéndolo en tramos homogéneos en cuanto a sus características geométricas hidráulicas.

Como cabeceras de los ríos se han elegido la estación de aforo E-363 para el río Caudal, Piñeres en el río Aller, San Andrés en el río Turón, la estación de aforos E-335 en el río Nalón y Pola de Siero en el río Nora. Como puntos finales se

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RIOS

han considerado la confluencia de los ríos Nalón y Caudal para ambos ríos y el embalse de Priañes para el río Nora.

Por otro lado, para la localización de los vertidos urbanos se ha dispuesto en algunos tramos de los ríos de información precisa, elaborada por la CHN. En el resto de los casos ha sido necesario recurrir a estimaciones basadas en el examen de la cartografía de la zona. En cuanto a los principales vertidos industriales, su localización y caracterización se ha realizado con base en la información contenida en otros estudios realizados con anterioridad, algunos de los cuales se relacionan en la bibliografía (4), (5), (7), (12).

Como una gran parte de los vertidos industriales son de tipo minero, se ha considerado la necesidad de incluir como contaminante reactivo a los sólidos en suspensión. No se ha incluido en la simulación, por el contrario, ningún contaminante conservativo.

Para la caracterización de los vertidos urbanos, a falta de datos reales, se han utilizado los siguientes estándares:

Caudal	100-250 l/hab/día
DBO ₅	75 g/hab/día
Sólidos en suspensión	90 g/hab/día
Nitrógeno amoniacal	6.1 g/hab/día
Nitrógeno total	10 g/hab/día
Fósforo disuelto	2 g/hab/día

A partir de ellos, se ha llegado a expresar las concentraciones de estos contaminantes (en mg/l) en los diferentes vertidos considerados.

La mayor parte de los valores iniciales de los parámetros se han supuesto iguales a los adoptados como finales en el modelo desarrollado por este equipo de trabajo en el río Campiazo (Cantabria). Los parámetros relacionados directamente con características físicas de la cuenca se han determinado de manera específica en cada uno de los premodelos.

Aunque la propia denominación de premodelo lleva aparejada de manera implícita la ausencia de una fase de calibrado, se han realizado, sin embargo, algunas operaciones de ajuste, referidas fundamentalmente al oxígeno disuelto, DBO y concentraciones de nitrógeno en sus diferentes formas (especialmente la amoniacal), así como a la concentración de sólidos en suspensión. Para

ello, se han utilizado datos de calidad del río obtenidos en estudios anteriores y en una pre-campaña de calidad realizada a tal efecto en junio de 1988.

En esta fase sólo se ha tratado de corregir errores groseros, dado que el premodelo no pasa de ser una primera aproximación a la realidad. Así, en algunos casos, se ha detectado la existencia de vertidos que se habían pasado por alto y, en otros, se han modificado valores de parámetros, como se indica en el apartado siguiente.

5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

Dada la envergadura del trabajo (11), en este apartado sólo se incluye una muestra de los resultados obtenidos y una breve referencia a las cuestiones más destacables.

Se han considerado dos tipos de resultados, cuya diferencia no es fácil de establecer: la propia construcción de los premodelos, por una parte, como herramientas de trabajo para representar diferentes situaciones sin más que realizar las modificaciones pertinentes en los datos de partida (situaciones iniciales, etc.) y los derivados de su aplicación a una situación determinada, por

TABLA 1

Ríos	Nalón	Caudal	Nora
N.º tramos	14	10	17
N.º cabeceras	2	3	2
Afluentes	Sta. Bárbara	Aller Turón	Noreña
N.º elementos	53	79	137
Longitud elemento (mts.)	800	660	500
L. modelo río princ. (km.)	40,8	33	67,5
Pend. media río principal	0,00495	0,00719	0,00238
Caudal cabec. río principal	1,31	1,11	0,15
Caudal final (m ³ /seg.)	3,08	4,13	1,11
Modelo circulación	manning	manning	manning
Tiempo total de paso (h.)	43	24	181
Población total (hab.)	81,772	75,945	209,708
N.º vertidos	227	96	95
N.º elementos con vertido	32	39	36
Caudal total vertido (m ³ /s)	0,657	0,800	0,544
Carga contaminante:			
DBO	7,847		17,967
Sólidos en suspensión	2,893,363	1,078,738	971,877
Nitrógeno amoniacal	1,890	348	1,295
Nitrógeno orgánico	704	225	897
Fósforo disuelto	171	110	155

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RIOS

TABLA 2

Parámetros	Río Nalón	Río Caudal	Río Nora
α_3	3.50	3.50	3.50
α_6	1.20	1.20	1.20
α_3	1.60	1.60	1.60
α_4	2.00	2.00	2.00
α_1	0.85	0.85	0.85
α_2	0.012	0.012	0.012
μ_{max}	2.50	2.50	2.50
ρ	0.10	0.10	0.10
KN	0.20	0.20	0.20
KP	0.04	0.04	0.04
λ_1	0.03	0.03	0.03
λ_2	0.0165	0.0165	0.0165
KNITRF	0.60	0.60	0.60

Parámetros globales de Nitrógeno, Fósforo, Algas y Luz

K	300	6,000	300	6,000	6	6,000
K_1	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600
K_3	0.000	0.200	0.000	0.200	0.000	0.200
K_4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
K_2	—	0.200	—	0.200	(1)	0.200

(1) En el Tramo 2 el valor de este parámetro es de 20 parámetros de Oxígeno disuelto y DBO.

Parámetros	Río Nalón		Río Caudal		Río Nora	
β_3	0.200	0.200	0.200	0.200	10.00	10.00
σ_4	0.001	0.050	0.001	0.050	0.000	0.000
β_1	0.750	0.750	0.750	0.750	0.150	0.150
σ_3	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000
β_2	1.500	1.500	1.500	1.500	1.000	1.000
β_4	0.300	0.300	0.300	0.300	10.00	10.00
σ_5	0.001	0.050	0.001	0.050	0.000	0.000
σ_2	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000

Parámetros de Nitrógeno y Fósforo

α_0	50	50	50	50	50	50
α_1	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
λ_0	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
K_5	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
K_6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
σ_6	1.000	10.00	1.000	10.00	1.000	1.000
σ_7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Parámetros varios

otra, que se concretan en la variación espacial de algunos componentes de la calidad del agua.

En lo que hace referencia al primero de los tipos indicados, en la tabla 1 adjunta se resumen las características principales de la modelación realizada, pudiéndose apreciar fácilmente las dife-

rencias existentes entre los tres ríos.

Aunque la relación total de variables y parámetros y sus valores correspondientes se puede consultar en (11), en la tabla 2 se indican los considerados más representativos, estableciendo una distinción en función de su variabilidad o no de un tramo a otro. En el primero de los casos, la primera de las columnas corresponde a tramos tipo canal y la segunda a tramos tipo embalse o azud.

Para el cálculo de la tasa de reaireación de los tramos tipo canal, en los ríos Nalón y Nora se ha utilizado el método de Langbien y Durun (6), mientras que para el río Caudal se ha utilizado el de O'Connor y Dobbins (8). En los tramos tipo azud se ha definido directamente el valor que se muestra en la segunda columna. Como excepción, hay que destacar que los valores adoptados en los tramos 2, 15, 17 y 18 del río Nora han sido de 1.5, 3.0, 1.2 y 0.6, respectivamente.

La presentación de resultados que proporciona el programa original es bastante incómoda y poco práctica, por lo que ha sido necesario incorporarle mejoras para posibilitar la presentación en forma gráfica, facilitando así su análisis y comprensión.

En la figura 2 se incluyen las gráficas correspondientes a la variación, a lo largo del tramo modelizado del río Nalón, del oxígeno disuelto, de la demanda bioquímica de oxígeno, del nitrógeno amoniacal y de los sólidos en suspensión.

Por otro lado, en la figura 3 se muestran las gráficas análogas correspondientes al río Caudal y en la figura 4 las del río Nora, siendo de destacar que en estas últimas tan sólo se incluyen, como término de comparación y ajuste, los datos obtenidos en la precampaña de calidad.

Durante la precampaña de calidad de junio de 1988 los caudales circulantes fueron bastante superiores a los de estiaje. Por ello, los datos deducidos de la misma se han considerado como un límite o cota máxima de calidad al realizar el ajuste de los premodelos. Lo mismo cabe decir de los datos de otros estudios.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los ríos Nalón y Caudal los valores de la DBO de los otros estudios que ha servido para el

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RIOS

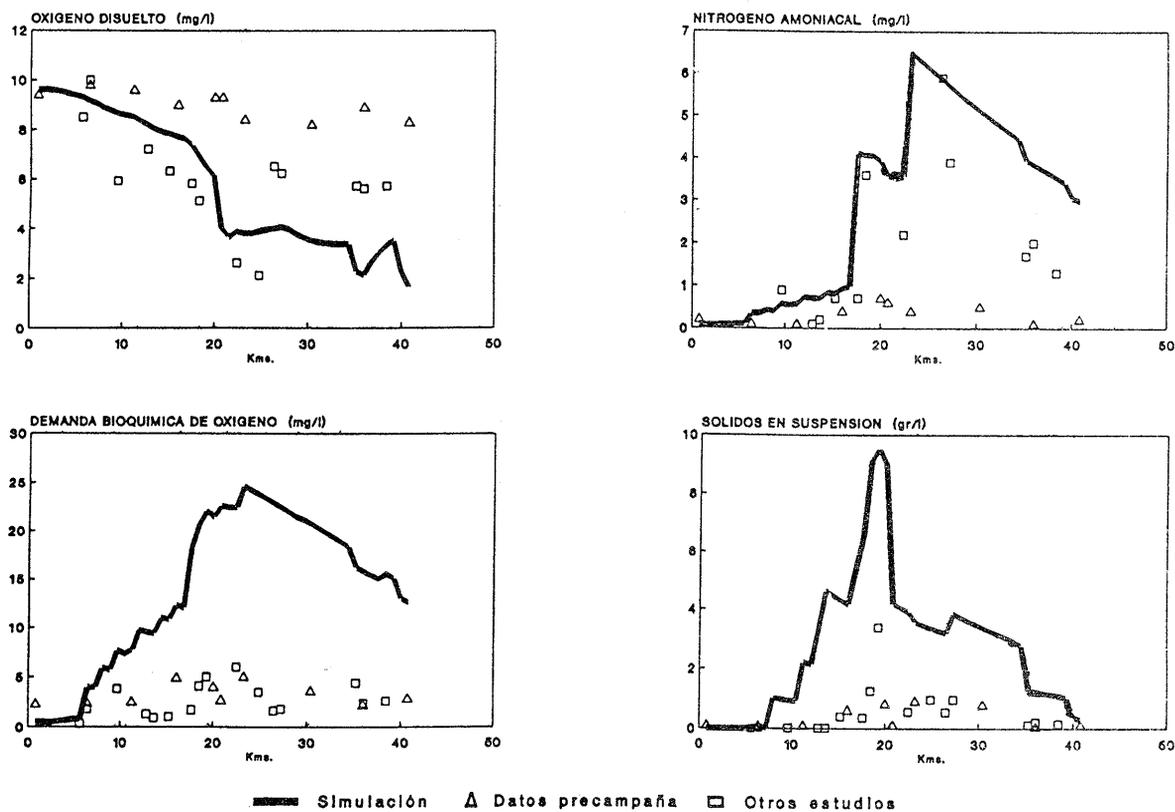


Figura 2.—Premodelo del río Nalón

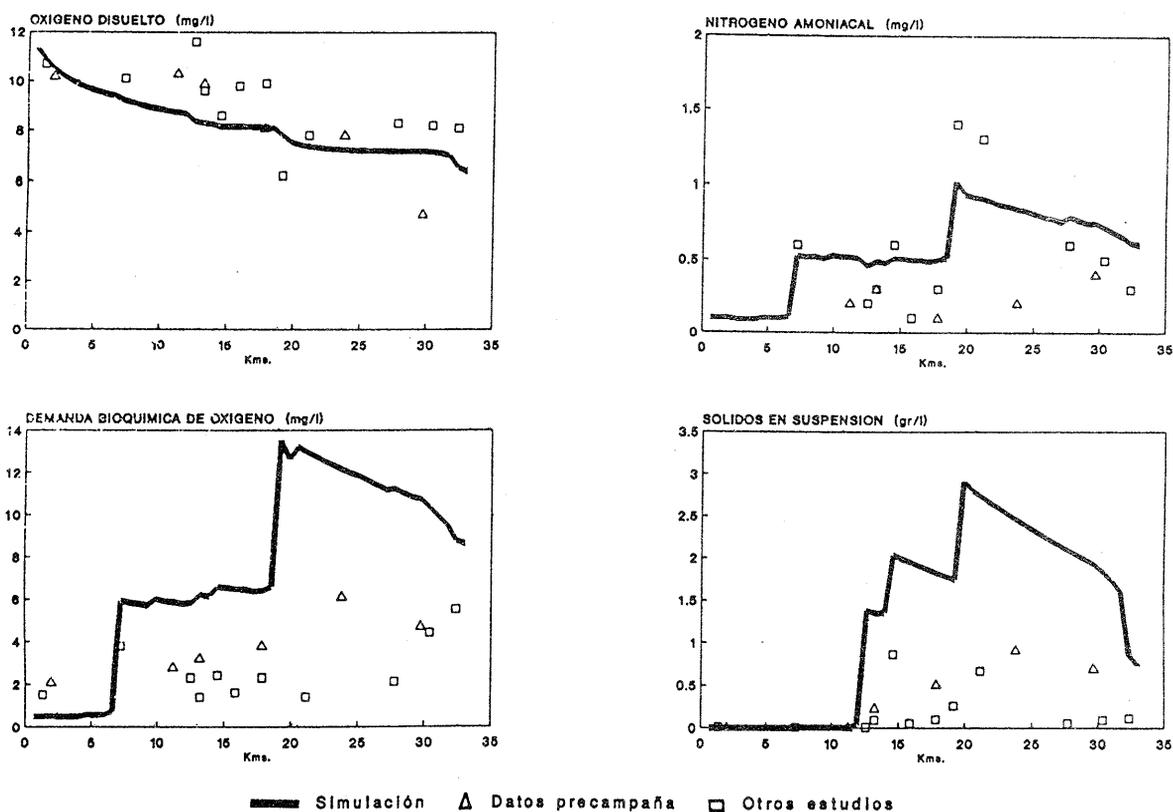


Figura 3.—Premodelo del río Caudal

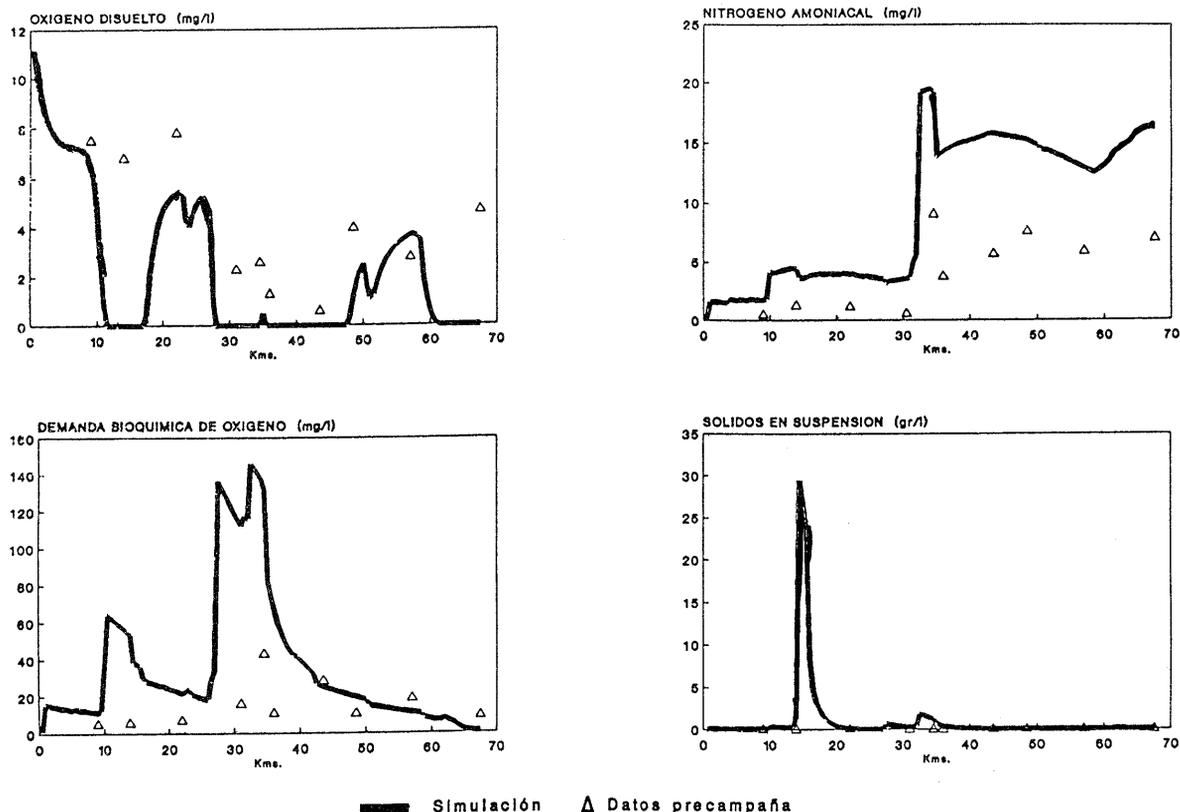


Figura 4.—Premodelo del río Nora

ajuste son exageradamente bajos, poniéndose en duda su fiabilidad. Al compararlos con los determinados en la precampaña, dichos valores son más bajos a pesar de que los valores de oxígeno disuelto son apreciablemente más pequeños que los de la precampaña. Hay que esperar que en la realidad se produzca mayor contaminación de DBO, lo cual coincide con la simulación realizada.

La simulación de la DBO en el río Nora es inferior a algunos valores medidos en la zona baja del río, lo cual puede explicarse por la existencia de fenómenos anaerobios en la zona alta y media del río, ya que el modelo QUAL2E no simula los fenómenos anaerobios y, sin embargo, sí considera la eliminación aerobia de la DBO en dichos tramos.

En cuanto al ajuste de los sólidos en suspensión, se observa una gran diferencia entre los valores medidos en la precampaña y los valores simulados. Entre las posibles causas cabe indicar:

— La consideración en los premodelos de una situación de estado estacionario, que supone que los vertidos son constantes en cantidad y contaminación, lo cual no es real y puede magnificar el

problema. Este hecho exige un estudio más en detalle de los vertidos mineros.

— La no consideración, en los ríos Nalón y Caudal, de reducción de sólidos en los ríos y arroyos afluentes al río principal. En el río Nora sí se ha considerado dicho efecto aunque quizá no en la medida suficiente dada la alta sedimentabilidad de los residuos de carbón.

En la simulación del nitrógeno amoniacal destaca, de forma clara, la incidencia de los vertidos puntuales, que hacen elevar la concentración de forma muy importante. En cuanto a las discrepancias existentes en algunos ajustes, pueden ser debidas, en algunos casos, a la ocasionalidad y temporalidad de vertidos de origen industrial. De hecho, si no se consideran dichos vertidos puntuales, la simulación puede quedar bastante ajustada a los datos conocidos. La simulación en el río Nora sigue la misma tendencia que los datos de la precampaña pero con mayores valores absolutos, lo cual resulta lógico dados los caudales más pequeños adoptados en la simulación.

Se han deducido altos valores de las tasas de nitrificación para los ríos Nalón y Caudal, lo cual

MODELOS DE SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS RIOS

hace destacar la gran importancia que tiene este fenómeno en estos ríos, y obliga a plantearse especialmente la contaminación por nitrógeno orgánico y amoniacal de cara a obtener valores adecuados de oxígeno disuelto en los ríos, dado el previsible alto consumo de oxígeno debido a la nitrificación.

Se deduce para todos los ríos que la contaminación difusa por nitratos puede ser importante, debido seguramente a la actividad agropecuaria en la cuenca.

En el río Nora, la no convergencia de una solución (debido a las situaciones anaerobias que se presentan) ha obligado a considerar dos situaciones extremas respecto a los fenómenos de nitrificación, que acotan la realidad. Frente a la hipótesis de inhibición de la nitrificación sólo para el caso de oxígeno disuelto nulo, parece más ajustada a la realidad la hipótesis de que no existe nitrificación en el río. Por el contrario, parece quedar demostrada la existencia de fenómenos de desnitrificación que hacen mantenerse en muy bajos valores la concentración de nitratos en muchos tramos del río.

La actual situación del río Nora, con elevados niveles de contaminación, hace que los fenómenos representados por el premodelo no sean los que se puedan dar en el río en una situación de mejor calidad de sus aguas.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido financiado por la Confederación Hidrográfica del Norte de España, a través de un Convenio con la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria. El estudio ha sido dirigido por los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D. Ramón Alvarez Maqueda, D. Luis Gil García y D. Carlos Blanco Quirós. El desarrollo de las campañas de análisis y aforos ha sido llevado a cabo por personal de la citada Confederación.

NOTACION

Parámetros Definición

α_3 Consumo específico de oxígeno para la oxidación del amoníaco.
 α_6 Consumo específico de oxígeno para la oxidación de los nitritos.

α_3 Producción específica de oxígeno por crecimiento de las algas.
 α_4 Consumo específico de oxígeno por respiración de las algas.
 α_1 Contenido específico de nitrógeno en la biomasa de las algas.
 α_2 Contenido específico de fósforo en la biomasa de las algas.
 μ_{max} Tasa máxima de crecimiento de las algas.
 ρ Tasa de respiración de las algas.
KN Constante de Michaelis—Menton de semi-saturación para el nitrógeno.
KP Constante de Michaelis—Menton de semi-saturación para el fósforo.
 λ_1 Coeficiente lineal de auto—oscurecimiento producido por las algas.
 λ_2 Coeficiente no lineal de auto—oscurecimiento producido por las algas.
K Constante de dispersión.
 K_1 Tasa de desoxigenación debida a la materia orgánica carbonácea.
 K_3 Tasa de sedimentación de la DBO carbonácea.
 K_4 Tasa de consumo béntico de oxígeno.
 K_2 Tasa de reaireación.
 β_3 Tasa de hidrólisis del nitrógeno orgánico.
 σ_4 Tasa de sedimentación del nitrógeno orgánico.
 β_1 Tasa de oxidación biológica del amoníaco.
 σ_3 Tasa de producción béntica de nitrógeno amoniacal.
 β_2 Tasa de oxidación biológica de los nitritos.
 β_4 Tasa de solubilización del fósforo orgánico.
 σ_5 Tasa de sedimentación del fósforo orgánico.
 σ_2 Tasa de producción béntica de fósforo disuelto.
 α_0 Contenido de clorofila A en la biomasa de las algas.

- α_1 Contenido específico de nitrógeno en la biomasa de las algas.
- λ_0 Coeficiente de extinción de luz independiente de las algas.
- K_5 Tasa de desaparición de coliformes.
- K_6 Tasa de desaparición del elemento arbitrario no conservativo.
- σ_6 Tasa de sedimentación del elemento arbitrario no conservativo.
- σ_7 Tasa de producción béntica del elemento arbitrario no conservativo.

BIBLIOGRAFIA

(1) ANDRES, A. y CUBILLO, F. (1984). "Modelos Simplificados de Calidad de Aguas". Plan Integral del Agua en Madrid.

(2) ASCORDE, A., GOMEZ PONCELA, L.M., PRESMANES, M. y TEJERO, J.I. (1990). "Aplicación del Modelo QUAL II al Río Campiazo (Cantabria)". Modelos de Calidad del Agua. Ed. Prensa XXI.

(3) BROWN, L. y BARNWELL, T. (1985). "Computer Program Documentation for the Stream Quality Model QUAL II. Versión Qual2e". U.S. Environmental Protection Agency.

(4) GONZALEZ, F. y MIRANDA, A. (1988). "Estudio de Calidad de las Aguas de los Ríos Nalón y Caudal". Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(5) INGENIERIA DE LA POLUCION, S.A. (1988). "Estudios Previos a la Redacción de los proyectos de los Sistemas generales de Saneamiento de las Cuencas Mineras del Nalón, Caudal y Nora".

(6) LANGBIEN, W.B. y DURUM, W.H. (1967). "The Aeration capacity of Streams". U.S. Geol. Survey Circ. 542.

(7) LOPEZ LLANEZA, J. "Estudio de la Calidad del Agua en el Río Nalón y su Cuenca". Consejería de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Gobierno del Principado de Asturias.

(8) O'CONNOR, D.J. y DOBBINS, W.E. (1958). "Mechanism of Rearation in Natural Streams". Trans. ASCE, v. 123.

(9) STREETER, H.W. y PHELPS, E.B. (1958). "Study of the Polution and Natural Purification of the Ohio River". U.S. Public Health Service Bull, 146.

(10) TEJERO, J.I. y otros. (1988). "Campañas de Reconocimiento de los Ríos Nalón, Caudal y Nora". Informes emitidos para la Confederación Hidrográfica del Norte de España (3 tomos).

(11) TEJERO, J.L. y otros. (1989). "Premodelos de los Ríos Nalón, Caudal y Nora". Informe emitido para la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

(12) (1985) "Estudio del Río Nalón y su Cuenca: Inventario y Análisis Físico—Químico de los vertidos de aguas residuales". Conserjería de Ordenación del territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Principado de Asturias.

José Angel Sainz Borda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1975). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1979). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Agustín Ascorbe Salcedo

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1981). Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos (1983). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Andrés Liaño Herrera

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1976). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1981). Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica (1).

Mar Presmanes García

Licenciada en Ciencias Químicas. Becaria de la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria.

Ignacio Tejero Monzón

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1976). Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1980). Catedrático de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (1).

Como equipo de trabajo han llevado a cabo estudios e investigaciones en diversos campos dentro del ámbito de la Ingeniería Hidráulica y de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental, que han dado lugar a varios informes técnicos y publicaciones, tanto a nivel nacional como internacional.

(1) Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.