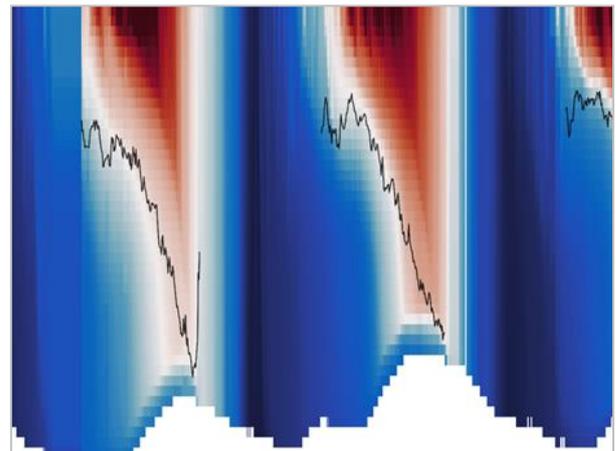


DESPLIEGUE Y CALIBRADO DE UNA INFRAESTRUCTURA VIRTUAL PARA LA REVERSIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE DE EL VAL (ZARAGOZA)

Memoria





MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



DESPLIEGUE Y CALIBRADO DE UNA INFRAESTRUCTURA VIRTUAL PARA LA REVERSIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE DE EL VAL (ZARAGOZA)

Informe Final

PROMOTOR:

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO



DIRECCIÓN DEL PROYECTO:

María José Rodríguez Pérez
Vicente Sancho-Tello Valls

EMPRESA CONSULTORA:

Ecohydros SL.



EQUIPO DE TRABAJO:

Agustín P. Monteoliva, Alberto Criado, María Fernández, Iván González, Javier Hernández, Nuria Lozano, Alberto Navas, Omar Monteoliva, María Sánchez.

Colaboradores externos: Fernando Aguilar, Antonio Delgado, Daniel García, Cintia Luz Ramón, Ignacio Robles, Francisco Rueda, José Valdiande.

PRESUPUESTO DEL PROYECTO:

97.550,00 Euros (118.035,50 Euros IVA incluido)

CONTENIDO:

MEMORIA/ANEXOS

AÑOS DE EJECUCIÓN:

2020 a 2022

FECHA ENTREGA:

JULIO 2022



REFERENCIA IMÁGENES PORTADA:

Superior izquierda: Vista de la presa de El Val desde la zona de acceso al embalse

Superior derecha: Acumulación de fitoplancton en una reclusa del embalse

Inferior izquierda: Zona de cola del embalse en época de bajo nivel de la reserva hídrica

Inferior derecha: Gráficos de monitorización con alta frecuencia de la temperatura en la columna de agua del embalse

CITA DEL DOCUMENTO: Confederación Hidrográfica del Ebro (2022). Despliegue y calibrado de una infraestructura virtual para la reversión de la eutrofización del embalse de El Val (Zaragoza). 157 pág. Disponible en PDF en la web: <http://www.chebro.es>

El presente informe pertenece al Dominio Público en cuanto a los Derechos Patrimoniales recogidos por el Convenio de Berna. Sin embargo, se reconocen los Derechos de los Autores y de la Confederación Hidrográfica del Ebro a preservar la integridad del mismo, las alteraciones o la realización de derivados sin la preceptiva autorización administrativa con fines comerciales, o la cita de la fuente original en cuanto a la infracción por plagio o colusión. A los efectos prevenidos, las autorizaciones para uso no científico del contenido deberán solicitarse a la Confederación Hidrográfica del Ebro.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. OBJETO	16
3. ANTECEDENTES Y FUENTES DE INFORMACIÓN	17
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO	20
5. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA GENERAL.....	22
6. ACTIVIDADES REALIZADAS.....	25
6.1. RECONOCIMIENTO PREVIO.....	25
6.2. DESPLIEGUE Y CALIBRADO DE ESTACIONES DE MONITORIZACIÓN Y DE SISTEMA DE INFORMACIÓN LIMNOLÓGICA DEL EMBALSE.....	30
6.2.1. Datos disponibles de repositorios externos.....	30
6.2.1.1. Sonda perfiladora Aquadam.....	30
6.2.1.2. Datos meteorológicos.....	31
6.2.1.3. Datos hidro-meteorológicos automáticos.....	31
6.2.2. Despliegue de estaciones remotas para generación de datos in situ.....	33
6.2.2.1. Sistema de control remoto. Diseño para el módulo de monitorización.....	35
6.2.2.2. Estructura de monitorización en la nube (Cloud).....	39
6.2.2.3. Componentes del sistema portátil.....	43
6.2.2.4. Monitorización en continuo de puntos críticos.....	48
6.3. CAMPAÑAS DE MUESTREO Y ANALÍTICAS REALIZADAS.....	63
6.3.1. Controles en ríos y vertidos.....	63
6.3.2. Controles en el embalse.....	66
6.4. OTROS DATOS Y ANALÍTICAS APORTADAS POR LA CHE.....	69
6.4.1. Datos de controles mensuales de vertidos.....	69
6.4.2. Otros controles del Servicio de Vertidos.....	69
6.4.3. Muestras y análisis en redes de control CEMAS.....	72
6.5. RESULTADOS DE LOS CONTROLES DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	73
6.5.1. Datos fisicoquímicos de campo.....	73
6.5.2. Análisis de laboratorio.....	75
6.6. SISTEMA DE INFORMACIÓN LIMNOLÓGICA.....	89
6.7. GENERACIÓN DE VALORES DIARIOS DE NUTRIENTES.....	93



6.7.1.	<i>Interpolado de datos para generación de series diarias actuales</i>	93
6.7.2.	<i>Desarrollo de sensores de datos para aplicación en monitorización futura</i>	94
6.8.	<i>ESTIMACIÓN DEL ORIGEN DE NUTRIENTES MEDIANTE ISÓTOPOS ESTABLES</i>	98
6.8.1.	<i>Introducción a la técnica</i>	98
6.8.2.	<i>Muestreos y análisis de isótopos estables</i>	100
6.8.3.	<i>Resultados principales de los análisis de isótopos estables</i>	102
6.9.	<i>SEGUIMIENTO DEL ESTADO TRÓFICO MEDIANTE TELEDETECCIÓN</i>	107
6.10.	<i>CALIBRADO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE APORTACIONES DE NUTRIENTES EN LA CUENCA</i>	110
6.10.1.	<i>Tratamiento de datos de entrada al modelo</i>	111
6.10.1.1.	<i>Estaciones meteorológicas</i>	111
6.10.1.2.	<i>Información geográfica, edafológica y usos del suelo</i>	112
6.10.1.3.	<i>Procesado de la información meteorológica</i>	112
6.10.1.4.	<i>Tratamiento de la información con SIG y SWAT</i>	112
6.10.2.	<i>Ejecución del modelo SWAT</i>	113
6.10.3.	<i>Resultados del modelo SWAT</i>	115
6.10.4.	<i>Integración de todos los flujos en modelo dinámico ECOMOD_VAL</i>	117
6.10.5.	<i>Análisis de las aportaciones de nutrientes al embalse</i>	120
6.11.	<i>MODELADO HIDRODINÁMICO 3D Y BIOGEOQUÍMICO DEL EMBALSE</i>	124
6.11.1.	<i>Descripción somera y configuración de los modelos utilizados</i>	124
6.11.1.1.	<i>Modelo hidrodinámico</i>	124
6.11.1.2.	<i>Modelo biogeoquímico</i>	132
6.11.2.	<i>Resultados principales de las simulaciones</i>	133
6.11.2.1.	<i>Modelo hidrodinámico</i>	133
6.11.2.2.	<i>Modelo biogeoquímico</i>	140
6.12.	<i>DEFINICIÓN DE MEDIDAS CORRECTORAS Y ENSAYO DE ESCENARIOS DE ACTUACIÓN</i>	142
7.	RESUMEN DE TRABAJOS REALIZADOS Y CONCLUSIONES	146
7.1.	<i>TRABAJOS REALIZADOS</i>	146
7.1.1.	<i>Incorporación de fuentes de información e indicadores a base de datos</i>	146
7.1.2.	<i>Despliegue y mantenimiento de estaciones de monitorización en continuo (apartado 6.2)</i> <i>147</i>	
7.1.3.	<i>Campañas de muestreo y análisis de laboratorio</i>	147
7.1.4.	<i>Generación de series diarias de nutrientes</i>	148
7.1.5.	<i>Estudio de las aportaciones de nutrientes</i>	148
7.1.6.	<i>Estudios en el embalse</i>	149
7.1.7.	<i>Medidas correctoras y escenarios de actuación</i>	150



7.2.	<i>HALLAZGOS DESTACABLES Y CONCLUSIONES</i>	151
8.	RECOMENDACIONES	153
9.	REFERENCIAS	155

ÍNDICE DE APÉNDICES

- APÉNDICE I. REVISIÓN DE ESTACIONES EN VISITA PREVIA DE CAMPO
- APÉNDICE II. DATOS COSECHADOS Y CURADOS EN LA MONITORIZACIÓN REMOTA DE ALTA FRECUENCIA
- APÉNDICE III. BOLETINES DE CAMPO DE LOS MUESTREOS EN RÍOS Y VERTIDOS
- APÉNDICE IV. BOLETINES DE CAMPO Y PERFILES VERTICALES EN EL EMBALSE
- APÉNDICE V. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREOS DISCRETOS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO EN RÍOS Y VERTIDOS
- APÉNDICE VI. ANÁLISIS ESPECÍFICO SOBRE EL GRADO DE CONFORMIDAD CON LA NORMATIVA DE CALIDAD DE AGUAS DE LOS REGISTROS Y ANÁLISIS EN EL ENTORNO DEL VERTIDO DE LA EDAR DE ÁGREDA-ÓLVEGA
- APÉNDICE VII. RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREOS DISCRETOS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO DE AGUA Y SEDIMENTOS DEL EMBALSE
- APÉNDICE VIII. ANÁLISIS DE LAS COMUNIDADES FITOPLANCTÓNICAS EN EL EMBALSE
- APÉNDICE IX. DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE SENSOR DE DATOS (*SOFTSENSOR*) PARA SU USO FUTURO EN MONITORIZACIÓN DE NUTRIENTES CON ALTA FRECUENCIA
- APÉNDICE X. ANÁLISIS DE ISÓTOPOS ESTABLES PARA MEJORAR LA ESTIMACIÓN DEL ORIGEN DE LA APORTACIÓN DIFUSA DE NUTRIENTES
- APÉNDICE XI. DESARROLLO DE HERRAMIENTA PARA EL SEGUIMIENTO DEL ESTADO TRÓFICO MEDIANTE TELEDETECCIÓN
- APÉNDICE XII. SIMULACIONES 3D DE DIFERENTES ESCENARIOS DE GESTIÓN
- APÉNDICE XIII. DESCRIPCIÓN DE PROPUESTA DE TRATAMIENTO MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de todas las fuentes de información localizadas y de su procedencia (en el apartado 6.3. se puede encontrar una descripción de los parámetros citados y sus unidades de medida).	19
Tabla 2. Puntos de muestreo del proyecto.....	26
Tabla 3. Detalles de las diferentes estaciones.....	31
Tabla 4. Listado de variables incorporadas al estudio	32
Tabla 5. Sensores del sistema portátil de medición.....	43
Tabla 6. Sensores instalados en el sistema de monitorización de los puntos V1, R4 y R5	50
Tabla 7. Sensores instalados en el sistema de monitorización del punto R11	53
Tabla 8. Sensores instalados en el sistema de monitorización del punto R1.....	55
Tabla 9. Información de los puntos de muestreo manual	63
Tabla 10. Análisis realizados y técnicas analíticas aplicadas	64
Tabla 11. Número y tipo de muestra recogidas en cada campaña.....	65
Tabla 12. Número de muestras y tipo de muestras recogidas en el embalse del Val en cada campaña ..	67
Tabla 13. Estaciones de muestreo incluidas por el servicio de vertidos.....	69
Tabla 14. Campañas realizadas durante los años 2020 y 2021	71
Tabla 15. Información básica sobre las masas de agua y puntos de muestreo asociados.....	73
Tabla 16. Relación de estaciones de muestreo en las que se han analizado isótopos estables	100

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Situación del embalse y cuenca de El Val en la Demarcación Hidrográfica del Ebro	20
Figura 2. Cuenca de drenaje efectiva (incluye el río Queiles hasta el azud) del embalse de El Val.....	21
Figura 3. Esquema de organización de flujos de datos, procesos de modelado e hitos (objetivos finales)	22
Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados	25
Figura 5. Ejemplo de representación gráfica pseudo3D de datos generados por la sonda Aquadam (temperatura, oxígeno disuelto, clorofila a y turbidez)	30
Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas disponibles y utilizadas	31
Figura 7. a) Esquema de explotación hidráulica del embalse del Val. b) Sección transversal del embalse del Val.....	33
Figura 8. Ubicación de las estaciones de monitorización en continuo.....	34
Figura 9. Esquema general del sistema de control y gestión de sensores.....	36
Figura 10. Estructura de la nube implantada en el proyecto.....	40
Figura 11. Acceso a la nube Grafana.....	41
Figura 12. Interconexión de Grafana con la base de datos influxDB.....	41
Figura 13. Valores de conductividad y turbidez las estaciones remotas de monitorización durante un periodo de 2 días	42
Figura 14. Visualización de todos los parámetros medidos en las estaciones remotas de los puntos de estudio (R1 y V1) durante un periodo de 2 días.....	42
Figura 15. Dispositivo portátil de medición en el río Val (R1). Sondas y sensores en el cauce (izquierda) y sistema de adquisición y control (derecha)	45
Figura 16. Resultado del ejercicio de calibración de la concentración de nitratos obtenida por absorción <i>in situ</i>	46
Figura 17. Datos de pH, Conductividad, OD y T ^a , medidos en todas las estaciones remotas de monitorización en las 18 campañas	47
Figura 18. Tanque de mediciones y sistema de control en la arqueta de vertido de la EDAR de Ágreda- Ólvega (V1).....	49

Figura 19. Datos almacenados en la nube a través de la plataforma Grafana de los parámetros de conductividad y turbidez en todos los puntos de monitorización remota (V1, R1, R4, R5 y R11) durante la última semana.	51
Figura 20. Adquisición de datos almacenados en la nube a través de la plataforma Grafana de todos los parámetros monitorizados en los puntos de monitorización remota R4, R5 y R11 durante un periodo de 1 mes.	52
Figura 21. Instalación de la estación remota R11.	53
Figura 22. Instalación de la estación 2 en el punto R1, fotos de izquierda a derecha: Armazón con sensores; instalación y sistema de alimentación energética solar.	55
Figura 23. Autoanalizador de nutrientes WIZ-SYSTEAM en el punto de estudio (R1).	57
Figura 24. Ejemplo de serie de monitorización con alta frecuencia en la estación R1.	58
Figura 25. Serie de monitorización con alta frecuencia mediante autoanalizador de nutrientes en el punto R1.	58
Figura 26. Recta de calibración entre la SDA a 226 nm y la concentración de nitrato medida en el laboratorio en (a) R1 y (b) R11.	60
Figura 27. Serie de monitorización con alta frecuencia de nitratos mediante espectrofotómetro UV en el punto R1.	61
Figura 28. Resultados de medias horarias de los parámetros físico-químicos (conductividad, turbidez, T ^a , OD, pH y ORP) medidos en el punto R1.	62
Figura 29. Ubicación de todas las estaciones muestreadas en el embalse de El Val.	68
Figura 30. Puntos de muestreo en la cuenca del Val.	72
Figura 31. Masas de agua y estaciones de la red CEMAS en la cuenca del embalse de El Val.	72
Figura 32. Diagramas de cajas de datos fisicoquímicos in situ en las diferentes estaciones de control.	74
Figura 33. Diagramas de cajas de nutrientes de fósforo y nitrógeno en las diferentes estaciones de control.	76
Figura 34. Diagramas de cajas de nutrientes de sílice, sólidos en suspensión y materia orgánica en las diferentes estaciones de control.	77
Figura 35. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el vertido (V1).	78
Figura 36. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R4 del río Val.	79
Figura 37. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R1 del río Val.	79
Figura 38. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R11 del río Val.	80

Figura 39. Concentraciones de fósforo total, amonio y nitratos en los puntos de muestro de la cuenca del Val, cuenca del Queiles y embalse del Val	81
Figura 40. Concentración de fósforo total en el vertido (V1) respecto a umbral de la normativa zonas sensibles (< 100.000 hab_eq)	82
Figura 41. Evolución temporal de la concentración de nutrientes inorgánicos en diferentes estratos verticales del embalse	83
Figura 42. Concentración de TP y ratio NIT/TP en diferentes estaciones y estratos verticales del embalse	84
Figura 43. Tablas y gráficos representativos de los resultados de los análisis de fitoplancton, e imagen de microscopio óptico de <i>Dolichospermum mendotae</i>	86
Figura 44. Gráfico de fluorescencia de clorofila a en profundidad y a lo largo del tiempo (enero 2020 a la actualidad).	87
Figura 45. Evolución del valor medio en la zona fótica de fluorescencia de clorofila a.	87
Figura 46. Estado trófico según el valor medio en la zona fótica de fluorescencia de clorofila a.....	88
Figura 47. Esquema y ecuación del algoritmo de ajuste al perfil térmico vertical (a partir de Cook & Rimmer, 2010).	89
Figura 48. Resultado de la aplicación del algoritmo de detección de termoclina a los datos de la sonda Aquadam durante el periodo del Estudio. Profundidad de la termoclina (arriba) y trazado de termoclina sobre los datos de temperatura de la sonda Aquadam (abajo).	90
Figura 49. Valores de clorofila a en el embalse registrados por la sonda Aquadam. Arriba valores medios en 5 m superficiales y abajo valores en cada metro de profundidad.	91
Figura 50. Ejemplo de interpolación mediante regresión MARS para generar datos diarios de nutrientes en R1	94
Figura 51. Aplicación del algoritmo de sensor de datos al TP en R1. Set de entrenamiento (arriba) y set de datos curados en continuo disponibles (abajo).	96
Figura 52. Ubicación de las estaciones de análisis de isótopos estables y su pertenencia a subcuencas.	101
Figura 53. Representación de los resultados analíticos de isótopos estables en nitratos (explicación en el texto).....	102
Figura 54. Clasificación de los valores isotópicos encontrados en la cuenca del Val y representados según el diagrama de Kendall, 1998 (explicación en el texto).	104

Figura 55. Imágenes interpretadas de satélite de agosto de 2021: temperatura (arriba) y clorofila a (abajo).....	108
Figura 56. Imágenes interpretadas de satélite para estimación de clorofila a en diferentes momentos del periodo de estudio, y valores evolución de los valores medios	109
Figura 57. Representación de los procesos hídricos principales en el modelo SWAT	111
Figura 58. Subcuencas del sistema hidrológico del Val en M1 (A), M1 – R5 (B), R5 – R1 (C).....	114
Figura 59. Subcuencas del sistema hidrológico del Val en R1 - CED (A), M2 – R11 (B).....	114
Figura 60. Serie de datos de precipitación (azul), caudal observado (rojo) y simulado con SWAT (verde) en R1 (río Val a la entrada del embalse).....	115
Figura 61. Simulación de la concentración de fósforo total (TP) y nitrógeno total (TN) en R1 (rojo) frente a la interpolación de los datos procedentes de análisis de laboratorio (azul).....	116
Figura 62. Representación del módulo relativo a los flujos de agua en el modelo ECOMOD_Val.	118
Figura 63. Representación del módulo relativo a los flujos de nutrientes en el modelo ECOMOD_Val. .	119
Figura 64. Representación del módulo relativo a la excreción de nutrientes por los peces en el modelo ECOMOD-Val.	119
Figura 65. Concentración de nutrientes en las entradas al embalse de El Val (explicación en el texto).	120
Figura 66. Cargas de TP y TN y contribuciones relativas al embalse de las diferentes fuentes de aportación (explicación en el texto).....	122
Figura 67. Distribución temporal de las cargas de P y N según fuentes de aportación.	123
Figura 68. Detalles de la batimetría y modelo digital del terreno utilizado para la simulación	125
Figura 69. Disposición de los órganos hidráulicos de la presa de El Val.	127
Figura 70. Representación 2.5D de las series de datos de temperatura, oxígeno disuelto y clorofila a de la sonda Aquadam (septiembre de 2018 a febrero de 2022), utilizadas para la simulación	128
Figura 71. Representación de algunos de los perfiles verticales de datos fisicoquímicos en diferentes estaciones del embalse (E1 a E4), utilizados para la simulación	129
Figura 72. Representación de las variables que determinan la densidad del agua en las entradas al embalse	130
Figura 73. Representación de los datos meteorológicos utilizados para la simulación.....	130
Figura 74. Comparación del resultado de la simulación de la temperatura del agua (arriba) y de los datos registrados por la sonda Aquadam (abajo).	131

Figura 75. Simulación de la mezcla de aguas de diferente origen en la zona de presa (arriba) y de cola (abajo). Año 2021.	134
Figura 76. Simulación de la circulación de los influjos a lo largo del periodo de estratificación. Captura de vídeo de agosto de 2020 (arriba) y 2021 (abajo).	136
Figura 77. Comparación de escenarios hidráulicos (año 2020 arriba, y 2021 abajo). Explicación en el texto.	138
Figura 78. Comparación de escenarios actual (Test1) y con tratamiento terciario en EDAR de Ágreda-Ólvega (Test 2) en el año 2020 (arriba) y 2021 (abajo). Explicación en el texto.	139
Figura 79. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la temperatura (°C) del embalse (color).	140
Figura 80. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en el embalse (color).....	141
Figura 81. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la concentración de clorofila-a ($\mu\text{g-Chl}a \text{ L}^{-1}$) en el embalse (color).....	141
Figura 82. Estimación de la concentración media anual de PT en el embalse de El Val como consecuencia de los diferentes escenarios de actuación comentados. Se representa la media y la desviación estándar en la serie de datos del periodo.	144

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye el primer informe, relativo a los trabajos realizados durante el periodo 2020-2022, correspondiente a la ejecución de la Asistencia Técnica para el DESPLIEGUE Y CALIBRADO DE UNA INFRAESTRUCTURA VIRTUAL PARA LA REVERSIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE DE EL VAL (ZARAGOZA), con CLAVE 2019-PCV-30, adjudicado a Ecohydros, S.L. con fecha de 25 de marzo de 2020.

En el año 2017 la Confederación Hidrográfica del Ebro promovió un estudio preliminar del estado de calidad del embalse de El Val. En dicho estudio se concluyó que el embalse presenta un estado de eutrofia y un potencial ecológico moderado, debido a una aportación excesiva de fósforo. Se apuntaban además una serie de posibles causas que era necesario estudiar con mayor detenimiento y mediante herramientas cuantitativas. En dicho Estudio y en los trabajos complementarios realizados posteriormente, se aporta información de aspectos parciales, relativos a la limnología de la masa de agua y a las aportaciones de nutrientes estimadas en su cuenca de drenaje.

Como consecuencia, y con el fin último de optimizar las medidas correctoras en un programa de carácter adaptativo, se planteó la necesidad de acometer estudios de mayor resolución espacio-temporal para acotar la importancia cuantitativa de los diferentes agentes causales y modificadores de la respuesta de la masa de agua en el aspecto de la eutrofización.

Esta necesidad es aún más firme por el hecho de que este embalse ha sido incluido en la lista de Zonas Sensibles (Resolución de 6 de febrero de 2019, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por la que se declaran zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias). Esto obliga a prever tratamientos adicionales de las aguas residuales urbanas para la eliminación de nitrógeno, fósforo o ambos y, en su caso, demás sustancias pertinentes, y también puede conllevar la imposición en las autorizaciones de vertido de requisitos más rigurosos para garantizar que las aguas receptoras cumplan con las normas de calidad ambiental fijadas en la normativa vigente.

2. OBJETO

El objetivo operativo del contrato es poner en marcha y explotar un sistema de información limnológica de la cuenca y embalse de El Val, así como las herramientas de simulación validadas necesarias para diseñar medidas correctoras de carácter adaptativo, es decir, que se puedan modular en función de la información más reciente, todo ello con el fin de revertir el proceso de eutrofización del embalse y el cumplimiento de los objetivos medioambientales según la legislación vigente. En su conjunto, el sistema puesto en marcha mediante este contrato constituirá una infraestructura virtual para optimizar la gestión del problema de la eutrofización de este embalse.

Con este fin, se plantearon los siguientes hitos parciales:

- i. Despliegue, calibrado y explotación de estaciones de monitorización de alta frecuencia en las entradas hídricas superficiales al embalse y de un sistema asociado de información limnológica del embalse, accesible desde un portal WEB en tiempo cuasi-real.
- ii. Instalación, mantenimiento y explotación hasta el final de la vigencia del contrato de las estaciones necesarias para completar la información que proporcionan las ya existentes (perfiladora en embalse, meteorológicas y aforos).
- iii. Muestreo en los ríos tributarios para análisis de parámetros físico-químicos y de componentes del agua que sirven de base para obtener estimaciones validadas de nutrientes en dichos flujos de agua.
- iv. Puesta en marcha de un sistema de información limnológica que consta de una base de datos, un procedimiento de tratamiento y curación de esos datos y una serie de indicadores sobre el estado hidromorfológico y de eutrofización del embalse.
- v. Seguimiento bidimensional (en planta) del estado trófico y de la temperatura y turbidez en el embalse mediante imágenes de satélite.
- vi. Validación de un modelo de aportaciones de nutrientes en la cuenca, a partir de información previa y de nueva generación.
- vii. Configuración, calibrado y validación de un modelo hidrodinámico y biogeoquímico 3D del embalse.
- viii. Ensayo de escenarios apoyado en simuladores de los hitos precedentes y definición de medidas correctoras con carácter adaptativo, es decir, modulables por el marco hidro-meteorológico vigente.



3. ANTECEDENTES Y FUENTES DE INFORMACIÓN

En este apartado se facilita una revisión de los estudios y datos previos disponibles y de los proveedores de datos a utilizar en el estudio, incluyendo los que el propio trabajo generará, para facilitar su encuadre y la visión global.

En el seguimiento del potencial ecológico de masas de agua muy modificadas que mantiene la CHE desde el año 2010 (y en estudios anteriores) se ha constatado que el embalse de El Val no alcanza el buen potencial ecológico debido a un proceso de eutrofización.

Las causas de ese estado, que impide el cumplimiento de los Objetivos Medioambientales (OMA), no eran evidentes, aunque desde el punto de vista cualitativo se reconocía que los vertidos de aguas residuales urbanas de las poblaciones de Ólvega y Ágreda (y de la actividad industrial en estas localidades) podrían estar aportando una carga de nutrientes excesiva, y también se sospechaba de la presión de la intensa actividad ganadera en la cuenca como un potencial factor de presión.

Con el fin de realizar una primera acotación de estas causas, en el año 2017 la Confederación Hidrográfica del Ebro promovió un estudio preliminar de los factores que podrían explicar el deficiente estado del embalse de El Val. En dicho estudio se pusieron en evidencia una serie de presiones que intervenían en mayor o menor medida, dependiendo de la época del año y de las condiciones hidrometeorológicas, en el proceso de eutrofización del embalse y también en el déficit registrado de potencial ecológico. También se realizó una primera aproximación semicuantitativa a la carga de fósforo que recibe el embalse y su origen, es decir, de la importancia relativa de las fuentes generadoras y de exportación de este macronutriente.

Las principales conclusiones que se derivaron de dicho Estudio son las siguientes:

- i. La carga de fósforo que recibe el embalse resulta excesiva, causando la eutrofia de la masa y un potencial ecológico *Moderado*, lo que conlleva además un cierto riesgo de sufrir proliferaciones de cianobacterias potencialmente tóxicas.
- ii. La actividad ganadera puede suponer hasta el 38% de la carga anual de fósforo.
- iii. En un periodo más concreto y sensible (meses de mayo a septiembre, ambos inclusive), en el que la columna de agua se encuentra estratificada, el vertido de la EDAR de Ágreda-

Ólvega supone aproximadamente el 40% de la aportación de fósforo y la piscifactoría de Vozmediano el 21%.

- iv. En años secos el trasvase del Queiles adquiere mayor importancia, y en esa situación la piscifactoría de Vozmediano representa en torno al 38% de la aportación total de fósforo al embalse y tiene el mismo peso que la EDAR de Ágreda-Ólvega.
- v. El manejo activo de las poblaciones de peces del embalse, compuestas por especies exóticas invasoras resulta interesante como medida adyuvante porque no solamente contribuye a bajar la concentración media de fósforo en la columna de agua, sino que también reduce la biodisponibilidad del nutriente para el fitoplancton.
- vi. Se plantea alcanzar el objetivo de mesotrofia según la escala de la OCDE ($PT < 35 \mu\text{g/L}$), al menos durante el periodo de estratificación.
- vii. Para alcanzar dicho objetivo, se estima conveniente realizar estudios de mayor resolución, que permitan simular la dinámica de los nutrientes en la cuenca y del fitoplancton en el embalse, como forma más eficiente para optimizar las inversiones en actuaciones correctoras.

Posteriormente, se revisó la información necesaria para realizar las simulaciones con las características requeridas para alcanzar estimaciones cuantitativas basadas en datos de calidad tomados en el terreno y se estimó la necesidad de adquirir nueva información y datos, así como de habilitar nuevas instalaciones para generarlos. Una parte de esa información y fuentes de datos ya estaban disponibles y otros se han generado en el presente contrato.

En el cuadro siguiente (Tabla 1) se facilita un resumen de todas las unidades de información localizadas (históricas, presentes o incluidas en la presente licitación) y su procedencia, lo que a su vez permite poner en perspectiva los trabajos contenidos en el presente Estudio.

Las celdas resaltadas en color corresponden a actividades de generación de datos que se han puesto en marcha en el transcurso del presente trabajo.



ÁMBITO	PUNTOS	PARÁMETROS/ANALÍTICAS	FUENTE	ESTRATEGIA	FRECUENCIA
CUENCA HIDROGRÁFICA (METEOROLOGÍA)	Estaciones AEMET (3)	Temperatura y precipitación. Radiación solar, nubosidad	AEMET	-	Horaria
CUENCA HIDROGRÁFICA (GANADERÍA)	Estabulaciones en la cuenca	Cabezas de ganado por tipos y pauta manejo de los residuos: Se asume aplicación discrecional a campos de cultivo	Confederación Hidrográfica del Ebro (2017). Estudio del Estado Trófico del Embalse de El Val y Programa de Medidas	-	Estática
RÍOS	CEMAS: 1351 - 1250 - 0090	Temp, pH, Cond, O.D., DBO5, N total, NOx, NH4, P total, PRS	Redes de control de masas de aguas superficiales (CEMAS) de la CHE	Nivel, conductividad y temperatura en continuo. Analíticas quincenales entre mayo y octubre, según	Según parámetros y estación
	Entradas del río Val y derivación del Queiles al embalse	Caudal	Estaciones de aforos a ejecutar por la CHE (en su ausencia, nivel y curva de gasto en este trabajo)	Nivel y curva de gasto o estación de aforos de obra	Continua (diezminutal)
		Físico-químicos in situ (Temp., Cond., pH, ORP, Turbidez)	Estaciones de control a instalar en este trabajo	Estaciones automáticas de monitorización	Mínima horaria
		N total, NOx, NH4, P total, PRS, Si	Licitación actual y laboratorio de la CHE	Analíticas quincenales entre mayo y octubre, según situaciones a cubrir el resto del año (estimadas 18 en total)	Discrecional
	Diferentes fuentes y puntos de control en la cuenca y embalse	Isótopos estables de N y P para verificar reparto entre origen ARU, industrial y ganadero	Datos de un muestreo en CHE (2018). Estudios complementarios modelización embalse de El Val (Zaragoza). A completar en presente trabajo	Muestreo y análisis en unos 20 puntos de agua, suelo o residuos	Estacional
VERTIDOS	EDAR AGREDA	pH, DBO, DQO, SS	Titular de la actividad: Declaraciones analíticas	Envío de terceros	Mensual
	EDAR AGREDA	pH, DBO, DQO, SS, P total, N total, NOx, amonio	Resultados Analíticos CHE Y ECAH's		Discrecional
	EDAR AGREDA	Físico-químicos in situ (Temp., Cond., pH, ORP, Turbidez)	Estaciones de control a instalar en este trabajo	Estaciones automáticas de monitorización en entrada y salida de EDAR	Mínima horaria
	PISCIFACTORÍA VOZMEDIANO	T, pH, DBO, SS, P total, N total, amonio	Titular de la actividad: Declaraciones analíticas	Envío de terceros	Mensual
	PISCIFACTORÍA VOZMEDIANO	pH, DBO, DQO, SS, P total, N total, NOx, amonio	Resultados Analíticos CHE Y ECAH's	Analíticas quincenales entre mayo y octubre, según situaciones a cubrir el resto del año (estimadas 18 en total)	Discrecional
	PISCIFACTORÍA VOZMEDIANO	T, Cond, TUR, NOx, NH4, PRS	Nuevos parámetros	Analíticas integradas durante un ciclo de 24 h durante al menos una semana en 4 momentos representativos de estacionalidad	Discrecional
EMBALSE	Red SAIH (Presa de El Val)	Temperatura, precipitación y viento (velocidad y dirección)	CHE: Datos meteorológicos en la estación de presa	Automático	Diario
	Presa y azud	Volumen, aportación y salida total. Apertura compuertas derivación	CHE: Datos de explotación hidráulica del embalse y de derivación del azud del Queiles	Automático	Diario
	Presa	-	CHE: Datos físico-químicos y de clorofila <i>a</i> en perfiles verticales (metro a metro) en la presa	Automático	4 perfiles diarios
	Cabecera, zona intermedia y cola de embalse	Disco de Secchi, perfiles de CTD, OD, pH, PAR, TUR y clorofila a por fluorescencia. Fitoplancton y nutrientes (N y P) integrada en zona fótica (mejor en dos niveles concretos que integrada, una de ellas en el pico de fluorescencia) y nutrientes en 2 o 3 niveles del hipolimnion (según distancia al fondo y turbidez). Sedimentos en varios puntos a definir para análisis de granulometría y formas de fósforo (mejor con Fe también).	Muestreos limnológicos CEMAS y complementarios 2018 laboratorio CHE. Licitación actual (2020-21)	4 muestreos durante el periodo de estratificación, al menos 6 en total	Discrecional
	Puntos discretos	Disco de Secchi, mediciones en superficie de CTD, OD, pH, PAR, TUR, clorofila <i>a</i> , ficocianinas y CDOM por fluorescencia	Licitación actual	8 campañas en al menos 6 puntos del embalse a establecer según necesidades de calibrado de imágenes de satélite	Discrecional
	Todo el embalse		CHE, 2018: Batimetría, tipos de sustrato y peces	Una vez	Fijo

Tabla 1. Resumen de todas las fuentes de información localizadas y de su procedencia (en el apartado 6.3. se puede encontrar una descripción de los parámetros citados y sus unidades de medida).

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

El presente estudio se circunscribe al embalse de El Val y su cuenca de drenaje, que incluye tanto la del río Val como la del Queiles hasta el azud desde el que se deriva agua al embalse.

El embalse de El Val se localiza en el término municipal de Los Fayos, en la provincia de Zaragoza, se sitúa a una altitud de 629 m sobre el nivel del mar y recoge las aguas del río Val (en cuyo cauce se asienta la presa), más los aportes desde el río Queiles a través de un canal de trasvase desde un azud de derivación ubicado en este río.

Este embalse se sitúa relativamente cerca de las fuentes de dichos ríos, al pie de la Sierra del Moncayo por su cara occidental, aguas arriba de la localidad de Tarazona.

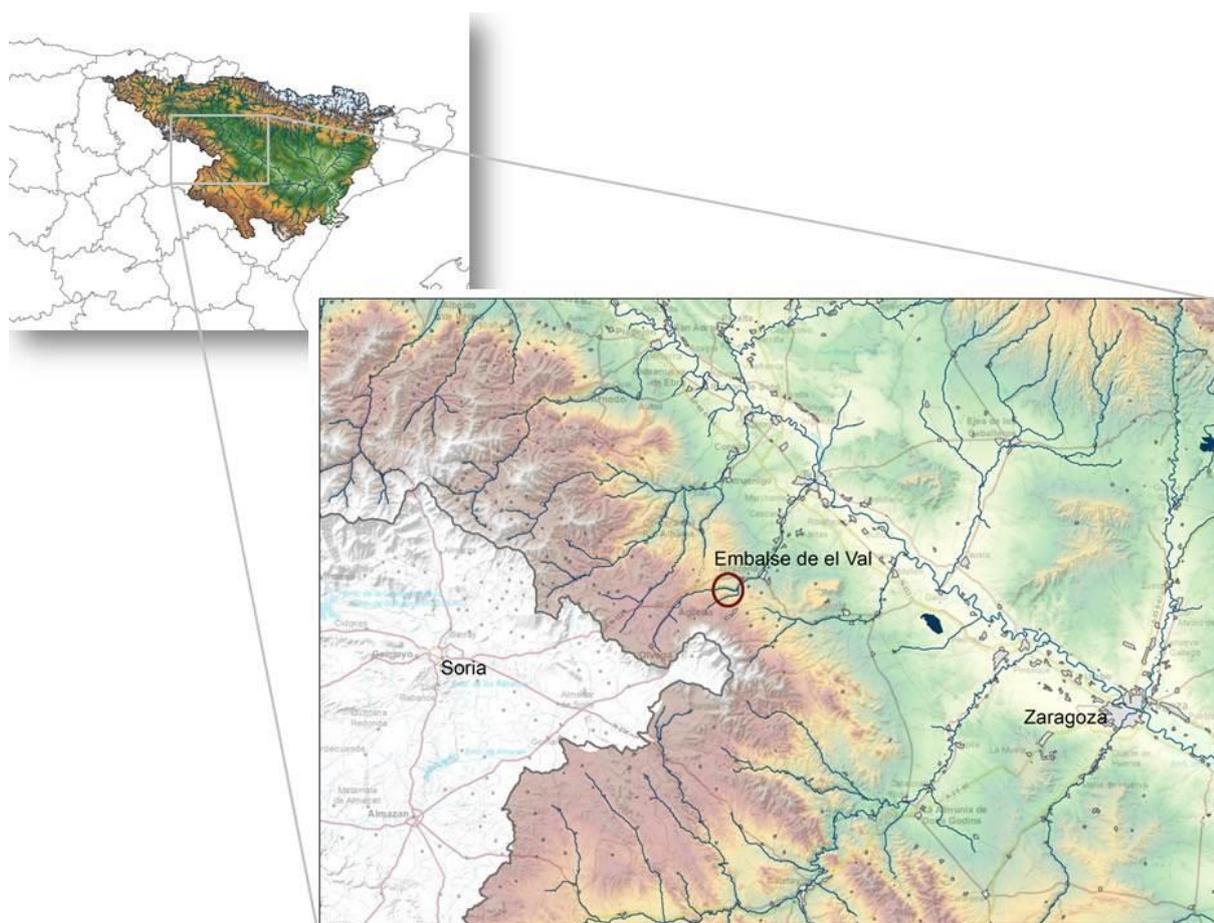


Figura 1. Situación del embalse y cuenca de El Val en la Demarcación Hidrográfica del Ebro

El río Val nace en la fuente Vomitrosa en el término de Ólvega (provincia de Soria) y recorre un tramo de poco más de 30 km antes de alcanzar el embalse del mismo nombre. La mayor parte de su no muy abundante caudal surge en los manantiales de los Ojos, en las inmediaciones de Ágreda; aguas arriba de esta surgencia, el río tiene un régimen hídrico intermitente.

Aguas abajo de la localidad de Ágreda transita por un profundo barranco hasta el embalse, recibiendo los aportes de varios afluentes menores e intermitentes. Poco antes de alcanzar el embalse abandona la provincia de Soria y entra en territorio aragonés.

Además, el embalse recibe la aportación de un trasvase de aguas desde un azud situado en el río Queiles a través del canal de derivación de Los Fayos (Zaragoza), situado al sur del embalse. Este río tiene su nacedero natural en el manantial de Vozmediano, principal punto de descarga del acuífero del Karst del sur y oeste del Moncayo, razón por la que tiene un caudal bastante sostenido de unos 1.100 L/s, que es del orden de 5 veces superior al del río Val.

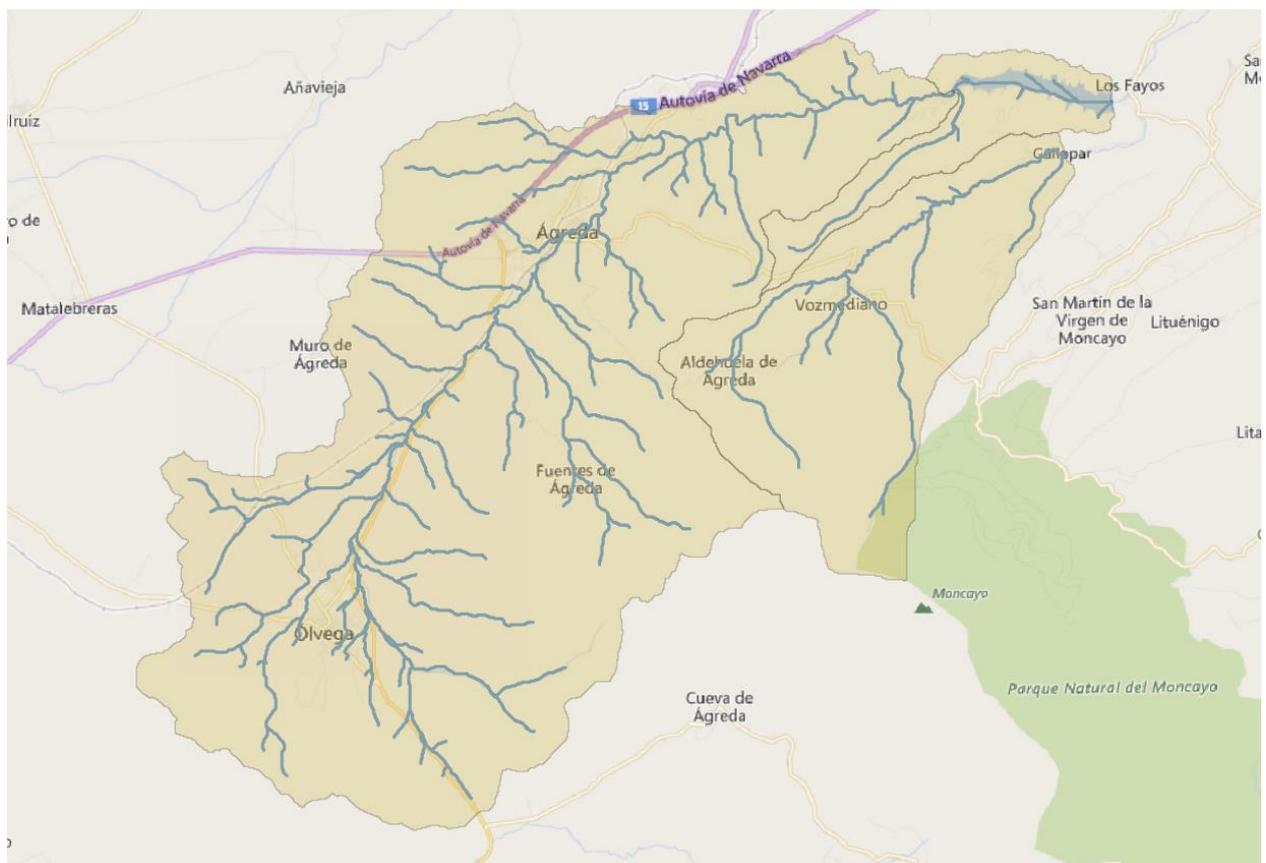


Figura 2. Cuenca de drenaje efectiva (incluye el río Queiles hasta el azud) del embalse de El Val

5. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA GENERAL

Con el fin de proporcionar una mejor idea de la forma en que los distintos procesos y tareas que se describen en los apartados siguientes se relacionan y nutren entre sí, se facilita en este apartado una descripción del conjunto de procesos y datos implicados y las relaciones de precedencia que se dan entre ellos (figura 3).

En color granate se disponen las fuentes de información de distinto tipo que se utilizan para configurar y calibrar las diferentes herramientas de simulación, y que proporcionan datos generados en los diferentes controles y muestreos y en otros estudios y redes existentes.

En azul se representan los procesos y módulos parciales de simulación, que confluyen en las entradas al embalse (modelado hidrológico y de nutrientes en la cuenca) y/o afectan directamente al propio embalse (modelo hidrodinámico 3D y de calidad 1D).

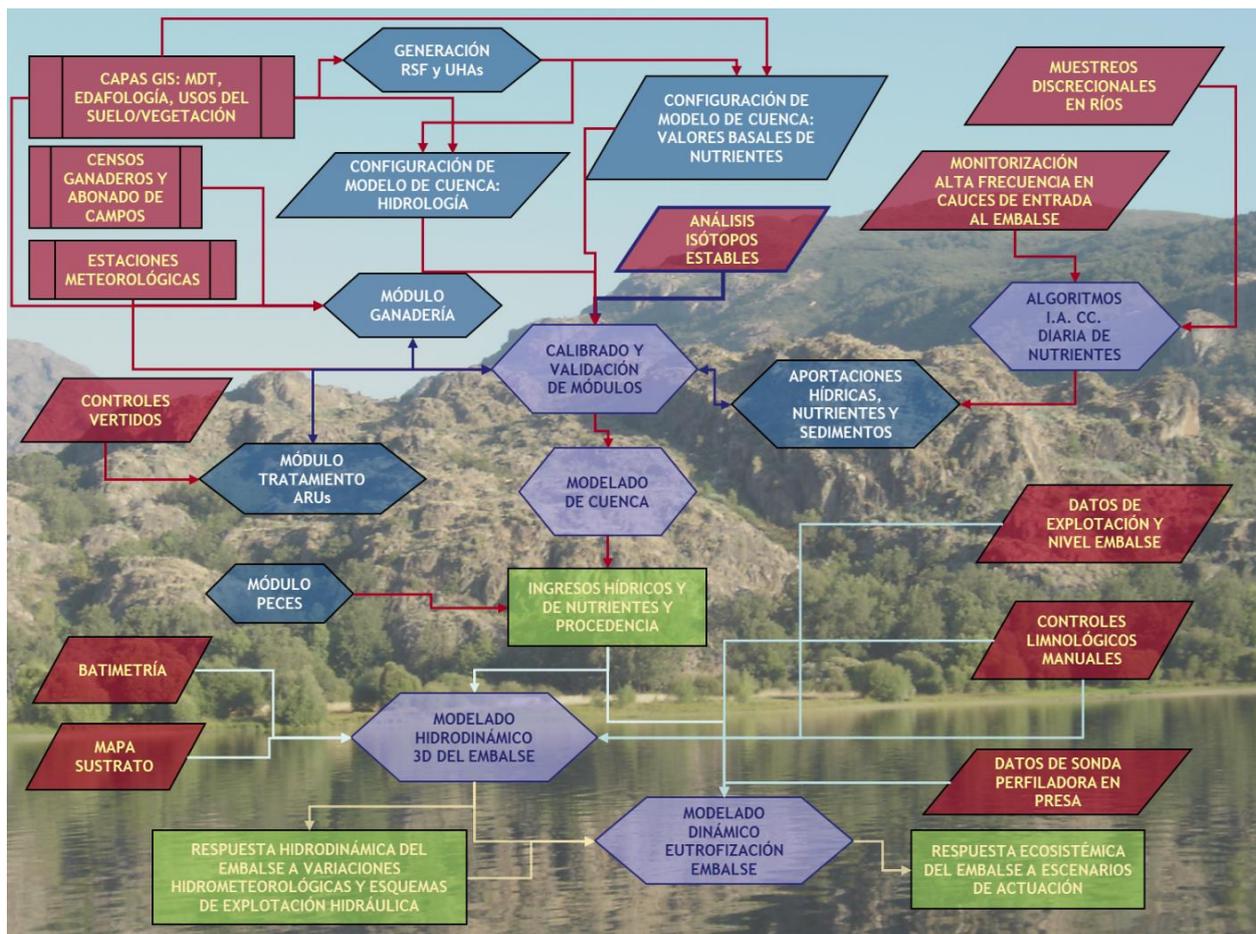


Figura 3. Esquema de organización de flujos de datos, procesos de modelado e hitos (objetivos finales)



En color violeta están los ámbitos de los cinco procesos principales de modelado:

- i. **ALGORITMOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL** aplicados a los datos de alta frecuencia en las estaciones de monitorización continuada del río Val y del trasvase del Queiles, a su entrada en el embalse. Se nutren de los análisis de laboratorio y del autoanizador de nutrientes en campo (“Muestreos discrecionales en ríos”). El objetivo es obtener estimaciones de la concentración media diaria de nutrientes y sedimentos en esas entradas principales al embalse. Incluye también el caudal, que se medirá directamente mediante estaciones de aforo o sensores de nivel y curva de gasto.
- ii. **CALIBRADO Y VALIDACIÓN DE MÓDULOS DE SIMULACIÓN EN LA CUENCA:** Caudal, ganadería, usos del suelo y vertidos de aguas residuales. Para ello, se utilizarán los análisis de isótopos estables, que aportarán información sobre la procedencia de las diferentes fuentes de aportación de nutrientes. Aunque no está representado explícitamente en el diagrama, esa asignación por orígenes se realizará aplicando modelos bayesianos de mezcla a los datos de isótopos estables.
- iii. **MODELADO DE CUENCA:** El simulador de aportación de nutrientes al embalse, debidamente calibrado, permitirá generar valores diarios de caudal, nutrientes y sedimentos bajo diferentes escenarios hidrometeorológicos y de presiones, incluyendo las actuaciones correctoras que se pretenda ensayar. Como consecuencia, se obtendrán las cargas de nutrientes que recibe el embalse, su vía y procedencia (caja verde de INGRESOS), una vez añadida la salida del módulo de peces (aportación de nutrientes a la columna de agua debida a la actividad fisiológica de las poblaciones de peces del embalse), que se trata como una aportación exógena más.
- iv. **MODELADO HIDRODINÁMICO 3D DEL EMBALSE:** Incorpora la información topobatimétrica, tipo de sustrato y entradas y salidas hidráulicas como contorno físico, y la salida del modelo de cuenca en los flujos de entrada al embalse, los datos de explotación hidráulica y las condiciones meteorológicas y de radiación como condiciones de contorno en la simulación. La calibración se realiza con apoyo en los perfiles manuales y automáticos y registro del nivel del agua en el embalse.

- v. **MODELADO DINÁMICO DE LA EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE:** Enlaza dinámicamente con el modelo hidrodinámico y superpone las aportaciones de los nutrientes. Para el calibrado y validación utiliza los datos de perfiles automáticos en la presa y de los muestreos limnológicos que se realizan en el embalse (perfiles físico-químicos, transparencia, nutrientes en la columna de agua y sedimentos y biomasa del fitoplancton).

Por último, en las cajas de color verde figuran los tres productos principales que se podrán alcanzar gracias a estos trabajos:

- i. Cargas en función de la hidrometeorología, usos del suelo, manejo ganadero y vertidos e importancia de las fuentes de aportación de nutrientes.
- ii. Comportamiento hidrodinámico del embalse en función de la variabilidad hidrometeorológica y del manejo hidráulico.
- iii. Respuesta ecosistémica (en términos de eutrofización) a los escenarios de actuación o corrección que se definan y ensayen, dentro de un proceso de optimización de las medidas correctoras y en un contexto de gestión adaptativa.

6. ACTIVIDADES REALIZADAS

6.1. RECONOCIMIENTO PREVIO

Durante el día 27 de mayo de 2020, el equipo técnico de Ecohydros realizó una visita a la cuenca con el fin de reconocer cada uno de los puntos de muestreo planteados previamente, y asentarlos en la planificación definitiva del Proyecto. En el APÉNDICE I se facilitan detalles e imágenes de los puntos de muestreo revisados durante esta visita.

Como resultado de esta visita, se completó la tabla de puntos de muestreo incorporando la información adicional requerida por el laboratorio para el correcto procesado de las analíticas (Tabla 2).

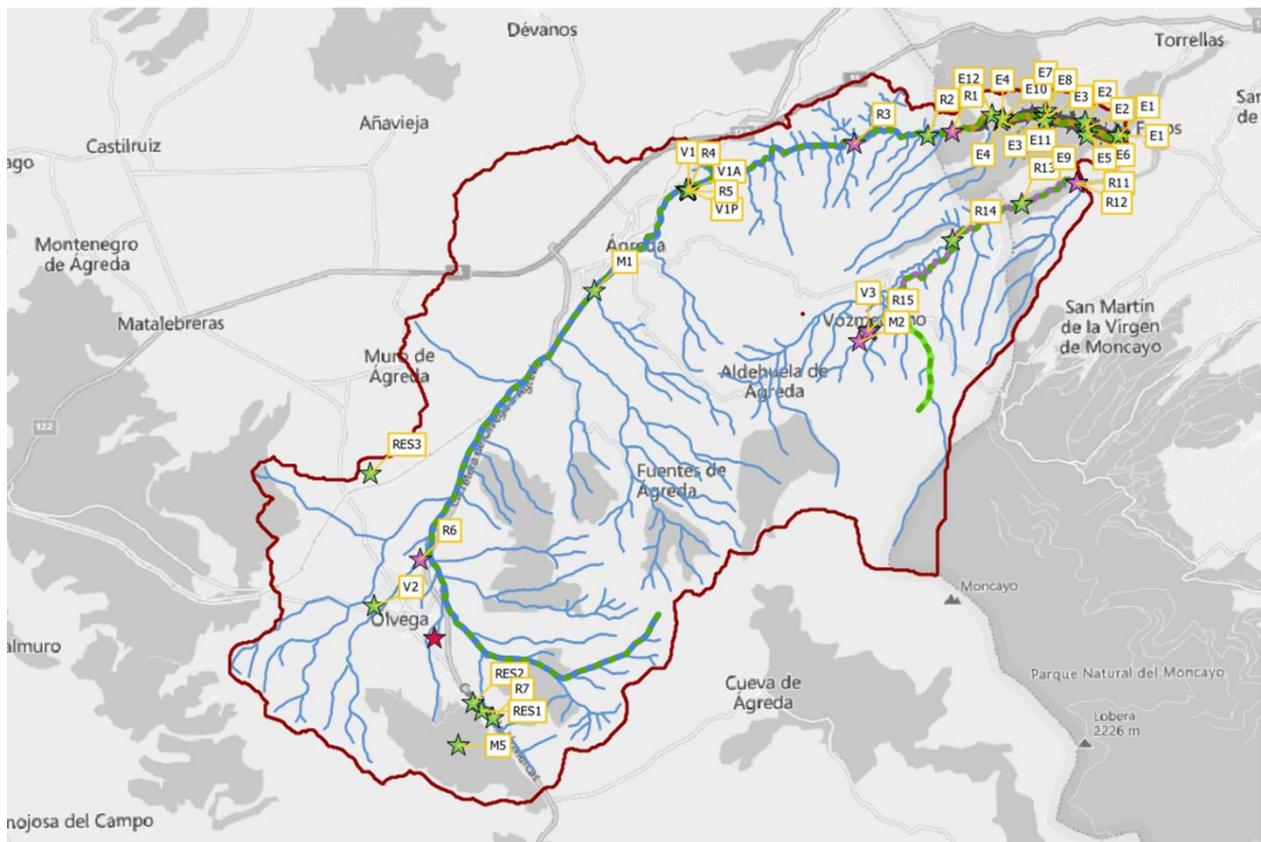


Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo seleccionados

Tabla 2. Puntos de muestreo del proyecto

ESTACION	COD_MASA	COD_PUNTO	CUENCA	CATEGORIA	UTM_X	UTM_Y	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA	COD_CEMAS
E1	ES091MSPF68	E1	VAL	EMBALSE	600462	4636762	Estación E1 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3115-FQ
E1	ES091MSPF68	E1	VAL	EMBALSE	600462	4636762	Estación E1 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3116-FQ
E2	ES091MSPF68	E2	VAL	EMBALSE	599731	4636934	Estación E2 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3116-FQ
E2	ES091MSPF68	E2	VAL	EMBALSE	599731	4636934	Estación E2 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3116-FQ
E3	ES091MSPF68	E3	VAL	EMBALSE	598808	4637210	Estación E3 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3117-FQ
E3	ES091MSPF68	E3	VAL	EMBALSE	598808	4637210	Estación E3 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	3117-FQ
E4	ES091MSPF68	E4	VAL	EMBALSE	597856	4637157	Estación E4 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	No
E4	ES091MSPF68	E4	VAL	EMBALSE	597856	4637157	Estación E4 del embalse de El Val	Los Fayos	Zaragoza	No
M1	-	M1	VAL	MANANTIAL	588651	4633241	Manantial Ojillos de Agreda	Los Fayos	Zaragoza	No
M2	-	M2	QUEILES	MANANTIAL	594626	4632098	Nacimiento del Queiles. Equivale a entrada de piscifactoría	Vozmediano	Soria	No
R1	ES091MSPF68	R1	VAL	Río	596715	4636848	Río Val, entrada cola embalse	Los Fayos	Zaragoza	3119-FQ
R11	ES091MSPF300	R11	QUEILES	Río	599527	4635692	Azud del Queiles	Los Fayos	Zaragoza	3125-FQ
R12	ES091MSPF300	R12	QUEILES	Río	599525	4635690	Río Queiles aguas arriba azud, en miniazud para toma abastecimiento Tarazona	Los Fayos	Zaragoza	0090-FQ
R13	ES091MSPF300	R13	QUEILES	Río	598285	4635209	Río Queiles a la altura de "La Plana del Cerro", entre las estaciones R14 y R12	Los Fayos	Zaragoza	3126-FQ
R14	ES091MSPF300	R14	QUEILES	Río	596063	4633877	Río Queiles aguas abajo de Vozmediano, a la salida de la CH Queiles	Vozmediano	Soria	3127-FQ
R15	-	R15	QUEILES	Río	594882	4632447	Río Queiles, aguas abajo de piscifactoría	Vozmediano	Soria	3128-FQ



ESTACION	COD_MASA	COD_PUNTO	CUENCA	CATEGORIA	UTM_X	UTM_Y	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA	COD_CEMAS
R2	ES091MSPF861	R2	VAL	Río	596169	4636760	Río Val a la altura de "Los Valles", entre estaciones R3 y R1 (cola del embalse)	Ágreda	Soria	3120-FQ
R3	ES091MSPF861	R3	VAL	Río	594511	4636582	Río Val a la altura de "El Mojón", entre R4 (EDAR de Ágreda-Ólvega) y R2	Ágreda	Soria	3121-FQ
R4	ES091MSPF861	R4	VAL	Río	590793	4635544	Río Val, aguas abajo EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria	1351-FQ
R5	ES091MSPF861	R5	VAL	Río	590750	4635502	Río Val, aguas arriba EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria	3122-FQ
R6	ES091MSPF861	R6	VAL	Arroyo	584729	4627145	Arroyo de los Caños, aguas abajo del Polígono Industrial Emiliano Revilla, en Ólvega	Ólvega	Soria	3123-FQ
R7	ES091MSPF861	R7	VAL	Arroyo	586364	4623549	Nacimiento arroyo de La Vega en puerto de Carrascal	Ólvega	Soria	3124-FQ
RES1	-	RES1	VAL	Residuo	586110	4623713	Granja de gallinas	Ólvega	Soria	No
RES2	-	RES2	VAL	Residuo	585916	4623892	Granja conejos	Ólvega	Soria	No
RES3	-	RES3	VAL	Residuo	583602	4629095	Balsa purín granja de cerdos	Ólvega	Soria	No
V1	ES091MSPF861	V1	VAL	Vertido	590774	4635521	Vertido EDAR Agreda	Ágreda	Soria	2014-S-900
V1P	ES091MSPF861	V1P	VAL	Vertido	590726	4635537	Influente EDAR Agreda (o	Ágreda	Soria	2014-S-900
V1A	ES091MSPF861	V1A	VAL	Vertido	590774	4635520	Vertido en alivio - bypass. En principio es equivalente al V1P	Ágreda	Soria	2014-S-900
V2	-	V2	VAL	Vertido	583689	4626093	Vertido fábrica de quesos Saiona (Pol. Ind. Ólvega)	Ólvega	Soria	No
V3	-	V3	QUEILES	Vertido	594829	4632327	Salida desagüe piscifactoría. Expdte. Vertido 2012s362 correspondiente a Eurotrucha, la piscifactoría de Vozmediano	Vozmediano	Soria	2012-S-362



ESTACION	COD_MASA	COD_PUNTO	CUENCA	CATEGORIA	UTM_X	UTM_Y	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA	COD_CEMAS
V4		V4	VAL	Vertido	586462	4623343	Referencia 2016-S-387 de autorización de vertidos	Ólvega	Soria	No
V1_CHE			VAL	Vertido	590770	4635531	Punto de vertido EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria	No
R4_CHE	ES091MSPF861		VAL	Río	590820	4635574	Río Val, unos 50 metros aguas abajo del vertido	Ágreda	Soria	No
R1_CHE	ES091MSPF68		VAL	Río	596715	4636850	Río Val aguas arriba del embalse	Los Fayos	Soria	No
R0300		0090-FQ	QUEILES	Río	599432	4635737	Río Queiles, captación abastecimiento Mancomunidad de Aguas del Moncayo / Azud alimentación Emb. del Val (FQ)	Los Fayos	Soria	No
R0861	ES091MSPF861	1351-FQ	VAL	Río	590793	4635543	Río Val desde su nacimiento hasta su entrada en el embalse de El Val	Ágreda	Soria	No
R0861	ES091MSPF861	1351-BIO	VAL	Río	590793	4635544	Río Val desde su nacimiento hasta su entrada en el embalse de El Val	Ágreda	Soria	No
M3		2413-8-0013	VAL	MANANTIAL	589055	4633630		Ágreda	Soria	No
M2_CHE		2413-8-0001	VAL	MANANTIAL	594611	4632081	Mismo punto que M2, generar vínculo en resultados	Vozmediano	Soria	No
M4		2414-3-0002	VAL	MANANTIAL	586225	4623647		Ólvega	Soria	No
M1_CHE		2413-8-0002	VAL	MANANTIAL	588784	4633258	Mismo punto que M1, generar vínculo en resultados	Ágreda	Soria	No
S3		2414-3-0065	VAL	POZO	584168	4625335		Ólvega	Soria	No
S2		2414-3-0024	VAL	MANANTIAL	583212	4628418		Ólvega	Soria	No
S1		2413-8-0032	VAL	POZO	589446	4635120		Ágreda	Soria	No
S4		2414-3-0063	VAL	POZO	585516	4625089		Ólvega	Soria	No



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



6.2. DESPLIEGUE Y CALIBRADO DE ESTACIONES DE MONITORIZACIÓN Y DE SISTEMA DE INFORMACIÓN LIMNOLÓGICA DEL EMBALSE

6.2.1. Datos disponibles de repositorios externos

6.2.1.1. Sonda perfiladora Aquadam

Se ha establecido una conexión que permite descargar automáticamente en formato CSV los datos generados por una multisonda perfiladora instalada en la presa e integrada en la red SAICA de la CHE. La conexión ha sido habilitada y autorizada por el Centro de control SAICA-Ebro. Ofrece datos de los siguientes parámetros en cada metro de la columna de agua: Profundidad, temperatura, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, oxígeno disuelto, turbidez y fluorescencia de clorofila a.

Sobre estos datos se ha programado una aplicación que, además de incorporar los datos a la base de datos del proyecto, permite generar gráficos pseudo3D. Ver los ejemplos mostrados en la Figura 5 de datos recogidos de oxígeno disuelto (DO) y clorofila (CHLA) desde enero del 2019 hasta septiembre de 2021, que representan los datos de cada variable (escala de color) en profundidad (eje vertical) y a lo largo del tiempo (eje X).

Esta colección de datos, una vez verificada, depurada y calibrada con los resultados de las campañas de muestreo del proyecto, permite analizar la evolución del embalse a lo largo de los años.

DATOS SONDA AQUADAM PRESA

Programación gráficos DxT y valores asociados

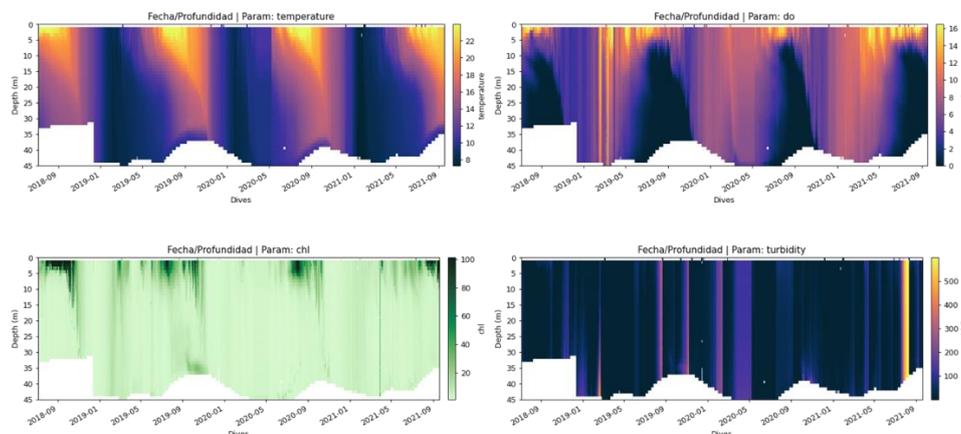


Figura 5. Ejemplo de representación gráfica pseudo3D de datos generados por la sonda Aquadam (temperatura, oxígeno disuelto, clorofila a y turbidez)

6.2.1.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos necesarios para el modelado se obtienen de las cinco estaciones meteorológicas funcionales en la cuenca y en sus cercanías (Figura 6). Tres de estas estaciones son accesibles desde la aplicación de la red SAIH de la CHE (ver apartado siguiente).

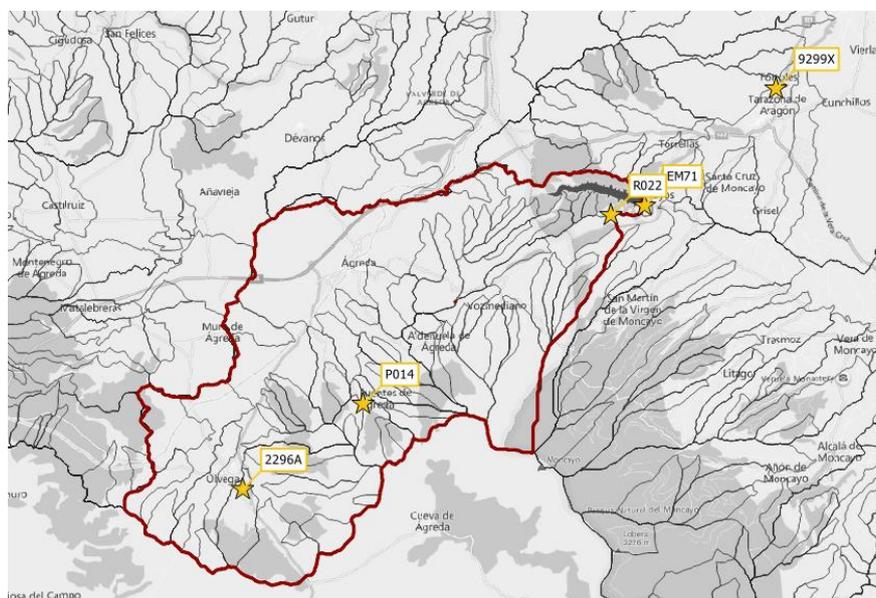


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas disponibles y utilizadas

En la tabla siguiente (Tabla 3) se facilitan los detalles de dichas estaciones:

Tabla 3. Detalles de las diferentes estaciones

ESTACION	UTM_X	UTM_Y	VAR_OBSVER	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA
2296A	585048	4625363	hHVmtTMpP	Estación automática AEMET: ÓLVEGA-CAMINO VEGAFRÍA	Ólvega	Soria
9299X	605873	4641096	hHBVmtTMpP	Estación automática AEMET: TARAZONA	Tarazona	Zaragoza
EM71	600742	4636495	PRESI;INSOL;TE MPE;HUMED;RA DIA;VVIEN;DVIE N;VMVIE;PQUIN	E071_Estación meteorológica embalse	Los Fayos	Zaragoza
P014	589747	4628716	PQUIN	P014_Fuentes_Agreda	Ágreda	Soria
R022	599426	4636130	TEMPE;PQUIN	R022_Repetidor	Tarazona	Zaragoza

6.2.1.3. Datos hidro-meteorológicos automáticos

Se ha obtenido un enlace FTPS proporcionado por el Centro de control de la Red SAIH de la CHE, que facilita acceso e incorporación a la base de datos del proyecto de la siguiente información:

- i. **Hidrometeorología en la cuenca:** Datos quinceminutales de las siguientes estaciones (Tabla 4) y variables:

Tabla 4. Listado de variables incorporadas al estudio

Código	Descripción variable	Unidades
E071T17NEMBA	NIVEL EMBALSE DEL VAL	msnm
E071T65VEMBA	VOLUMEN EMBALSE DEL VAL	hm ³
E071T75QENTE	CAUDAL ENTRADA EMBALSE DEL VAL	m ³ /s
E071T03QCAU1	Q CONDUCTO IZQ. ACQ. MAGALLON	l/s
E071T04QCAU2	Q CONDUCTO DRCH. ACQ. MAGALLON	l/s
E071T66QCAL1	CAUDAL TRASVASE QUEILES-VAL	m ³ /s
E071T09QCAU1	Q1.1 CAUDAL FONDO AZUD QUEILES	m ³ /s
E071T10QCAU2	Q1.2 CAUDAL FONDO AZUD QUEILES	m ³ /s
EM71T09PRESI	PRESIÓN ATMOSFERICA EL VAL	mbar
EM71T12INSOL	INSOLACIÓN ACUM.QM EL VAL	s
EM71T02TEMPE	TEMPERATURA AMB. EL VAL	°C
EM71T03HUMED	HUMEDAD RELAT. AIRE EL VAL	%
EM71T04RADIA	RADIACIÓN SOLAR EL VAL	w/m ²
EM71T05VVIEN	VELOCIDAD VIENTO EL VAL	m/s
EM71T06DVIEN	DIRECCIÓN VIENTO EL VAL	°
EM71T08VMVIE	VELOC. RACHA VIENTO EL VAL	m/s
EM71T85PQUIN	PRECIP. QM EMA VAL (BT)	mm
A174T65QRIO1	CAUDAL RÍO QUEILES EN LOS FAYOS	m ³ /s
R022T01TEMPE	TEMPERATURA AMB. REPETIDOR VAL	°C
R022T85PQUIN	PRECIP. QM EN REPETIDOR VAL	mm
R022T85PQUIN	PRECIP. QM EN FUENTES DE AGREDA (BT)	mm
PS01T03QCAL1	CAUDAL PISCIFACTORIA VOZMEDIANO (asociado a estación V3 del Estudio)	l/s

- ii. **Datos diarios de explotación hidráulica del embalse.** Para los datos diarios, el día 5 de cada mes se genera un fichero VAL_ECOHYDROS_DIARIO_MM AAAA.txt con los siguientes datos: Cota (msnm), volumen (hm³) entrada y salida (m³/s). En la Figura 7 se muestra un esquema de explotación hidráulica del embalse del Val (a) y la sección transversal del embalse (b).

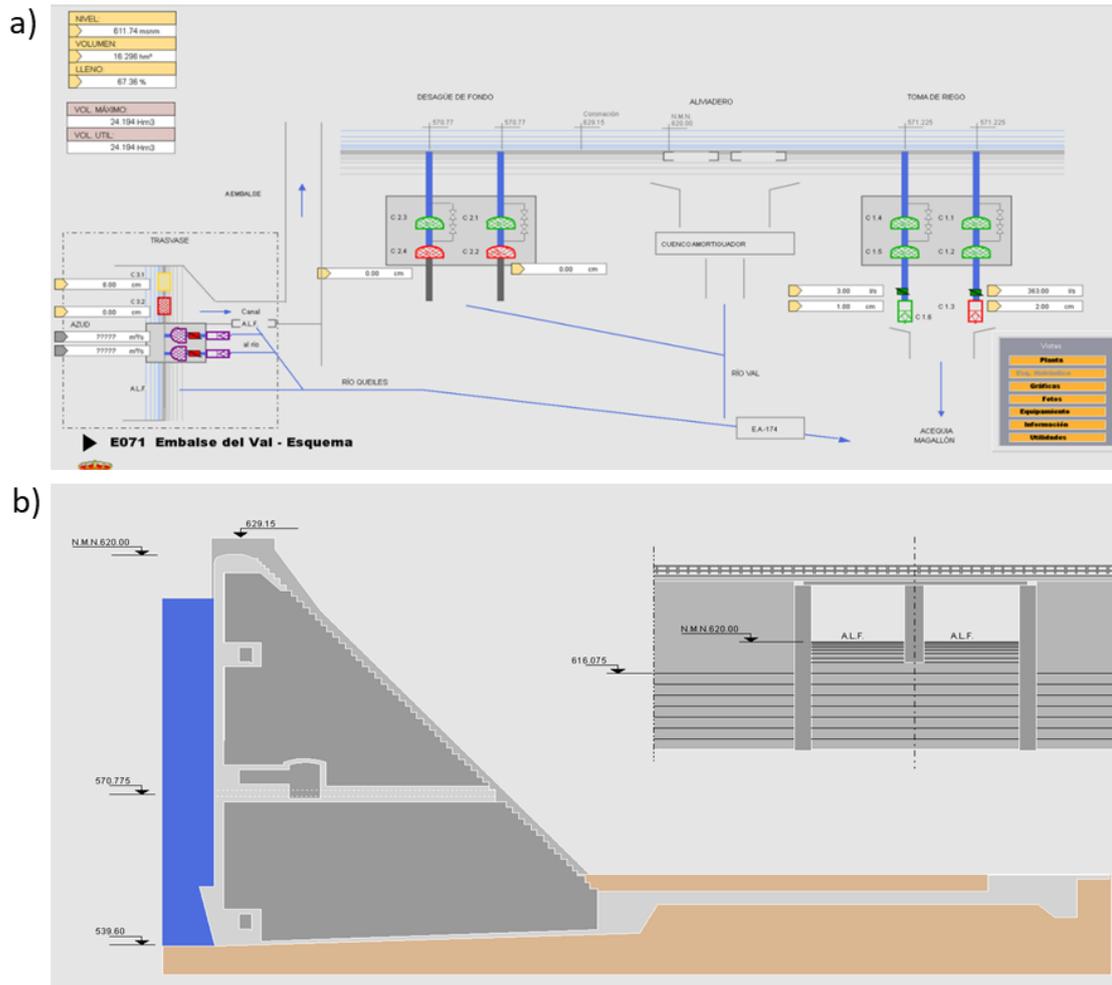


Figura 7. a) Esquema de explotación hidráulica del embalse del Val. b) Sección transversal del embalse del Val

Los pedidos de aportación hídrica aguas abajo se suministran a través de la acequia de Magallón.

- iii. **Datos de aforo en diferentes puntos de entrada del río Val.** Se está promoviendo un proyecto de la CHE para la instalación de una estación automática de aforo en el río Val a la entrada del embalse. Mientras tanto, se ha estado monitorizando en continuo el nivel del río y realizando periódicamente mediciones de caudal (ver apartado siguiente).

6.2.2. Despliegue de estaciones remotas para generación de datos in situ

Partiendo de las 2 estaciones de monitorización remota de alta frecuencia designadas como imprescindibles para controlar los dos influjos hídricos del embalse (Río Val y trasvase del Queiles), se ha alcanzado el objetivo de desplegar un total de 3 estaciones en los siguientes

puntos de muestreo: estación 1 (R5, R4 y V1); estación 2 (R1) y estación 3 (R11). La Figura 8 muestra la ubicación de las estaciones de monitorización en continuo.

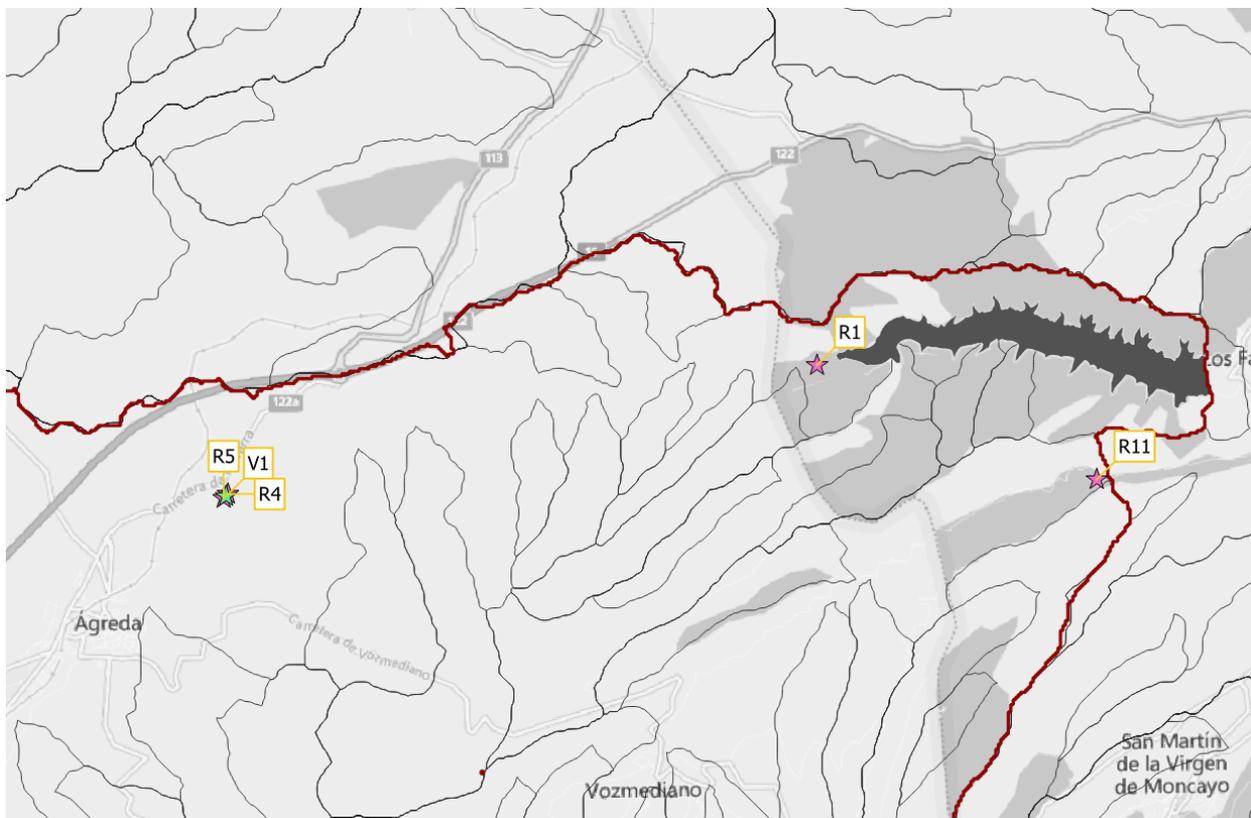


Figura 8. Ubicación de las estaciones de monitorización en continuo

Dado que los plazos administrativos y el necesario desarrollo técnico de las soluciones adaptadas a cada uno de los puntos y situaciones condicionaban el despliegue de los dispositivos y el inicio de la monitorización remota, se optó por habilitar un dispositivo portátil con un juego completo de sensores, que ha servido como base de medición durante los muestreos de agua en los futuros puntos de monitorización.

De esta manera, se han independizado la puesta en marcha de las estaciones de monitorización remota y el desarrollo de los algoritmos de inferencia de la concentración de nutrientes basados en los registros de las variables de medición *in situ*, evitando así comprometer la consecución de los objetivos del proyecto en plazo.

A continuación, se describen las características comunes a todas las estaciones de monitorización y posteriormente se detallarán los aspectos particulares de la solución adoptada en cada una de ellas.

6.2.2.1. **Sistema de control remoto. Diseño para el módulo de monitorización**

El diseño del módulo de monitorización parte de un sistema físico (*hardware*) desarrollado para realizar la integración de diferentes tecnologías de medición, incluyendo un sistema de control y DAQ (*Data Acquisition*) locales, cuyo propósito es el de permitir la captura de los diferentes parámetros de calidad del agua mediante el uso de un conjunto heterogéneo de dispositivos desplegados bajo diferentes condiciones (estaciones de medición, plataformas de boyas, cápsulas o estructuras hidráulicas). El DAQ está diseñado como un sistema de adquisición de datos de bajo consumo, capaz de integrar múltiples sensores multiparámetro, de una forma flexible y modular, compatible con todo tipo de sensores de medición de parámetros del agua, con sistemas únicos de control de potencia de los sensores, así como con capacidades de calibración y autocalibración.

Los sistemas DAQ tradicionales, basados en equipos industriales y utilizados para entornos de medición de agua, sufren muchas veces de altos consumos de energía, grandes factores de forma y a veces de una severa falta de flexibilidad y problemas de “*vendor blocking*” (incompatibilidades con sensores de terceros). Los estudios/proyectos de medición de la calidad del agua requieren sistemas DAQ optimizados, diseñados para una amplia variedad de sensores y despliegues de largo plazo, razón por la que consideró necesario disponer de sistemas de un control DAQ específico de bajo consumo, de tamaño reducido y gran versatilidad.

El diseño TopDAQ utilizado da como resultado un sistema DAQ adaptable y configurable en potencia sobre la superficie, que añade una funcionalidad de medida multiparamétrica flexible, una variedad de sistemas de comunicaciones inalámbricas, la funcionalidad de control y alimentación. La solución tiene la capacidad de medir cientos de parámetros con diferentes tipos de señales y sensores, mediciones analógicas y digitales de: temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, turbidez, potencial redox, espectrometría, etc.

El TopDAQ permite controlar la potencia a cada uno de los sistemas de entrada y sensor, siendo ideal para estudios de larga duración con bajos requerimientos de potencia.

La utilidad de los datos depende de la correcta adaptación del sistema DAQ a la aplicación de los procesos de los vertidos de aguas residuales industriales. La adecuación del hardware a los tipos de señales a medir, las características y acondicionamiento de la señal, la frecuencia de medida, la sensibilidad y el error aceptable.

Con este objetivo se ha diseñado un sistema que consta de una unidad de adquisición de datos que controla la toma de datos, actuadores, realiza las tareas de control de alimentación individualmente de cada sensor así como del propio sistema DAQ y gestiona las comunicaciones. Además de la obtención de datos de otros sensores atmosféricos que se quieran conectar en superficie, dicha unidad se comunica mediante un umbilical con una (o varias) electrónica(s) de gestión de sensores, emplazada en una cápsula estanca e interconectada a los sensores sumergidos deseados (Figura 9).

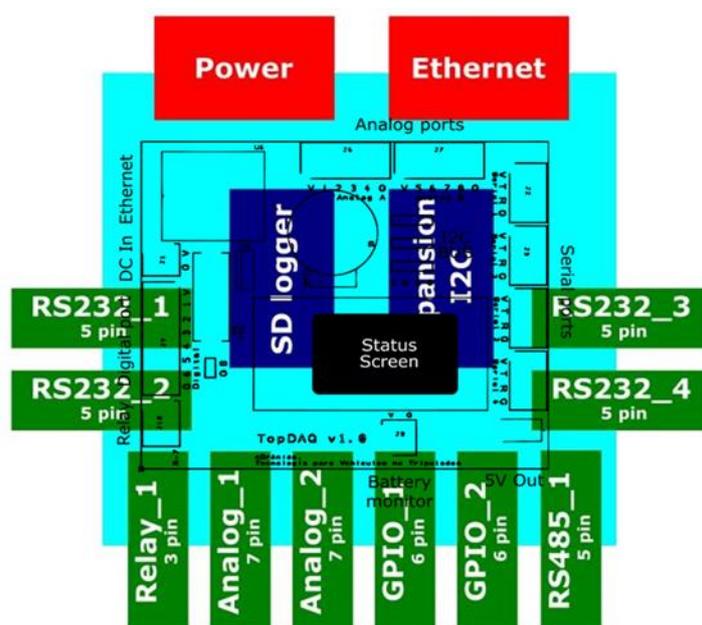


Figura 9. Esquema general del sistema de control y gestión de sensores

El TopDAQ (marca Envisad) es una integración de varias tecnologías; por lo tanto, las especificaciones son una combinación de los componentes utilizados. El objetivo principal se consigue gracias al procesador de doble núcleo de 32 bits de bajo consumo, que constituye el corazón de la unidad de control de las mediciones, diseñado específicamente para entornos remotos de calidad del agua que requieren un bajo consumo de energía, gran flexibilidad, interoperabilidad y escalabilidad.

TopDAQ es un sistema inteligente para la motorización periódica de diversos parámetros físico-químicos relacionados con la calidad del agua. La medición de los diferentes parámetros se puede realizar mediante sondas de última generación (medición de Temperatura, Conductividad, pH, Oxígeno Disuelto, turbidez, redox, cloro, nitratos, materia orgánica, etc.), ya que el sistema está concebido como un sistema modular, multi-sonda y multi-sensor, se adapta tanto a sensores analógicos como digitales (bus I2C, RS232, RS485, etc.).

El TopDAQ incluye un sistema de comunicaciones con una unidad de control, adquisición de datos y almacenamiento que permite configurar y calibrar cada sensor, programar tareas, descargar datos en tiempo real o subirlos a la nube, así como grabar en una unidad de almacenamiento in situ de gran capacidad. Se puede acceder a todos los recursos de esta unidad a través de Internet o directamente a través de una conexión LAN.

El sistema de comunicaciones conectado es un sistema inalámbrico versátil, capaz de realizar conexiones a largo alcance haciendo uso de las redes de telecomunicaciones móviles. La solución seleccionada ha sido la de una pasarela de comunicaciones 4G por razones de economía, pero el sistema se ha diseñado con capacidad de ampliación a comunicaciones 5G y LoRa. Con el fin de facilitar las comunicaciones, se independiza la conexión a la red GSM por medio de una pasarela de comunicaciones transparente que convierte de WiFi a red 3G/4G/5G. Dicha pasarela se emplaza en la misma unidad de superficie, aunque este diseño modular permite plantear otras alternativas.

Como idea general, la electrónica de gestión de sensores adapta los datos de cada una de las diferentes interfaces soportadas, pudiendo ser accedidos desde la unidad de control de superficie. Ésta última, agrupa los diferentes datos de la unidad de sensores (pueden ser varias) junto con los sensores de superficie y con los posibles sistemas de control, presentando una interfaz remota. Permite hacer una copia de los datos en local como respaldo (al igual que ofrecen otros sistemas de registro de datos).

Algunas características destacables del sistema son:

- Con el objetivo de simplificar los sistemas de adquisición de datos -aislando al usuario común de las herramientas de software de recuperación de sensores individuales- se dispone de diferentes puertos de sensores configurables que permiten un acceso y control directo sobre las mediciones y los sensores, integrando varias herramientas de calibración y autocalibración.

- Las operaciones de despliegue y el procesamiento de recuperación de datos se señalan como necesarios para garantizar la utilidad de las campañas de adquisición de datos.
- Integración de la mayoría de los sensores comerciales (Digitales, analógicos, I2C).
- Modularidad y escalabilidad.
- Acceso remoto vía internet (siempre que haya cobertura 3G/4G) y respaldo en almacenamiento local.
- Acceso remoto transparente de los puertos de sensores digitales mediante redirección de puerto ethernet a puerto serie físico.
- Posibilidad de control de actuadores (p.ej. Winches, electroactuadores, motores...).
- Actualización de firmware del sistema automática online y manual
- Bajo consumo ($P < 3W$).
- Desconexión de sensores mientras no se mide para ahorro de energía.

Requisitos de consumo:

- Tensión de alimentación: 9-30 VDC (230VAC a través de alimentador).
- Consumo medio inferior a 3W.
- Compatible con alimentación de batería con paneles solares, aerogeneradores... etc.

Funcionalidades:

- Procesador de doble núcleo de 32 bits de bajo consumo.
- 4G/3G/GPRS, WiFi, Lora.
- Interfaz Ethernet.
- Posibilidad de integrar GPS, acelerómetros e IMUs.
- Funcionamiento Autónomo 24/7.
- Sistema de autorecuperación WDT.
- Datalogger con capacidad de almacenaje en tarjeta SD.
- Pantalla de estado interna.
- Interfaz web para configuración local y remota del sistema.
- Software y firmware actualizable remotamente (OTA).
- Sistema de informes, descarga de datos, alertas y configuración básica por aplicación de mensajería.
- Envío periódico de datos a la nube.



- Integración de sensores.
- Interfaces de conexión sondas y sensores, I2C, RS232, RS485 o analógicos.
- Conexión directa de sensores digitales (mínimo 4).
- Conexión directa de sensores analógicos (mínimo 8).
- Escalabilidad número de sensores y sondas (parámetros).
- Conexión con electrónica sumergida mediante modem (2 hilos) o ethernet (4 hilos).
- GPIOs libres (6 GPIO) y relé SPDT para alarmas y control de equipos externos.
- Modularidad.
- Sensores configurables por interfaz web o línea de comandos.
- Entradas compatibles con cualquier sensor.
- Interoperabilidad fabricantes.
- Sistema de calibración de sensores on-line.

El sistema se ha diseñado para dotarse de las sondas y sensores, además de un GPS.

El TopDAQ resultante ofrece un equilibrio único de flexibilidad y eficiencia en las aplicaciones de aguas residuales, con facilidad de uso y bajo mantenimiento, específicamente adaptado a los entornos industriales. El sistema de monitorización *in situ* permite realizar las labores de configuración, control y medición de forma local, mediante conexión inalámbrica al TopDAQ. Mientras que como se ha visto la pasarela de comunicaciones permite recopilar los datos provenientes de los diferentes enlaces de largo alcance y reenviarlos a la nube (Cloud). A continuación, se describe la estructura que permite realizar la interrogación, operación y análisis remoto de sensores, TopDAQ y medidas obtenidas.

6.2.2.2. **Estructura de monitorización en la nube (Cloud)**

Cada TopDAQ se conecta a través de la pasarela de comunicaciones con dos servidores alojados en la nube (Cloud), un “Utility Server” que realiza las labores de configuración y mantenimiento (incluyendo el respaldo o *backup*) y un “Broker MQTT” que traslada los datos desde el TopDAQ a la nube. La información de configuración y los datos obtenidos del dispositivo se vuelcan por un lado a un servidor FTP con el formato CSV que generan diariamente los propios dispositivos. Por otro lado, los datos de las medidas se vuelcan en tiempo real (cada vez que se muestrean los sensores) a un bróker de datos (MQTT), que permite volcar los datos en la base de datos de series temporales (InfluxDB) a través de un agente de datos (Telegraf).

La base de datos (InfluxDB) permite programar el tratamiento de los datos de series temporales, tanto largas como son los de monitorización de los vertidos en el tiempo, como cortas, tales como los eventos fuera de rango. Para poder acceder y visualizar los datos obtenidos, mostrar gráficas de visualización y generar alertas por umbral, se cuenta con la plataforma de análisis Grafana. Esta herramienta está instalada en la nube de igual forma que la base de datos. Grafana permite programar *dashboards* o cuadros de mando y gráficos para el análisis de los datos, pudiendo realizar diferentes operaciones entre las variables. Grafana permite compartir los cuadros de mando actual mediante la creación de un enlace o una instantánea estática del mismo, realizando la gestión de usuarios según su vinculación a la organización y el rol. El siguiente diagrama (Figura 10) muestra la estructura de la nube implementada para el proyecto:

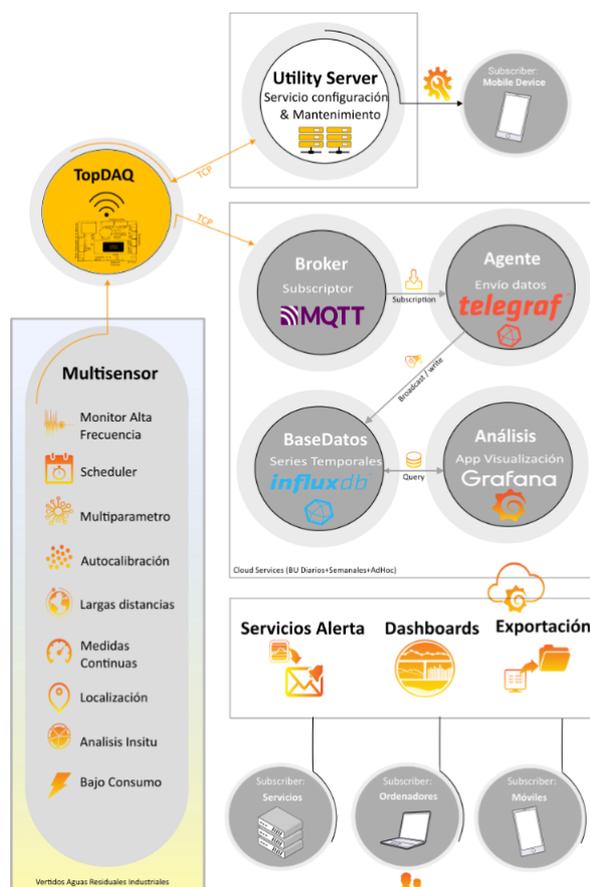


Figura 10. Estructura de la nube implantada en el proyecto

Las siguientes imágenes (Figura 11 y Figura 12) muestran la estructura resultante a disposición del usuario:

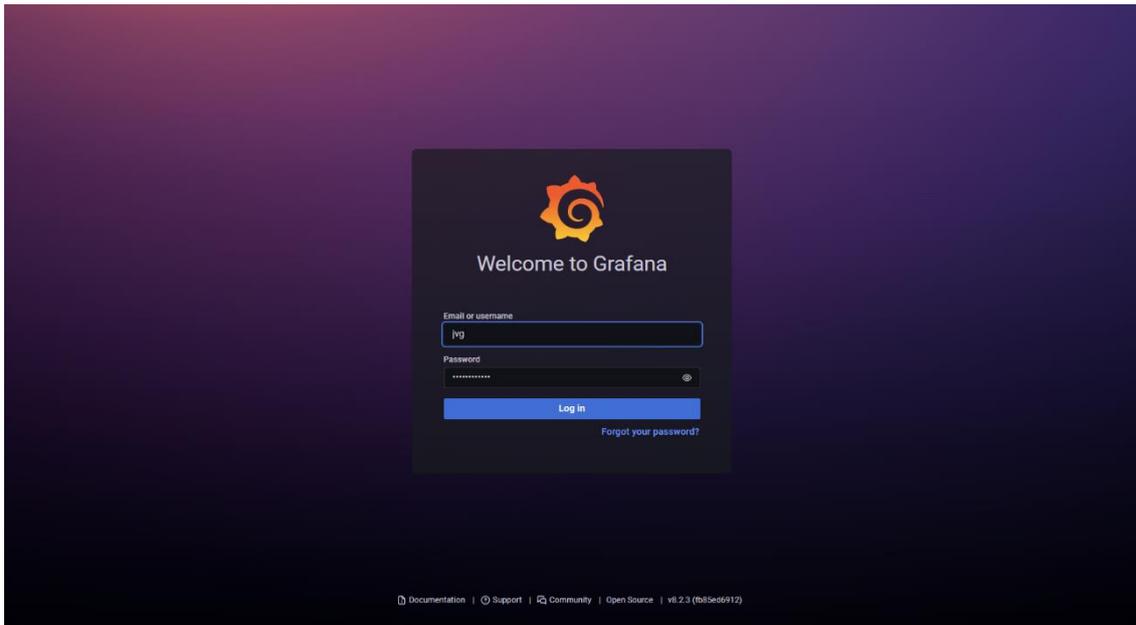


Figura 11. Acceso a la nube Grafana

Interconexión de Grafana con la base de datos influxDB como entrada de datos.

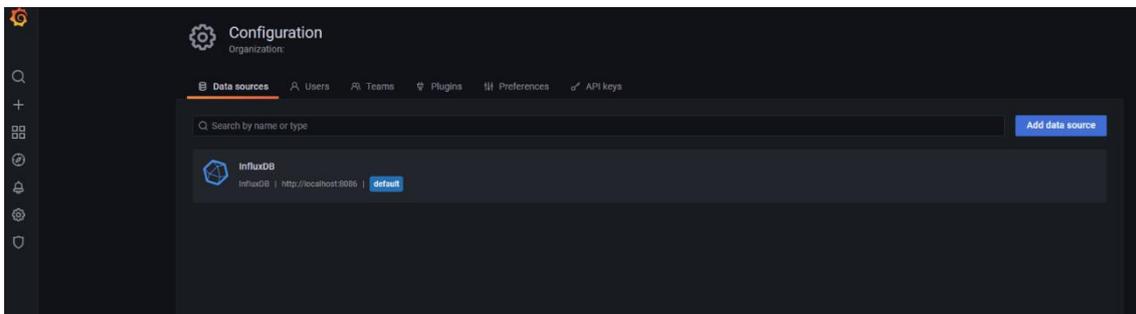


Figura 12. Interconexión de Grafana con la base de datos influxDB

El resultado de la plataforma de visualización de Grafana implementada en el proyecto consta de un panel de gráficas en las que se agrupan los valores físicos medidos en los puntos de muestreo. Una sola gráfica nos puede servir para comparar los valores entre puntos. Por un lado, tenemos tantas gráficas como variables físicas en bruto que se miden en el proyecto, por ejemplo, en la Figura 13, se representa las medidas de conductividad y turbidez en todos los puntos de monitorización remota instalados durante un periodo aproximado de 2 días (este periodo de tiempo se puede establecer en diferentes escalas: horas, días meses, años).

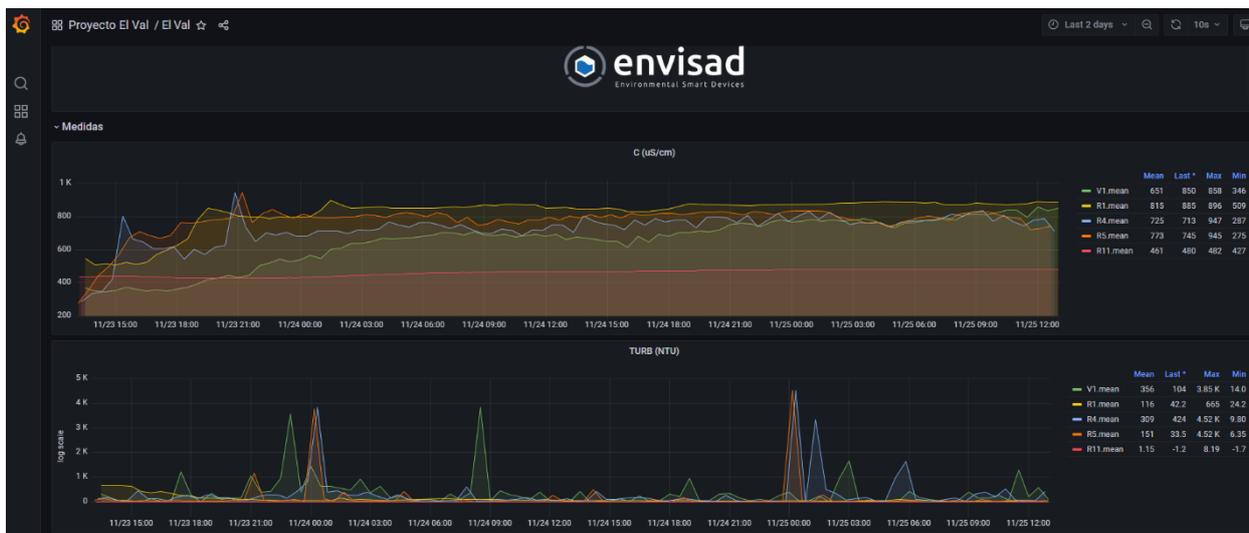


Figura 13. Valores de conductividad y turbidez las estaciones remotas de monitorización durante un periodo de 2 días

Por otro lado, se pueden generar gráficas temporales agrupadas por dispositivo, es decir se visualizan todos los parámetros de medida para el punto de estudio de manera gráfica y se muestran los valores de la media, el máximo, el mínimo y el último valor medido para el periodo seleccionado. En la Figura 14 se muestran todos los valores de los parámetros medidos en las estaciones remotas de los puntos de estudio (R1 y V1) durante un periodo de 2 días.



Figura 14. Visualización de todos los parámetros medidos en las estaciones remotas de los puntos de estudio (R1 y V1) durante un periodo de 2 días

Además de los valores físicos de muestreo que forman el pilar de datos de entrada del proyecto, los dispositivos mandan una serie de datos de que muestran la salud del sistema. De esta forma se grafica el estado de batería de los dispositivos, la temperatura del sistema electrónico o la memoria del sistema. Los dispositivos también generan mensajes cortos de para indicar alertas, información de inicio del dispositivo, o fallos del sistema. Esto ayuda de manera muy visual a la evolución de salud del sistema (carga de paneles solares, falta de AC,

sobrecalentamiento... etc). Ante la posible incidencia de que alguna de estas métricas se salga de los valores normales esperados, sería recomendable que el propio sistema sea encargado de avisar mediante medios telemáticos a los operadores del sistema. Es por ello que en esta plataforma se ha configurado un sistema de alertas tanto por email como por mensajería instantánea (Telegram) que pueden avisar en tiempo real de que cualquier métrica ha salido fuera del rango considerado como saludable. De esta forma se han configurado avisos de batería baja, temperatura alta e información de logs con severidad media.

6.2.2.3. **Componentes del sistema portátil**

Este equipo, también accesible en remoto, se ha dotado de las siguientes sondas y sensores mostrados en la Tabla 5, además de GPS:

Tabla 5. Sensores del sistema portátil de medición

Parámetro o función	Acrónimo	Instrumento	Método	Exactitud	Resolución	Rango
Profundidad de medición	D	SBE 37 SIP	Electrometría	0.1% FR	0.002% FR	+ 250 m
Temperatura del agua	T	SBE 37 SIP	Electrometría	0.002 °C	0.0001 °C	-5...35
Conductividad eléctrica del agua	C	SBE 37 SIP	Electrometría	0.003 mS/cm	0.0001 (mS/cm)	0 - 70 mS/cm
Conductividad eléctrica del agua compensada con la temperatura a 20°C	C20	SBE 37 SIP	Electrometría	0.003 mS/cm	0.0001 (mS/cm)	0 - 70 mS/cm
pH	PH	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	0,05 pH	0,003 pH	0...14
pH compensado con la temperatura	PH(Tc)	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	0,05 pH	0,003 pH	0...14
Potencial Redox	ORP	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	± 1 mV		-1000 + 1000 mV
Oxígeno disuelto	DO	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	± 0,1 mg/L	0,01 mg/L	0 - 20 mg/L
Saturación de oxígeno disuelto	DOSAT	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	-		0...200%
Turbidez	TURB	Cyclops 7_Turner Designs	Nefelometría	-	0.05	0.05...1500 NTU
Espectro de absorción en el UV	Doλ	ProPS TriOS	Espectrometría de absorción	0.2 nm	0.7	190-360 nm

Este sistema se ha utilizado para tomar registros simultáneos con las tomas de muestras de agua para análisis de nutrientes y otros compuestos en el laboratorio (ver apartado 6.3.). Siempre que el calado lo permitía, el arnés con los sensores y sondas se introducía en el cauce para la toma de datos. Cuando no se podía, se utilizaba una pequeña bomba y manguera para llenar y rebosar en continuo un recipiente en el que se introducía dicho arnés para obtener los registros (al menos 5 por punto y muestreo).

En las 18 campañas de muestreo se ha obtenido un conjunto de datos en los mismos puntos de la cuenca del embalse de El Val en los que se desplegaron estaciones de monitorización en continuo: V1, R4, R1 en el río Val, y R11 en el trasvase del Queiles al embalse del Val. Estos puntos se describen en el apartado siguiente.

Las campañas de muestreo se han realizado con una periodicidad aproximadamente quincenal y en cada campaña se han recogido 6 muestras en cada uno de los 4 puntos de muestreo citados. Por lo tanto, se cuenta con un registro de 108 observaciones para cada punto (excepto en el punto R11 en el que se cuenta con 96 observaciones porque en 15 de las ocasiones no había flujo de agua en el trasvase).

Como ya se ha comentado anteriormente y se explica más adelante en este informe, las 3 estaciones de monitorización en continuo empezaron monitorizando 4 puntos, pero en febrero de 2021 se añadió un nuevo punto (R5) a una de las estaciones. Este punto corresponde al río Val aguas arriba del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega. En este punto R5 se han recogido un total de 18 muestras en 6 campañas, en las que se tomaron 2 muestras por campaña.

En total se tomaron 438 registros durante todo el periodo de muestreos (año 2020 y 2021).

En las imágenes siguientes se facilita el detalle del sistema portátil durante su operación en el punto de muestreo R1.

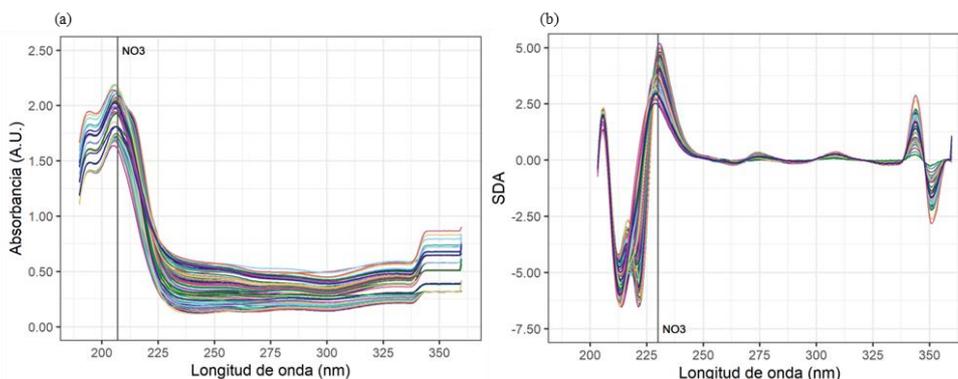


Figura 15. Dispositivo portátil de medición en el río Val (R1). Sondas y sensores en el cauce (izquierda) y sistema de adquisición y control (derecha)

En relación al sensor espectrofotométrico en el UV (ProPS de TriOS), se ha realizado una búsqueda y calibrado del pico de absorción con la concentración de nitratos en las muestras de laboratorio, habiéndose obtenido una muy buena correlación (Figura 16), lo que ha permitido aportar directamente valores de concentración de nitratos a la monitorización de alta frecuencia, sin necesidad de pasar por el algoritmo de I.A. que se describe en el apartado 6.6.

ANÁLISIS ESPECTROFOTOMÉTRICOS *IN SITU*

ProPS: Nitratos



Espectro y segunda derivada de la absorbancia (SDA) de cada uno de los muestreos llevados a cabo en 18 campañas durante el período 2020-2021 en R1. La línea vertical marca la longitud de onda aproximada en la que se produce la mayor absorción asociada al nitrato.

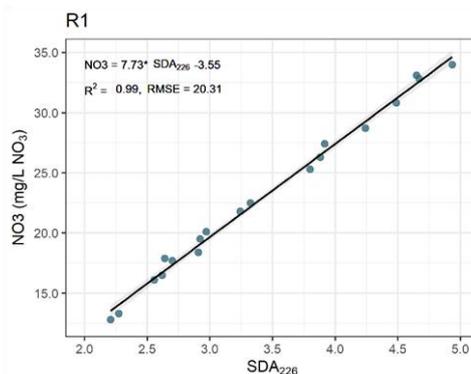


Figura 16. Resultado del ejercicio de calibración de la concentración de nitratos obtenida por absorción *in situ*.

A continuación, se muestran algunos resultados obtenidos para los principales parámetros medidos con el dispositivo móvil en todas las estaciones de muestreo durante el transcurso del proyecto (Figura 17).

Cómo se puede comprobar por los datos de las estaciones mostrados en la figura anterior, el vertido (V1) siempre es el que presenta los datos más desfavorables referidos a estándares de calidad del agua. Los valores encontrados en R4 (unos 20 m aguas abajo del vertido) son ligeramente mejores que para los mismos parámetros en V1, debido a la dilución con el agua procedente del río Val aguas arriba del vertido (R5).

Los valores de mejor calidad del agua se encuentran siempre en el punto R11, lo cual es lógico ya que este punto se encuentra en el azud del Queiles, que soporta menos presiones

antrópicas entre su nacimiento hasta el embalse del Val. Presenta los mayores valores para pH y OD y los menores para conductividad y turbidez.

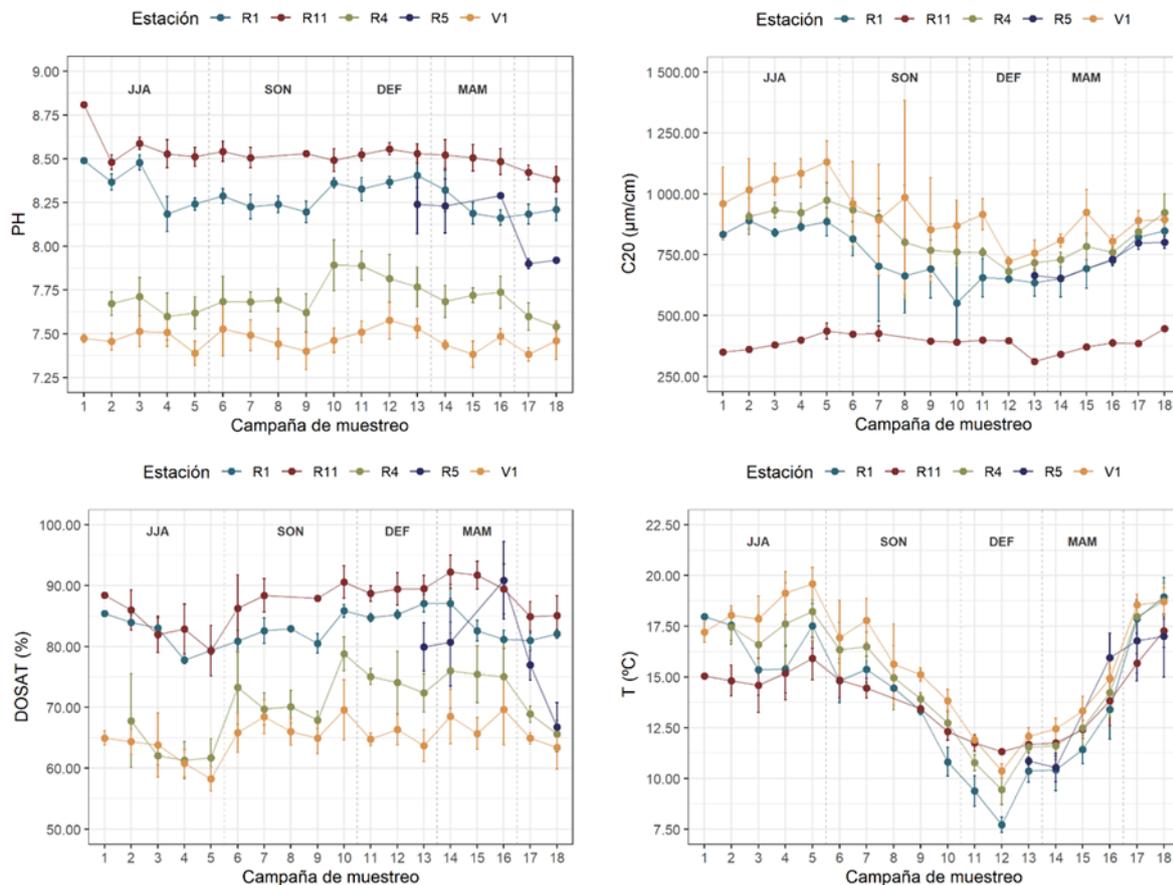


Figura 17. Datos de pH, Conductividad, OD y T^a, medidos en todas las estaciones remotas de monitorización en las 18 campañas

El punto de muestreo R1 se ubica aguas abajo de la EDAR de Ágreda-Ólvega a pocos metros de la entrada del embalse del Val (aprox. 1 km). Presenta siempre mejores valores en comparación con los medidos en R4 (situado inmediatamente aguas abajo del vertido). Esto puede deberse a dos factores: 1) la autodepuración propia del río durante el trayecto que existe entre R4 y R1; y 2) la dilución procedente de aportaciones de agua al río, aunque se presupone que esta dilución es mínima ya que no hay aportaciones hídricas significativas en esta sección longitudinal entre los dos puntos. Los valores de los parámetros en este punto son muy similares a los valores del punto R11, excepto para la conductividad, que presenta valores generalmente más elevados en R1 que en R11.

6.2.2.4. Monitorización en continuo de puntos críticos

Entorno de la EDAR de Ágreda-Ólvega: Estación 1 (puntos V1, R4 y R5)

Se ha optado por centralizar las mediciones en un único dispositivo (estación 1), emplazado en las instalaciones de la EDAR de Ágreda-Ólvega, que monitoriza alternativamente las aguas del efluente de la EDAR (punto V1) y de los puntos de río Val situados aguas arriba (R5) y abajo (R4) del vertido.

Esto se consigue mediante un sistema de bombeo controlado por electroválvulas, aplicando una pauta que se inicia con el llenado del tanque de registro desde la toma de agua del punto situado aguas arriba (R5), y que cumple con la doble función de lavado del tanque y sensores y de medida de esa agua. Posteriormente, se llena con la toma del punto R4 y se repite la medida en esta agua para, finalmente, hacer lo mismo con el agua del vertido. El ciclo completo de los tres puntos se completa en 30 min, periodo en el que se obtiene una medida de cada uno de los 3 puntos cada 10 min, es decir, normalmente se toman 2 registros por hora en cada punto de monitorización.



Figura 18. Tanque de mediciones y sistema de control en la arqueta de vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega (V1)

El punto V1 corresponde al vertido de aguas residuales tratadas en la EDAR de Ágreda-Ólvega. Las autorizaciones necesarias para el acceso a las instalaciones y despliegue del sistema de monitorización se solicitaron en el año 2020 al Ayuntamiento de Ágreda y a la concesionaria actual de la explotación de la EDAR (AQUAMBIENTE SERVICIOS PARA EL SECTOR DEL AGUA, S.A.U.).

El punto R4 corresponde al punto de control situado en el río Val, escasos metros aguas abajo del vertido de aguas residuales de la EDAR de Ágreda-Ólvega. Aunque durante el verano de 2020 se realizó un primer despliegue de sensores en este punto en el río Val, la deriva y acumulación de suciedad en los mismos hizo imposible el buen funcionamiento de esta estación monitorización. Se optó finalmente por aplicar un bombeo a un único tanque de medición como se explica al inicio de este apartado. Ambas estaciones se pusieron en funcionamiento el 30 de junio de 2020.

El punto R5 se ubica en el río Val, unos metros aguas arriba del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega. No estaba prevista su monitorización inicialmente, pero se añadió en el mes de febrero de 2021, mediante la incorporación del bombeo de agua al tanque de monitorización común (dispositivo multipunto) de V1 y R4. De este modo, se sumó el registro de las mismas variables en R5.

La dotación de sensores activos en este punto es la misma que en los puntos R4 (aguas abajo del vertido) y R5 (aguas arriba del vertido), como se ha explicado anteriormente.

La puesta en marcha del dispositivo de monitorización en los puntos R4 y V1 se produjo el 30 de junio de 2020. Durante la primera etapa de funcionamiento se realizaron modificaciones dirigidas a mejorar la calidad de los datos y evitar el rápido deterioro de los sensores en un agua de tan pobre calidad. Se destaca el cambio a sensores ópticos con cepillo auto limpiante para la medición de turbidez, así como el sistema de bombeo de agua del río entre medidas.

Aun así, se requiere una alta frecuencia (semanal) de limpieza de algunos de los sensores para garantizar la estabilidad de las medidas. En cualquier caso, los tiempos de puesta en marcha y adaptación a las condiciones del sitio se dilataron más de lo previsto debido a la pandemia COVID-19, por lo que se estableció el 8 de abril de 2021 como fecha de inicio de

generación estable de datos. Desde ese momento hasta julio de 2022 se han registrado más de 15.000 datos a un ritmo de 2 datos/h.

Estos datos se promedian por horas y se someten a un proceso de curado para eliminar registros y valores de variables individuales que constituyen artefactos, normalmente por mediciones entre procesos de mantenimiento, o de llenado y vaciado del depósito de medición. Actualmente, se tienen en total 5.400 registros promediados y válidos de las mencionadas variables.

Tabla 6. Sensores instalados en el sistema de monitorización de los puntos V1, R4 y R5

Parámetro o función	Acrónimo	Instrumento	Método	Exactitud	Resolución	Rango
Temperatura del agua	T	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 °C	0.01 °C	0...50 °C
Conductividad eléctrica del agua	C	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 µS/cm at 20 µS/cm	0.1 µS/cm	0...20 mS/cm
Conductividad eléctrica del agua compensada con la temperatura a 20°C	C20	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 µS/cm at 20 µS/cm	0.1 µS/cm	0...20 mS/cm
pH	PH	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	± 0.1 pH	0.01 pH	0...14 pH
pH compensado con la temperatura	PH(Tc)	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	± 0.1 pH	0.01 pH	0...14 pH
Potencial Redox	ORP	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	± 2 mV	0,1 mV	- 1000...+1000 mV
Oxígeno disuelto	DO	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	± 0.1 mg/L	0.01 mg/L	0 - 20 mg/L
Saturación de oxígeno disuelto	DOSAT	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	± 1%	-	0...200%
Turbidez	TURB	Turbidity Plus™ with Integrated Wiper_Turner Designs	Nefelometría	-	0.05	0.05...1500 NTU
Espectro de absorción en el UV	Doλ	ProPS TriOS	Espectrometría de absorción	0.2 nm	0.7	190-360 nm

En las siguientes figuras (Figura 19 y Figura 20) se muestra cómo se recogen los datos de las 7 variables en cada punto de monitorización a través de la plataforma Grafana. A través de esta plataforma se pueden almacenar todos los datos registrados de cada punto de muestreo en la

nube, así como monitorizar en continuo cada parámetro. Se pueden ver los datos que se están monitorizando en cada estación en tiempo real, así como realizar consultas de datos históricos por unidades de tiempo (horas, días, meses, semanas o años).

Aunque no sea el objeto del presente proyecto, la capacidad de acceder a los datos aportados por todas estaciones en tiempo real hace de este sistema una herramienta muy útil la hora de controlar y gestionar la calidad del agua en la cuenca. Si se asienta su explotación, se puede constituir en un sistema de alerta y seguimiento de eventos puntuales de “*vertidos anómalos*” (ej. mal funcionamiento de la EDAR, vertido por el aliviadero de la EDAR, aporte directo de un vertido al río, etc.).

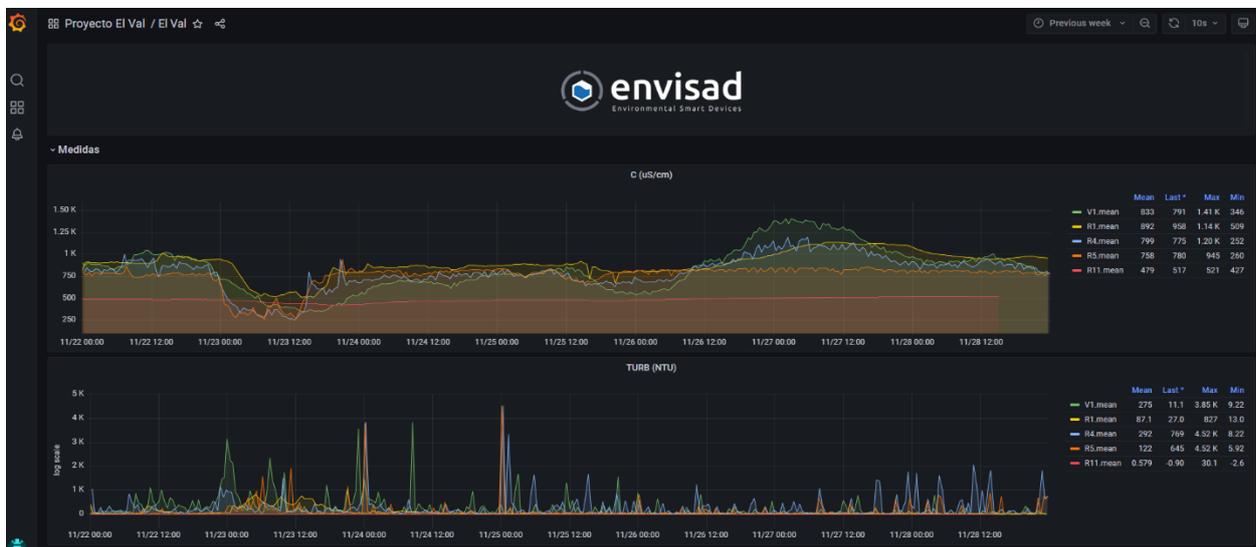


Figura 19. Datos almacenados en la nube a través de la plataforma Grafana de los parámetros de conductividad y turbidez en todos los puntos de monitorización remota (V1, R1, R4, R5 y R11) durante la última semana.



Figura 20. Adquisición de datos almacenados en la nube a través de la plataforma Grafana de todos los parámetros monitorizados en los puntos de monitorización remota R4, R5 y R11 durante un periodo de 1 mes.

Todos los datos ya curados se utilizan para realizar generar estimaciones de nutrientes mediante la aplicación algoritmos de inteligencia artificial (IA), entrenados con los datos tomados en las campañas de muestreo.

Punto R11

El punto R11 se ubica en el trasvase de derivación de agua del azud del Queiles al embalse Val. Esta estación se incorporó el 17 de marzo de 2021. El sistema de monitorización se instaló dentro de la caseta de la estación de aforos de la red SAIH ubicada en el trasvase del Queiles (Figura 21).

Figura 21. Instalación de la estación remota R11

En esta estación remota se recogen datos de todos los parámetros estudiados cada 15 min, que posteriormente son subidos y almacenados en la nube.

Los sensores instalados en este punto R11 se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 7. Sensores instalados en el sistema de monitorización del punto R11

Parámetro o función	Acronimo	Instrumento	Método	Exactitud	Resolución	Rango
Temperatura del agua	T	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 °C	0.01 °C	0...50 °C
Conductividad eléctrica del agua	C	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 µS/cm at 20 µS/cm	0.1 µS/cm	0...20 mS/cm
Conductividad eléctrica del agua compensada con la temperatura a 20°C	C20	Conductivity TriOS	Electrometría	± 0.5 µS/cm at 20 µS/cm	0.1 µS/cm	0...20 mS/cm
pH	PH	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	0,1 pH	0,01 pH	0...14
pH compensado con la temperatura	PH(Tc)	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	0,1 pH	0,01 pH	0...14
Potencial Redox	ORP	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	± 2 mV	0.1 mV	-1000 + 1000 mV
Oxígeno disuelto	DO	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	± 0.1 mg/L	0.01 mg/L	0 - 20 mg/L
Saturación de oxígeno disuelto	DOSAT	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	± 1%	-	0...200%
Turbidez	TURB	Turbidity Plus™ with Integrated Wiper_Turner Designs	Nefelometría	-	0.05	0.05...1500 NTU
Espectro de absorción en el UV	Doλ	ProPS TriOS	Espectrometría de absorción	0.2 nm	0.7	190-360 nm

Punto R1

El punto R1 está situado en el río Val, cerca de la entrada del río al embalse del mismo nombre. Esta estación de monitorización empezó a funcionar a pleno rendimiento el 8 de abril de 2021. El lugar de instalación se muestra en la Figura 22 y en la Tabla 8 los sensores implementados en ella. En esta estación, la toma de datos de todos los parámetros monitorizados se realiza cada 30 min.



Figura 22. Instalación de la estación 2 en el punto R1, fotos de izquierda a derecha: Armazón con sensores; instalación y sistema de alimentación energética solar

Tabla 8. Sensores instalados en el sistema de monitorización del punto R1

Parámetro o función	Acrónimo	Instrumento	Método	Exactitud	Resolución	Rango
Temperatura del agua	T	Conductivity TriOS	Electrometría	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$0.01 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Conductividad eléctrica del agua	C	Conductivity TriOS	Electrometría	$\pm 0.5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ at $20 \text{ } \mu\text{S/cm}$	$0.1 \text{ } \mu\text{S/cm}$	$0 \dots 20 \text{ mS/cm}$
Conductividad eléctrica del agua compensada con la temperatura a 20°C	C20	Conductivity TriOS	Electrometría	$\pm 0.5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ at $20 \text{ } \mu\text{S/cm}$	$0.1 \text{ } \mu\text{S/cm}$	$0 \dots 20 \text{ mS/cm}$
pH	PH	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	$0,1 \text{ pH}$	$0,01 \text{ pH}$	$0 \dots 14$
pH compensado con la temperatura	PH(Tc)	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	$0,1 \text{ pH}$	$0,01 \text{ pH}$	$0 \dots 14$
Potencial Redox	ORP	PHEHT Aqualabo	Potenciometría	$\pm 2 \text{ mV}$	0.1 mV	$-1000 + 1000 \text{ mV}$
Oxígeno disuelto	DO	Digital Dissolved Oxygen Sensor_TriOS	Luminiscencia	$\pm 0.1 \text{ mg/L}$	0.01 mg/L	$0 - 20 \text{ mg/L}$
Saturación de oxígeno disuelto	DOSAT	Digital Dissolved	Luminiscencia	$\pm 1\%$	-	$0 \dots 200\%$

Parámetro o función	Acrónimo	Instrumento	Método	Exactitud	Resolución	Rango
		Oxygen Sensor_TriOS				
Turbidez	TURB	Turbidity Plus™ with Integrated Wiper_Turner Designs	Nefelometría	-	0.05	0.05...1500 NTU
Espectro de absorción en el UV	Doλ	ProPS TriOS	Espectrometría de absorción	0.2 nm	0.7	190-360 nm

En esta estación se ha añadido posteriormente (julio de 2021) la monitorización directa de nutrientes con frecuencia discrecional mediante un autoanalizador WIZ-SYSTEa (Figura 23). El objetivo de este sistema es poder obtener datos de nutrientes con mayor frecuencia, con el fin de obtener datos suficientes para la calibración y validación de los algoritmos de inteligencia artificial. Estos datos serán utilizados para realizar el aprendizaje de máquina (*machine learning*) e inferir la concentración de nutrientes a partir de parámetros de más sencilla medición.

Los nutrientes que se pueden analizar con este equipo son TP, PO₄ y NH₄. Las técnicas de análisis se basan en técnicas colorimétricas para el TP y PO₄ y fluorimétricas para el NH₄. La frecuencia mínima con la que se puede obtener datos de estos nutrientes es de 2 h. Este equipo se instaló en julio de 2021, pero debido a diversas complicaciones surgidas en el campo, y más directamente a limitaciones de energía y comunicaciones en el punto de despliegue (se esperaba que para esas fechas ya hubiera una infraestructura de aforo con esas facilidades), este equipo ha funcionado de manera discontinua. A esto hay que sumarle que se trata de un dispositivo con el que hay muy poca experiencia previa documentada, con lo que su instalación, puesta a punto y explotación han constituido todo un reto en este proyecto.

Este tipo de analizadores se basa en reacciones químicas automatizadas, y requieren un calibrado y validación con soluciones de concentraciones conocidas en campo cada mes, antes y después de su uso. Por otro lado, son equipos cuyo consumo eléctrico es elevado y en el punto de estudio no hay suministro eléctrico. La instalación de un panel fotovoltaico adicional como fuente de alimentación funcionó para obtener entre 4 y 6 datos diarios, pero al final del verano, principios del otoño, esta frecuencia no se ha podido mantener ya que el panel solar instalado no alcanza a suministrar la energía necesaria para su correcto funcionamiento.

Finalmente se optó por la instalación de una célula de combustible de metanol. Su puesta en marcha ha supuesto a su vez un reto por las condiciones de bajas temperaturas invernales, lo que ha conllevado un trabajo de adaptación adicional. Sin embargo, la adquisición de estos datos de nutrientes en continuo es esencial por las razones expuestas.

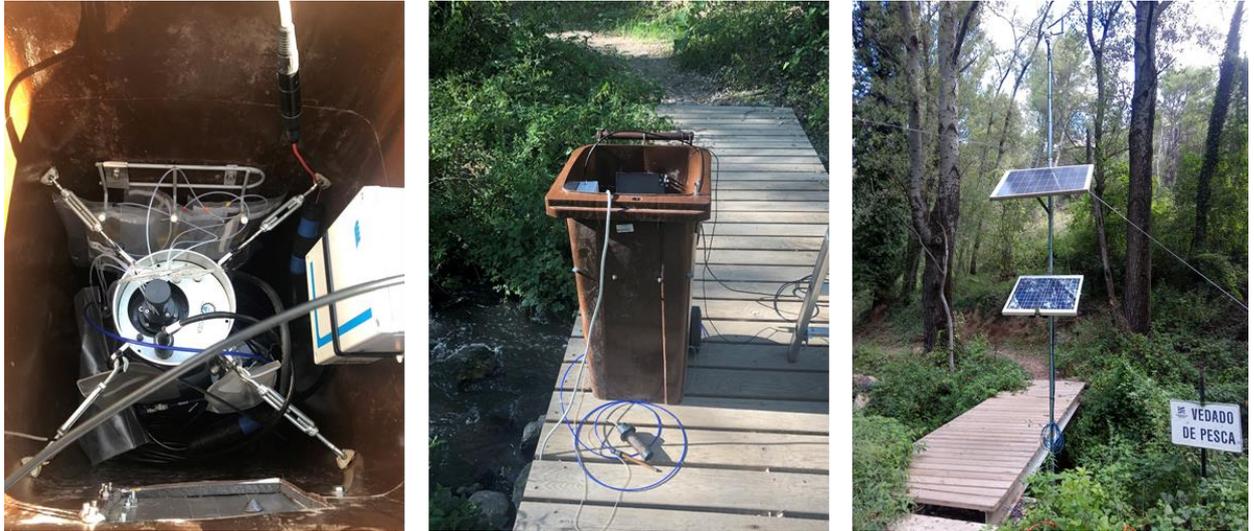


Figura 23. Autoanalizador de nutrientes WIZ-SYSTEa en el punto de estudio (R1)

En la Figura 28 se muestra las medias horarias de todos los valores recogidos por los sensores instalados en la serie R1 desde abril hasta noviembre de 2021. Se puede observar que hay diferencias horarias en las concentraciones de conductividad y OD medidas a lo largo de 24 h.

En el APÉNDICE II se facilitan gráficos de los diferentes puntos y parámetros monitorizados, una vez curadas las series brutas mediante técnicas al uso: rangos de conformidad, tratamiento de valores extremos, periodos de mantenimiento, etc.

ANÁLISIS FQ EN CONTINUO

Ejemplo serie CT en R1 entrada modelo embalse

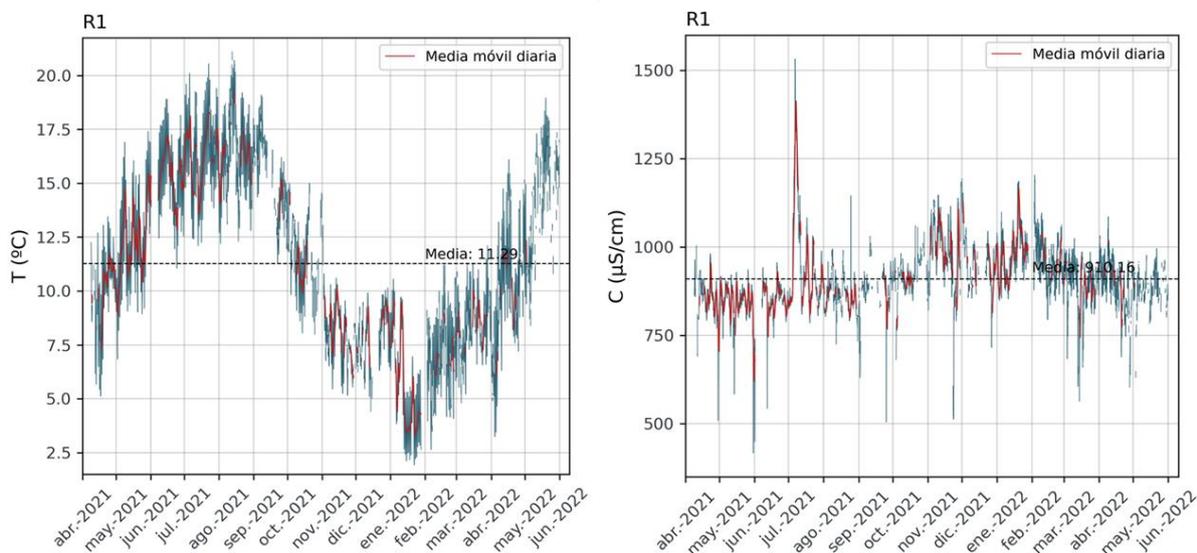


Figura 24. Ejemplo de serie de monitorización con alta frecuencia en la estación R1

ANÁLISIS AUTOANALIZADOR DE NUTRIENTES *IN SITU*

Systema: Nitratos,
amonio y fosfatos

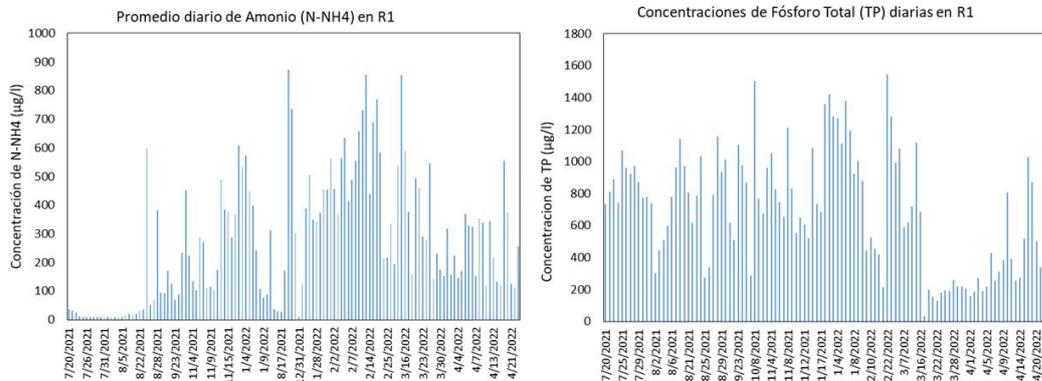
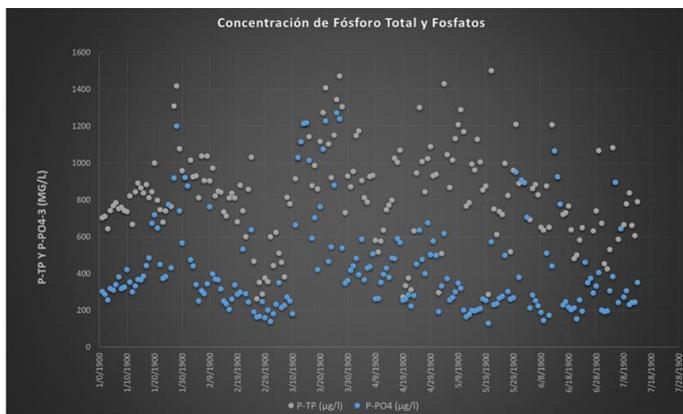


Figura 25. Serie de monitorización con alta frecuencia mediante autoanalizador de nutrientes en el punto R1

A estos datos se suman los datos de NO_3 obtenidos con el sensor espectrométrico de absorción ultravioleta ProPS-CW instalado en las estaciones remotas fijas (excepto en V1 donde la suciedad del agua impedía la obtención de un espectro informativo), y que ha ofrecido un óptimo resultado para la estimación de concentraciones de nitratos en continuo, sin necesidad de recoger la muestra y de su posterior conservación, traslado y análisis en el laboratorio.

Este sensor portátil, que es un espectrómetro de absorción en el UV, es compacto y ligero y utiliza una lámpara de deuterio de baja potencia (5 W) como fuente de radiación UV y un fotodiodo de silicio de 256 canales que permite la absorción de longitudes de onda comprendidas en el rango de 190 a 360 nm. De este modo, se multiplican las opciones potenciales de recoger una parte importante de la variación de los parámetros indicadores objetivo, puesto que se adquieren 256 valores espectrales en cada medida.

Para la obtención de la recta de calibración del NO_3 , se seleccionó un subconjunto de 19 y 14 muestras para R1 y R11 respectivamente -el 20% de la muestra inicial- con el objetivo de abarcar el mayor rango de concentraciones disponible.

La Figura 26 muestra la calibración obtenida para la SDA a 226 nm – valor deducido a partir del estudio del espectro de la segunda derivada – y los valores de concentración de nitrato medidos en el laboratorio.

En R1, el modelo de regresión lineal simple obtenido revela un muy buen ajuste con un valor de $R^2 = 0,99$ y un RMSE (*Root Mean Square Error*) de 1,87. Por otra parte, en R11 encontramos valores similares en los parámetros de la ecuación, con un $R^2 = 0,99$ y un RMSE = 0,76. Cabe destacar el rango de concentraciones que abarca cada una de las estaciones, que es mucho más limitado en R11 donde la diferencia entre los valores máximo y mínimo apenas supera los 1,5 mg/L N. La concentración de nitrato en las muestras varía desde 2,89 a 7,68 mg/L N en R1 y desde 2,01 a 3,61 mg/L N en R11.

En la Figura 27 se presenta la serie de concentración de nitratos en R1 obtenida a partir de este sensor óptico.

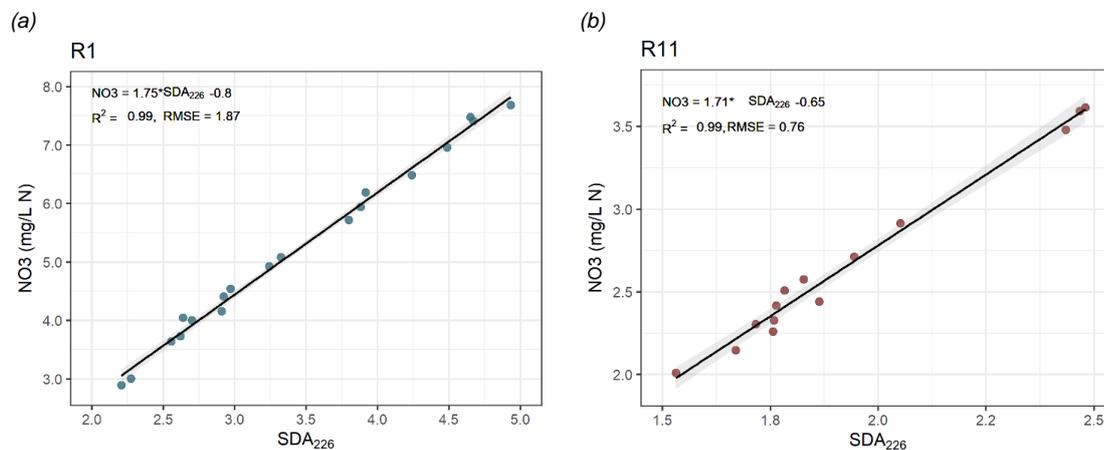


Figura 26. Recta de calibración entre la SDA a 226 nm y la concentración de nitrato medida en el laboratorio en (a) R1 y (b) R11.

ANÁLISIS NITRATOS EN CONTINUO POR ESPECTROMETRÍA

ProPS: Espectro de absorción en el UV

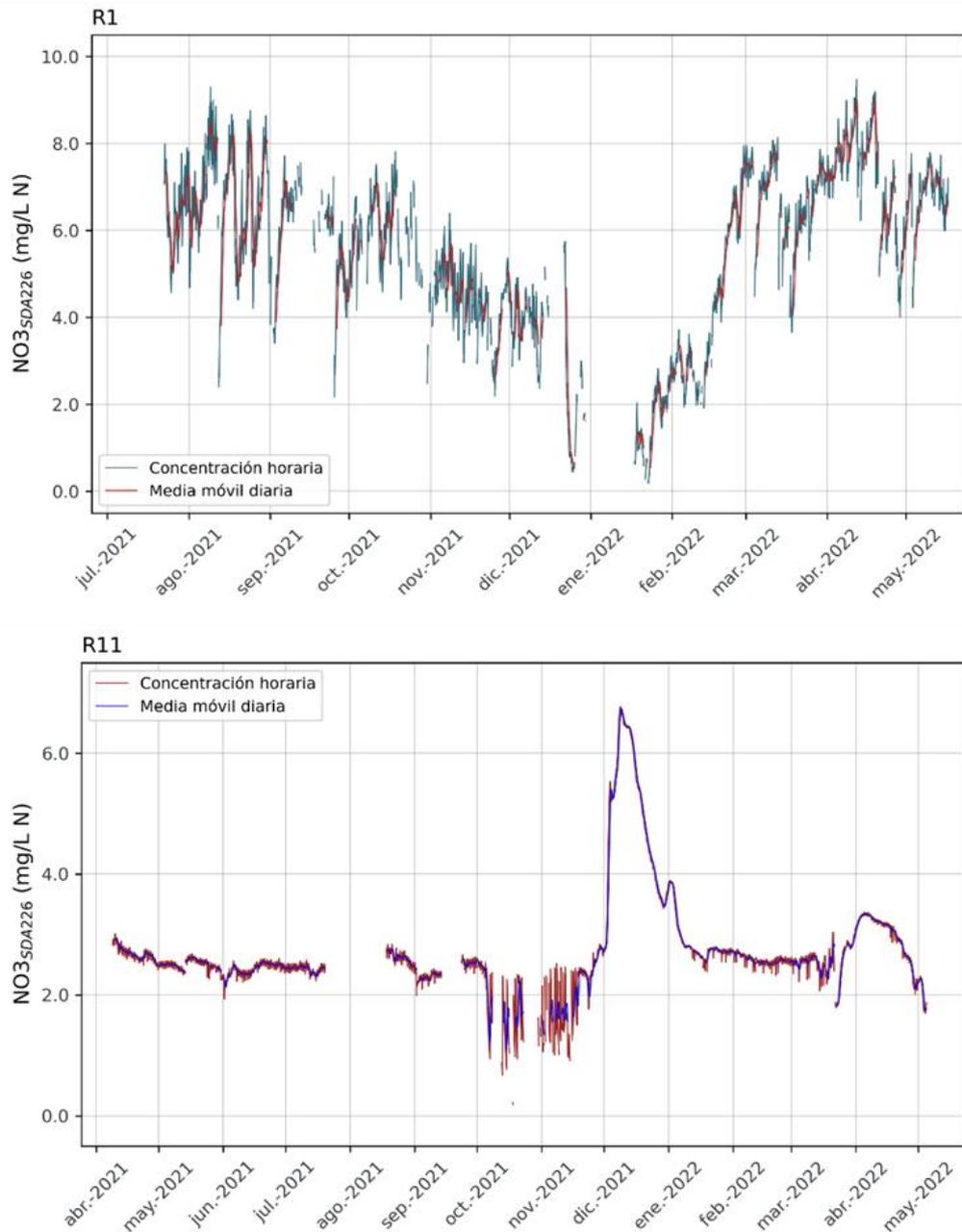


Figura 27. Serie de monitorización con alta frecuencia de nitratos mediante espectrofotómetro UV en el punto R1

Uno de los análisis que se pueden realizar a partir de estos datos es la pauta horaria de los valores. A modo de ejemplo se ha realizado en el punto R1.

Las concentraciones de conductividad incrementan su valor durante las primeras horas de la mañana y a última hora de día, mientras que el OD sufre un descenso bastante acusado durante las horas centrales del día. Este descenso de la concentración de OD está inversamente relacionado con la T^a (a mayor temperatura menor concentración de O_2 disuelto en el agua) lo cual queda reflejado en la Figura 28.

El comportamiento de la turbidez durante este tiempo es diferente, no observándose una clara fluctuación de su concentración en rangos horarios, aunque sí se puede observar más fluctuación en las medidas durante la segunda mitad del día (de 12:00 am a 12:00 pm).

Otros parámetros como el pH y ORP se mantienen bastante constantes, no observándose una fluctuación significativa de sus valores durante las horas del día.

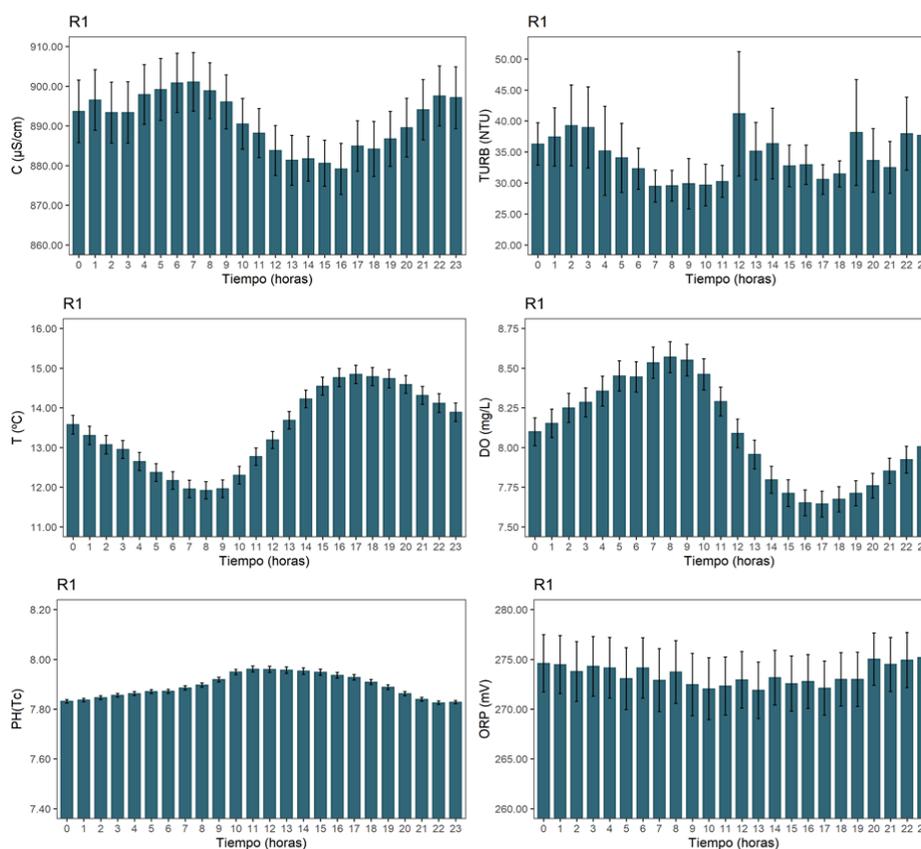


Figura 28. Resultados de medias horarias de los parámetros físico-químicos (conductividad, turbidez, T^a , OD, pH y ORP) medidos en el punto R1

6.3. CAMPAÑAS DE MUESTREO Y ANALÍTICAS REALIZADAS

6.3.1. Controles en ríos y vertidos

Entre junio de 2020 y julio de 2021, se realizaron un total de 18 campañas de muestreo en ríos y vertidos. Cada campaña ha consistido en 6 muestreos en cada uno de los 4 puntos de control que se recogen en la tabla siguiente. En el punto R5 se realizaron menos campañas ya que este punto se incorporó en febrero de 2021 (campaña VAL13). En el APÉNDICE III se recogen los boletines de campo de estos muestreos.

Cada una de las campañas de este tipo de muestreo se han realizado a lo largo de 3 días, procurando que al final hubiera una diferencia aproximada de 6 horas entre los diferentes muestreos, es decir, para que quedaran repartidos en el intervalo de 24 horas. En algunas ocasiones el punto R11 (trasvase del río Queiles) estaba seco y el punto V1A (alivio de la EDAR) no estaba vertiendo en ninguna de las ocasiones. En total, al término del año se dispone de 438 muestreos repartidos entre los 5 puntos.

En la siguiente Tabla 9 se muestra la información de los puntos en los que se realizaron los muestreos discretos manuales.

Tabla 9. Información de los puntos de muestreo manual

PUNTO	MASA	CUENCA	CATEGORIA	DESC_CEMAS	MUNICIPIO	PROVINCIA	CEMAS	PUNTO VERTIDOS
R1	ES09168	VAL	Río	Val / entrada cola embalse	Los Fayos	Zaragoza	3119-FQ	RIO:AG_ABAJ3
R11	ES091300	QUEILES	Río	Azud del Queiles	Los Fayos	Zaragoza	3125-FQ	RIO:TRASVASE
R4	ES091861	VAL	Río	Val / Agreda (FQ)	Ágreda	Soria	1351-FQ	RIO:AG_ABAJ
R5	ES091861	VAL	Río	Val / aguas arriba EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria	3122-FQ	RIO:AG_ARRI
V1	ES091861	VAL	Vertido	Vertido EDAR Agreda	Ágreda	Soria	2014-S-900	U:SAL_DEP
V1A	ES091861	VAL	Vertido	Influente EDAR Agreda	Ágreda	Soria	2014-S-900	U:ALIVIO

En cada muestreo se tomaron al menos 5 registros de parámetros físico-químicos *in situ* mediante el dispositivo descrito en el apartado 6.2.2.1. Simultáneamente, se procede a la toma de muestras de agua para su envío al laboratorio de la CHE. Estas muestras han consistido en 2 alícuotas de 3 L cada una tomada en recipientes de plástico nuevos, que se mantienen en frío desde el momento de la toma y se hacen llegar al laboratorio en un plazo máximo de 24 h. A la alícuota 2 de 500 mL se le añade ácido sulfúrico hasta alcanzar un pH<2 en la muestra.

El detalle del tratamiento y las analíticas que se realizan en el laboratorio en cada una de ellas se facilita en la tabla siguiente (SET_NUT):

Tabla 10. Análisis realizados y técnicas analíticas aplicadas

ALICUOTA	VARIABLE_COD	VARIABLE_DESC	UNIDAD	MÉTODO
1	PO ₄	Concentración de fósforo reactivo soluble	mg/L_PO ₄	"Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 4500 P_E. Determinación por espectrofotometría UV-VIS.
2	TP	Concentración de fósforo total	mg/L_P	"Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 4500 P_E. Determinación por espectrofotometría UV-VIS.
1	PO _{4_TOT}	Concentración de fósforo reactivo total	mg/L_PO ₄	"Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 4500 P_E. Determinación por espectrofotometría UV-VIS.
2	TN	Concentración de nitrógeno total	mg/L_N	"Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 4500 N_C. Determinación por espectrofotometría UV-VIS.
1	NO ₃	Concentración de nitratos	mg/L_NO ₃	"ISO 10304-1. Determinación por cromatografía iónica."
1	NO ₂	Concentración de nitritos	mg/L_NO ₂	"ISO 6777 Determinación por espectrofotometría UV-VIS."
2	NH ₄	Concentración de amonio	mg/L_NH ₄	"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 4500 NH_D. Determinación por electrometría."
1	TSS	Concentración de sólidos totales en suspensión	mg/L	UNE EN 872 Determinación por filtración y gravimetría.
1	DBO ₅	DBO ₅	mg/L_O ₂	En ríos: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5210 B. Determinación por electrometría. En vertidos: "Standard Methods for the Examination of Water and Waste-Water". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5210 D. Determinación por manometría.
1	DBO _c	DBO carbonácea (inhibición de nitrificación)	mg/L_O ₂	En ríos: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5210 B.

ALICUOTA	VARIABLE_COD	VARIABLE_DESC	UNIDAD	MÉTODO
				Determinación por electrometría. En vertidos: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5210 D. Determinación por manometría.
2	TOC	Carbono orgánico total	mg/L_C	"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5310 B. Determinación por espectroscopía IR.
1	DOC	Carbono orgánico disuelto	mg/L_C	"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". APHA-AWWA-WPCF. Edición 23. 2017. Método 5310 B. Determinación por espectroscopía IR.
1	SiO ₂	Sílice reactiva	mg/L_SiO ₄	Espectrofotometría UV-VIS

Tras confirmar que no añadía información, y de acuerdo con el laboratorio de la CHE, los análisis de fósforo reactivo total (PO₄_TOT) se interrumpieron desde la campaña VAL4 en adelante.

Todos los resultados de estas campañas de muestreo y análisis discretos en ríos y vertidos se facilitan en el APÉNDICE V.

En algunas de las campañas se han realizado además mediciones de caudal en el punto R1 mediante un caudalímetro *FlowTracker* de Sontek que utiliza tecnología Doppler ADV. En todos los muestreos se anota la altura de la lámina de agua. Con esos datos se dispone de una primera curva de gasto hasta que se ponga en funcionamiento la estación de aforo que está prevista por la CHE para dicho lugar (entrada del río Val al embalse).

En la tabla siguiente se facilita el número y tipo de muestras de cada tipo en cada campaña de muestreo de ríos y vertidos.

Tabla 11. Número y tipo de muestra recogidas en cada campaña

CAMPAÑA	FECHA	SET_NUT	SET_SIA	SET_FQ
VAL1	22-25/06/2020	30		30
VAL2	30/06-02/07/2020	24		24
VAL3	14-16/07/2020	24	4	24
VAL4	04-06/08/2020	24	4	24



CAMPAÑA	FECHA	SET_NUT	SET_SIA	SET_FQ
VAL5	25-27/08/2020	24		24
VAL6	08-10/09/2020	24		24
VAL7	22-24/09/2020	24		24
VAL8	06-08/10/2020	18		18
VAL9	20-22/10/2020	19		19
VAL10	17-19/11/2020	24	4	24
VAL11	15-17/12/2020	24	4	24
VAL12	19-21/01/2021	20	4	20
VAL13	15-17/02/2021	26	5	26
VAL14	15-17/03/2021	26	5	26
VAL15	13-15/04/2021	26	5	26
VAL16	18-20/05/2021	26	5	26
VAL17	14-16/06/2021	26	5	26
VAL18	19-21/07/2021	26	5	26
TOTAL		429	50	429

Los grupos o SETs analíticos que se aplican son los siguientes:

FQ: Medida de parámetros físico-químicos en superficie y transparencia de Secchi.

NUT: Análisis en laboratorio de los analitos descritos en el apartado anterior.

SIA: Análisis de isótopos estables en nutrientes disueltos (ver apartado correspondiente).

Además de las muestras recogidas en la Tabla 11, hay que añadir las muestras analizadas con el autoanizador de nutrientes *in situ* WIZ-SYSTEa, en un número total que, a la fecha de emisión del informe, superan los 450 desde su implantación a finales de julio de 2021, para cada uno de los 3 analitos: TP, PO4 y NH4.

6.3.2. Controles en el embalse

Todas las estaciones muestreadas en el embalse del Val se muestran en la Figura 29 y en la tabla siguiente se facilita el número y tipo de muestras de cada tipo en cada campaña de muestreo de embalses.

Tabla 12. Número de muestras y tipo de muestras recogidas en el embalse del Val en cada campaña

CAMPAÑA	FECHA	SET_FQ_PRO	SET_NUT	SET_GRANU	SET_PHYTO	SET_SED
VAL1	23/06/2020	4	14	4	8	4
VAL3	15/07/2020	1	5		3	
VAL5	25/08/2020	4	10		9	
VAL7	22/09/2020	4	13		9	
VAL9	19/10/2020	1	5		3	
VAL14	16/03/2021	1	5		3	
VAL16	18/05/2021	1	5		3	
VAL18	21/07/2021	4	13	4	9	4
TOTAL		20	70	12	47	12

Los grupos o *SETs* analíticos que se aplican son los siguientes:

FQPRO: Perfil métrico de parámetros físico-químicos en la columna de agua y transparencia de Secchi.

FQ: Medida de parámetros físico-químicos en superficie y transparencia de Secchi.

NUT: Análisis en laboratorio de los analitos descritos en el apartado anterior.

PHYTO: Concentración de clorofila y en 10 de las muestras recuentos del fitoplancton por grupos.

GRANU: Análisis granulométrico en sedimentos.

SED: Análisis de nutrientes en agua intersticial en sedimentos.

En el punto E1 del embalse de El Val, situado en la zona más profunda cercana a la presa, se han realizado en total 8 campañas de muestreo durante los años 2020 y 2021 (APÉNDICE IV). En cada campaña se registró un perfil físico-químico vertical (tipo de muestra "FQ_PRO") mediante sonda multiparamétrica *Hydrolab Datasonde 4a*, así como medidas de la transparencia del agua mediante disco de Secchi.

Se tomaron además muestras de agua en 5 niveles de profundidad (dos de ellas en la zona fótica), para el análisis de todos los parámetros anteriores (tipo de muestra "NUT"), a los que se añade la transparencia de Secchi. Tras confirmar que no añadía información, los análisis de fósforo reactivo total (PO₄_TOT) se interrumpieron desde la campaña VAL7 en adelante.

En la zona fótica y en los picos profundos de fluorescencia de la clorofila *a* se tomaron muestras para el análisis de este pigmento mediante el método fotométrico en laboratorio y, en una selección de 10 muestras, la determinación taxonómica, recuento y biovolumen del fitoplancton (tipo de muestras “PHYTO”). Estos datos se usan para calibrar el modelo biogeoquímico del embalse.

En 4 de esas campañas se tomaron además seis (6) muestras más, repartidas entre otros tres puntos del embalse (E2, E3 y E4) siguiendo el eje cabecera-cola, para el análisis de los mismos parámetros de nutrientes. En estos tres puntos se realizaron perfiles físico-químicos verticales (tipo de muestra “FQ_PRO”) y mediciones con disco de Secchi.

En una de esas campañas se tomaron registros en superficie con la misma sonda y medida de la transparencia de *Secchi* en un total de 8 puntos adicionales (E5 a E12), para la calibración de imágenes de teledetección.

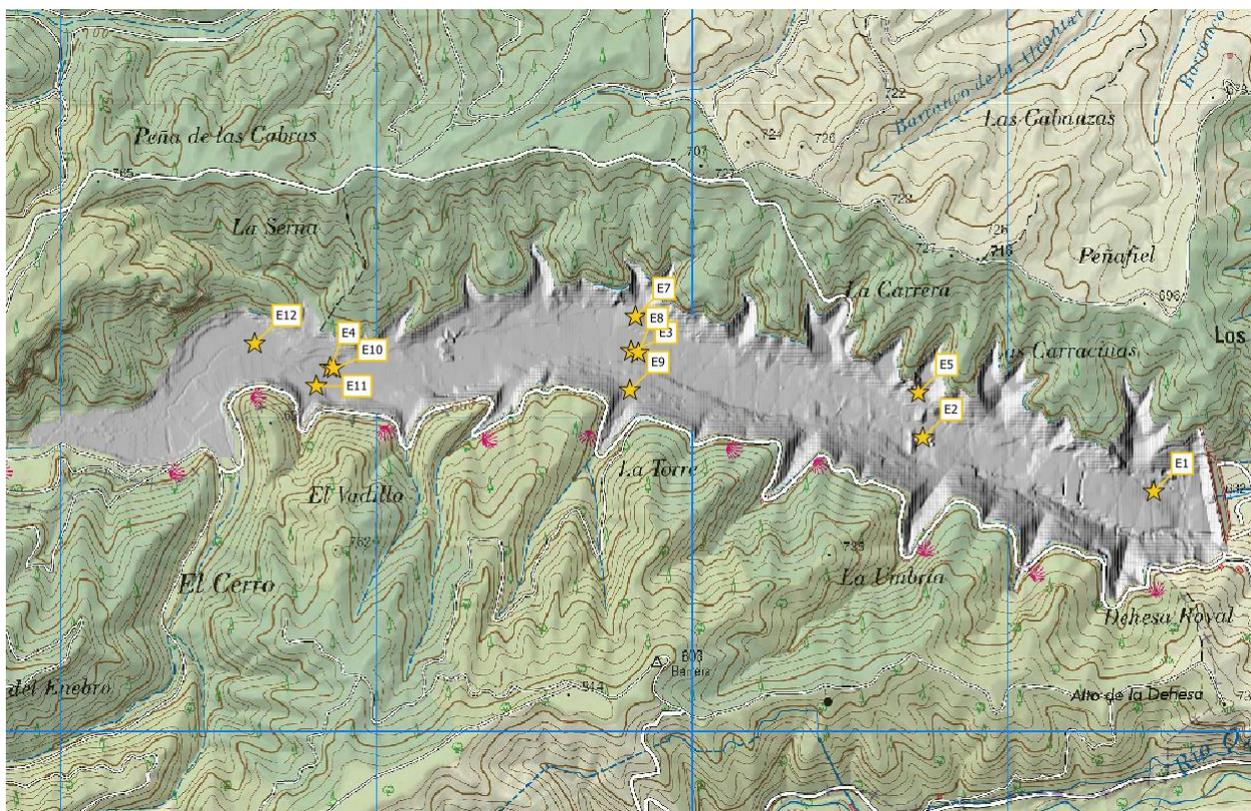


Figura 29. Ubicación de todas las estaciones muestreadas en el embalse de El Val

En la primera y última campaña de muestreo en el embalse (VAL1 y VAL 18) se realizó una toma de muestras de sedimentos superficiales mediante draga Ekman para el análisis en laboratorio de granulometría, materia orgánica y fósforo y nitrógeno intersticiales (tipo de muestra “SED”).

Todos los resultados de estas campañas de muestreo y análisis discretos en el embalse se facilitan en los Apéndices IV (BOLETINES DE CAMPO Y PERFILES VERTICALES EN EL EMBALSE) y VII (RESULTADOS ANÁLISIS DE LABORATORIO DE AGUA Y SEDIMENTOS DEL EMBALSE).

6.4. OTROS DATOS Y ANALÍTICAS APORTADAS POR LA CHE

6.4.1. Datos de controles mensuales de vertidos

El servicio de vertidos recaba datos de los vertedores con carácter mensual, en concreto los siguientes:

- EDAR de Ágreda-Ólvega: pH, DBO, DQO, SS.
- PISCIFACTORÍA DE VOZMEDIANO: T, pH, DBO, SS, P total, N total, amonio.

Además, proporcionan datos de caudal diario de vertido, tanto de aguas tratadas como aliviadas directamente al cauce.

6.4.2. Otros controles del Servicio de Vertidos

Desde mediados de julio de 2020 y hasta mayo de 2021, este Servicio de la CHE promovió una serie de muestreos y analíticas en diferentes puntos de la cuenca del embalse de El Val, con un carácter quincenal. Las estaciones de muestreo incluidas en dichos controles se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 13. Estaciones de muestreo incluidas por el servicio de vertidos

CODIGO ESTACION	DESCRIPCIÓN	UTM-X	UTM-Y	CODIGO CEMAS	PUNTO VERTIDOS	EXPEDIENTE
R6	Arroyo de los Caños, aguas abajo del Polígono Industrial Emiliano Revilla, en Ólvega	584729	4627145	3123-FQ	RIO:AG_ABAJ	2018NUM0125
R5	Río Val, aguas arriba EDAR de Ágreda-Ólvega	590750	4635502	3122-FQ	RIO:AG_ARRI	2014S0900
V1	Vertido EDAR Ágreda	590774	4635521	2014-S-900	U:SAL_DEP	2014S0900

CODIGO ESTACION	DESCRIPCIÓN	UTM-X	UTM-Y	CODIGO CEMAS	PUNTO VERTIDOS	EXPEDIENTE
R4	Río Val, aguas abajo EDAR de Ágreda-Ólvega	590793	4635544	1351-FQ	RIO:AG_ABAJ	2014S0900
R3	Río Val entre EDAR de la estación R3 y R1 (cola del embalse), a la altura de "El Mojón"	594511	4636582	3121-FQ	RIO:AG_ABAJ2	2014S0900
R1	Río Val, entrada cola embalse	596715	4636848	3119-FQ	RIO:AG_ABAJ3	2014S0900
M2	Nacimiento del Queiles. Equivale a entrada de piscifactoría	594626	4632098	-	PEZ:ENT_PISCI	2012S0362/2018S0661
V3	Salida desagüe piscifactoría	594829	4632327	2012-S-362	PEZ:SAL_PISCI	2012S0362/2018S0661
R12	Río Queiles en la cola del azud del trasvase al embalse de El Val	599432	4635737	0090-FQ	RIO:CAPT	2012S0362/2018S0661
R11	Azud del Queiles	599753	4635770	3125-FQ	RIO:TRASVASE	2012S0362/2018S0661

Se realizaron dos campañas:

- **Campaña A:** en la que toma la muestra el contratista y la analizan en el laboratorio de la CHE en todos los puntos del cuadro anterior.
- **Campaña B:** Se realizan únicamente en los puntos de vertido EDAR de Ágreda-Ólvega (V1), entrada piscifactoría (M2) y salida piscifactoría (V3). Muestreos mensuales, alternados quincenalmente con los de la campaña A.

Los parámetros que se analizaron son:

- ACE_GRAS = Aceites y Grasas
- CAUAFOR = Caudal Aforado
- COND20 = Conductividad a 20 °C
- COT = Carbono orgánico total
- DBO₅ = DBO₅
- DBO₅ = DBO₅
- DBO₅_CARB = DBO₅ Carbonácea
- DQO_D = Demanda química de oxígeno

- GRASAS = Grasas
- MES = Sólidos en suspensión
- MES = Sólidos en suspensión
- NH₄ = Amonio total
- NO₂ = Nitritos
- N_T = Nitrógeno Total
- O₂ = Oxígeno disuelto
- O₂% = Oxígeno disuelto (% sat.)
- PO₄ = Fosfatos
- PO₄_TOT = Fosfato total
- P_TOT = Fósforo Total
- TEM_AG = Temperatura del agua
- COD = Carbono orgánico disuelto
- pH = pH

Dentro de los años 2020 y 2021 se han realizado las siguientes campañas (Tabla 14):

Tabla 14. Campañas realizadas durante los años 2020 y 2021

CAMPAÑA A	CAMPAÑA B
29/07/2020	13/07/2020
20/08/2020	10/08/2020
14/09/2020	02/09/2020
26/10/2020	15/10/2020
17/11/2020	06/11/2020
21/12/2020	15/01/2021
25/01/2021	12/02/2021
22/02/2021	12/03/2021
22/03/2021	09/04/2021
19/04/2021	07/05/2021

En la Figura 30 se muestra la ubicación de los puntos reflejados en la Tabla 13 junto con todos los puntos de muestreo del embalse del Val y algún punto más adicional muestreado durante este estudio.

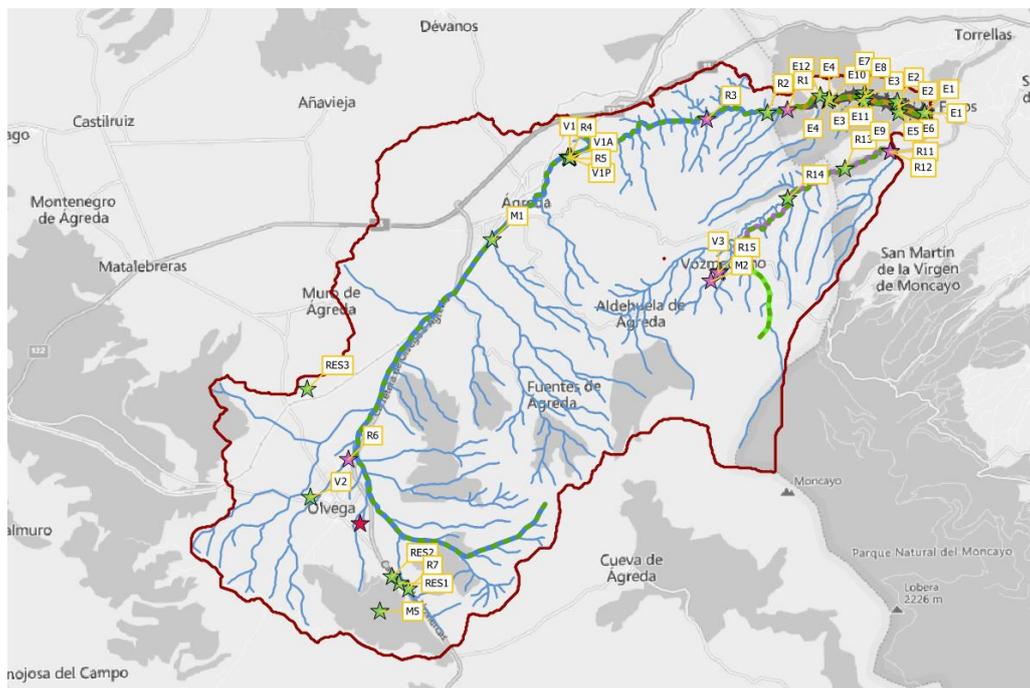


Figura 30. Puntos de muestreo en la cuenca del Val

6.4.3. Muestreos y análisis en redes de control CEMAS

En la cuenca de estudio hay tres masas de agua de la categoría ríos y una masa de agua de categoría *muy modificada* que corresponde al propio embalse de El Val (Figura 31).

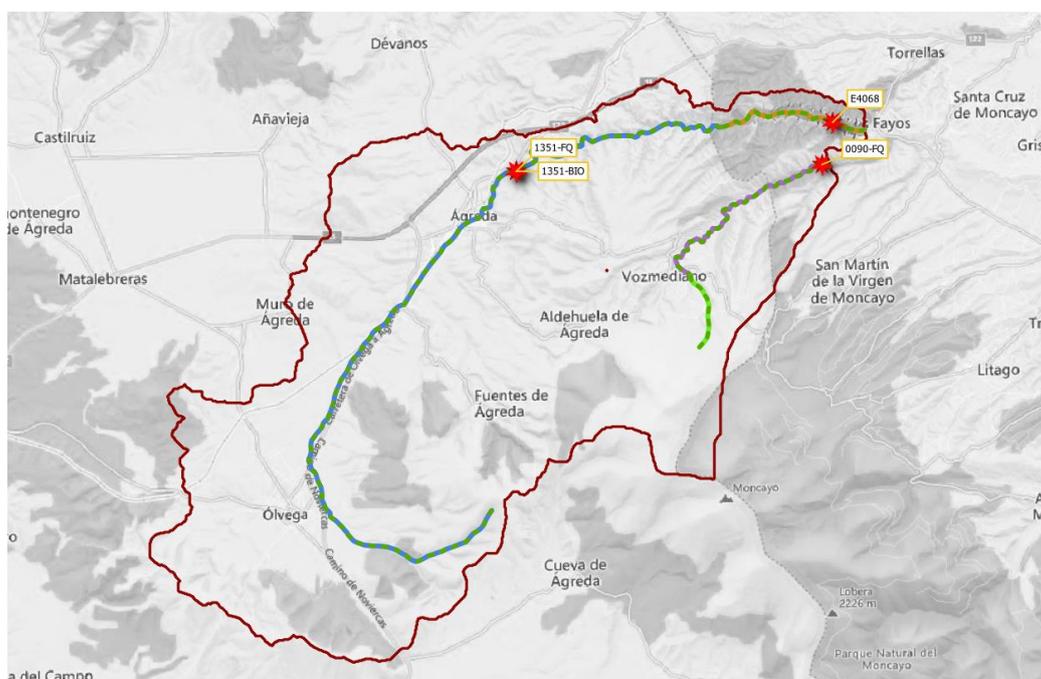


Figura 31. Masas de agua y estaciones de la red CEMAS en la cuenca del embalse de El Val

Ya fuera de la cuenca, aguas abajo del embalse de El Val, existe una cuarta masa de agua fluvial (MAS954) que se incorpora a la información analizada, puesto que su estado ecológico depende directamente del embalse de El Val. A continuación, se facilita la información básica sobre los puntos de muestreo ubicados en esas masas de agua (Tabla 15).

Tabla 15. Información básica sobre las masas de agua y puntos de muestreo asociados

COD. PUNTO MUESTREO	Toponimia PUNTO_MUESTREO	MAS	NOM_MAS	TIPO
E4068	Embalse de El Val	68	Embalse de El Val	E-T07
0090	Queiles / Azud alimentación Emb. del Val	300	Río Queiles desde la población de Vozmediano hasta el río Val	R-T12
1251	Queiles / Los Fayos	300	Río Queiles desde la población de Vozmediano hasta el río Val	R-T12
1351	Val / Agreda	861	Río Val desde su nacimiento hasta su entrada en el Embalse de El Val	R-T12
2232	Queiles / Tarazona	954	Río Queiles desde el río Val hasta Tarazona (incluye río Val desde la Presa del Embalse de El Val hasta su desembocadura en río Queiles)	R-T12

6.5. RESULTADOS DE LOS CONTROLES DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

6.5.1. Datos físicoquímicos de campo

A partir de la representación gráfica de los numerosos datos disponibles (Figura 32) se aprecia gran variabilidad dentro de cada punto de muestreo, pero también ciertas regularidades que permiten compararlos entre sí:

- La temperatura del agua se ve incrementada por el propio vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega, siendo similar entre las dos estaciones no afectadas por el mismo: río Val aguas arriba del vertido (R5) y río Queiles en el trasvase (R11). Esta última presenta menor variabilidad (rango de aproximadamente 11 a 18 °C).
- La conductividad eléctrica del agua es muy superior en la cuenca del Val, con valores en el entorno de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en R5, que no superan los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en R11. El vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega eleva esos valores, de forma que superan con frecuencia los 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- El pH y el oxígeno disuelto (% de saturación), siguen un patrón similar, con los valores más altos en la cuenca del Queiles (R11) y los más bajos en el vertido de la EDAR y aguas abajo del mismo.

- La turbidez es lógicamente mucho más alta en el vertido de la EDAR que en el resto de los puntos de control, pero resulta llamativo que en río Val a la entrada del embalse (R1) es más alta que en tramos más cercanos al vertido (R4), lo que indica una influencia de la erosión del terreno en ese tramo de tránsito.

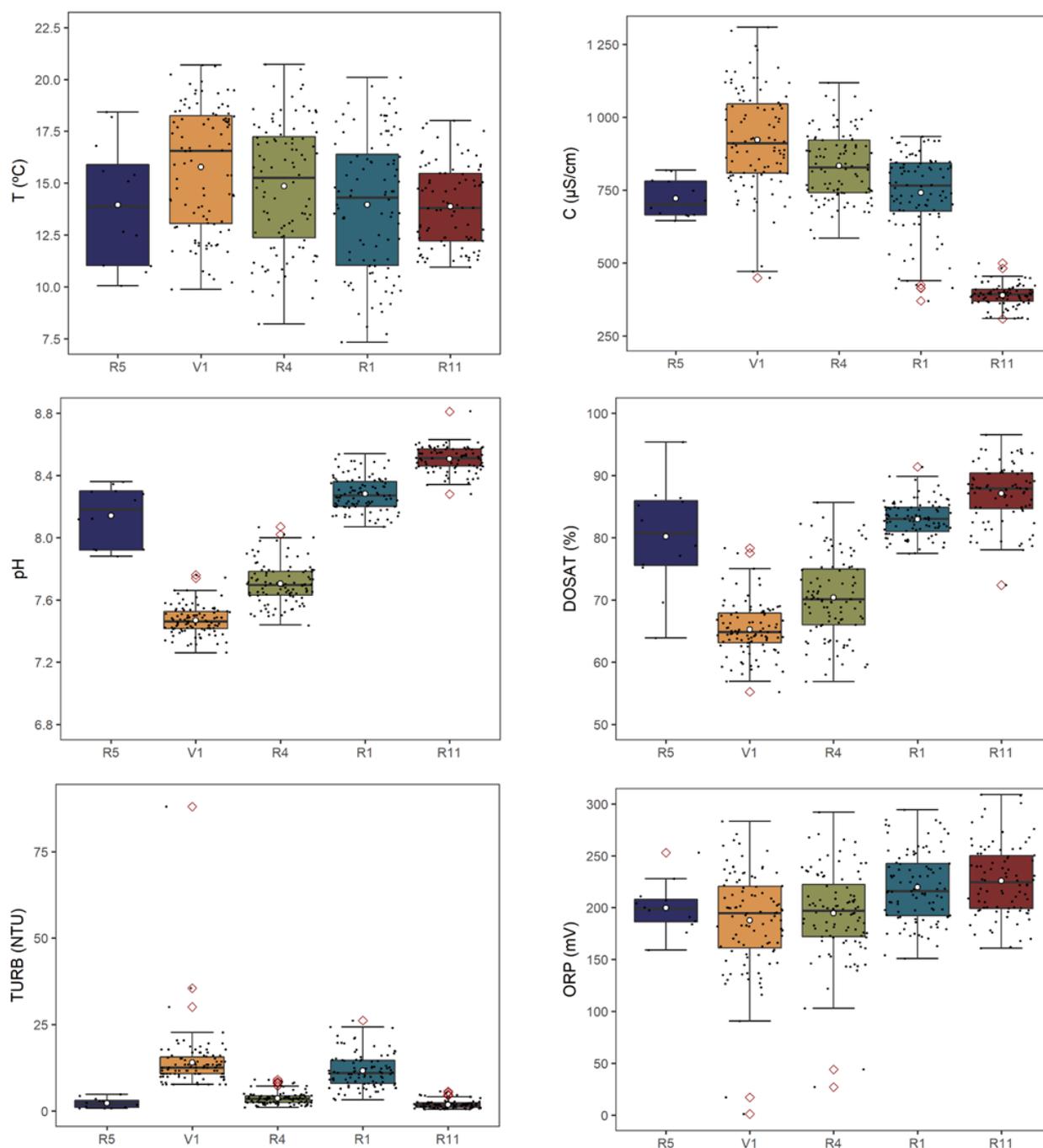


Figura 32. Diagramas de cajas de datos fisicoquímicos in situ en las diferentes estaciones de control

6.5.2. Análisis de laboratorio

A partir de la representación gráfica de los numerosos datos disponibles (Figura 33 y Figura 34) se aprecia gran variabilidad dentro de cada punto de muestreo, pero también ciertas regularidades que permiten compararlos entre sí:

- El fósforo orgánico y el inorgánico, así como el nitrógeno orgánico y el amonio reflejan la influencia del propio vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega, con valores en el vertido y en el río Val aguas abajo del vertido mucho más elevados que en el resto de las cuencas. La diferencia es que el amonio desaparece en el tránsito hasta R1 (entrada al embalse de El Val) y por el contrario suben los nitratos, como consecuencia del proceso de nitrificación.
- A pesar del incremento en nitratos que se refleja en los altos valores de este nutriente en el punto R1, las concentraciones en R5 (río Val aguas arriba del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega) son sistemáticamente elevadas (5 a 7 mg/L). Esto indica que hay una fuente de contaminación en la parte alta de la cuenca que emana en el manantial de los Ojillos de Ágreda. Los valores de nitratos en el Queiles (R11) son inferiores, pero se mantienen en un rango de 2 a 4 mg/L, que no es tampoco desdeñable.
- El contenido en sílice de las aguas del Queiles es sensiblemente inferior (< 3 mg/L) a la de los puntos del río Val (en torno a 4 mg/L), lo que puede tener implicaciones en cuanto al crecimiento de las diatomeas fitoplanctónicas en el embalse.
- Al igual que ocurría con la turbidez, el contenido en sólidos en suspensión en el punto R1 es superior al resto, de lo que se deduce que hay una aportación por erosión en ese tramo del río Val aguas abajo de la EDAR de Ágreda-Ólvega, y que podría estar relacionada con actividades que produzcan erosión en las cercanías del cauce, como por ejemplo algunas pistas que lo vadean.
- La materia orgánica en sus formas particulada y disuelta presenta valores moderados a la salida del vertido de la EDAR porque la depuración secundaria es efectiva a ese nivel. Aunque esos valores van disminuyendo hacia aguas abajo, todavía en la entrada al embalse (R1) son más elevados que aguas arriba del vertido (R5) y que en el Queiles (R11).

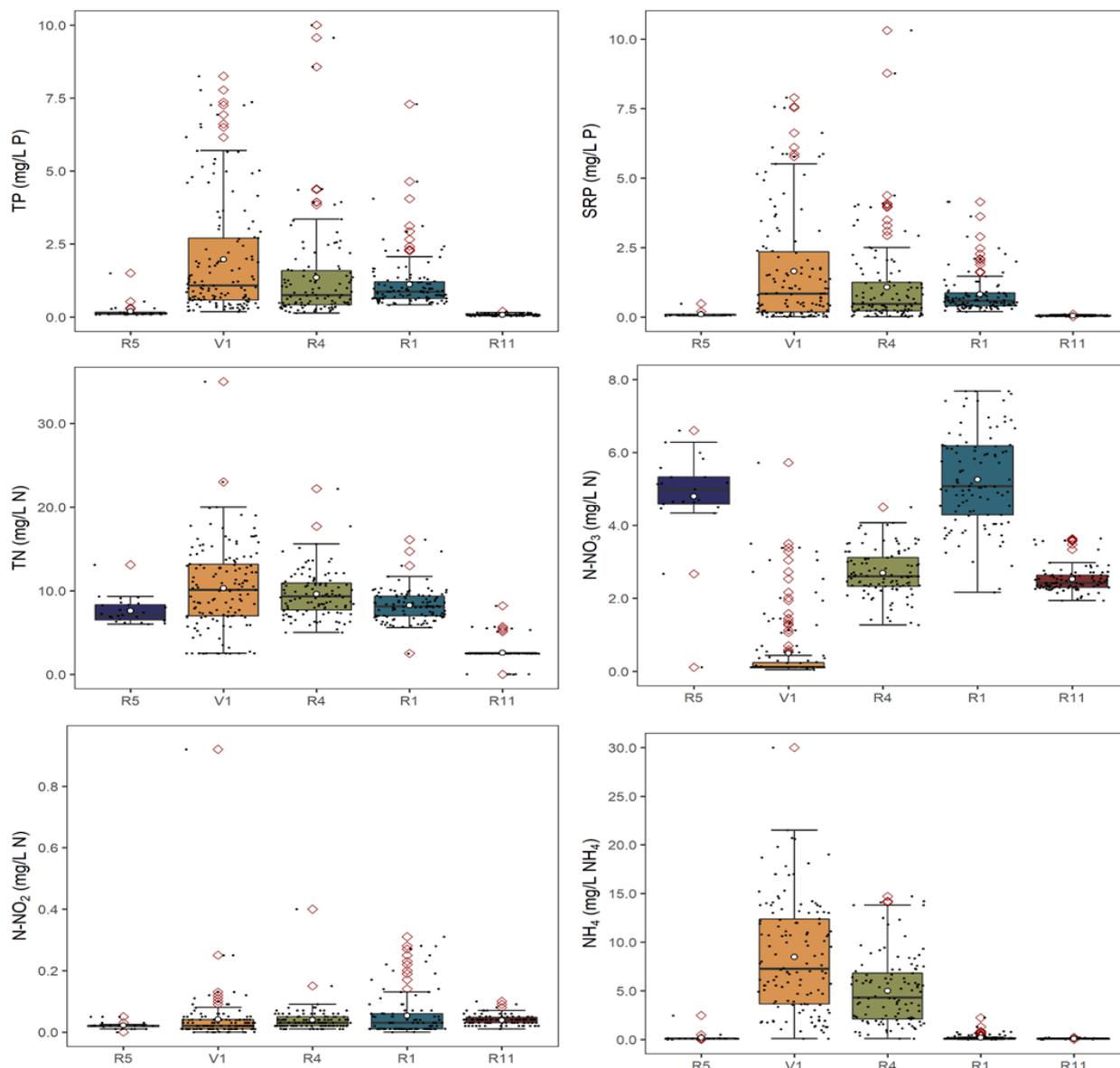


Figura 33. Diagramas de cajas de nutrientes de fósforo y nitrógeno en las diferentes estaciones de control

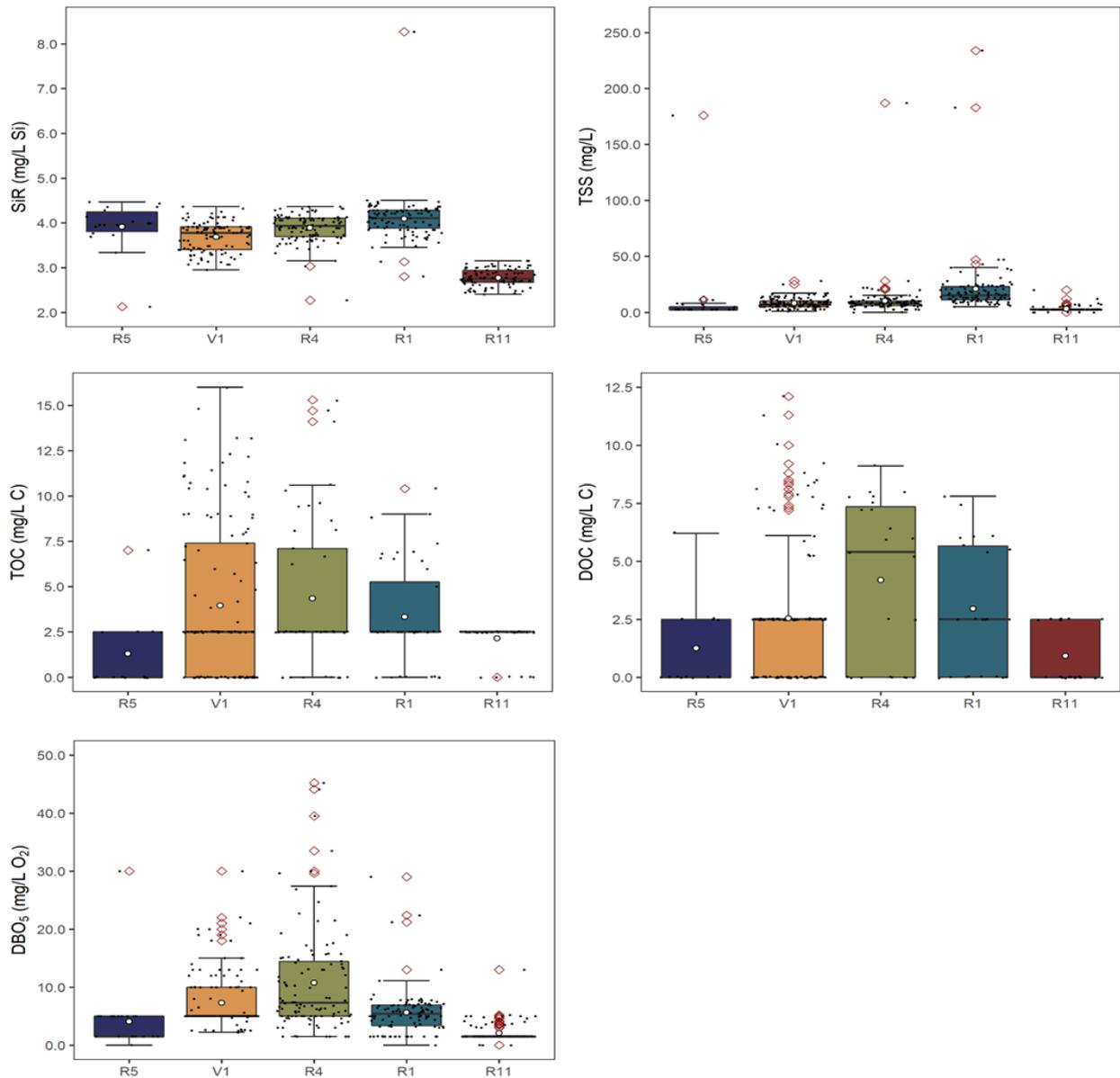


Figura 34. Diagramas de cajas de nutrientes de sílice, sólidos en suspensión y materia orgánica en las diferentes estaciones de control

Se ha realizado un informe específico sobre la conformidad de los resultados obtenidos en los registros y análisis en el entorno del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega anteriormente descritos, con relación a las **normativas de aplicación en materia de vertidos y de estado ecológico del río Val**. Este informe constituye una pieza separada del proyecto que se aporta en el APÉNDICE VI.

En las gráficas siguientes se recogen los principales resultados obtenidos en las diferentes campañas de muestreo y análisis de laboratorio, referidos a los nutrientes críticos para la eutrofización del embalse.

Durante ese periodo se aprecia que el vertido V1 marca una impronta estacional en todo el recorrido del río Val aguas abajo, con concentraciones que se van atenuando pero que alcanzan el embalse con valores aún elevados. Los valores más altos y variables de fósforo total y de amonio se producen en los meses de finales de invierno/primavera temprana y en los meses de verano.

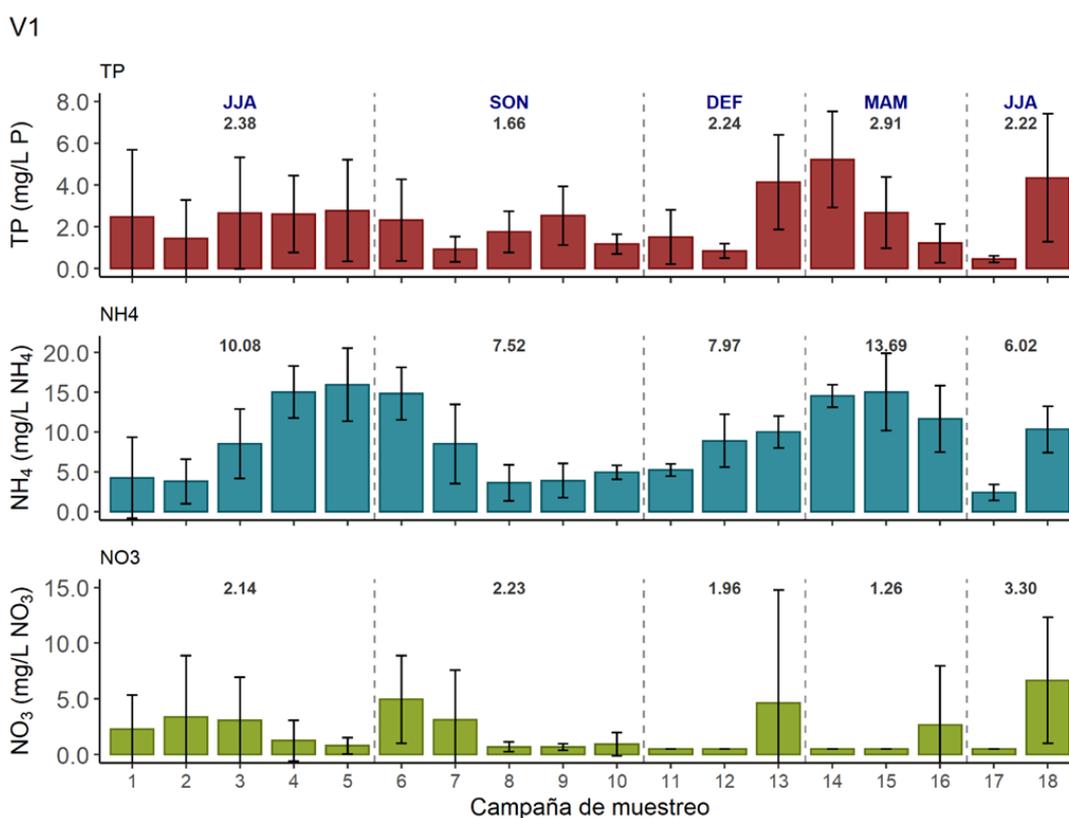


Figura 35. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el vertido (V1)

R4

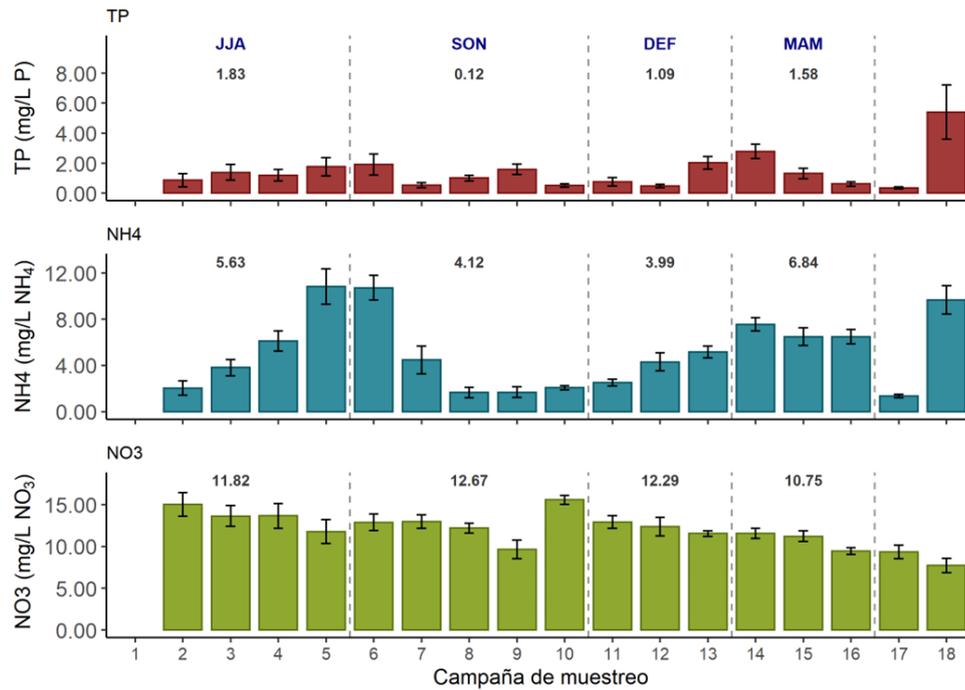


Figura 36. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R4 del río Val

R1

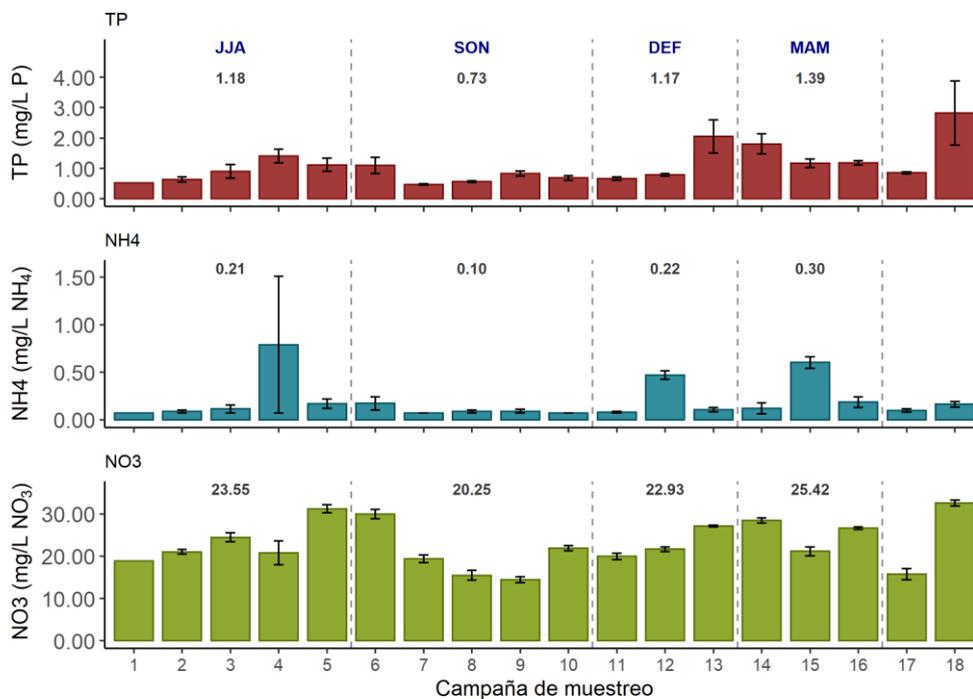


Figura 37. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R1 del río Val

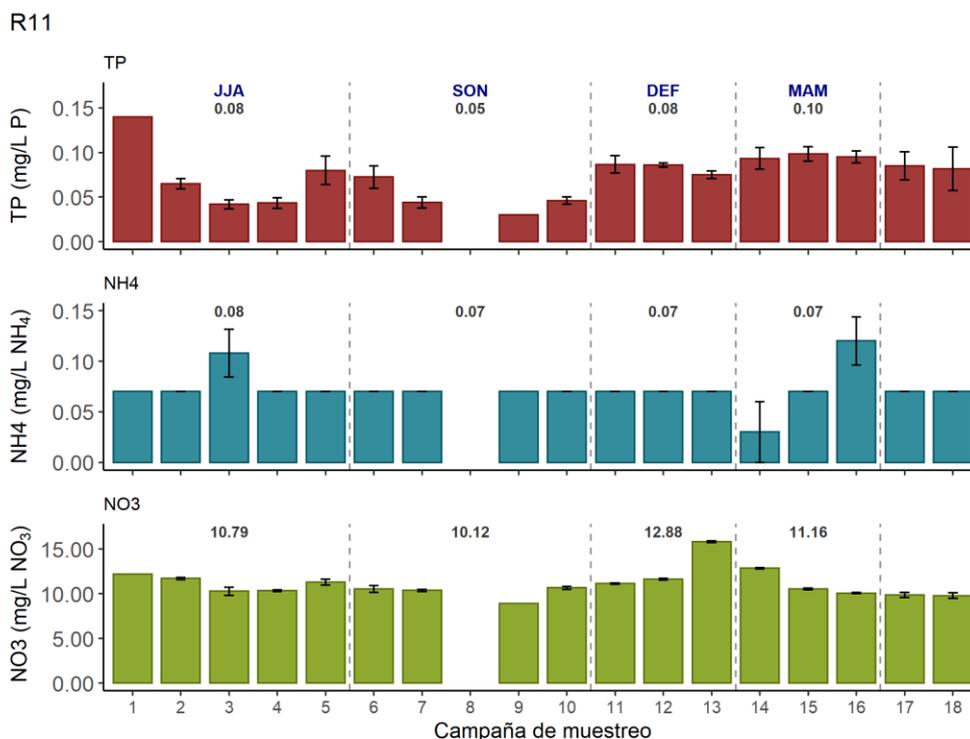


Figura 38. Evolución temporal de la concentración de nutrientes en el punto R11 del río Queiles

En la Figura 39 se muestran los principales datos de nutrientes de nitrógeno y fósforo medidos como fósforo total (TP), amonio (N-NH₄) y nitratos (N-NO₃) en los puntos detallados en la Tabla 13 durante todo el periodo de estudio.

Los datos de nutrientes varían sensiblemente su concentración dependiendo de la cuenca en la que se encuentre el punto de muestreo. Como se puede observar claramente, la cuenca que presenta concentraciones más elevadas es la del río Val, siendo las concentraciones de nutrientes en la cuenca del Queiles bastante más bajas, sobre todo en lo que a TP y NH₄ se refiere. Esta diferencia no es tan acusada en las concentraciones de NO₃. Las concentraciones de TP y NH₄ más elevadas registradas durante todo el periodo de este estudio se encuentran ambas en el punto V1 que corresponde al vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega.

Se aprecia que en general la concentración de fosforo total y amonio es más alta en los puntos del río Val influidos por el vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega. Sin embargo, los nitratos tienen concentraciones altas desde las fuentes, aguas arriba de dicho vertido, y en el río Queiles son más bajas y constantes, pero están por encima de lo que cabría esperar.

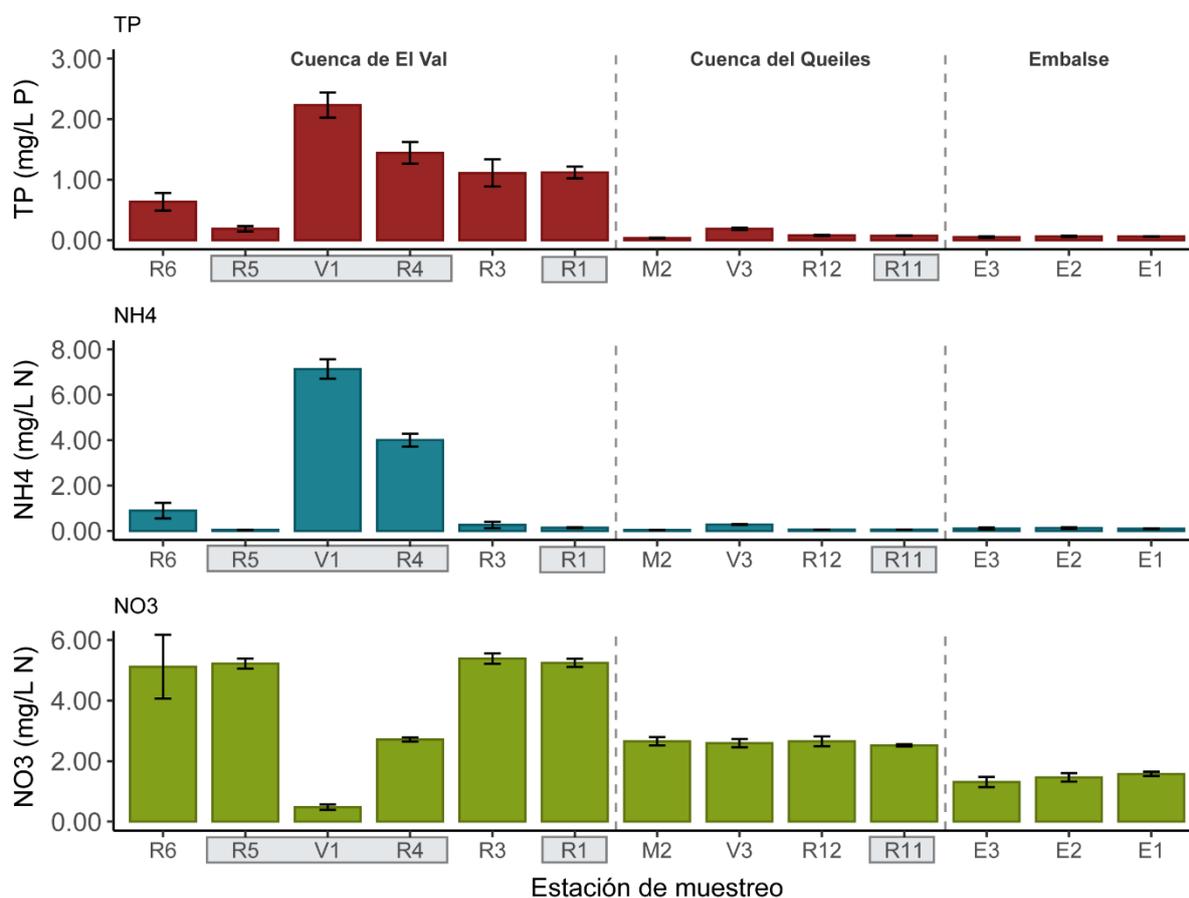


Figura 39. Concentraciones de fósforo total, amonio y nitratos en los puntos de muestro de la cuenca del Val, cuenca del Queiles y embalse del Val

Según el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas, las concentraciones de vertido de una EDAR de entre 10.000-100.000 habitantes-equivalentes (h-e) como es el caso de la EDAR de Ágreda-Ólvega (20.833 h-e) deben cumplir 2 mg/l P y/o 15 mg/l N si el vertido se realiza a una zona sensible. Las concentraciones en el punto de vertido V1 presentan una media de más de 2 mg P/l durante todo el proyecto.

Por otro lado, mediante la Resolución de 6 de febrero de 2019, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, se declararon nuevas zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias, incluyendo el Embalse de El Val, por lo que las poblaciones de más de 10.000 habitantes equivalentes que se produzcan sobre estas zonas declaradas sensibles o sobre su área de captación, deberán de disponer de un tratamiento más riguroso que el secundario, viéndose por lo tanto afectado el vertido conjunto de Ágreda y Ólvega. Por esta razón, en la revisión de la

autorización de vertido recientemente otorgada, se han establecido límites de 15 mg/l de N y de 2 mg/l de P, tal y como exige la normativa, a cumplir cuando sea remodelada la EDAR 

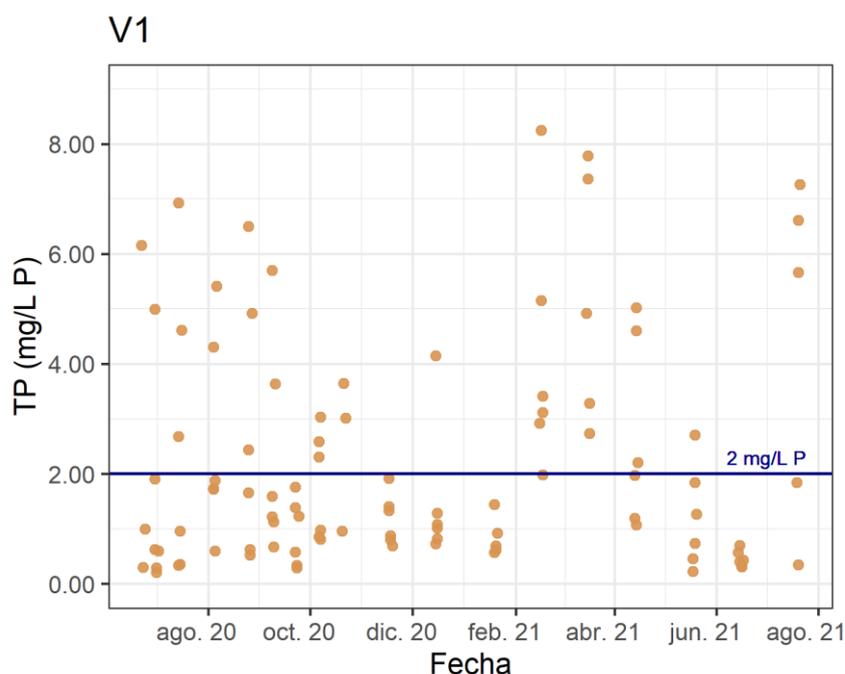
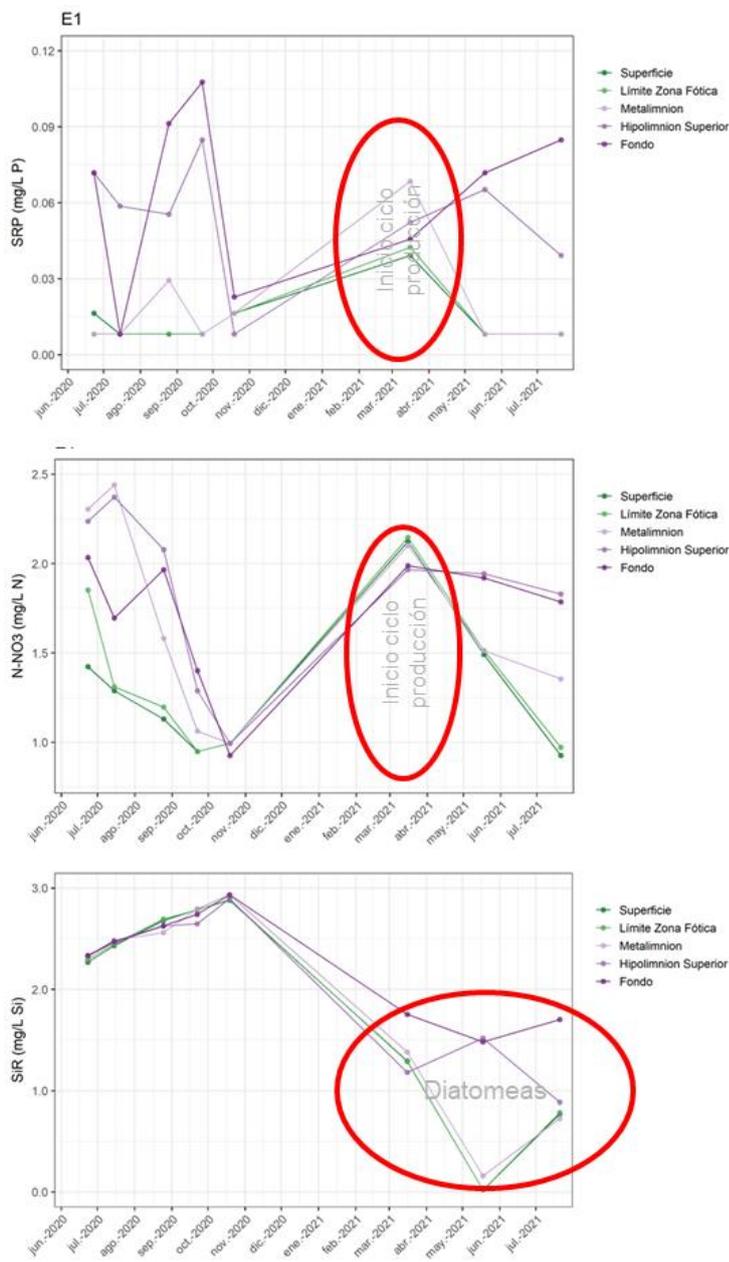


Figura 40. Concentración de fósforo total en el vertido (V1) respecto a umbral de la normativa zonas sensibles, para vertidos de entre 10.000 heq y 100.000 heq

Los límites exigidos en cuanto al nitrógeno total (TN) en el vertido son más elevados (15 mg N/l) que los de TP según el mismo Real Decreto 509/1996. Los resultados de concentración de NH_4 y NO_3 mostrados en la Figura 39 sugieren que los niveles de nitrógeno aportado a la cuenca del Val no representan tanto problema como los de TP en lo que a esta normativa en concreto se refiere.

En la citada figura se aprecia que las concentraciones de fósforo en el punto de muestreo R1, que corresponde al punto de entrada de agua al embalse, son algo más bajas que en el vertido (V1) y que aguas abajo del mismo (R4), pero más elevadas que en el punto aguas arriba del vertido (R5). Sin embargo, los nitratos presentan una concentración similar en R1 y en R5, lo que implica que la autodepuración de los nitratos en ese recorrido no es suficiente para compensar la nitrificación del amonio del vertido. En todo caso, la aportación de agua del río Val al embalse tiene un alto contenido en ambos nutrientes, con un origen mayoritario del fósforo en la EDAR de Ágreda-Ólvega, y de origen compartido entre la citada EDAR y las aguas del río Val aguas arriba del vertido en el caso del nitrógeno.

En cuanto a los resultados de los **análisis realizados en el embalse**, y que se facilitan en el APÉNDICE VII, se extraen las siguientes apreciaciones relevantes:



La concentración de nutrientes en el embalse está en valores elevados al inicio del periodo de crecimiento del fitoplancton (abril), pero se van consumiendo durante el periodo de estratificación en los estratos más superficiales, que son en los que el fitoplancton recibe luz suficiente para realizar la fotosíntesis. Durante la primavera se consume la sílice, lo que resulta limitante para las diatomeas, que son reemplazadas por otros grupos fitoplanctónicos a lo largo del verano y eso permite que se recuperen los niveles de este nutriente en el verano temprano.

Figura 41. Evolución temporal de la concentración de nutrientes inorgánicos en diferentes estratos verticales del embalse

En las 4 campañas realizadas en diferentes estaciones del embalse (Figura 42), se aprecia una alternancia en cuanto a las concentraciones de fósforo total en superficie, pero en las muestras de fondo los valores desde el final del verano son más altos en el hipolimnion de la estación de cabecera. La ratio NIT/TP es lo bastante alta como para que el nitrógeno no sea el factor limitante del crecimiento algal, excepto en la estación E2 en el mes de septiembre.

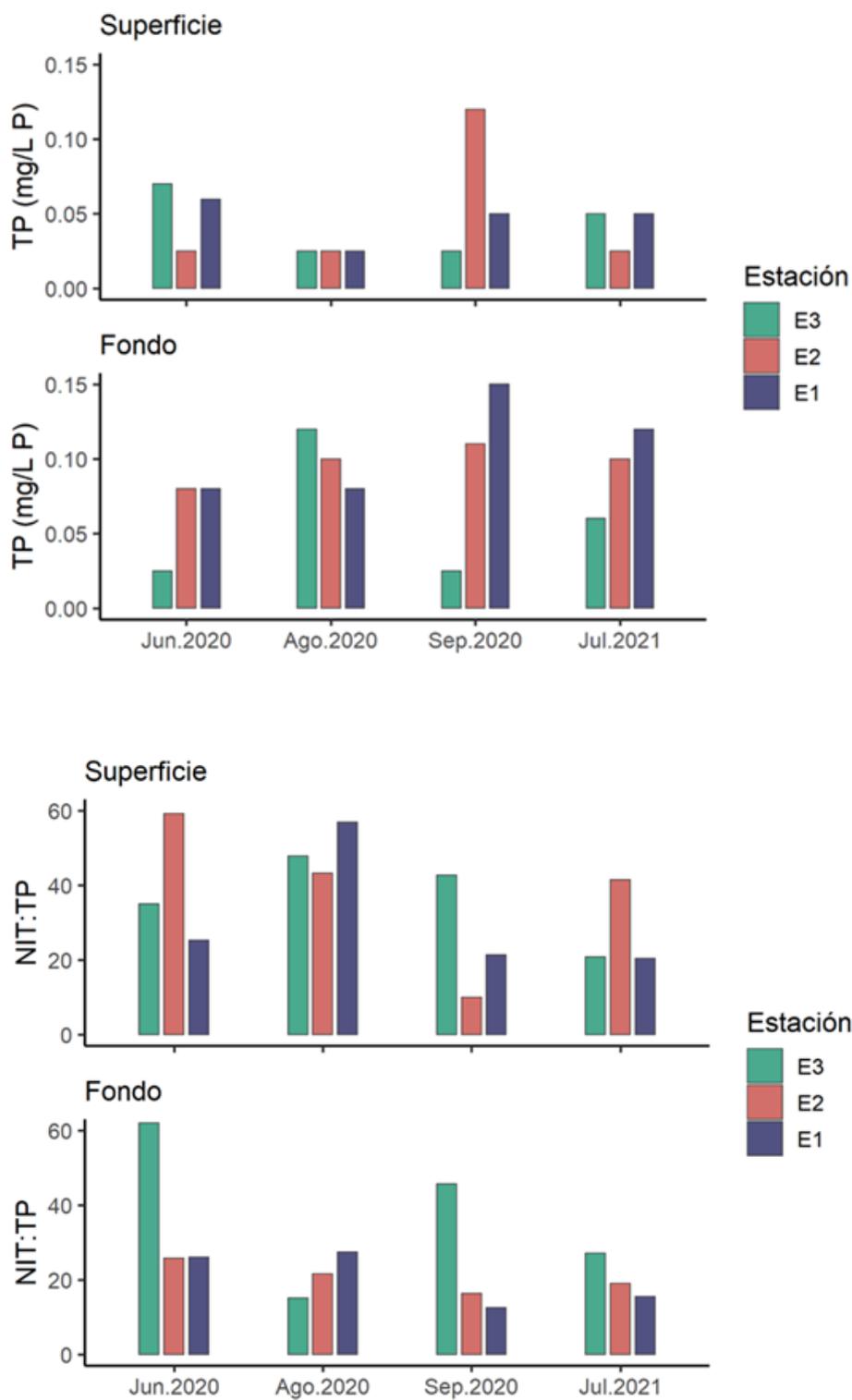


Figura 42. Concentración de TP y ratio NIT/TP en diferentes estaciones y estratos verticales del embalse

En el APÉNDICE VIII se facilitan los resultados pormenorizados en las muestras de fitoplancton que se han analizado en el proyecto. A continuación, se destacan los hallazgos más relevantes en este aspecto del Estudio, y que se ilustran en la Figura 43.

En términos de biovolumen total de fitoplancton, prácticamente todas las muestras se clasifican en estado de EUTROFIA y con la concentración de clorofila *a* se clasifican en estado de EUTROFIA o de HIPEREUTROFIA.

A lo largo de las campañas realizadas en los periodos 2020 -2022 se han identificado un total de 73 taxones en los diferentes puntos de muestreo. El nivel de resolución taxonómica ha sido de 19 taxones identificados a nivel de GÉNERO y 54 taxones a nivel de ESPECIE.

En las cuatro estaciones de muestreo las comunidades están dominadas por las cianobacterias, con un valor porcentual de abundancia superior al 80%, alcanzando en la estación E2 su máxima dominancia (96%). A este grupo, le siguen las criptofíceas, clorofíceas y bacillariofíceas con porcentajes de abundancia mucho menores (<10%). Hay no obstante picos de biomasa de dinofíceas en el mes de septiembre de 2020, que presentan los valores máximos absolutos de biovolumen (30 - 40 mm³/L).

En cuanto a las especies de cianobacterias, se observa una alternancia en la dominancia de dos especies de cianobacterias nostocales: *Aphanizomenon* sp. y *Dolichosperpum mendotae*, que además ha resultado ser productora de toxinas en el embalse (en concreto, anatoxinas y microcistinas). También aparece en alguna ocasión *Microcystis* sp. Los picos de cianobacterias se producen durante el periodo estival avanzado y de forma algo más atenuada en la primavera.

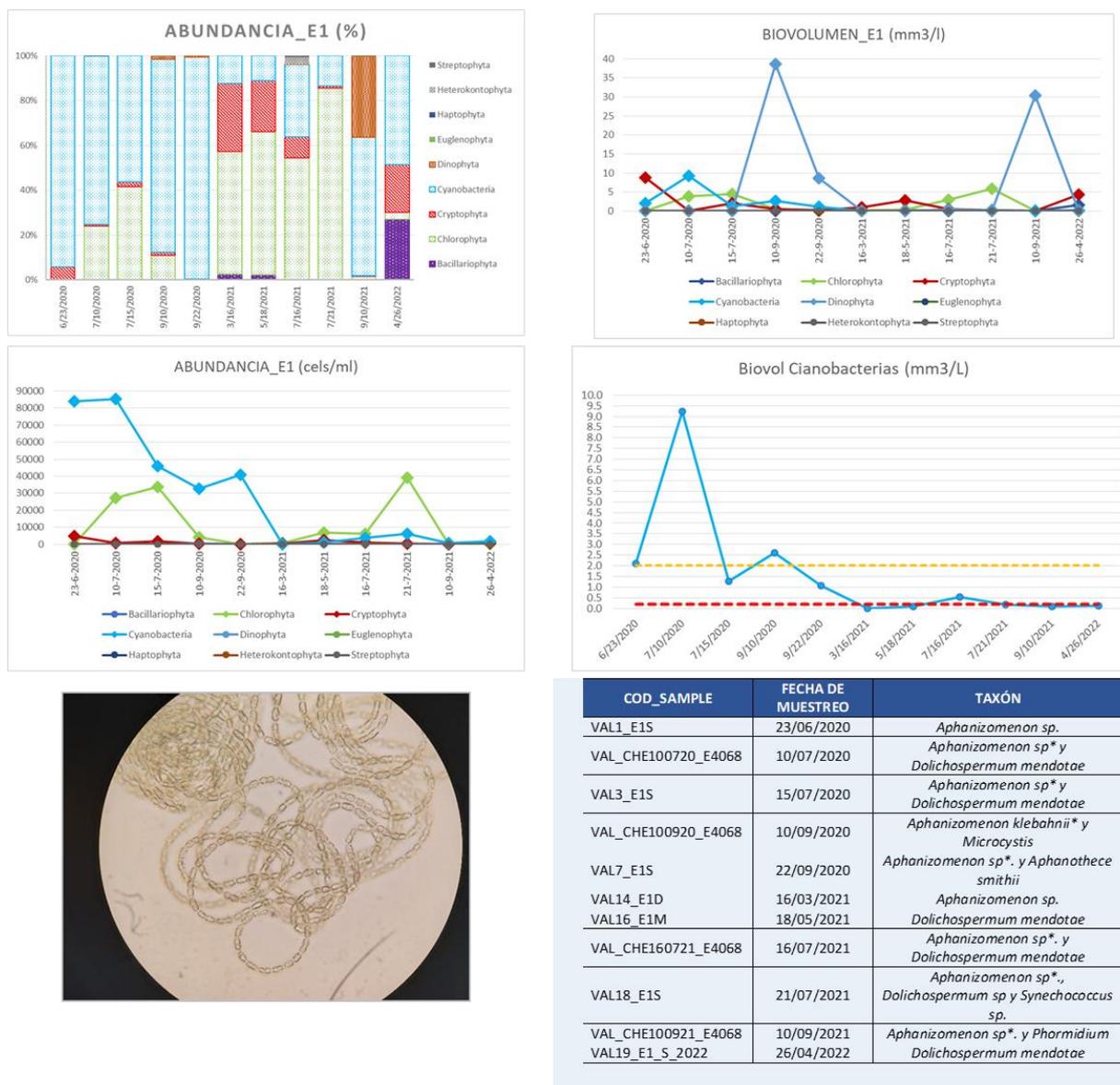


Figura 43. Tablas y gráficos representativos de los resultados de los análisis de fitoplancton, e imagen de microscopio óptico de *Dolichospermum mendotae*.

Mediante el análisis de los datos diarios ofrecidos por la sonda perfiladora Aquadam, se ha trazado con mayor resolución temporal la evolución de la biomasa de fitoplancton (fluorescencia *in vivo* de la clorofila a).

En la Figura 44 se pueden observar los crecimientos estivales y post-estivales que son habituales en los embalses eutrofizados, pero en el año 2021 es mucho más intenso que en el 2020, con valores al final del verano que superan los 100 $\mu\text{g/L}$. Además, en la primavera de 2021 aparece un breve pico a nivel superficial y en el año 2022 se reproduce.

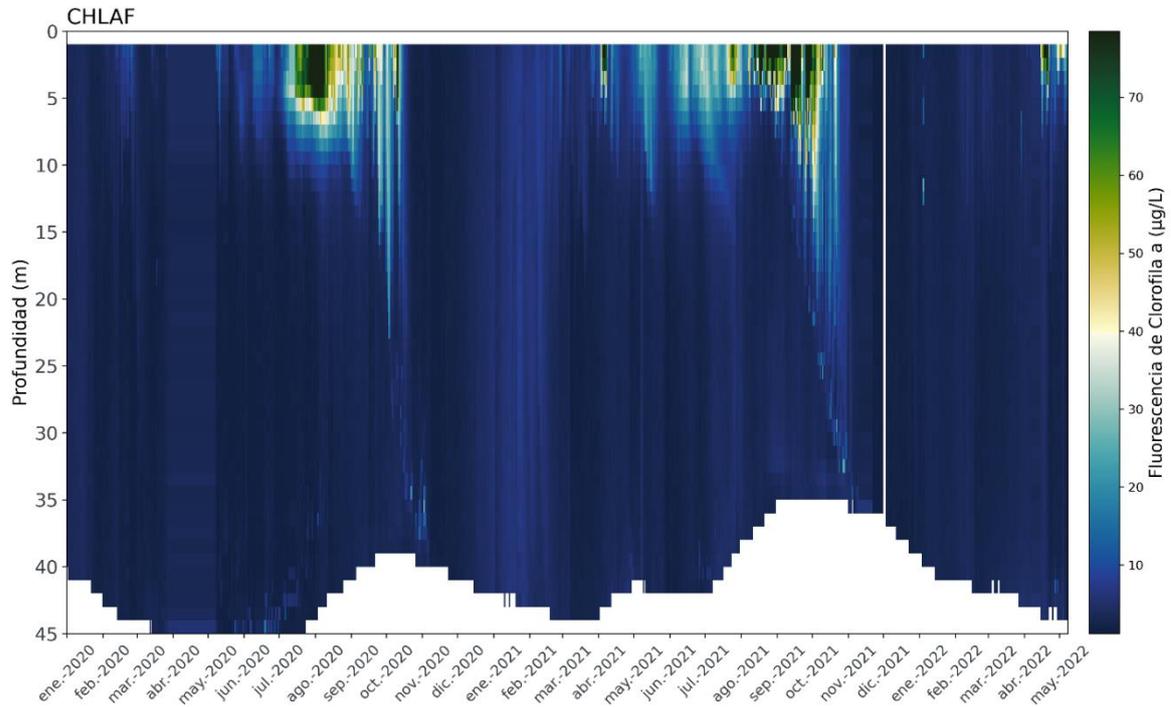


Figura 44. Gráfico de fluorescencia de clorofila a en profundidad y a lo largo del tiempo (enero 2020 a la actualidad).

Si se calcula un valor promedio en la zona fótica de cada perfil (Figura 45), se aprecian más claramente los valores que alcanzan dichos picos.

Clorofila a media diaria en la zona fótica

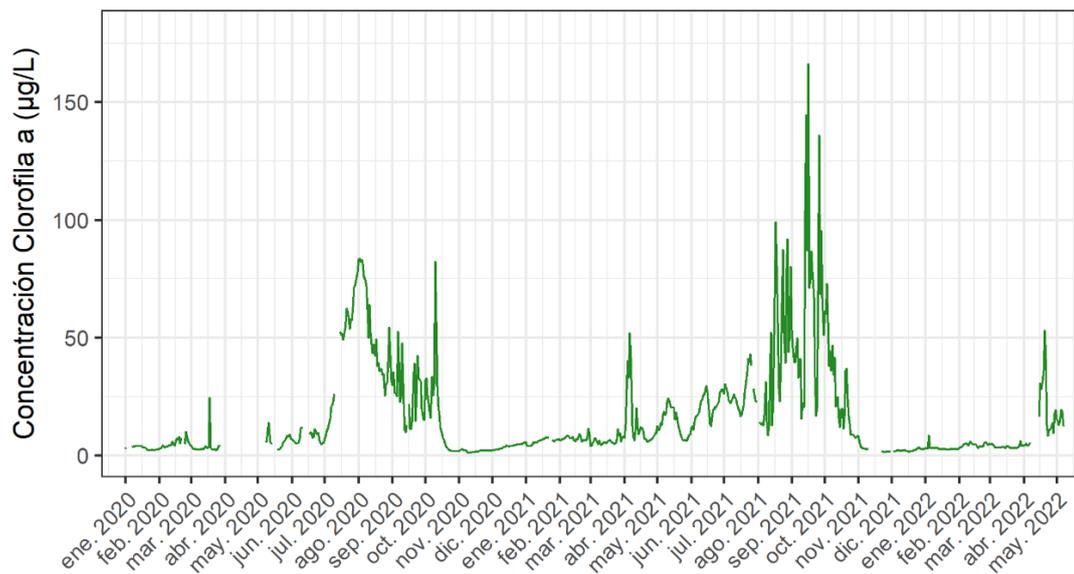


Figura 45. Evolución del valor medio en la zona fótica de fluorescencia de clorofila a.

Si traducimos estos valores en categorías de estado trófico según los umbrales de la OCDE (Figura 46), se puede apreciar que entre mayo y noviembre el embalse está en situación de EUTROFIA o de HIPEREUTROFIA. Incluso en los meses de invierno y de primavera temprana se dan situaciones de EUTROFIA intermitente.

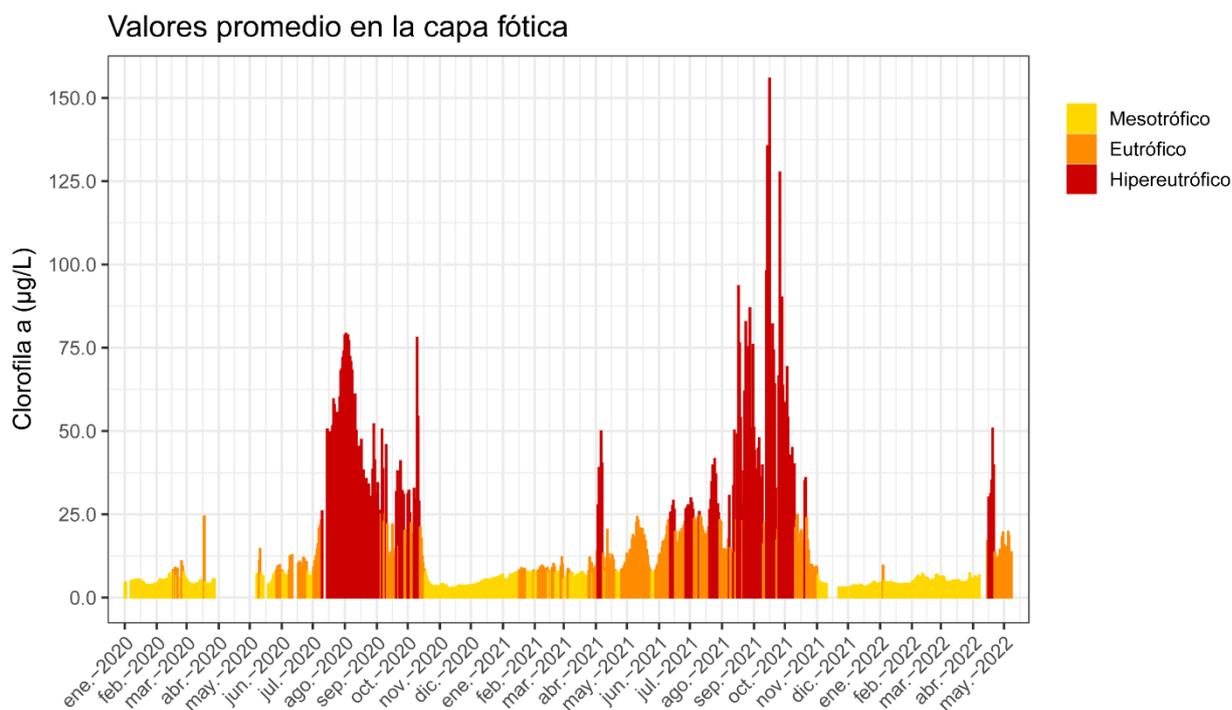


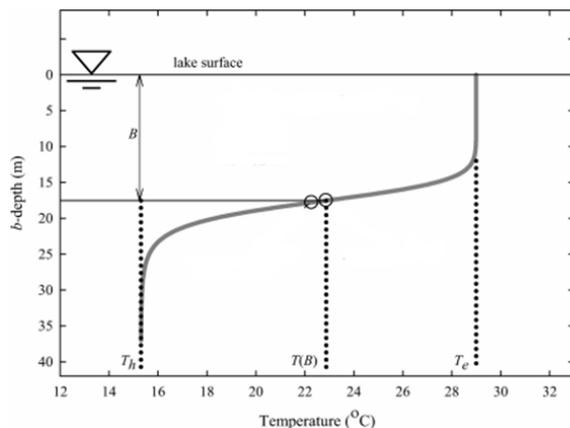
Figura 46. Estado trófico según el valor medio en la zona fótica de fluorescencia de clorofila a.

6.6. SISTEMA DE INFORMACIÓN LIMNOLÓGICA

Aparte de los datos que ofrecen directamente cada uno de los sensores en cada medida, se han generado valores de una serie de parámetros e indicadores de utilidad en la gestión limnológica, y que se han utilizado en los diferentes apartados que constituyen este informe.

Se parte de un desarrollo específico que permite calcular de forma automática y objetiva las diferentes capas verticales en función de su estructura térmica. Se computa la curva de temperatura y los valores de los parámetros que determinan las diferentes capas o estratos verticales (epi, meta e hipolimnion). Con este fin, se ha programado un algoritmo que permite ajustar el perfil de temperatura mediante una ecuación empírica (Cook & Rimmer, 2010).

Los parámetros α y n se determinan por ajuste a dicha ecuación por iteración, minimizando la suma del error cuadrático entre los valores observados (perfil térmico registrado) y esperados (función ajustada).



$$T(z) = T_h + \frac{T_e - T_h}{\left(1 + (\alpha Z)^n\right)^{\frac{1}{n}}}$$

α = Parámetro que ajustar la curva (en m⁻¹). Determina la profundidad del gradiente máximo de temperatura.
 n = parámetro adimensional que controlan la pendiente del gradiente térmico en el ajuste de la curva.
 T_e = Temperatura del epilimnion.
 T_h = temperatura del hipolimnion.
 Z = Medidas de la profundidad (variable independiente).

Figura 47. Esquema y ecuación del algoritmo de ajuste al perfil térmico vertical (a partir de Cook & Rimmer, 2010).

El resultado de la aplicación de este algoritmo a los datos de la sonda Aquadam se facilita en la figura siguiente, en la que se aprecia que la termoclina se forma de manera estable durante el mes de abril y que a partir de julio se va hundiendo progresivamente hasta desaparecer a principios del mes de noviembre. Entre noviembre y abril se producen situaciones de estratificación térmica intermitente.

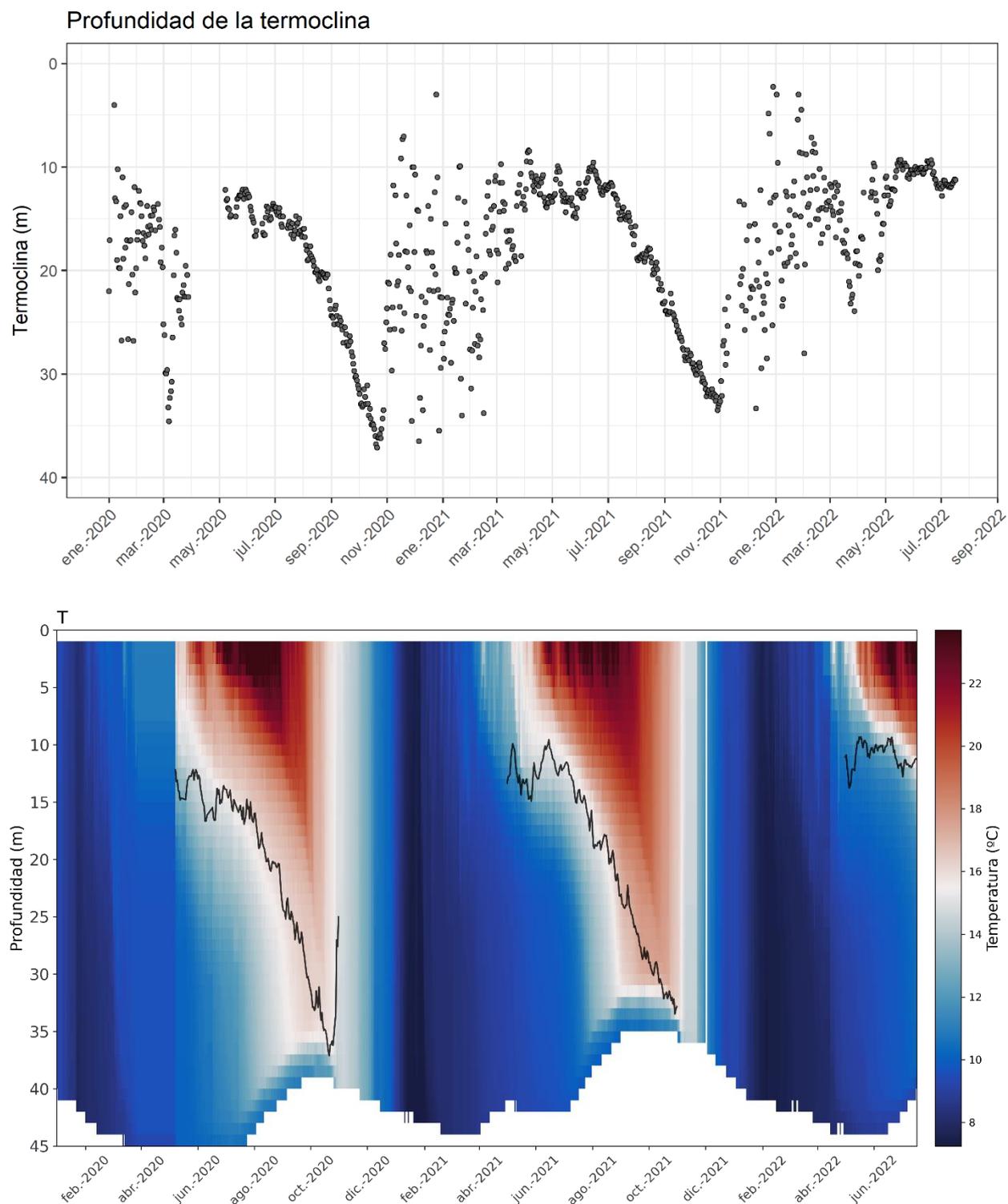


Figura 48. Resultado de la aplicación del algoritmo de detección de termoclina a los datos de la sonda Aquadam durante el periodo del Estudio. Profundidad de la termoclina (arriba) y trazado de termoclina sobre los datos de temperatura de la sonda Aquadam (abajo).

Otra de la serie de datos disponibles con alta frecuencia y relevante para la eutrofización es la concentración de clorofila a. Si se representa la concentración media de clorofila a en los 5 m más superficiales a lo largo de los últimos 4 años, se aprecia que hay valores muy altos en el verano de 2018 y que en los dos años siguientes se moderaron, pero en 2021 otra vez se elevan, aunque menos (Figura 49).

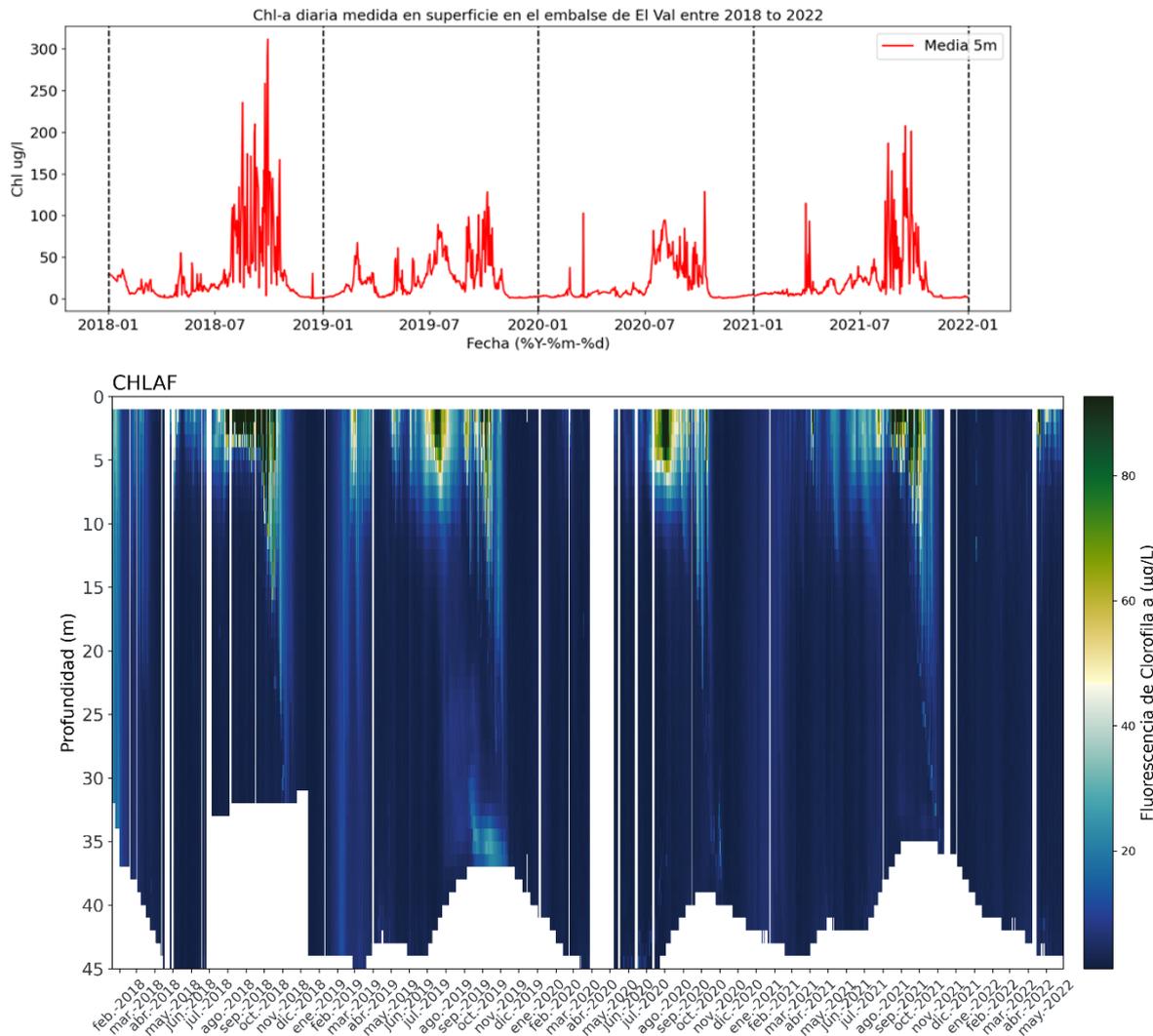


Figura 49. Valores de clorofila a en el embalse registrados por la sonda Aquadam. Arriba valores medios en 5 m superficiales y abajo valores en cada metro de profundidad.

A continuación, se listan los diferentes indicadores que se han calculado y manejado para diferentes procesos a lo largo del Estudio y que resultarían de gran utilidad en el seguimiento de la evolución futura de esta masa de agua:

Hidromorfológicos y físicos

- Nivel, superficie y volumen de embalse.
- Profundidad máxima y actual en estación.
- Tiempo de residencia hidráulica en diferentes compartimentos.
- Profundidad de termoclina en cada perfil.
- Profundidad de los límites superior e inferior del metalimnion.
- Transparencia del agua, a partir de datos de turbidez y lecturas del disco de Secchi.
- Profundidad de zona fótica.

Físico-químicos

- Saturación de oxígeno disuelto en zona fótica.
- Déficit hipolimnético de oxígeno disuelto.

Eutrofización

- Índice de biomasa de fitoplancton.
- Biovolumen de cianobacterias.
- Índices de estado trófico basados en transparencia y clorofila *a*.

Potencial ecológico

- Valores de los elementos indicadores en embalses y del potencial ecológico al uso en la red de seguimiento del estado ecológico de la CHE.

6.7. GENERACIÓN DE VALORES DIARIOS DE NUTRIENTES

Para acometer el modelado y la predicción de la eutrofización se necesitan datos de las aportaciones de nutrientes al embalse con una frecuencia elevada (idealmente horaria o mayor). De este modo se evita el enmascaramiento de eventos que podrían tener lugar entre dos datos sucesivos y por tanto la infraestimación de riesgos. Por ello, en el contexto de este proyecto resulta vital generar una serie realista de concentración diaria de nutrientes en las aportaciones principales al embalse: ríos Val (R1) y Queiles (R11).

Sin embargo, la instrumentación existente para monitorizar nutrientes con alta resolución no es apta para su funcionamiento a largo plazo en ambientes hostiles de campo, ya sea por el elevado coste de fabricación y mantenimiento de los sensores o analizadores o por la escasa estabilidad de algunos tipos de sensores.

6.7.1. *Interpolado de datos para generación de series diarias actuales*

Como alternativa a cualquier estrategia de modelado, incluyendo las técnicas de Inteligencia Artificial en los sensores de datos, se puede generar una serie de valores de concentración de nutrientes con frecuencia sistemática de resolución temporal diaria mediante interpolado temporal de las 18 campañas ejecutadas en los puntos críticos de río y vertido, y las 6 muestras tomadas en cada una. De esta forma, se pueden utilizar estas series para las actividades de modelado (ver más adelante), antes de disponer de las herramientas desarrolladas y calibradas de sensores de datos.

Se han realizado para ello diferentes ejercicios de interpolado temporal hasta alcanzar los más realistas para cada parámetro. En general, el método óptimo ha resultado ser el MARS (*Multivariate Adaptive Regression Splines*), que es un método de modelado no incorporando no linealidades e interacciones de variables al modelo lineal. Divide la serie de datos en tramos o regiones a las que va ajustando regresiones lineales que luego se combinan.

En las 6 réplicas (diferentes horarios) de cada una de las 18 campañas se observa en las estaciones afectadas por el vertido de la EDAR una variabilidad superior a la que se da entre campañas de muestreo. En el apartado dedicado a los datos de entrada del modelo de simulación del embalse se proporciona la serie diaria resultante para cada variable y punto de control.

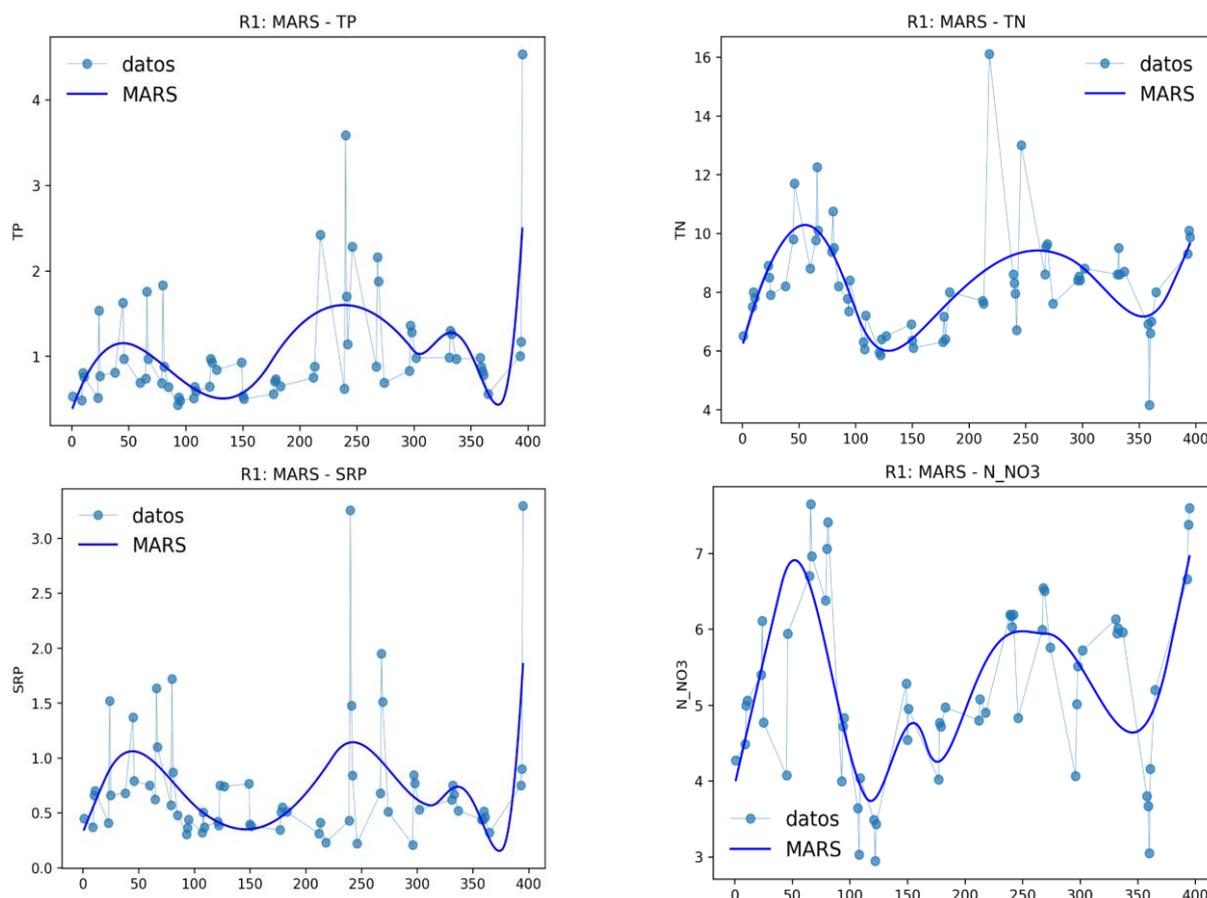


Figura 50. Ejemplo de interpolación mediante regresión MARS para generar datos diarios de nutrientes en R1

6.7.2. Desarrollo de sensores de datos para aplicación en monitorización futura

En el APÉNDICE IX se describe en detalle la técnica y la aplicación a los datos del proyecto, y a continuación se resumen los resultados obtenidos.

- Se han ajustado modelos para predecir las concentraciones de distintas especies de nutrientes en las estaciones de control R1 y R11.
- De forma general, se aprecia que el error de los modelos disminuye a medida que se incrementa el número de variables predictoras. La obtención de ajustes de calidad



requiere de modelos basados en la combinación de al menos cuatro variables predictoras.

- Las observaciones recogidas por la WIZ-SYSTEAM han permitido ampliar al conjunto de datos de entrenamiento y mejorar los modelos obtenidos, especialmente el modelo utilizado en la predicción del P-PO₄.
- Los resultados reafirman la importancia de variables como el caudal de R1 y la concentración de nitrato (inferida por espectrofotometría UV) para mejorar la capacidad predictiva de los modelos. El caudal se presenta como una variable fundamental en la predicción de TP y P-PO₄, mientras que la concentración de N-NO₃ tiene mayor peso en la predicción de N-NH₄.
- Las variables obtenidas a partir de la monitorización en continuo resultan un apoyo vital en la combinación final de predictores. Los esfuerzos puestos en la mejora del mantenimiento han mejorado significativamente la calidad de los datos y actualmente se dispone de más de 8.000 observaciones en formato horario.
- Respecto a las variables derivadas de la monitorización en continuo, cabe destacar el papel del potencial de óxido-reducción (ORP), del oxígeno (DO y DOSAT) y de la temperatura (T), dado que en la mayoría de las pruebas se mantienen como últimas variables en ser eliminadas por la función de selección secuencial, lo cual pone de manifiesto su importancia y su peso en la estimación de la concentración del nutriente.

- Se han conseguido muy buenos ajustes en las colecciones de datos de entrenamiento y su aplicación posterior a los datos de monitorización en continuo disponibles (aquellos en los que se ha podido tener un valor del caudal) ha resultado también satisfactoria, como se muestra en las figuras siguientes.

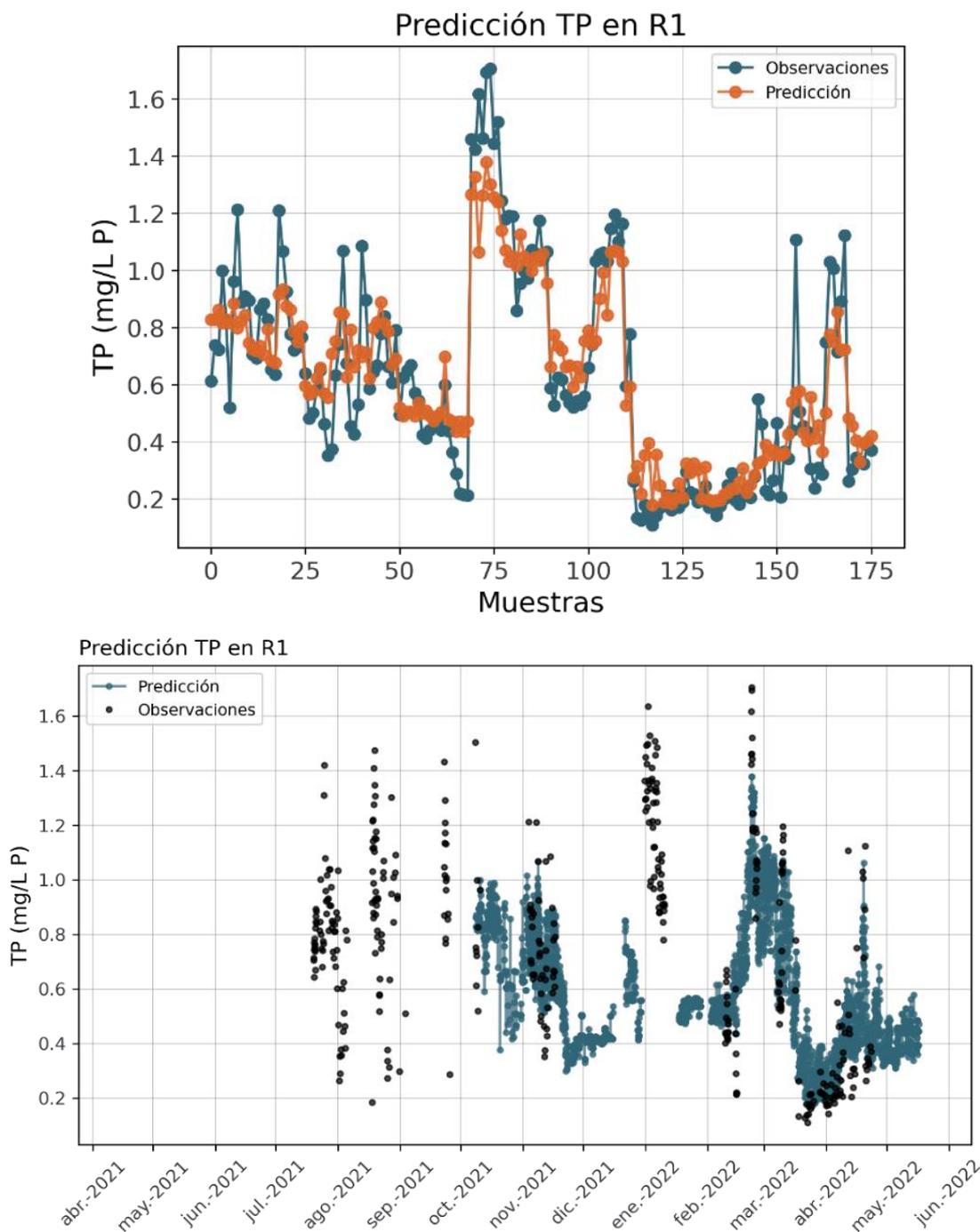


Figura 51. Aplicación del algoritmo de sensor de datos al TP en R1. Set de entrenamiento (arriba) y set de datos curados en continuo disponibles (abajo).



- Para que esta herramienta funcione adecuadamente, es imprescindible implementar procedimientos optimizados de mantenimiento preventivo de los sensores básicos (caudal y fisicoquímica *in situ*), lo que mejoraría la calidad de los datos de las variables predictoras y reduciría el número de períodos con ausencia prolongada de medidas.
- Es también vital mantener en funcionamiento el sensor de presión dedicado a la medición del caudal en R1, en tanto en cuanto no se ponga en marcha la estación de aforo programada en R1. Estos datos no sólo ayudarían a la inferencia de la concentración de nutrientes, sino que aportan una valiosa información para mejorar el conocimiento de la dinámica del sistema cuenca/embalse.

6.8. ESTIMACIÓN DEL ORIGEN DE NUTRIENTES MEDIANTE ISÓTOPOS ESTABLES

En el APÉNDICE X se facilita una descripción más detallada de esta técnica y de la metodología aplicada en el presente ESTUDIO, y en este apartado de la MEMORIA se recogen los aspectos más relevantes que han resultado de aplicación directa, asumiendo que esta técnica tiene mucho más recorrido futuro tanto en este ámbito como en otros sometidos a presiones antrópicas de carácter difuso.

6.8.1. Introducción a la técnica

Los isótopos estables son átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente peso atómico que sus congéneres, debido a que tienen diferente número de neutrones. Algunos son estables (no se desintegran como los radiactivos) y pesados (tienen más neutrones que el átomo normal). Algunos ejemplos son el deuterio (hidrógeno con un neutrón), ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O o ^{34}S , todos ellos isótopos pesados y estables de los correspondientes elementos (^{12}C , ^{14}N , ^{16}O o ^{32}S , respectivamente).

Resulta interesante en ecología el hecho de que la materia viva discrimina a estos isótopos pesados incorporándolos diferencialmente en los procesos fisiológicos, con el resultado de que su concentración en los seres vivos es diferente que en el material de partida. Además, la intensidad de la discriminación, es decir, la ratio isotópica resultante, es característica de determinados procesos y fuentes de procedencia (naturales o antrópicas), de modo que dejan una impronta en los nutrientes circulantes en el medio que, siempre que se controlen esos procesos intermedios (nitrificación, habilitan la posibilidad de trazar la influencia de esas fuentes en los nutrientes analizados.

La discriminación isotópica de un elemento se indica por la letra δ y frecuentemente se calcula como:

$$\delta X = [(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 10^3$$

Donde X representa el isótopo analizado y R representa la proporción del isótopo analizado respecto a su forma natural. Por lo tanto, se expresa en valores relativos a un estándar. En ocasiones se denomina también ΔX , que es la notación que se aplica en los resultados de este informe. Para mayor claridad se explica con un ejemplo: En la notación de este informe, $\Delta^{18}\text{O}$ es la ratio del isótopo pesado ^{18}O respecto al ^{16}O en el nutriente analizado en la muestra de agua, dividido por esa misma ratio en la referencia (estándar de Viena de agua oceánica).



Tradicionalmente, los análisis de isótopos estables (en adelante, SIA, del inglés *Stable Isotope Analysis*) se han aplicado como trazadores en estudios geoquímicos (^2H), astrobiología y medicina. En ecología se aplican ya con cierta asiduidad al estudio del flujo de energía en las redes tróficas (normalmente usando ^{13}C y ^{15}N) y contribuyen a trazar y cuantificar las relaciones tróficas.

Una aplicación más reciente y muy prometedora en el estudio de la eutrofización de las aguas son los SIA en nutrientes disueltos, con el fin de trazar su origen (trazado de fuentes o “*source tracking*”). En este ámbito se trabaja con el isótopo ^{15}N en los nitratos y amonio (NO_3 y NH_4) y se está empezando a aplicar con el ^{18}O en nitratos y fosfatos (NO_3 y en PO_4).

La nueva legislación comunitaria en materia de concentración de nitratos y nitritos en aguas está obligando a realizar modificaciones en las depuradoras urbanas, y así como otros cambios en las estrategias ganaderas o agrícolas que pueden tener importantes costes económicos y sociales. Sin embargo, no se tiene la certeza de que tras estos cambios el problema se solucione, ya que no se conoce, ante una contaminación difusa, como contribuye cada fuente de contaminación: urbana, fertilizantes agrícolas, residuos ganaderos, industriales o una procedencia atmosférica. Ante este contexto, resulta necesario emplear nuevas metodologías centradas en el estudio de las razones isotópicas ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$) de los nitratos disueltos, con el objeto de cuantificar la proporción con la que contribuye cada una de las posibles fuentes de contaminación, lo que permite aportar información complementaria para afrontar correctamente este problema.

Las contaminaciones puntuales en el espacio y persistentes en el tiempo son relativamente fáciles de localizar y solucionar. Sin embargo, en la mayor parte de los casos nos encontramos ante contaminaciones difusas, en las que suelen intervenir varias fuentes: agrícola, industrial, ganadera, residuos urbanos, etc., resultando complicado cuantificar la contribución de cada fuente. Muchas veces son múltiples contaminaciones esporádicas, a lo que se le suman diversos procesos biogeoquímicos y otras aportaciones naturales que difuminan o enmascaran la química original de cada contaminante. En la práctica, las políticas de conservación del medio ambiente se encuentran ante el problema de que no pueden tomar medidas adecuadas cuando desconocen la importancia real de cada fuente de contaminación.

El estudio de isótopos estables en nitratos puede aportar una información muy completa de los procesos relacionados con la eutrofización de las aguas y, en concreto en este Estudio,

permite asignar la contribución de fuentes de aportación difusa a la concentración de nutrientes observada, especialmente en puntos no influidos por vertidos puntuales de aguas residuales urbanas.

6.8.2. Muestras y análisis de isótopos estables

Como se ha descrito en el apartado 6.3., en las campañas sistemáticas realizadas en el periodo de estudio se recogieron muestras en los puntos de monitorización de las cuencas del Val y del Queiles y en diferentes momentos del año para el análisis de isótopos estables. Aparte de esto, se tomaron muestras adicionales en puntos que se consideraron críticos para identificar la contribución de las aportaciones difusas de origen ganadero y algunos vertidos en origen. En el APÉNDICE X se facilitan los resultados pormenorizados de todos los análisis isotópicos realizados.

Tabla 16. Relación de estaciones de muestreo en las que se han analizado isótopos estables

ESTACION	CUENCA	CATEGORIA	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA
R1	VAL	Río	Río Val, entrada cola embalse	Los Fayos	Zaragoza
R11	QUEILES	Río	Azud del Queiles	Los Fayos	Zaragoza
R4	VAL	Río	Río Val, aguas abajo EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria
R5	VAL	Río	Río Val, aguas arriba EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria
V1	VAL	Vertido	Vertido EDAR de Ágreda-Ólvega	Ágreda	Soria
M1	VAL	Manantial	Manantial Ojillos de Agreda	Los Fayos	Zaragoza
M2	QUEILES	Manantial	Nacimiento del Queiles. Entrada Piscifactoría	Vozmediano	Soria
M3	VAL	Manantial	Río Val aguas arriba EDAR de Ágreda-Ólvega. Manantial del Ojillo o de la Caseta	Ágreda	Soria
M4	VAL	Manantial	Manantial de Fte. Bomitrosa	Ólvega	Soria
R3	VAL	Río	Río Val a la altura de "El Mojón", entre R4 (EDAR de Ágreda-Ólvega) y R2	Ágreda	Soria
R6	VAL	Río	Arroyo de los Caños, aguas abajo del Polígono Industrial Emiliano Revilla, en Ólvega	Ágreda	Soria
R7	VAL	Arroyo	Nacimiento arroyo de La Vega en puerto de Carrascal	Ólvega	Soria

ESTACION	CUENCA	CATEGORIA	DESCRIPCION	MUNICIPIO	PROVINCIA
R14	QUEILES	Río	Río Queiles aguas abajo de Vozmediano, a la salida de la CH Queiles	Vozmediano	Soria
R15	QUEILES	Río	Río Queiles, aguas abajo de piscifactoría	Vozmediano	Soria
RES2	VAL	Residuo	Granja conejos	Ólvega	Soria
RES3	VAL	Residuo	Balsa purín granja de cerdos	Ólvega	Soria
V2	VAL	Vertido	Vertido fábrica de quesos Saiona (Pol. Ind. Ólvega)	Ólvega	Soria

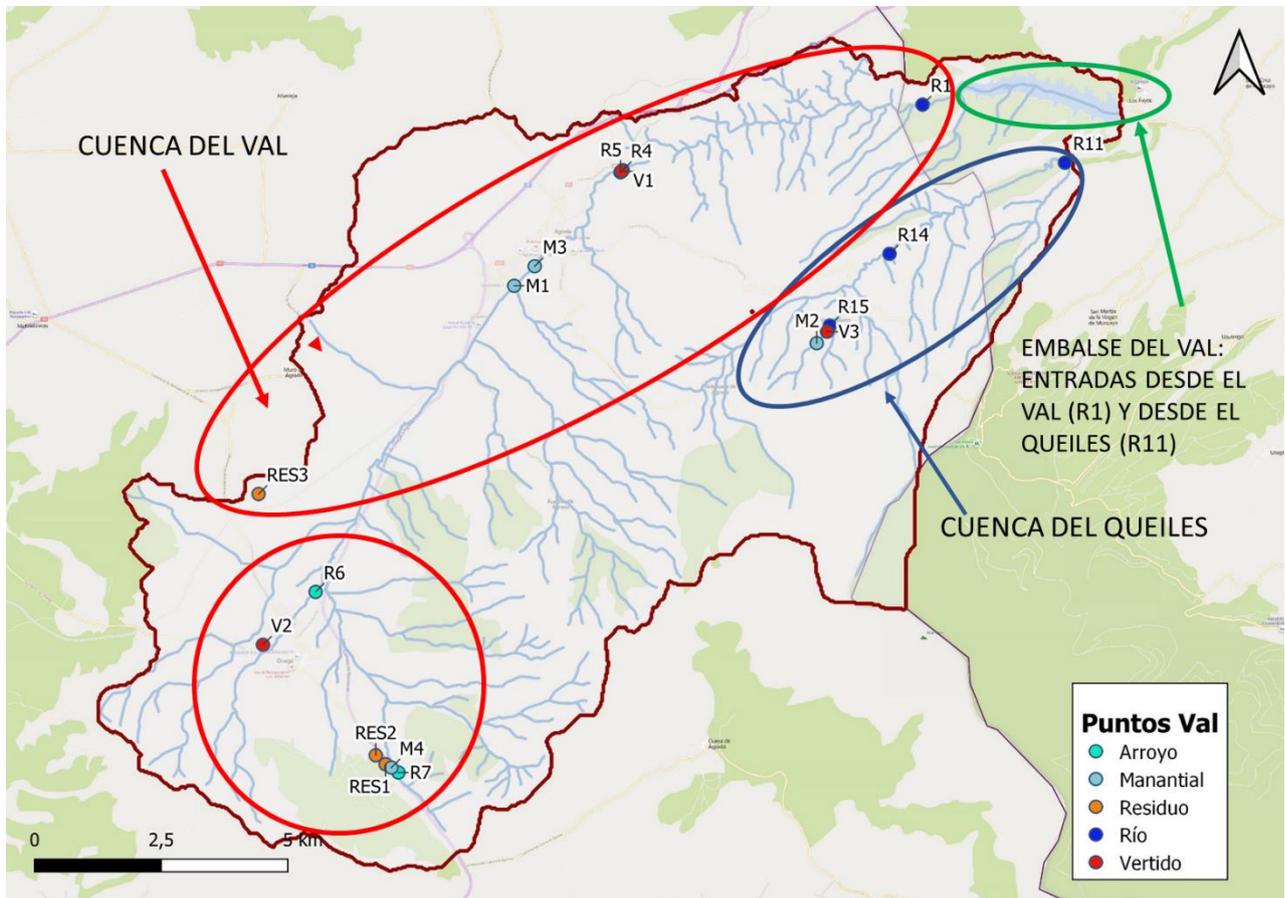


Figura 52. Ubicación de las estaciones de análisis de isótopos estables y su pertenencia a subcuencas.

6.8.3. Resultados principales de los análisis de isótopos estables

En la Figura 53 se disponen todas las muestras analizadas según los valores obtenidos de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en los nitratos y los cuadrantes característicos de determinadas procedencias de las aguas. Asimismo, se representa la línea teórica que marca la tendencia de la desnitrificación.

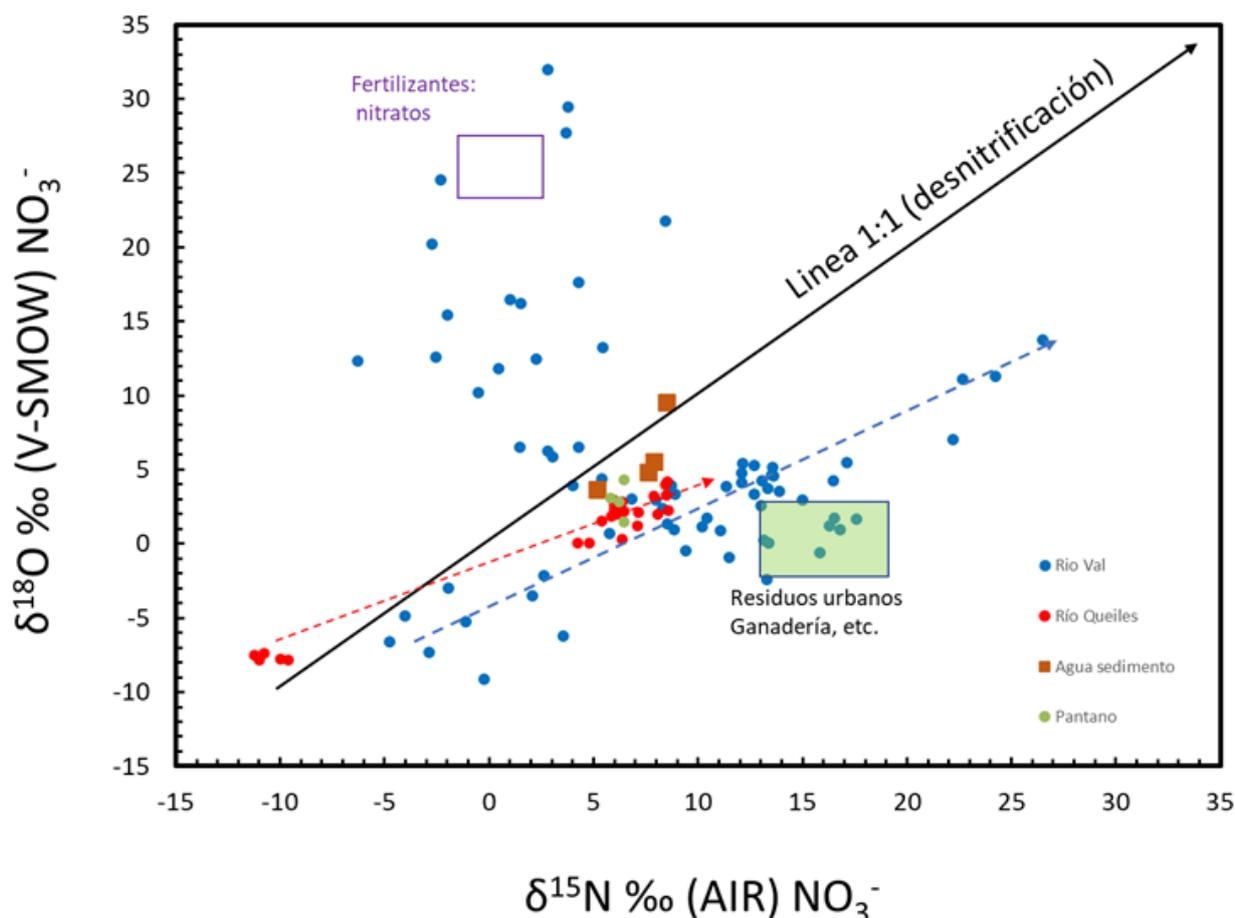


Figura 53. Representación de los resultados analíticos de isótopos estables en nitratos (explicación en el texto).

La interpretación de este tipo de análisis no es directa, y es complementaria a la información que ofrece la concentración del nutriente en la muestra. A diferencia de ésta, los valores isotópicos representados en dos ejes (ratios isotópicas del nitrógeno y del oxígeno en el caso de los nitratos) se disponen en cuadrantes que indican la influencia del proceso que los origina y por tanto de la fuente de procedencia. Cuando proceden de puntos relacionados espacialmente, se analiza su posición en torno a líneas teóricas que indican tendencias forzadas por procesos concretos.

En el caso de los nitratos, los procesos de nitrificación y desnitrificación dejan su impronta de esta manera. En el del carbono inorgánico, la distribución en único eje de la ratio isotópica del carbono en la molécula de CO_2 indica el peso de procesos de respiración frente a un origen natural por disolución del CO_2 atmosférico o de procesos profundos de disolución de las rocas, especialmente de las calizas.

Según los datos obtenidos en el conjunto de muestras, gran parte de los valores isotópicos de oxígeno y nitrógeno de nitratos se alinean o extienden semi paralelos alrededor de la línea de desnitrificación. Solamente en la cuenca del río Queiles se observan valores isotópicos muy negativos, tanto en oxígeno como en nitrógeno. Estos datos coinciden con los valores isotópicos $\delta^{15}\text{N}$ en amonio, muy negativos también. Esto revela un origen relacionado con la piscifactoría.

Sin embargo, la mayor parte de datos del río Val presenta valores relativamente altos en $\delta^{15}\text{N}$ que son compatibles con un origen de la contaminación difusa relacionada con residuos orgánicos, ya sea ganaderos o residuos de aguas deficientemente tratadas, procedentes de alguna población o industria.

Los valores $\delta^{18}\text{O}$ más altos son compatibles con una deposición atmosférica (pero la cantidad de nitratos sería en ese caso insignificante) o con una síntesis de nitratos (fertilizantes inorgánicos). Sin embargo, en los casos de valores relativamente altos en $\delta^{15}\text{N}$ habría que descartar estas opciones, y la explicación más coherente y plausible es una maduración de residuos orgánicos de granjas tanto en la propia granja, como por abonado de tierras con residuos ganaderos. Por tanto, estos valores estarían indicando una contaminación antrópica ganadera, ya que si fuera causada por fertilizantes inorgánicos deberían tener valores próximos a cero por mil en $\delta^{15}\text{N}$.

Con el fin de obtener una doble confirmación de que la contaminación en esa zona proviene de residuos orgánicos mayoritariamente procedentes de granjas de cerdos, se realizaron análisis de $\delta^{13}\text{C}$ en DIC (*Dissolved Inorganic Carbon*). Los valores $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos son relativamente negativos lo que implica que estarían relacionados con aportes de CO_2 , considerando que esta ratio se hace muy negativa cuando el carbono procede de la respiración de las bacterias. Lo que nuevamente apunta a una contaminación con residuos orgánicos.

Para entender los flujos y/o aportaciones de contaminación difusa en la cuenca del Val, se ha preparado el siguiente gráfico en el cual se muestran los resultados de los puntos aguas arriba

del vertido en la cuenca del Val (Figura 54). En la siguiente figura se pueden ver los valores isotópicos de los nitratos obtenidos en los puntos R6, R7, M1, M3 y en los residuos de cerdos y conejos (RES3 y RES2, respectivamente).

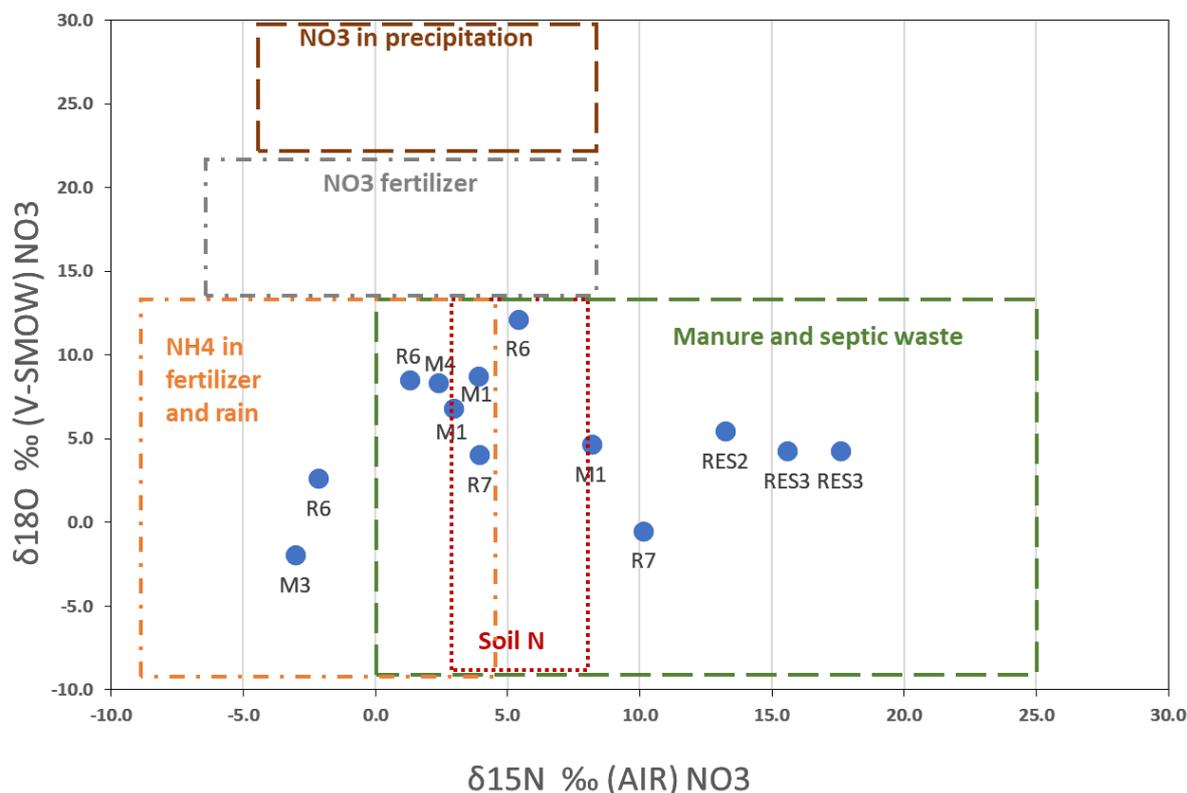


Figura 54. Clasificación de los valores isotópicos encontrados en la cuenca del Val y representados según el diagrama de Kendall, 1998 (explicación en el texto).

Se aprecia que el mismo punto puede cambiar su posición en función de la época del año (R6 y R7), lo que resalta la importancia de planificar adecuadamente la frecuencia y momento de estos muestreos.

En el caso del punto R6 (arroyo de los Caños), esto se explica porque drena el polígono industrial de Ólvega y los aportes contaminantes por vertidos esporádicos y no controlados de las diferentes industrias instaladas en el polígono, sumado al lavado por escorrentía del propio polígono, imponen una variabilidad muy alta en su calidad y en el origen de los contaminantes. Además, los datos disponibles de este punto contienen valores que representan máximos en el conjunto de la cuenca y que igualan el promedio al de los tramos del río Val con mayor concentración de nitratos (Figura 39).

El punto R7 (cercano al nacimiento del arroyo de La Vega en el puerto de Carrascal) es el mejor candidato para ofrecer valores basales o de referencia de nutrientes en el río Val, porque no hay otro curso de agua superficial y permanente en la zona alta. Su caudal es bajo, pero las concentraciones de nutrientes en las escasas medidas disponibles en ese punto son inferiores a 0,3 mg-N/L, que por tanto se puede considerar un valor basal para este parámetro en la cuenca. No obstante, su separación del cuadrante de nitrógeno procedente del suelo no es clara, lo que implica que en esa zona se pueden dar procesos de desnitrificación en suelos orgánicos saturados de agua, de origen natural.

A efectos de simplificar esta MEMORIA TÉCNICA, se facilitan a continuación conclusiones sobre determinadas fuentes contaminantes que tienen relevancia en la cuenca, aparte de la EDAR de Ágreda-Ólvega que se ha monitorizado expresamente y tratado en apartados anteriores. Estas conclusiones se alcanzan a partir de la interpretación de los datos expuestos y de los que se facilitan en el APÉNDICE X:

- i. En la **subcuenca que drena al manantial de Ojillos de Ágreda**, aguas arriba del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega, y en la que el flujo de agua por el cauce del río Val es prácticamente nulo desde la población de Ólvega, se confirma una notoria influencia de los residuos ganaderos en las ratios isotópicas de los nitratos. Esta subcuenca constituye la mayor zona de recarga subterránea en la que el uso del suelo incluye cultivos en campos abonados.

Esta influencia de residuos orgánicos es menor en el punto M3, que es un manantial lateral situado cerca de los Ojillos de Ágreda (Fuente de la Caseta o manantial del Ojillo) pero que indudablemente tiene un origen distinto. De hecho, este punto podría constituir una referencia en cuanto a la concentración basal de nutrientes en aguas subterráneas de la cuenca, pero se dispone de muy escasos datos de concentración de nitratos como para usarlos como referencia.

Estos valores de concentración de nitratos, junto a los del punto R7, han servido para validar las predicciones del modelo SWAT (apartado 6.11) en la parte alta de la cuenca, que se han utilizado finalmente para el balance del presente proyecto. No obstante, en estos puntos críticos para evaluar la carga de origen ganadero se tienen muy escasos datos de concentración de nitratos, por lo que sería altamente recomendable disponer sensores ópticos autónomos de nitratos en R5 y en los manantiales representativos de la cuenca, con el fin de

estimar con mayor precisión y mejorar los modelos que predicen la evolución de su concentración en función de las dinámicas hidrometeorológicas y de las prácticas ganaderas.

- ii. La **piscifactoría de Vozmediano** libera una gran cantidad de amonio que se oxida a nitratos (nitrificación). Con valores característicos muy negativos tanto en $\delta^{18}\text{O}$ como de $\delta^{15}\text{N}$ (como se observa en el punto R11) en diferentes épocas del año. Los peces en los estanques de cultivo producen altas concentraciones de residuos en forma de heces y en excretas, con niveles de amonio que llegan a ser tóxicos para los organismos acuáticos y que produce cambios de pH. Este amonio se va transformando en nitritos y nitratos, consumiendo oxígeno disuelto, proceso que se da entre el vertido de la piscifactoría (V3) y el azud del Queiles (R11).
- iii. La **fábrica de productos lácteos de Ólvega** puede producir una gran cantidad de lactosueros que se traducen en materia orgánica disuelta. La respiración bacteriana asociada a esta materia orgánica consume oxígeno disuelto y libera un CO_2 que modifica la composición isotópica del DIC (*Dissolved Inorganic Carbon*) hacia valores muy negativos. Justamente en ese punto (V2) presenta un valor de -22 (V-PDB), que es el más negativo de todas las aguas estudiadas y que constituye un buen marcador de este vertido. Además, este tipo de industria usa salmueras que también incrementan la salinidad (mucho sal y DOC). También se han descrito cambios en el pH.

6.9. SEGUIMIENTO DEL ESTADO TRÓFICO MEDIANTE TELEDETECCIÓN

En el APÉNDICE XI se recoge el detalle metodológico de este seguimiento, y a continuación se proporcionan los resultados más relevantes a efectos de la eutrofización del embalse.

Los satélites escogidos para la monitorización del embalse son los satélites multiespectrales Landsat 8 y Sentinel 2, dado que estos tienen características similares que los hacen perfectamente complementarios. Los datos descargados y analizados para la calibración de los algoritmos son los coincidentes en el tiempo con los datos de la sonda Aquadam.

En el caso del satélite Landsat 8, con un tiempo de revisita de 16 días, se descargaron un total de 89 imágenes. Para el satélite Sentinel 2, cuyo tiempo de revisita es de tan solo 5 días, el número de imágenes descargadas es de 287.

Los ajustes conseguidos para la temperatura y la clorofila *a* son muy satisfactorios y permiten utilizar esta herramienta para el seguimiento futuro de evolución temporal de la distribución de los valores de estas variables en la superficie del embalse.

La temperatura del agua muestra diferencias notables (de hasta 5°C) en la superficie del embalse, y lo mismo, pero aún más acusado, ocurre con la concentración de la clorofila *a* (Figura 55) lo que evidencia que esta técnica debería utilizarse de manera complementaria a la monitorización de alta frecuencia en puntos fijos (plataformas perfiladoras y boyas).

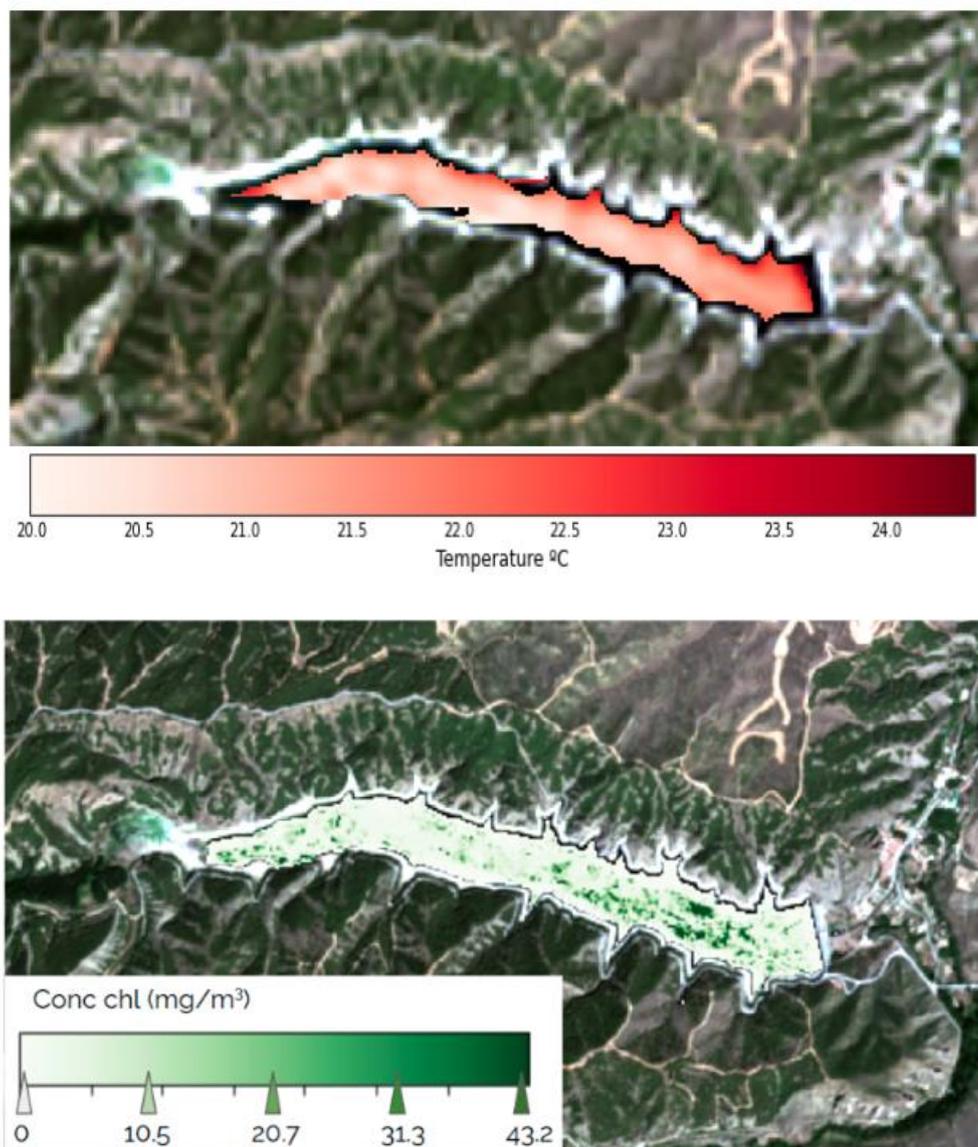


Figura 55. Imágenes interpretadas de satélite de agosto de 2021: temperatura (arriba) y clorofila a (abajo).

En la serie de imágenes que se facilitan en la figura siguiente se puede apreciar la utilidad de esta herramienta para realizar un seguimiento de la dinámica del fitoplancton en el embalse. Resulta llamativo que los valores promedio en el embalse son muy inferiores a los que registra la sonda Aquadam en la presa. Esto se explica porque representa un punto de concentración en el que confluyen las corrientes superficiales debidas al viento dominante, unido al flujo habitual en un embalse desde la cola hacia la presa. En lo que se refiere a los indicadores de biomasa de fitoplancton, tiene más sentido utilizar esta herramienta basada en imágenes de satélite como

estimador centrado de la biomasa de algas en el embalse en ejercicios que impliquen balances de masas.

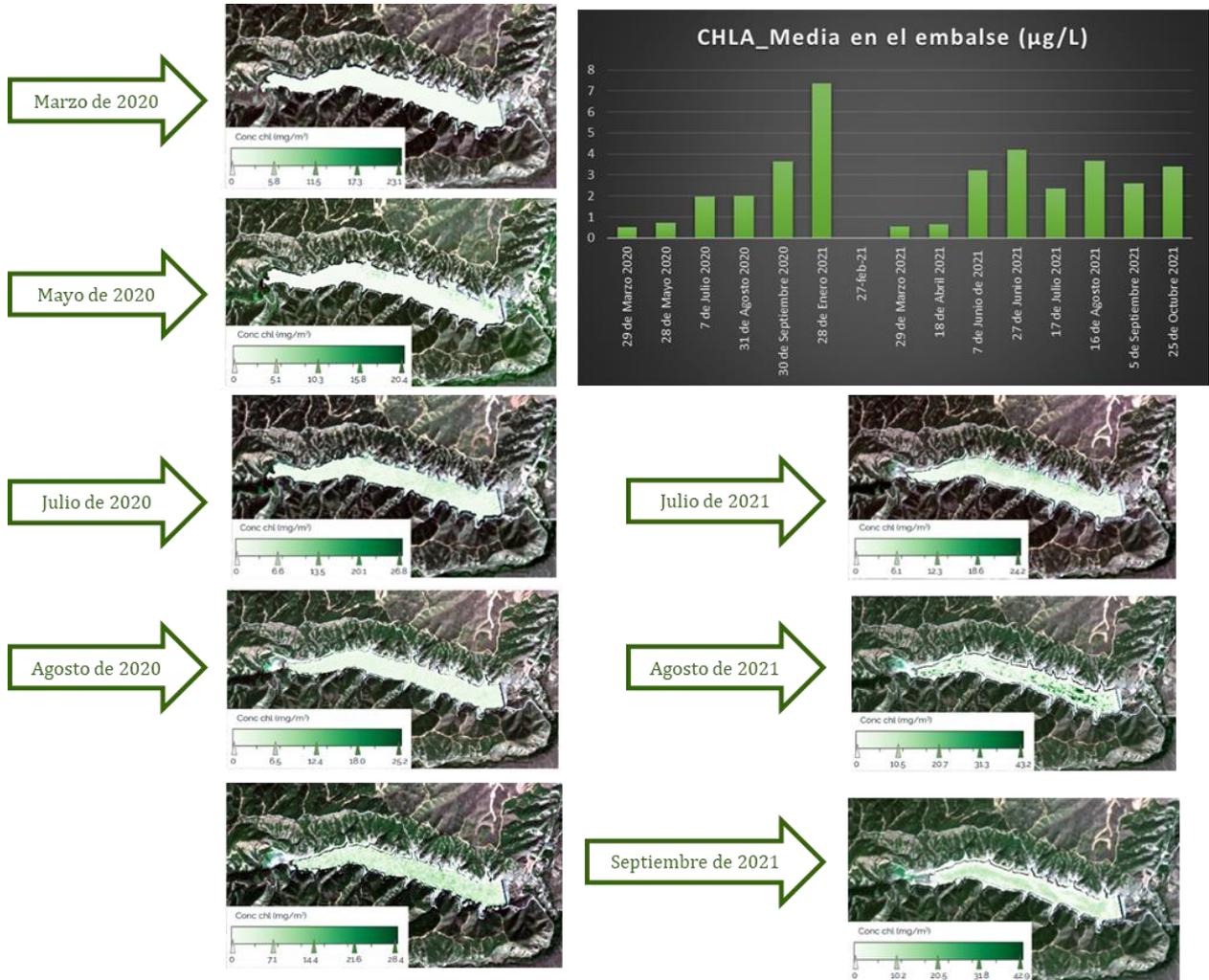


Figura 56. Imágenes interpretadas de satélite para estimación de clorofila a en diferentes momentos del periodo de estudio, y valores evolución de los valores medios

6.10. CALIBRADO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE APORTACIONES DE NUTRIENTES EN LA CUENCA

Con el fin de disponer de estimaciones con suficiente resolución de las aportaciones diarias de agua y nutrientes al embalse se han puesto en marcha los dispositivos de monitorización descritos en apartados anteriores y se han generado las series expuestas en el apartado 6.8.

Sin embargo, se requiere además disponer de un procedimiento que permita realizar proyecciones de diferentes escenarios, tanto de actuación (medidas correctoras) como de hidrometeorológicos.

Por esta razón, se ha recurrido a un modelado hidrológico y de transporte a escala de la cuenca del embalse de El Val. El modelo empleado es el SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) y fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Arnold et al., 1998). Ha sido sometido posteriormente a numerosas mejoras y adaptaciones y actualmente es considerado como uno de los más contrastados, como consta las más de 2500 publicaciones científicas basadas en su aplicación y desarrollo continuo.

El SWAT es un modelo continuo y de base física, que se ejecuta en una escala temporal diaria (Neitsch et al., 2011). Es un modelo basado en procesos que permite predecir el caudal y la exportación de nutrientes y contaminantes en la cuenca. El modelo se basa en ecuaciones de balance hídrico, incluyendo la escorrentía superficial, la precipitación (lluvia y/o nieve), la evapotranspiración, la infiltración y el flujo subsuperficial. Las ecuaciones de balance de nutrientes también se basan en factores como la carga externa, el transporte de nutrientes con la escorrentía, los fertilizantes, la cantidad de absorción de nutrientes de las plantas y las características del suelo (Gassman et al., 2007).

El modelo SWAT tiene en cuenta los ciclos de los nutrientes y rastrea el movimiento del nitrógeno y el fósforo en varias formas. En el ciclo del fósforo (P), se incluye la captación de P por parte de las plantas, la aplicación de fertilizantes, la mineralización y los procesos de descomposición, mientras que en el ciclo del nitrógeno (N) se incluye la captación de N por parte de las plantas, la aplicación de fertilizantes, la volatilización de NH₄, la nitrificación, la desnitrificación, la descomposición y los procesos de mineralización (Neitsch et al., 2011).

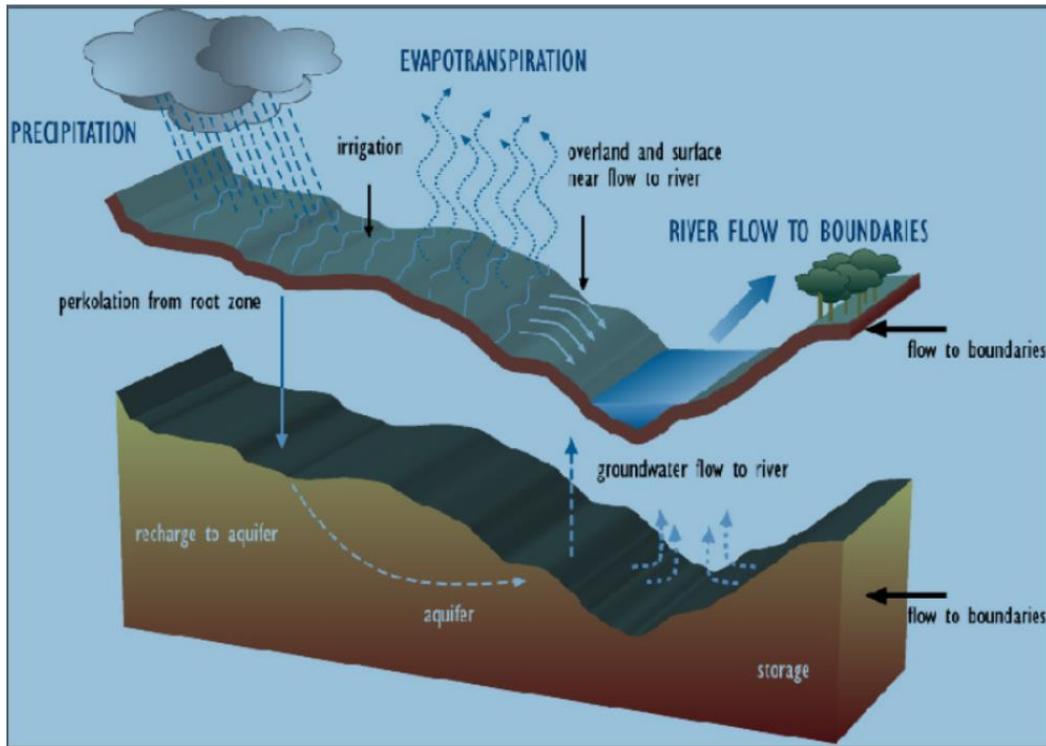


Figura 57. Representación de los procesos hídricos principales en el modelo SWAT

A continuación, se describen las tareas ejecutadas en la implementación de este modelo a la cuenca de El Val.

6.10.1. Tratamiento de datos de entrada al modelo

6.10.1.1. Estaciones meteorológicas

Para el estudio climatológico de la cuenca del embalse del Val se recopilaban los datos de precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar recogidas en las estaciones meteorológicas gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología, la Confederación Hidrográfica del Ebro y la base de datos de ERA5 (apartado 6.2).

En particular, se recabó información de dos estaciones meteorológicas más próximas al embalse: Ólvega (2296A) y Embalse del Val (EM71). Ambas contienen una serie completa de datos diarios de precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar desde 2010 al 2021.

6.10.1.2. **Información geográfica, edafológica y usos del suelo**

A partir de las páginas web del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica – CNIG se descargaron capas digitales en formato ráster del modelo digital de elevaciones con una resolución de 25 m y la base de datos SIOSE de ocupación del suelo en España a escala 1:25.000 en formato vectorial.

También se descargaron capas digitales en formato vectorial de la tipología del suelo de la provincia de Soria a escala 1: 50.000, facilitada por la página web de la Junta de Castilla y León (Index of /cartografia/06_Edafologia -itacyl.es-) y por la página web del Gobierno de Aragón (*Open Data Focus* -aragon.es-)

6.10.1.3. **Procesado de la información meteorológica**

Los datos procedentes de la AEMET se recibieron en ficheros EXCEL que presentan los datos originales de precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento diarios desde las 07:00 del día de la fecha hasta las 07:00 del día siguiente. En dichos ficheros, los datos de precipitación se recogieron en decimas de milímetro, los de temperatura en decimas de grado centígrado, los datos de humedad en humedad relativa en porcentaje y la velocidad del viento en km/h. En cuanto a la radiación solar descargada en la base de datos de ERA 5, estaba expresada en W/m².

6.10.1.4. **Tratamiento de la información con SIG y SWAT**

Toda la información espacial suministrada por diferentes fuentes fue necesario procesarla según los criterios de SWAT. Este pretratamiento se realizó en el entorno de QGIS.

A la capa de usos del suelo presentes en la cuenca se le asignó la relación de códigos de las coberturas de la base de datos de SWAT. En cuanto a la información de la tipología de suelo, se editó la geodatabase de SWAT con la finalidad de incluir la información de los parámetros hidrofísicos del mapa de suelos utilizados.

También fue necesario adaptar los datos climatológicos al formato que el modelo SWAT requiere de entrada.

Para realizar la calibración y la validación del modelo se utilizaron los registros de caudal y nutrientes diarios tomados en campo en varios puntos de muestreo a lo largo de la cuenca del Val y la cuenca del Queiles, como ya se ha descrito en los apartados anteriores.

6.10.2. Ejecución del modelo SWAT

De forma muy resumida, se describen a continuación los pasos que se han seguido en el proceso de la modelización.

- i. El modelo de la cuenca de estudio a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) con una resolución de 25 m, permite establecer los puntos de salida de cada subcuenca para obtener los datos de caudal y de nutrientes en los puntos de interés. Para este modelo los puntos de salida se corresponden con las diferentes subcuencas del sistema hidrológico (M1, R5, R1, R11 y CED) que sirvieron para la calibración y validación del modelo.
- ii. Una vez definida la red de puntos de control, SWAT genera las URH (Unidades de Respuesta Hidrológica) que son unidades de las subcuencas con una combinación particular de características de tipo de suelo, cobertura vegetal y pendiente.
- iii. A continuación, se incorporaron los datos climatológicos de las series de precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar a escala diaria para un periodo de tiempo de 10 años (2010 - 2021).
- iv. Después de obtener las salidas del modelo del caudal y nutrientes diarios, se procedió a comparar los resultados con las observaciones y ajustar los parámetros necesarios para alcanzar un ajuste satisfactorio.

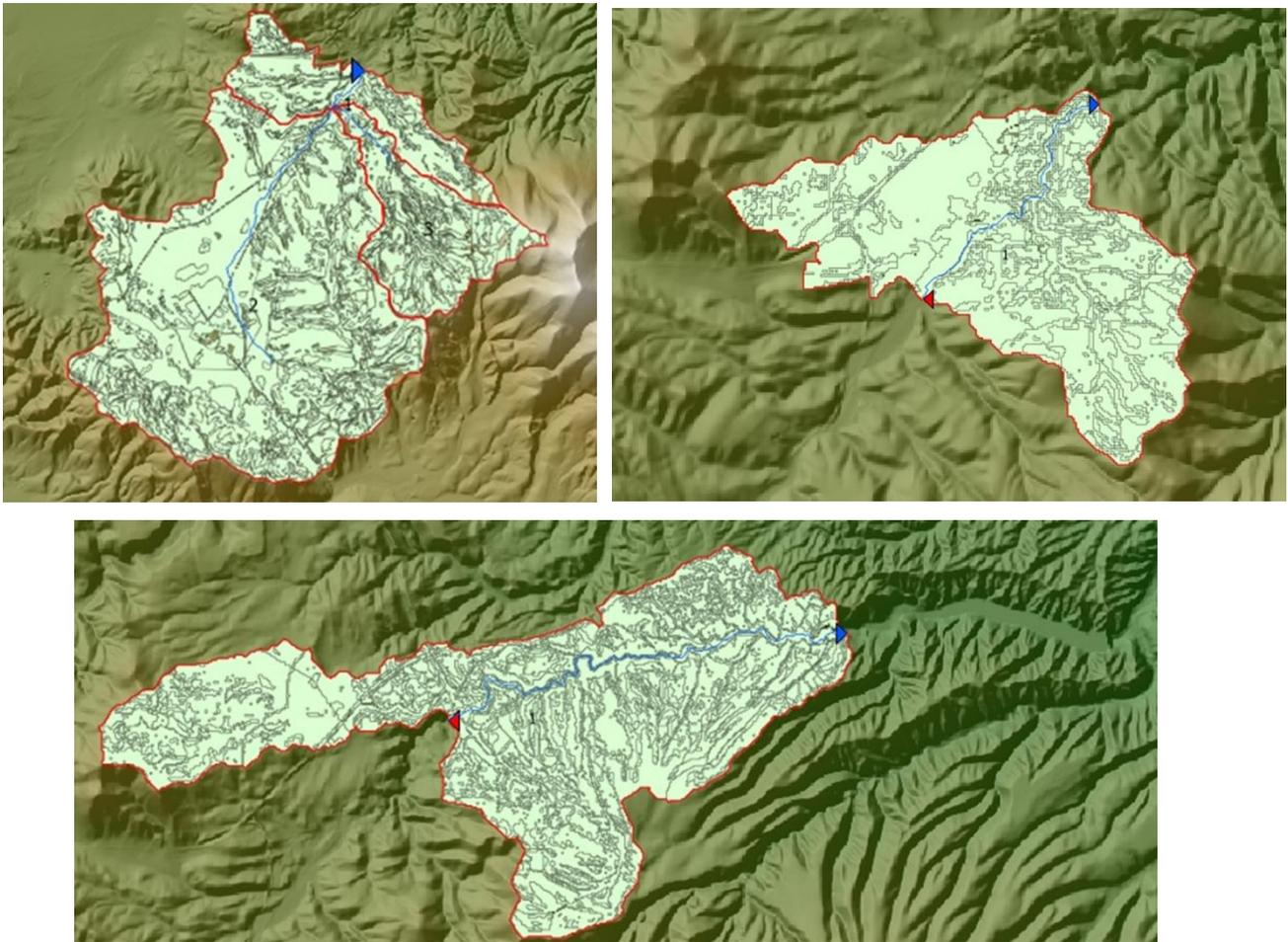


Figura 58. Subcuencas del sistema hidrológico del Val en M1 (A), M1 – R5 (B), R5 – R1 (C)

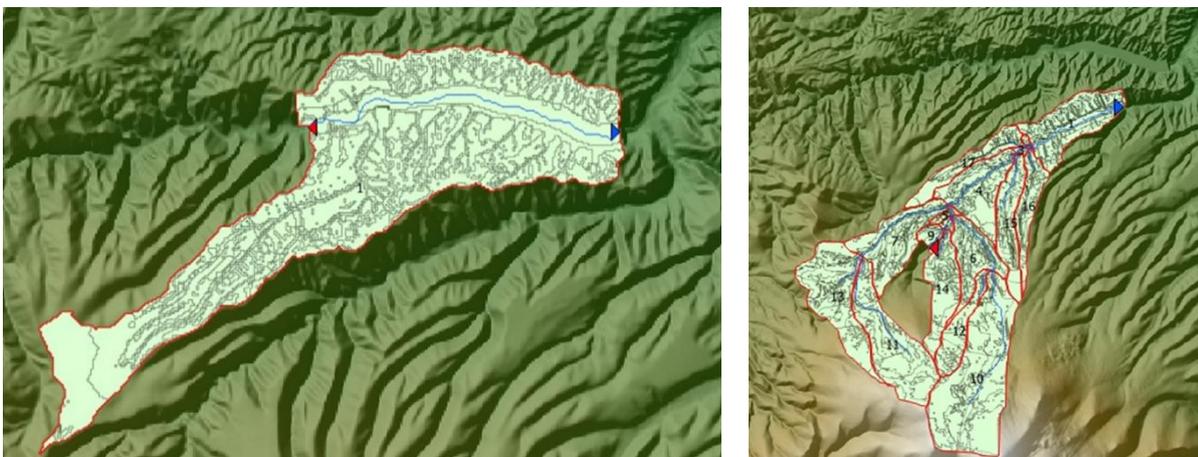


Figura 59. Subcuencas del sistema hidrológico del Val en R1 - CED (A), M2 – R11 (B)

6.10.3. Resultados del modelo SWAT

A pesar de que los datos de caudales en el río Val son escasos, se obtuvo un buen ajuste a las series cortas generadas durante el periodo de monitorización dentro del proyecto (Figura 60). No obstante, cuando en el futuro se disponga de series más completas de caudales en los diferentes puntos, será muy recomendable realizar un reajuste del modelo.

El caudal estimado en R1 (entrada del río Val al embalse) es la suma de las aportaciones en el punto R5 (aguas arriba del vertido), del caudal de vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega y de la escorrentía en el tramo entre R5 y R1.

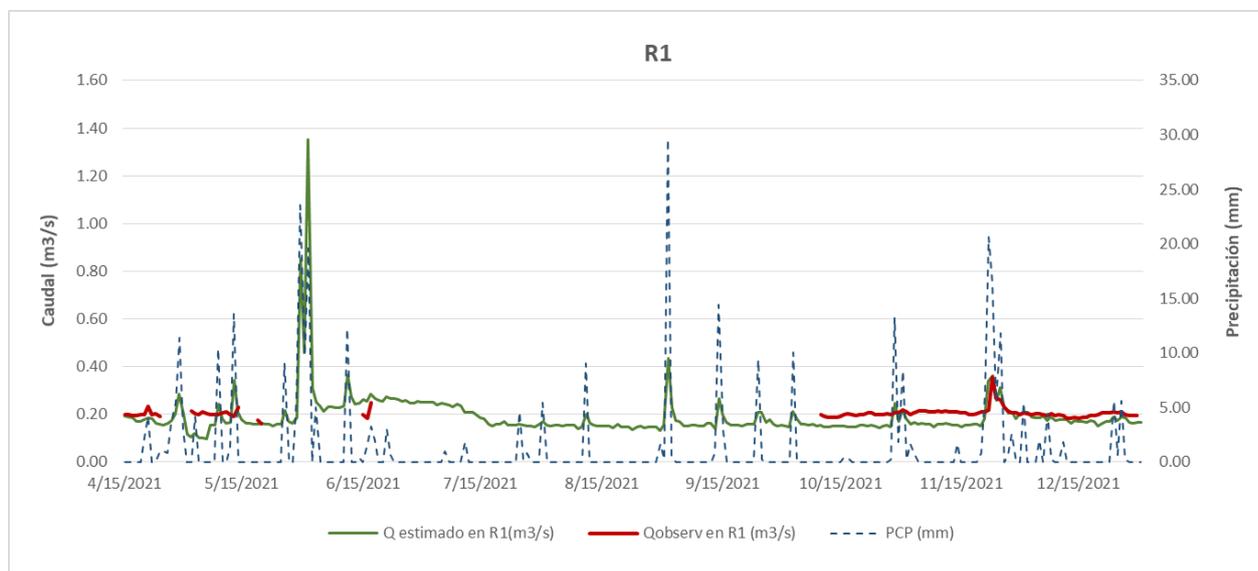


Figura 60. Serie de datos de precipitación (azul), caudal observado (rojo) y simulado con SWAT (verde) en R1 (río Val a la entrada del embalse)

El caudal en R5 se ha generado por simulación de la escorrentía mediante el modelo SWAT en la cuenca de drenaje del río Val aguas arriba de R5, que se suma a un valor basal de caudal (85 L/s). Este es el caudal que se asume mana por el manantial de los Ojillos de Ágreda, dado que no se dispone de aforos en estos puntos.

En la subcuenca del río Queiles se aplica el valor de caudal de trasvase al embalse aforado en la red SAIH. Para estimar el caudal total circulante por el Queiles en el azud de mismo nombre, se suma el caudal del manantial de Vozmediano (M2) y la escorrentía modelada con SWAT en la subcuenca del azud. Dado que no hay aforos en ese tramo, el hidrograma del manantial se ha generado asumiendo un valor máximo de 1.300 L/s y mínimo de 800 L/s a partir de algunos datos disponibles, y aplicando rampas de transición entre estaciones del año a esos valores extremos.

La simulación de las concentraciones de nutrientes en los referidos puntos de control ha ofrecido valores que están en el rango de las medidas disponibles, y que en el futuro podrán reajustarse cuando los sensores de datos hayan generado series más largas y completas. En la Figura 61 se representan los resultados diarios de la aplicación del modelo SWAT en el punto de control R1 para la concentración de fósforo total y de nitrógeno total.

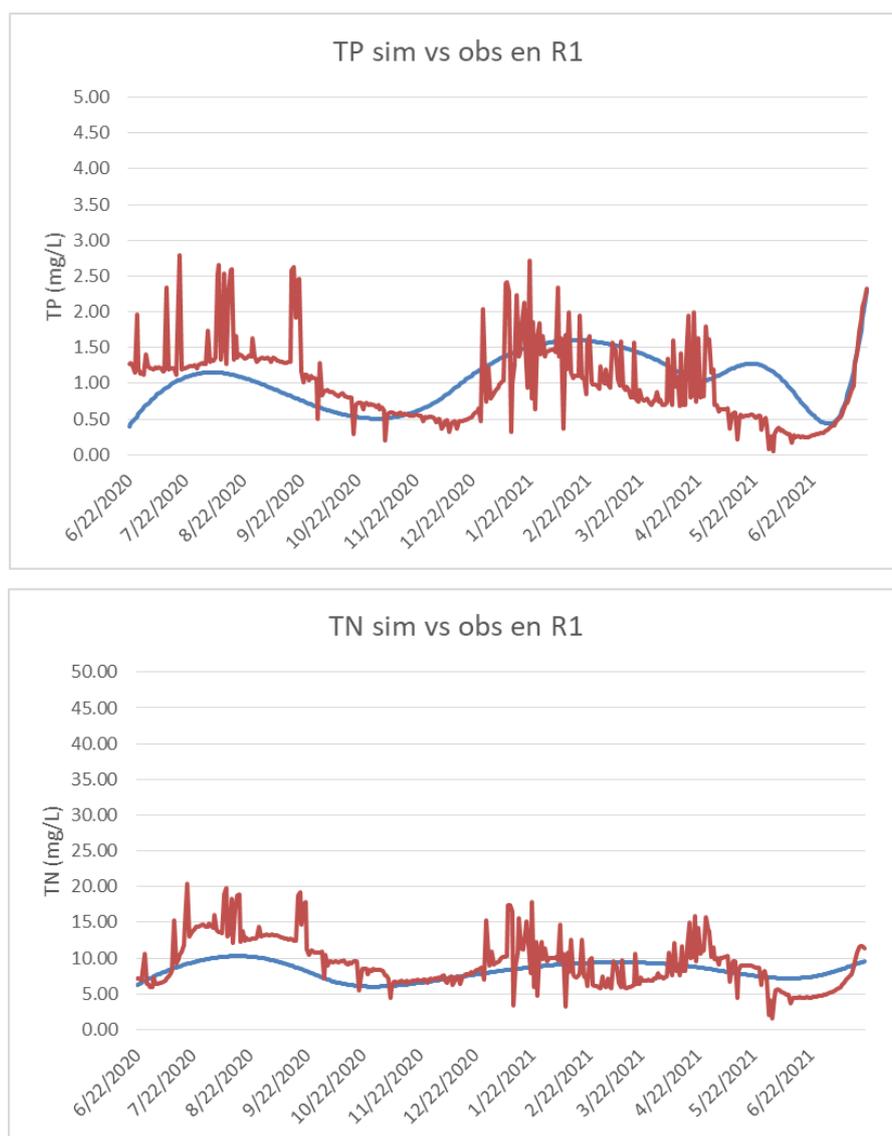


Figura 61. Simulación de la concentración de fósforo total (TP) y nitrógeno total (TN) en R1 (rojo) frente a la interpolación de los datos procedentes de análisis de laboratorio (azul)

Estos datos se aplican a la simulación de escenarios distintos a los monitorizados, y la herramienta de modelado de cuenca permitirá realizar proyecciones de aportaciones de nutrientes al embalse bajo diferentes supuestos hidrometeorológicos y de actuación y medidas correctoras.

6.10.4. Integración de todos los flujos en modelo dinámico ECOMOD_VAL

Las diferentes subcuencas, aportaciones de agua subterránea (manantiales) y puntos de vertido se han incorporado a un modelo dinámico programado en lenguaje STELLA, que permite obtener resultados agregados de flujos de agua y de nutrientes en las entradas al embalse y que se usa para alimentar el modelo de embalse en simulaciones de escenarios.

Este modelo, que se ha denominado *ECOMOD-Val*, incorpora también los flujos de agua en el embalse, y junto a los esquemas de manejo hidráulico y su curva hipsométrica, permite cerrar los balances hídricos en cada uno de los escenarios de simulación, dado que no se conocen los caudales de salida por el desagüe de fondo.

Otras consideraciones relativas al balance hídrico en la subcuenca del Queiles, hasta el punto de confluencia con el río Val son:

- El caudal del nacimiento del Queiles (manantial de Vozmediano) oscila entre 800 L/s en verano y 1.200 L/s el resto del año, con picos que pueden ser de 1.500 L/s en periodos de lluvia. La piscifactoría utiliza ahora el 90% del caudal (en verano), el resto del año quizás sea la mitad. En todo caso, ese caudal se devuelve al río unos metros más abajo de la toma.
- Entre ese retorno y el azud del Queiles, se añaden las escorrentías y se detraen unos 42 L/s para abastecimiento de Tarazona, Novallas, Los Fayos y Torrellas.
- Del azud se sueltan unos 200 L/s al cauce (caudal ecológico y algún abastecimiento menor) y el resto se deriva al embalse (aforado en el punto R11). De esos 200 L/s hay una parte (en torno al 30%) que no llega a la estación de aforo en Los Fayos, situada aguas abajo y por la que pasa el agua del Val y del Queiles.
- El criterio para soltar agua por el desagüe de fondo (no se puede hacer ajuste fino en la apertura), es cuando la demanda de riego por el Queiles supera los 1.000 L/s.

En las siguientes figuras se resume gráficamente el modelo ECOMOD-Val, con las variables de flujo, nivel y auxiliares que tienen nombres auto explicativos y que coinciden con los códigos de estaciones y de variables descritos anteriormente.

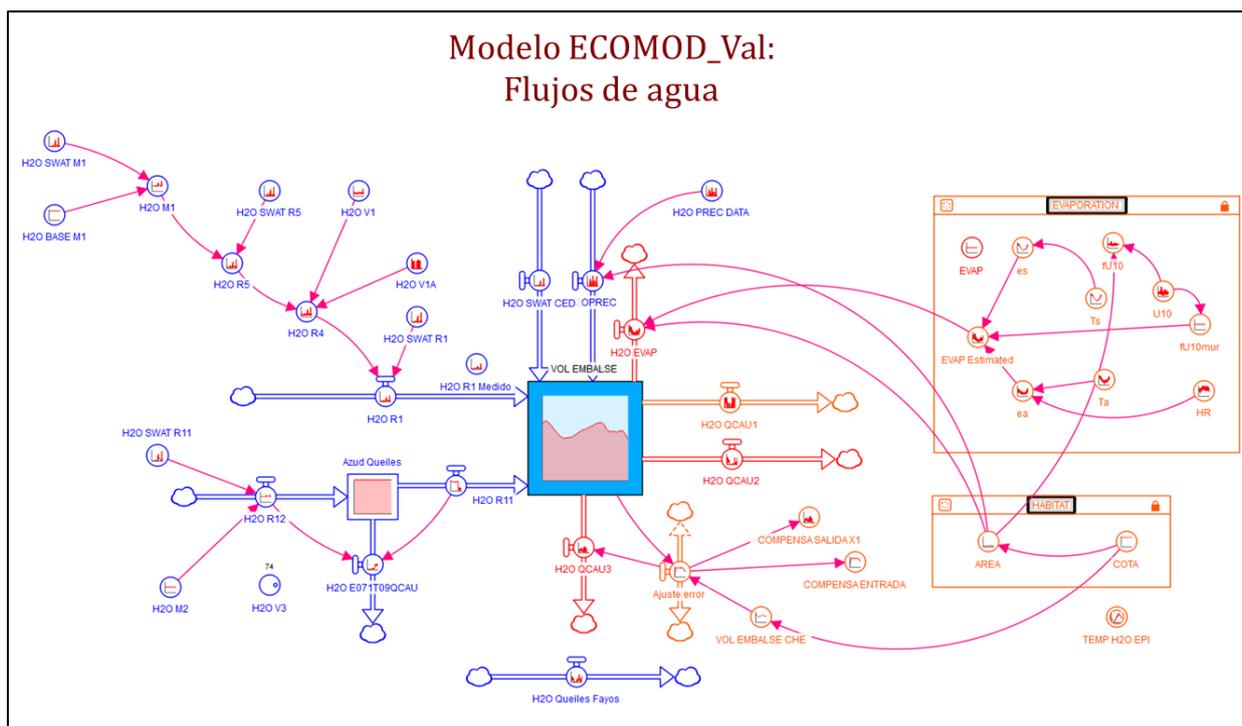


Figura 62. Representación del módulo relativo a los flujos de agua en el modelo ECOMOD_Val.

En el submodelo del flujo de nutrientes en la cuenca (Figura 63), se aplican diferentes escenarios de gestión (puntos sólidos negros) que se explican en el apartado 6.13 de este documento. A partir de las concentraciones de nutrientes (“NUTc”) y de los flujos de agua (“HYMO.H2O”) de los diferentes compartimentos, se calculan las cargas diarias de nutrientes por cada compartimento (“NUT”). Los compartimentos principales son:

- **Aportes difusos:** Escorrentías por subcuencas estimadas con el SWAT, precipitación directa al embalse (“PREC”) y escorrentía directa al embalse (“CED”).
- **Manantiales:** Ojillos de Ágreda (M1) y Vozmediano (M2).
- **Vertidos:** EDAR de Ágreda-Ólvega (V1), su correspondiente alivio o bypass (V1A) y piscifactoría de Vozmediano (V3).
- Otras **presiones o tratamientos** concretos: Carga ganadera (“GAN”), recirculación de nutrientes por las carpas en el embalse (“CARP”) y humedales artificiales (“WET”).

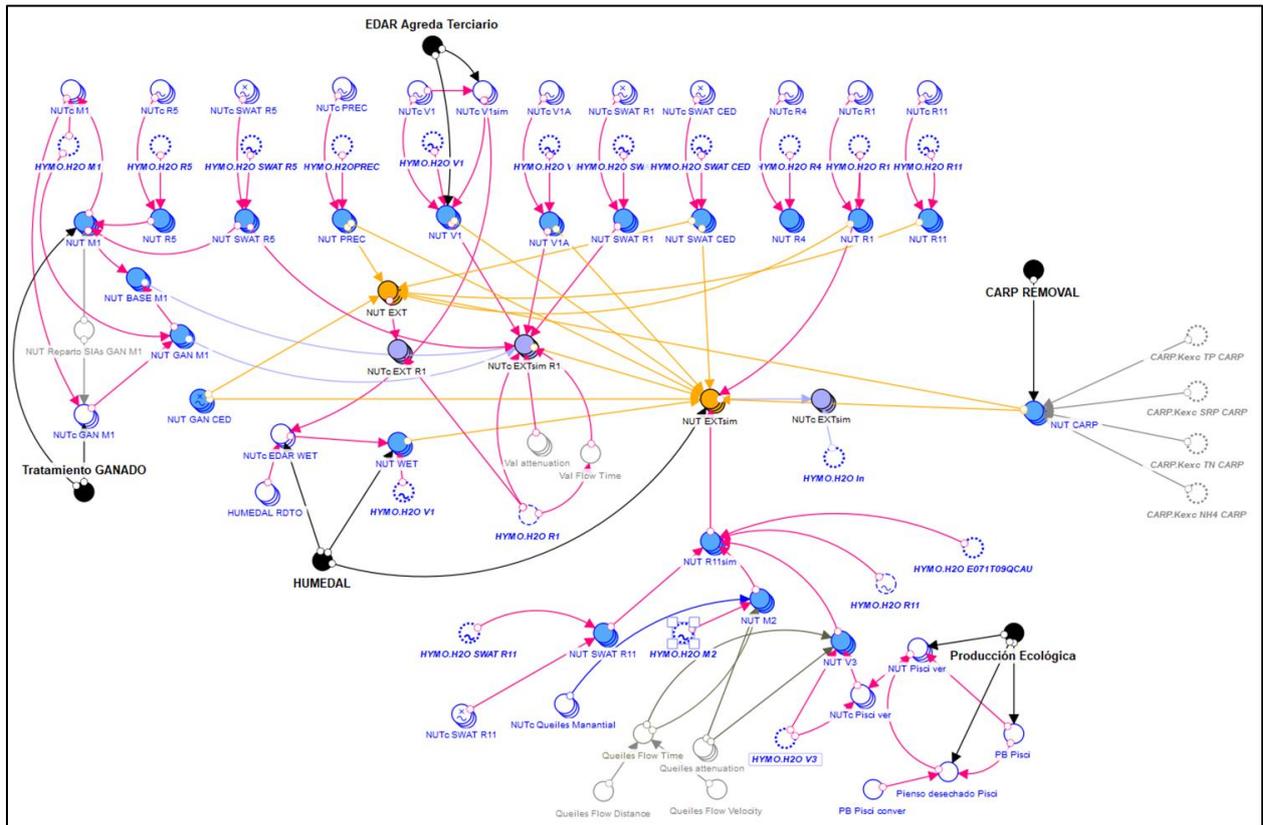


Figura 63. Representación del módulo relativo a los flujos de nutrientes en el modelo ECOMOD_Val.

La recirculación de nutrientes debida a la excreción por la población de carpas censada en el embalse se estima mediante un módulo específico que relaciona dinámicamente la excreción con el crecimiento individual, que a su vez depende de la temperatura del agua (Figura 64).

Módulo de cálculo de la excreción de población de carpas

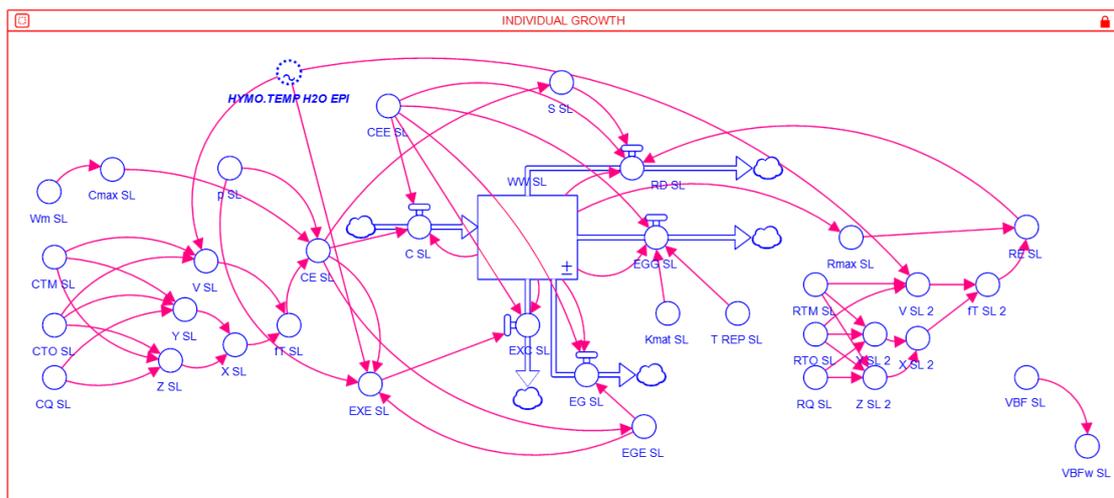


Figura 64. Representación del módulo relativo a la excreción de nutrientes por los peces en el modelo ECOMOD-Val.

6.10.5. Análisis de las aportaciones de nutrientes al embalse

En la Figura 65 se representa evolución de las concentraciones de fósforo total (arriba), nitrógeno total (medio) y de la ratio nitrógeno/fósforo o TN/TP (abajo), en las entradas al embalse: río Val (R1) y trasvase del Queiles (R11).

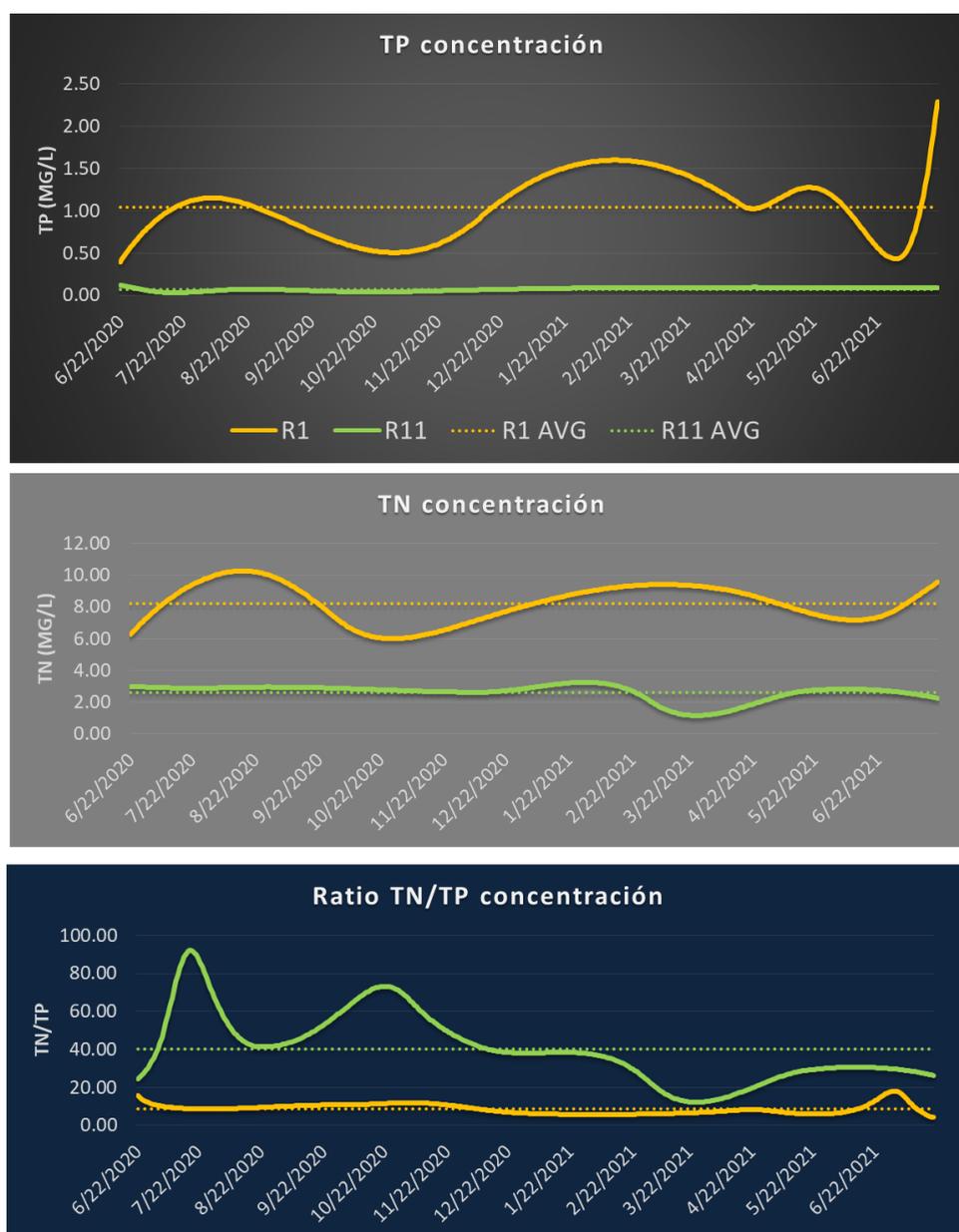


Figura 65. Concentración de nutrientes en las entradas al embalse de El Val (explicación en el texto).

La concentración de fósforo total es un orden de magnitud superior en el R1 (1,04 mg/L) que en R11 (0,09 mg/L) y los máximos se producen en el primer trimestre del año y durante el verano.



Algo parecido ocurre con el nitrógeno total, pero en este caso la diferencia es menor: 8,24 mg/L en el río Val (R1) frente a 2,61 mg/L en el trasvase del Queiles (R11).

La ratio TN/TP es muy inferior en el río Val (8,75) que en el trasvase del Queiles (40,42). Esos valores tan bajos favorecen el crecimiento de cianobacterias y los mínimos se dan en primavera.

Por otro lado, el caudal trasvasado (R11) es de 65,7 dam³/d, frente a 15,17 dam³/d en el río Val, lo que supone que en promedio es 4,3 veces más alto y eso hace que la carga de fósforo sea únicamente 3,3 veces superior en R1 que en R11. Esto mismo hace que la carga del nitrógeno aportada por R11 sea 1,4 veces superior a la de R1.

En la Figura 66 se facilitan las cargas de nutrientes resultantes según las diferentes fuentes de aportación. Se facilitan en los gráficos superiores las cargas totales por cuencas de aportación: RÍO VAL (R1), TRASVASE DEL QUEILES (R11) y OTROS, que suma la de la subcuenca de escorrentía al embalse, la precipitación directa y la aportación por la excreción de las carpas, que se contempla como si fuera una carga externa adicional.

La carga total anual externa es de 7,89 t/año de fósforo y 112,4 t/año de nitrógeno. En el caso del fósforo, la mayor parte procede de la cuenca del río Val (R1), y la fuente que más contribuye es la EDAR de Ágreda-Ólvega con el 41%. A esto hay que sumar un 14% que se estima aportan los alivios de dicha planta de tratamiento. La contribución ganadera y de la piscifactoría tienen una importancia similar (14%) y la aportación base (sin carga ganadera) de los manantiales y de las escorrentías representan un 7% y 10%, respectivamente.

En el caso del nitrógeno, la ganadería pasa a ser la fuente dominante (63%) y las aportaciones de la EDAR de Ágreda-Ólvega representan en cambio el 19%. Escorrentías y piscifactoría aportan un 10% y un 7%, respectivamente, quedando la aportación base de los manantiales y la aportación interna de las carpas como contribuciones menores.

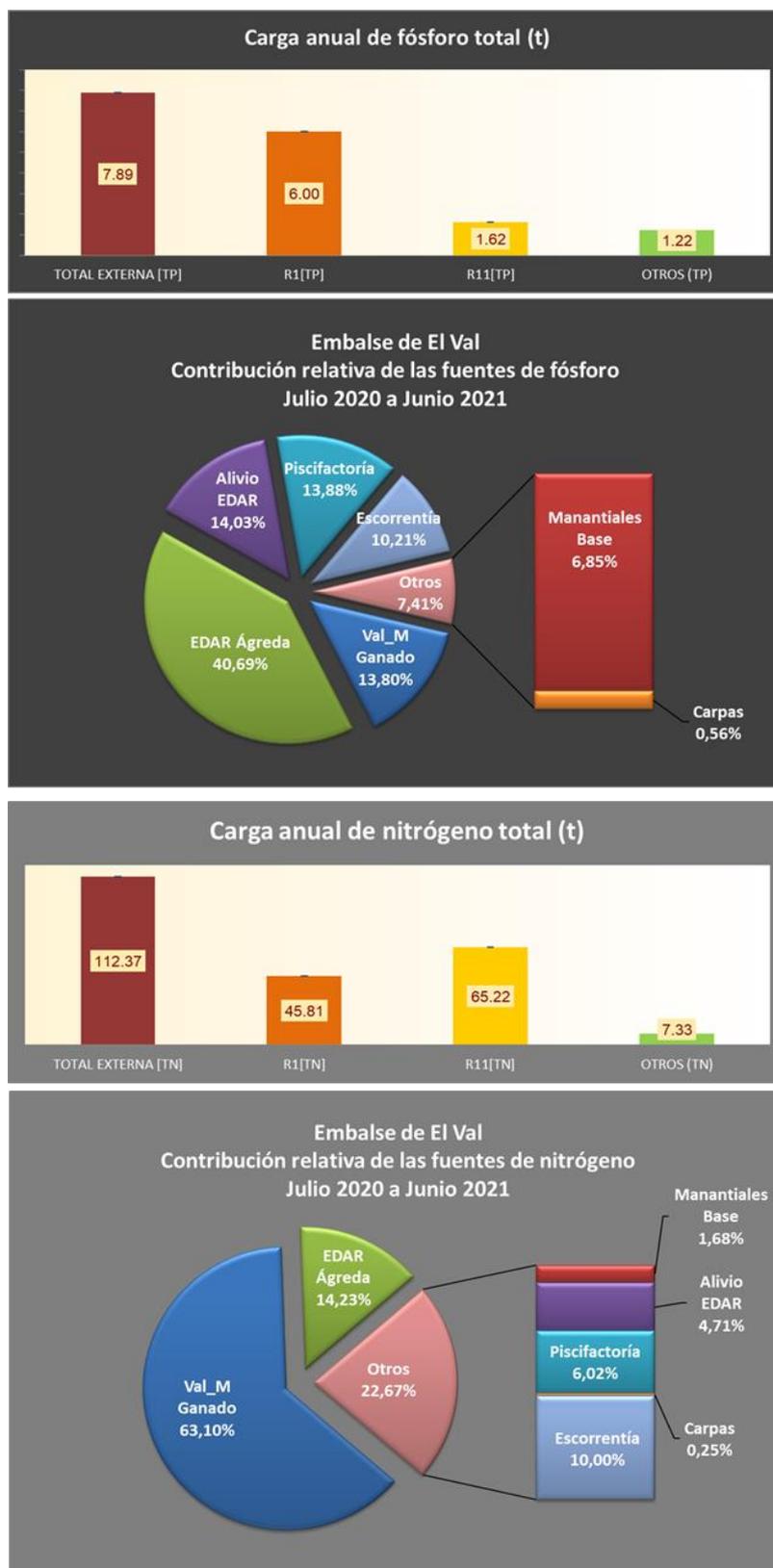


Figura 66. Cargas de TP y TN y contribuciones relativas al embalse de las diferentes fuentes de aportación (explicación en el texto).

En cuanto a la distribución en el tiempo de esas aportaciones (Figura 67), se diferencian entre las que se producen de forma continuada, las que están vinculadas a eventos de pocos días de duración (vertido por el alivio de la EDAR de Ágreda-Ólvega) y las que tienen un carácter más estacional. Este último caso está representado por la ganadería en la cuenca alta de El Val, aguas arriba del manantial de los Ojillos de Ágreda, que aporta mayor carga durante los meses de invierno y primavera.

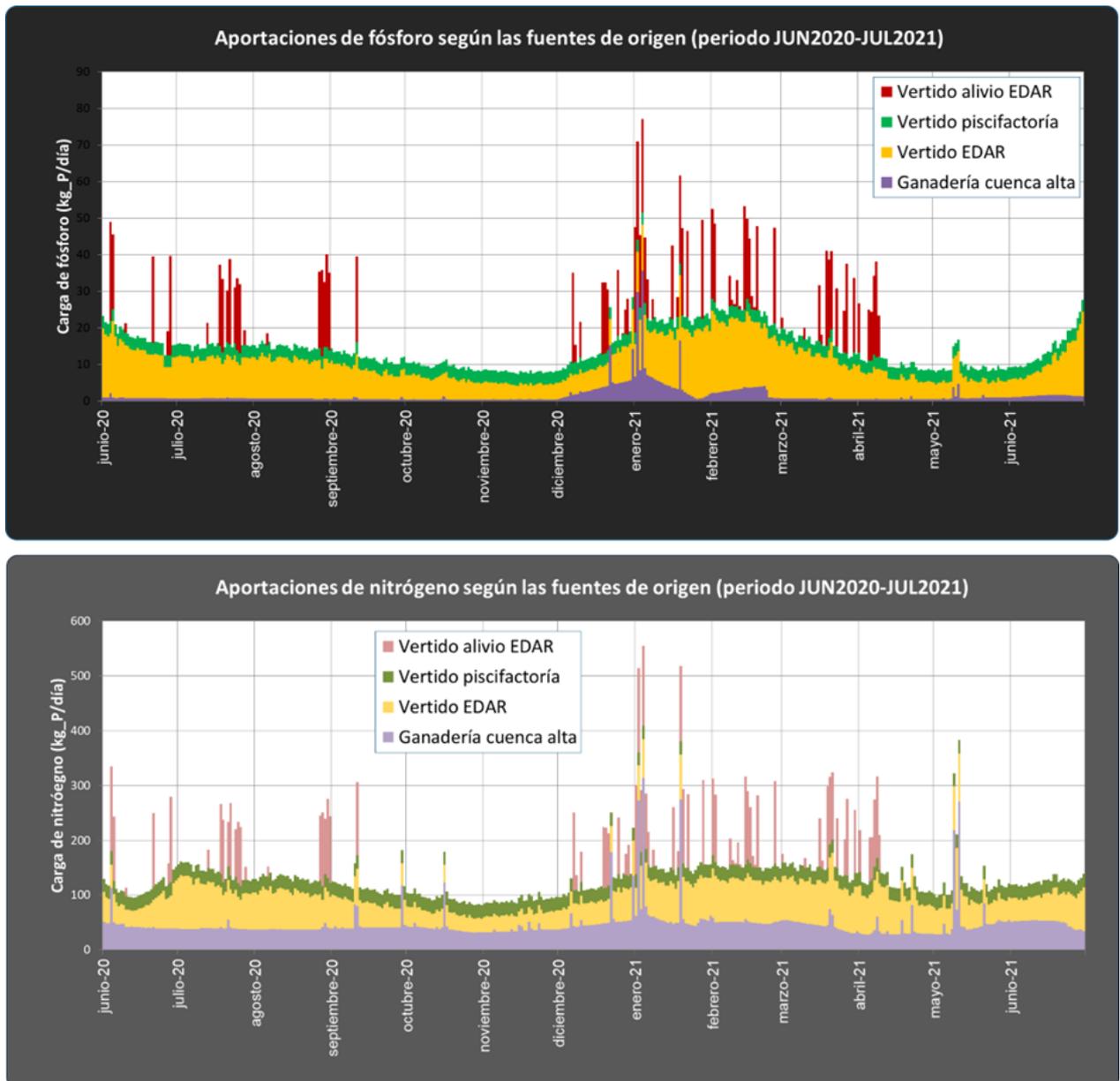


Figura 67. Distribución temporal de las cargas de P y N según fuentes de aportación.

6.11. MODELADO HIDRODINÁMICO 3D Y BIOGEOQUÍMICO DEL EMBALSE

6.11.1. Descripción somera y configuración de los modelos utilizados

6.11.1.1. Modelo hidrodinámico

Descripción

Las simulaciones se realizaron con el modelo termodinámico, hidrodinámico, de transporte y de mezcla tridimensional (3D) Si3D (Smith, 2006). Las ecuaciones de gobierno, planteadas en forma promediada por capas, se resuelven mediante un método de diferencias finitas semi-implícito, de tres niveles, en una malla cartesiana escalonada, en la que sólo se tratan implícitamente los términos de gradiente de presión barotrópica y los componentes difusivos verticales del transporte.

La ecuación de transporte escalar se resuelve utilizando un esquema semi-implícito de dos niveles. La mezcla turbulenta se representa en el modelo 3D mediante términos de tipo difusivo. Se utilizan coeficientes de mezcla constantes (viscosidad/difusividad horizontal de los remolinos) para representar la mezcla horizontal de momentos y escalares y los coeficientes de mezcla vertical (viscosidad/difusividad vertical) varían en el espacio y en el tiempo.

El modelo ha sido ampliamente validado frente a soluciones analíticas (véase, por ejemplo, Rueda & Smith, 2009) y utilizado en estudios teóricos (Rueda & Schladow, 2009). Además, se ha aplicado con éxito al análisis de procesos hidrodinámicos y de transporte en condiciones reales en una amplia gama de masas de agua, incluyendo lagos polimícticos poco profundos (Rueda et al., 2008; Rueda & Schladow, 2003), lagos profundos de tamaño medio a grande bajo estratificación débil (Priet-Mahéo et al., 2019; Ramón et al., 2020; Rueda & MacIntyre, 2009) y fuerte (Hoyer et al., 2014, 2015), y, estuarios y ríos estratificados (Llebot et al., 2014; Ramón et al., 2014). En todos ellos, los resultados de validación fueron satisfactorios.

Configuración del modelo para el embalse de Val

El dominio computacional se discretizó con celdas de 60 m en la dirección horizontal ($\Delta x = \Delta y = 60$ m). La altura de la capa superficial Δz se fijó en 1,5 m y las alturas de las capas sucesivas se fijaron en $\Delta z = 0,5$ m. El paso de tiempo se fijó en 20 s y el coeficiente de arrastre del fondo C_d se fijó en 0,002 (Smith, 2006). A_h y K_h se fijaron en $0,02 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Lawrence et al., 1995; Peeters & Hofmann, 2015).

Los períodos de estudio se extendieron (1) del 20 de junio al 1 de noviembre de 2020, y (2) del 1 de abril al 1 de noviembre de 2021. Se asumió que el embalse estaba inicialmente en reposo con temperaturas uniformes iguales al perfil de temperatura promedio diario recogido cerca de la presa (datos de Aquadam) el primer día del periodo de simulación.

El modelo se forzó con la presión atmosférica de 15 minutos, la temperatura del aire, la humedad relativa y las velocidades y direcciones del viento recogidas en la estación EM71, y la radiación de onda corta recogida en la estación meteorológica de Tarazona. La atenuación de la luz se calculó a partir de los perfiles PAR realizados en el embalse (perfiles FQPRO). El modelo se forzó con la temperatura de entrada y las descargas horarias en las entradas del río Val y del agua trasvasada desde el río Queiles. En la ubicación de la presa, el agua se extrajo de una elevación de 571 m.s.n.m. para simular las tomas de agua (en el lado izquierdo de la presa) y la salida de fondo a la misma cota, pero en la parte central de la presa.

Para configurar el embalse se partió de la batimetría realizada en el año 2018 mediante ecosonda monohaz (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2018), aspecto que sería muy recomendable mejorar utilizando una técnica de cobertura completa, porque hay incertidumbres topográficas en algunas zonas críticas que pueden condicionar la dinámica del agua y por tanto de la estructura física de la columna de agua.

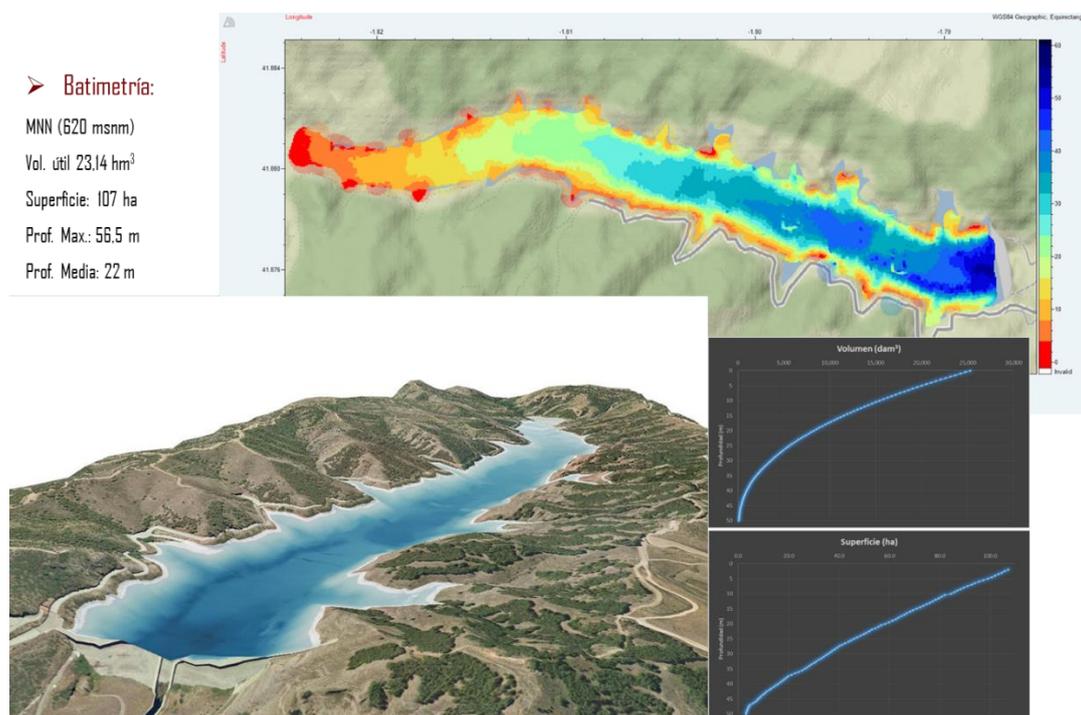
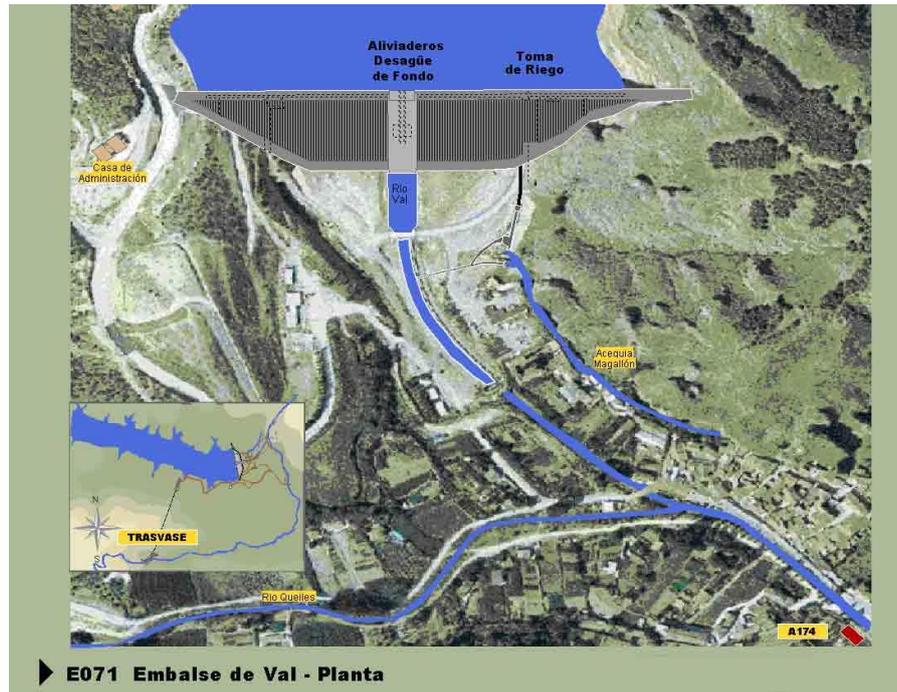


Figura 68. Detalles de la batimetría y modelo digital del terreno utilizado para la simulación



Los influjos o tributarios planteados son el río Val (R1) y el trasvase del Queiles (R11). La presa tiene 2 tomas en su lateral izquierdo a la cota en su eje de 571,225 msnm, ambas aforadas por separado. La que está a la izquierda sirve a la acequia de Magallón para riegos. La de la derecha es agua que retorna al cauce del Val aguas abajo de la presa. El desagüe de fondo está a 570,775 msnm, es decir casi a la misma altura que las laterales.



Órganos desagüe presa

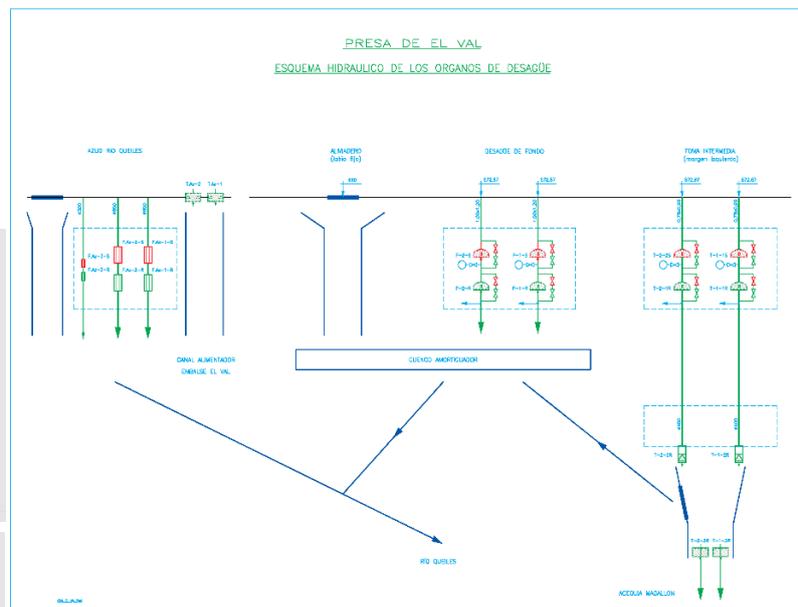
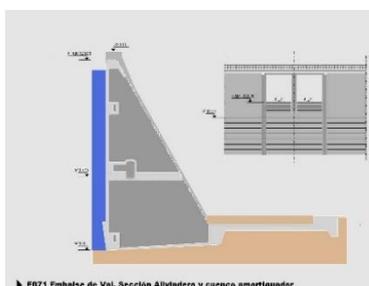
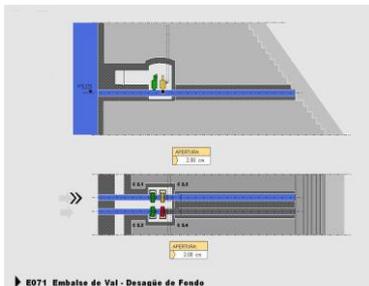


Figura 69. Disposición de los órganos hidráulicos de la presa de El Val.

Para calibrar y validar los resultados del modelo 3D se han utilizado los datos proporcionados por la sonda perfiladora Aquadam situada en la presa y por las campañas de muestreo ejecutadas en el marco del presente Estudio (figuras siguientes). La calibración se ha realizado con los datos disponibles para el periodo de estratificación de 2021 y la validación durante el periodo de estratificación anterior (mayo a octubre de 2020). Ambos periodos se presentan como resultados de esta actividad.

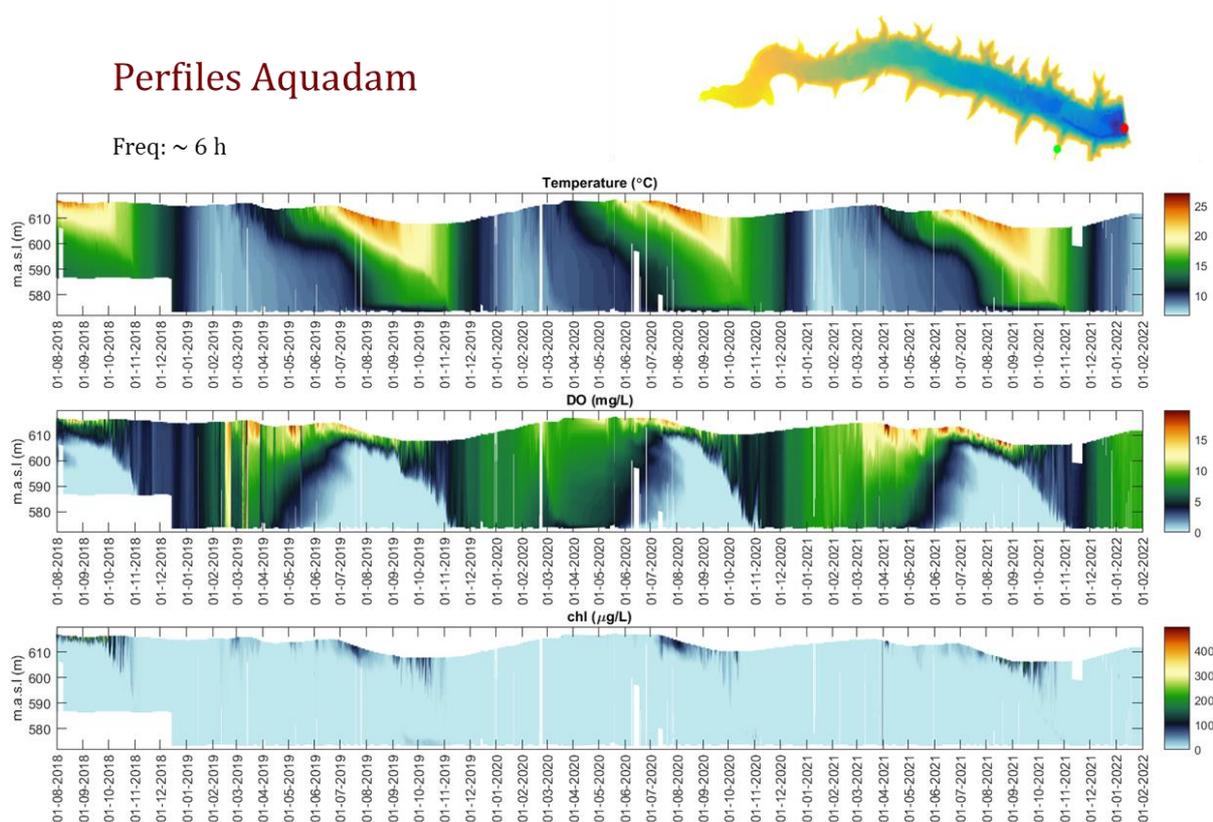


Figura 70. Representación 2.5D de las series de datos de temperatura, oxígeno disuelto y clorofila a de la sonda Aquadam (septiembre de 2018 a febrero de 2022), utilizadas para la simulación

Perfiles campañas FQPRO

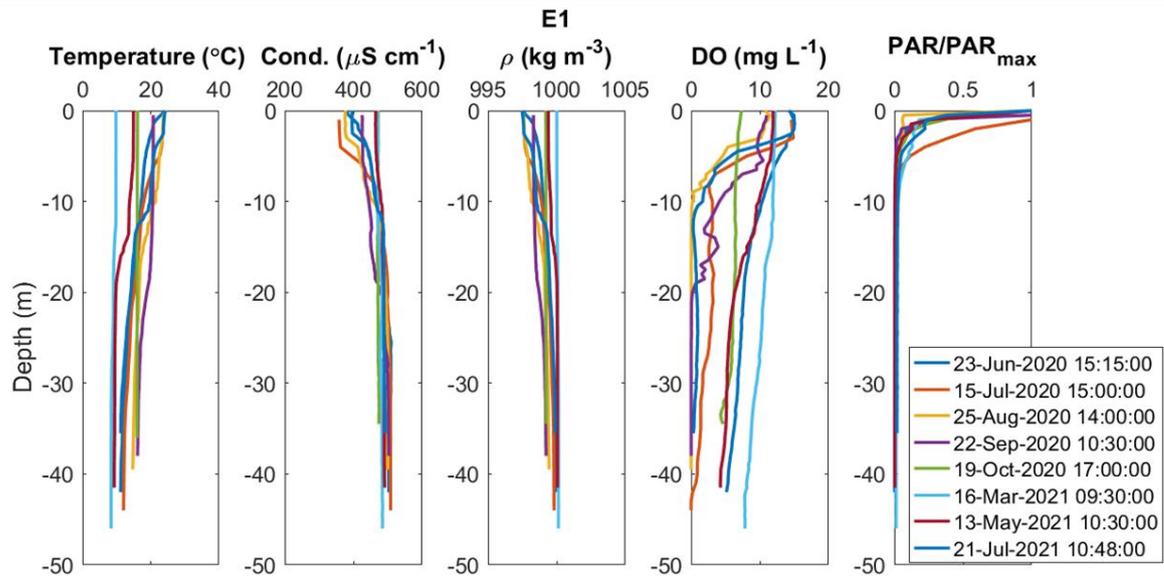
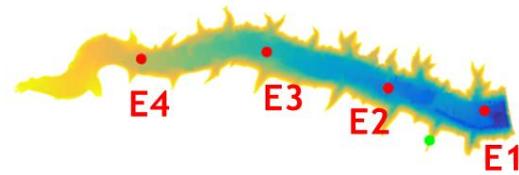


Figura 71. Representación de algunos de los perfiles verticales de datos fisicoquímicos en diferentes estaciones del embalse (E1 a E4), utilizados para la simulación

En las figuras siguientes se representan las variables de utilizadas: Flujos de entrada y salida, temperatura y densidad del agua y variables meteorológicas. En este último caso se han detectado derivas en los datos que ha habido que corregir retroactivamente.

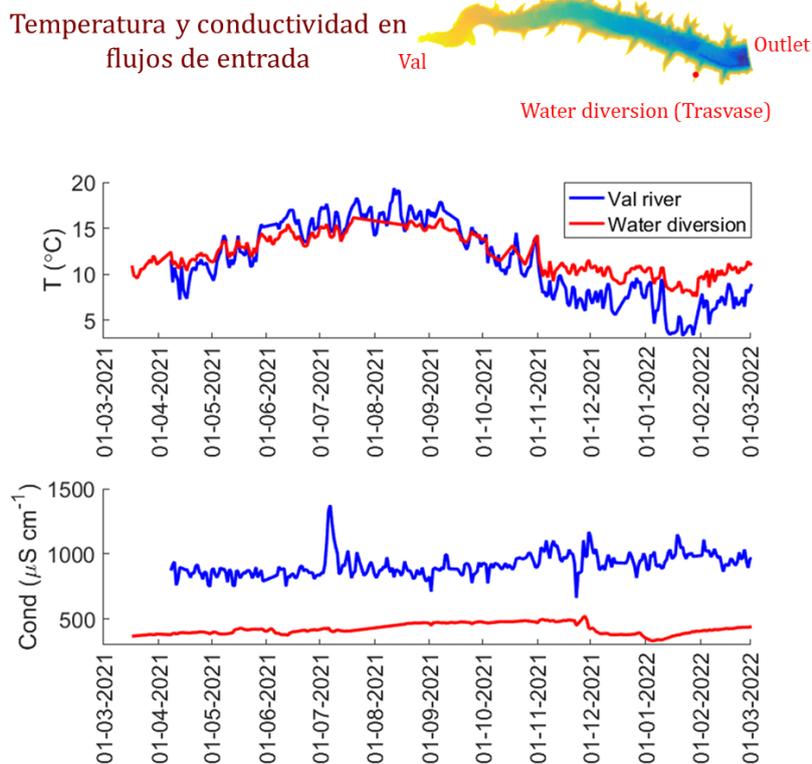


Figura 72. Representación de las variables que determinan la densidad del agua en las entradas al embalse

Datos meteorológicos diarios SAIH presa: 2009-2021

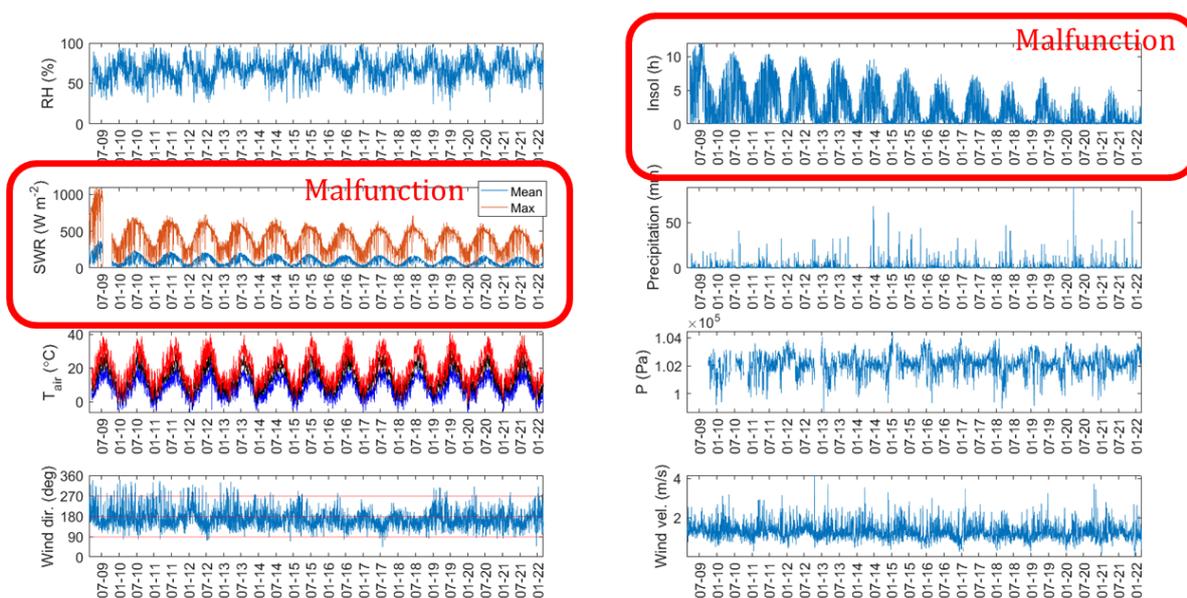


Figura 73. Representación de los datos meteorológicos utilizados para la simulación

El resultado del proceso de calibrado y validación posterior ha sido exitoso (Figura 74), y se ha obtenido un excelente ajuste en todas las variables que definen la estructura física de la columna de agua, en particular por su trascendencia limnológica la duración y profundidad de la estratificación térmica.

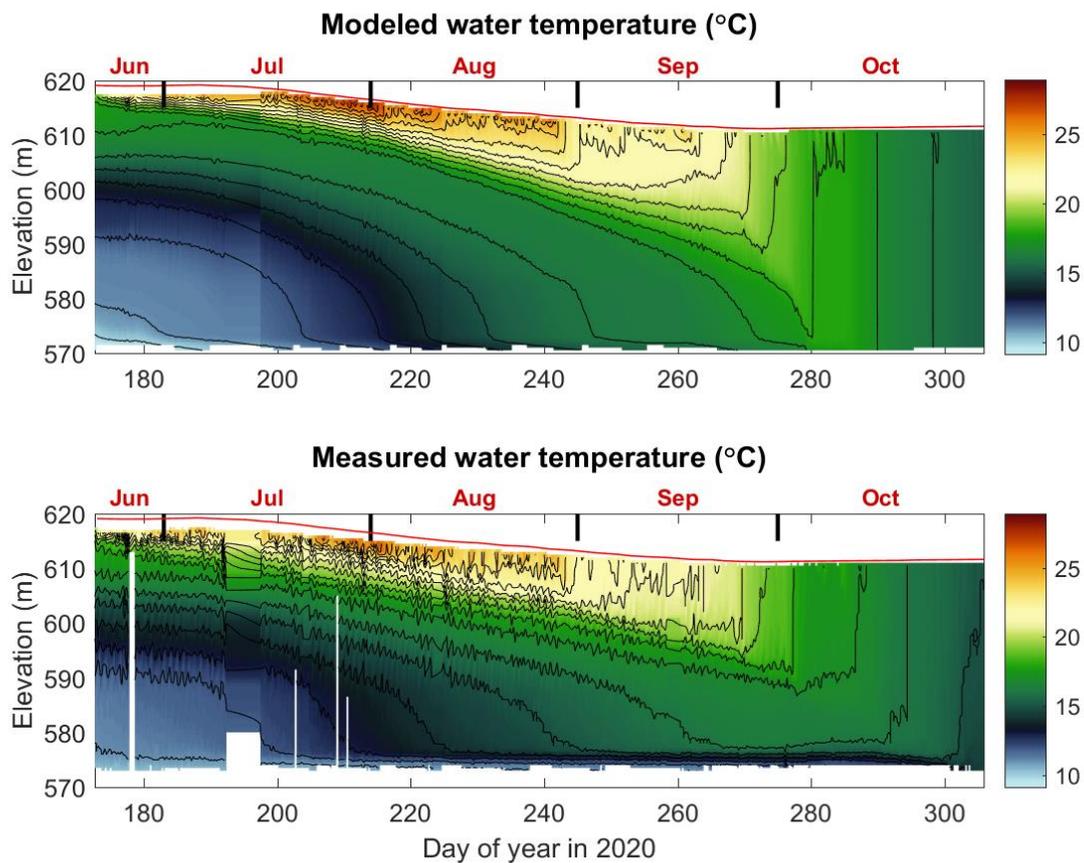


Figura 74. Comparación del resultado de la simulación de la temperatura del agua (arriba) y de los datos registrados por la sonda Aquadam (abajo).

6.11.1.2. **Modelo biogeoquímico**

Dada la multiplicidad de procesos a representar en los modelos de calidad del agua, y el alto grado de parametrización de los sub-modelos biogeoquímicos utilizados, los cambios en la calidad del agua en el embalse del Val durante el período de estudio (1 año desde junio 2020 a julio de 2021) se simularon utilizando un modelo 1D-z.

La utilización de un modelo 1D se justifica, primero, en el hecho de que los cambios principales en las propiedades fisicoquímicas de lagos y embalses (oxígeno, nutrientes, metales, dinámica del plancton) ocurren en el eje vertical. Además, las simulaciones con estos modelos son rápidas, y, por tanto, son más adecuados para la identificación de parámetros y análisis de incertidumbre (Hipsey et al., 2019).

En el Val se utilizó el modelo acoplado GLM-AED. El modelo GLM (*General Lake Model*) es un modelo unidimensional hidrodinámico lagrangiano en donde la masa de agua es conceptualizada como una acumulación de estratos independientes, cada uno de ellos con propiedades físicas, químicas y biológicas, que pueden crecer o disminuir de espesor con los procesos de entradas y salidas de agua (Hipsey et al., 2019).

El modelo AED (*Aquatic EcoDynamics*) es un modelo ecológico con el que se pueden simular los ciclos del oxígeno, nitrógeno, carbono, fósforo, y otros nutrientes, junto con dinámica de fitoplancton (Hipsey et al., 2013).

El modelo se ha ejecutado sin calibración completa de parámetros. El proceso de calibración puede ser un reto por el elevado número de parámetros a calibrar, y al objeto de obtener resultados significativos se necesitaría:

- (1) iniciar las simulaciones en pleno invierno, en el momento en que los procesos biogeoquímicos son más lentos, y los gradientes en las características físico-químicas menos pronunciados (o despreciables incluso). Pero no se disponía de algunos de los datos de contorno críticos validados en ese periodo dentro del Estudio, como el caudal en R1).
- (2) un periodo de estudio más prologado (al menos 5 años).

6.11.2. Resultados principales de las simulaciones

6.11.2.1. Modelo hidrodinámico

Para visualizar el comportamiento hidrodinámico del embalse en las salidas de las simulaciones, se ha incorporado un trazador virtual en cada uno de los flujos de entrada y al agua que se encuentra en el embalse al inicio de la simulación. Es una forma de ver cómo se mezclan las aguas de diferente origen.

En la Figura 75 se representa el resultado de cada una de estas pruebas: Porcentaje que mantiene en cada profundidad y momento del periodo (abril a noviembre de 2021) cada una de las tres fuentes (agua inicial del embalse, río Val y trasvase del Queiles).

En el gráfico superior se aprecia que el agua inicial va menguando en sentido descendente a medida que transcurre el periodo de estratificación, pero siempre aporta más del 50%.

En el gráfico intermedio se puede ver cómo evoluciona el agua procedente del río Val, y lo hace de forma completamente inversa a la anterior, de modo que el mayor porcentaje (25%) se concentra en el mes de septiembre en el epilimnion.

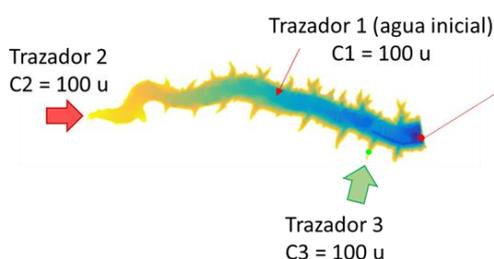
Por último, el gráfico inferior muestra el comportamiento del agua que llega por el trasvase del Queiles. Tiende también a ubicarse en el estrato más superficial, en el que alcanza el valor máximo (25%) en el mes de julio. Sin embargo, a partir de agosto se distribuye preferentemente por el metalimnion, es decir, en un estrato intermedio al que no llega la luz, y se va hundiendo progresivamente a medida que esa capa lo hace hasta que se mezcla totalmente hacia mediados de octubre.

En la Figura 75 se puede apreciar que el comportamiento en la estación E3 (más hacia la cola del embalse) es diferente. Durante todo el periodo estival y hasta el final del ciclo, el agua del trasvase domina la columna de agua. Esto quiere decir que este influjo del trasvase tiende a situarse más hacia atrás o, dicho de otra manera, cuando hay trasvase el agua del río Val se acumula en la zona superficial de la cabecera del embalse.

MODELO EMBALSE

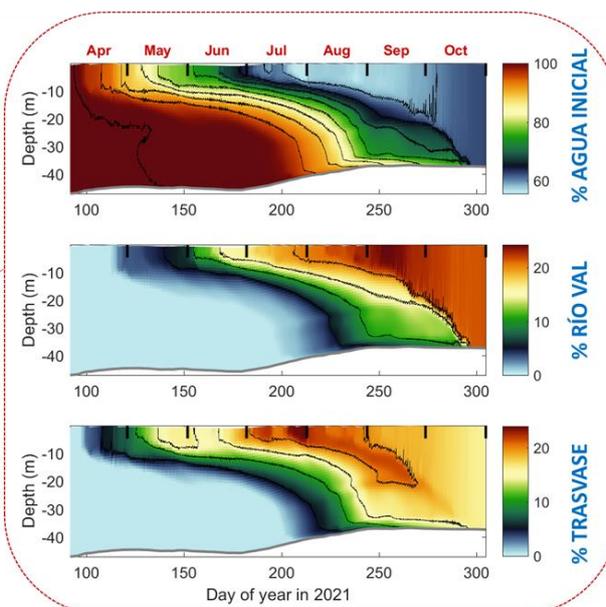
Trazador constante desde inicio de simulación.

- **Trazador 1:** Agua inicial (background)
- **Trazador 2:** Agua río Val
- **Trazador 3:** Agua del trasvase



Simulación trazadores año 2021: Presa

Proporción río Val/trasvase/embalse en la columna de agua: mezcla



- **Trazador 1:** Agua inicial (background)
- **Trazador 2:** Agua río Val
- **Trazador 3:** Agua del trasvase

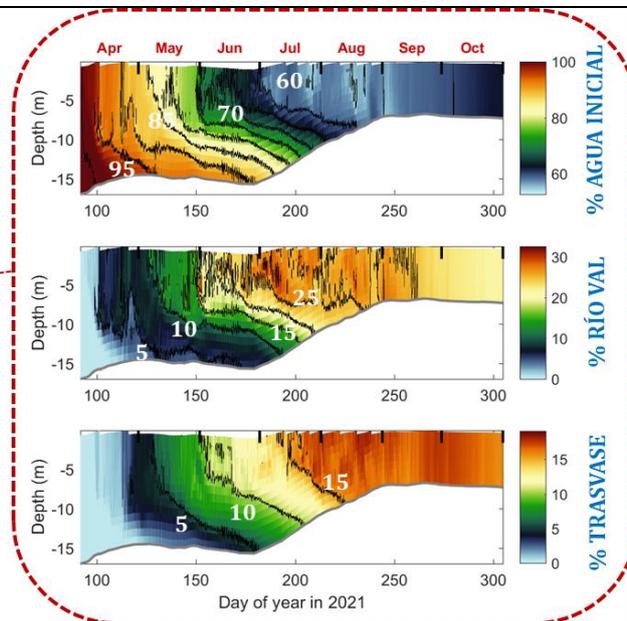
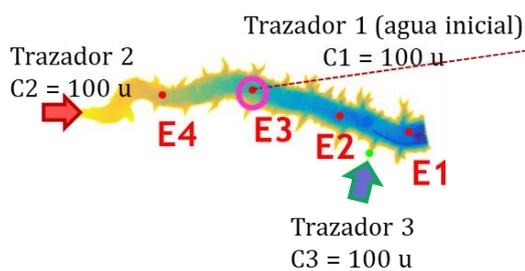


Figura 75. Simulación de la mezcla de aguas de diferente origen en la zona de presa (arriba) y de cola (abajo). Año 2021.

Si se hace este mismo ejercicio para el año 2020, en el que el caudal del trasvase del Queiles fue casi 3 veces superior al del año 2021, el resultado muestra que el agua del trasvase domina la columna de agua hasta los 10 m de profundidad desde el mes de julio y que este dominio se extiende hacia abajo a medida que avanza el verano. Es decir, domina la zona fótica del embalse durante el periodo de crecimiento algal.

Ésta y otras apreciaciones se ilustran profusamente en el APÉNDICE XII, en el que se facilitan los resultados de las simulaciones de diferentes escenarios de gestión. En dichas simulaciones, en lugar de trazadores con concentración constante, se introducen las concentraciones de fósforo total (TP) y nitrógeno total (TN) observadas en el río Val (R1) y en el trasvase del Queiles (R11). Se asume concentración cero en el agua embalsada en el inicio del periodo para destacar la influencia de la circulación de las entradas, y además de las concentraciones resultantes, se facilita la ratio TN/TP como productos de salida.

Los escenarios que se manejan son:

- i. Año con mayor contribución del **trasvase del Queiles** (2020) y con menor contribución (2021). En promedio, el primer año se trasvasaron 99 dam³/d en 2020 y 35 dam³/d en el segundo año. Para los siguientes escenarios se simulan ambos años.
- ii. **Manejo hidráulico** en la presa:
 - Test 1: Situación actual (tomas y desagüe a 571 msnm)
 - Test 2: Tomas a nivel superficial y desagüe a 571 msnm
 - Test 3: Tomas y desagüe a nivel superficial
- iii. Escenarios **EDAR de Ágreda-Ólvega**: Tratamiento terciario fijando el tope en 2 mg/L para el fósforo total a la entrada del embalse, y reduciendo proporcionalmente la misma curva de concentración actual (reescalado de 0 - 4 mg/L actual a 0 - 2 mg/L tras el tratamiento terciario).

Se recogen y comentan a continuación los resultados más relevantes:

Circulación de los flujos de entrada (Figura 76). En el año 2020, el agua del trasvase contribuye a confinar el flujo del río Val en la cola del embalse. En el año 2021 el agua del río Val se extiende por la superficie del embalse hasta la presa y en los meses críticos de agosto y

septiembre el agua del trasvase se hunde al metalimnion, y por tanto se pierde su capacidad de diluir los nutrientes en la zona fótica superficial, que es donde las algas hacen uso de ellos.

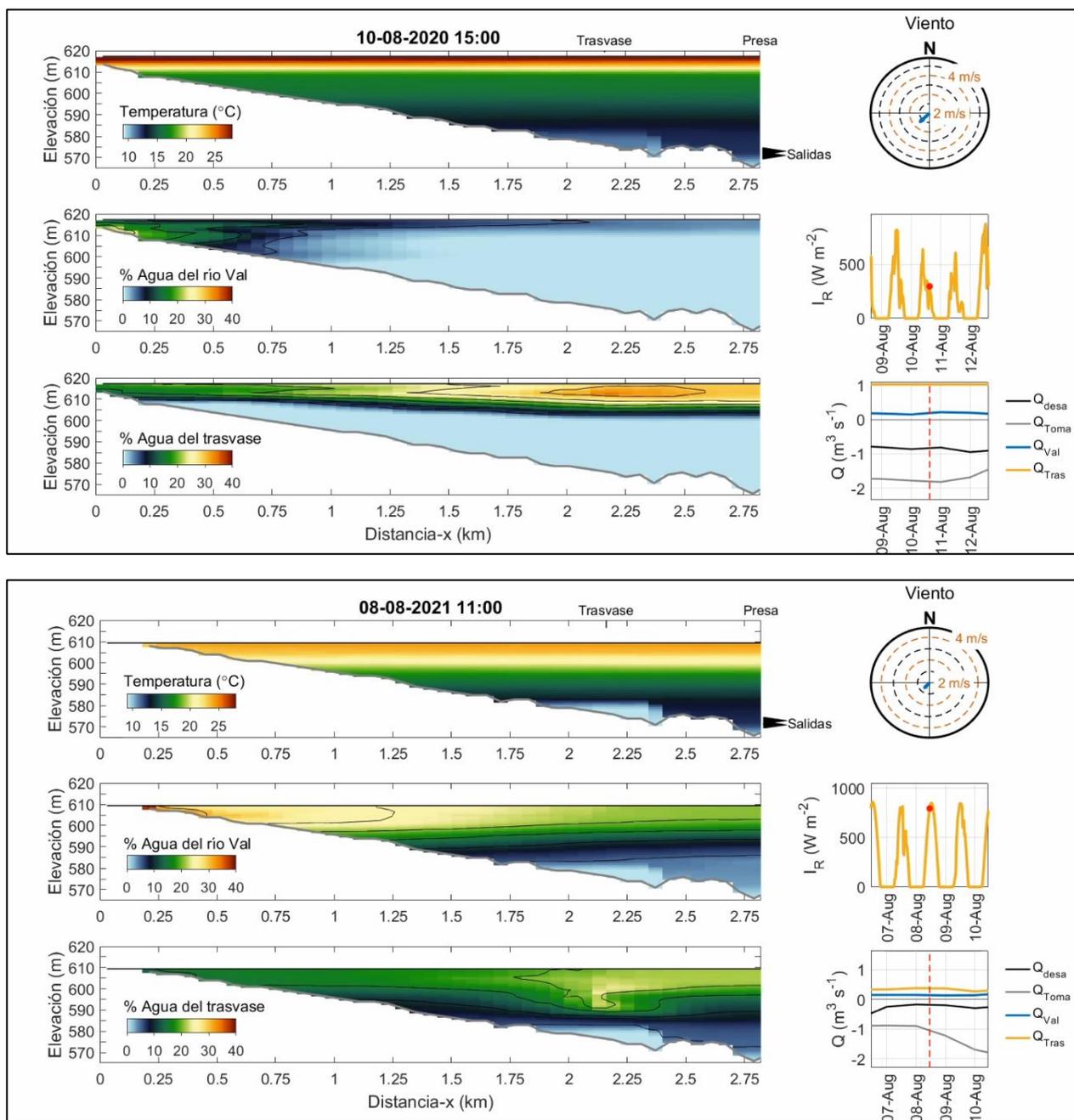


Figura 76. Simulación de la circulación de los inlfujos a lo largo del periodo de estratificación.
 Captura de vídeo de agosto de 2020 (arriba) y 2021 (abajo).



Comparación de escenarios hidráulicos (Figura 77). En el año 2020 baja la temperatura media del agua durante el verano en 4°C en el *Test 2* y hasta 6°C en el *Test 3*. En el año 2021 también hay descenso de temperatura, pero es de menor rango.

El volumen de agua en el que la relación TN/TP es inferior a 10 ($Vol_{TN/TP} < 10$), lo que favorece el crecimiento de cianobacterias fijadoras de nitrógeno, se triplica al final de verano en ambas pruebas. En el año 2021 se incrementa ligeramente al final del verano. La concentración de nitrógeno total (TN) desciende un 40% en el verano tardío de 2020 en el *Test 2* y hasta un 60% en el *Test 3*. En 2021 desciende a la mitad en ambas pruebas. La concentración de fósforo total (TP) desciende un 50% en el verano tardío de 2020 en el *Test 2* y hasta un 75% en el *Test 3*. En 2021 desciende un 35% en ambas pruebas.

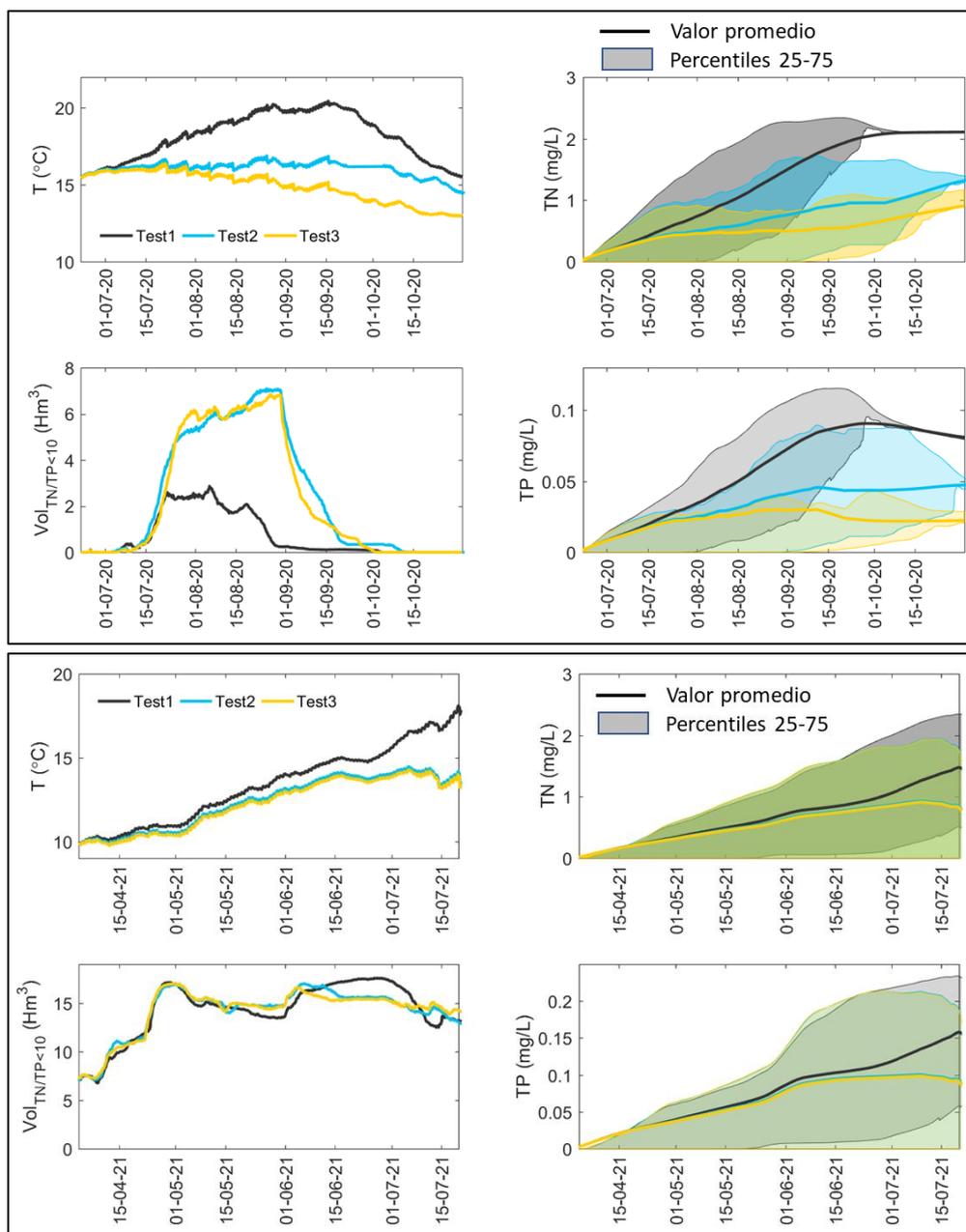


Figura 77. Comparación de escenarios hidráulicos (año 2020 arriba, y 2021 abajo). Explicación en el texto.

Comparación de escenarios de tratamiento de aguas residuales en la EDAR de Ágreda-Ólvega (Figura 78). En este caso, se aprecian diferencias en el $\text{Vol}_{\text{TN/TP} < 10}$ y en TP. El primero de ellos desciende durante el verano un 20% en 2020 y un 75% en 2021. En este último año además se aprecia un pronunciado descenso (90%) en primavera.

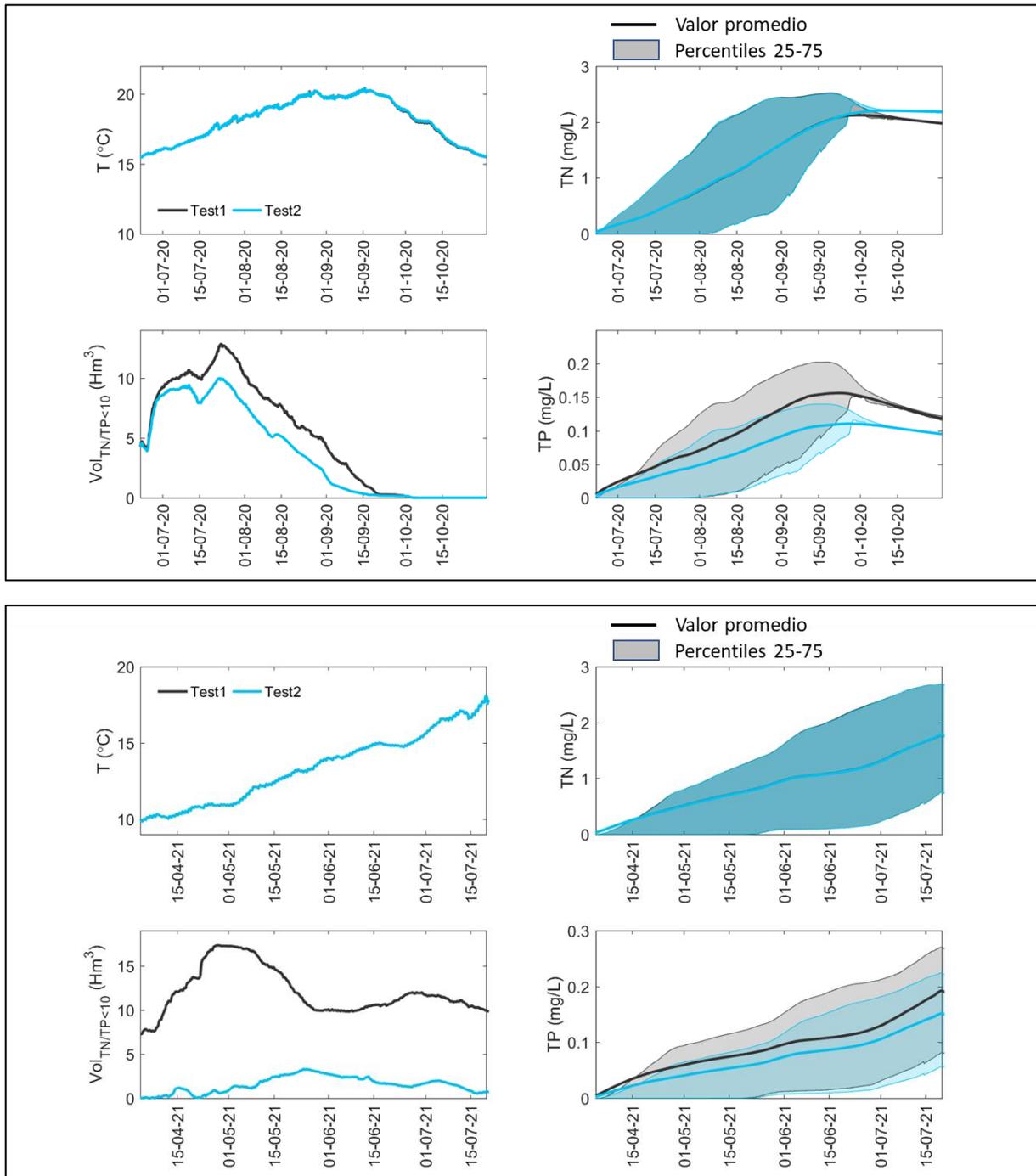


Figura 78. Comparación de escenarios actual (Test1) y con tratamiento terciario en EDAR de Ágreda-Ólvega (Test 2) en el año 2020 (arriba) y 2021 (abajo). Explicación en el texto.

6.11.2.2. Modelo biogeoquímico

En la simulación que se muestra a continuación se han utilizado dos grupos funcionales de algas, cuyo comportamiento se representa utilizando parámetros ‘típicos’ de algas verdes (clorofitas) y cianobacterias. En la Figura 79, se representan simulaciones (arriba) y observaciones (abajo) de temperaturas (eje x- representa el tiempo, el y- la cota, y en color, la temperatura). El error medio cuadrático es de 1,37 °C. Este valor es similar al obtenido en otras simulaciones de embalses publicados en la literatura.

En la Figura 80 se han representado los cambios en profundidad y tiempo del oxígeno disuelto, y en la Figura 81 los de clorofila-a ($\mu\text{g-Chla L}^{-1}$). El modelo, aún sin una calibración completa, representa, en general, los cambios estacionales en la concentración de oxígeno disuelto y, en particular, el desarrollo de las condiciones de anoxia en el hipolimnion durante los momentos de estratificación. En cuanto a la clorofila-a, representa razonablemente bien el pico en el primer año, pero no en el segundo, durante la primavera. Además, el modelo predice un máximo en el verano de 2020 algo más prolongado que el observado, y con concentraciones mayores.

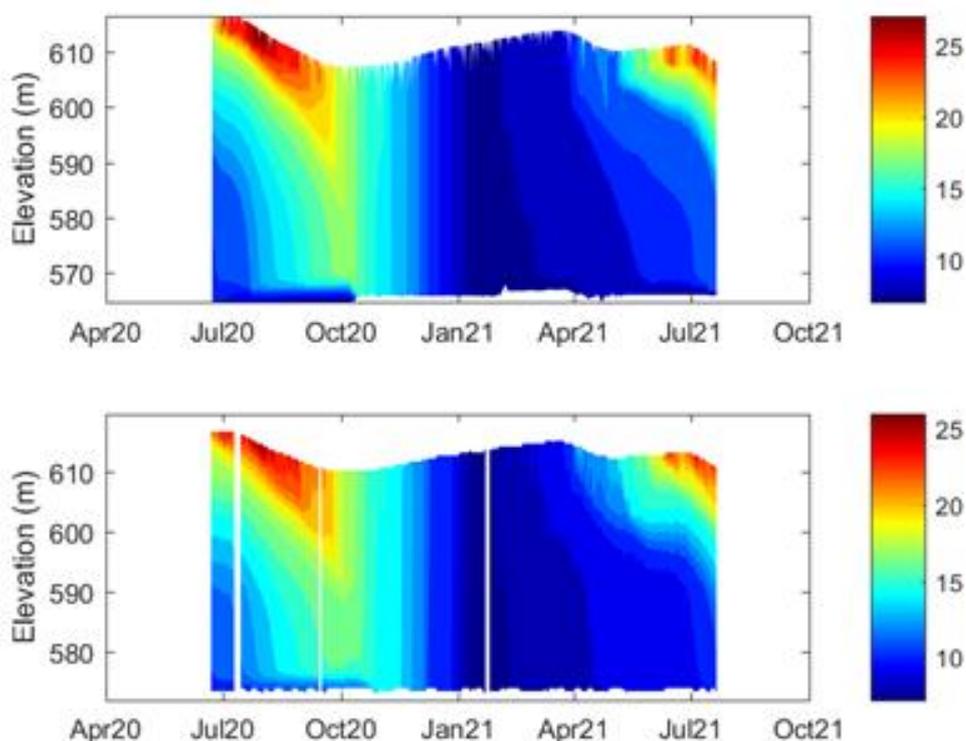


Figura 79. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la temperatura (°C) del embalse (color).

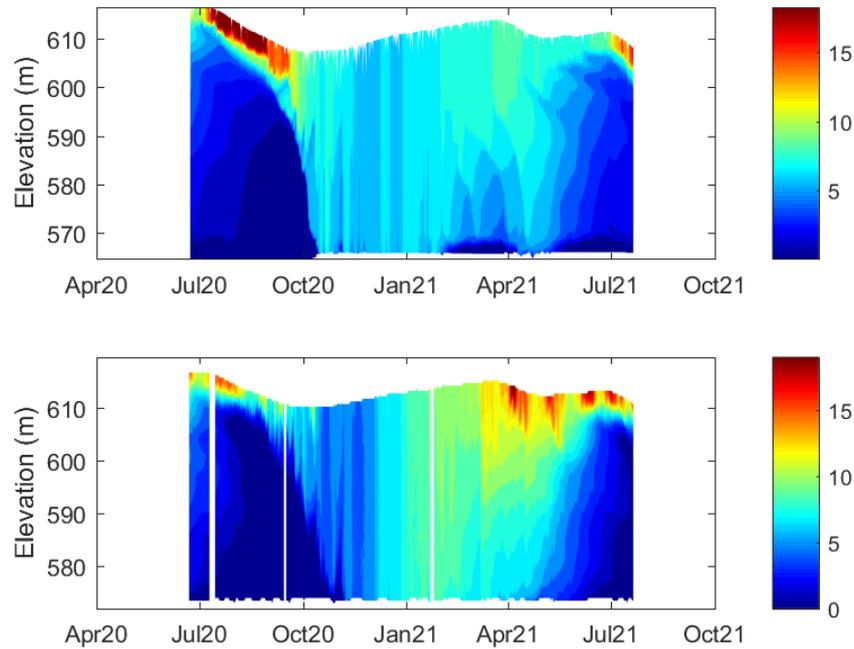


Figura 80. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la concentración de oxígeno disuelto (mg/L) en el embalse (color).

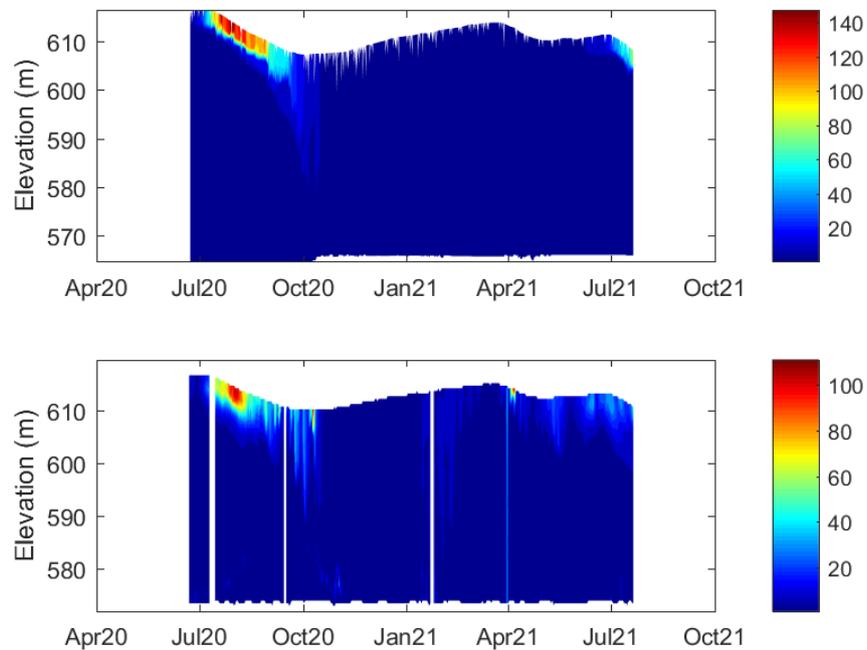


Figura 81. Variación en profundidad (eje y-) y tiempo (eje x-) de la concentración de clorofila-a ($\mu\text{g-Chla L}^{-1}$) en el embalse (color).

6.12. DEFINICIÓN DE MEDIDAS CORRECTORAS Y ENSAYO DE ESCENARIOS DE ACTUACIÓN

Como se ha explicado en el apartado 6.11.4., todos los procesos de aportaciones hídricas y de nutrientes se han integrado en el modelo ECOMOD-Val. Esto permite generar diferentes escenarios de aportación de nutrientes y predecir la concentración esperada de fósforo, mediante las herramientas de modelado del embalse descritas.

A efectos de comparar con la necesaria agilidad diferentes escenarios de tratamiento, se realiza un balance de agua y nutrientes con el modelo ECOMOD-Val a partir de los resultados del ECOMOD-Val, y se estima la concentración equivalente en el embalse y el estado trófico esperable mediante la expresión (Vollenweider & Kerekes, 1980):

$$[P]l = 1,55 \cdot \left[\frac{L(P)/Q_s}{1 + \sqrt{\bar{z}/Q_s}} \right]^{0,82}$$

Donde,

- $[P]l$ = Concentración normalizada de fósforo en el embalse
- $L(P)$ = Carga o aportación específica de fósforo, es decir, masa de fósforo externa (incluida la precipitación directa) que recibe el embalse anualmente, dividida por la superficie del embalse.
- Q_s = Aportación hidráulica específica (m/año), equivalente a la aportación hídrica anual (Q_i) dividida por la superficie del embalse.
- $[P]i$ = Concentración de fósforo en los flujos de entrada
- TRH = tiempo de residencia hidráulica (años)

En el momento en que se disponga de escenarios de tratamiento de aguas más detallados, se estará en condiciones de lanzar simulaciones completas cuenca/embalse, sacando provecho de las herramientas puestas a punto en el presente Estudio.

Siguiendo esta línea de razonamiento, se plantean algunos escenarios de actuación preliminares para estimar su potencial rendimiento en la disminución de la concentración de fósforo en el embalse de El Val (Figura 82), y más concretamente para evaluar su efectividad en el objetivo de alcanzar un nivel de MESOTROFIA según la escala de la OCDE (35 $\mu\text{g P/L}$).



Estos escenarios, expuestos en el mismo orden que en la citada figura, son los siguientes:

- I. **ESTUDIO PREVIO:** Resultado de la simulación preliminar realizada mediante coeficientes teóricos de exportación de nutrientes realizada en el año 2017 y aplicada a una serie de datos meteorológicos de 10 años (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2017).
- II. **ACTUAL DATOS LABORATORIO:** Resultado de la estimación realizada en el presente estudio para los años 2020 y 2021, a partir de las mediciones y análisis realizados a lo largo del proyecto.
- III. **ACTUAL SIMULADO:** Resultado de la estimación realizada en el presente estudio para los años 2020 y 2021, a partir de las simulaciones de aportaciones en la cuenca (SWAT y ECOMOD_Val). Este es el escenario del que se parte para aplicar los supuestos de actuación que siguen a continuación.
- IV. **TERCIARIO EDAR:** Ampliación del tratamiento de las aguas residuales de la EDAR de Ágreda-Ólvega. Se plantea una reducción de la concentración de fósforo en el vertido, aplicando un tope máximo de 2 mg/L y una reducción proporcional de las concentraciones observadas en el periodo del estudio. Se trataría de reducir la concentración de fósforo lo suficiente como para cumplir con la normativa sobre aguas residuales en zonas sensibles. Para el cálculo de la carga, se suman los caudales de vertido actuales por el vertido de agua tratada y por el alivio o *bypass*.
- V. **HUMEDAL:** Construcción de humedales controlados entre el vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega y la entrada al embalse. Se plantean dos etapas:
 - a. Humedal de 3 ha inmediatamente aguas abajo de la EDAR de Ágreda-Ólvega.
 - b. Añadir segundo humedal de 1,5 ha en la zona de entrada del río Val al embalse.

En este tipo de actuación, la superficie disponible de terreno es un condicionante principal y es por lo que se ha repartido en dos sistemas (Etapa a y b) limitados a 3 ha de superficie, uno en la zona cercana a la EDAR y otro cerca ya de la entrada al embalse (APÉNDICE XIII). La segunda de las etapas partiría de una concentración de fósforo total inferior a 0,2 mg/L en promedio y por ello el rendimiento será inferior.

- VI. **ALL:** Combinación de las actuaciones anteriormente expuestas, junto a las siguientes:
Control de las poblaciones de peces. La extracción de una biomasa de peces (carpa y alborno) equivalente a la biomasa actual contribuiría a una reducción neta de fósforo en la parte del sistema más sensible, es decir, el propio embalse. Esta reducción se estima en términos de fósforo excretado únicamente (no se tiene en cuenta la egesta ni la

extracción de fósforo asimilado en el pez), por efecto de un bombeo neto desde el fondo, donde se alimentan, a la columna de agua. Se aplica una reducción del 80% de la biomasa de peces total estimada en el año 2017 (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2017).

Actuación sobre el vertido de la **piscifactoría**. Se plantea un cambio a un sistema de producción ecológico, lo que implica una reducción de la producción a 55.000 kg/año desde los aproximadamente 200.000 kg/años actuales, y el uso de piensos diferentes (Corrales, 2014).

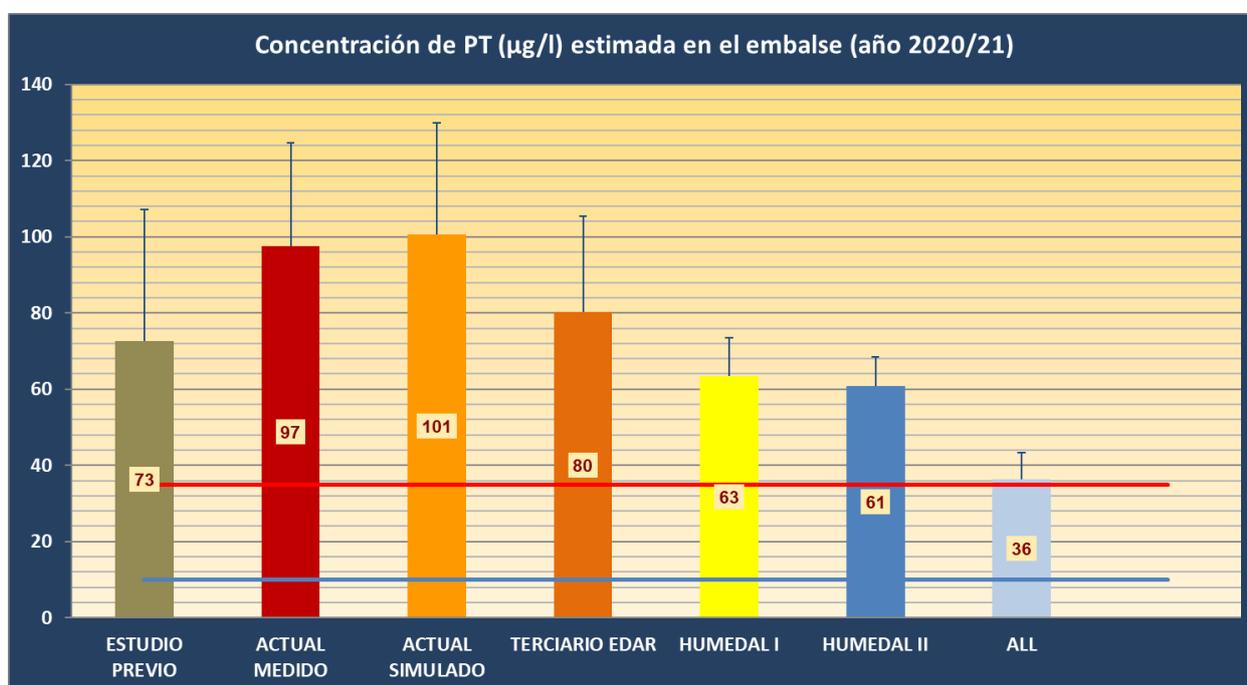


Figura 82. Estimación de la concentración media anual de PT en el embalse de El Val como consecuencia de los diferentes escenarios de actuación comentados. Se representa la media y la desviación estándar en la serie de datos del periodo.

La estimación del resultado de estas medidas se puede considerar conservadora, puesto que tanto el rendimiento de la ampliación de la EDAR podría ser mejor que un simple tope a 2 mg/L y también porque no tiene en cuenta las mejoras que constantemente se están aplicando a los sistemas de humedales artificiales, especialmente en lo que se refiere a la capacidad de absorber fósforo de sustratos altamente innovadores (Altamira-Algarra et al., 2022).

Por otro lado, no se han tenido en cuenta en esta previsión las recomendaciones que se derivan del potencial de manejo hidráulico del sistema, que pueden tener una considerable



repercusión en cuanto a la minoración de la eutrofización del embalse para una misma carga de nutrientes (apartado 6.12).

Por último, el hecho de que los dos años hidrológicos simulados en este proyecto han constituido dos extremos hidrometeorológicos, permite utilizar estos resultados como representativos de un amplio espectro de **escenarios de cambio climático**.

En efecto, se trata de una cuenca en la que las aportaciones hídricas están gobernadas por las aguas subterráneas, con lo que esto supone de laminación de avenidas y sequías; esto, sumado al hecho de que el embalse de El Val tiene un régimen hidráulico gobernado por los caudales de trasvase del río Queiles (el rango de caudales del río Val es muy limitado), hace que la repercusión hidrológica del cambio climático quede atenuada o superada por el manejo hidráulico.

En consecuencia, el análisis efectuado de estos dos años tan dispares en el manejo hidráulico es en este caso una aproximación más realista a esta materia. Como se ha mostrado en el apartado 6.12, cuando se maximizan los trasvases (año 2020), el agua procedente del río Queiles (con menor contenido en nutrientes) domina la zona fótica, en la que el fitoplancton se desarrolla. En cambio, en el año 2021, en el que el caudal de trasvase era muy inferior, el agua del trasvase se hunde hacia el metalimnion durante los meses críticos de agosto y septiembre y por tanto se pierde su capacidad de diluir los nutrientes en la zona fótica superficial, favoreciendo la proliferación de las microalgas.

7. RESUMEN DE TRABAJOS REALIZADOS Y CONCLUSIONES

El embalse de El Val presenta un problema de eutrofización de sus aguas que impide que su potencial ecológico se clasifique en buen estado (según la Directiva Marco del Agua) y que genera proliferaciones de cianobacterias tóxicas. Entre los agentes causales se dan problemas derivados de presiones antrópicas de diferente tipo que requieren un abordaje conjunto y optimizado, que considere además los procesos internos en el propio embalse, de carácter ecosistémico y dinámico.

Para definir la mejor estrategia y optimizar las inversiones en medidas correctoras, se ha puesto en marcha el presente proyecto, cuyo objetivo principal es desplegar una serie de herramientas de análisis que sienten las bases de una evaluación continuada de la evolución del sistema y de las medidas de gestión. Esta avanzada estrategia resulta de interés porque es capaz de generar respuestas y medidas de gestión de forma ágil y adaptada a la realidad cambiante del sistema cuenca/embalse, evitando de este modo incurrir en inversiones de eficacia incierta, y basando las medidas de gestión en el conocimiento del funcionamiento de los elementos y procesos clave.

Se espera que esta línea de trabajo aporte soluciones a la problemática ambiental del embalse de El Val, pero también que sirva como experiencia piloto para mejorar la gestión de la eutrofización en otros casos de la DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO.

Los trabajos realizados y los hitos alcanzados cubren en su conjunto el reto de *desplegar y calibrar una infraestructura virtual para la reversión de la eutrofización del embalse de El Val*.

7.1. TRABAJOS REALIZADOS

Se resumen a continuación los trabajos ejecutados y desarrollos alcanzados en el transcurso de este proyecto, y que se han detallado con profusión de detalles en este documento MEMORIA y en los APÉNDICES que lo acompañan.

7.1.1. ***Incorporación de fuentes de información e indicadores a base de datos***

- Tabla descriptiva de 74 estaciones de control de diferente tipo.
- Datos en continuo hidrometeorológicos y de explotación hidráulica de la red SAIH.
- Datos en continuo de la sonda multiparamétrica perfiladora Aquadam en la presa.

- Analíticas de laboratorio realizadas.
- Cálculo de indicadores limnológicos (apartado 6.6)

7.1.2. Despliegue y mantenimiento de estaciones de monitorización en continuo (apartado 6.2)

Se han montado y puesto en funcionamiento 3 estaciones de monitorización en los puntos de entrada al embalse (río Val y trasvase del Queiles) y en la EDAR de Ágreda-Ólvega. Ésta última está dotada de un sistema de bombeo y limpieza que permite monitorizar secuencialmente 3 puntos: Río Val aguas arriba (R5) y aguas abajo del vertido (R4), más el propio vertido (V1).

Cada estación ha generado más de 10.000 registros en el periodo de abril de 2021 a julio de 2022, es decir, han estado más de un año (tiempo previsto inicialmente) funcionales, si bien la pandemia de COVID-19, la ausencia de una estación de aforo en el río Val con suministro de comunicaciones y energía (prevista inicialmente) y las dificultades de la mala calidad del agua depurada de la EDAR han dilatado el periodo de despliegue inicial y han producido lagunas de datos. Además, en la estación de entrada del río Val al embalse se ha puesto en marcha un autoanalizador de nutrientes.

Los datos generados han permitido calibrar los sensores de datos (apartado 6.8.2), con el fin de extraer valores de nutrientes a partir de parámetros físico-químicos de más sencilla monitorización. Además, se ha obtenido valiosa información sobre puntas de vertido y variaciones horarias y estacionales de estos parámetros.

7.1.3. Campañas de muestreo y análisis de laboratorio

Se han realizado 18 campañas en 4 puntos de monitorización de ríos y vertido, tomando 6 muestras por campaña en diferentes horarios), y 8 campañas en diferentes puntos y profundidades del embalse (apartado 6.3). A estos datos se añaden otros aportados por la CHE (apartado 6.4)

A partir de los resultados de campo y laboratorio, se han elaborado diversas representaciones gráficas que permiten comparar cada parámetro entre estaciones de muestreo y campañas (apartado 6.5).

7.1.4. Generación de series diarias de nutrientes

Los resultados de los análisis de laboratorio han sido sometidos a diferentes tratamientos estadísticos que han permitido generar una serie diaria de nutrientes entre junio de 2020 y julio de 2021 mediante la técnica que mejor se ajustaba a la realidad observada (apartado 6.8.1). Estos datos han servido para alimentar el modelado biogeoquímico del embalse.

Por otro lado, se ha puesto a punto una prometedora técnica de inferencia de concentración de nutrientes (sensores de datos o softsensors) a partir de datos de monitorización en continuo de parámetros físico-químicos (apartado 6.8.2). Esta herramienta queda disponible para su aplicación futura en la generación continuada de concentración de nutrientes en las entradas al embalse, que se podrá utilizar entonces como datos de contorno. Este desarrollo abre una extraordinaria oportunidad para alimentar y mejorar los modelos y proyectar predicciones de eutrofización y riesgos de proliferación de cianobacterias tóxicas en función de las soluciones de gestión y de los escenarios hidrometeorológicos que se planteen.

7.1.5. Estudio de las aportaciones de nutrientes

Para este análisis, se ha partido de una conceptualización de la cuenca en subcuencas que drenan a los siguientes puntos críticos:

MANANTIAL DE OJILLOS DE ÁGREDA: El río Val aguas arriba de este punto (M1) se sume en el terreno y se ha considerado que el drenaje de esa subcuenca es subterráneo. Las aguas que se utilizan para procesos urbanos e industriales aguas arriba de este punto (poblaciones de Ólvega y el propio Ágredda) se toman del acuífero y se vehiculan a la EDAR de Ágredda-Ólvega, situada aguas abajo. Se puede por lo tanto asumir razonablemente que los nutrientes procedentes de fuentes difusas en la cuenca se incorporan al río Val a través de este punto. Estas fuentes son principalmente los residuos ganaderos de las numerosas granjas, principalmente de cerdos, que se aplican al terreno para el cultivo de los campos en esta subcuenca.

Mediante el uso de isótopos estables (apartado 6.9), especialmente del nitrógeno y del oxígeno en los nitratos disueltos, se ha establecido que el exceso de carga de nutrientes sobre los valores basales tiene un origen ganadero, lo que ha permitido estimar dicha aportación, separándola de la basal y de la que se ha estimado por escorrentía natural mediante el modelo de cuenca (apartado 6.11).

VERTIDO DE LA EDAR DE ÁGREDA-ÓLVEGA: Trata las aguas residuales de las poblaciones de la cuenca del río Val aguas arriba de este punto. El vertido tiene una componente de agua tratada (V1) y un alivio intermitente de agua no tratada (V1A). El APÉNDICE VI se dedica a un análisis detallado de los registros obtenidos en este vertido y de la conformidad normativa del mismo y del tramo del río Val aguas abajo en relación con la normativa sobre ZONAS SENSIBLES y a la DIRECTIVA MARCO DEL AGUA.

PUNTO DE ENTRADA DEL RÍO VAL AL EMBALSE (R1): Es la principal vía de entrada de nutrientes al embalse. Este punto suma las aportaciones de los manantiales de los Ojillos de Ágreda y del vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega. A ellas se añaden las escorrentías naturales (modelo SWAT) y se descuenta la autodepuración en el recorrido del río de 8,4 km entre ambos puntos.

PUNTO DE DERIVACIÓN DEL TRASVASE DEL QUEILES AL EMBALSE (R11): Este punto incorpora agua de la cuenca del Queiles al embalse, desde el azud del Queiles. El nacimiento del río se produce en el manantial de Vozmediano (M2), que se utiliza para los procesos de la piscifactoría de trucha de esa localidad, originando su retorno un vertido (V3). Las aportaciones de nutrientes en consecuencia son la suma de las que aportan el manantial y vertido citados, y que se someten a un proceso de autodepuración en el recorrido hasta el azud.

ESCORRENTÍA DIRECTA AL EMBALSE (CED): La escorrentía de esta zona, que no drena a ninguno de los puntos de control anteriores, sino que lo hace directamente al embalse, se ha estimado mediante el modelo de cuenca SWAT.

Los caudales y concentraciones de nutrientes en cada una de estas subcuencas se han incorporado a un modelo dinámico de simulación (ECOMOD-Val) que permite estimar las cargas y concentraciones bajo diferentes escenarios de actuación (apartado 6.11.4). En el apartado 6.11.5 se realiza un análisis de las estimaciones de las aportaciones de nutrientes y de su origen, generados mediante esta herramienta.

7.1.6. Estudios en el embalse

Todos los datos recogidos de tipo hidrometeorológico y de calidad del agua en las estaciones de entrada al embalse, así como la batimetría preexistente, han servido para alimentar el modelo hidrodinámico y biogeoquímico del embalse.

Además, las campañas de muestreo (apartado 6.5) y de la sonda Aquadam se han utilizado para calibrar los propios modelos de simulación y los algoritmos de teledetección (apartado 6.10). Estos algoritmos permiten analizar la distribución bidimensional de la biomasa algal y, junto a los datos de monitorización continuada en el embalse, realizar seguimientos de su evolución.

El modelado del embalse (apartado 6.12) ha permitido analizar el comportamiento de los diferentes influjos de agua y de sus constituyentes, en dos periodos (2020 y 2021) que son representativos de los extremos en cuanto al manejo hidráulico del trasvase del Queiles y de los órganos de desagüe de la presa.

7.1.7. Medidas correctoras y escenarios de actuación

Los trabajos han culminado en la definición de una serie de medidas correctoras que parten de los resultados obtenidos en el conjunto de estudios desarrollados. Estas medidas abarcan desde la que ya está prevista de mejora de los tratamientos en la EDAR de Ágreda-Ólvega, hasta la reducción de la biomasa de peces en el embalse, pasando por tratamientos complementarios mediante humedales controlados que sirven tanto para conseguir el objetivo de carga externa planteado como amortiguar los pulsos de contaminación que se puedan producir.

Finalmente, las diferentes medidas descritas se someten a un contraste de escenarios para establecer la combinación de estas que permita alcanzar el objetivo buscado. Este objetivo se traduce operativamente en una concentración media esperada de fósforo total en el embalse que no sobrepase el umbral que separa la mesotrofia de la eutrofia.

7.2. HALLAZGOS DESTACABLES Y CONCLUSIONES

Se ha confirmado que el embalse de El Val está en situación **eutrofia o hipereutrofia** (según el momento del año) y que presenta un **riesgo elevado de floraciones de cianobacterias tóxicas**. Este riesgo es mayor en los meses de septiembre y octubre, pero en algunos años se observan también en la primavera. Las cianobacterias dominan en estas épocas la comunidad del fitoplancton e incluyen especies potencialmente tóxicas.

Los **niveles de fósforo total** en el embalse son **elevados** pero muy variables entre estaciones y profundidades de muestreo, lo que dificulta una interpretación directa y obliga a utilizar modelos dinámicos para ello. Los niveles de nitrógeno son también altos y, en general la ratio N/P no es lo bastante baja como favorecer el crecimiento de las cianobacterias fijadoras de nitrógeno. De nuevo, la simulación dinámica 3D del embalse aporta información de mayor resolución sobre esta cuestión.

El embalse tiene un comportamiento muy distinto en función del **caudal y momento del trasvase del Queiles**; cuando este es mayor, consigue confinar la pluma de entrada del río Val, más cargado de nutrientes, en la zona de cola y a mayor profundidad, alejándolo de la zona fótica en la que estarían más disponibles para el crecimiento de las algas.

La **concentración de fósforo total** en el río Val es un orden de magnitud superior a la del Queiles (1,04 mg/L frente a 0,09 mg/L) y los máximos se producen en el primer trimestre del año y durante el verano. Algo parecido ocurre con el **nitrógeno total**, pero en este caso la diferencia es menor: 8,24 mg/L en el río Val (R1) frente a 2,61 mg/L en el trasvase del Queiles (R11).

Las **aportaciones externas de fósforo**, que es el nutriente al que dirigir las medidas correctoras, están dominadas por la entrada del **río Val**, que aporta una carga de fósforo 3,3 veces superior a la que aporta el **trasvase del Queiles**. Sin embargo, la **carga de nitrógeno** que aporta este último supera en 1,4 veces a la del río Val, debido a que su volumen es 4,3 veces superior en el conjunto del periodo estudiado. La ratio TN/TP es muy inferior en el río Val (8,75) que en el trasvase del Queiles (40,42). Los valores bajos favorecen el crecimiento de cianobacterias y los mínimos se dan en primavera.

La **carga total anual externa** es de 7,89 t/año de fósforo y 112,4 t/año de nitrógeno. En el caso del **fósforo**, la mayor parte procede de la cuenca del **río Val** (R1), y la fuente que más contribuye es la **EDAR de Ágreda-Ólvega** con el 41%. A esto hay que sumar un 14% que se

estima aportan los alivios de dicha planta de tratamiento. La contribución ganadera y de la piscifactoría tienen una importancia similar (14%) y la aportación base (sin carga ganadera) de los manantiales y de las escorrentías representan un 7% y 10%, respectivamente.

En el caso del **nitrógeno**, la **ganadería** pasa a ser la **fuentes dominante** (63%) y las aportaciones de la EDAR de Ágreda-Ólvega representan en cambio el 19%. Escorrentías y piscifactoría aportan un 10% y un 7%, respectivamente, quedando la aportación base de los manantiales y la aportación interna de las carpas como contribuciones menores. La ganadería aporta mayor carga durante los meses de invierno y primavera, debido a la estacionalidad de las aplicaciones de los residuos al terreno y a la percolación inducida por las precipitaciones.

La **simulación dinámica de los procesos críticos en el embalse** ha mostrado que el **caudal y momento** en el que se realiza el **trasvase del Queiles** tiene una influencia trascendental en la calidad del agua del embalse, dominando la zona de crecimiento de las algas cuando el caudal es más alto, pero cediendo esa zona al caudal procedente del río Val, más cargado de nutrientes, cuando el volumen de trasvase es menor. Se ha demostrado este efecto tanto en términos de concentración de fósforo y nitrógeno como de la ratio N/P, que cuando baja de 10 impone condiciones ventajosas para las cianobacterias fijadoras de nitrógeno. Asimismo, se ha mostrado cómo el uso de detracciones de agua superficiales en la presa implicaría una concentración más baja de nutrientes en la zona de crecimiento algal.

El **conjunto de medidas correctoras** ensayadas permitiría alcanzar el **objetivo operativo** de 35 µg/L de fósforo total en el embalse, que separa la MESOTROFIA de la EUTROFIA, de modo que sería pertinente la ejecución de todas ellas. Para asegurar que las oscilaciones sobre ese valor no provoquen desviaciones del objetivo o solamente lo hagan de forma excepcional, se cuenta con las **opciones de manejo hidráulico**, tanto en el sentido de maximizar el caudal de la transferencia desde el Queiles durante los periodos de mayor riesgo, como el de habilitar desagües a nivel superficial.



8. RECOMENDACIONES

Ejecutar el conjunto de **medidas correctoras planteadas** en el presente trabajo (apartado 6.13), que consistiría en:

- **Vertidos y aguas residuales:** Ampliación del tratamiento de las aguas residuales de la EDAR de Ágreda-Ólvega. A pesar de las aguas de proceso (no de escorrentía pluvial) del Polígono de Ólvega están conectadas con la EDAR, los Ayuntamientos, en el ejercicio de sus competencias y tal y como se contempla en la autorización de vertido, han de intensificar los controles de vertidos industriales en sus redes de saneamiento y además, el vertido de las aguas pluviales del citado polígono ha de ser monitorizado y controlado previamente a su evacuación, y en el caso de ser necesario, exigir un tratamiento adicional a la decantación existente en la salida de estas escorrentías al Arroyo de los Caños.
- Construcción de **humedales controlados** entre el vertido de la EDAR de Ágreda-Ólvega y la entrada al embalse. Se debe estudiar la necesidad/oportunidad de realizarlo en un único emplazamiento o en dos etapas separadas geográficamente, una a la salida de la EDAR y otra a la entrada del río Val al embalse.
- Control de las **poblaciones de peces del embalse**. Es una medida coadyuvante en el proceso de restauración. Se plantea una reducción del 80% de la biomasa de peces y un mantenimiento posterior mediante extracciones periódicas de mantenimiento que podrían reforzarse con eventos organizados de pesca recreativa. Contribuiría además a reducir el riesgo de mortandades masivas de peces en el embalse.
- Cambio a un sistema de producción ecológica de la **piscifactoría de Vozmediano**, lo que implicaría una reducción de la producción a 55.000 kg/año desde los aproximadamente 200.000 kg/años actuales.

Estas medidas pueden ejecutarse secuencialmente por el orden indicado, si bien el control de las poblaciones de peces convendría abordarlo cuanto antes, porque existe un riesgo de mortandad masiva, y este riesgo será mayor a medida que el estado de eutrofización del embalse vaya atenuándose (oligotrofización), porque su capacidad de carga disminuirá.

Las herramientas de **gestión adaptativa de la eutrofización** consistirían en el manejo de caudales de trasvase y la implantación de un sistema de desagüe superficial como alternativa al desagüe de fondo. Las pautas de manejo se establecerían a partir de las previsiones de las

simulaciones del crecimiento del fitoplancton. A todo esto, se podría añadir la regulación de las pautas de abonado de campos en función de la hidrometeorología y de la respuesta en el manantial de evacuación al río Val (ver más abajo).

Estas previsiones, requieren **ajustar, mantener y tomar ventaja de las herramientas desarrolladas en el presente trabajo**, así como de los elementos de generación de información con alta frecuencia, por lo que recomienda mantener y disponer los siguientes elementos de monitorización:

- **Embalse:** Sonda Aquadam, boyas de ficocianinas en al menos dos puntos críticos y seguimiento mediante teledetección.
- **Flujos de entrada al embalse y al humedal controlado** (o río Val aguas abajo del vertido de la EDAR de Ágrede-Ólvega), utilizando **sensores de datos**.
- Caudal y concentración de nitratos en continuo (sensor óptico) en el **manantial de los Ojillos de Ágrede** para detectar los pulsos de contaminación ganadera.
- Caudal del manantial de Vozmediano y de la derivación a la piscifactoría, mediante sensores de presión o altímetros y curva de gasto.

Las **actividades de monitorización** recomendadas se consideran **imprescindibles** para aplicar una **estrategia de gestión adaptativa**, y se podrían ejecutar con un coste moderado, gracias a los trabajos ya realizados y a los avances y desarrollos conseguidos en el presente Estudio.

9. REFERENCIAS

- Boutton, T.W., Wong, W.W., Hachey, D.L., Lee, L.S., Cabrera, M.P., Klein, P.D., 1983. Comparison of quartz and Pyrex tubes for combustion of organic samples for stable carbon isotope analysis. *Anal. Chem.* 55, 1832–1833. <https://doi.org/10.1021/ac00261a049>
- Choi, D.-J., Park, H., 2001. A hybrid artificial neural network as a software sensor for optimal control of a wastewater treatment process. *Water Res.* 35, 3959–3967. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00134-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00134-8)
- Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E., Moore, G.R., 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Anal. Chem.* 54, 993–995. <https://doi.org/10.1021/ac00243a035>
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2017). Estado trófico del embalse de El Val y programa de medidas. 71 pág. <http://www.chebro.es>
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2018). Estudios complementarios modelización embalse de El val (Zaragoza). 52 pág. <http://www.chebro.es>
- Corrales, N. 2014. *Propuesta para la producción de trucha ecológica (Oncorhynchus mykiss) en "Alevines del Moncayo"*. Trabajo de fin de máster del Máster Interuniversitario en Acuicultura 2013-2014. Universitat de Valencia y Universitat Politècnica de Valencia.
- Fry, B., Saupe, S., Hullah, M., Peterson, B.J., 1993. Platinum-catalyzed combustion of DOC in sealed tubes for stable isotopic analysis. *Mar. Chem.* 41, 187–193. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4203\(93\)90118-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-4203(93)90118-8)
- Haimi, H., Mulas, M., Corona, F., Vahala, R., 2013. Data-derived soft-sensors for biological wastewater treatment plants: An overview. *Environ. Model. Softw.* 47, 88–107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.009>
- Hipsey, M.R., Bruce, L.C. & Hamilton, D.P., 2013. *Aquatic EcoDynamics (AED) model library: science manual*. AED Report. The University of Western Australia, 34 pp.
- Hipsey, M.R., Bruce, L.C., Boon, C., Busch, B., Carey, C.C., Hamilton, D.P., Hanson, P.C., Read, J.S., de Sousa, E., Weber, M. & Winslow, L.A., 2019. A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geoscientific Model Development*, 12:473-523.
- Hoyer, A. B., Wittmann, M. E., Chandra, S., Schladow, S. G., & Rueda, F. J. (2014). A 3D Individual-Based Aquatic Transport Model for the Assessment of the Potential Dispersal of Planktonic Larvae of an Invasive Bivalve. *Journal of Environmental Management*, 145, 330–340. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.011>
- Hoyer, A. B., Schladow, S. G., & Rueda, F. J. (2015). Local dispersion of nonmotile invasive bivalve species by wind-driven lake currents. *Limnology and Oceanography*, 60(2), 446–462. <https://doi.org/10.1002/lno.10046>
- Kendall, C. (1998). Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. In *Isotope tracers in catchment hydrology* (pp. 519-576). Elsevier.
- Kendall, C., Elliott, E.M., Wankel, S.D., 2008. Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems, in: Michener, R., Lajtha, K. (Eds.), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Wiley Blackwell Publishing, pp. 375–450.
- Lawrence, G. A., Ashley, K. I., Yonemitsu, N., & Ellis, J. R. (1995). Natural dispersion in a small lake.

- Limnology and Oceanography, 40(8), 1519–1526. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1519>
- Llebot, C., Rueda, F. J., Solé, J., Artigas, M. L., & Estrada, M. (2014). Hydrodynamic States in a Wind-Driven Microtidal Estuary (Alfacs Bay). *Journal of Sea Research*, 85, 263–276. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2013.05.010>
- McIlvin, M.R., Altabet, M.A., 2005. Chemical Conversion of Nitrate and Nitrite to Nitrous Oxide for Nitrogen and Oxygen Isotopic Analysis in Freshwater and Seawater. *Anal. Chem.* 77, 5589–5595. <https://doi.org/10.1021/ac050528s>
- Nestler, A., Berglund, M., Accoe, F., Duta, S., Xue, D., Boeckx, P., Taylor, P., 2011. Isotopes for improved management of nitrate pollution in aqueous resources: review of surface water field studies. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 18, 519–533. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0422-z>
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2011. *Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation* version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Pellerin, B.A., Downing, B.D., Kendall, C., Dahkgren, R.A., Kraus, T.E.C., Saraceno, J., Spencer, R.G.M., Bergamaschi, B.A., 2009. Assessing the sources and magnitude of diurnal nitrate variability in the San Joaquin River (California) with an in situ optical nitrate sensor and dual nitrate isotopes. *Freshw. Biol.* 54, 376–387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02111.x>
- Peeters, F., & Hofmann, H. (2015). Length-scale dependence of horizontal dispersion in the surface water of lakes. *Limnology and Oceanography*, 60(6), 1917–1934. <https://doi.org/10.1002/lno.10141>
- Priet-Mahéo, M. C., Ramón, C. L., Rueda, F. J., & Andradóttir, H. Ó. (2019). Mixing and internal dynamics of a medium-size and deep lake near the Arctic Circle. *Limnology and Oceanography*, 64(1), 61–80. <https://doi.org/10.1002/lno.11019>
- Ramón, C. L., Armengol, J., Dolz, J., Prats, J., & Rueda, F. J. (2014). Mixing Dynamics at the Confluence of Two Large Rivers Undergoing Weak Density Variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(4), 2386–2402. <https://doi.org/10.1002/2013JC009488>
- Ramón, C. L., Priet-Mahéo, M. C., Rueda, F. J., & Andradóttir, H. (2020). Inflow Dynamics in Weakly Stratified Lakes Subject to Large Isopycnal Displacements. *Water Resources Research*, 56(8), e2019WR026578. <https://doi.org/10.1029/2019WR026578>
- Rueda, F. J., & MacIntyre, S. (2009). Flow paths and spatial heterogeneity of stream inflows in a small multibasin lake. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2041–2057. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2041>
- Rueda, F. J., & Schladow, G. (2009). Mixing and stratification in lakes of varying horizontal length scales: Scaling arguments and energy partitioning. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2003–2017. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2003>
- Rueda, F. J., & Schladow, S. G. (2003). Dynamics of Large Polymictic Lake. II: Numerical Simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 92–101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:2\(92\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(92))
- Rueda, F. J., & Smith, P. E. (2009). Analytical Solutions For Mathematical Verification. In S. S. Y. Wang, P. J. Roache, R. A. Schmalz, Y. Jia, & P. E. Smith (Eds.), *Analytical Solutions for Mathematical Verification* (pp. 45–119). ASCE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784409572>
- Rueda, F. J., Schladow, S. G., & Clark, J. F. (2008). Mechanisms of contaminant transport in a multi-basin lake. *Ecological Applications*, 18(sp8), A72–A88. <https://doi.org/10.1890/06-1617.1>
- Salata, G.G., Roelke, L.A., Cifuentes, L.A., 2000. A rapid and precise method for measuring stable carbon isotope ratios of dissolved inorganic carbon. *Mar. Chem.* 69, 153–161. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(99\)00102-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4203(99)00102-4)
- Seewald, J.S., Seyfried, W.E., Shanks, W.C., 1994. Variations in the chemical and stable isotope



- composition of carbon and sulfur species during organic-rich sediment alteration: An experimental and theoretical study of hydrothermal activity at guaymas basin, gulf of california. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 5065–5082. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90232-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90232-1)
- Smirnoff, A., Savard, M.M., Vet, R., Simard, M.-C., 2012. Nitrogen and triple oxygen isotopes in near-road air samples using chemical conversion and thermal decomposition. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 26, 2791–2804. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/rcm.6406>
- Smith, P. (2006). A Semi-Implicit, Three-Dimensional Model of Estuarine Circulation. Open File Report 2006-1004, USGS, Sacramento, USA.
- St-Jean, G., 2003. Automated quantitative and isotopic (¹³C) analysis of dissolved inorganic carbon and dissolved organic carbon in continuous-flow using a total organic carbon analyser. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 17, 419–428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/rcm.926>
- Uribe, N. 2010. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 47 pp. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Vollenweider, R.A. and J.J. Kerekes. 1980. *Synthesis Report: Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control)*. Rep. Technical Bureau, Water Management Sector Group, Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris.