

Modelización de la calidad del agua en ríos fuertemente contaminados por aguas residuales urbanas. Experiencias en el río Sar (Galicia)

Joaquín Suárez¹, Ignacio Ardá², Javier González³, Jerónimo Puertas⁴, Ramón García⁵, Manuel Álvarez⁶, Sara Vieito⁷

jsuarez@udc.es

(1) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Profesor Titular, Universidade da Coruña

(2) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Director de Obra, Conf. Hidr. del Cantábrico

(3) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Jefe de Área, Conf. Hidr. del Cantábrico

(4) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Catedrático, Universidade da Coruña

(5) Licencia en Ciencias Químicas; Investigador asociado, Universidade da Coruña

(6) Ingeniero Hidrólogo; Profesor Asociado, Universidade da Coruña

(7) Técnico FP II; Laboratorio de Ing. Sanitaria y Ambiental, Universidade da Coruña

1 Introducción

Con el fin de analizar la incidencia sobre el río Sar del efluente de la nueva depuradora de aguas residuales que se construirá para el sistema de saneamiento y drenaje de la aglomeración urbana de Santiago de Compostela se consideró de interés la elaboración de un modelo numérico de calidad de aguas del río. El trabajo que se presenta a continuación es parte de la asistencia técnica denominada "ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS EFLUENTES DE LA NUEVA EDAR DE SANTIAGO DE COMPOSTELA SOBRE EL RÍO SAR MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS", realizada para la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

El río Sar es un afluente del río Ulla por su ribera derecha; nace en la parroquia de Bando (Santiago de Compostela) y desemboca en al parroquia de Iria Flavia (Padrón). Un tramo del Río Sar está incluido en la Red Natura 2000. Es habitual que en estiaje, a la altura en que recibe el vertido de la actual EDAR, a sólo unos 11 km de su nacimiento, el río presente caudales inferiores a los de la propia EDAR. La escasa capacidad del río para recibir contaminación sin que la calidad del sistema acuático se vea alterada ha motivado a la Confederación Hidrográfica del Cantábrico a proponer un análisis más detallado de la influencia sobre el río de los efluentes de la nueva EDAR con diferentes grados de tratamiento. En el estudio solo se analizó la interrelación depuradora-río en situaciones de tiempo seco.

Dado el tipo de problemática de calidad de aguas a estudiar, y los recursos disponibles, se optó por utilizar un modelo de régimen estacionario, concretamente el QUAL2E (Brown, 1987). La propia Confederación Hidrográfica del Cantábrico lo ha utilizado ya en otras ocasiones para analizar problemas de calidad de aguas.

El modelo de simulación consta de dos partes fundamentales: el modelo hidráulico y el modelo de calidad del agua. La calibración y validación de los submodelos implica la realización de tres tipos de campañas de campo: campañas de aforo de caudales, campañas de dispersión y campañas de calidad/contaminación de aguas, tanto del río que se modeliza como de afluentes y vertidos principales.

2 El sistema de saneamiento y drenaje de Santiago de Compostela

Santiago de Compostela es la capital de la Comunidad Autónoma de Galicia. Con una población creciente de más de 100.000 habitantes de derecho (unos 125.000 de hecho) es la tercera ciudad en tamaño de la Comunidad. Se encuentra situada entre dos ríos, el Sar y el Sarela (afluente del primero), que fueron el motivo de que surgiera el germen de la ciudad y que son en la actualidad los que más presión reciben de la misma.

El sistema de saneamiento de Santiago es unitario a excepción de alguna nueva área urbanizada recientemente. Se diferencian claramente tres zonas: el casco antiguo, zona del ensanche, y nuevos asentamientos. La cuenca urbana se podría describir de forma general en dos tipologías, una con urbanización cerrada (80% de zona impermeable) de 3.9 km² y otra de urbanización abierta (20% - 40% de área impermeable) de 5.5 km².

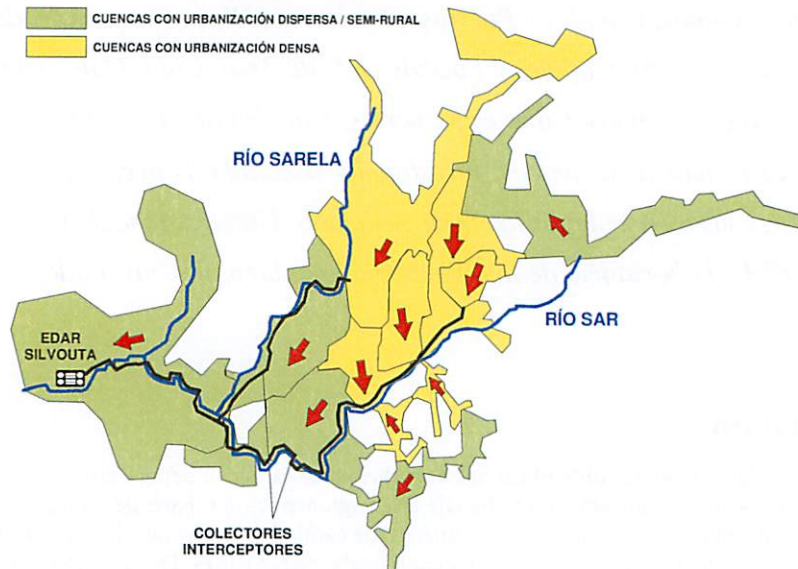


Figura 1 Croquis de las subcuencas de saneamiento y drenaje de la aglomeración urbana de Santiago de Compostela.

El sistema de colectores interceptores tiene forma de "Y" y discurren paralelos a los ríos Sar y Sarela. Su estado de conservación actual no es bueno, permitiendo que aguas fluviales penetren en las conducciones en algunos puntos. Por supuesto, en época de lluvias, y a través de los numerosos aliviaderos, se vierten a los dos ríos las aguas que no pueden ser transportadas a la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Silvouta. Un elevado volumen de agua, con una importante carga contaminante, se vierte sistemáticamente durante estos sucesos a ambos ríos.

La depuradora, convencional de fangos activos (sin nitrificación y desnitrificación por lo tanto), está a menudo al borde del colapso puesto que los caudales máximos que es capaz de tratar ya son superados en ocasiones en tiempo seco, por lo que se producen vertidos de aguas residuales brutas a través del by-pass de la EDAR. Las dificultades de operar la planta en esta situación, que debería ser excepcional y no ordinaria, hace que tanto la línea de agua como la línea de fango se desequilibren y, por lo tanto, la calidad del efluente empeore.

Ambos ríos, Sar y Sarela, nacen en las proximidades de la ciudad, por lo que apenas son arroyos de menos de 4 metros de anchura y unos decímetros de profundidad cuando ya comienzan a recibir pequeños vertidos. Conforme van incorporando cuenca receptora van aumentando también sus caudales pero a la altura de la EDAR, con un caudal medio de 400 L/s, el río Sar apenas lleva 200-300 L/s en estiaje. La calidad del efluente de la EDAR condiciona totalmente la calidad del agua del río. Los efectos de los sucesos de rebose de alcantarillado en época de lluvia, frecuentes en esta región, junto a la situación anteriormente comentada, han degradado finalmente el ecosistema fluvial.

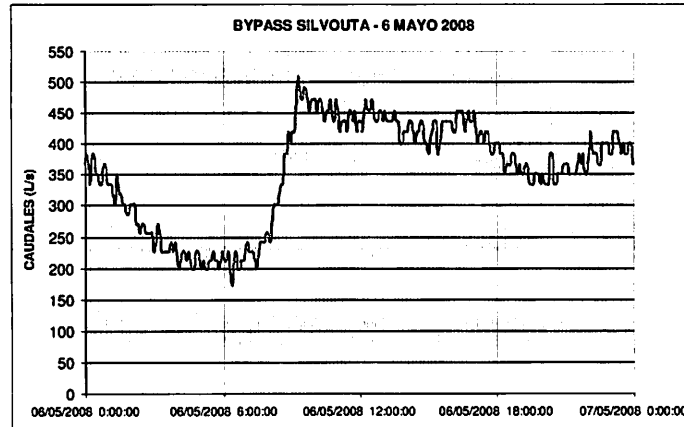


Figura 2 Curva de caudal vertido a través del by-pass de la EDAR de Silvouta en uno de los días de realización de las campañas de campo para la elaboración del modelo

3 Objetivos y metodología

El trabajo tenía como objetivo principal el elaborar, calibrar y validar un modelo numérico de simulación de la calidad físico-química de las aguas del río Sar, desde el actual emplazamiento de la EDAR hasta un punto, aguas abajo en el río, en que se consideró que la influencia de la misma es despreciable. Dicho modelo de simulación debía permitir estudiar la alteración de la calidad de las aguas en diferentes escenarios de caudales fluyentes y de efluentes de la nueva EDAR de Santiago de Compostela.

Una vez se elaboró el modelo, que simula de un modo “útil” el comportamiento del río Sar, se procedió a configurar escenarios que simulaban situaciones críticas o pésimas de calidad del agua del río, y se valoró la mejora que supondría para la calidad de las aguas la construcción de la nueva infraestructura.

La metodología que se utilizó es la clásica para la construcción de un modelo “real” de calidad de aguas; de forma sintética se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Metodología seguida en la elaboración del modelo de calidad de aguas del río Sar

METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN DE UN MODELO DE CALIDAD DE AGUAS DEL RÍO SAR
ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS
RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA ACUÁTICO Y SU CONTEXTO
<ul style="list-style-type: none"> • Recopilación y análisis de datos. • Reconocimiento de los impactos significativos. • Definición de la estrategia de simulación (espacial y temporal). • Selección de parámetros a modelizar.
SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE MODELIZACIÓN
CONCEPTUALIZACIÓN DEL RÍO
<ul style="list-style-type: none"> • Selección de presiones más importantes. • Definición de flujos másicos (entradas y salidas). • Definición de condiciones de contorno. • Establecimiento del modelo geométrico-hidráulico.
ELABORACIÓN DE UN PREMODELO
<ul style="list-style-type: none"> • Selección de constantes y tasas de otros modelos y de la bibliografía.
ELABORACIÓN DE UN MODELO CALIBRADO
<ul style="list-style-type: none"> • Basado en campaña de campo que configura el "escenario de calibración".

<ul style="list-style-type: none"> • Se miden caudales, dispersión, contaminación de vertidos y calidad de aguas.
ELABORACIÓN DE UN MODELO VALIDADO <ul style="list-style-type: none"> • Basado en campaña de campo que configura el "escenario de validación" • Se miden caudales, dispersión, contaminación de vertidos y calidad de aguas.
APLICACIÓN DEL MODELO DEL RÍO <ul style="list-style-type: none"> • Definición de escenarios de interés • Realización de simulaciones • Valoración del cumplimiento de objetivos

4 Reconocimiento del sistema acuático y su contexto

4.1 Características hidrológicas

Las pendientes del cauce determinan dos tipologías de río claramente diferenciadas que tienen una gran importancia en el comportamiento en cuanto a calidad del agua del río. Se puede diferenciar un primer “tramo alto”, que discurre desde la cabecera del tramo del Sar modelizado, el denominado Puente de Silvouta (situado apenas 200 metros antes del vertido de la EDAR actual) hasta el puente de Lapido; el río desciende 86 metros en 5 kilómetros. En este primer tramo son frecuentes los rápidos y el calado es pequeño. El segundo tramo discurre desde Lapido hasta Padrón; el río cambia radicalmente de características; desciende apenas 25 metros en 19 kilómetros. En esta segunda zona el río tiene abundantes meandros y se hace más profundo y lento. Las campañas de calidad del agua y de caracterización hidráulica se han diseñado teniendo muy en cuenta las características anteriormente descritas.

Los procedimientos de cálculo empleados en la estimación de los caudales medios anuales y de los caudales mínimos en cada uno de los 11 puntos de estudio, ubicados en la cuenca del Sar, se han basado en el método de análisis regional de frecuencia”.

Para la realización de las campañas de aforo de caudales se definieron 11 secciones de control. Siete de ellas situadas en el cauce principal, mientras que el resto se destinaron a medir los caudales aportados por los afluentes más importantes situados aguas abajo del vertido de la EDAR de Silvouta. Para cada uno de los 11 puntos de estudio se determinaron las principales características morfométricas de sus respectivas cuencas (área, pendiente media y altura media), así como otras características relevantes de los ríos (longitud, pendiente media, tiempo de concentración, etc.).

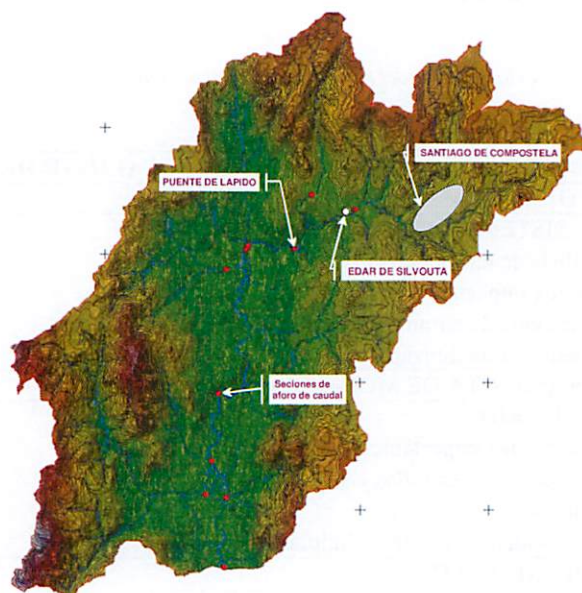


Figura 3 Cuenca del río Sar hasta la sección de cierre establecida para el modelo (MDT20)

5 Descripción general del QUAL2e

El modelo de la EPA QUAL2E es un modelo estacionario, o de régimen permanente, contrastado a nivel internacional. En el esquema siguiente se presenta el submodelo de calidad del agua que es capaz de manejar el QUAL2E. Si bien el modelo lo permite, no se simularán las algas. El resto de los fenómenos sí fue modelizado.

El modelo QUAL2E (US-EPA) discretiza el río en tramos, que a su vez están compuestos por elementos. Los elementos, que son reactores de mezcla completa, son de igual longitud y cada tramo puede tener diferente número de ellos. El número de tramos que se utilizan para describir el río depende en gran medida de la complejidad del sistema que se modeliza.

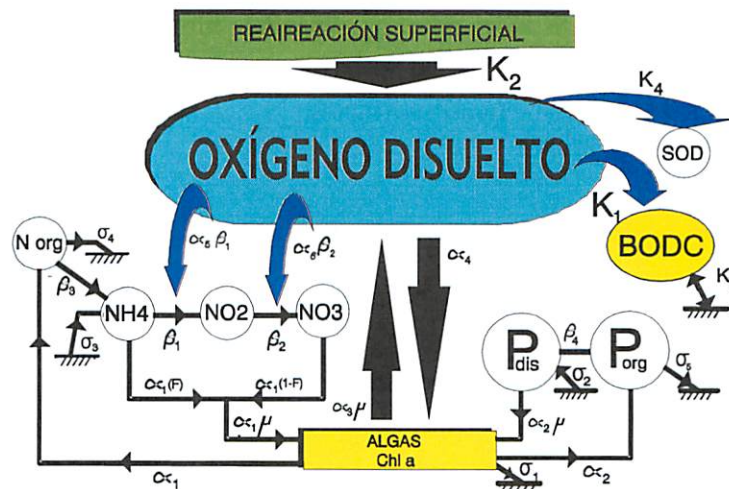


Figura 4 Esquema general del balance de oxígeno en el modelo QUAL2E con sus diferentes variables y parámetros

6 Construcción de un modelo numérico del río Sar

6.1 Conceptualización del río

Con el fin de simplificar la compleja realidad inherente a un sistema acuático fluvial y adaptarlo a los requerimientos del QUAL2E se procedió a dividir el río Sar en elementos y tramos:

- Se modelizaron 24 km de río.
- Se adoptó como longitud de elemento 200 metros (longitud de reactor de mezcla completa para el QUAL2E, y por lo tanto de igual calidad del agua), que permite introducir vertidos y afluentes con suficiente precisión para el tipo de análisis de calidad de aguas que se va a realizar. Se definieron 120 elementos.
- Se dividió el río en 11 tramos de longitud variable. Cada tramo permite la definición de unas determinadas tasas cinéticas.

6.2 Descripción general de las campañas de caracterización de los escenarios de calibración y validación

Con el fin de elaborar un “modelo calibrado” y un “modelo validado”, se procedió a planificar dos campañas de campo; la primera fue realizada el día 11 de febrero de 2008 y la segunda el día 6 de mayo de 2008. En ellas se realizaron las actividades que se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 2 Resumen de las actividades realizadas en las campañas de campo y en laboratorio para caracterizar los escenarios de calibración y validación del río Sar.

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA		
CAUDAL: (Equipos: Molinete A-OTT Tipo C2, y 3 caudalímetros Hach-SIGMA 950): Nº de secciones de control de caudal con aforo manual: <div style="text-align: right;">Cauce principal:</div> <div style="text-align: right;">Afluentes:</div> Nº de secciones de control de caudal con sección de aforo fija: <div style="text-align: right;">EDAR de Silvouta:</div>	CALIBRACIÓN 6 4 3	VALIDACIÓN 2 4 3
DISPERSIÓN: (Equipos: Rhodamina. WT, 2 Fluorómetros Turner 10-AU-005): Nº de secciones en las que se lanzó pulso de trazador: Nº de secciones en las que se midió el paso de trazador:	CALIBRACIÓN 1 2	VALIDACIÓN 2 8
CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD/CONTAMINACIÓN DEL AGUA		
CAUCE PRINCIPAL Nº de secciones definidas en el cauce principal: Nº de muestra tomadas: Nº de valores de calidad del agua medidos "in situ": Nº de determinaciones analíticas realizadas en laboratorio: AFLUENTES Nº de secciones definidas en afluentes: Nº de muestra tomadas: Nº de valores de calidad del agua medidos "in situ": Nº de determinaciones analíticas realizadas en laboratorio: VERTIDOS Nº de vertidos muestreados: Nº de muestra tomadas: Nº de valores de calidad del agua medidos "in situ": Nº de determinaciones analíticas realizadas en laboratorio:	CALIBRACIÓN 13 13 26 195 4 4 8 60 6 6 12 90	VALIDACIÓN 14m+13t 14m+13t 28m+26t 210m+195t 4m+3t 4m+3t 8m+6t 120m+6t 6m+4t 6m+4t 12m+8t 90m+60t
NOTA: "m"-muestras de la mañana; "t"-muestras de la tarde		

6.2.1 Campañas de aforos

Se realizaron tres campañas de aforo de caudales: la de calibración, la de validación y una campaña de rastreo, previa a las dos citadas, para localizar buenas secciones aforo, tener un orden de magnitud de caudales y valorar las relaciones área de aportación-caudal.

Durante la campaña de calibración el caudal en la cabecera del tramo modelizado fue de 1,14 m³/s y de 6.9 m³/s en la sección de cierre. Durante la campaña de validación el caudal en la cabecera del tramo modelizado fue de 1,5 m³/s y de 8,1 m³/s en la sección de cierre.

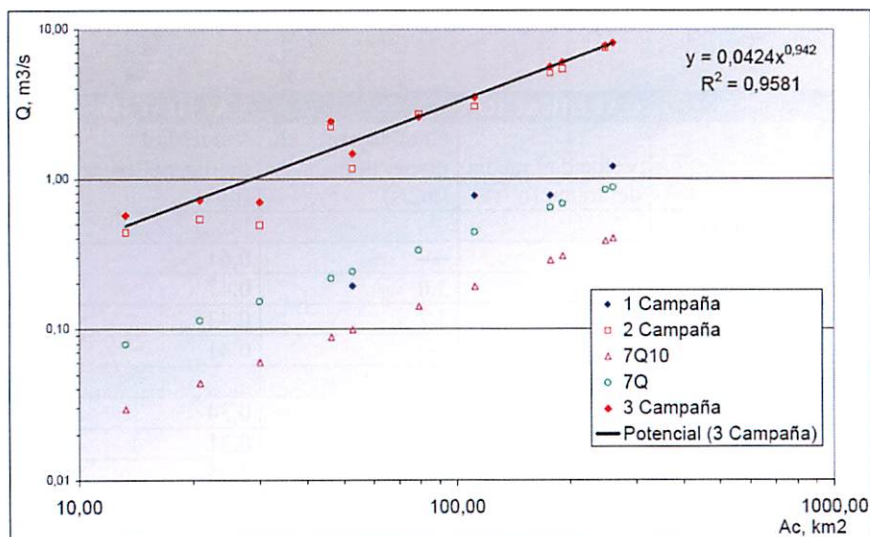


Figura 5 Ajuste de área de aportación-caudal con la campaña de validación (3ª campaña), valores obtenidos en las otras campañas, y caudales de estiaje estimados

6.2.2 Campañas de medida de la dispersión

Para el cálculo del coeficiente de dispersión y de las velocidades medias de tramo se realizaron dos campañas de trazadores. Se utilizó Rhodamina WT como trazador. Se liberaron masas de trazador a la altura del vertido de la EDAR de Silvouta (tramo alto) y de la EDAR de Ames (tramo bajo), y se midió el paso del trazador en varias secciones aguas abajo. Se disponía de dos fluorómetros Turner 10-AU para medir el paso del pulso de Rhodamina; además se recogieron muestras discretas para su posterior medida en el laboratorio.

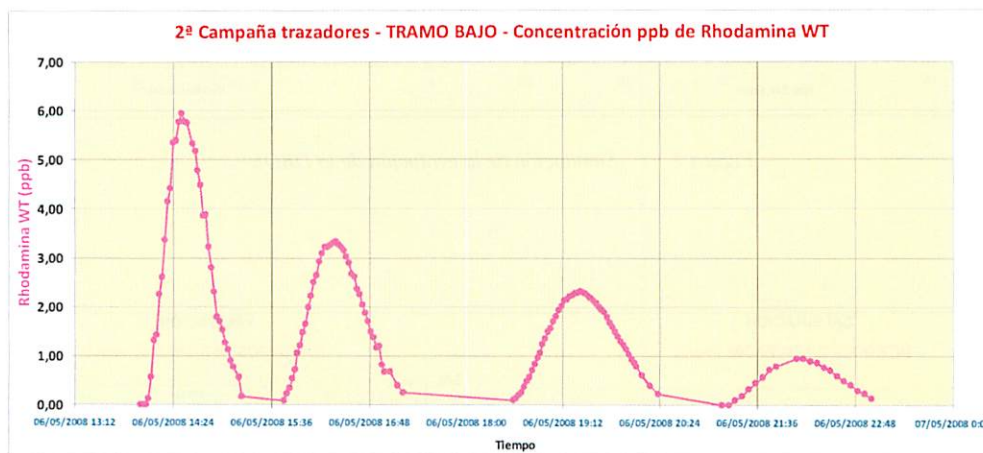


Figura 6 Curvas de paso de la Rhodamina WT en las cuatro secciones del "tramo bajo"

Tabla 3 Velocidades medias y coeficiente de dispersión en los tramos caracterizados

Sección	CALIBRACIÓN		VALIDACIÓN	
	Velocidad media del tramo (m/s)	Coficiente de dispersión (m ² /s)	Velocidad media del tramo (m/s)	Coficiente de dispersión (m ² /s)
Inyección 1 - Puente Silvouta				
Puente del sendero	----	----	0,61	10,0
Instrumento	0,38	3,6	0,47	7,1
Lapido	0,41	3,7	0,43	5,6
EDAR Bertamiráns	----	----	0,41	5,4
Inyección 2 - EDAR Ames				
San Salvador de Bastavales	----	----	0,34	4,6
Ponte Codesido	----	----	0,31	4,0
Ponte Meeana	----	----	0,35	6,3
Cierre del Polígono	----	----	0,37	4,6

6.3 Resultados de la modelización de los escenarios de calibración y validación

A continuación se presenta una selección de resultados del modelo numérico del río Sar calibrado y validado. Se comparan los resultados obtenidos con el QUAL2E y los valores medidos en las campañas de calibración y validación.

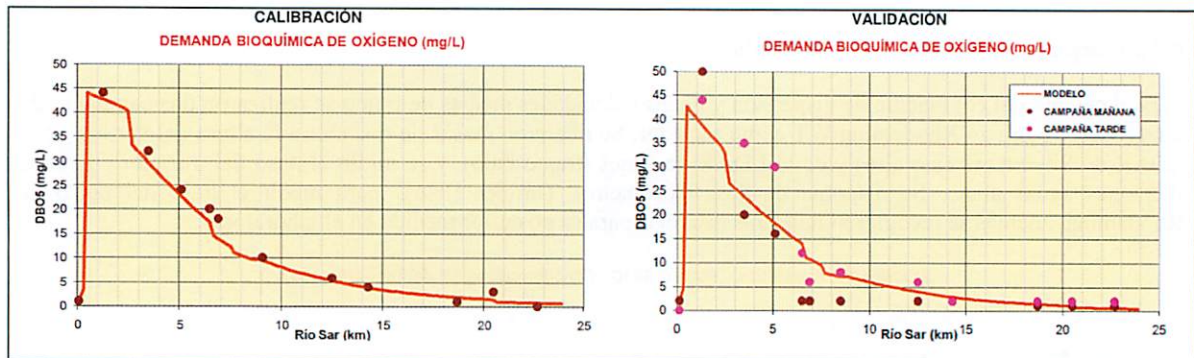
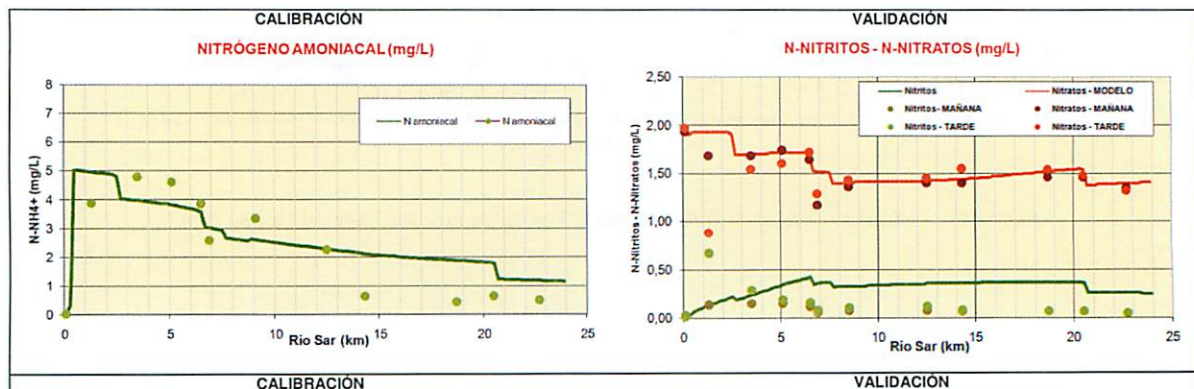


Figura 7 Simulación de la evolución de la DBO5



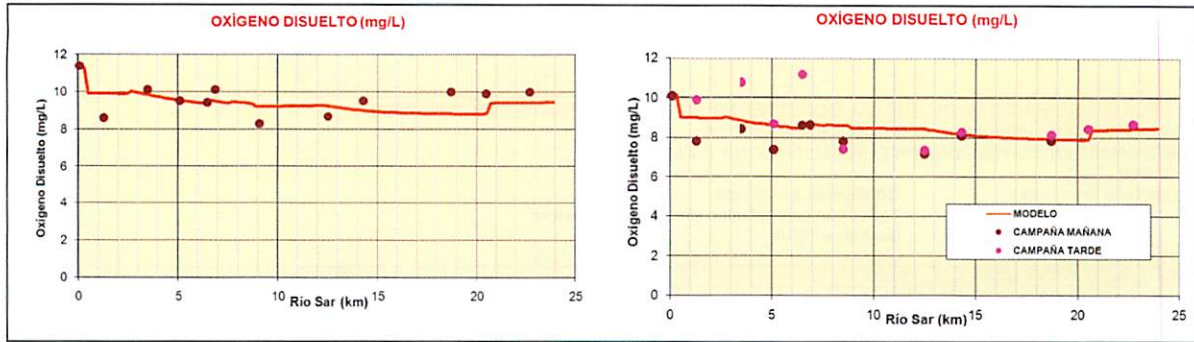


Figura 8 Simulación de la evolución de diferentes formas de nitrógeno y del oxígeno disuelto

En la tabla siguiente se presentan los valores de los parámetros y constantes a las que se ha llegado después de un proceso de ajuste al “escenario de calibración” y al “escenario de validación”, de forma conjunta, de las simulaciones obtenidas mediante el QUAL2E.

Tabla 4 Parámetros y constantes de las cinéticas de los parámetros de calidad de aguas una vez ajustados los escenarios de calibración y validación.

Parámetros de Oxígeno Disuelto y DBO		
K1	Tasa de desoxigenación carbonosa (día-1)	0.20 y 0.15
K3	Tasa de desaparición de DBO por sedimentación (día-1)	2, 5 y 7
K4	Consumo béntico de oxígeno (mg-O/m2.día)	0.00
K2	Constante de reaireación (día-1)	Formulación de Owens, Edwards y Gibs y O'Connor y Dobbins
Parámetros de Nitrógeno y Fósforo		
β_3	Tasa de hidrólisis del N-org a N amoniacal (día-1)	0,15 y 0.20
σ_4	Tasa de sedimentación del N-orgánico (día-1)	0.1
β_1	Tasa de oxidación biológica del N-NH4+ a N-NO2- (día-1)	1.0
σ_3	Tasa de fuente béntica de N-amoniacal (mg-O/m2-día)	3.0 y 0.0
β_2	Tasa de oxidación biológica de N-NO2- a NO3- (día-1)	2 y 3
β_4	Tasa de transformación de P-orgánico a P-disuelto (día-1)	0.5
σ_5	Tasa de sedimentación del P-orgánico (día-1)	0.0 y 5.0
σ_2	Tasa de fuente béntica de P-disuelto (mg-P/m2-día)	0.0

7 Análisis de los impactos de la nueva EDAR en diferentes escenarios

Una vez se dispuso de un “modelo real” del río Sar, calibrado y validado, fue posible comenzar a analizar diferentes escenarios de interés. Se simularon los siguientes: En primer lugar se analizó cómo evolucionaría la calidad del agua del río cuando, manteniendo la situación actual, se produjese un estiaje severo (7Q10) y, en segundo lugar, se analizó la situación futura en la que la depuradora estaría funcionando a pleno rendimiento y, de nuevo, se de una situación de estiaje severo.

Se han analizado soluciones de EDAR con tres efluentes diferentes, todos ellos de una gran calidad. Los escenarios analizados fueron los que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5 Variables que se consideraron en los escenarios analizados con el modelo numérico del río Sar.

TIPOLOGÍAS BÁSICAS DE EDAR A CONSIDERAR EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS			
A) BIOMASA EN SUSPENSIÓN CON ELIMINACIÓN DE N Y P			
B) BIOMASA EN SUSPENSIÓN CON ELIMINACIÓN DE N Y P + AFINO			
C) MBR			
Hipótesis principales:		OD effluente 2 - 4,5 mg/L Todos con precipitación simultánea de fósforo Qestiaje = 7Q10	
CAUDALES NUEVA EDAR		m3/h	L/s
CAUDAL MEDIO DIARIO		72000	0,833
CAUDAL MEDIO HORARIO		3000	0,833
CAUDAL HORARIO PUNTA		5400	1,500
			1,8
SANTIAGO		Valor climático	
Temperatura MEDIA		18	19,9
Temperatura MÁXIMA MEDIA		23,3	25,3
Temperatura MÍNIMA MEDIA		4,5	6,3
ESCENARIOS NUEVA EDAR	A) BIOMASA EN SUSPENSIÓN CON ELIMINACIÓN DE N Y P	B) BIOMASA EN SUSPENSIÓN CON ELIMINACIÓN DE N Y P + AFINO	C) MBR
OD EFLUENTE (mg/L)	2 - 4,5	2 - 4,5	2 - 4,5
DBO5 (mg/L)	15	3 A 8	3 A 8
SS (mg/L)	15	5	1
NITRÓGENO			
NTK (mg/L)	4	3	1,9
N-NH4 (mg/L)	0,8	0,8	0,8
N-NO3 (mg/L)	6	6	6
N-TOTAL (mg/L)	10	9	7,9
P-TOTAL (mg/L)	1	0,8	1
1) SITUACIÓN ACTUAL Igual cont. de fondo y Ames	[A1] Q estiaje / Tª alta	[B1] Q estiaje / Tª alta	[C1] Q estiaje / Tª alta
2) SITUACIÓN ACTUAL Óptimo en EDAR Ames	[A2] Q estiaje / Tª alta	[B2] Q estiaje / Tª alta	[C2] Q estiaje / Tª alta

Se trata de escenarios en los que el río está en estiaje (7Q10) y la temperatura ambiental es alta (escenario típico de verano); se trata de un escenario muy desfavorable. Los valores obtenidos mediante modelización se compararon con los objetivos de calidad del agua fijados por las diferentes normativas y planes.

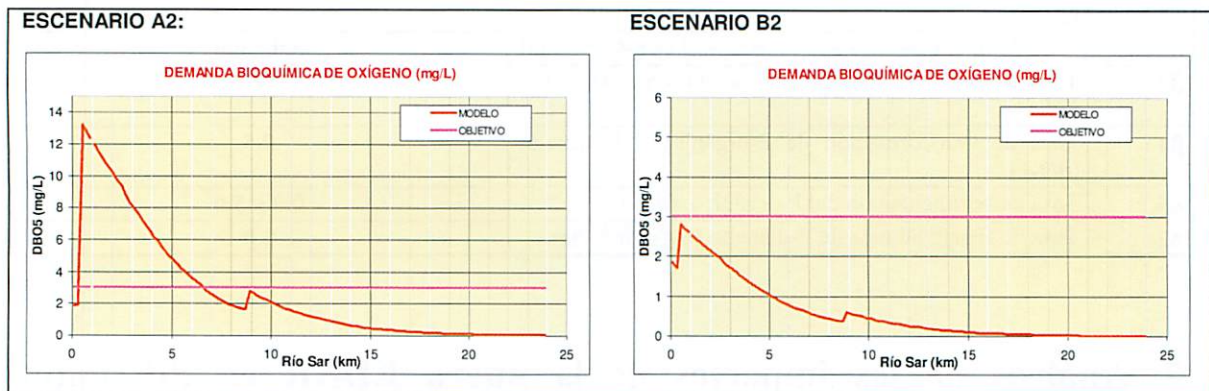


Figura 9 Simulación de la evolución de la DBO₅ con diferentes efluentes en la nueva EDAR

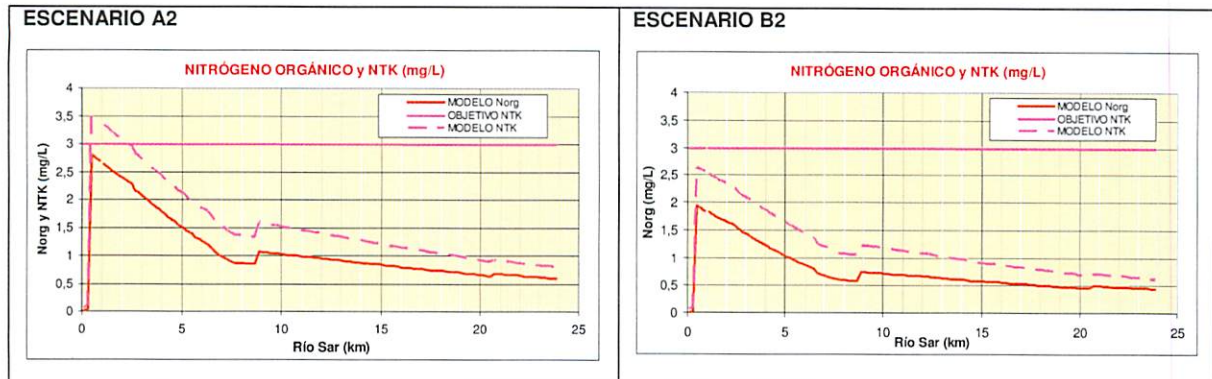


Figura 10 Simulación de la evolución de diferentes formas de nitrógeno con diferentes efluentes en la nueva EDAR

8 Valoraciones del cumplimiento de los diferentes parámetros de calidad de aguas en los escenarios modelizados

De las simulaciones realizadas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La DBO5 podría ser un problema en el punto de mezcla, pero queda resuelto si se utilizan las estrategias de EDAR [B], biomasa en suspensión con eliminación de N y P, más un afino, y [C], que utilizaría MBR.

Los SS en suspensión no representan ningún problema, dado que todas las líneas de depuración analizadas tienen un magnífico efluente en este parámetro.

Respecto al oxígeno disuelto comentar que el río soporta bien los consumos por degradación de la materia orgánica (por otra parte ya muy refractaria) y por nitrificación del efluente de la EDAR. La reaireación que se produce aguas debajo de la EDAR es muy importante. Incluso con valores de DBO5 por encima de los de la legislación el río seguiría cumpliendo en oxígeno disuelto. El punto de mezcla puede suponer algún incumplimiento transitorio de los objetivos, pero se solucionaría el problema habilitando una infraestructura de reoxigenación del efluente.

Para cumplir la normativa en NTK es necesario recurrir a un tratamiento avanzado, tipo [B] ó [C], ya que es necesario reducir el N orgánico del efluente.

Con el NH_4^+ no hay problema, se alcanzan los objetivos buscados. Las simulaciones ponen de manifiesto que no debería haber problemas con el amoníaco, y se cumplirán los objetivos de calidad.

Respecto a los nitratos se cumplen los objetivos de calidad.

Hay que recordar que el escenario que se ha analizado (estiaje severo con temperatura ambiental alta) es muy desfavorable y que se están utilizando las Mejores Técnicas Disponibles (es decir, tecnologías avanzadas con costes de inversión y explotación asumibles socialmente).

Si bien el QUAL2e ha sido una herramienta útil para el análisis de incidencia de los efluentes de la nueva EDAR, no ha sido el modelo más adecuado para el análisis de los escenarios de calibración y validación, ya que no se puede simular la gran oscilación de los valores de los parámetros de calidad del agua generada por el vertido del by-pass de la EDAR. Un modelo de régimen no permanente hubiese sido más adecuado.

9 Referencias bibliográficas

Brown, I.C.; Barnwell, T.O.; (1987); "The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS"; US-EPA; Athens (EEUU); 1 Vol.; 189 pag. .

Chapra, S.C. (1997); "Surface water-quality modeling"; McGraw-Hill; New York; (USA) ISBN 00-784-33061

Thomann, R.; Mueller, J.A.; (1987); "Principles of surface water quality modeling and control"; Harper & Row; U.S.A.; 1 Vol.; 644 pag.