

Trabajo Fin de Máster

MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA DE
TRAMO MEDIO-BAJO DEL RÍO PISUERGA. PROPUESTA DE
MEDIDAS DE MEJORA

Intensificación: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

ANA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

Director:

JAVIER PAREDES ARQUILOA

JULIO, 2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

| Datos del proyecto |
|---|
| Título: MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA DE TRAMO MEDIO-BAJO DEL RÍO PISUERGA. PROPUESTA DE MEDIDAS DE MEJORA |
| Alumno: ANA GONZÁLEZ SÁNCHEZ. |
| Director: DR.JAVIER PAREDES ARQUILOA |
| Fecha de Lectura: 24 Junio,2015 |

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es analizar la calidad del agua del río Pisuerga en su tramo medio-bajo y su confluencia con el río Duero, en la provincia de Valladolid. Se ha desarrollado un modelo de simulación que nos ha permitido conocer el estado de la calidad del agua y nos ha facilitado la realización de una serie de propuestas de medidas de mejora para el cumplimiento de la normativa Europea.

Se ha analizado la evolución temporal de la concentración de oxígeno disuelto, DBO5, amonio, nitratos y fósforo a lo largo del tramo objeto de estudio. Se ha especificado la problemática a partir de las concentraciones de los parámetros, así como los tramos más afectados, con el propósito de identificar las fuentes de contaminación. Esta información ha proporcionado un mejor conocimiento para proponer distintas medidas de mejora necesarias a llevar a cabo para incrementar la calidad del agua.

La simulación ha sido efectuada con el sistema de soporte de decisión AquaToolDMA, que permite modelar la gestión y planificación de los Recursos Hídricos. Para la modelización de la calidad del agua se usó la herramienta GESCAL, que tiene la capacidad de realizar un modelo de calidad de aguas a escala cuenca.

Las simulaciones de escenarios con diferentes medidas de mejora y el análisis de resultados, han permitido establecer cuáles son las principales actuaciones a llevar a cabo. Por tanto, se ha concluido con la propuesta de un plan de mejora de la EDAR de Valladolid reduciendo las concentraciones de amonio y DBO5 en el vertido.

Además, se ha adjuntado una propuesta con diferentes líneas de investigación, con la finalidad de determinar las fuentes de contaminación externas a la zona de estudio.

Palabras clave (máximo 5): Pisuerga, Duero, GESCAL, EDAR, soporte de decisión.



ABSTRACT

The objective of this project is to analyze the water quality of the River Pisuerga in its medium-low segment and its confluence with the Duero River in the province of Valladolid. It has been carried out a simulation model that it has allowed us to know the state of water quality and it has provided the development of proposals of improvement measures to comply with the European regulations.

It has been analyzed the temporal evolution of the concentration of dissolved oxygen, DBO5, ammonium, nitrate and phosphorus along the section under study. The problem is specified from the concentrations of the parameters, as well as the sections most affected, in order to identify sources of pollution. This information has provided a better knowledge to propose different measures necessary to increase the water quality.

The simulation has been made with the decision support system AquaToolDMA, which allows to model the management and planning of water resources. For modeling water quality GESCAL tool that has the ability to conduct a water quality model was used to basin scale.

The simulations of scenarios with different measures of improvement and the analysis of results have established the main actions to perform. Therefore, it has been concluded with the suggestion of a plan to improve the EDAR of Valladolid reducing DBO5 and ammonium concentrations in the discharge.

Moreover, it has attached a proposal with different lines of research, in order to determine the sources of contamination outside the study area.



RESUM

L'objectiu del present projecte és analitzar la qualitat de l'aigua del riu Pisuerga al seu tram mitjà-baix i la seua confluència amb el riu Duero, en la província de Valladolid. S'ha desenvolupat un model de simulació que ens ha permés coneixer l'estat de la qualitat de l'aigua i ens ha facilitat realitzar una sèrie de propostes de mesures de millores per al compliment de la normativa europea.

S'ha analitzat l'evolució temporal de la concentració d'oxigen dissolt, DB05, amoni, nitrats i fòsfor al llarg del tram estudiat. S'ha especificat la problemàtica a partir de les concentracions dels paràmetres, així com dels trams més afectats amb el propòsit d'identificar les fonts de contaminació. Aquesta informació ha proporcionat un millor coneixement per a proposar distintes mesures de millora necessàries per a incrementar la qualitat de l'aigua.

La simulació es va efectuar amb el sistema de suport de decisió AguaToolDMA, que permeteix modelar la gestió i planificació dels Recursos Hídrics. Per a la modelització de la qualitat de l'aigua es va utilitzar la ferramenta GESCAL, que té la capacitat de realitzar un model de qualitat d'aigües a escala conca.

Les simulacions d'escenaris amb diferents mesures de millora i l'anàlisi de resultats, han permés establir quines són les principals actuacions que s'han de dur a terme. Per tant, s'ha conclós amb la proposta d'una millora de l'EDAR de Valladolid reduïnt les concentracions d'amoni i DB05 en l'abocament.

De la mateixa manera, s'ha adjuntat una proposta amb diferents línies d'investigació, amb la finalitat de determinar les fonts de contaminació externes a la zona d'estudi.

"No hay vida sin agua"

Albert Szent-Gyorgyi

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Resumen..... | i |
| Abstract | ii |
| Resum..... | iii |
| ÍNDICE..... | vii |
| LISTA DE SIGLAS..... | xiii |
| FIGURAS..... | xv |
| TABLAS..... | xix |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| Influencia de las zonas urbanas en los recursos hídricos | 2 |
| Influencia de la agricultura y la ganadería en los recursos hídricos | 2 |
| La gestión de los recursos hídricos | 3 |
| 1.1 Panorama general de los recursos hídricos en Castilla y León | 4 |
| 1.2 Objetivo del trabajo | 7 |
| 1.3 Estructura del Trabajo..... | 8 |
| 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO PISUERGA. | 9 |
| 2.1 Características generales de la cuenca | 10 |
| Geomorfología | 10 |
| Climatología | 11 |
| 2.2 Sistema de explotación del Pisuerga | 12 |
| Aguas superficiales..... | 13 |
| Aguas subterráneas | 14 |
| 2.3 Zonas sensibles | 16 |
| 3. FUENTES DE INFORMACIÓN..... | 19 |

| | |
|--|----|
| Datos de Sistemas de Información Geográfica | 19 |
| Red Oficial de estaciones de caudales del Estado Español..... | 20 |
| Datos de las series SIMPA | 20 |
| Red de control de la calidad del agua | 20 |
| Datos de Aguas Residuales | 23 |
| Vertidos de aguas residuales de la planta de tratamiento (EDAR)..... | 24 |
| Vertidos de aguas residuales industriales | 25 |
| 4. ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA PISUERGA | 26 |
| 4.1 Caudales | 29 |
| 4.2 Calidad del agua | 30 |
| 4.2.1. El oxígeno disuelto (OD)..... | 31 |
| 4.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) | 33 |
| 4.2.3. Nitrógeno | 34 |
| 4.2.3.1. Amonio..... | 34 |
| 4.2.3.2. Nitratos | 36 |
| 4.2.3.3. El nitrógeno orgánico..... | 41 |
| 4.2.4 Fósforo Total | 41 |
| 4.3. Conclusión y diagnóstico de la calidad del agua..... | 42 |
| 5. HERRAMIENTA GESCAL PARA EL DARROLLO DEL MODELO | 45 |
| 5.1. Introducción | 45 |
| 5.2. Formulación de Modelo..... | 46 |
| 5.2.1 Modelado en conducciones | 46 |
| 5.2.2 Procesos modelados y componentes | 50 |
| Contaminantes arbitrarios | 50 |
| Materia orgánica y oxígeno disuelto | 50 |

| | |
|--|----|
| Materia Orgánica Carbonosa | 52 |
| Nitrógeno orgánico | 53 |
| Amonio..... | 53 |
| Nitritos y Nitratos..... | 54 |
| Fósforo orgánico | 54 |
| Fosfatos..... | 55 |
| Oxígeno disuelto | 55 |
| 5.3. Consideraciones generales | 56 |
| Influencia de la temperatura | 56 |
| Influencia de la concentración de oxígeno disuelto | 57 |
| 6. DESARROLLO DEL MODELO..... | 58 |
| 6.1 Aportaciones | 60 |
| 6.2 Conducciones | 61 |
| 6.3 Demandas | 63 |
| 6.4 Canal de Castilla y Canal del Duero..... | 64 |
| Canal de Castilla | 64 |
| Canal del Duero..... | 65 |
| 6.5 Centrales hidroeléctricas | 66 |
| 7. SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN CALIBRACIÓN DEL MODELO | 67 |
| 7.1. Simulación de caudales..... | 68 |
| 7.2. Calibración de la calidad del agua..... | 70 |
| 7.3. Comparación de los valores observados y simulados | 72 |
| 7.3.1 Oxígeno Disuelto..... | 72 |
| 7.3.2 Demanda biológica de oxígeno..... | 74 |
| 7.3.3 Amonio..... | 75 |

| | |
|--|-----|
| 7.3.4 Nitratos | 78 |
| 7.3.5 Fósforo | 80 |
| 7.4. Resultados generales y conclusiones acerca de la calibración | 82 |
| 8. SIMULACIONES Y MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA | 86 |
| 8.1 Escenarios de simulación | 86 |
| Escenario 1 | 86 |
| Escenario 2 | 87 |
| Escenario 3 | 88 |
| Escenario 4 | 89 |
| 8.2 Simulaciones y resultados | 90 |
| 8.2.1 Oxígeno disuelto | 90 |
| 8.2.2 Demanda biológica de oxígeno | 91 |
| 8.2.3 Amonio | 91 |
| 8.2.4 Nitratos | 92 |
| 8.2.5 Fósforo | 93 |
| 8.3 Conclusiones de los resultados de las simulaciones y propuesta de acción . | 93 |
| 9. Conclusiones y futuras líneas de investigación | 96 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 101 |
| ANEXO 1 Modelo completo del Pisuerga | 103 |
| ZONA A | 103 |
| ZONA B | 104 |
| ZONA C | 104 |
| ANEXO 2 Escenarios de propuestas de mejora | 105 |
| ANEXO 3 Simulación de medidas de mejora | 105 |
| Tramo en ICA de Valladolid | 105 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Tramo en ICA de Simancas..... | 106 |
| Tramo en ICA de Villamarciel..... | 108 |

LISTA DE SIGLAS

CEE: Comunidad Económica Europea

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CHD: Confederación Hidrográfica del Duero

DBO5: Demanda Biológica de Oxígeno a 5 días

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

GESCAL: Modelo para la Simulación de la Calidad de Recursos Hidráulicos

ICA: Red Integral de Calidad de Aguas

ICONA: Instituto para la Conservación de la Naturaleza

IPH: Instrucción de Planificación Hidrológica

LIC: Lugares de Interés Comunitario

MARM: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

MASb: Masas de aguas subterráneas

NH₄⁺: Amonio

NO₃⁻: Nitratos

OD: Oxígeno Disuelto

OMS: Organización mundialde la salud

PAC: Política Agrícola Común

PHN: Plan Hidrológico Nacional

RPH: Reglamento de Planificación Hidrológica

ROEA: Red Oficial de Aforos del Estado

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SIMGES: Modelo para la Simulación de Gestión de Recursos Hidráulicos

SIMPA: Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación-Aportación

ZEPA: Zona de Especial Protección para las Aves

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Confederaciones Hidrográficas en España..... | 5 |
| Figura 2: Sistema de recursos hídricos en Castilla y León..... | 6 |
| Figura 3: Delimitación de las subzonas de estudio definidas | 10 |
| Figura 4: Gráfico Climograma de Valladolid..... | 11 |
| Figura 5: Acuíferos del Sistema de Explotación Pisuerga. | 14 |
| Figura 6: Zonas protegidas en el Sistema del Pisuerga..... | 17 |
| Figura 7: Estaciones de aforo en el sistema ROEA..... | 26 |
| Figura 8: Estaciones ICA's en el sistema | 27 |
| Figura 9: Puntos de vertido en el Pisuerga | 29 |
| Figura 10: Representación gráfica de caudales acumulados hasta Villamarciel | 30 |
| Figura 11: Gráfico oxígeno disuelto medio a lo largo del tramo | 31 |
| Figura 12: Gráfico de concentraciones de oxígeno disuelto en la estación de Cabezón de Pisuerga | 32 |
| Figura 13: Gráfico concentración de DBO5 a lo largo del tramo | 33 |
| Figura 14: Grafico concentración de amonio a lo largo del tramo | 35 |
| Figura 15: Gráfico relación entre caudal y concentración de amonio en Valladolid... .. | 36 |
| Figura 16: Gráfico concentración de nitratos a largo del tramo..... | 37 |
| Figura 17: Relación entre caudal y concentración de amonio en Valladolid..... | 38 |
| Figura 18: Zonas de regadío en el sistema del Pisuerga | 38 |
| Figura 19: Gráfico concentración de nitratos medio mensual por río..... | 39 |
| Figura 20: Gráfico caudal mensual medio por río..... | 40 |
| Figura 21: Gráfico comparación nitratos-amonio en Simancas..... | 40 |
| Figura 22: Concentración de fósforo a lo largo del tramo | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 23: Esquema de modelación de las conducciones..... | 47 |
| Figura 24: Procesos considerados en la hipótesis básica de modelación del oxígeno disuelto. | 51 |
| Figura 25: Procesos considerados en la modelación del oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno | 52 |
| Figura 26: Topología del modelo del Sistema del Pisuerga en AquatoolDMA | 58 |
| Figura 28: Sección representativa del modelo..... | 59 |
| Figura 29: Gráfico en curvas de temperatura del modelo | 63 |
| Figura 30: Gráfico de demandas en el modelo | 63 |
| Figura 31: Canal de Castilla | 65 |
| Figura 32: Representación gráfica de caudales simulados-observados en Valladolid | 69 |
| Figura 33: Representación gráfica de caudales simulados-observados en Villamarciel | 70 |
| Figura 34: Gráficos de comparación entre valores de OD simulados y observados.... | 73 |
| Figura 35: Gráficos de comparación entre valores de DBO5 simulados y observados | 75 |
| Figura 36: Gráficos de comparación entre valores de amonio simulados y observados | 78 |
| Figura 37: Gráficos de comparación entre valores de nitratos simulados y observados | 80 |
| Figura 38: Gráficos de comparación entre valores de fósforo simulados y observados | 82 |
| Figura 39: Perfiles longitudinales de las concentraciones | 84 |
| Figura 40: Croquis de los tratamientos en la estación depuradora de Valladolid..... | 87 |
| Figura 41: Volumen (Hm ³) del embalse de Aguilar de Campoo entre 1980-2006 | 89 |
| Figura 42: Gráfico de OD en diferentes escenarios | 90 |
| Figura 43: Gráfico de DBO5 en diferentes escenarios | 91 |

| | |
|---|----|
| Figura 44: Gráfico de Amonio en diferentes escenarios..... | 92 |
| Figura 45: Gráfico de Nitratos en diferentes escenarios | 92 |
| Figura 46: Gráfico de Fósforo en diferentes escenarios | 93 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Zonas, subzonas y sistemas de explotación definidos | 9 |
| Tabla 2: Subzonas y su área en km ² | 12 |
| Tabla 3: Principales embalses en el sistema de explotación del Pisuerga..... | 13 |
| Tabla 4: Relación de masas de agua subterránea y % de la superficie de cada MASb15 | |
| Tabla 5: Parámetros de calidad de agua en estaciones | 23 |
| Tabla 6: Estaciones ROEA en el tramo a estudio | 26 |
| Tabla 7: Estaciones ICA en el tramo a estudio | 27 |
| Tabla 8: Puntos de vertido en el tramo a estudio..... | 28 |
| Tabla 9: Lista de las aportaciones naturales del modelo con su ROEA, el ICA y el caudal promedio | 61 |
| Tabla 10: Lista de las conducciones que constituyen el modelo de Pisuerga con sus características..... | 62 |
| Tabla 11: Elementos de comparación entre valores observados y simulados | 68 |
| Tabla 12: Parámetros variables para la calibración | 71 |
| Tabla 13: Lista de los segmentos de la construcción del modelo de Pisuerga con los valores de sus parámetros | 71 |
| Tabla 14: Valores teóricos para la constante del ciclo de nitrógeno..... | 76 |
| Tabla 15: Escenarios de propuestas de mejora | 86 |
| Tabla 16 : Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento secundario..... | 88 |
| Tabla 17: Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento más riguroso..... | 88 |

1. INTRODUCCIÓN

El agua es trascendental para el desarrollo socio-económico y medioambiental al ser un elemento esencial en el desarrollo de la vida. Gran parte de las ciudades han crecido alrededor de zonas con recursos hídricos para poder satisfacer las necesidades propias del ser humano tales como el uso doméstico, la agricultura, la cría de animales o para sistemas de transporte. Con el transcurso del tiempo los ríos aumentaron sus funciones con la generación de energía y el almacenamiento de agua con presas y embalses.

El desarrollo social y económico de una región depende de la disponibilidad hídrica, por otro lado el propio desarrollo y crecimiento de ciudades llevan al deterioro de los recursos naturales. El empeoramiento en la calidad del agua causado por diversas actividades económicas reduce la disponibilidad de agua dulce, degrada el suelo, impacta numerosos ecosistemas terrestres y marinos y encarece el tratamiento de este elemento. Con la finalidad de solucionar la problemática social producida por la escasez de recursos hídricos, en 2010 a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas se reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que el agua potable y la red de saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.

La gestión de los recursos hídricos, con el objetivo de cumplir el derecho fundamental al agua mencionado, se estipula en cada país con la creación de planes y directivas para atender a todas las demandas y garantizar la calidad adecuada de los sistemas hídricos. Las principales preocupaciones sobre la gestión se centraron en la calidad de los ríos y depósitos de agua, en contaminación de acuíferos, en la carga difusa de áreas agrícolas, en la deforestación y en el impacto global climático

Los cambios en la sociedad y el modo de vida, como los cambios en los usos del suelo, la urbanización y el crecimiento poblacional, producen un deterioro en la calidad del agua. El crecimiento poblacional y el éxodo rural afecta de manera directa a las zonas urbanas y los usos del suelo influyen de manera drástica en el caso de la agricultura y ganadería a la calidad de los recursos hídricos.

Influencia de las zonas urbanas en los recursos hídricos

El aumento de la demanda del agua, sobre todo para el uso doméstico e industrial es la consecuencia del crecimiento de las ciudades. Este incremento causado por su fácil acceso ha provocado la generación de un nuevo residuo líquido denominado agua residual. De esa manera, la red de saneamiento de agua residual es una mejora que se da como secuencia lógica de la implantación del sistema de abastecimiento de agua. En caso de falta de abastecimiento de agua, las condiciones de vida son precarias y la población se siente obligada a adoptar medidas más simples para la disposición de las aguas, relacionando el agua con el bienestar de las personas.

Inicialmente los cuerpos de agua recibían el agua residual directamente de los sistemas de saneamiento y de las escorrentías; con el crecimiento de las zonas urbanas, las aguas que llegaban a los ríos eran cada vez más contaminadas y el poder de autodepuración de los ríos no era suficiente para su limpieza. Eso ha llevado uso de nuevos sistemas de tratamiento de agua potable y de aguas residuales, con el fin de evitar la proliferación de enfermedades derivadas el agua contaminada.

Estos nuevos sistemas de tratamiento de aguas conjunto el estado de la red de saneamiento es un indicador en el desarrollo humano en la sociedad. El correcto tratamiento de las aguas residuales antes de su vertido a los cauces naturales protege la calidad de los cauces naturales de agua, la cual influye directamente en la salud pública. El reciclaje de aguas residuales implica una ganancia tanto ambiental como económica.

Influencia de la agricultura y la ganadería en los recursos hídricos

La agricultura y la ganadería de Castilla y León han cambiado a lo largo de los últimos 29 años, a partir de la entrada de España en la Unión Europea. La adaptación a los últimos tiempos ha producido modificaciones en la utilización de la tierra. La producción agraria regional se ha ido adaptando a las directrices marcadas por la Política Agrícola Común (PAC). Las sucesivas reformas de la PAC, unidas a los acuerdos internacionales dentro de la Organización Mundial del Comercio (OMC), son las que de una forma u otra han condicionado el tipo de cultivos tanto de España como de Castilla y León.

Estas actividades incrementan la concentración de nutrientes en el suelo que se establecen, provocando que las filtraciones de estos contaminantes a aguas subterráneas o las escorrentías debidas al riego y a las precipitaciones acaben afectando a las aguas superficiales más cercanos, pudiendo producir problemas de eutrofización.

La agricultura se ha hecho más extensiva y más respetuosa con el medioambiente. Las explotaciones han mejorado sus estructuras productivas; ha aumentado la superficie en regadío y ha desaparecido un alto porcentaje de pequeñas explotaciones, en particular las ganaderas; se ha promovido y consolidado el asociacionismo agrario y se ha desarrollado en gran medida la industria agroalimentaria y la comercialización de los productos agrarios. (Gómez y Limón, 2007)

La propuesta del Plan Hidrológico del Duero de 2015 satisface las exigencias normativas de la Directiva Marco del Agua y la legislación española. La planificación hidrológica tiene por objetivos generales conseguir el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas, la satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial. Estos objetivos se logran incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos, en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales (Artículo 40 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, TRLA).

La gestión de los recursos hídricos

La gestión de los recursos hídricos es básica para lograr la distribución óptima del agua. Para ello las informaciones hidrometeorológicas y de calidad son indispensables para promover un adecuado aprovechamiento de los recursos hídricos de forma ecológicamente sostenible. La existencia de datos y el acceso a ellos permiten una mejor gestión de los recursos hídricos especialmente en cuencas pequeñas, donde la incertidumbre puede generar riesgos en proyectos con dimensionamiento inadecuado.

La gestión de los recursos hídricos involucra intereses económicos, sociales y ambientales, por ello los modelos matemáticos representan una importante herramienta en la gestión de los recursos naturales. Estos modelos nos ayudan a la

identificación y evaluación de opciones para la planificación y definición de objetivos, pero dependen de la calidad de los datos y del modelo.

Los Sistemas de Soporte a Decisión (SSD) son una de las herramientas que permiten simular el sistema hídrico con sus características físicas e hidrológicas considerando las demandas de agua y aportaciones de usuarios y afluentes. Asociados a los modelos cuantitativos, los modelos de calidad analizan el impacto de los usos en la calidad de los sistemas hídricos, posibilitando hacer simulaciones y gestionar mejor los usos de los recursos.

En este trabajo, usando la herramienta para la modelación de la calidad del agua a escala cuenca denominada GESCAL, se creará un modelo de calidad de río, siendo implementada sobre el Sistema de Soporte a Decisión AQUATOOL (J.P. Arquiola, A.S. Solera, J.A Álvarez, 2009).

1.1 Panorama general de los recursos hídricos en Castilla y León

En Castilla y León se ubica la cuenca del Duero que es, con notable diferencia, el río más importante que atraviesa dicha comunidad. De los casi 900 km de longitud total Castilla y León se ubica en la cuenca del Duero que es, con notable diferencia, el río más importante que atraviesa Castilla y León. De los casi 900 km de longitud total de este río, cerca de 600 km cruzan nuestra Región de este a oeste, desde su nacimiento en los Picos de Urbión (provincia de Soria), hasta adentrarse en Portugal por tierras zamoranas, pasando por las provincias de Burgos y Valladolid y discurriendo por importantes núcleos de población como Soria, Aranda de Duero, Peñafiel, Tordesillas, Toro o Zamora. Su caudal se enriquece con varios afluentes tales como el Pisuerga, el río que es objeto de estudio en este trabajo; o el Esla en el norte y el Adaja o el Tormes por el sur.

El agua y los ríos de Castilla y León están gestionados por cuatro Confederaciones: La Confederación Hidrográfica del Duero, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil, Confederación Hidrográfica del Ebro y la Confederación Hidrográfica del Tago.



Figura 1: Confederaciones Hidrográficas en España

Fuente: MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)

Respecto a las infraestructuras, en Castilla y León hay un número elevado de embalses, lo que permite un aprovechamiento racional de los recursos hídricos, tanto para el abastecimiento de las poblaciones, como para la generación de energía hidroeléctrica o para uso agrícola. Destacables son dos de los embalses más grandes de España ubicados en dicha Comunidad: Almendra en Salamanca y Ricobayo en Zamora.

Los recursos naturales totales del sistema de explotación del Pisuerga se han evaluado en 863 hm³/año, que se elevan a 2.317 hm³/año al incluir los recursos de los sistemas afluentes del Carrión y del Arlanza. Para su regulación, el sistema de explotación del Pisuerga cuenta con los embalses de Aguilar (247 hm³ de capacidad), Requejada (65 hm³) y Cervera (10 hm³), en la cabecera del Pisuerga; en la cuenca del río Valdavia encontramos Las Cuevas (11 hm³) y Villafría (12 hm³); en la cuenca del Esgueva, aunque fuera de cauce, Encinas (0,8 hm³) y Tórtoles de Esgueva (1,6 hm³); y también los

En el informe de 2007 de la Comisión Europea sobre la calidad de las aguas de baño, el río Pisuerga se declara inadecuada para el baño, ya que no cumple con los requisitos obligatorios de la calidad del agua. La fuente de la contaminación se compone principalmente de la descarga de aguas residuales urbanas de las ciudades de Valladolid, Burgos y Palencia y sus polígonos industriales. Estos centros de descarga urbana se caracteriza por caudales medios de aguas residuales $1,5\text{m}^3/\text{s}$, $1,3\text{m}^3/\text{s}$ y $0,4\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente. El vertido en el caso de Burgos es el más preocupante, ya que se produce en una etapa temprana del río Arlanzón, donde el caudal es débil.

Para cumplir las normas europeas en materia de calidad del agua, la Confederación Hidrográfica del Duero ha emprendido una serie de medidas de mejora para reducir la contaminación de las aguas superficiales de la región (Planificación Hidrológica 2009). Estos consisten principalmente en la ampliación de la capacidad de las importantes plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y de la introducción o la mejora del proceso de nitrificación.

1.2 Objetivo del trabajo

El objetivo de este estudio es el primero en proporcionar un diagnóstico del estado actual de la calidad del agua de la cuenca con el fin de determinar los contaminantes pertinentes, su fuente, y los tramos más contaminados del río. El segundo objetivo es evaluar la eficacia de las medidas de mejora propuestas por la Confederación Hidrográfica del Duero a partir de la publicación Plan Nacional de Calidad de Aguas: Saneamiento y Depuración (2007-2015), mediante la simulación de la calidad del agua en el tramo a estudio de la cuenca con las nuevas concentraciones de contaminantes, y formular propuestas diferentes a las habidas en el documento.

El tramo modelado será el cauce que transcurre a través de la provincia de Valladolid hasta su confluencia al río Duero, desde el municipio de Cabezón de Pisuerga al norte de la provincia hasta Villamarciel, analizando en este punto el río Duero.

El modelo contará con la degradación de la materia orgánica, el ciclo de nitrógeno y el consumo de oxígeno. Para esto, serán considerados los componentes: oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, nitratos, amonio, y fósforo.

Con base en la situación del río y su contexto serán realizadas simulaciones para evaluar posibles escenarios y se podrá determinar cuál será la mejor opción de acciones para la mejoría de la calidad de las aguas del Río Pisuerga, además de poder verificar la posible mejoría a partir de las nuevas actuaciones en la calidad del agua.

1.3 Estructura del Trabajo

Las simulaciones se efectúan con el modelo GESCAL implementado en sistema de soporte de decisión AquaToolDMA (Solera et al. 2007). El uso combinado de AquaToolDMA y GESCAL permite la modelización de la gestión y planificación de los recursos hídricos, así como la modelización de la calidad del agua a escala de cuenca que es de interés en el presente estudio.

Después de una descripción geográfica de la cuenca del Pisuerga (capítulo 2) y el informe sobre las fuentes de datos (capítulo 3), se discutirán los datos observados para analizar la calidad del agua de la cuenca y su estado actual (capítulo 4). Una presentación del programa AquaToolDMA y su herramienta de modelación de calidad de aguas, GESCAL, se situará en el capítulo 5.

La elaboración de la topología y la implementación de los datos adjuntan en el capítulo 6,

El siguiente paso es la calibración del modelo por medio de la comparación de las concentraciones observadas a lo largo del río con los valores simulados y adaptación constantes que influyen en los procesos que tienen lugar en el cauce, para obtener un buen ajuste del modelo a la realidad (Capítulo 7). Una vez que el modelo está calibrado, la simulación de la calidad del agua puede llevarse a cabo, incluyendo los cambios en las concentraciones provocadas por las medidas de mejora propuestas (capítulo 8). Se analizarán los efectos de estas modificaciones y no la eficacia.

Por último, en el capítulo 9 se realizarán las conclusiones de los resultados de las diferentes simulaciones, un análisis de los diferentes escenarios y la propuesta de futuras líneas de investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO PISUERGA.

El área de influencia del Pisuerga se expande por las Comunidades Autónomas de Castilla y León y Cantabria, siendo parte de la cuenca del río Duero.

Los principales ríos de la cuenca son el Pisuerga, el Carrión y el Arlanzón. Estos tres ríos junto con el Sequillo, que no es parte de la cuenca Pisuerga, constituyen la llamada Zona B, una unidad de gestión de la CHD.

La cuenca del Duero se dividió funcionalmente en el Plan Hidrológico de 1998 en 5 zonas (A, B, C, D y E) y 12 subzonas, atendiendo principalmente a criterios hidrográficos, socioeconómicos y de gestión del recurso hídrico. El ámbito territorial de las subzonas coincide con el de las Juntas de Explotación. En el Plan en revisión de 2015 se han mantenido en esencia las subzonas del Plan de 1998, realizando algunos pequeños ajustes en las subcuencas fruto de la mayor precisión disponible y de la conveniencia de disgregar la antigua subzona del Tera en dos, una vertiente al Esla (Aliste-Tera) y otra vertiente e Portugal (Tera-Manzanas), de modo que, comenzando por el noroeste y recorriendo la cuenca en el sentido de giro de las agujas del reloj, se denominan: 1) Támeaga-Manzanas, 2) Aliste-Tera, 3) Órbigo, 4) Esla-Valderaduey, 5) Carrión, 6) Pisuerga, 7) Arlanza, 8) Alto Duero, 9) Riaza-Duratón, 10) Cega-Eresma-Adaja, 11) Bajo Duero, 12) Tormes y 13) Águeda.

Tabla 1: Zonas, subzonas y sistemas de explotación definidos

| Zona | Subzonas | Sistemas de explotación |
|------|---|--|
| A | 1. Támeaga-Manzanas 2. Aliste-Tera 3. Órbigo 4. Esla-Valderaduey | 1. Támeaga-Manzanas 2. Tera 3. Órbigo 4. Esla |
| B | 5. Carrión 6. Pisuerga 7. Arlanza | 5. Carrión 6. Pisuerga 7. Arlanza |
| C | 8. Alto Duero 9. Riaza-Duratón | 8. Alto Duero 9. Riaza-Duratón |
| D | 10. Cega-Eresma-Adaja 11. Bajo Duero | 10. Cega-Eresma-Adaja 11. Bajo Duero |
| E | 12. Tormes 13. Águeda | 12. Tormes 13. Águeda |

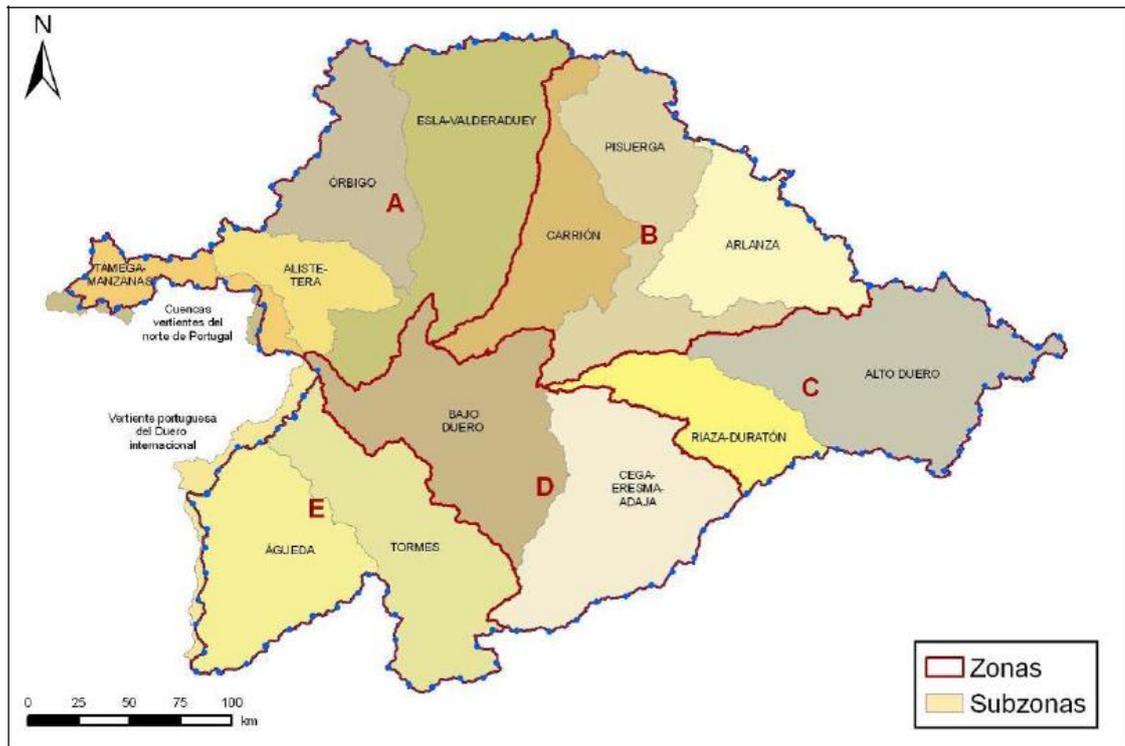


Figura 3: Delimitación de las subzonas de estudio definidas

Fuente: Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero.2009

En este estudio, el término Sistema Pisuerga se refiere a toda la Zona B, mientras que subzona se ha designado simplemente por el nombre del principal río de dicha subzona, Pisuerga.

2.1 Características generales de la cuenca

Geomorfología

El Sistema de Pisuerga está rodeado al norte por la Cordillera Cantábrica y el noreste por el Sistema Ibérico, con el páramo de Las Loras como la transición entre las dos formaciones. Al sur de la cuenca se extiende como la formación geológica de la Depresión del Duero. El Oeste se abre a la meseta castellana sin ninguna formación importante de la montaña que separa las cuencas Carrión y Sequillo de la cuenca de Valderaduey.

Climatología

El clima en la mayoría de las partes del sistema Pisuerga es continental, con veranos secos e inviernos fríos, que es típico de la meseta norte. El clima de alta montaña prevalece en la en la frontera montañosa del Norte y Noreste, esa área recibe la mayor parte de la precipitación que cae sobre la cuenca. Estas precipitaciones están comprendidas entre 1.000 y 1.500 mm/año, mientras que en la meseta oscila la precipitación entre 400 y 600 mm/Año.

La ciudad de Valladolid ubicada en el centro de la cuenca sedimentaria del Duero tiene un clima más extremo y seco al que cabría esperar a casi 700 metros de altitud y a solo 190 kilómetros del mar Cantábrico en línea recta, debido a estar casi completamente rodeada de montañas que la aíslan del mar.

Las montañas que delimitan la meseta retienen los vientos y las lluvias, excepto por el Oeste, por donde la ausencia de grandes montañas abre un pasillo abierto al océano Atlántico y es por Portugal por donde penetran la mayoría de las precipitaciones que llegan a Valladolid. Los vientos del norte llegan a Valladolid secos y fríos, y los del sur suelen ser cálidos y húmedos, pero es por el Oeste y Suroeste por donde suele llegar la lluvia a Valladolid.

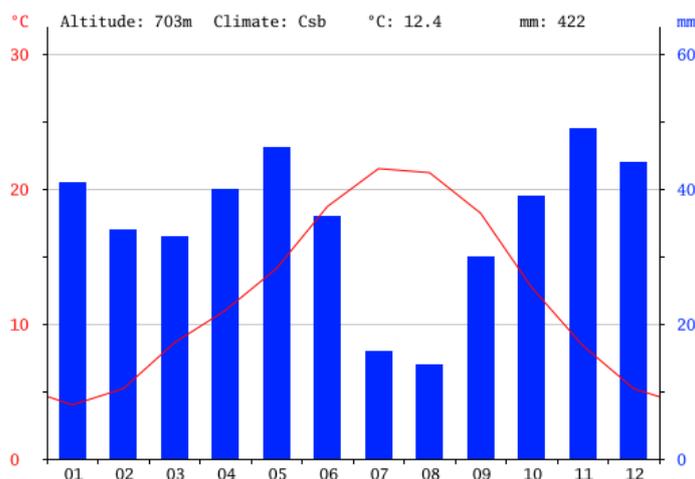


Figura 4: Gráfico Climograma de Valladolid

Fuente: Climate-data.org

De acuerdo con Köppen y Geiger clima se clasifica como Csb(Oceánico de veranos secos). La temperatura media anual en la provincia Valladolid se encuentra a 12.4 °C. La precipitación es de 422 mm al año (climate-data.org).

2.2 Sistema de explotación del Pisuerga

El sistema se extiende sobre un área de aproximadamente 7055 km² (17.300 km² (junto las subzonas del Carrión y del Arlanza), atiende en la actualidad el abastecimiento urbano de 60418 habitantes y el regadío de unas 43.500ha.

Tabla 2: Subzonas y su área en km²

| Zona | Subzona | Área (km ²) |
|------|-----------------------|-------------------------|
| A | 1. Támeaga-Manzanas | 1.911,5 |
| | 2. Aliste-Tera | 2.920,6 |
| | 3. Órbigo | 4.986,5 |
| | 4. Esla-Valderaduey | 9.482,7 |
| B | 5. Carrión | 4.977,0 |
| | 6. Pisuerga | 7.055,4 |
| | 7. Arlanza | 5.329,5 |
| C | 8. Alto Duero | 8.952,7 |
| | 9. Riaza-Duratón | 3.972,0 |
| D | 10. Cega-Eresma-Adaja | 7.884,9 |
| | 11. Bajo Duero | 7.795,9 |
| E | 12. Tormes | 7.385,5 |
| | 13. Águeda | 6.205,3 |

Fuente: Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero.2009

El río principal es el Pisuerga que encuentra su origen en la ciudad de La Pernía, Palencia. El Pisuerga desemboca en el río Duero 270 kilómetros aguas abajo. Los recursos naturales totales del sistema de explotación del Pisuerga se han evaluado en 904 hm³/año, que se elevan a 2.362 hm³/año al incluir los recursos de los sistemas afluentes del Carrión y del Arlanza.

El siguiente río importante es el Arlanza, con su origen en la Sierra de la Demanda, cerca de la localidad de Quintanar de la Sierra. Tiene 166 km de longitud, y se une con el río Arlanzón en la localidad de Quintana del Puente. No está claro qué río es un afluente del otro ya que sus caudales son similares, aunque los del Arlanza son generalmente más relevantes. El río Arlanzón encuentra su fuente en la Sierra de la

Demanda y cruza la ciudad de Burgos. Desemboca en el Arlanza después de unos 110 km de su nacimiento.

Por otra parte el río Carrión, junto con el río Sequillo constituye el Comité de Explotación Carrión, aunque el estudio se referirá a ella como Sistema Carrión o simplemente Carrión, debido a la limitada importancia del río Sequillo. El río Carrión tiene una longitud de 179 km, pasa a través de la ciudad de Palencia y desemboca en el Pisuerga en la localidad de Dueñas.

Más información acerca de los aportes naturales de cada río se encuentra en el capítulo 6 sobre la concepción del modelo.

Aguas superficiales

Como ha sido indicado anteriormente, los recursos naturales totales del sistema de explotación del Pisuerga se han evaluado en 904 hm³/año, que se elevan a 2.362 hm³/año al incluir los recursos de los sistemas afluentes del Carrión y del Arlanza.

Tabla 3: Principales embalses en el sistema de explotación del Pisuerga.

| Embalse | Usos | Capacidad |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| Aguilar de Campoo | Control de avenidas | 247 hm ³ |
| | Abastecimiento | |
| | Regadío | |
| | Industrial | |
| | Energético | |
| | Navegación | |
| La Requejada | Control de avenidas | 65 hm ³ |
| | Abastecimiento | |
| | Regadío | |
| | Industrial | |
| | Energético | |
| | Navegación | |
| Cervera | Control de avenidas | 10 hm ³ |
| | Abastecimiento | |
| | Regadío | |
| | Navegación | |
| | Control de aforos | |

Fuente: Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero.2009

Para su regulación, el sistema de explotación del Pisuerga cuenta con los embalses de Aguilar (247 hm³ de capacidad), Requejada (65 hm³) y Cervera (10 hm³), en la cabecera del Pisuerga; en la cuenca del río Valdavia encontramos Las Cuevas (11 hm³) y Villafría (12 hm³); en la cuenca del Esgueva, aunque fuera de cauce, Encinas (0,8 hm³) y

Tórtoles de Esgueva (1,6 hm³); y también los embalses menores de Lomilla de Aguilar (0,6 hm³) y Pomar de Valdivia (0,3 hm³). Entre las infraestructuras de transporte más relevantes se encuentra el tramo norte del Canal de Castilla, el Canal del Pisuerga y el de Villalaco.

Aguas subterráneas

El sistema de explotación o subzona Pisuerga forma parte de la zona B, según la zonificación territorial que figura en el Plan Hidrológico de cuenca (CHD, 2010). Esta zona cubre el sector nordeste de la cuenca con una superficie de 17.297 km² y abarca las cuencas de los ríos Esgueva, Pisuerga y Arlanza. Incluye parte de las provincias de Valladolid, Palencia y Burgos (Comunidad Autónoma de Castilla y León), así como una pequeña parte de la provincia de Cantabria (Comunidad Autónoma de Cantabria).

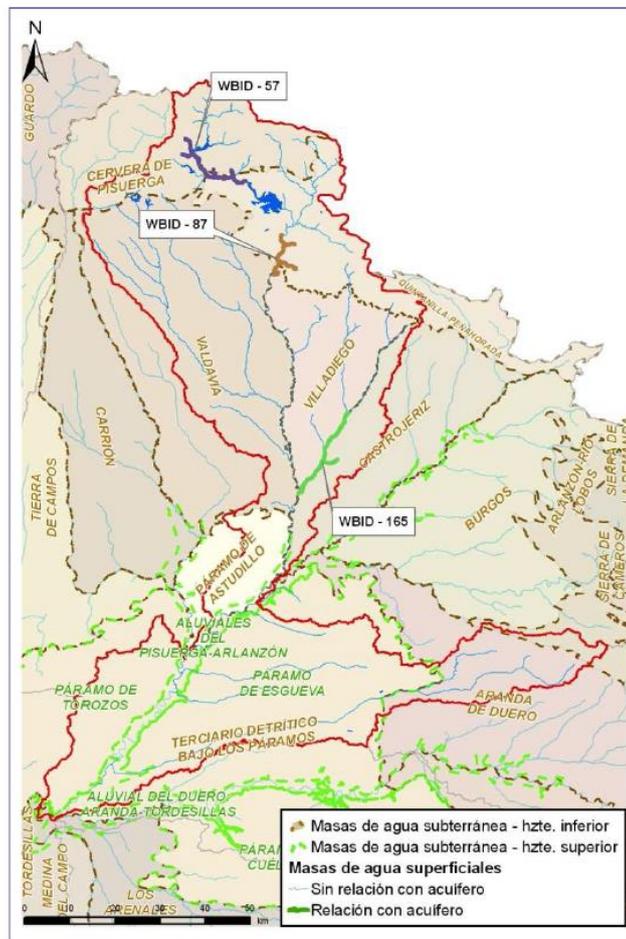


Figura 5: Acuíferos del Sistema de Explotación Pisuerga.

Fuente: Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero.2009

En la figura 5 se localizan las zonas subterráneas. Además la tabla 4 se puede observar la relación de masas de agua subterránea (MASb) que incluye el sistema de explotación Pisuerga, así como el porcentaje de la superficie de cada MASb que queda comprendido en este sistema de explotación.

Tabla 4: Relación de masas de agua subterránea y % de la superficie de cada MASb

| MASb | | % de MASb en el sistema de explotación |
|---------|---------------------------------------|--|
| 021.014 | Villadiego | 100,00% |
| 021.004 | Quintanilla - Peñahoradada | 69,17% |
| 021.029 | Páramo de Esgueva | 68,72% |
| 021.006 | Valdavia | 67,05% |
| 021.025 | Páramo de Astudillo | 64,27% |
| 021.003 | Cervera de Pisuerga | 59,79% |
| 021.020 | Aluviales de Pisuerga-Arlanzón | 40,75% |
| 021.032 | Páramo de Torozos | 32,45% |
| 021.016 | Castrojeriz | 29,51% |
| 021.030 | Aranda de Duero | 18,11% |
| 021.039 | Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas | 16,56% |
| 021.018 | Arlanzón - Río Lobos | 6,44% |
| 021.038 | Tordesillas | 0,68% |

Fuente: Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Duero.2009

En el horizonte superior se incluyen masas de agua identificadas en acuíferos superficiales, en general con un desarrollo vertical inferior a los 60 m. Desde un punto de vista geológico se corresponden con depósitos detríticos aluviales, rañas o piedemontes, y también con niveles calizos tabulares aislados topográficamente en mesas o muelas, que reciben el nombre de páramos. El horizonte inferior o general incluye al resto de las masas de agua subterránea y, en particular, al gran acuífero detrítico complejo que se extiende por la zona central de la cuenca quedando parcialmente cubierto por las masas del horizonte superior.

El cauce del río se definió en una serie de tramos para facilitar su estudio litológico y de permeabilidad. La zona de estudio de este trabajo se incluye en los siguientes dos tramos:

Tramo en el curso bajo del río Pisuerga

El tramo definido está situado en el río Pisuerga, entre la confluencia con el río Arlanza, y su entrada a la población de Valladolid.

En este tramo la relación río-acuífero se produce por medio de pequeños manantiales con formaciones subyacentes de menor permeabilidad, de origen fundamentalmente detrítico.

Se trata de un tramo con conexión mixta difusa indirecta y manantiales en cauces efluentes. Se ha considerado que la relación río-acuífero en este tramo se encuentra en régimen influenciado.

Tramo en el curso bajo del río Pisuerga hasta su confluencia con el río Duero

El tramo está situado en el río Pisuerga, entre la población de Valladolid y la confluencia con el río Duero.

El río fluye sobre los sedimentos aluviales, que tienen influencia en la relación río-acuífero por drenaje en el cauce del río Pisuerga. Se trata de un tramo con conexión difusa indirecta por flujo profundo en cauces efluentes. Se ha considerado que la relación río-acuífero en este tramo se encuentra en régimen influenciado.

2.3 Zonas sensibles

Las zonas protegidas son zonas objeto de protección especial en virtud de una norma específica sobre protección de las aguas superficiales o subterráneas, o sobre conservación de hábitat y especies directamente dependientes del agua.

Los convenios internacionales suscritos por España, las directivas europeas y la legislación nacional y autonómica establecen diferentes categorías de zonas protegidas, cada una de ellas con sus objetivos específicos de protección, su base normativa y las exigencias correspondientes a la hora de su designación, delimitación, seguimiento y suministro de información.

En función de la mencionada base normativa, aplicable a las diferentes categorías de zonas protegidas, éstas son designadas y controladas por diferentes administraciones

(autoridades competentes) y para algunas, como las reservas naturales fluviales o las zonas de protección especial, es el propio Plan Hidrológico de cuenca quien las designa (artículo 25 del PHN, artículos 22, 23 y 81 del RPH).

En cada Demarcación Hidrográfica, el Organismo de cuenca correspondiente está obligado a establecer y mantener actualizado un Registro de Zonas Protegidas, con arreglo al artículo 6 y anejo IV de la DMA y al artículo 99 bis del TRLA (Texto Refundido de la Ley de Aguas, desarrollado en el artículo 24 del RPH (Reglamento de planificación hidrológica) y en el apartado 4 de la IPH). La adhesión de todas ellas en un registro único de la demarcación resulta de especial interés para su adecuada consideración tanto en la gestión territorial de la cuenca como en la planificación hidrológica. El Anexo IV de la DMA indica las áreas a ser protegidas, incluyendo los cuerpos de agua donde se ubican las instalaciones de captación de agua para el consumo humano, cuerpos de agua para uso recreativo, áreas sensibles a nutrientes y áreas designadas para la protección de hábitats o especies cuando las aguas constituyen un factor importante de su protección.

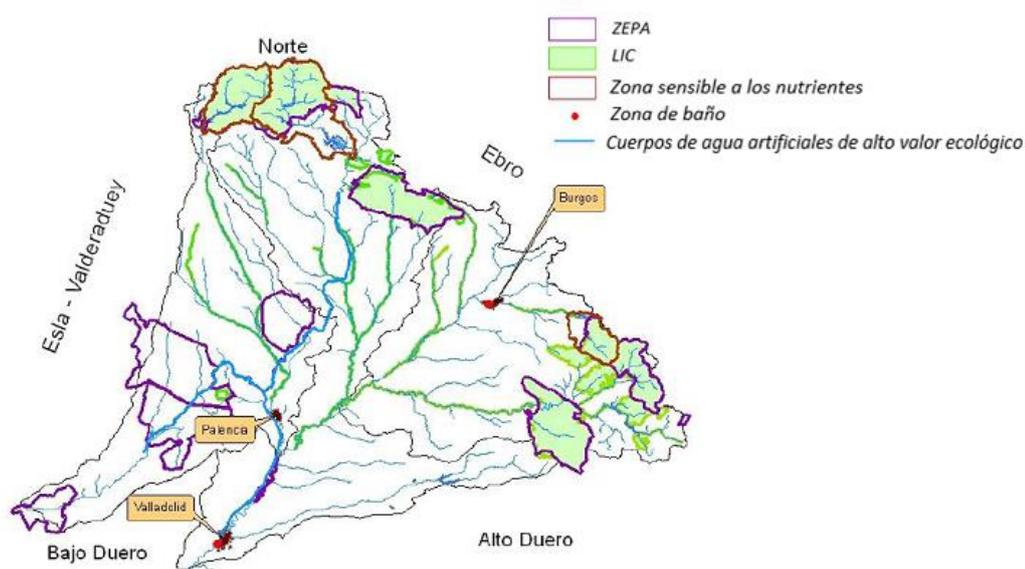


Figura 6: Zonas protegidas en el Sistema del Pisuerga

Fuente: Red Natura 2000. Junta de Castilla y León

El agua debe cumplir con las normas europeas, nacionales y regionales de las aguas de baño. Las áreas designadas como sensibles a los nutrientes en el suministro de agua urbana son las cabeceras de las cuencas donde se encuentran las presas. Debido a su alto valor ecológico, los lugares de interés comunitario (LIC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) también son áreas protegidas.

A excepción de las zonas de baño, la calidad del agua del río tramo estudiado no afecta a las zonas protegidas, ya que están situados aguas arriba del río. Además, las zonas de baño de las ciudades de Burgos, Palencia y Valladolid están situados aguas arriba de las descargas de aguas residuales urbanas, lo que evita una alta contaminación de la corriente reservada para actividades al aire libre, aunque estas áreas pueden ser contaminadas por la escorrentía superficial.

3. FUENTES DE INFORMACIÓN

Para analizar la calidad del agua de un río, los principales datos necesarios consisten en los atributos de calidad y cantidad del curso de agua, así como la información física sobre el lecho del río. Estos datos se obtienen por las estaciones de calibre situadas a lo largo del río y sus afluentes. Se necesita un SIG (sistema de información geográfica) para localizar las estaciones y otros objetos pertinentes del sistema, tales como los cuerpos de agua, municipios, etc.

Nuestra fuente de información consiste en:

- SIG (Sistemas de Información Geográfica)
- Red Oficial de estaciones de caudales del Estado Español (Red Oficial de Aforos del Estado), la red ROEA en este estudio.
- Datos de las series SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación-Aportación), recibidos de la Confederación Hidrográfica del Duero.
- Red de control de la calidad del agua (red de Calidad de Aguas) de red o ICA
- Los datos de las aguas residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Los datos de descarga de aguas residuales industriales procedentes de las zonas industriales.

Datos de Sistemas de Información Geográfica

El SIG (en nuestro caso ArcGIS) se utilizó sobre todo para visualizar los mapas ya creados del sistema fluvial, localizar geográficamente las masas de agua, estaciones de la red de medición de flujo y de la red de control de calidad de agua, manchas de aguas residuales vertidos, las entradas naturales y municipios. Las longitudes de los distintos tramos de la cama de agua, necesaria para el diseño del modelo, también se obtuvieron con el GIS.

Red Oficial de estaciones de caudales del Estado Español

La tarea de medición de caudales se asigna a la CHD de acuerdo con el Real Decreto 984/1989. Las estaciones son puntos de medida cuyo objetivo principal es determinar la evolución del caudal, nivel de agua y la lluvia en el tiempo. Los datos de caudal de los tramos de río que se utiliza para realizar el estudio se compone de los caudales mensuales medidos en hm³/mes.

La red construida por las estaciones distribuidas a lo largo y a lo ancho de la cuenca de captación corresponde a la denominada Red Oficial de Aforos del Estado (ROEA). Existen también otras estaciones el dueño de las cuales no es el Estado, sino otra institución.

Datos de las series SIMPA

SIMPA es un sistema para gestionar y analizar la información temporal y espacial procedente de la Base de Datos del CEDEX y donde se integran las aplicaciones hidrológicas desarrolladas en este Organismo para simular diferentes procesos del ciclo hidrológico relacionados con los recursos hídricos, las crecidas o la calidad de las aguas.

Red de control de la calidad del agua

La red de control de la calidad del agua está constituida por una serie de estaciones cuya tarea es el control sistemático de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua. Las estaciones de control miden diferentes parámetros de la caracterización de las aguas superficiales, así como las aguas subterráneas. En la zona administrada por la asociación para la gestión de las aguas del Duero (Confederación Hidrográfica del Duero), la CHD, se establecen diversas redes de estaciones de control.

La Red Integrada de Calidad de las Aguas (Red ICA) se diseñó en el año 1993 a raíz de la implantación del Programa SAICA (Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas) en las cuencas intercomunitarias del territorio español con el objeto de introducir e integrar en una sola red los requerimientos derivados de las disposiciones comunitarias relativas a la calidad de las aguas tras su incorporación a la normativa nacional. De esta forma la nueva Red ICA incorporó el conjunto de redes preexistentes,

sus datos históricos y métodos operativos, abarcando para ello la Red COCA (Control Oficial de Calidad del Agua), la Red COAB (Control Oficial de Abastecimientos) y la Red COSB (Red Oficial de Calidad de las Aguas Subterráneas).

Subred COAB (Control de aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable)

La incorporación de España a la CEE determinó la necesidad de adecuar a la reglamentación comunitaria la normativa nacional en materia de aguas. De entre las más importantes por su trascendencia sobre la población se encontraban las directivas 75/440/CEE y 79/869/CEE que definen, respectivamente, la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable y los métodos de medición, frecuencia de muestreos y análisis asociados a dichas aguas.

La Directiva 75/440/CEE establece tres niveles en orden decreciente de calidad, A1, A2 y A3 y los sistemas mínimos de tratamiento de potabilización que deben ir asociados a dichos niveles. Las aguas de calidad inferior al nivel A3 no pueden utilizarse para el abastecimiento, salvo de modo excepcional siempre que se emplee un tratamiento apropiado.

Hay que tener en cuenta que tanto la *Directiva 75/440/CEE* como la *79/869/CEE* quedarán derogadas siete años después de la fecha de entrada en vigor de la *Directiva 2000/60/CE* (Art.22), es decir, el 22/12/2007.

Los puntos que conforman esta red de control se hacen coincidir con las tomas de agua superficial destinada a usos potables y existen tres categorías de parámetros que determinan su frecuencia de muestreo en función del número de habitantes abastecidos.

Subred COPI (Control de aguas continentales declaradas de interés para la protección o mejora de la vida piscícola)

Responde a Directiva 78/659/CEE sustituida por la Directiva 2006/44/CE, que tiene como objetivo proteger de la contaminación las aguas continentales declaradas de interés para la protección o mejora de la vida piscícola.

La designación española de las masas de aguas continentales declaradas de interés para la protección o mejora de la vida piscícola fue realizada a propuesta del antiguo Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), donde se delimitaron una serie de tramos fluviales y embalses que, finalmente, fueron designados oficialmente en septiembre de 1992 y comunicados a la entonces CEE a tal efecto. Se distinguen dos tipos de aguas, denominadas “salmonícolas” y “ciprinícolas”, de acuerdo con su aptitud para la vida de especies representativas de dichos grupos. La reglamentación asociada a este tipo de aguas exige controlar su calidad definiendo su frecuencia de muestreo, los parámetros objeto de control y el procedimiento de diagnóstico para la valoración del cumplimiento respecto a los requerimientos establecidos.

Subred COTX (Control de sustancias peligrosas en aguas superficiales)

La Directiva 76/464/CEE, se ocupa de la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático. Su objetivo es la regulación de cualquier vertido que pueda contener sustancias nocivas exigiendo con carácter general, una autorización administrativa en la que se definan unas condiciones que permitan la eficaz protección del medio hídrico receptor.

En ella se recogen las pautas que regirán el control de la contaminación producida por las sustancias catalogadas como peligrosas y diferenciadas en dos grupos denominados “sustancias peligrosas de la Lista I y de la Lista II”.

Los parámetros de calidad del agua que se analizan en cada una de las estaciones son los que se reflejan en la tabla 5:

Tabla 5: Parámetros de calidad de agua en estaciones

| Nombre Parámetro | Unidades |
|--------------------------------|----------|
| Temperatura del agua | °C |
| Conductividad | μS/cm |
| DBO5 | mg/L O2 |
| DQO | mg/L O2 |
| Fosfatos | mg/L PO4 |
| Fósforo orgánico total | mg/L P |
| Oxígeno disuelto | mg/L O2 |
| Nitratos | mg/L N |
| Amonio Total | mg/L NH4 |
| PH | ud PH |
| Saturación de Oxígeno disuelto | % O2 |
| SS | mg/l |

Fuente: CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas)

Adicionalmente todas las estaciones disponen de sondas de nivel del agua en el cauce y temperatura ambiente.

Datos de Aguas Residuales

La descarga de aguas residuales se define como todas las emisiones de contaminantes realizadas directa o indirectamente a las aguas continentales y para el resto del dominio público hidráulico, independientemente del procedimiento o técnica de la contaminación.

El artículo 97 del texto refundido de la Ley Española del Agua (Ley de Aguas de 1985, revisada en 1999) prohíbe la descarga de aguas residuales o productos de desecho en el dominio público, a pesar de que el artículo 100 del Texto Refundido permite la realización de vertidos, siempre que se haya obtenido previamente la autorización de vertido correspondiente. La obtención de la autorización sólo se concederá en condiciones específicas: una purificación suficiente de la descarga de agua y el respeto de algunas limitaciones en cuanto a la emisión, por lo que para cumplir los objetivos de calidad en la corriente del receptor.

Para el control de los vertidos, el instrumento principal es un inventario de los vertidos existentes en la cuenca del Duero con la información asociada a cada descarga, tales como: la identificación del titular, peculiaridades de la descarga de aguas residuales, la actividad de origen y situación administrativa. Incluido en el inventario de los vertidos es una documentación detallada sobre los límites de descarga para cada descarga y contaminantes autorizado. Estos límites son compatibles con los requisitos de las normas de descarga de aguas residuales establecidas por las directivas europeas y los correspondientes Reales Decretos.

Vertidos de aguas residuales de la planta de tratamiento (EDAR)

La Directiva 91/271 / CEE (1991) del Consejo de la Unión Europea describe la obligación de someter las aguas residuales a un tratamiento de purificación de acuerdo con criterios específicos. Los criterios utilizados por la directiva europea para establecer estas obligaciones se basan en los siguientes conceptos: la aglomeración urbana habitantes equivalentes y áreas sensibles. Esta directiva define estos conceptos.

La *aglomeración urbana* se define como el área de la cual la población y/o actividades económicas están suficientemente concentrados para permitir la recogida y conducción de las aguas residuales urbanas y su transporte a una planta de tratamiento a un punto de disposición final.

El parámetro *habitante equivalente* se define como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno durante cinco días (DBO5) de 60 g O₂ / día. Su valor se calcula a partir del valor medio diario de la carga orgánica biodegradable, correspondiente a la carga máxima de semana del año, sin tener en cuenta las situaciones provocadas por las fuertes lluvias u otras circunstancias excepcionales.

Las áreas urbanas se clasifican en base al *habitante equivalente* de sus aguas residuales. Dependiendo del valor de este indicador, la legislación europea recomienda cierto tipo de tratamiento de aguas residuales. Para determinar los tratamientos a aplicar a las aguas residuales se tiene en cuenta la sensibilidad de la zona de vertido.

Los datos de los vertidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) son considerados para las aglomeraciones urbanas por encima de 2.000 habitantes equivalentes. Las EDARS están clasificadas por valor habitante-equivalente, su tipo de área de disposición (sensible o no sensible) y con las mediciones de DBO5, DQO, sólidos en suspensión (SS), amonio, nitrógeno total y fósforo total, así como las limitaciones de las descargas caracterizar las aglomeraciones urbanas afectadas.

Vertidos de aguas residuales industriales

Los tipos de aguas residuales industriales varían mucho dependiendo de la industria, ya que diferentes industrias causan diferentes tipos de residuos. También dentro de la misma industria, la composición de las descargas es tan variable como la variedad de procesos de producción.

4. ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL SISTEMA PISUERGA

El análisis de la evolución del caudal y la calidad del agua en las diferentes localizaciones del Sistema de Pisuerga es el paso antes del modelado. Consiste en la realización de un bosquejo general de la problemática del sistema, distinguiendo los puntos sensibles de la cuenca y determinar cuál de los vertidos de aguas residuales son relevantes. Los datos utilizados para este trabajo se componen de las mediciones realizadas en las estaciones ROEA y redes ICA (figuras 8 y 9 respectivamente).

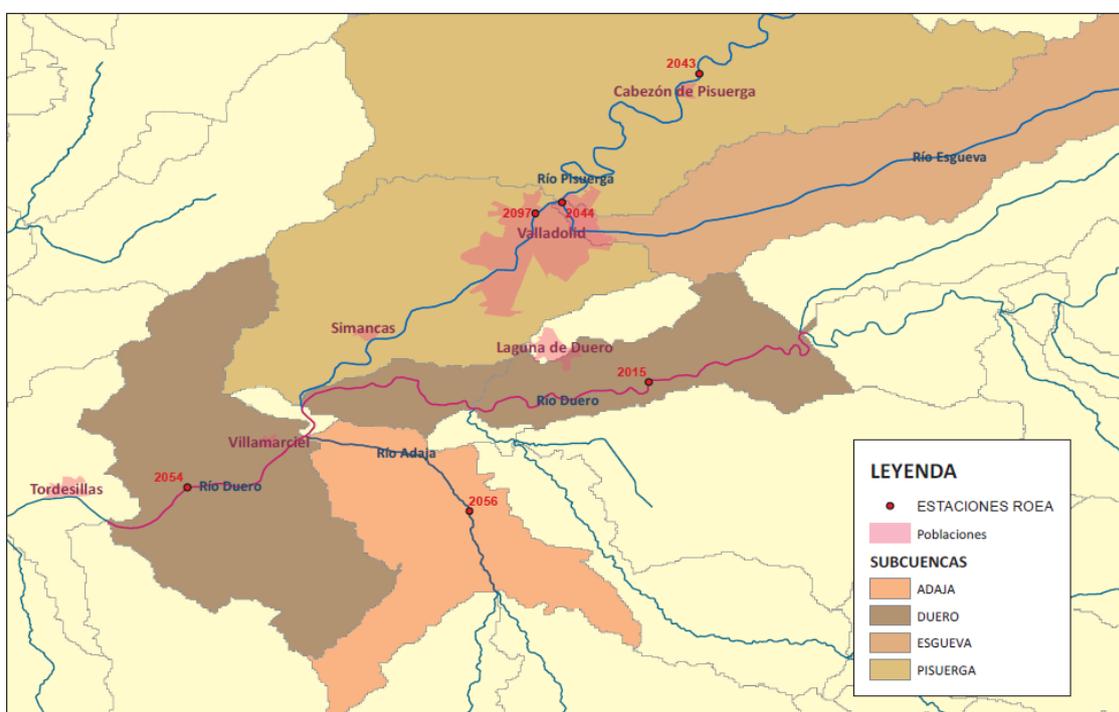


Figura 7: Estaciones de aforo en el sistema ROEA

Fuente:Elaboración propia

Tabla 6: Estaciones ROEA en el tramo a estudio

| CÓDIGO | TIPO | RÍO | MASA DE AGUA |
|--------|----------|--------------|--------------|
| 2015 | R.O.E.A. | Río Duero | 315 |
| 2043 | R.O.E.A. | Río Pisuerga | 264 |
| 2044 | R.O.E.A. | Río Esgueva | 311 |
| 2054 | R.O.E.A. | Río Duero | 377 |
| 2056 | R.O.E.A. | Río Adaja | 421 |
| 2097 | R.O.E.A. | Río Pisuerga | 668 |

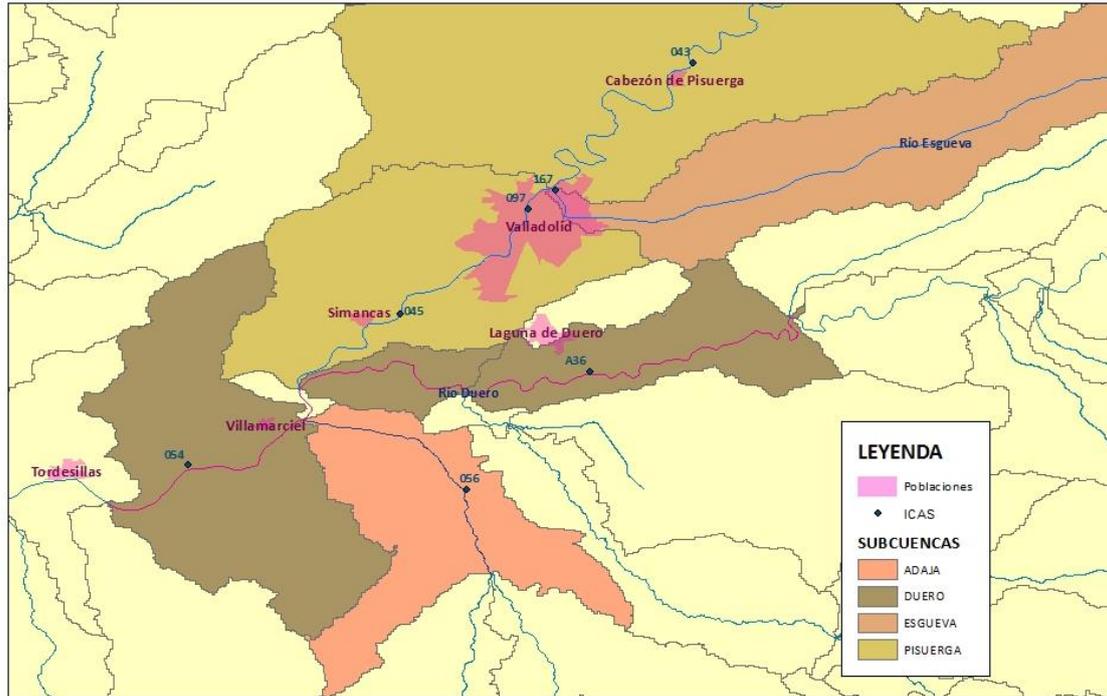


Figura 8: Estaciones ICA's en el sistema

Fuente:Elaboración propia

Tabla 7: Estaciones ICA en el tramo a estudio

| Nombre | Código | Id | Estación | Cauce |
|--------------------------|------------|-----|----------|----------|
| PISUERGA EN CABEZON | DU03430001 | 80 | 43 | PISUERGA |
| DUERO EN VILLAMARCIEL | DU03710001 | 89 | 54 | DUERO |
| PISUERGA EN SIMANCAS | DU03720001 | 90 | 45 | PISUERGA |
| PISUERGA EN VALLADOLID | DU03720002 | 91 | 97 | PISUERGA |
| DUERO EN LAGUNA DE DUERO | DU03720003 | 92 | A36 | DUERO |
| ESGUEVA EN VALLADOLID | DU03720004 | 93 | 167 | ESGUEVA |
| ADAJA EN VALDESTILLAS | DU04000001 | 107 | 56 | ADAJA |

Para una mejor comprensión de los factores que influyen en la evolución de la calidad de agua en el tramo de río, es importante situar las ubicaciones de los vertidos de aguas residuales que podemos observar en la figura 9 tras el inventario adjuntado en la tabla 8:

Tabla 8: Puntos de vertido en el tramo a estudio

| VERTIDO | CÓDIGO | FUENTE | MÉTODO DE VERTIDO |
|-------------------|---------------|---|--|
| V.CABEZON | 0127. - VA | AYUNTAMIENTO CABEZÓN DE PISUERGA | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS, DIRECTAMENTE AL CAUCE |
| V.GRUP 264 | 0131. - VA | AYUNTAMIENTO DE SANTOVENIA DE PISUERGA | VERTIDO DIRECTAMENTE A CAUCE |
| V.GRUP 264 | 0163. - VA | BEFESA ALUMINIO VALLADOLID, SA | VERTIDO FINAL A CAUCE A TRAVÉS DEL COLECTOR DE INSTALACIONES |
| V.GRUP 264 | 0010. - VA | PANIBERICA DE LEVADURAS SA | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES AL CAUCE DESPUES DE PASAR POR LOS SISTEMAS DE DEPURACION |
| V.GRUP 375 | 0039. - VA | SADA P.A. CASTILLA-GALICIA, S.A. | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES AL CAUCE DESPUES DE PASAR POR LOS SISTEMAS DE DEPURACION |
| V.GRUP 375 | 0347. - VA | AYUNTAMIENTO DE ARROYO DE LA ENCOMIENDA | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES AL CAUCE DESPUES DE PASAR POR LOS SISTEMAS DE DEPURACION |
| V.GRUP 375 | 0073. - VA | DULCES Y CONSERVAS HELIOS SA | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES AL CAUCE DESPUES DE PASAR POR LOS SISTEMAS DE DEPURACION |
| V.NEU MICHELIN | 0115. - VA | NEUMÁTICOS MICHELÍN | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES FINAL A CAUCE A TRAVÉS COLECTOR FACTORÍA |
| V.URB ENTRE | 0515. - VA | URBANIZACIÓN ENTREPINOS | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES AL CAUCE DESPUES DE PASAR POR LOS SISTEMAS DE DEPURACION |
| V.ING URBANA | 0739. - VA | VERTIDO INGENIERÍA URBANA Y FORESTAL | VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS, DIRECTAMENTE AL CAUCE |

En la tabla se agrupan los vertidos en el caso de ser vertido puntuales en zonas cercanas de menor valor a limitado en el capítulo 6 de este documento para incluirlos en el modelo. Al tomarlas individualmente no cumplían el valor mínimo, pero su suma la supera al juntarlas por cercanía e incluyéndolas en el modelo con dichas agrupaciones.

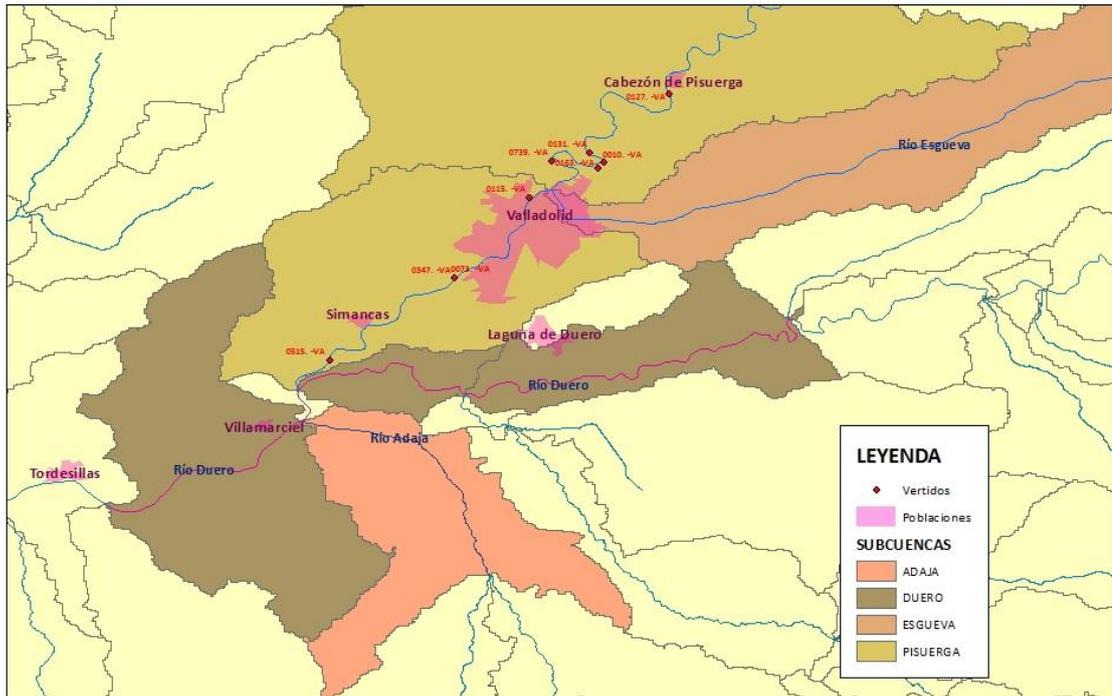


Figura 9: Puntos de vertido en el Pisuerga

Fuente:Elaboración propia

En primer lugar será descrita la evolución de caudal, seguido de un análisis de las diferentes concentraciones de contaminantes para evaluar el estado actual de la cuenca.

4.1 Caudales

La evolución del caudal en la cuenca está evidentemente influenciada por los períodos de sequías e inundaciones, como se puede observar en el siguiente gráfico. Según la agencia estatal de meteorología (AEMET), una sequía se produce cuando el SPI sea permanentemente negativo y alcance una intensidad de $-1,0$ o inferior, el fenómeno finaliza cuando el SPI se hace positivo. La intensidad o gravedad de un período seco o húmedo corresponde a la suma de los valores del SPI de cada uno de los años que lo integran.

Los inviernos de 2000/2001, 2002/2003 y 2009/2010 se caracterizan por fuertes precipitaciones, con un SPI (índice de precipitación estandarizado) de 1,9, (muy húmedo) y 1 (humedad moderada) respectivamente.

En cambio, los veranos de 2002, 2005 y 2012 indican precipitaciones muy bajas con un SPI de -1,6 (seco moderado) para 2002 y de -2 (muy seco) para los otros dos años.

El siguiente gráfico (Figura 10) representa el caudal del Pisuerga desde su paso por la localidad de Cabezón de Pisuerga hasta después de su confluencia con el Duero, en la localidad de Villamarciel. La línea representa el caudal medido en la estación específica de Villamarciel, que puede ser comparado con el caudal acumulado (columnas) compuesto por la medición aguas arriba de la aportación del Pisuerga, el río Esgueva, el Duero y el río Adaja.

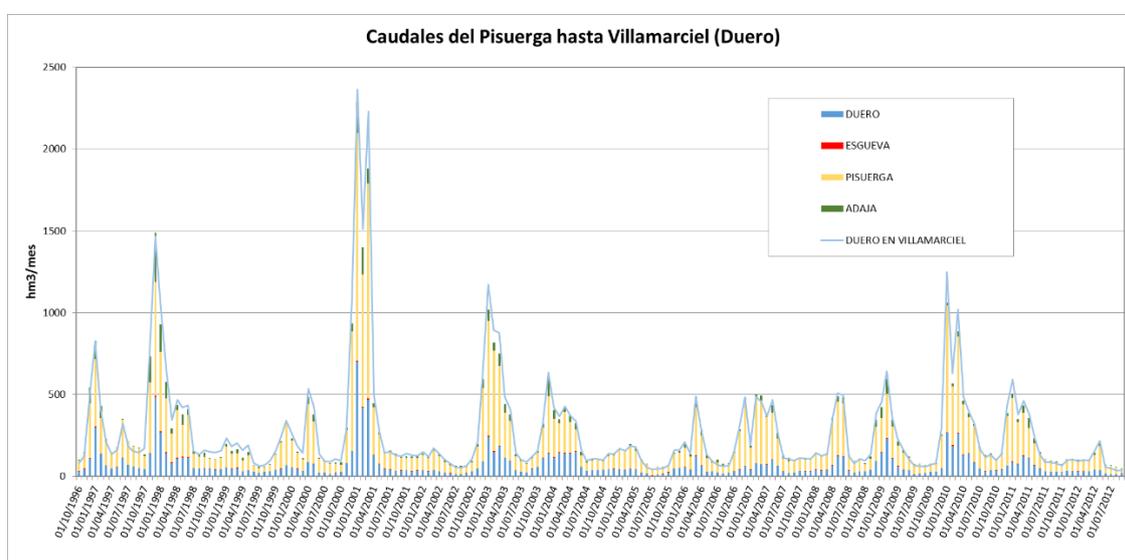


Figura 10: Representación gráfica de caudales acumulados hasta Villamarciel

Fuente:Elaboración propia

La diferencia entre la acumulada y el caudal medido puede ser debido a ejemplo a cierta demanda agrícola urbana o caudal de entrada, a la infiltración del agua superficial hacia el acuífero o a algún vertido de aguas residuales, aunque la contribución de caudal del último es generalmente irrelevante.

4.2 Calidad del agua

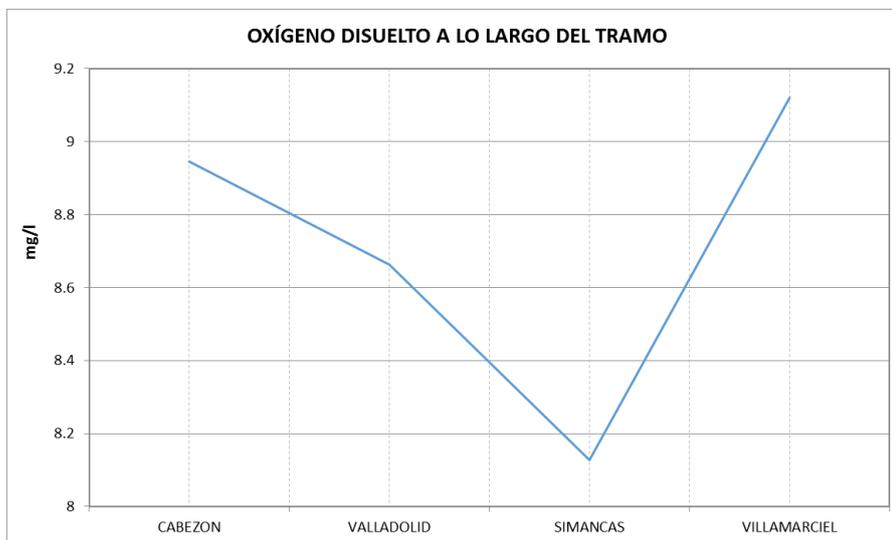
Para el correcto análisis de nuestro cauce debemos ser conscientes de la calidad del río aguas arriba y de sus afluentes. En el caso del Arlanzón su grado de contaminación

es alto, influenciando en la calidad del agua hasta el tramo que va a ser estudiado en este trabajo.

4.2.1. El oxígeno disuelto (OD)

La presencia de oxígeno es estrictamente necesaria para la vida sistema acuático, su fuente principal es la atmósfera, y su pérdida es debido a la respiración por animales acuáticos, la degradación y diversas reacciones químicas. La concentración de oxígeno disuelto en el agua depende de la temperatura y la altitud. El coeficiente de aireación está influenciada por la temperatura, la profundidad y la velocidad del agua. Por ejemplo, los vertidos de refrigeración, como el agua que se utilizan para enfriar la maquinaria en una planta de fabricación, elevan la temperatura del agua y reducen su contenido de oxígeno. Si se produce un aumento de la turbidez del agua también es posible provocar una disminución del OD. Una baja concentración de OD puede ser un indicador una problemática por eutrofización. Los valores altos de oxígeno disuelto comprendidos entre 8 a 12mgO₂/l son una garantía de una alta biodiversidad de especies.

Figura 11: Gráfico oxígeno disuelto medio a lo largo del tramo



Fuente:Elaboración propia

La concentración media de oxígeno disuelto en el tiempo a lo largo del río varía de 8.1 a 9.2mgO₂ / l (véase la figura 11). Los efectos de las descargas de aguas residuales

urbanas de las ciudades del área metropolitana de Valladolid y Simancas se evidencian con la bajada de concentraciones de OD de alrededor 1.2 mgO₂ / l, son ligeramente visibles y generan una disminución de la medida se puede hacer en las estaciones Valladolid y Simancas, volviendo a aumentar en Villamarciel ya que suma la aportación del río Duero. El tramo aguas abajo de Valladolid se somete a una ligera disminución de la concentración de oxígeno en el agua, como resultado de la urbanización de Valladolid.

En el siguiente gráfico (figura 12) con la representación de las lecturas en la estación de Cabezón de Pisuerga se detecta la variación de OD dependiendo de la temperatura, por el cambio estacional. En los meses de verano la concentración de oxígeno alcanza valores mínimos como 4.3mgO₂/l y 5.1 mgO₂/l en el verano de 1999 y en el verano de 2006 en la estación de Cabezón, el hecho de que la concentración de OD varía fuertemente con los cambios de temperatura no debe ser omitida. A pesar de que la concentración de OD media puede parecer alta, como hemos observado en la anterior figura 11, muchos veranos se caracterizan por bajas concentraciones de aproximadamente 6mgO₂/l.

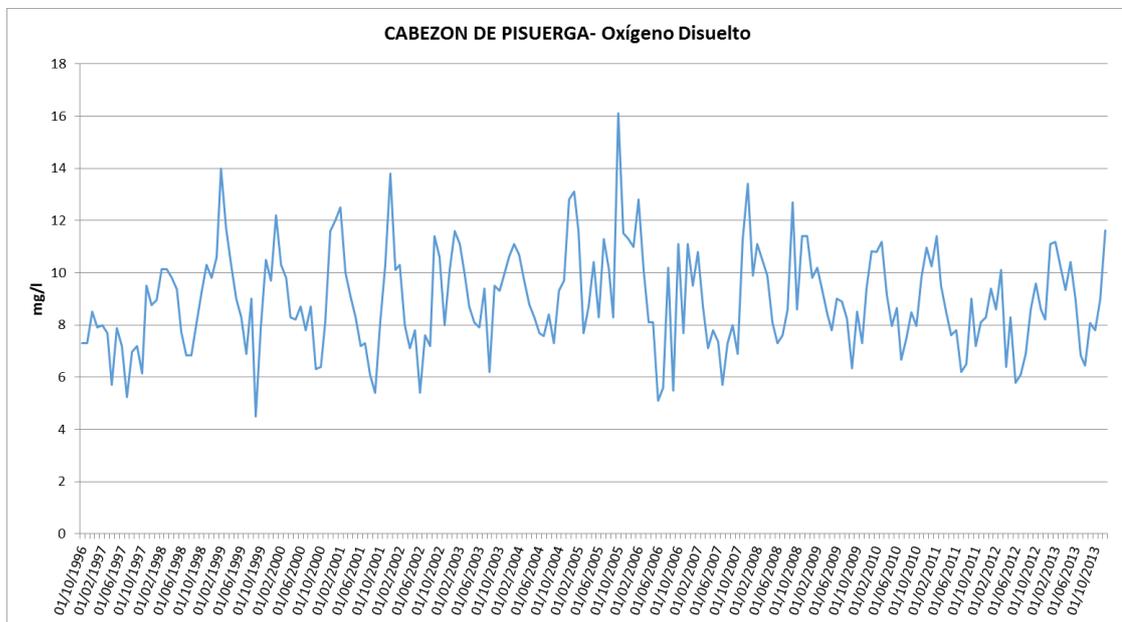


Figura 12: Gráfico de concentraciones de oxígeno disuelto en la estación de Cabezón de Pisuerga

Fuente:Elaboración propia

También es a destacar el hecho de que la concentración de oxígeno disuelto se mide generalmente cerca de la superficie de la corriente, lo que podría dar lugar a una sobreestimación de la concentración, sobre todo en tramos con grandes profundidades.

4.2.2 Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)

La DBO5 es una manera de medir la concentración de materia orgánica en el agua, generalmente se da en mgO_2 / l , y comparte una estrecha relación con la concentración de oxígeno disuelto. Corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para que las bacterias heterótrofas contenidas en el agua para degradar el material orgánico disponible, en el transcurso de 5 días.

En corrientes naturales la DBO5 no tiende a superar las concentraciones de $2\text{mgO}_2/\text{l}$. En España, el límite de concentración en la salida de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas es $25\text{mgO}_2 / \text{l}$.

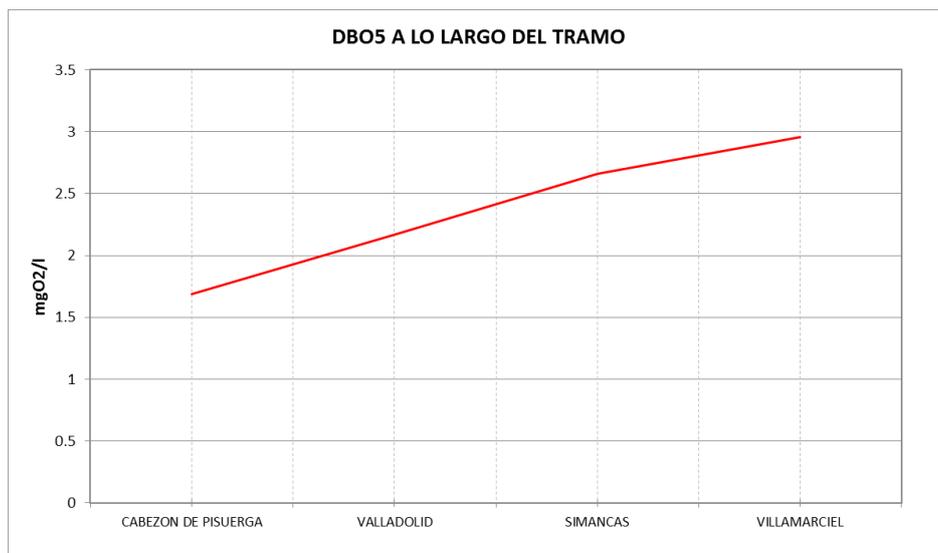


Figura 13: Gráfico concentración de DBO5 a lo largo del tramo

Fuente:Elaboración propia

Como puede verse en la Figura 13, la DBO5 promedio varía entre 1.75 y $3\text{mgO}_2/\text{l}$ que es aceptable, mientras que los valores absolutos tienen una gama de $1,8$ a $15\text{mgO}_2/\text{l}$. De manera similar a la concentración de OD, las fluctuaciones estacionales de la demanda biológica de oxígeno son elevadas. Los efectos de los vertidos de aguas residuales urbanas sobre la calidad del agua son similares a los observados en el caso de

oxígeno disuelto (Figura 11), a partir de Valladolid los valores de DBO5 son más elevados.

4.2.3. Nitrógeno

El nitrógeno es esencial para todos los organismos; es parte fundamental de moléculas como proteínas y ácidos nucleicos y es un nutriente indispensable en el crecimiento de organismos fotosintéticos. Así, el crecimiento de bacterias, la degradación de la materia orgánica, etc, depende de su presencia en el agua y su cantidad. Además, su papel de factor limitante potencial le da una función central en el proceso de eutrofización y por lo tanto es un parámetro determinante de la calidad del agua.

En la química del agua, los compuestos del nitrógeno, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- y nitrógeno orgánico, representan un papel muy importante puesto que son ellos los verdaderamente responsables del crecimiento de los organismos animales y vegetales en el medio acuático, pudiendo provocar un proceso de eutrofización.

En condiciones normales, los compuestos nitrogenados del agua provienen fundamentalmente de la degradación de la materia orgánica muerta, que a su vez ha sido absorbida de la atmósfera para su metabolismo. En condiciones del medio alteradas, los aportes adicionales de nitrógeno proceden mayoritariamente de los vertidos urbanos y de ciertas instalaciones industriales, así como del uso creciente de fertilizantes y pesticidas en la agricultura.

4.2.3.1. Amonio

Amonio puede aparecer en su forma ionizada NH_4^+ o como amoniaco NH_3 , dependiendo del pH, temperatura del agua, el oxígeno disuelto, etc. El agua se considera no contaminada con concentraciones muy bajas, debiendo ser inferiores a 0.1-0.2mgN/l.

Como puede verse en la Figura 14, el tramo río estudiado está sujeta a una contaminación por amonio, sobre todo a partir de las lecturas situadas en la ciudad de

Valladolid. La concentración media de amonio en el tiempo varía de 0,15 a 0.41mgN / l a lo largo del río, y el rango absoluto de variación es 0.01-3.29mgN/l.

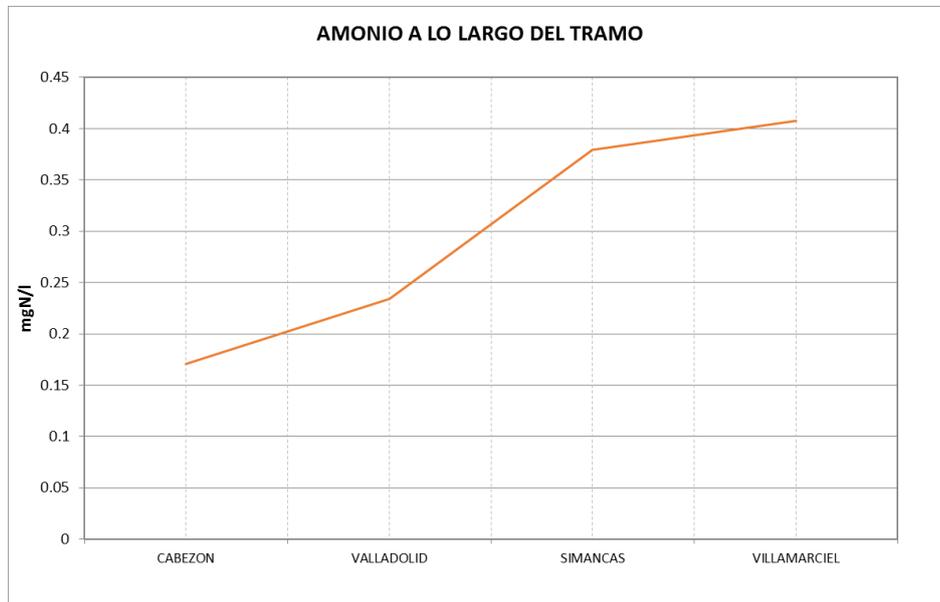


Figura 14: Grafico concentración de amonio a lo largo del tramo

Fuente:Elaboración propia

El incremento de la concentración de NH_4^+ lo podemos considerar como contaminación antropogénica ya que el valor medido Valladolid es más drástico posiblemente debido a los vertidos del grupo 264.

La Figura 15 representa la evolución de la concentración de NH_4^+ y el caudal en Valladolid. En la correlación inversa entre los dos parámetros se puede observar que los picos en la concentración se producen durante los períodos de sequía, justo la concentración de amonio desciende es cuando el nivel del agua es alto.

Este fenómeno lo podemos explicar de la siguiente manera: El caudal de los vertidos residuales urbanos son más o menos constantes durante todo el año, mientras que la precipitación y el caudal del cauce fluctúan. El resultado de ello es una variación de la concentración de NH_4^+ en función del flujo, lo que indica que la fuente principal de contaminación en la zona es antropogénico.

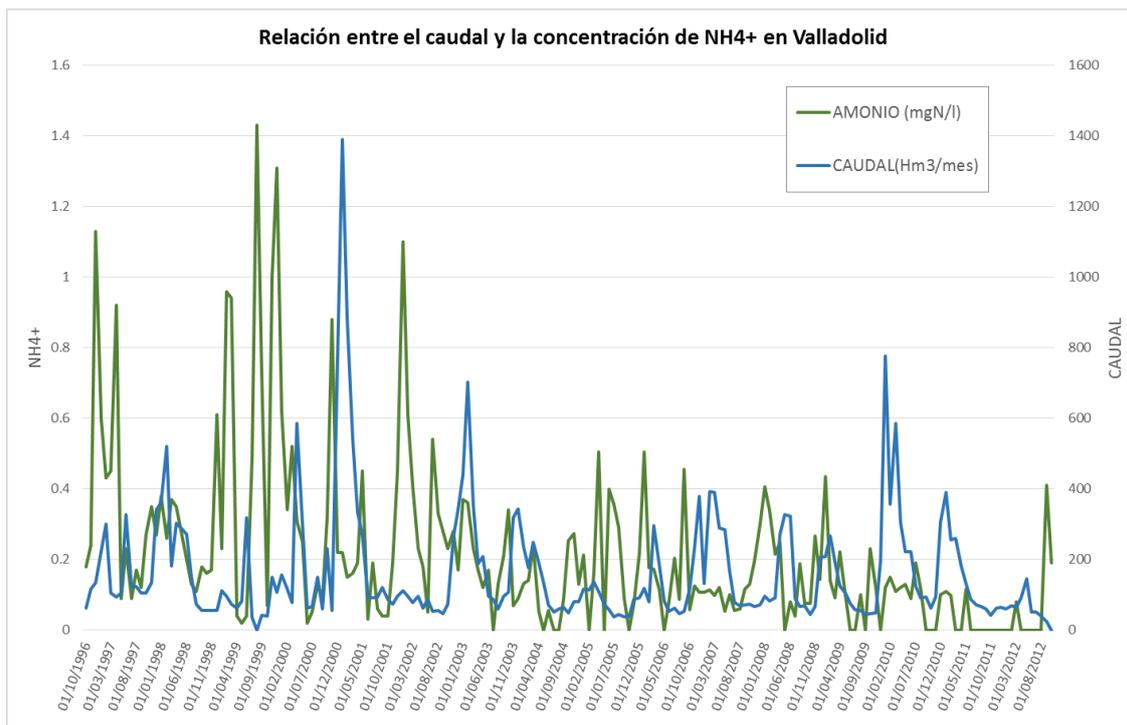


Figura 15: Gráfico relación entre caudal y concentración de amonio en Valladolid

Fuente:Elaboración propia

4.2.3.2. Nitratos

El amonio se transforma naturalmente a nitritos y nitratos en el agua gracias al proceso denominado nitrificación. La OMS y el anexo I del Real Decreto 927/1988 recomiendan un valor límite de 50mgN /l para los nitratos en los cuerpos de agua superficiales, una concentración máxima respetada por el tramo de río estudiado.

Se observa el aumento de la concentración aguas abajo de Simancas, que conoce ha indicado en el caso del amonio, puede ser propiciado por el vertido del grupo 264, ya que el vertido del municipio de Cabezón de Pisuerga es menor a 1mgN/l. La bajada de la concentración media a partir de Simancas la podemos atribuir a que el cauce que pasa por el municipio de Villamarciel es la de río Duero, posterior de la confluencia del Pisuerga. El volumen de agua que fluye por el río Duero es mayor al que circula por el Pisuerga, y por lo tanto la concentración desciende.

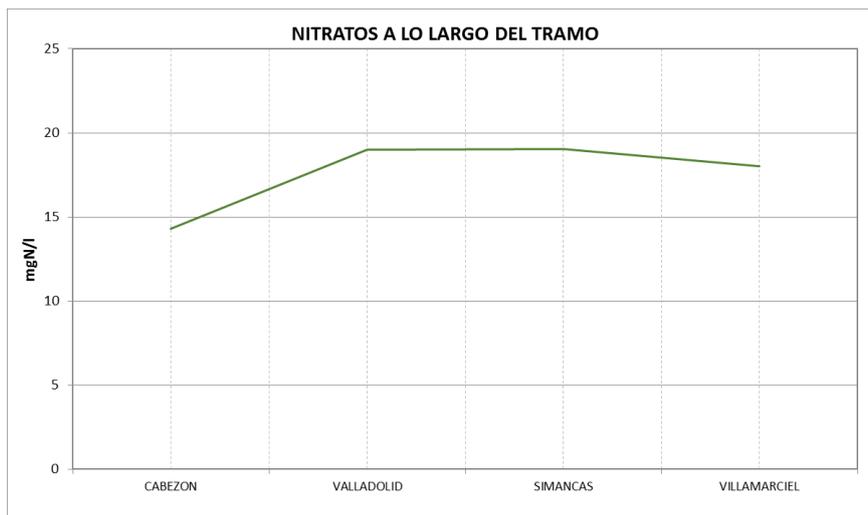


Figura 16: Gráfico concentración de nitratos a largo del tramo

Fuente:Elaboración propia

Generalmente en las masas de agua naturales la concentración de nitratos se encamina hacia los 5mgN / l, la diferencia positiva en el Sistema Pisuerga podría deberse a la utilización de fertilizantes en la agricultura y la entrada de escorrentías de agua de riego cargada de las concentraciones de nitratos superiores (contaminación difusa). En la Figura 16 se expone la relación entre el caudal y las concentraciones de nitratos en Valladolid, como se hizo para el amonio en el apartado 4.2.3.1. En este caso se puede observar que las concentraciones evolucionan con una cierta similitud al caudal (gran parte de los “picos” de nitrógeno coinciden con los del caudal).

Esto indica que el agua de riego o escorrentías superficiales tienen un cierto efecto sobre la concentración de nitratos en el río.

Sin embargo, la Figura 18 y las gráficas en las figuras 19 y 20 indica que la producción agrícola no es la causa principal del excedente de nitrato en el agua. La tierra irrigada está representada en verde, y se puede suponer que el riego se lleva a cabo en las actividades agrícolas que están presentes. Las subcuencas con más irrigación son la del Esgueva y la del Duero antes de la confluencia con el Pisuerga.

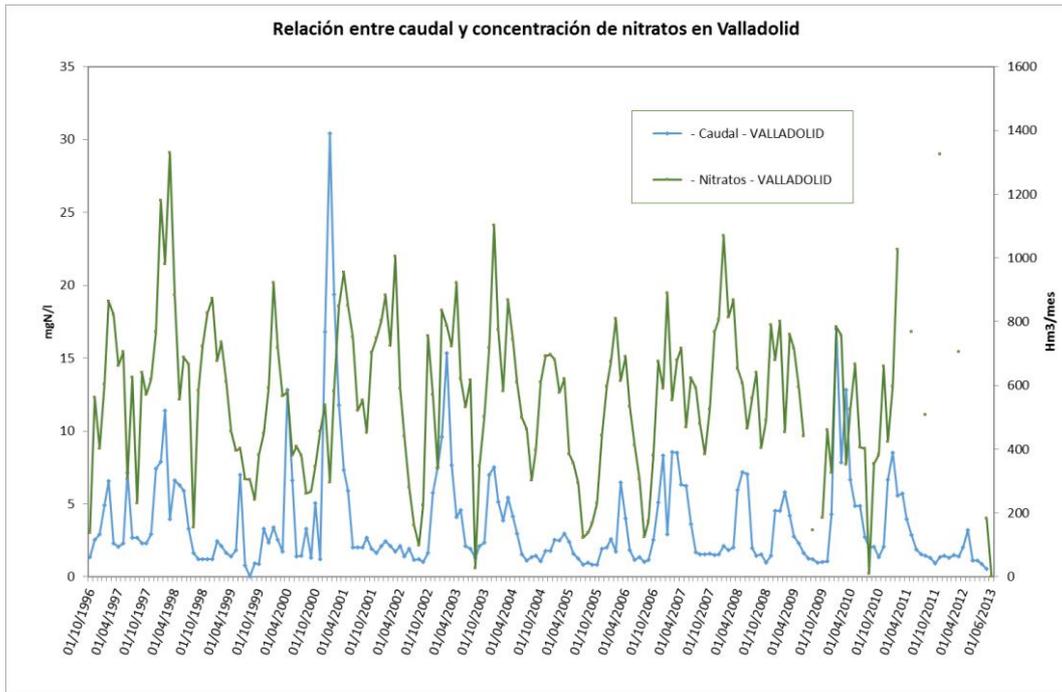


Figura 17: Relación entre caudal y concentración de amonio en Valladolid

Fuente:Elaboración propia

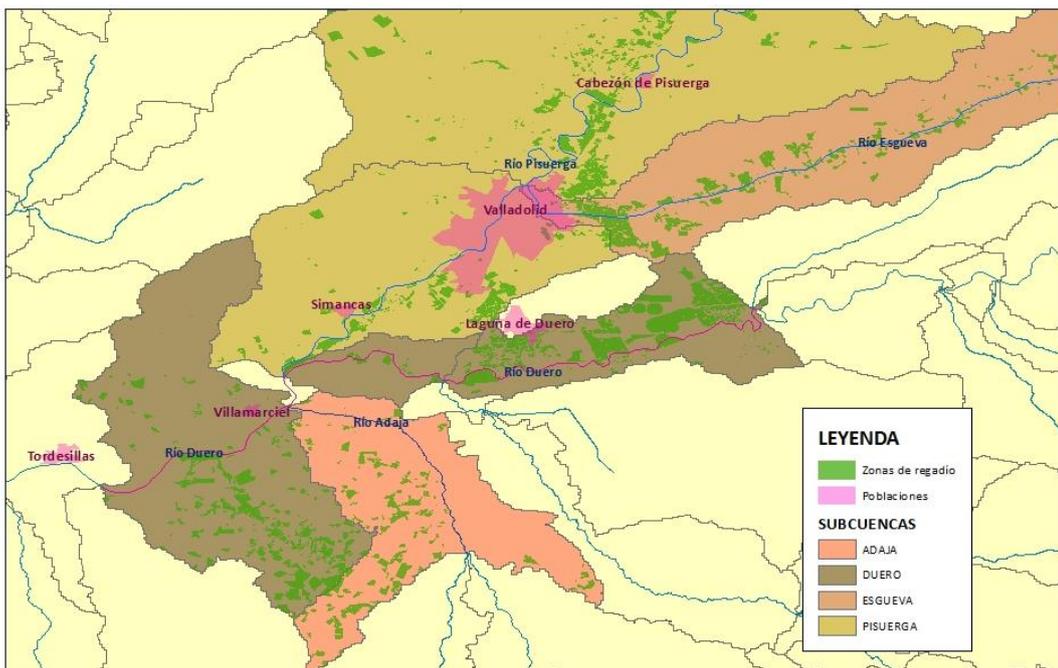


Figura 18: Zonas de regadío en el sistema del Pisuerga

Fuente:Elaboración propia

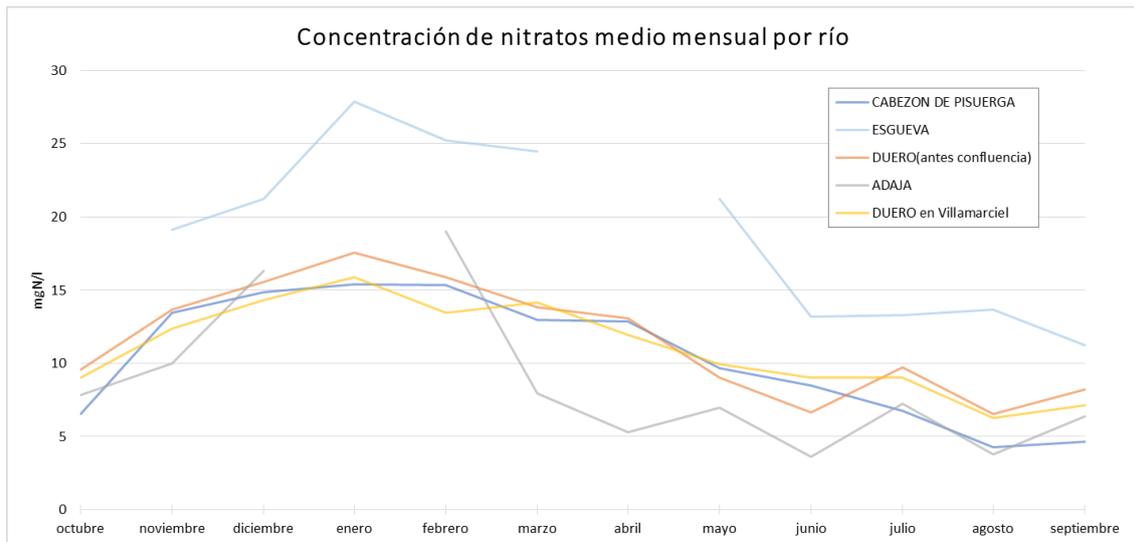


Figura 19: Gráfico concentración de nitratos medio mensual por río

Fuente:Elaboración propia

Analizando el gráfico de la figura 19 las concentraciones relativamente altas de nitratos se debieron a los fertilizantes en el caso del Esgueva, siendo más afectada debido a su poco caudal. En el Duero se establece en valores medios similares con parecidas concentraciones que el Pisuerga aguas arriba a pesar de estar en zona de regadío.

Teniendo en cuenta que los caudales, representados en la figura 20, son de mayor volumen a la altura de Cabezón de Pisuerga, tienen una similar concentración de nitratos sin ser tan influenciado por las escorrentías de regantes y que la concentración en Villamarciel del Duero es levemente menor (suponemos por su aumento de caudal) llegamos a la conclusión de que está poco influenciado por esas escorrentías superficiales. Por lo tanto, se puede afirmar que el uso de fertilizantes no es la principal fuente de contaminación por nitratos.

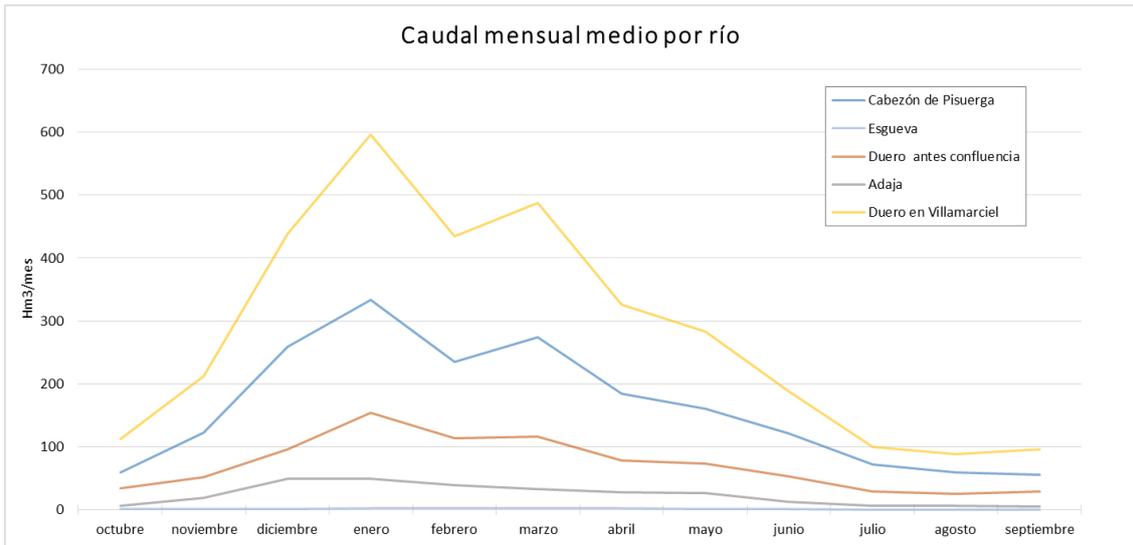


Figura 20: Gráfico caudal mensual medio por río.

Fuente:Elaboración propia

Como se ha indicado anteriormente, un proceso natural que ocurre en las corrientes de agua es la nitrificación, que transforma el amonio en nitrato. La figura 21 representa la relación entre las concentraciones de amonio y nitrato en Simancas, que es la estación aguas debajo de Valladolid y por lo tanto posterior a los mayores vertidos urbanos. Ya que introduce una alta cantidad de amonio en el río, un aumento de la concentración de nitrato es de esperar una vez que la nitrificación ha tenido tiempo para proceder.

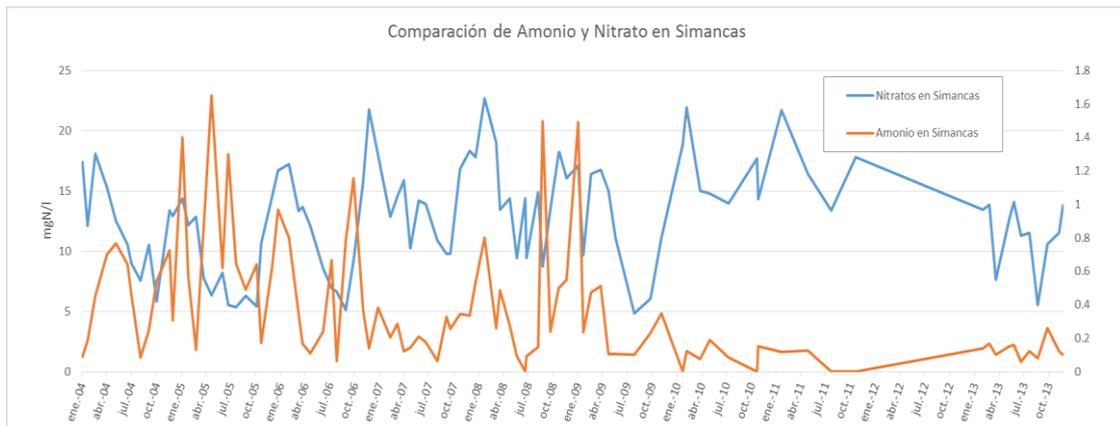


Figura 21: Gráfico comparación nitratos-amonio en Simancas

Fuente:Elaboración propia

El gráfico de la figura 21 muestra una cierta proporcionalidad inversa entre las dos concentraciones, los picos de concentración de nitratos que se producen con un tiempo de retraso después de los eventos de alta concentración de amonio. Por lo tanto, es más probable que el origen de la contaminación por nitratos es debido indirectamente a los vertidos de aguas residuales de Valladolid y sus alrededores.

4.2.3.3. El nitrógeno orgánico

El nitrógeno orgánico puede ser un producto natural tal como proteínas, péptidos, ácidos nucleicos y urea, o materia orgánica sintética. Se mide por lo general junto con amonio como el nitrógeno Kjeldahl total (NTK), que denota a los compuestos nitrogenados, excepto nitritos y nitratos. Surge de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, cuya salida generalmente contiene alrededor 20mgN/l de nitrógeno orgánico. Hay sólo unos pocos datos sobre nitrógeno orgánico proporcionado para el Sistema de Pisuegra, y las concentraciones varían de 0.63 a 4.03 mgN/l, que es un valor aceptable.

4.2.4 Fósforo Total

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y efluentes de aguas de tratamiento como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas.

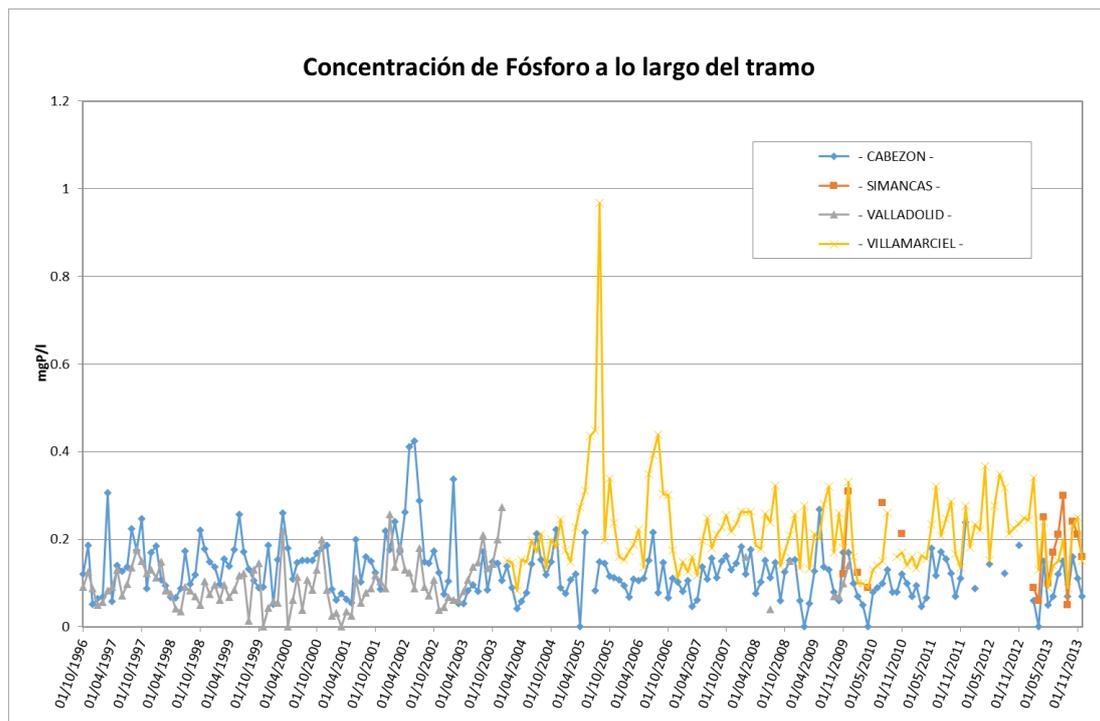


Figura 22: Concentración de fósforo a lo largo del tramo

Fuente:Elaboración propia

Hay pocos datos sobre fósforo proporcionado para el Sistema de Pisuega en algunas estaciones como la de Simancas, según se indica en la Figura 22, y las concentraciones varían de 0 a 0.4 mgP/l, siendo 0.89 mgP/l un dato puntual, que es un valor aceptable ya que está por debajo de los 10 mgP/l que se considera agua oligotrófica según Chapra (1997).

4.3. Conclusión y diagnóstico de la calidad del agua

El análisis de la evolución del caudal a lo largo del sistema de Pisuega respecto al tiempo demuestra que no se produce en gran medida una pérdida o ganancia de volumen de agua, lo que significa que no hay un aporte importante (de pequeños afluentes, acuíferos, etc.) o de salida (de acuíferos, la demanda de agua, etc.) a excepción de la confluencia con el Duero, el Esgueva y el Adaja y los canales de Castilla y del Duero.

En cuanto a la calidad del agua del río, se puede concluir que la principal fuente de contaminación consiste en las descargas de aguas residuales urbanas de los municipios

de Valladolid y sus alrededores, y que su estado analizado en el primer punto de estudio en el tramo (Cabezón de Pisuerga) nos indica tener la misma problemática con los vertidos aguas arriba de municipios tales como Burgos y Palencia.

Las aguas residuales de Valladolid y la periferia de la ciudad afectan a la calidad del agua de manera progresiva viéndose más afectada en Simancas, que contiene altas concentraciones de DBO5 y de amonio y una bajada de concentración de oxígeno disuelto. También debe señalarse que su abundante caudal en este tramo favorece a la expansión de la problemática aguas abajo con un aumento del proceso de nitrificación. Por lo tanto, el tramo crítico de la cuenca estudiada corresponde a los kilómetros aguas abajo de Valladolid, aproximadamente hasta la confluencia con el Duero (última ICA ubicada en Villamarciel). Esta parte del río está contaminado por casi todos los parámetros estudiados: bajo OD y altos niveles de DBO5, NH4 +, PT y NO₃²⁻.

En el caso del río Esgueva, las escorrentías superficiales de aguas de riego tienen una influencia directa en la calidad del agua, sobre todo con las mediciones de NO₃² con concentraciones muy altas; y al contrario con el OD con concentraciones bajas. Pero debido a su bajo caudal respecto al Pisuerga, el aporte de este afluente no afecta de manera importante a la calidad del agua, ya que las lecturas en la estación aguas abajo en la estación de Valladolid solo se percibe un aumento drástico en el NH₄⁺ que antes hemos atribuido a los vertidos urbanos de la zona.

Respecto al Río Duero antes de su confluencia con el Pisuerga, los valores NO₃² y PT son similares a los habidos en el Pisuerga que hemos determinado de origen antrópico, pero al analizar unos valores NH₄⁺ bajos y unos niveles de oxígeno más que aceptables; y proceder de una zona rica en agricultura regante, llegamos a la descarga de aguas residuales del Duero son afectadas por escorrentía de aguas de riego.

El afluente Adaja es considerada una aportación de agua en buen estado de calidad, sus concentraciones de DBO5, NH₃, PT y NH₄⁺ se encuentran en valores aceptables, además de que los niveles de OD son similares a los encontrados en el río Duero. A pesar de ser la aportación con mejores valores en parámetros de calidad, es de bajo caudal respecto al Duero es baja en su desembocadura afectando de manera leve a la cuenca.

En general, todo el Sistema Pisuergra indica un muy alto contenido de amonio que no cumple con los requisitos para la vida acuática. Este amonio se puede considerar que proviene de los vertidos a las masas de agua de origen antrópico, debido a su similitud de altas concentraciones en zonas con puntos de vertido. Su carga de materia orgánica también es preocupante, por lo que puede ser producida por los vertidos de origen urbano.

Además, se debe tener en cuenta que a pesar de que en cierta concentración media no supera los límites permitidos, las fluctuaciones estacionales pueden ser importantes y el río puede encontrarse contaminado temporalmente.

En el siguiente capítulo se detallará la metodología para la modelación con la herramienta GESCAL, documentado con el Manual de usuario GESCAL Versión 1.1

5. HERRAMIENTA GESCAL PARA EL DARROLLO DEL MODELO

5.1. Introducción

La herramienta GESCAL programa es una herramienta para modelar la calidad del agua en una escala de cuenca. Fue implementado en el Sistema de Ayuda a la Decisión (DSS) AQUATOOL (Andreu et al., 1996) y en su nueva versión AquaToolDMA (Solera et al., 2007) para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Así, la aplicación combinada permite el modelado de la gestión y la calidad de los sistemas de recursos hídricos con una sola herramienta.

El programa permite la modelación de los constituyentes convencionales con un doble objetivo: por un lado se busca sencillez a la hora de modelar de una manera coherente con la escala de trabajo y por otro se intenta no perder representatividad ni capacidad de modelación.

Aunque el programa permite, la modelación de la calidad del agua, en sistemas de recursos completos no deja de ser muy interesante su aplicación a pequeña escala como pueden ser tramos de río específicos o el análisis de un sólo embalse. Esto se debe a la completa consideración de procesos que se realiza en su formulación.

El modelo SIMGES permite la modelación de sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. En este caso el uso de SIMGES no trata de la simulación real de toda una cuenca, sino con un tramo de río en el que las entradas corresponden a aportaciones de aguas residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales, o para pequeños cauces naturales. Concretamente, SIMGES simula el caudal y GESCAL la calidad del agua a lo largo del río.

5.2. Formulación de Modelo

La herramienta GESCAL permite el desarrollo de modelos de calidad del agua sobre modelos de simulación de sistemas de recursos hídricos previamente desarrollados con el módulo SIMGES.

Aunque la calidad de agua se ha considerado en todos los posibles elementos de la modelación de la simulación la modelación de los procesos físico – químicos y biológicos que afectan a la calidad se considera exclusivamente en los elementos de tramos de río (o canales) y embalses (o lagos). La característica fundamental, de esta herramienta, es la posibilidad de modelar tanto embalses como tramos de río en una misma aplicación y de una forma integrada con el resto de elementos del sistema. Así, de esta forma, la calidad en un tramo de río o en un embalse no sólo depende de los procesos que se producen sino también de la gestión del sistema y de la calidad de los diferentes elementos que tengan relación con el elemento en cuestión. Los constituyentes que se pueden modelar son los siguientes:

- Temperatura
- Contaminantes arbitrarios
- Oxígeno Disuelto y materia orgánica de carbono (OCM)
- Ciclo de nitrógeno: nitrógeno orgánico, amonio y nitratos, influencia en el oxígeno disuelto
- La eutrofización: ciclo del nitrógeno, el fitoplancton (tales como la clorofila-a, fósforo orgánicos e inorgánicos, influencia en oxígeno disuelto

5.2.1 Modelado en conducciones

El elemento conducción concebido en el modelo de simulación SIMGES sirve para modelar cualquier curso de agua, ya sea un tramo de río, un canal o cualquier otro tipo de conducción. En el programa GESCAL se modela el tramo de río bajo las siguientes características:

- Se considera unidimensional con homogeneidad de concentraciones tanto en el eje vertical como en el transversal.

- Estado estacionario: Para cada mes se estima las condiciones estacionarias de calidad del agua que alcanzaría el tramo de río si las condiciones se mantuvieran constantes dentro de ese intervalo de tiempo. - Se consideran los procesos de advección y dispersión.

- En la modelación de los tramos de río también se tiene en cuenta la posible relación hidráulica con los acuíferos ya sea por aporte de agua desde el acuífero o por filtración del río.

-Permite la introducción de elementos de contaminación difusa.

- La hidráulica se puede modelar tanto por relaciones potenciales como por la ecuación de Manning asumiendo sección trapezoidal.

- Los vertidos puntuales se consideran en los nudos.

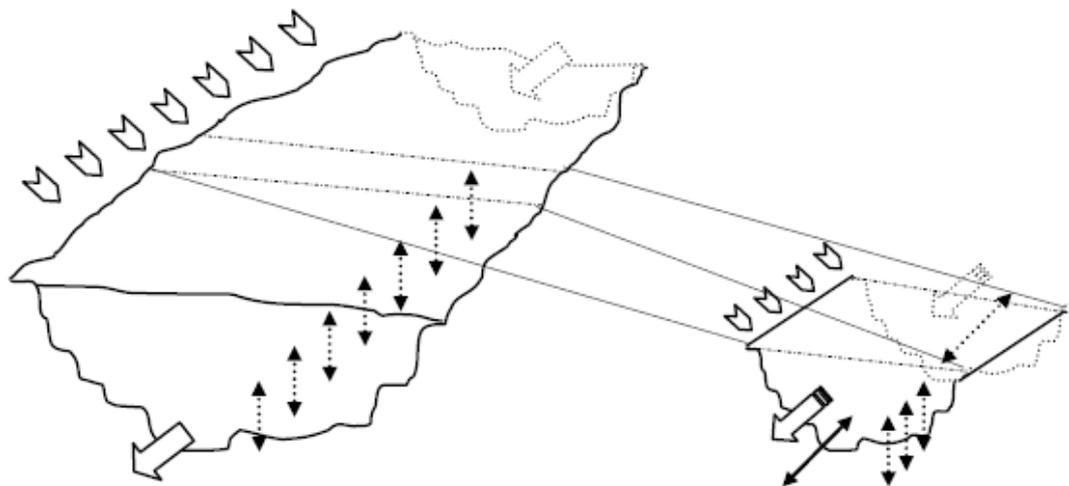


Figura 23: Esquema de modelación de las conducciones.

Fuente: Manual de usuario GESCAL Versión 1.1

Independientemente del constituyente que se esté modelando la ecuación diferencial que se resuelve para simular la evolución de la calidad del agua en el tramo de río es la misma y viene definida por el siguiente balance de materia:

$$0 = \frac{d}{dx} \left(E \frac{dC}{dx} \right) - \frac{d(uC)}{dx} + \frac{S_d + C_e q_e - C q_s + \sum W_i}{V} \quad (1)$$

En donde: E representa la dispersión (m²día⁻¹); C la concentración del constituyente (mg/l); C_e la concentración del constituyente en el acuífero al que está conectado el río (mg/l); x la distancia a lo largo del tramo de río (m); u la velocidad (m día⁻¹); V el volumen de la masa de agua (m³); q_e es el caudal que aporta el acuífero (m³día⁻¹); q_s el posible caudal filtrante al acuífero (m³día⁻¹); S_d cantidad de masa aportada de forma difusa al tramo de río (gr/día). ΣW_i (M) representa el conjunto de procesos que eliminan o aportan materia al elemento.

Bajo la hipótesis de unidimensionalidad en ríos es necesario establecer un modelo hidráulico que relacione los caudales circulantes con la velocidad, profundidad y ancho del río. Para el establecimiento de esta relación se dispone de dos métodos. El primero, desarrollado por Leopold and Maddock (1953) establece relaciones potenciales entre las distintas variables hidráulicas y el caudal:

$$u = \alpha_1 Q^{\beta_1}$$

$$h = \alpha_2 Q^{\beta_2}$$

$$b = \alpha_3 Q^{\beta_3}$$

Donde u representa la velocidad (ms⁻¹); Q es el caudal circulante (m³s⁻¹); h es el calado (m); b el ancho del río (m). Los coeficientes α₁, β₁, α₂, β₂, α₃ y β₃ son parámetros que se establecen de forma empírica y que por continuidad deben cumplir:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$$

$$\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = 1$$

El segundo método implementado en el programa es el cálculo hidráulico por la fórmula de Manning:

$$u = \frac{R_h^{2/3} I^{1/2}}{n}$$

En donde: R_h (m) representa el radio hidráulico que se obtienen como el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado. I (m/m) representa la pendiente del canal y n es el número de Manning o de rugosidad. La velocidad se obtiene en ms^{-1} .

Se considera una sección trapezoidal con lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$u = \frac{\left(\frac{b_o y + s y^2}{b_o + 2y\sqrt{s^2 + 1}} \right)^{2/3} I^{1/2}}{n}$$

Dónde: b_o representa el ancho de la solera del río (m). “ s ” es la pendiente lateral (m/m). “ y ” representa el calado (m); “ n ” es el coeficiente de Manning La resolución de la ecuación de Manning pasa por aplicar un método de resolución numérica por iteración. Debido a las posibles relaciones de los tramos de río con los acuíferos, el caudal no tiene porque ser el mismo a lo largo del tramo. Por ello, asumiendo que las pérdidas o ganancias de caudal son uniformes a lo largo del tramo, las relaciones hidráulicas se resuelven para cada uno de los “segmentos” o diferenciales en los que se divide el tramo para el cálculo.

Por otra parte, cabe destacar que la elección de un método u otro no es global para todos los tramos de río permitiendo aplicar un método u otro de forma discrecional sobre los tramos.

5.2.2 Procesos modelados y componentes

Los componentes que pueden ser modelados son: temperatura, contaminantes arbitrarios, la materia orgánica carbonosa, oxígeno disuelto, nitrógeno orgánico, amonio, nitrato, fitoplancton, fósforo orgánico y fosfato. La herramienta se ha centrado claramente en el modelado de los componentes más comunes de las aguas superficiales, incluyendo los procesos de eutrofización.

Contaminantes arbitrarios

Para los contaminantes arbitrarios se considera un proceso de descomposición modelado mediante una cinética de primer orden y un proceso de sedimentación de la parte particulada.

$$\sum W_i = -K(\theta^{T-20})C - \frac{VS}{h}C$$

Donde: K representa la constante de descomposición a 20 °C (día⁻¹); es el coeficiente por corrección de temperatura; la sedimentación se considera mediante un parámetro VS que representa la velocidad de sedimentación del constituyente (m día⁻¹); h es el calado del río (m); C representa la concentración del contaminante en el río (mg l⁻¹).

Materia orgánica y oxígeno disuelto

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran tres posibles niveles incrementales de complejidad. La opción más sencilla tiene en cuenta la modelación de la MOC y el oxígeno disuelto. El segundo grado de complejidad considera adicionalmente el ciclo del nitrógeno. Las diferentes formas consideradas son nitrógeno orgánico, amonio y nitratos. Finalmente el último nivel de complejidad permite la modelación de la MOC, el ciclo del nitrógeno, fitoplancton, el fósforo (orgánico y soluble reactivo), sus relaciones y las afecciones sobre el oxígeno disuelto. De esta forma la modelación de la materia orgánica carbonosa queda englobada dentro de la modelación del proceso de eutrofización.

La figura 24 muestra los procesos considerados en la opción de modelación básica en cuanto a oxígeno disuelto (OD) y materia orgánica carbonosa (MOC) se refiere. Nota DOS: Demanda de Oxígeno por parte del Sedimento.

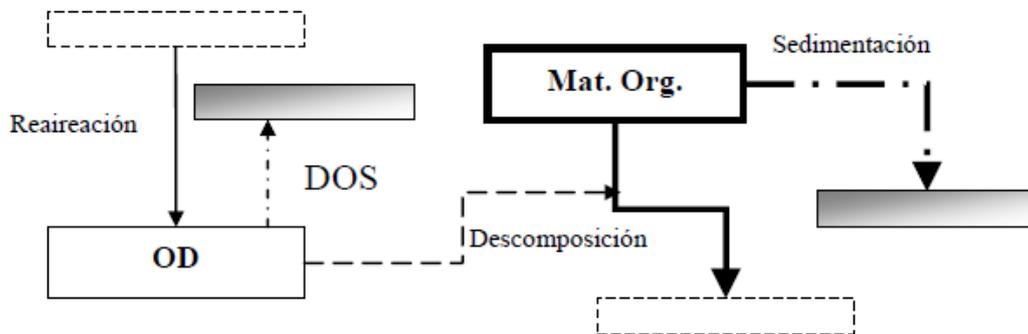


Figura 24: Procesos considerados en la hipótesis básica de modelación del oxígeno disuelto.

Fuente: Manual de usuario GESCAL Versión 1.1

En la figura 25 se muestran los procesos y constituyentes que se incluyen en la segunda opción de modelación del oxígeno disuelto, MOC y ciclo del nitrógeno.

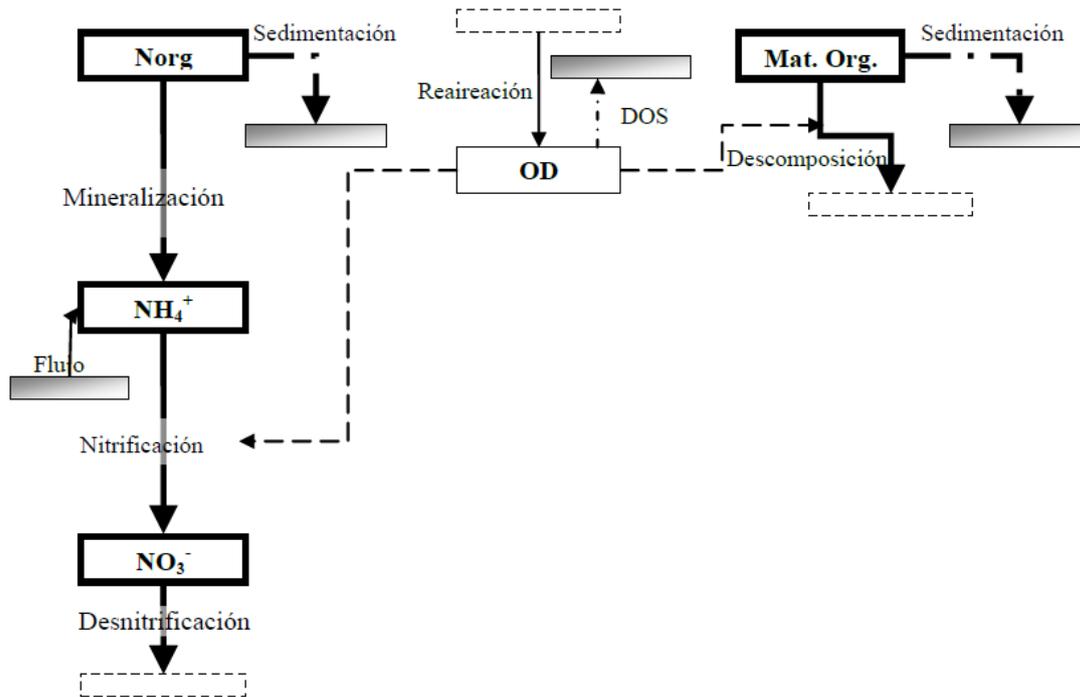


Figura 25: Procesos considerados en la modelación del oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno

Fuente: Manual de usuario GESCAL Versión 1.1

Materia Orgánica Carbonosa

Para la modelación de la MOC se tiene en cuenta la degradación por microorganismos aeróbicos heterótrofos y la sedimentación de la parte particulada.

$$\sum W_i = -K_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + K_d^{1/2}} L - \frac{VS_L}{h} L$$

En donde: L es la concentración de MOC en el río (M/V); K_d es la constante de degradación (T^{-1}); θ_d es la constante por corrección de la temperatura de la constante K_d ; VS_L es la velocidad de sedimentación ($mdía^{-1}$); h es la altura de la masa de agua; T es la temperatura de la masa de agua.

Nitrógeno orgánico

Para el nitrógeno orgánico se consideran los procesos de amonificación y sedimentación:

$$\sum W_i = -K_{Noa} \theta_{noa}^{T-20} N_o - \frac{VS_{No}}{h} N_o + r_{na} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A$$

Donde: K_{Noa} representa la constante de amonificación (día^{-1}); θ_{noa} representa el coeficiente de corrección de la constante anterior por temperatura; N_o es la concentración de nitrógeno orgánico en el río (MT^{-1}); VS_{No} velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (mdía^{-1}); r_{na} representa el contenido de nitrógeno en las algas (mgN/mgA). El último término sólo se considera en la opción en que se modele el fitoplancton representando la aportación debido a la respiración del mismo.

Amonio

Los procesos considerados sobre el amonio han sido el incremento de concentración por la amonificación del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación. La nitrificación se ha considerado en su totalidad incluyendo el paso de amonio a nitritos y de estos a nitratos.

$$\sum W_i = +K_{Noa} \theta_{Knoa}^{T-20} N_o - \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{n1/2}} \right) N_a + -r_{na} F_n K'_g A$$

En donde: N_a representa la concentración de amonio (NH_4^+) en el río (mg l^{-1}); K_{Nai} es la constante de nitrificación de paso a nitritos (día^{-1}); θ_{nai} es la corrección por temperatura de la constante de nitrificación; $K_{n1/2}$ es la constante de semisaturación del nitrógeno (mg l^{-1}); O es la concentración de oxígeno disuelto. F_n representa el factor de preferencia por el amonio frente a los nitratos; r_{na} es el coeficiente estequiométrico (mgN/mgA); K'_g es la constante de crecimiento de fitoplancton teniendo en cuenta el factor corrector por temperatura, limitación de nutrientes y atenuación de la luz (día^{-1}); A es la concentración de clorofila-a (mg l^{-1}). El último término sólo se considera en la opción en que se modele el conjunto global. El efecto de la reducción de nitrificación por condiciones

anóxicas se ha considerado corrigiendo la constante con un factor dependiente de la concentración del oxígeno disuelto y una constante de semisaturación.

Nitritos y Nitratos

Los nitratos y nitritos se modelan de forma conjunta debido a la rapidez con que los primeros se oxidan a la forma más reducida. En el proceso de modelación de los nitratos se tiene en cuenta el efecto del incremento de concentración por la transformación de amonio y la disminución de los mismos por posibles procesos de desnitrificación y crecimiento del fitoplancton.

$$\sum W_i = \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{nai/2}} \right) N_a - \left(K_{no3} \theta_{no3}^{T-20} \frac{O + K_{no3/2}}{O} \right) N_{o3} - r_{na} (1 - F_n) K'_g A$$

Donde: N_{o3} es la concentración de nitratos ($\text{mg l}^{-1} - \text{N}$); K_{no3} representa la constante de desnitrificación (día^{-1}); θ_{no3} es el factor de corrección de temperatura para la constante anterior; $K_{No3/2}$ representa la constante de semisaturación para tener en cuenta que la desnitrificación sólo se produce en momentos de anoxia.

Fósforo orgánico

Sobre el fósforo orgánico se considera el efecto de la respiración del fitoplancton, la mineralización del mismo a la forma inorgánica y la sedimentación. Con estas consideraciones la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\sum W_i = -K_{mp} \theta_{mp}^{T-20} P_{or} + f_p r_{pa} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A - \frac{VS_{or}}{h} P_{or}$$

Donde: P_{or} es la concentración de fósforo orgánico (mg l^{-1}). K_{mp} representa la constante de mineralización del fósforo orgánico (día^{-1}); θ_{mp} es el coeficiente de corrección por temperatura de la constante de mineralización; r_{pa} es el coeficiente estequiométrico (mgP/mgA); VS_{or} es la velocidad de sedimentación del fósforo orgánico (mdía^{-1}); f_p es la fracción de fósforo orgánico que se genera en la respiración del fitoplancton.

Fosfatos

Sobre los fosfatos se considera el efecto de mineralización de la forma orgánica y el del crecimiento del fitoplancton.

$$\sum W_i = +K_{mp} \theta^{T-20} P_{or} - r_{pa} K_g' A + (1 - f_p) r_{pa} K_{resp} \theta^{T-20} A$$

Donde: P representa la concentración de fósforo inorgánico en el río (mg/l-1).

Oxígeno disuelto

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran los siguientes procesos:

- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación de materia orgánica carbonosa.
- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de nitrificación.
- Consumo de oxígeno en la respiración del fitoplancton.
- Producción del mismo en el proceso de crecimiento mediante la fotosíntesis.

$$\begin{aligned} \sum W_i = & +K_a \theta^{T-20} (O_{sat} - O) - K_d \theta_d^{T-20} L - \\ & - r_a \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{nl/2}} \right) N_a + \\ & + r_{ocrec} \left(K_g \max \theta_g^{T-20} F_l \text{Min} \left(\frac{N_{aiO3}}{N_{aiO3} + K_{NF1/2}}; \frac{P}{P + K_{P1/2}} \right) \right) A - r_{oresp} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A \end{aligned}$$

Donde: O es la concentración de oxígeno disuelto en el río (mg/l-1); O_{sat} es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (mg/l-1); K_a es la constante de reaeración (día⁻¹); θ_a es factor de corrección por temperatura; r_a representa el consumo de oxígeno por oxidación de amonio (mgO/mgN) ; r_{ocrec} y r_{oresp} representan el oxígeno producido y consumido por el crecimiento de las algas y la respiración.

Cada una de las líneas de la fórmula representa los términos que se añaden según la consideración de modelación que se realice: modo sencillo (sólo oxígeno disuelto y materia orgánica), modo medio en donde se incluye el ciclo del nitrógeno y modo completo en donde se incluye el efecto del fitoplancton y del fósforo.

La saturación de oxígeno disuelto se estima a partir de la temperatura del tramo de río utilizando la ecuación propuesta en (APHA, 1992)

$$\ln O_{satpo} = -139.34411 + \frac{1.575701 \cdot 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \cdot 10^7}{T_a^2} + \frac{1.2438 \cdot 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \cdot 10^{11}}{T_a^4}$$

Donde: T_a es la temperatura del agua en grados Kelvin. La constante de reaeración puede ser introducida como un dato u obtenerse mediante el método de Covar: Si la H (profundidad) < 0.61 (m) entonces se utiliza la fórmula de Owens-Gibbs:

$$K_a = 5.32 \frac{u^{0.67}}{H^{1.85}}$$

Donde u es la velocidad en m/s. Si $H > 0.61$ (m) y $H > 3.44 \cdot u^{2.5}$ entonces se utiliza la fórmula de O'Connor-Dobbins:

$$K_a = 3.93 \frac{u^{0.5}}{H^{1.5}}$$

En cualquier otro caso se utiliza la fórmula de Churchill:

$$K_a = 5.026 \frac{u}{H^{1.67}}$$

5.3. Consideraciones generales

Influencia de la temperatura

La velocidad de las reacciones que se consideran en el modelo aumenta con la temperatura, según la ecuación de Arrhenius:

$$K(T) = K(20) \cdot \theta^{T-20}$$

Donde K(T) es el valor de la constante a la temperatura T, K(20) es el valor de la constante a 20°C y θ es el factor de corrección de temperatura y depende del proceso.

Influencia de la concentración de oxígeno disuelto

La velocidad de los procesos que dependen del oxígeno disponible (degradación de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación) está corregida por la concentración de oxígeno generalmente según la expresión:

$$K = K \cdot \frac{OD}{OD + K_{1/2}}$$

Donde OD es la concentración de oxígeno y $K_{1/2}$ es una constante de semisaturación diferente para cada proceso. Para el caso de las conducciones en donde se busca el estado estacionario se realiza un proceso iterativo de cálculo entre los diferentes constituyentes relacionados en la modelación del oxígeno disuelto. Se ha puesto como criterio de convergencia el valor de la suma de las concentraciones de oxígeno disuelto en los segmentos en que se divide el tramo de río.

El límite de convergencia se define como 0.5 mg/l de diferencia entre dos iteraciones. Para asegurar la convergencia la constante de degradación de la materia orgánica se estima como la media entre la obtenida para la simulación anterior y la que se obtendría para unos niveles de oxígeno de esta simulación.

En particular, para el proceso de desnitrificación, que tiene lugar en ausencia de oxígeno, la corrección por oxígeno se introduce de la siguiente manera:

$$K = K \cdot \frac{K_{1/2}}{OD + K_{1/2}}$$

representativa de todo el modelo, el cual está al completo en la anterior figura 27. Todo el modelo se puede encontrar en el Anexo 1 de una manera más clara, en formato de imagen completa y con una fragmentación en tres zonas para su mejor visibilidad.

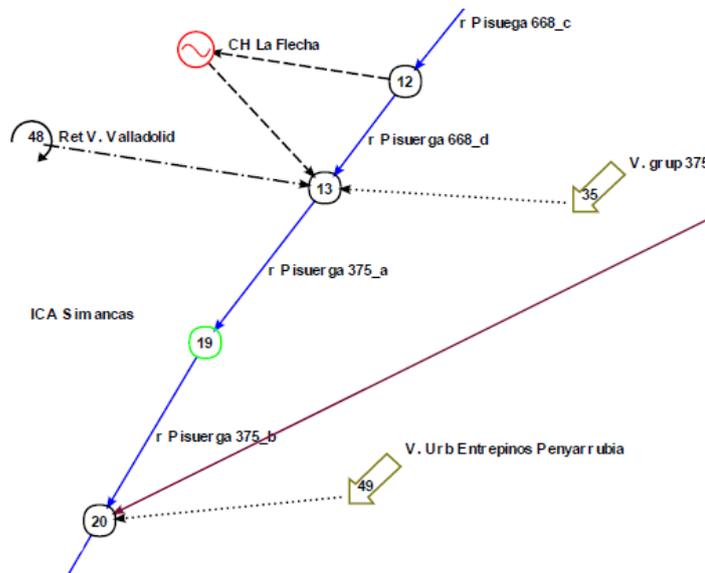


Figura 28: Sección representativa del modelo

Fuente: Elaboración Propia

Para su regulación, el sistema de explotación del Pisuerga cuenta con los embalses de Aguilar, Requejada y Cervera, en la cabecera del Pisuerga. Al estar en la cabecera del río, no entra en el tramo de estudio de nuestro modelo por lo que no se añadirán elementos de embalses. Tampoco se consideró ninguna demanda de agua o de entrada / salida hasta el acuífero, ya que estos movimientos de masas de agua no influyen notablemente el análisis de agua (véase en el capítulo 4, las Figuras 10).

La topología del modelo fue construida en su mayoría de acuerdo a los mapas geográficos manejados con los geográficos ArcGIS (fuente: Confederación Hidrográfica del Duero) , software del sistema de información geográfica, y se inspiró en una medida menor por un modelo anterior (IMPLEMENTING ENVIRONMENTAL FLOWS IN COMPLEX WATER RESOURCES SYSTEMS – CASE STUDY: THE DUERO RIVER BASIN, SPAIN(Paredes

et al)), desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

6.1 Aportaciones

Las aportaciones pueden ser naturales (afluentes) o artificiales (vertidos de aguas residuales, canales) y corresponden a un volumen adicional de agua con ciertas cargas de parámetros de calidad. La información relativa a cada caudal de entrada se utiliza como una entrada de datos para la simulación y consiste en mediciones de caudales y concentraciones de los parámetros de calidad. En el modelo del Sistema Pisuerga se considerarán todos los afluentes que disponen de una estación de medición de caudal y todas los vertidos de aguas residuales cuyo volumen excede $100.000\text{m}^3/\text{año}$. Se agruparon para la implementación en el modelo algunos puntos de vertidos para el cumplimiento de este límite en el caso de que fueran con altos niveles de contaminación y teniendo en cuenta su situación.

La fuente de información relacionada con las entradas (véase también el capítulo 3 sobre las fuentes de información) son los datos del CEDEX de la red de control de las estaciones de medición de caudal y de la calidad el agua para las aportaciones naturales. Los datos sobre los vertidos de aguas residuales son proporcionados por la CHD en forma de inventario. En caso de falta de datos de calidad, se utilizan los valores correspondientes a una media mensual de anteriores periodos con un intervalo mínimo de 20 años, obteniendo los datos del modelo del Duero anteriormente mencionado entre los años 1980-2006.

Para las series de aportaciones naturales en las confluencias determinadas con SIMPA, las cuales han sido facilitadas por la Confederación Hidrográfica del Duero, los parámetros de calidad que usaremos para el OD y Nitratos serán de 11mgO/l y 1.4 mgN/l respectivamente.

El inventario de los vertidos de aguas residuales y su ubicación se puede encontrar en la tabla 8 y la figura 9, ubicadas en el capítulo 4. En el caso del vertido de la demanda urbana de Valladolid y sus alrededores, se implementa en el modelo como el retorno de la demanda urbana definida en el punto 6.3, que tiene la toma en el canal de Castilla.

A continuación se muestra la lista de las aportaciones naturales y su correspondiente estación de aforo o calidad, cuyos valores usamos para la implementación en el modelo (véase también la figura 7 y 8 en el capítulo 3 para la ubicación de las ICA's y ROEA):

Tabla 9: Lista de las aportaciones naturales del modelo con su ROEA, el ICA y el caudal promedio

| Nombre | Río | Estación ICA | Estación ROEA | Caudal medio anual |
|--------------------------|----------|--------------|---------------|---------------------------|
| PISUERGA EN CABEZON | PISUERGA | 43 | 2043 | 63,764 m ³ /s |
| DUERO EN VILLAMARCIEL | DUERO | 54 | 2054 | 116,919 m ³ /s |
| PISUERGA EN VALLADOLID | PISUERGA | 97 | 2097 | 61,755 m ³ /s |
| DUERO EN LAGUNA DE DUERO | DUERO | A36 | 2015 | 34,842 m ³ /s |
| ESGUEVA EN VALLADOLID | ESGUEVA | 167 | 2044 | 1,933 m ³ /s |
| ADAJA EN VALDESTILLAS | ADAJA | 56 | 2056 | 10,914 m ³ /s |

Fuente:CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

6.2 Conducciones

La conducciones son tramos fluviales separados por nudos unos de otros, que coincide con cada masa de agua estipulada por la Confederación Hidrográfica del Duero. Los nudos pueden representar estaciones de medición, la confluencia entre dos ríos o entre una corriente principal y una entrada (aportación, efluente o canal).

En el contexto de calibración, por ejemplo, la discretización del río en segmentos permite realizar pequeños cambios a lo largo de la corriente de los parámetros que influyen en los diferentes procesos físicos y químicos en el agua. Los resultados de la simulación consisten en la evolución temporal del agua o una concentración en el segmento elegido.

La Tabla 10 es una lista de los segmentos que constituyen el modelo. Los parámetros que caracterizan cada segmento son los siguientes: longitud, parámetros hidráulicos α_1 , β_1 , α_2 , β_2 (véase el capítulo 5.2.1.) y temperatura. La longitud de cada tramo del sistema son medidos con el software ArcGIS. Los parámetros hidráulicos se calculan en

función de los datos obtenidos por los estudios biológicos llevados a cabo en la cuenca. Estos últimos elementos también serán modificados en ciertos segmentos en la etapa de calibración.

El nombre de cada segmento contiene el nombre del río donde se encuentra. El código alfanumérico incluido en el nombre es el código de la masa de agua en los que ha sido basada la división de las conducciones.

Tabla 10: Lista de las conducciones que constituyen el modelo de Pisuerga con sus características

| CodElemento | Nombre conducción | Longitud(m) | Velocidad | | Profundidad | | ICAs |
|-------------|---------------------------------------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------|-----------------------|
| | | | $\alpha 1$ | $\beta 1$ | $\alpha 2$ | $\beta 2$ | |
| 4 | r Pisuerga 264_b | 5126 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | CABEZON-VALLADOLID |
| 5 | r Pisuerga 264_c | 9834 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | CABEZON-VALLADOLID |
| 8 | r Pisuerga 264_d | 3906 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | CABEZON-VALLADOLID |
| 10 | r Pisuerga 668_a | 2838 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | CABEZON-VALLADOLID |
| 15 | r Pisuerga 668_b | 2610 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | CABEZON-VALLADOLID |
| 16 | r Pisuerga 668_c | 5057 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | VALLADOLID-SIMANCAS |
| 17 | r Pisuerga 668_d | 100 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | VALLADOLID-SIMANCAS |
| 21 | r Pisuerga 375_a | 5022 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | VALLADOLID-SIMANCAS |
| 22 | r Pisuerga 375_b | 5749 | 0.12983 | 0.43 | 0.21663 | 0.4 | VALLADOLID-SIMANCAS |
| 25 | r Pisuerga 375_c | 3141 | 0.065 | 0.43 | 0.585 | 0.45 | SIMANCAS-VILLAMARCIAL |
| 39 | r Duero 376_b | 10522 | 0.065 | 0.43 | 0.585 | 0.45 | SIMANCAS-VILLAMARCIAL |
| 45 | C Castilla Sur | * | * | * | * | * | * |
| 57 | Canal del Duero (desagüe de Simancas) | * | * | * | * | * | * |
| 58 | Canal del Duero (desagüe Santovenia) | * | * | * | * | * | * |
| 71 | r.Duero 377_a | 2497 | 0.065 | 0.43 | 0.585 | 0.45 | SIMANCAS-VILLAMARCIAL |
| 72 | r.Duero 377_b | 9898 | 0.065 | 0.43 | 0.585 | 0.45 | SIMANCAS-VILLAMARCIAL |
| 73 | r.Duero 377_c | 5399 | 0.065 | 0.43 | 0.585 | 0.45 | SIMANCAS-VILLAMARCIAL |

*Los canales no se simularán en GESCAL

Fuente: Elaboración Propia

La temperatura ajustada en una conducción corresponde a la medida en el ICA más cercana, generalmente la de aguas arriba. Como fluctúa durante el año, las curvas de modulación de la temperatura medida en la ICA también se aplicaron a los tramos. Se utilizó un año normal, con temperaturas mensuales medias.

La temperatura en Valladolid es ligeramente superior a la corriente, y los valores son similares en el resto de curvas, a excepción de laguna de Duero, que se implementa en la conducción aguas arriba de la confluencia del río Duero con el Río Pisuerga.

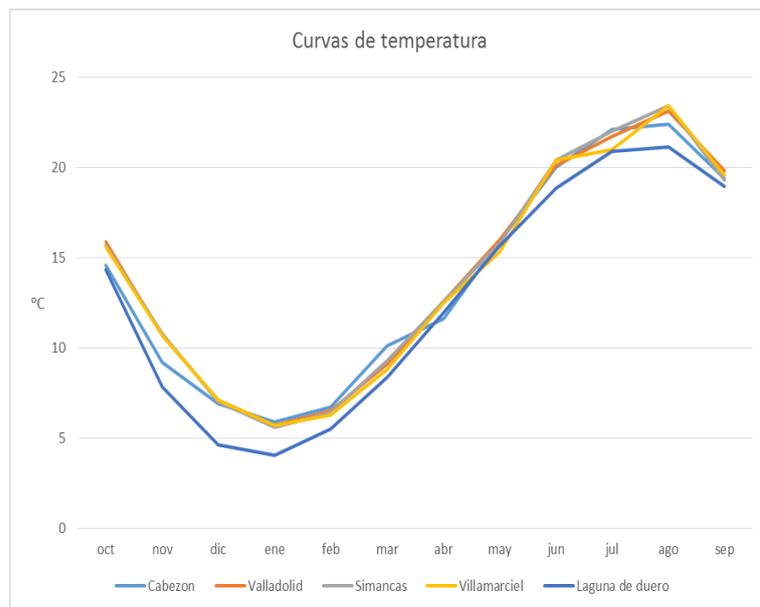


Figura 29: Gráfico en curvas de temperatura del modelo

Fuente: Elaboración Propia

6.3 Demandas

En el modelo se implementaron dos demandas consuntivas, las producidas por el área metropolitana de Valladolid y aguas abajo, en el río Duero, la Mancomunidad de Vega de Duero.

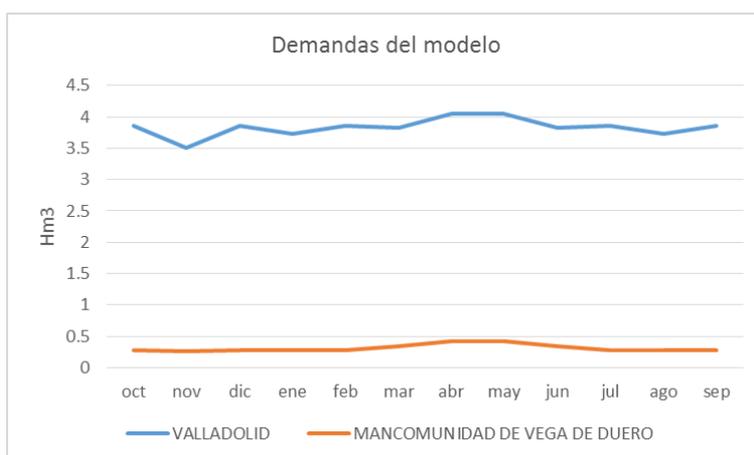


Figura 30: Gráfico de demandas en el modelo

Fuente: Elaboración Propia

Ambas demandas tienen tendencia de aumentar en los meses de abril y mayo. La demanda de Valladolid y sus alrededores es la que más afecta al caudal. Esta extracción se sitúa en el canal de Castilla, que tiene la toma de agua en el mismo cauce del Pisuega aguas arriba, por lo tanto no influye directamente al tramo de estudio, sino a la aportación del canal en Valladolid. El vertido de aguas residuales de Valladolid y su área metropolitana será implementado como un retorno de dicha demanda aguas debajo del municipio de Valladolid.

La demanda de la Mancomunidad de Vega del Duero es de menor volumen, situada la toma en el cauce del río Duero, no afecta de manera drástica al caudal ya que el volumen mensual medio mínimo de este tramo es de unos 88 Hm³/mes.

6.4 Canal de Castilla y Canal del Duero

Ambos canales serán implementados en el modelo como conducciones de tipo 1. En los canales no se va a modelizar la calidad y no se produce ningún vertido.

Canal de Castilla

Con una anchura que varía entre 11 y 22 metros, el canal discurre a lo largo de 207 kilómetros, atravesando 38 términos municipales, uniendo las localidades de Alar del Rey (Palencia), donde tiene su nacimiento, con las de Valladolid y de Medina de Rioseco, situadas respectivamente al final de los ramales Sur y de Campos (el Canal tiene forma de Y invertida). La provincia de Palencia es la que más longitud de canal tiene (ramal Norte). Algunos kilómetros al norte de la capital palentina el canal se divide en dos grandes ramales que se dirigen uno a Medina de Rioseco (ramal de Campos) y otro a Valladolid (ramal Sur).



Figura 31: Canal de Castilla

Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero

Su término en Valladolid es la aportación que ha sido implementada en el modelo, influido por la demanda urbana que toma los recursos de dicho canal antes de su desagüe al río Pisuerga.

Canal del Duero

La aportación del canal del Duero se bifurca antes de la confluencia con el cauce del río Pisuerga, situándose en diferentes zonas del río la aportación del canal del Duero.

Toma sus aguas del Duero en la presa de Quintanilla de Onésimo y discurre hasta Valladolid por los términos municipales de Tudela de Duero y Laguna de Duero. Desemboca actualmente en el Pisuerga entre Santovenia y Cabezón. El ramal del canal que desagua aguas abajo de Simancas es el perteneciente a la acequia de Simancas, que procede del canal del Duero. Estos dos ramales se incluyen en el modelo como conducciones que desaguan en los puntos especificados, con el aporte obtenido de las series proporcionadas por la CHD.

6.5 Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son demandas no consuntivas en el modelo. Son aquellos elementos que utilizan el agua sin consumirla, devolviéndola al cauce del que ha sido extraída. En este modelo no encontramos con las centrales hidroeléctricas de La Isla y La Flecha.

La central de la Isla se sitúa aguas arriba de Valladolid, en el tramo posterior al vertido de Cabezón de Pisuerga. Cuenta con un caudal máximo de 306 Hm³/mes.

La central de la Flecha se sitúa entre los municipios de Villamarciel y Simancas, y cuenta con un caudal máximo de 220.3 Hm³/mes.

7. SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración consiste en ajustar los parámetros del modelo con la finalidad de que los resultados simulados sean lo más similares posible a los observados permitiendo que el modelo describa con fidelidad la realidad.

La simulación tiene un intervalo temporal de 16 años, entre 1996 a 2012.

El primer aspecto a comprobar es el cuantitativo, es decir los caudales. Para los procesos físico-químicos considerados en el modelo, explicado en “Formulación de Modelo” (Capítulo 5), los parámetros a ser calibrados son: constante de reaeración (K_a) la constante de degradación de la materia orgánica (k_d), la velocidad de sedimentación de la materia orgánica (V_{SL}), la constante de amonificación (K_{noa}), la velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (V_{SNO}), la constante de nitrificación (K_{Nai}), decaimiento del fósforo orgánico y velocidad de sedimentación del fósforo orgánico (V_{sor}).

En algunos tramos la constante de reaeración (K_a) ha sido calculada por el Método de Covar, que se basa en la velocidad y la profundidad del tramo. Para el resto de tramos se ha realizado una calibración al igual que con el resto de parámetros, de manera manual, comparando los resultados obtenidos por el modelo con los valores observados por las estaciones de calidad.

En la Tabla 11 se pueden ver los elementos del modelo que fueron utilizados en la comparación de los datos observados por las estaciones de aforo y de calidad con los valores simulados por el modelo, para la comprobación de caudales y calibración de parámetros de calidad.

Tabla 11: Elementos de comparación entre valores observados y simulados

| CAUDALES | | CALIDAD | |
|--------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| Valores observados | Valores simulado | Valores observados | Valores simulados |
| Valladolid | r Pisuega 668_c | Valladolid | r Pisuega 668_c |
| Villamarciel | r.Duero 377_c | Simancas | r Pisuega 375_a |
| | | Villamarciel | r.Duero 377_c |

Fuente: Elaboración Propia

7.1. Simulación de caudales

Los caudales simulados por el modelo resultan ser similares a los medidos en las diversas estaciones ROEA. Esto indica que ni las aportaciones ni las pérdidas importantes de agua fueron omitidas en el concepto del modelo.

En las siguientes figuras se grafican las dos comprobaciones con los datos de las estaciones de Valladolid y Villamarciel y los tramos más próximos aguas arriba de dichas estaciones. Estas comprobaciones serán las que nos darán la idea de la idoneidad del modelo, ya que el resto de estaciones ROEA han sido utilizadas para implementar las aportaciones del resto de los cauces, y se carece de más estaciones en el cauce principal (la estación ROEA de Simancas no funciona desde 1918)

En la figura 32 se representan los caudales simulados (rojo) en el tramo del río Pisuega (r Pisuega 668-b) previo a la estación ROEA de Valladolid frente a los observados (sin línea, azul). La figura 33 muestra la evolución en el tiempo de observados (Villamarciel) y los caudales calculados en el tramo r.Duero 377_c, ya en el cauce del Duero, siendo la última estación de los tramos de estudio.

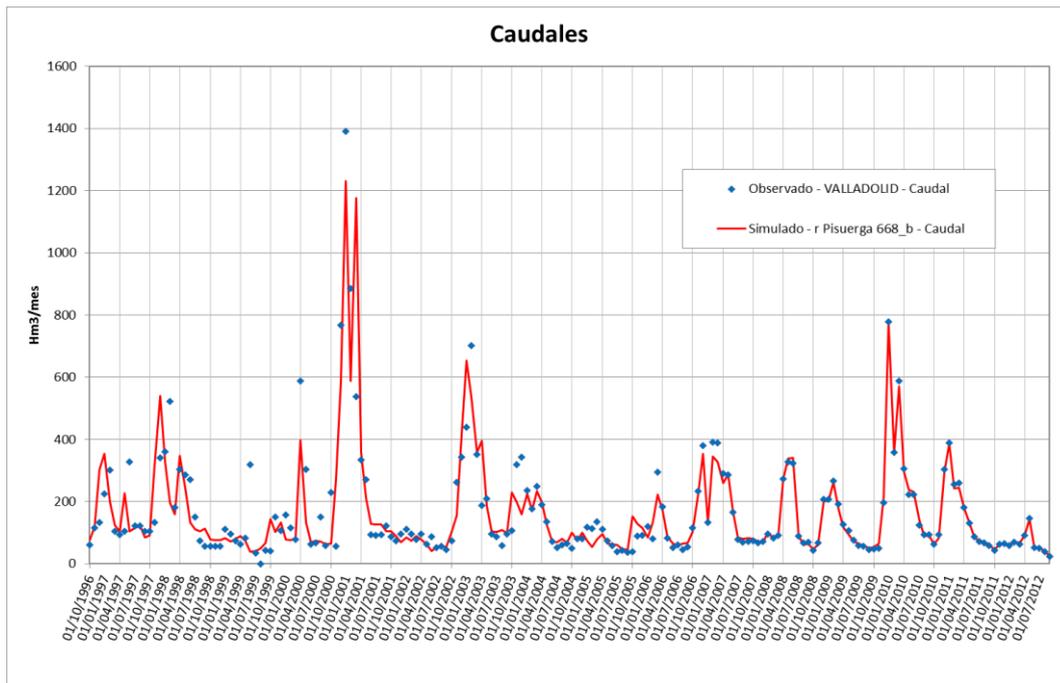


Figura 32: Representación gráfica de caudales simulados-observados en Valladolid

Fuente: Elaboración Propia

Los caudales en simulados se alejan de los observados en los picos situados en los años 2001, 2002 y 2003. Como se indicó en el Capítulo 4, Estado actual de la calidad del agua, los inviernos de esos años se caracterizan por fuertes precipitaciones, con un SPI (índice de precipitación estandarizado) de 1,9, (muy húmedo) y 1 (humedad moderada) respectivamente. Las escorrentías de dichas precipitaciones no son implementadas en este modelo, y pueden ser las causantes de ese descenso en los valores picos de caudales. A pesar de esas discrepancias puntuales entre los simulados y los observados, el resto de la simulación tiene una tendencia muy similar a la de los datos observados.

En la estación del municipio de Villamarciel es el lugar donde los valores simulados coinciden menos con los caudales medidos. El hecho de que los valores simulados superan los observados no es preocupante, ya que generalmente se produce durante lapsos de tiempo de ausencia de contaminación importante. Esta diferencia puede ser producida por alguna demanda de la que no tenemos constancia y no hemos implementado en el modelo o por un simple error de lectura temporal debido al exceso puntual de caudales.

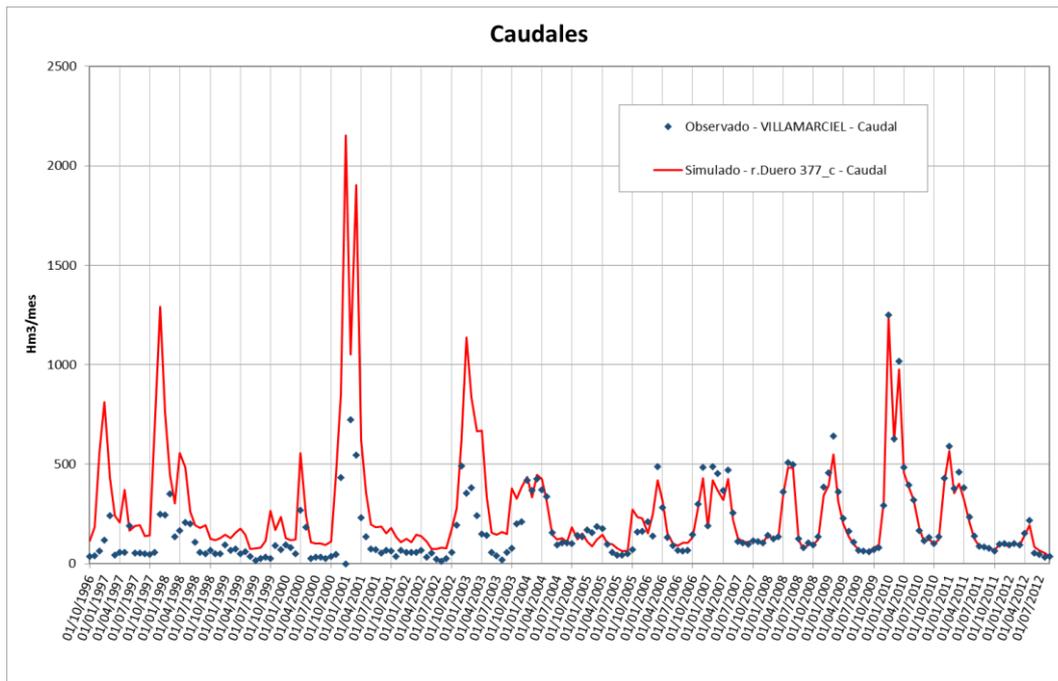


Figura 33: Representación gráfica de caudales simulados-observados en Villamarciel

Fuente: Elaboración Propia

Al no tener más estaciones de aforo con las que poder comparar las simulaciones, llegamos a la conclusión a medida que los resultados son satisfactorios aguas abajo, en la última estación del tramo a estudio, se puede suponer que ninguna discrepancia importante tiene lugar en esta parte del sistema a estudio.

7.2. Calibración de la calidad del agua

Para ajustar las concentraciones que caracterizan la calidad del agua, el diagnóstico del capítulo 4 se debe tener en cuenta, ya que las conclusiones resultantes de que nos dan una idea de la importancia de los procesos que tienen lugar, al igual que la degradación de la materia orgánica, la nitrificación, desnitrificación, aireación, etc. De acuerdo con el análisis de la calidad del agua, los principales parámetros siguientes (Tabla 12) son variables, ya sea por tramos del río o conducciones individuales.

Tabla 12: Parámetros variables para la calibración

| Par. | Ud | Rango | Parámetro |
|------------------|-----|------------|---|
| ka | 1/d | 0-100 | Reaireación |
| kd | 1/d | 0.02-3.4 | Descomposición de la materia orgánica carbonosa |
| VsL | m/d | 0.01-0.36 | Velocidad de sedimentación de la materia orgánica carbonosa |
| kN _{oa} | 1/d | 0.02-0.4 | Hidrólisis del nitrógeno orgánico |
| V _{SNo} | m/d | 0.0001-0.1 | Velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico |
| kN _{ai} | 1/d | 0.01-1 | Nitrificación del amonio |
| Kno ₃ | 1/d | 0.001-0.1 | Desnitrificación |
| Kmp | 1/D | 0.01-0.7 | Decaimiento del fósforo orgánico |
| Vsor | m/d | 0.001-0.1 | Velocidad de sedimentación del fósforo orgánico |

Fuente: Manual de usuario GESCAL Versión 1.1

Los parámetros k_{Nai}, k_a y k_d son los más influyentes en las concentraciones al calibrar. En la Tabla 13 se enumeran los segmentos que constituyen el modelo de Pisuerga con sus valores de los parámetros principales atribuidos.

Tabla 13: Lista de los segmentos de la construcción del modelo de Pisuerga con los valores de sus parámetros

| Conducción | Ka | Kd | Vsd | Knoa | V _{Sno} | Knai | kno3 | Kmp | Vsor |
|---------------------------------------|-----|------|------|------|------------------|------|-------|------|-------|
| r Pisuerga 264_b | 1.5 | 1 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 1 | 0.001 | 0.05 | 0.01 |
| r Pisuerga 264_c | 1.5 | 0.5 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 0.5 | 0.001 | 0.05 | 0.01 |
| r Pisuerga 264_d | -1 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 0.05 | 0.001 | 0.05 | 0.01 |
| r Pisuerga 668_a | 1.5 | 1 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 1 | 0.001 | 0.05 | 0.01 |
| r Pisuerga 668_b | 1.5 | 1 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 1 | 0.001 | 0.05 | 0.01 |
| r Pisuerga 668_c | 1 | 0.5 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 0.5 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r Pisuerga 668_d | -1 | 0.5 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 0.5 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r Pisuerga 375_a | 1.5 | 1 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 1 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r Pisuerga 375_b | 1.5 | 1 | 0.01 | 0.1 | 0.001 | 1 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r Pisuerga 375_c | 0.1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r Duero 376_b | 1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| C Castilla Sur | 0.1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| Canal del duero (desagüe de Simancas) | 0.1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| Canal del Duero (desagüe Santovenia) | 0.1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r.Duero 377_a | 1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r.Duero 377_b | 1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |
| r.Duero 377_c | 1 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 0.01 | 0.001 |

*El valor "-1" indica que el programa autocalcula el parámetro por el Método de Covar.

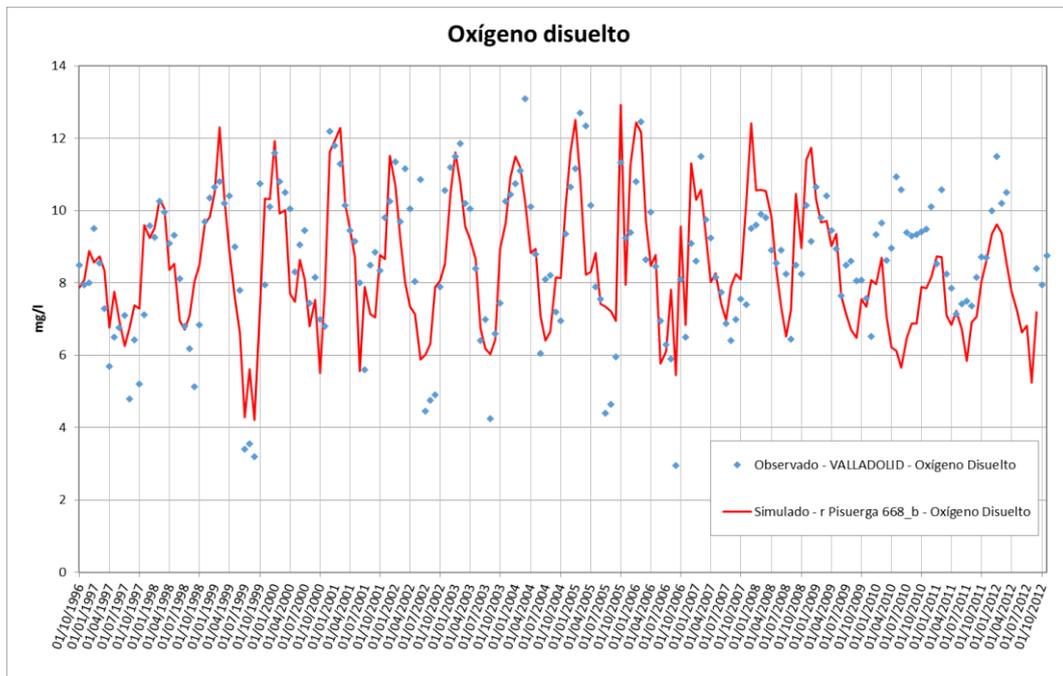
Fuente: Elaboración Propia

7.3. Comparación de los valores observados y simulados

7.3.1 Oxígeno Disuelto

En la Figura 33 se representan las gráficas de valores de oxígeno disuelto calculados por el modelo y los observados por las estaciones de calidad. El modelo consigue una muy buena aproximación con los datos reales observados.

Los valores de concentración de OD empeoran de manera leve en la estación de Simancas. El empeoramiento no es debido a una disminución de todos los niveles de oxígeno, si no que los valores mínimo son más bajos llegando a descender a valores de 2 mgO/l. En la estación de Villamarciel se encuentran los mejores valores observados y simulados, no bajando casi nunca de los 6mgO/l.



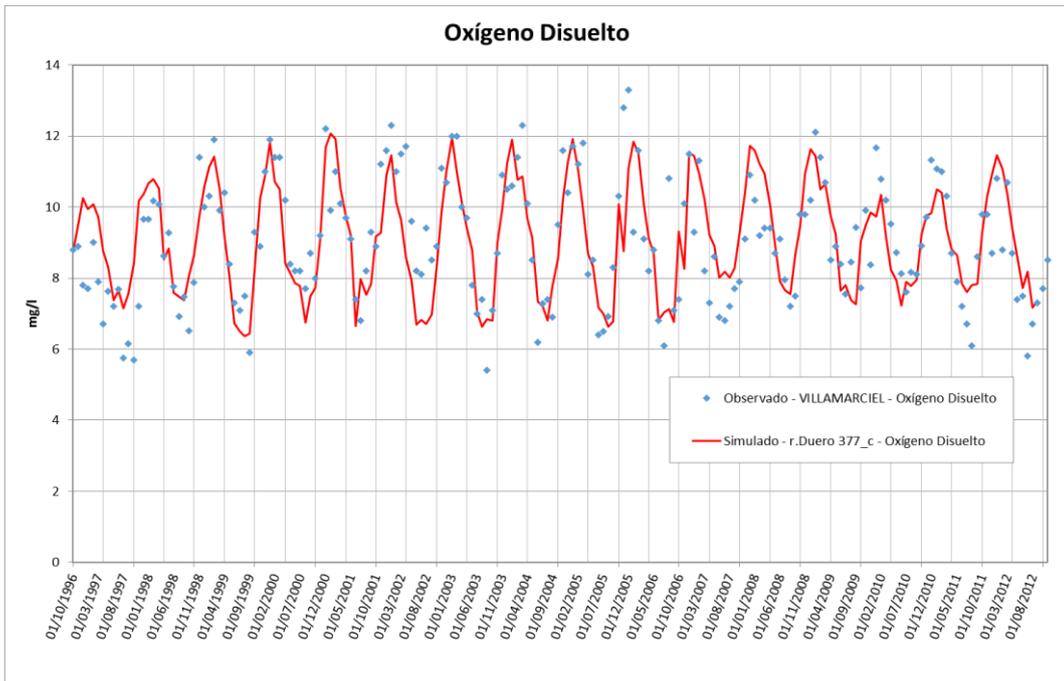
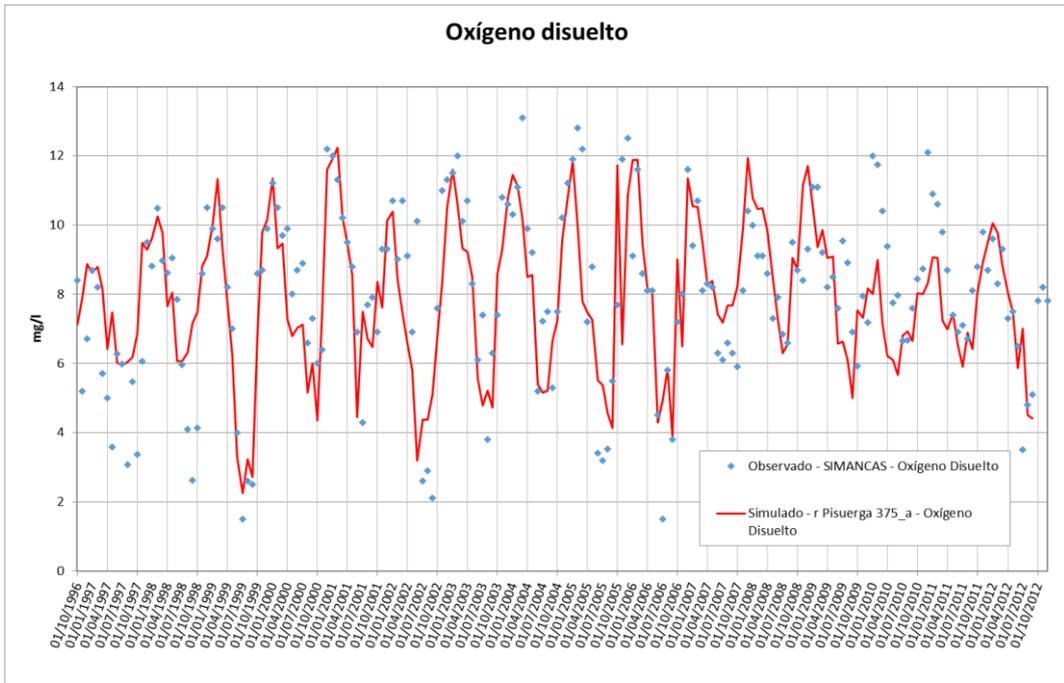
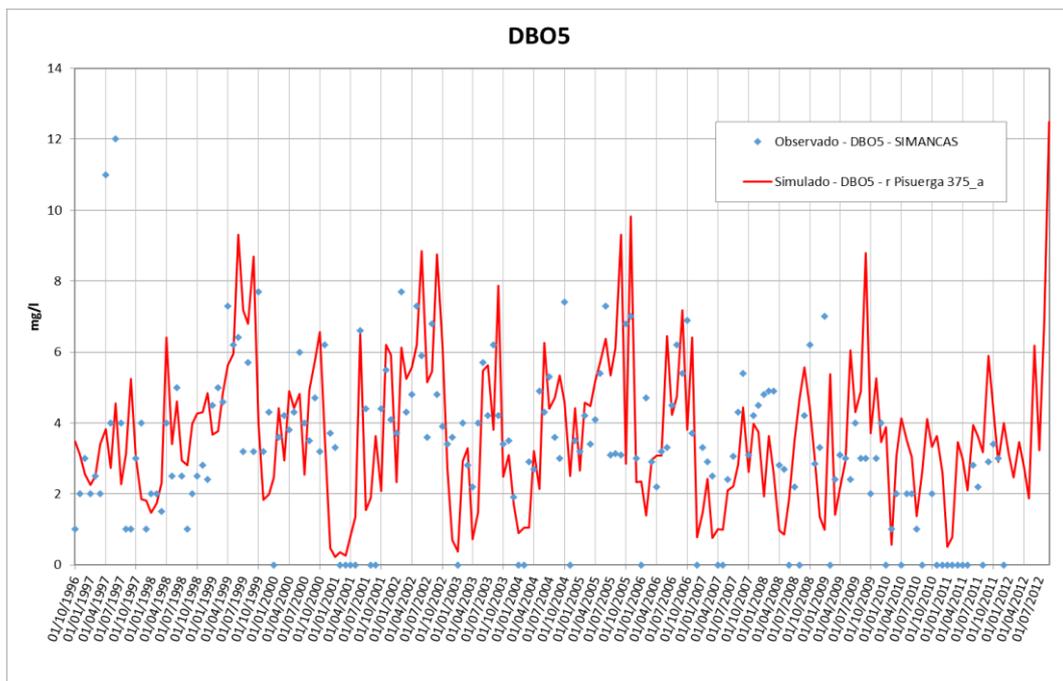
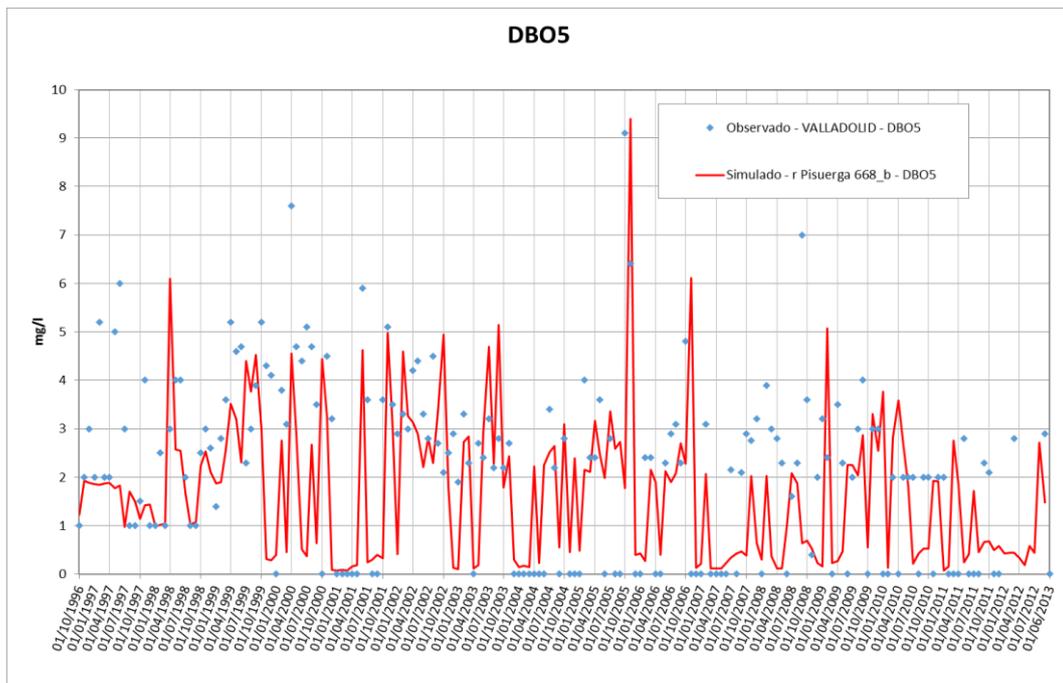


Figura 34: Gráficos de comparación entre valores de OD simulados y observados

Fuente: Elaboración Propia

7.3.2 Demanda biológica de oxígeno

Para la calibración de la k_d y de la V_{SL} , la principal variable de calidad a ser comparada es la DBO5, aunque el OD también es afectado por cambios en la k_d . Las gráficas de la Figura 34 comparan los valores de DBO5 simulados por el modelo y los observados en las estaciones de calidad.



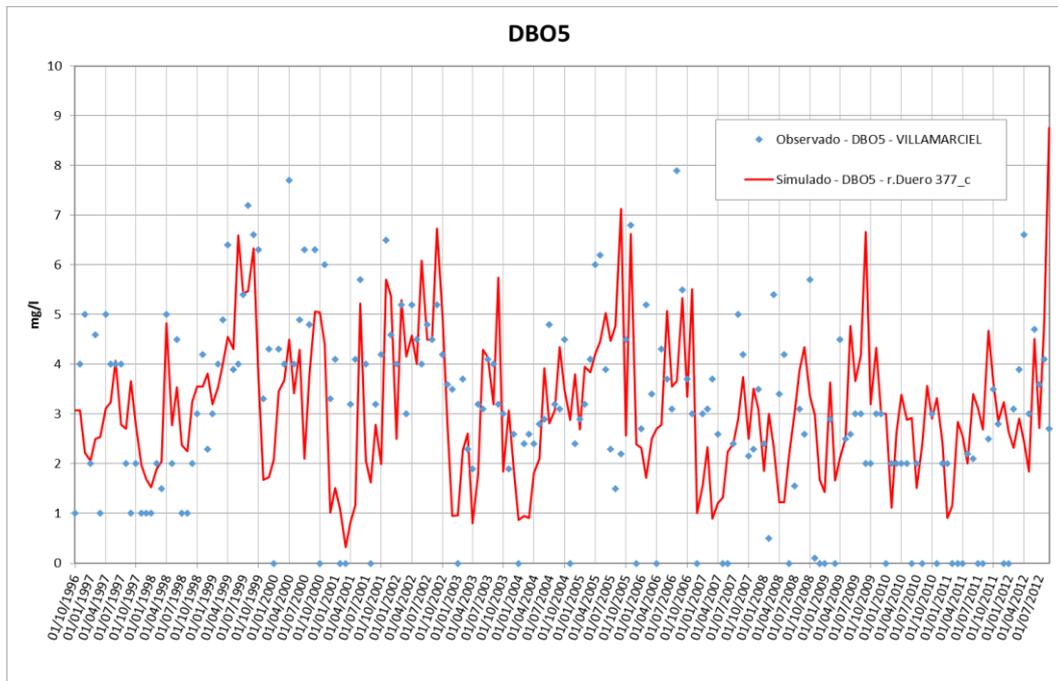


Figura 35: Gráficos de comparación entre valores de DBO5 simulados y observados

Fuente: Elaboración Propia

Se debe considerar que se ha intentado mantener la k_d coherente con la carga contaminante aportada a lo largo del río, cuya calidad se ve más comprometida a en la zona de Simancas, que es la zona aguas debajo de los vertidos urbanos de Valladolid y sus alrededores. En la estación situada en el río Duero, Villamarciel, se nota una bajada de la concentración de DBO5, debida a la confluencia de las cuencas del río Pisuegra y del río Duero.

Algunos de los observados con valores nulos pueden ser debidos a que en algunos casos de que las mediciones menores a 2 mg/l, no se pueden realizar una correcta valoración y se opta por poner un valor igual a 0.

7.3.3 Amonio

La Figura 36 presenta las gráficas para valores observados y simulados de amonio). Las gráficas de simulación-observados de nitrógeno orgánico no son representadas debido a la falta de datos observados, obteniendo solo las concentraciones necesarias para las

aportaciones y poder completar el ciclo del nitrógeno a partir de otras estaciones ICAs. Con estas gráficas y con las de nitratos (apartado 7.3.4, Figura 37) se han calibrado las constantes de nitrificación (k_{nai}).

En el caso de la constante de degradación (k_{noa}) se opta por los valores teóricos incluidos en la siguiente tabla de valores teóricos para las constantes del ciclo del nitrógeno:

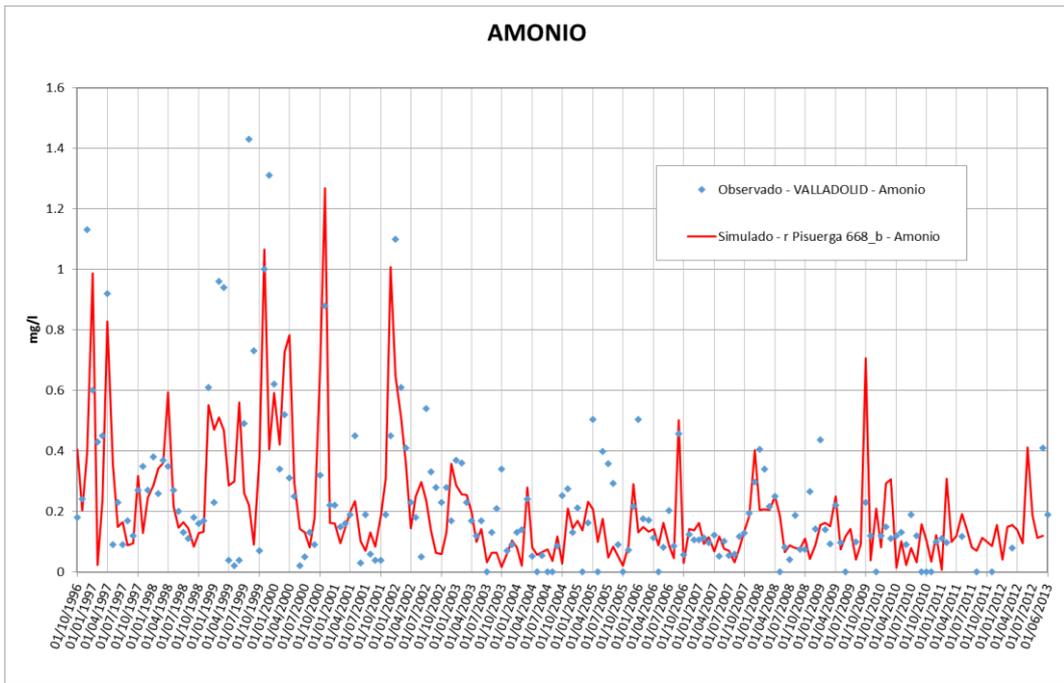
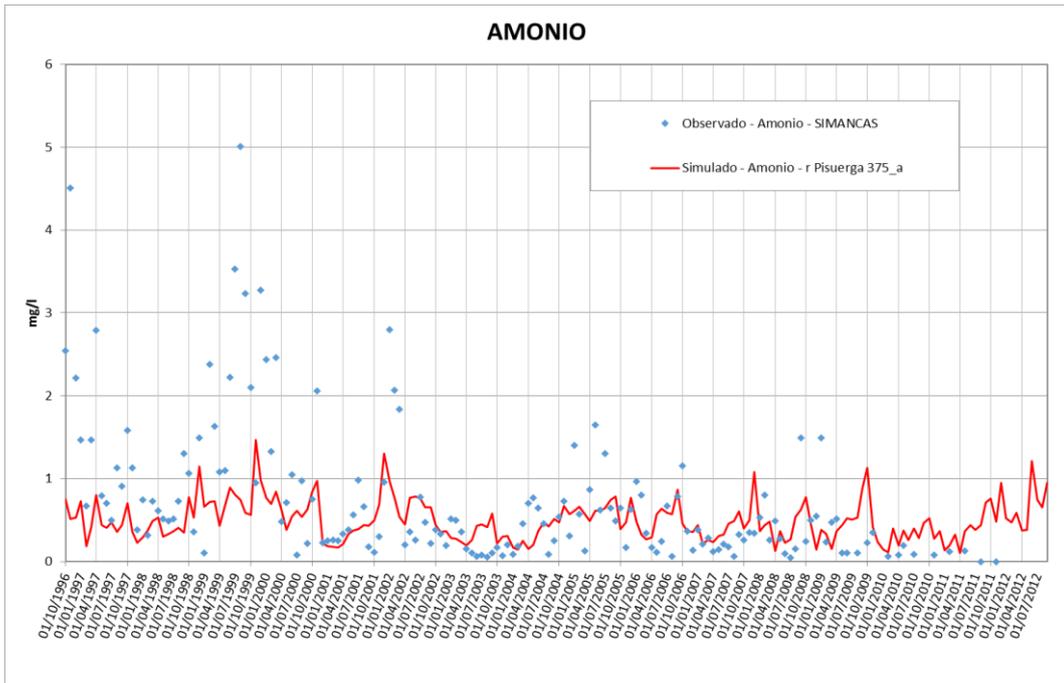
Tabla 14: Valores teóricos para la constante del ciclo de nitrógeno

| Constante de velocidad | Intervalo de valores (d^{-1}) | Valor medio (d^{-1}) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| k_{noa} | 0.1 - 0.4 | 0.25 |
| $k_{NH_4 \rightarrow NO_2}$ | 0.1 - 0.5 | 0.35 |
| $k_{NO_2 \rightarrow NO_3}$ | 0.5 - 2.0 | 1.25 |

Fuente: MARTÍN MONERRIS y MARZAL DOMÉNECH (1999).

En la Tabla 14 se pueden observar valores teóricos de la constante de degradación del nitrógeno orgánico (k_{noa}) y de las constantes de cada etapa de la nitrificación, la del paso de amonio a nitrito ($k_{NH_4-NO_2}$) y la del paso de nitrito a nitrato ($k_{NO_2-NO_3}$), los cuales han servido de base para la calibración de los parámetros referentes al ciclo de nitrógeno.

Para la primera y tercera estación (Valladolid y Villamarciel) el modelo consigue una aproximación bastante buena. Para el caso de la estación intermedia (Simancas) el modelo no consigue una tan buena, a pesar de los altos valores de k_{noa} en algunos tramos. Se nota que los datos observados no siguen una tendencia, variando bastante de un mes a otro. Esto refleja la falta de información acerca de la concentración de los vertidos en este tramo, donde la simulación no se asemeja a los observados. Al ser la zona donde los vertidos urbanos de Valladolid son vertidos, se supone una falta de información respecto dichos fluentes.



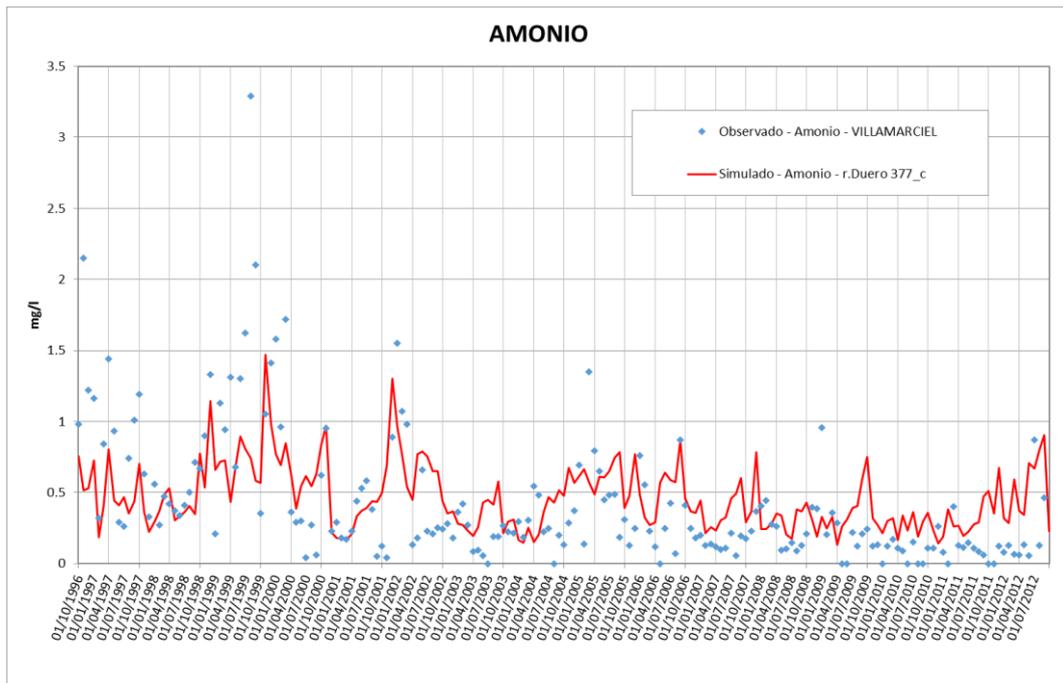


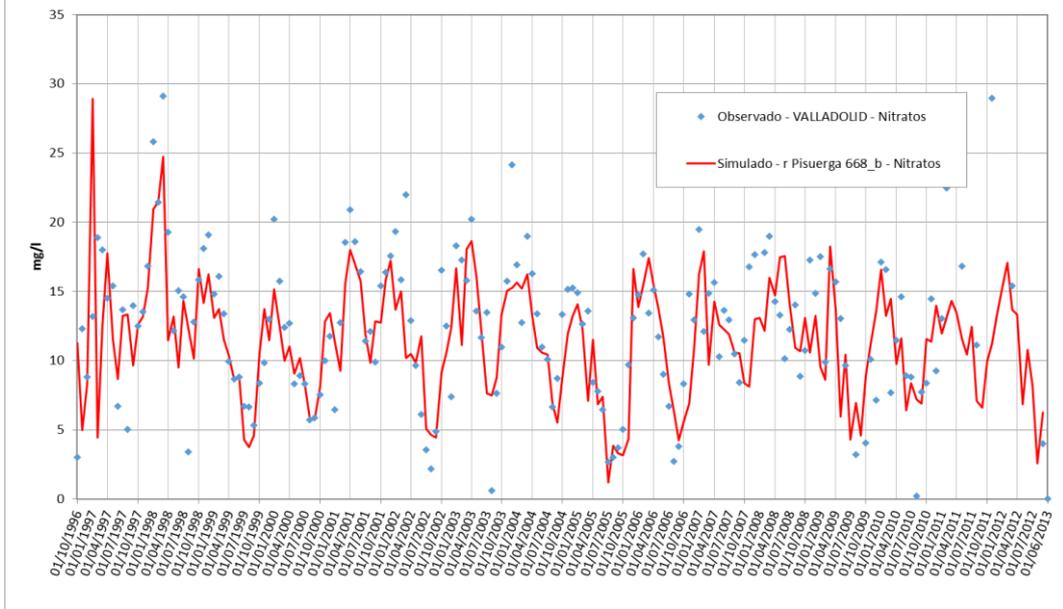
Figura 36: Gráficos de comparación entre valores de amonio simulados y observados

Fuente: Elaboración Propia

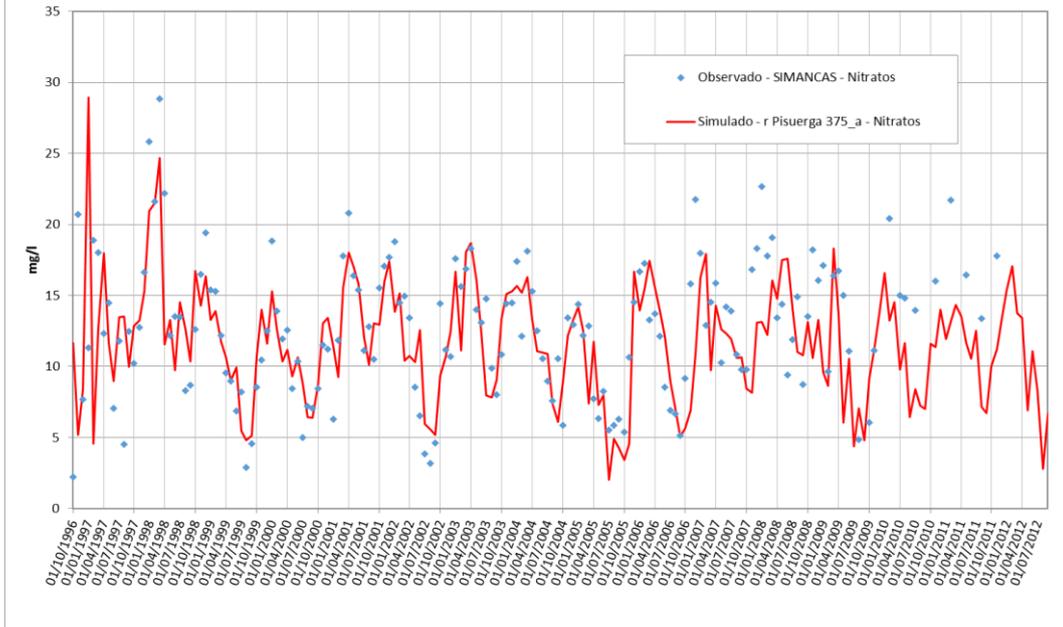
7.3.4 Nitratos

Las gráficas de comparación de los nitratos están recogidas en la Figura 37. En ellas puede observarse como el modelo ha conseguido una reproducción bastante buena de los valores medidos en las estaciones de calidad. Estos buenos resultados fueron obtenidos para todas las estaciones, mejorando progresivamente aguas abajo, siendo el mejor ajuste el de la gráfica de Villamarciel, última estación del cauce a estudio.

NITRATOS



NITRATOS



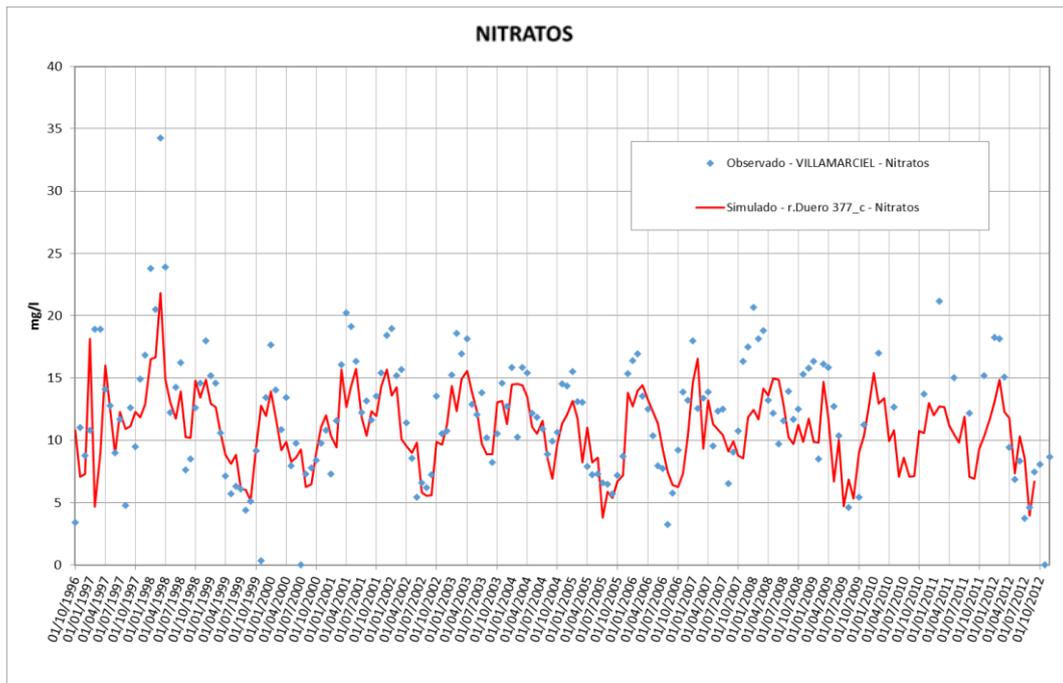


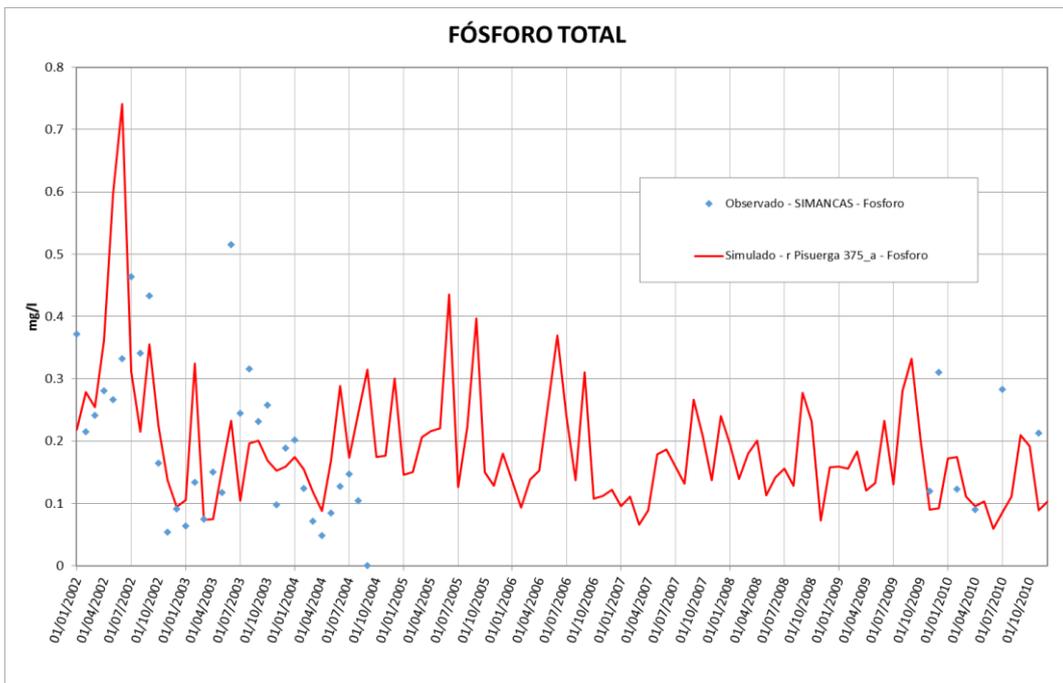
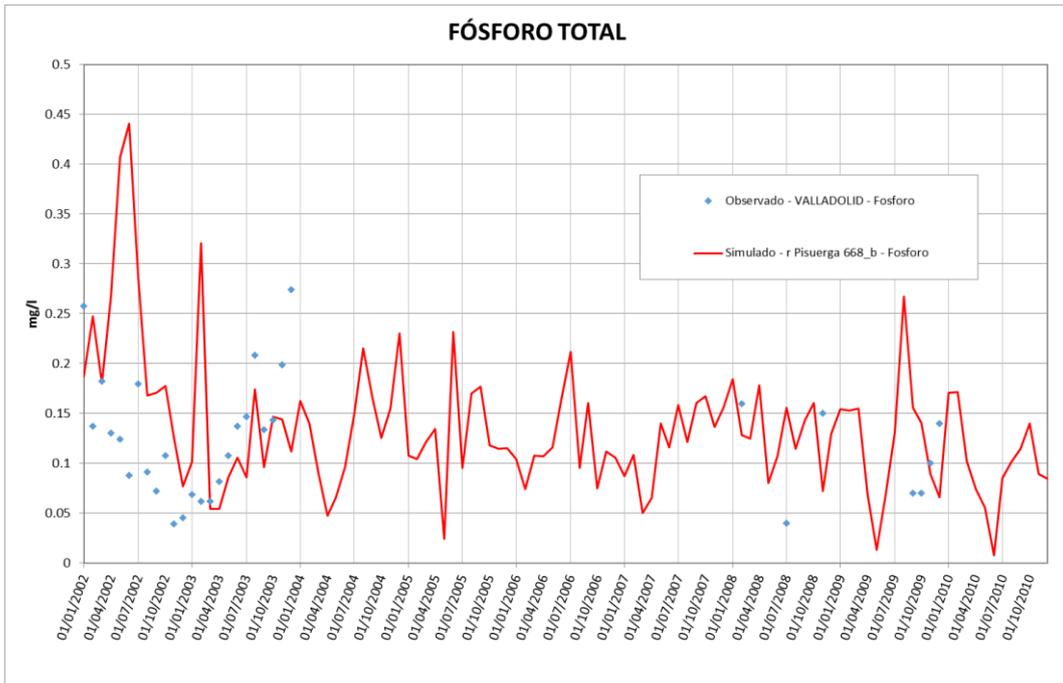
Figura 37: Gráficos de comparación entre valores de nitratos simulados y observados

Fuente: Elaboración Propia

La progresión de las concentraciones de nitratos a lo largo del río es de valores semejantes entre las estaciones, con un ligero descenso en la estación de Villamarciel, posiblemente producida por ser la simulación en el cauce del Duero posterior a la confluencia con el Pisuerga y el río Adaja.

7.3.5 Fósforo

Los valores de fósforo total son presentados en la Figura 38. Comparando las gráficas es posible observar como los datos obtenidos mediante el modelo quedan próximos a los pocos datos medidos. Del estudio de las gráficas se puede observar una tendencia a mayor concentración de fósforo en los tramo medio del cauce, en Simancas, como con el resto de concentraciones de contaminantes, indicando que el punto de contaminación está situado aguas abajo de Valladolid.



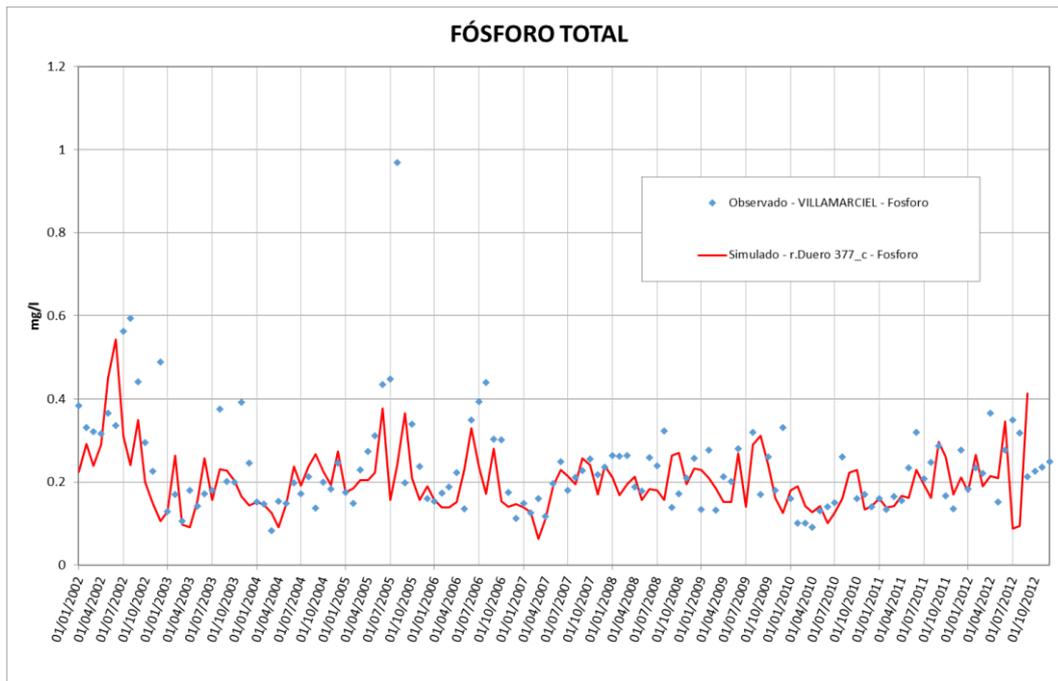


Figura 38: Gráficos de comparación entre valores de fósforo simulados y observados

Fuente: Elaboración Propia

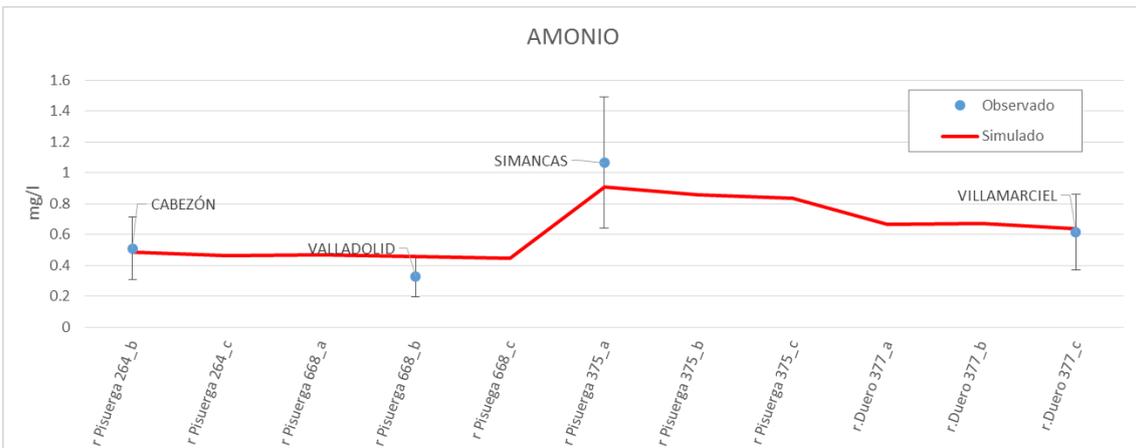
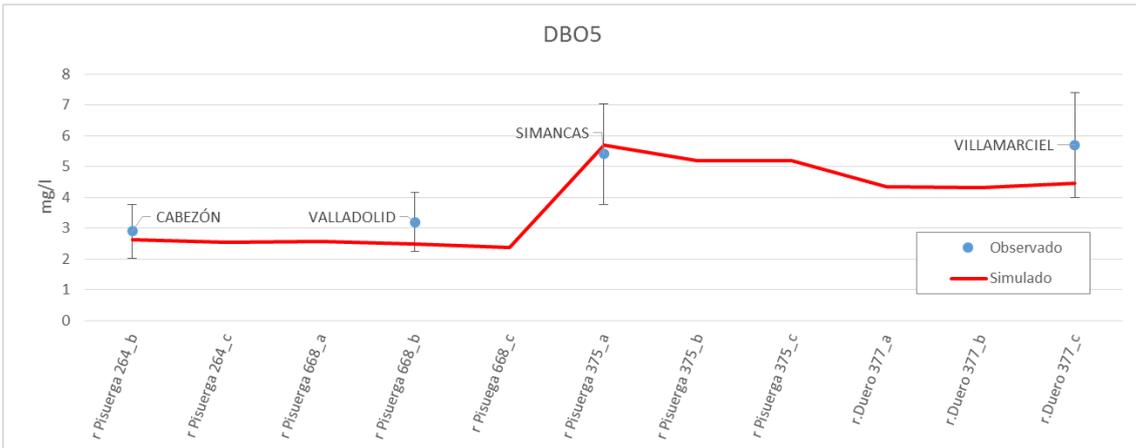
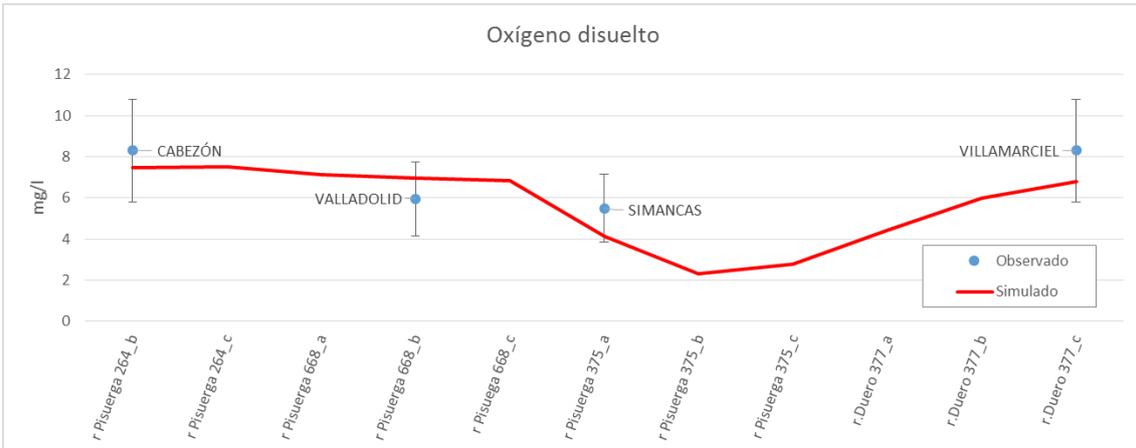
Los datos observados por las estaciones son escasos, solo en la última estación (Villamarciel) tenemos datos a lo largo de toda la serie temporal. En esa estación la comparación entre los observados y simulados es bastante satisfactoria.

7.4. Resultados generales y conclusiones acerca de la calibración

La figura 39 representa gráficamente la comparación de las concentraciones de oxígeno disuelto simuladas y observadas a lo largo de la corriente de los ríos Pisuega-Duero.

Los parámetros de calidad de agua son simulados por el modelo de manera satisfactoria en el tramo estudio, a pesar de que los datos de concentración de DBO5 y fósforo no han estado disponibles en su totalidad.

Es difícil juzgar la validez de la calibración de fósforo total, ya que las medidas no son lo suficientemente numerosas en las dos primeras estaciones, como hemos podido observar en la figura 38. Sin embargo, se puede observar que la curva simulada se asemeja bastante con los pocos valores disponibles.



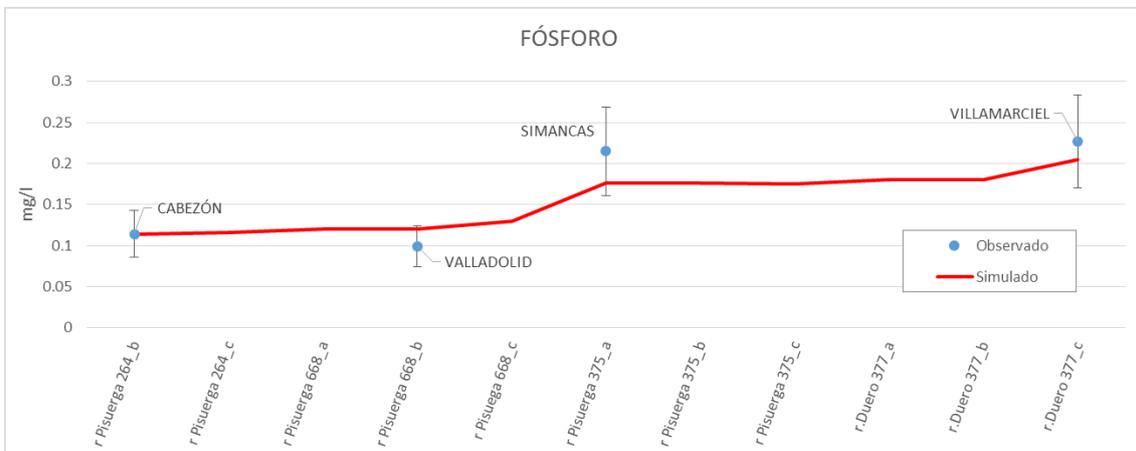
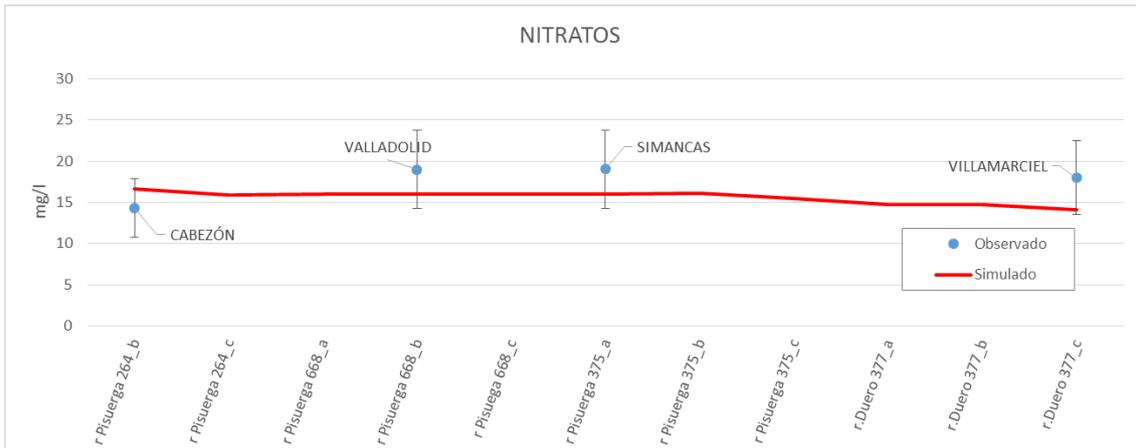


Figura 39: Perfiles longitudinales de las concentraciones

Fuente: Elaboración Propia

El modelo refleja más o menos la realidad, con un rango de error de un calibre entorno al 15-20%, excepto en el caso de la DBO5 y fósforo, que llegan al 30%.

En el caso de la DBO5, como hemos indicado en el apartado 7.3.3, algunos de los observados con valores nulos pueden ser debidos a que en algunos casos de que las mediciones menores a 2 mg/l, no se pueden realizar una correcta valoración y se opta por poner un valor igual a 0, por lo que la simulación reflejaría un error mayor al que realmente existe.

Respecto al fósforo, este error se magnifica como consecuencia de las lecturas en la estación de Valladolid y Simancas, las cuales tienen pocas mediciones de este parámetro, ajustándose de manera más acertada en la estación con más observados, la situada en Villamarciel.

8. SIMULACIONES Y MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA

La simulación se lleva a cabo mediante el cambio de entrada de datos tales como los diversos parámetros del agua de las descargas de aguas residuales, y mediante el uso de la calibración que se define en el capítulo anterior.

Para implementar las medidas de mejora, se simulará el modelo con cambios respecto a los vertidos y aportaciones en el mismo intervalo temporal. Con las nuevas simulaciones se realizará una valoración de las posibles mejoras que nos aportarían estas propuestas de medidas. Todas las simulaciones con los diferentes escenarios en rango temporal se ubican en el ANEXO 3

8.1 Escenarios de simulación

La simulación para la valoración de las medidas propuestas se realizará con cuatro escenarios que se adjuntan en la tabla 15:

Tabla 15: Escenarios de propuestas de mejora

| | MEDIDA DE MEJORA | VALORES CUANTITATIVOS |
|------------|--|--|
| ESCENARIO1 | MODELO SIN MEDIDA DE MEJORA | |
| ESCENARIO2 | DISMINUCIÓN DE AMONIO Y DBO5 EN EL VERTIDO DE VALLADOLID | MAX AMONIO 1mg/l; MAX DBO5 25mg/l |
| ESCENARIO3 | AUMENTO DE CAUDAL EN MESES DE MAYOR CONTAMINACIÓN | 20hm3 entre Abril- Agosto |
| ESCENARIO4 | ESCENARIO1+ESCENARIO2 | MAX AMONIO 1mg/l+20hm3 entre Abril- Agosto |

Fuente: Elaboración Propia

Escenario 1

La simulación del escenario 1 será la misma que se define en el capítulo 7, “SIMULACIÓN Y CALIBRACIÓN CALIBRACIÓN DEL MODELO”, sin ninguna medida de mejora en sus aportaciones. Será el escenario base para su comparación con los que reciben alguna medida.

Escenario 2

En el capítulo 4, concretamente en el apartado “4.3. Conclusión y diagnóstico de la calidad del agua”, se llega a la conclusión que la problemática con el amonio y la DBO5 corresponde en gran medida con los vertidos residuales de la EDAR de Valladolid.

La EDAR de Valladolid se compone de pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario según se puede visualizar en la figura 40:

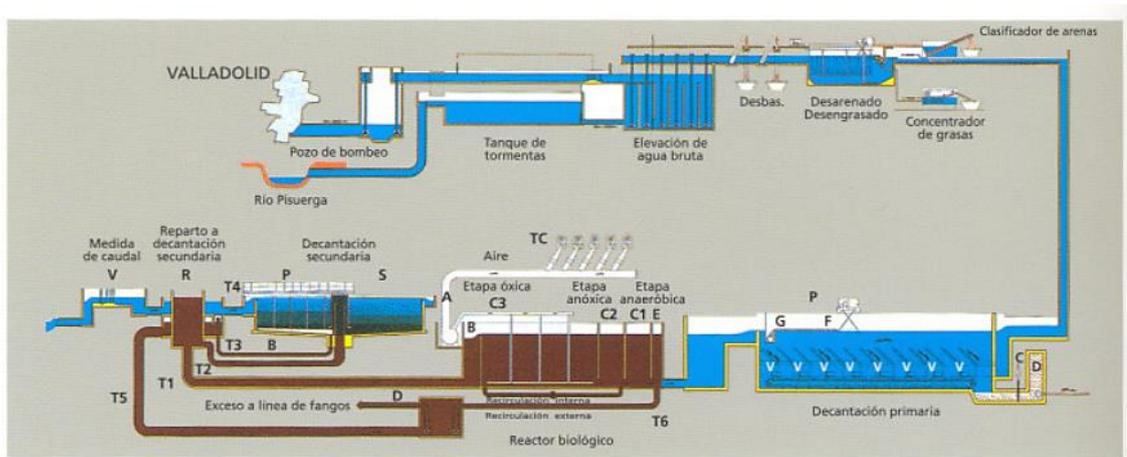


Figura 40: Croquis de los tratamientos en la estación depuradora de Valladolid

Fuente: Aguas de Valladolid

Para solucionar esta problemática se plantea una mejora en el tratamiento secundario de la EDAR con el propósito de disminuir su vertido de amonio de 24 mg/l a 1 mg/l, que sería la máxima reducción posible en una EDAR con tratamiento secundario.

La DBO5 supera en algunos tramos los valores los valores superficiales recomendados por la OMS y el anexo I del Real Decreto 927/1988, el cual indica una concentración de 5 mg/l de calidad exigida a las aguas superficiales que sean destinadas a la producción de agua potable con tratamiento A2 (Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección).

Los valores de salida de EDAR de Valladolid respecto la DBO5 llegan a los de 82 mg/l, siendo estipulada una concentración de 25 mg/l según la directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

En el caso del fósforo no hay posibilidad de mejorar su vertido, ya que ya está en una concentración de 1mg/l, cumpliendo con la normativa.

Las siguientes tablas 16 y 17 se pueden ubicar en esa normativa:

Tabla 16 : Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento secundario

| Parámetros | Concentración | Porcentaje mínimo de reducción (b) |
|--|-------------------------|------------------------------------|
| DBO ₅ (c) (a 20° C sin nitrificación) | 25 mg/L O ₂ | 70-90 % |
| DQO | 125 mg/L O ₂ | 75 % |
| Total sólidos en suspensión | 35 mg/L (d) | 90 % (d) |

Tabla 17: Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de depuración de aguas residuales urbanas mediante tratamiento más riguroso

| Parámetros | Concentración | | Porcentaje mínimo de reducción (b) |
|------------------------------|----------------------|---------------|------------------------------------|
| | 10.000 a 100.000 h-e | > 100.000 h-e | |
| Fósforo total | 2 mg/L P | 1 mg/L P | 80 % |
| Nitrógeno total (c) (mg/L N) | 15 mg/L N (d) | 10 mg/L N | 70-80 % |

Fuente: directiva 91/271/CEE

Escenario 3

Los análisis del estado actual del cauce (capítulo 4) nos relacionan la problemática de altos niveles de concentración con los meses de caudales más reducidos. Los meses considerados para el aumento de caudal serán Abril, Mayo, Junio, Julio y Agosto.

El aporte de caudal se lograría con un aumento en las sueltas del embalse más importante en el Sistema del Pisuerga, Aguilar de Campoo. Este embalse, con una máxima capacidad de 270 Hm³, tiene un volumen mínimo estipulado para cumplir las garantías aguas abajo de 30 Hm³. Según el modelo del Duero anteriormente mencionado en otros capítulos, del que tenemos datos entre los años 1980-2006, solo

en 6 momentos puntuales llega al nivel mínimo de 50Hm³, sobrepasándolo solo en un caso, por lo que se ha estipulado el aporte extra en 20Hm³.

Este aporte extra se añadirá al modelo como una aportación en el nudo que representa la ICA de Cabezón de Pisuerga, y con los datos de calidad extraídos del modelo del Duero.

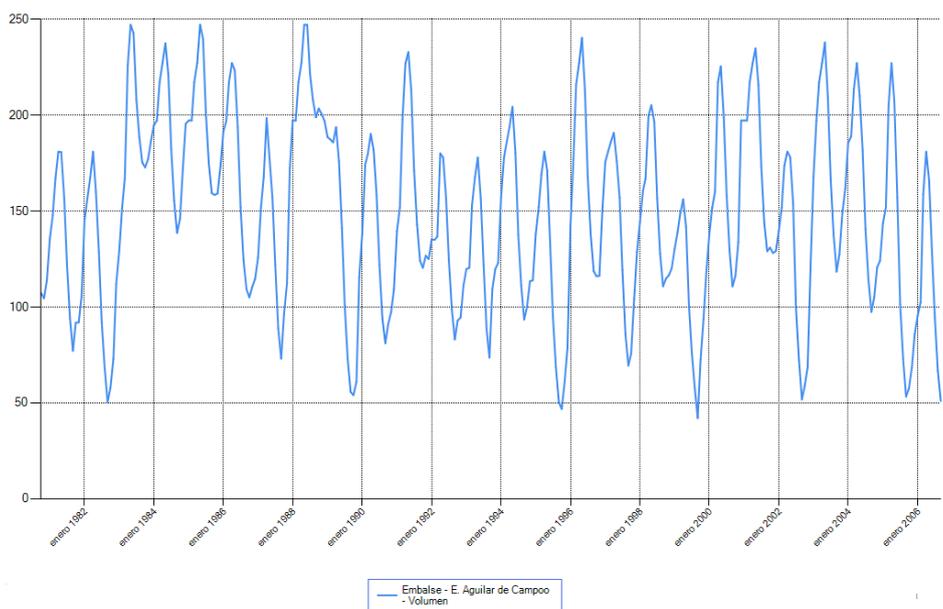


Figura 41: Volumen (Hm³) del embalse de Aguilar de Campoo entre 1980-2006

Fuente: Modelo Completo del Duero- Confederación hidrográfica del Duero

Los datos de calidad que se relacionarán con ese aporte serán los obtenidos en el modelo de calidad del mismo modelo. En los años en los que se carece de datos, aportaremos una media mensual del resto de datos como se hizo con el resto de aportaciones (capítulo 6).

Escenario 4

En este escenario se propondrán las medidas de los escenarios 2 y 3 en conjunto, con una mejoría en la EDAR de Valladolid y un aumento de caudal en los meses estipulados.

8.2 Simulaciones y resultados

A continuación se adjuntan los gráficos resultantes las simulaciones con una comparativa entre los 4 escenarios.

Para su mejor comprensión la representación ha sido realizada a partir de perfiles longitudinales, midiendo las concentraciones desde el primer tramo en Cabezón de Pisuerga hasta el último en Villamarciel (río Duero). Han sido anulados en las gráficas los tramos en los que se extrae volúmenes para las centrales hidroeléctricas, ya que esos resultados no representarían la realidad en el cauce.

8.2.1 Oxígeno disuelto

En la figura 42 se observa la evolución del OD a lo largo del cauce. En ella visualizamos la mejoría drástica de 1.5 mgO/l del escenario 4 respecto al escenario. El aumento de caudal (E.3 y E.4) mejora los niveles de OD en todo el cauce, y la mejora del tratamiento secundario en la EDAR (E.1 y E.2) aumenta el OD en el punto más problemático del recorrido.

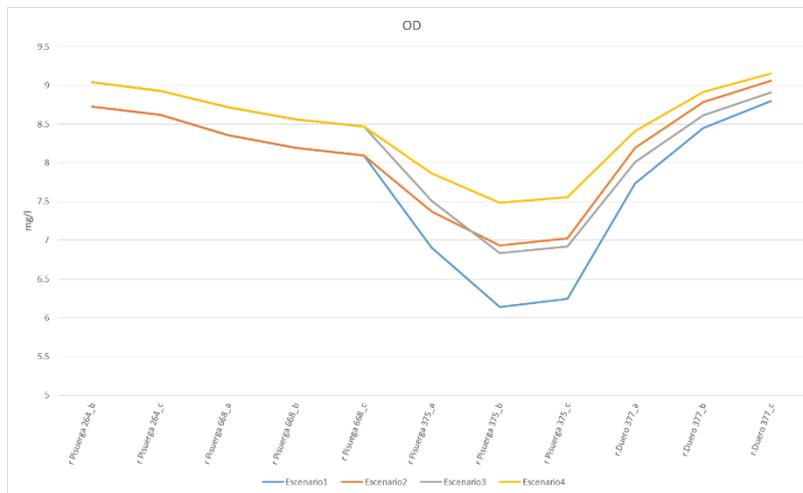


Figura 42: Gráfico de OD en diferentes escenarios

Fuente: Elaboración Propia

El OD es más sensible a la a la mejora de la EDAR que variación de caudales, ya que en el caso del escenario 3, no llega a los niveles de mejora del escenario 2 en el punto de más baja concentración.

8.2.2 Demanda biológica de oxígeno

La figura 43 representa la evolución de la DBO5 a lo largo del cauce. En ella visualizamos que la disminución de la DBO5 se ve afectada por el aumento de caudal del escenario 3 de manera muy leve. Su aumento de valores a partir del tramo 668c-r.Pisuerga se debe al vertido de la EDAR de Valladolid, por lo que la medida de mejora de la EDAR disminuye los valores de DBO5 entorno a 1mgO/l.

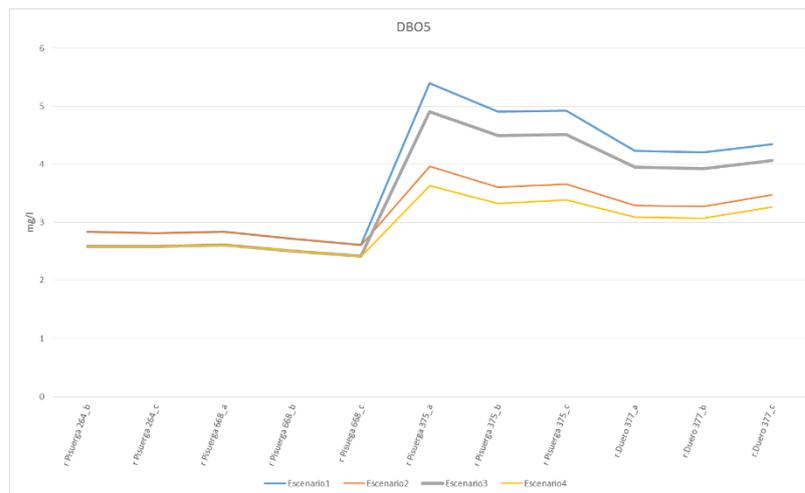


Figura 43: Gráfico de DBO5 en diferentes escenarios

Fuente: Elaboración Propia

8.2.3 Amonio

La figura 44 nos confirma que el problema de amonio en el tramo a estudio es la alta concentración que contiene el efluente de la EDAR de Valladolid.

Los escenarios 2 y 4 presentan unas concentraciones constantes, sin picos a partir del vertido, manteniéndose entre 0.2 y 0.3 mg/l, anulando el pico producido por los vertidos en los escenarios 1 y 3. El aumento de caudal casi no afecta a la concentración de amonio.

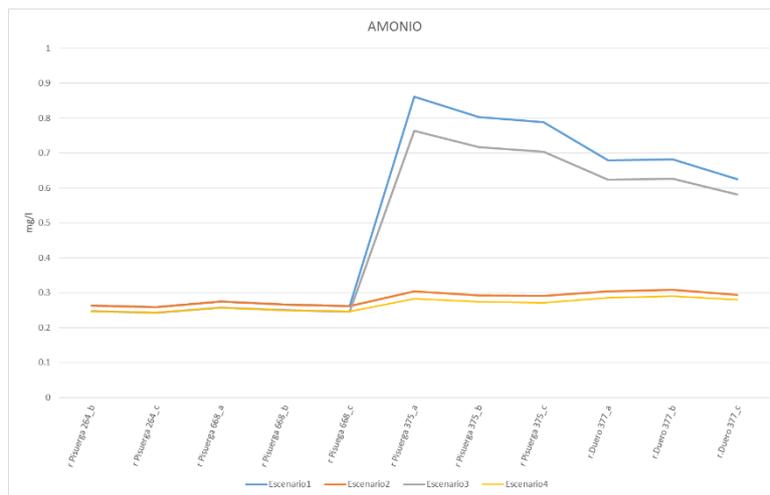


Figura 44: Gráfico de Amonio en diferentes escenarios

Fuente: Elaboración Propia

8.2.4 Nitratos

La afección de las medidas de mejora en los nitratos es diferente a la del amonio. Como se visualiza en la figura 45, la disminución del nitrato más radical se efectúa en los escenarios 3 y 4, en los que se ha incrementado el caudal. La mejora de la EDAR no se percibe en gran medida en la concentración del contaminante, como podemos comprobar con los escenarios 1 y 2 o 3 y 4.

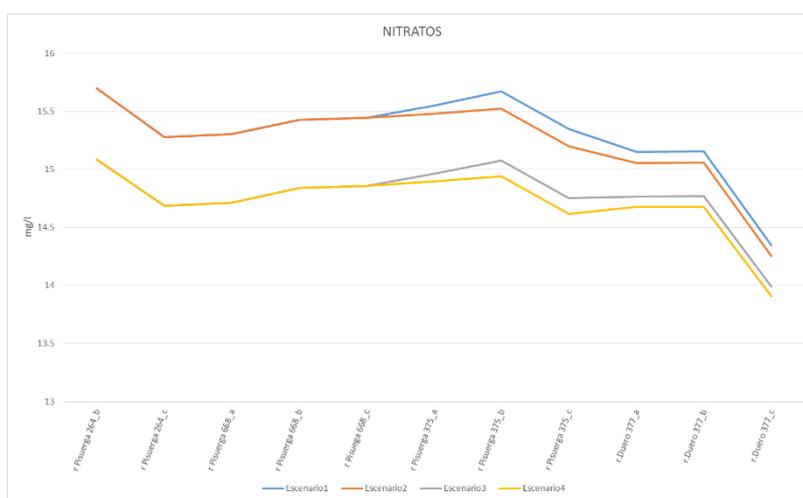


Figura 45: Gráfico de Nitratos en diferentes escenarios

Fuente: Elaboración Propia

8.2.5 Fósforo

La problemática del fósforo en la corriente de agua solo se podría solucionar con la metodología de aumento de caudal, ya que la EDAR ya cumple las normativas de vertidos limitando el efluente a 1 mg/ de fósforo. Como se observa en la figura 46, el fósforo no se puede ver afectado por la mejora en la EDAR del vertido de amonio (comparativa E.1 y E.2).

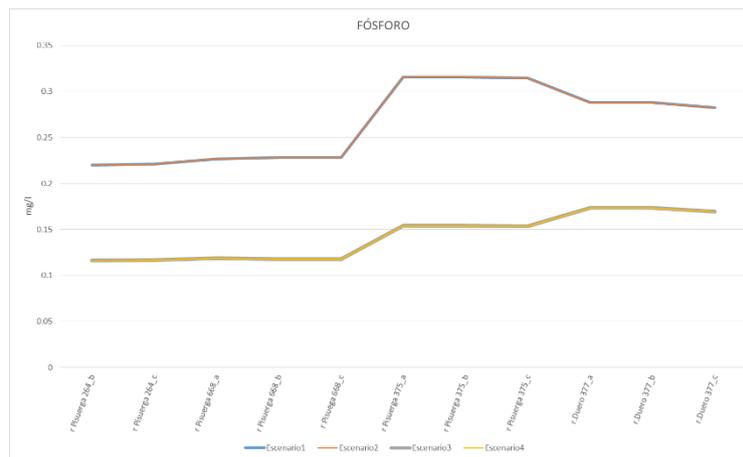


Figura 46: Gráfico de Fósforo en diferentes escenarios

Fuente: Elaboración Propia

8.3 Conclusiones de los resultados de las simulaciones y propuesta de acción

Los gráficos representados en el anterior apartado nos permiten analizar la evolución de las diversas concentraciones a lo largo del río para los 4 escenarios. En ellos se observa una mejora general de la calidad del agua dependiendo del parámetro analizado y del escenario.

El efecto de las medidas de mejora en la EDAR indica una clara mejoría de la calidad en la zona más contaminada del tramo del río. Por ejemplo, el oxígeno disuelto sufre un gran cambio en su punto de más baja concentración gracias a la disminución de la concentración de la DBO5 en el vertido para cumplir la normativa de vertidos de EDAR, reduciendo la DBO5 en el cauce hasta 1mgO/l. También el amonio después del vertido de las aguas residuales urbanas de Valladolid disminuye desde más de 0.8 mg/l a casi 0.2mg/l.

En el caso de los nitratos se ven afectados por la disminución del proceso de nitrificación al haberse reducido la cantidad de amonio, pero no es un detrimento tan marcado como en el amonio, no llegando a 0.5 mg/l, por lo que esta medida no solucionaría la problemática de los nitratos.

Al juntar las dos propuestas de mejora en el escenario 4, podemos comparar con el escenario 3 (aumento de caudal) el efecto de la medida de mejora implementada en el escenario 2 (mejoría de la EDAR). En esta comparativa observamos que la mejoría del fósforo y nitratos está directamente relacionada con el aumento de caudales. Esa mejoría tiene lugar a lo largo de todo el cauce, incrementándose en los puntos de concentración más altos. Este fenómeno es más tangible en el caso del fósforo, que además de mejorarlo en un 50% desde el inicio del tramo a estudio, aumenta su mejoría en el punto más contaminado tras el vertido de Valladolid.

El aumento de caudales también mejora de manera significativa el oxígeno disuelto, incrementado la concentración en el punto de menor concentración, pero aún así el modelo es más sensible a la medida de mejoría de la EDAR (E.2 produce mejores resultados que E.3).

A pesar que la concentración de fósforo supera los 0.2 mg/l y a los altos niveles de nitratos no se produce eutrofización ya que la concentración de DBO5 y oxígeno disuelto no se ve afectada lo suficiente para considerar el tramo eutrófico, siendo posible esta situación por la corriente que atraviesa esta zona del río.

En general, la medida implementada en el escenario 2 produce una clara mejoría de la calidad del agua del río Pisuerga en el tramo medio-bajo respecto el escenario base, cumpliendo con el anexo I del Real Decreto 927/1988, en que se estipulan las limitaciones de concentraciones en los vertidos urbanos. Esta medida ya fue estipulada en el Anejo 12 del Plan Hidrológico del Duero de 2009, vigente en la actualidad, en la que se indica que en 2012 el proyecto de mejora de la EDAR tendría su comienzo. En 2015 el BocyI (Boletín Oficial de Castilla y León) publica la licitación de la obra en la que instalarán tratamiento terciario.

A pesar de la mejoría gracias a esta propuesta, solo con el escenario 4 se lograría la mejora necesaria para prevenir de una posible eutrofización del río en la zona de Valladolid, la cual y supera las concentraciones de fósforo recomendadas.

En conclusión, los resultados en los diferentes escenarios nos confirman que la actuación sobre la EDAR de Valladolid, propuesta en el Plan Hidrológico de 2009, mejoraría la calidad de las aguas del río Pisuerga.

9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El análisis de las concentraciones de contaminantes del río Pisuerga en su tramo medio-bajo entre los años 1996-2012 indica una baja calidad del agua que se acentúa tras el Vertido de las aguas residuales de Valladolid. Respecto a los datos disponibles se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- Aunque la acentuación de los bajos niveles de calidad se sitúan tras el vertido de Valladolid, el nivel de concentración de amonio y fósforo es generalmente alto en todo el tramo a estudio, lo que nos indica una fuente de concentración aguas arriba del municipio de Cabezón de Pisuerga que se atribuye a los vertidos urbanos de los municipios de Burgos y Palencia. Estos dos municipios vierten sus aguas residuales a los ríos Carrión y Alarzón, los cuales son afluentes del Pisuerga. Los vertidos de los dos municipios son la causa principal del deterioro de la calidad del agua aguas arriba de Cabezón de Pisuerga.
- El análisis también revela que las altas concentraciones de nitratos no son principalmente producto de la nitrificación del amonio vertido en las EDAR, sino de las escorrentías de las zonas de agricultura y ganadería en los alrededores del cauce del río. El río Esgueva, aunque afecta de manera leve al río Pisuerga por su bajo caudal, es un ejemplo de río influenciado por las escorrentías con nitratos, ya que no sufre ningún vertido urbano puntual de importancia y sus concentraciones de nitratos son de gran envergadura.
- Aguas abajo, en el tramo medio del río Pisuerga, el efluente de la EDAR de Valladolid afecta directamente a la calidad del agua, incrementando el amonio, el fósforo y la DBO5. Los nitratos también sufren este aumento debido al proceso de nitrificación del amonio vertido, situándose el pico más alto aguas debajo del municipio de Simancas. El oxígeno disuelto sufre un descenso en su concentración claramente causado por el vertido.
- A partir de la confluencia del río Pisuerga con el río Duero las concentraciones de los parámetros estudiados mejoran debido al gran

aumento del caudal de la unión de ambos cauces, excepto en el caso del fósforo, cuya concentración también es alta en el río Duero. Este incremento en el fósforo sigue evolucionando al alza hasta el punto final del estudio en el municipio de Villamarciel, ya que la confluencia con el río Adaja empeora la problemática por su alta concentración en este elemento.

Para analizar la situación y tratar de dar posibles soluciones se ha desarrollado un modelo de simulación de la calidad del agua. Para ello se ha utilizado la herramienta GESCAL del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL. Cabe resaltar del desarrollo del modelo los siguientes aspectos:

- El modelo elaborado refleja con bastante precisión el caudal del cauce, con curvas simuladas similares a los valores observados. Esto indica que las demandas implementadas fueron correctas y que ninguna entrada o salida importante fue evidenciada. También se confirma que no existe ninguna interacción significativa con los acuíferos de la zona.
- El proceso de calibración del oxígeno disuelto, DBO5, amonio, nitratos y fósforo se realizó con éxito a pesar de la falta de datos observado en algunos casos tales como el fósforo, del cual se tenían escasas lecturas.
- El oxígeno disuelto consigue una buena calibración, mejorando en el último tramo donde se sitúa la estación de Villamarciel.
- La calibración más compleja a llevar a cabo es la de la DBO5, cuyas lecturas en caso de ser valores menores a 2mgO/l y al no poder realizar la toma de datos tan bajos correctamente se sustituyen con 0mgO/l. La simulación se asemeja bastante en las subidas y bajadas de concentraciones, aunque no llega a ser una representación exhaustiva de los datos observados.
- El amonio es el parámetro más delicado a la hora calibrar; sigue la tendencia de ascenso y descenso de valores al igual que las lecturas pero no logra representar algún pico de las concentraciones, siendo una variación más tangible en la estación intermedia de Simancas.
- Los nitratos también resultan delicados de calibrar con valores simulados que varían significativamente de la concentración medida en algunas de las

estaciones, teniendo el mismo problema que el amonio de falta de representación de algún pico en los datos.

- Los problemas mencionados respecto el amonio y los nitratos no son preocupantes ya que además de ser pocos los puntos de discrepancia, la tendencia de la simulación es muy similar a la de los datos observados.
- Respecto al fósforo solo se disponen datos en todo el intervalo temporal de la última estación, la de Villamarciel. En este punto la calibración se puede considerar satisfactoria.

Han sido propuestas unas medidas de mejora a la calidad implementadas en 4 escenarios diferentes. Según las distintas simulaciones realizadas, con la combinación de dos alternativas en el escenario 4, se concluye que:

- El escenario 1 representa la simulación base sin ningún tipo de medida de mejora. El escenario 2 implementa una mejora en la EDAR de Valladolid con el objetivo de disminuir el amonio y la DBO5. El escenario 3 representa un aumento de caudales en unos meses determinados del año para la reducción de la concentración de amonio, nitratos, fósforo y DBO5. En el escenario 4 se integran las dos alternativas con la finalidad de observar su efecto y poder valorarlo frente los escenarios 2 y 3.
- La medida de mejora de la EDAR de Valladolid indica una clara mejoría de la calidad en la zona más contaminada del tramo del río. El oxígeno disuelto sufre un gran cambio en su punto de más baja concentración gracias a la disminución de la concentración de la DBO5 en el vertido para cumplir la normativa de vertidos de EDAR. El amonio es el contaminante más afectado en esta medida de mejora aguas abajo del vertido. Los nitratos se ven afectados por la disminución del proceso de nitrificación al haberse reducido la cantidad de amonio con la mejora de la EDAR, pero con disminución de poco calibre. El fósforo no se ve afectado de ninguna manera con esta medida.

- La medida de mejora de aumento de caudales aguas arriba con la suelta de 20Hm³ del Embalse de Aquilar de Campoo afecta de manera más impactante a la concentración de nitratos y fósforo a lo largo de todo el cauce, siendo la única medida que disminuye la concentración del fósforo en el cauce.

A partir de los estudios realizados en la cuenca y la simulación de los diferentes escenarios se toma como propuesta de rehabilitación de la calidad de aguas la mejora de la EDAR de Valladolid, ya que se considera que los niveles de nitratos no llegan a los límites de contaminación estipulados por la OMS y las concentraciones de fósforo y amonio aguas arriba de nuestra zona de estudio provienen de los vertidos de aguas residuales de Burgos y Palencia.

Para cumplimentar este estudio se proponen las siguientes líneas de investigación futuras que ayudarían a determinar las fuentes de contaminación para poder tomar futuras decisiones de corrección y prevención. La **propuesta de futuras líneas de investigación** sería:

- Análisis de las aguas residuales de Palencia al río Carrión y de Burgos al río Arlanzón y su efecto sobre su aporte al Pisuerga.
- Estudio de la calidad de aguas en el tramo alto del Pisuerga y sus afluentes, con la finalidad de determinar la fuente de contaminación del amonio, de los nitratos y del fósforo.
- Estudio del efecto sobre el cauce de las zonas ganaderas y agrícolas en la ribera del río Pisuerga respecto a los niveles de contaminación de nutrientes.

Por último se concluye que como producto de este estudio se dispone de un modelo con una precisión adecuada tanto de la simulación de caudales, como de la variación de los parámetros, oxígeno disuelto, DBO₅, amonio, nitratos y fósforo total.

Los resultados del modelo mostraran la dinámica de los contaminantes en el Río Pisuerga en su tramo medio-bajo y su confluencia con el río Duero, y arrojará datos que permitirán determinar el estado de la calidad del agua del cauce. Estos resultados

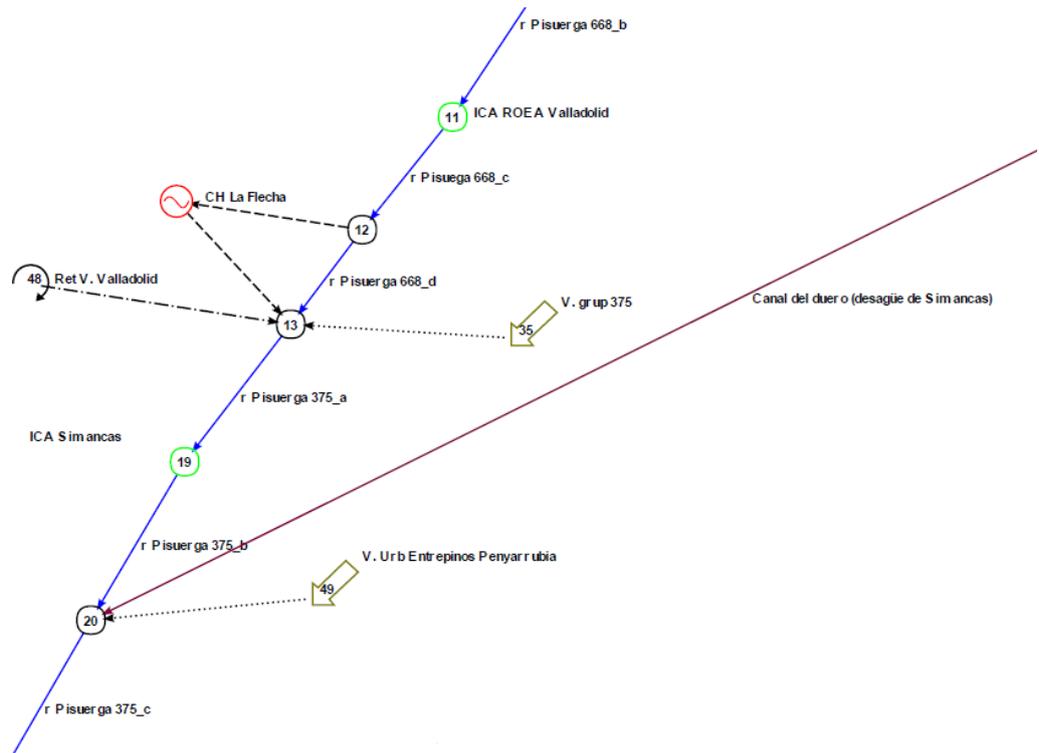
ayudarán a tomar decisiones correctivas y preventivas al futuro, con el fin de la mejora de la calidad del agua en el tramo de río a estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

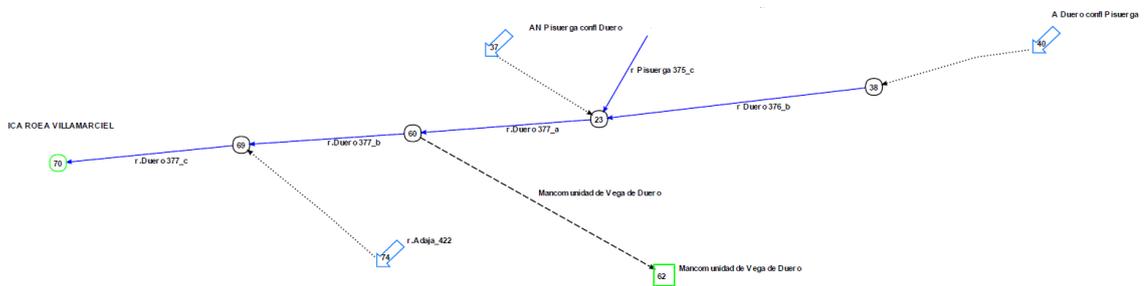
- AEMET Agencia Estatal de Meteorología. (Última consulta 13 de Abril de 2015).
Obtenido de www.aemet.es.
- Aguas de Valladolid, S.A. (Última consulta 10 de Mayo de 2015). *Estación depuradora de aguas residuales*. Obtenido de www.aguasdevalladolid.com.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2010). *El derecho humano al agua y al saneamiento. Resolución 64/292* .
- CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (Última consulta 20 de Febrero de 2015). www.cedex.es.
- Centro de Información Territorial. Junta de Castilla y León. (s.f.).
www.cartografia.jcyl.es. Recuperado el 11 de Enero de 2015
- Confederación Hidrográfica del Duero. (2009). *Planificación Hidrológica del Duero* .
Obtenido de www.chduero.es.
- Confederación Hidrográfica del Duero. (2015). *Propuesta de Planificación Hidrológica del Duero* . Obtenido de www.chduero.es.
- Confederación Hidrográfico del Duero. (Última consulta 16 de Marzo de 2015).
www.chduero.com.
- Directiva del Marco del Agua. (1998). *DIRECTIVA 75/440/CEE Y 79/869/CEE*.
- Directiva del Marco del Agua. (23 de Octubre de 2000). *DIRECTIVA 2000/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO* .
- Gómez Limón, J., & Gómez Ramos, A. (2007). *Opinión pública sobre la multifuncionalidad del regadío: el caso de Castilla y León*. Valladolid.

- MAGRAMA.Ministerio de Agricultura,Alimentación y Medio Ambiente. (1991). *DIRECTIVA 91/271/CEE*. Obtenido de www.magrama.gob.es.
- MAGRAMA.Ministerio de Agricultura,Alimentación y Medio Ambiente. (Última consulta 7 de Abril de 2015). *Plan Nacional de Calidad de las Aguas Saneamiento y Depuración 2007-2015*. Obtenido de www.magrama.gob.es.
- Martín Monerris, M., & Marzal Doménech, P. (1999). *MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA*. Valencia, España: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE.UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1988). *ANEXO I.REAL DECRETO 927/1988*. Obtenido de www.fomento.gob.es.
- Ministerio de Salud y consumo. (2007). *Calidad de las aguas de baño. Informe técnico*.
- Ministerio para las Administraciones Públicas. (1989). *Real Decreto 984/1989 por la que se determina la estructura orgánica dependiente de la Presidencia de las Confederaciones Hidrográficas*. Obtenido de www.boe.es.
- Paredes, J., Solera, A., & Andreu, J. (2007). *AQUATOOL SSD PARA PLANIFICACIÓN DE CUENCAS. MANUAL DE USUARIO Versión 1.0*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.DIHMA.
- Paredes, J., Solera, A., & Andreu, J. (2009). *MODELO GESCAL DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS.MANUAL DE USUARIO*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Paredes, J., Solera, A., & Francisco, M.-C. (2011). *IMPLEMENTING ENVIRONMENTAL FLOWS IN COMPLEX WATER RESOURCES SYSTEMS – CASE STUDY: THE DUERO RIVER BASIN*.
- Texto Refundido de la Ley de Aguas. Artículo 40*. (2001). Obtenido de www.boe.es.

ZONA B



ZONA C



Fuente: Elaboración Propia

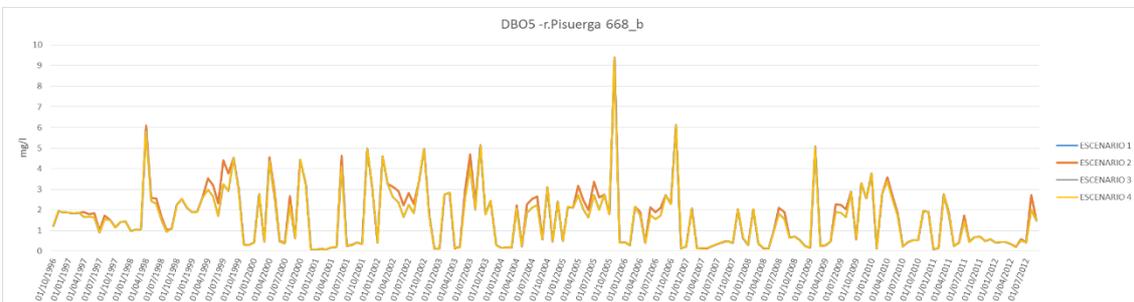
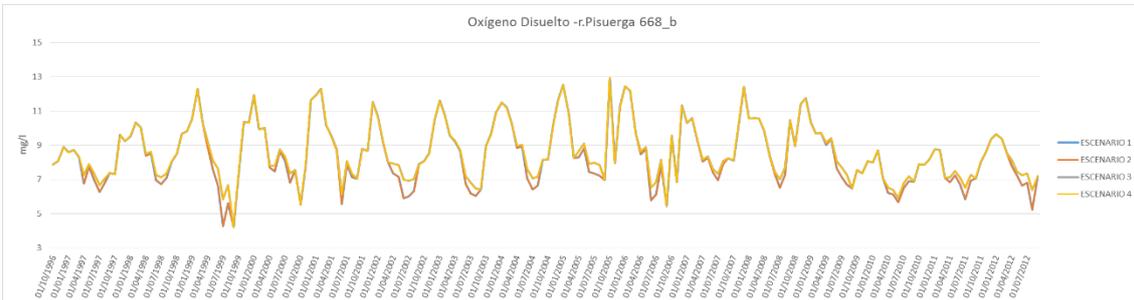
ANEXO 2 Escenarios de propuestas de mejora

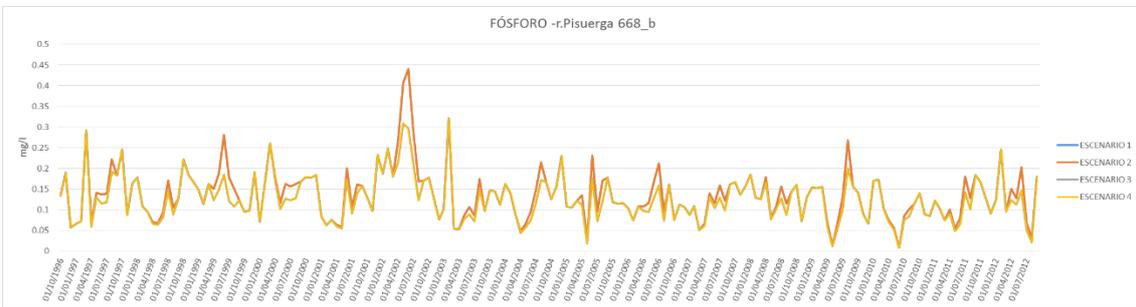
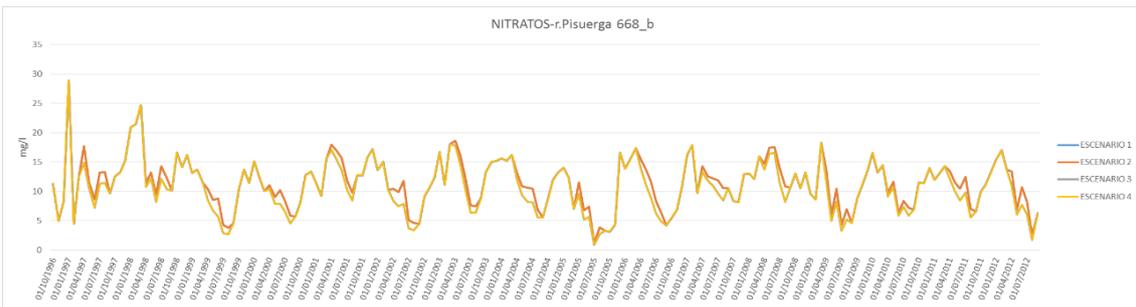
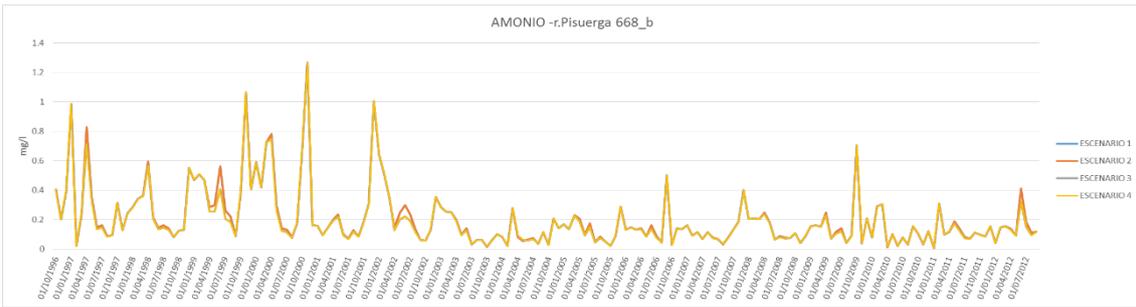
| | MEDIDA DE MEJORA | VALORES CUANTITATIVOS |
|------------|--|--|
| ESCENARIO1 | MODELO SIN MEDIDA DE MEJORA | |
| ESCENARIO2 | DISMINUCIÓN DE AMONIO y DBO5 EN EL VERTIDO DE VALLADOLID | MAX AMONIO 1mg/l; MAX DBO5 25mg/l |
| ESCENARIO3 | AUMENTO DE CAUDAL EN MESES DE MAYOR CONTAMINACIÓN | 20hm3 entre Abril- Agosto |
| ESCENARIO4 | ESCENARIO1+ESCENARIO2 | MAX AMONIO 1mg/l+20hm3 entre Abril- Agosto |

Fuente: Elaboración Propia

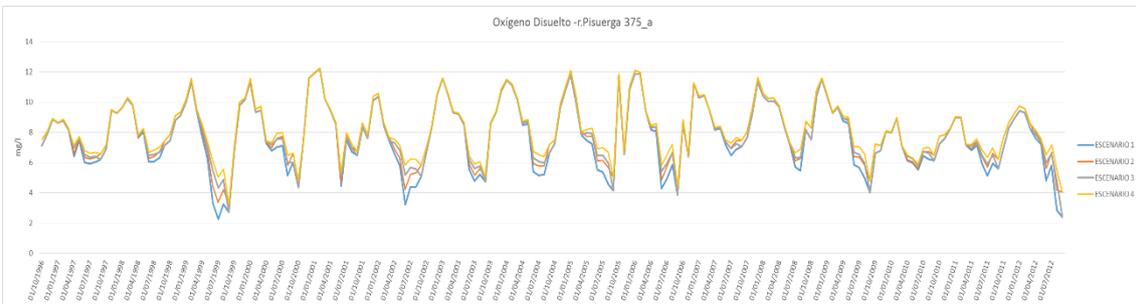
ANEXO 3 Simulación de medidas de mejora

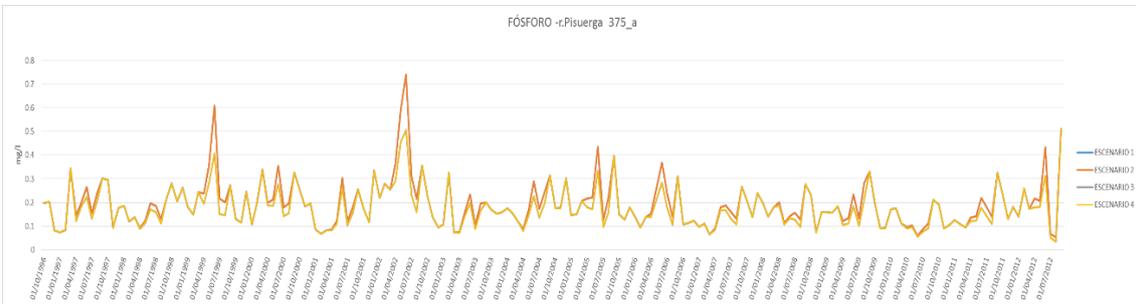
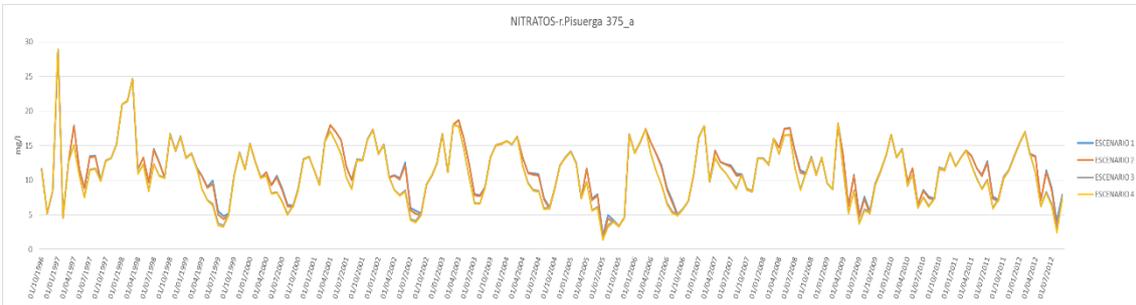
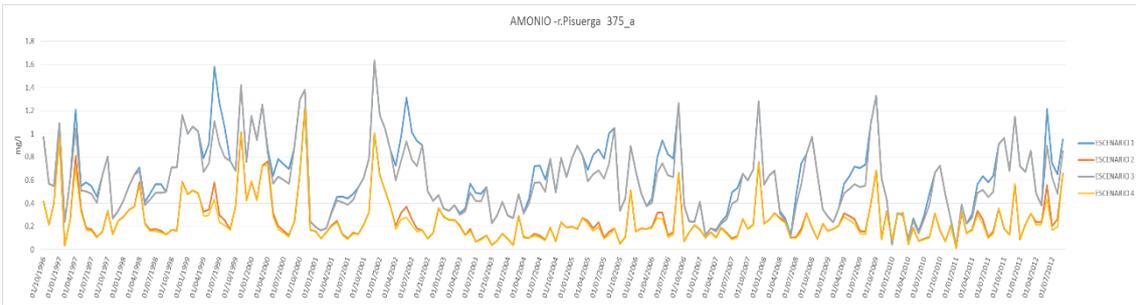
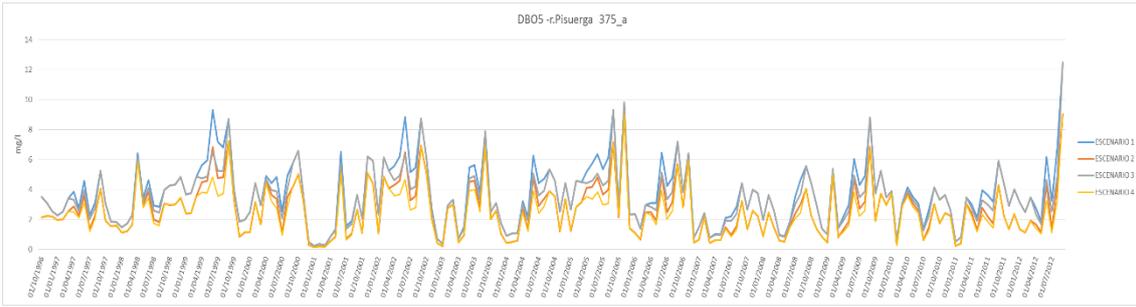
Tramo en ICA de Valladolid



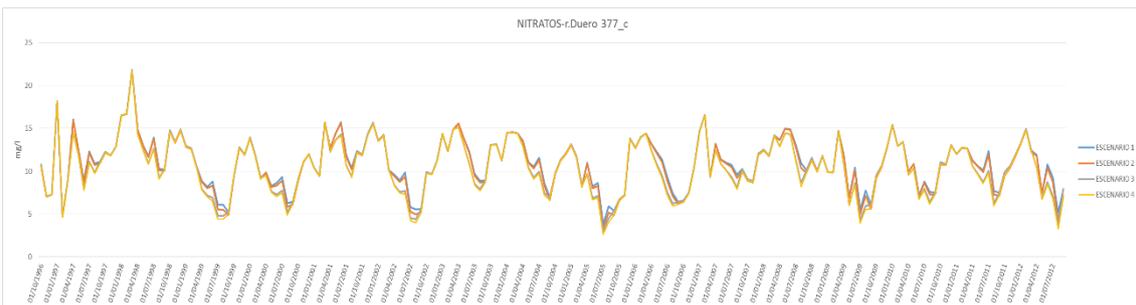
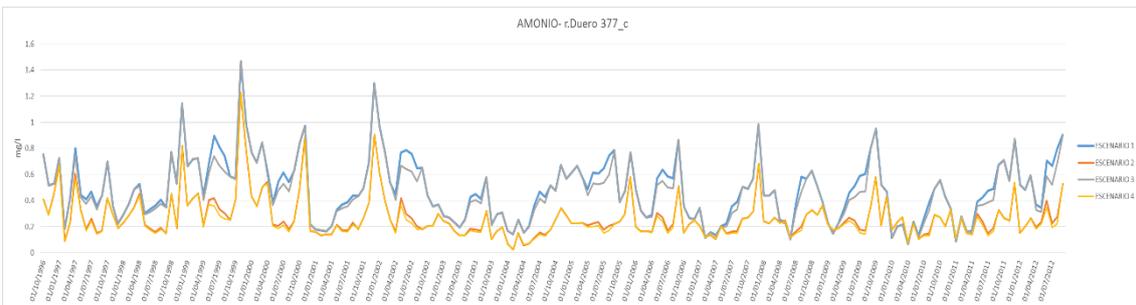
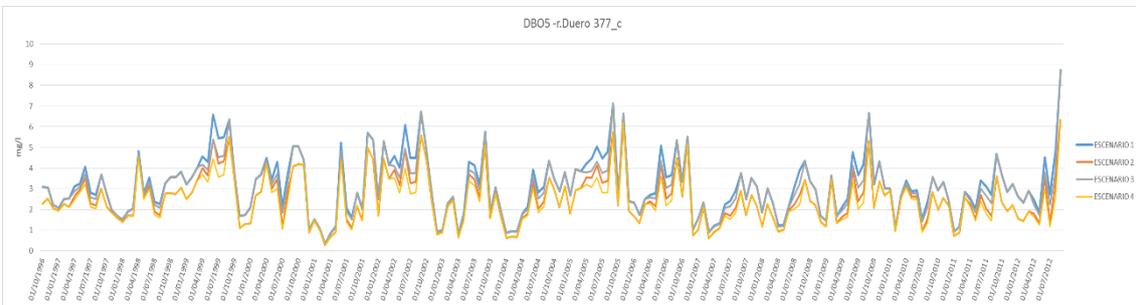
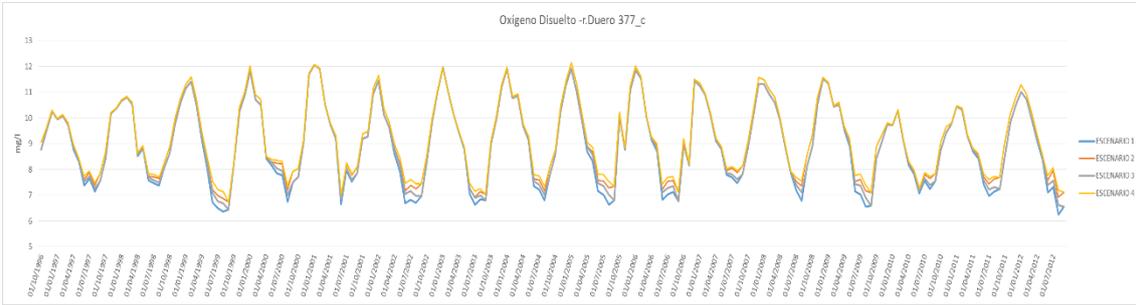


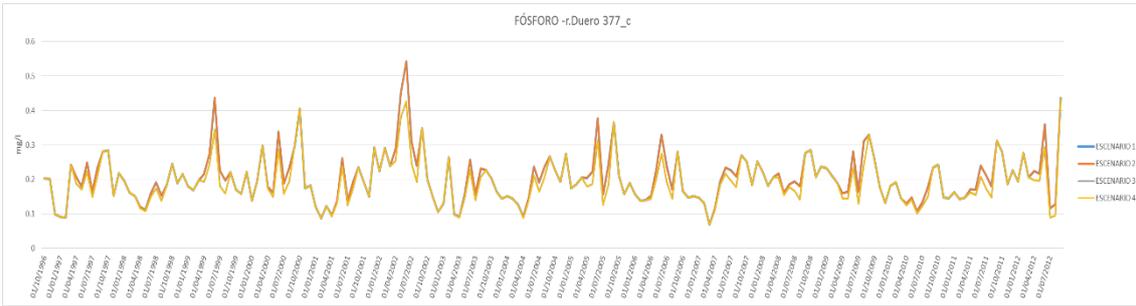
Tramo en ICA de Simancas





Tramo en ICA de Villamarciel





Fuente:Elaboración propia



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

