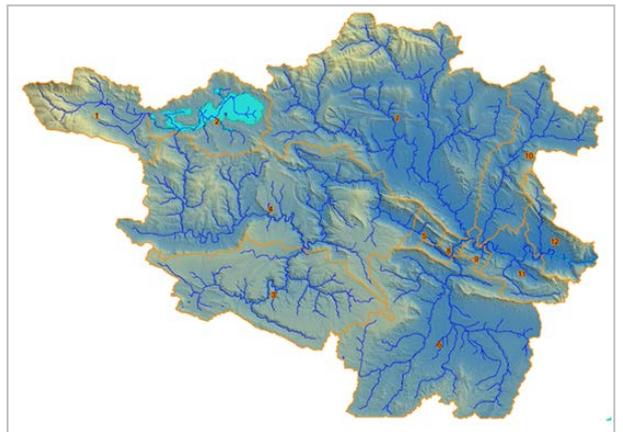
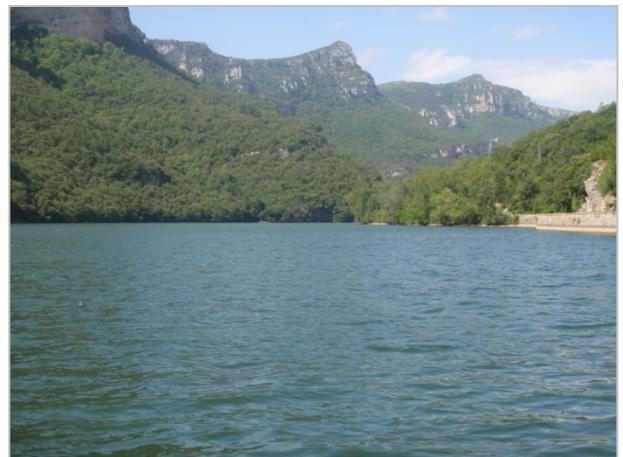


## **ESTADO TRÓFICO DEL EMBALSE DE SOBRÓN Y PROGRAMA DE MEDIDAS**





## ESTADO TRÓFICO DEL EMBALSE DE SOBRÓN Y PROGRAMA DE MEDIDAS

**PROMOTOR:**

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO



**SERVICIO:**

CONTROL DEL ESTADO ECOLÓGICO

**DIRECCIÓN DEL PROYECTO:**

Vicente Sancho-Tello Valls

Susana Cortés Corbasí

M<sup>a</sup> José Rodríguez Pérez

**EMPRESA CONSULTORA:**

Ecohydros SL.



**EQUIPO DE TRABAJO:**

Agustín Monteoliva, José Augusto Monteoliva, Alberto Criado, Tamara Santiago.

**PRESUPUESTO DE LA ADJUDICACIÓN:**

20.878,55 Euros

**CONTENIDO:**

MEMORIA/CD

**AÑO DE EJECUCIÓN:**

2016

**FECHA ENTREGA:**

DICIEMBRE 2016

REFERENCIA IMÁGENES PORTADA:

Superior izquierda: presa de Sobrón

Superior derecha: vista general del embalse de Sobrón

Inferior izquierda: vista general del embalse de Sobrón

Inferior derecha: mapa de la cuenca de drenaje del embalse de Sobrón con red hidrográfica y subcuencas de análisis

CITA DEL DOCUMENTO: Confederación Hidrográfica del Ebro (2016). Estado trófico del embalse de Sobrón y programa de medidas. 62 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.

## ESTADO TRÓFICO DEL EMBALSE DE SOBRÓN Y PROGRAMA DE MEDIDAS

---

*El embalse de Sobrón está catalogado como “zona sensible” de acuerdo a los criterios establecidos en el anexo II del Real Decreto 509/96, de 15 de marzo. Esto implica la adopción de medidas especiales para reducir la aportación de nutrientes en el área de captación y también un seguimiento específico de la calidad de sus aguas.*

*El presente Estudio, realizado en la cuenca hidrográfica del embalse de Sobrón, ha permitido alcanzar estimaciones de las aportaciones de fósforo al embalse y de su procedencia, mediante la aplicación de procedimientos semi-empíricos de modelado a los datos disponibles. Estas estimaciones sirven al propósito de planificar la gestión futura del embalse como zona sensible.*

*Las estimaciones realizadas reflejan un exceso en la carga de fósforo, que en su mayor parte procede de las actividades ganaderas, aunque durante el verano predominaría la carga procedente de las aguas residuales. La subcuenca correspondiente al embalse del Ebro genera la mayor parte de la carga de fósforo que recibe el embalse de Sobrón.*

*Se ha comprobado que es posible reducir el actual estado trófico del embalse (mesotrofia con tendencia a la eutrofia) actuando en su cuenca, especialmente en la del embalse del Ebro. Esta reducción, y mejora asociada de la calidad del agua, se centraría en la carga de fósforo que recibe el embalse, y tendría un carácter cuantitativo, es decir, no implicaría tanto un cambio de clase de estado trófico, como una estabilización en el rango de la mesotrofia.*

*Con este fin, se facilita una serie de indicaciones y recomendaciones que incluye la obtención de datos necesarios para la calibración de las herramientas de modelado adecuadas para optimizar las actuaciones que formarían parte del Programa de Medidas. Entre las actuaciones que se barajan, se incluyen no sólo el tratamiento terciario de las aguas residuales, sino también la definición de un plan de mejora del manejo del ganado y sus residuos, así como del manejo hidráulico y pesquero en el propio embalse del Ebro.*

*La estrategia planteada tendría a su vez el efecto beneficioso añadido de mejorar el estado trófico del embalse del Ebro, que es también zona sensible, así como del tramo de río Ebro entre ambos embalses. Tendría además un carácter demostrativo y piloto de gran relevancia para la gestión de otras zonas sensibles de la Demarcación del Ebro.*

## TROPHIC STATE AND PROGRAMME OF MEASURES IN THE SOBRÓN RESERVOIR

---

*The Sobrón reservoir is classified as an "eutrophication sensitive area" according to the criteria established in Annex II of Royal Decree 509/96, dated March 15, in application of the Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment. This means the adoption of special measures to reduce the contribution of nutrients exported from the catchment area, and also the implementation of a specific monitoring program of the quality of its waters.*

*This study, carried out in the basin of the Sobrón reservoir, has allowed the estimation of the contribution of phosphorus to the reservoir and its origin through the application of semi-empirical modeling procedures with the available data. These estimates serve the purpose of planning the future management of the reservoir as a sensitive area.*

*The achieved estimates reflect an excess in the phosphorus load, most of which comes from livestock activities, although during the summer the wastewater load would predominate. The sub-basin of the Ebro reservoir generates most of the phosphorus load received by the Sobrón reservoir.*

*It has been shown that it is possible to reduce the current trophic status of the reservoir (mesotrophy with a tendency to eutrophy) by acting in its basin, especially in the Ebro reservoir. This reduction, and the associated improvement in water quality, would focus on the reservoir exogenous phosphorus load, and would have a quantitative character, that is to say, it would not imply so much a change of class of trophic state, as a stabilization in the range of the mesotrophy.*

*In order to achieve this goal, a series of indications and recommendations are provided, which includes the generation of the required data needed for the calibration of the appropriate modeling tools, in order to optimize the actions that would form part of the Measures Programme. The considered actions not only include the tertiary treatment of wastewater, but also the definition of a plan to improve livestock and waste management, as well as hydraulic and fishing management in the Ebro reservoir itself.*

*The proposed strategy would also have the added beneficial effect of improving the trophic status of the Ebro reservoir, which is also a sensitive area, as well as the Ebro river segment between both reservoirs. It would also have a demonstrative and pilot nature of great relevance for the management of other sensitive areas in the Ebro Hydrographic Demarcation.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. ÁMBITO DE ESTUDIO .....</b>	<b>12</b>
<b>3. ESTADO TRÓFICO Y POTENCIAL ECOLÓGICO .....</b>	<b>15</b>
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
4.1. <i>GENERACIÓN CARTOGRÁFICA DE LA CUENCA Y RED HIDROGRÁFICA .....</i>	<i>20</i>
4.2. <i>MODELADO HIDROLÓGICO Y DE APORTACIONES DIFUSAS DE FÓSFORO.....</i>	<i>24</i>
4.2.1. <i>Mapa usos del suelo y asignación a grupos hidrológicos .....</i>	<i>26</i>
4.2.2. <i>Parametrización y ajustes del modelo.....</i>	<i>30</i>
4.2.3. <i>Datos de contorno del modelo.....</i>	<i>30</i>
4.2.4. <i>Estimación de la concentración esperada en el embalse .....</i>	<i>34</i>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
5.1. <i>BALANCE HÍDRICO.....</i>	<i>36</i>
5.2. <i>APORTACIONES DE FÓSFORO .....</i>	<i>39</i>
5.3. <i>CONCENTRACIÓN ESTIMADA EN EL EMBALSE BAJO DIFERENTES ESCENARIOS .....</i>	<i>45</i>
5.3.1. <i>Manejo pesquero .....</i>	<i>48</i>
5.3.2. <i>Explotación hidráulica.....</i>	<i>50</i>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>53</b>
<b>7. RECOMENDACIONES Y PROGRAMA DE MEDIDAS.....</b>	<b>55</b>
7.1. <i>OBJETIVOS .....</i>	<i>55</i>
7.2. <i>DATOS Y HERRAMIENTAS NECESARIAS .....</i>	<i>56</i>
7.3. <i>PROGRAMA DE MEDIDAS .....</i>	<i>57</i>
7.3.1. <i>Manejo de la carga ganadera.....</i>	<i>57</i>
7.3.2. <i>Manejo hidráulico del embalse .....</i>	<i>58</i>
7.3.3. <i>Manejo pesquero .....</i>	<i>58</i>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación del potencial ecológico del embalse de Sobrón entre 2.003 y 2.015.....	15
<b>Tabla 2.</b> Número y características de los diferentes tipos ganaderos presentes en la cuenca.....	32
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones de nutrientes por tipos de vertido a partir de las analíticas disponibles .....	34
<b>Tabla 4.</b> Precipitación y aportación hídrica anual en la cuenca del embalse de Sobrón, a partir de la simulación hidrológica del Estudio .....	36
<b>Tabla 5.</b> Estadísticas principales de las aportaciones mensuales de fósforo (kg) al embalse de Sobrón, estimadas mediante simulación (la suma se refiere a todo el periodo estudiado) para la cuenca total del embalse, agregando subcuencas.....	39
<b>Tabla 6.</b> Tiempo de residencia hidráulica (TRH, en años) en el lago para la serie estudiada, y valores corregidos de concentración de fósforo total [P] estimada en el lago (en $\mu\text{g}_P/\text{l}$ ), a partir de la aportación anual de fósforo o L(P), expresada en $\text{mg}/\text{m}^2$ y obtenida por simulación.....	46

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Situación del embalse y cuenca de Sobrón en la Demarcación Hidrográfica del Ebro, y áreas de captación de las zonas sensibles de los embalses del Ebro y Sobrón.....	12
<b>Figura 2.</b> Ficha técnica de la presa de Sobrón (sig.mapama.es).....	13
<b>Figura 3.</b> Evolución interanual de la concentración media de fósforo total en el embalse de Sobrón. Las líneas horizontales indican el umbral de la OCDE que separa la mesotrofia de la eutrofia (rojo) y de la oligotrofia (verde). La línea discontinua indica el umbral objetivo de $24 \mu\text{g}/\text{l}$ (ver más adelante) .....	16
<b>Figura 4.</b> Evolución interanual del valor del índice TSI, calculado a partir de la concentración media de fósforo total. La línea horizontal roja señala el límite entre mesotrofia y eutrofia y la verde entre oligotrofia y mesotrofia.....	17
<b>Figura 5.</b> Detalles de las subcuencas de análisis aplicadas en el Estudio .....	19
<b>Figura 6.</b> Resultado del proceso de representación adaptada del MDT y remoción de depresiones del terreno .....	20
<b>Figura 7.</b> Resultado del proceso de análisis de la dirección de flujo.....	21
<b>Figura 8.</b> Mapa raster de pendiente del terreno generado en el análisis .....	22
<b>Figura 9.</b> Mapa raster del área de contribución específica de cada celda .....	22

<b>Figura 10.</b> Subcuencas de drenaje y red sintética de ríos obtenida para la simulación hidrológica en la cuenca del embalse de Sobrón .....	23
<b>Figura 11.</b> Esquema de los procesos implicados en el balance hídrico del modelo GWLF .....	25
<b>Figura 12.</b> Tipos hidrológicos de suelo (superior), y clasificación según valores del factor “K” (inferior) ...	28
<b>Figura 13.</b> Mapa de usos del suelo utilizado en el ESTUDIO .....	29
<b>Figura 14.</b> Ubicación de las explotaciones ganaderas censadas en las subcuencas de análisis .....	31
<b>Figura 15.</b> Ubicación de los puntos de vertido censados en las subcuencas de análisis.....	33
<b>Figura 16.</b> Valores mensuales medios de las variables hidrológicas en el periodo estudiado .....	37
<b>Figura 17.</b> Ajuste de la mejor ronda de simulación en la subcuenca 3, seleccionada entre las numerosas calibraciones realizadas .....	38
<b>Figura 18.</b> Aportaciones mensuales estimadas de fósforo total (kg) al embalse de Sobrón en el periodo de 2008 a 2015, diferenciando entre los diferentes tipos de fuentes generadoras .....	40
<b>Figura 19.</b> Aportaciones anuales estimadas de fósforo total (kg) al embalse de Sobrón y precipitación anual en la cuenca, en el periodo de 2008 a 2015 (promedio de la serie en color granate) .....	41
<b>Figura 20.</b> Porcentaje de la aportación al total de cada fuente generadora de fósforo. En el gráfico superior (18a) se calcula sobre el promedio de la serie de años estudiada, en el intermedio (18b) en el año en el que la carga estimada de fósforo es máxima, y en el inferior (18c) en el año más seco y de menor aportación de fósforo.....	42
<b>Figura 21.</b> Aportación específica de fósforo (kg/ha/año) de cada una de las sub-cuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados) .....	43
<b>Figura 22.</b> Aportación anual de fósforo (kg/año) de cada una de las sub-cuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados).....	44
<b>Figura 23.</b> Importancia relativa de las distintas fuentes en la aportación anual de fósforo de cada una de las sub-cuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados).....	45
<b>Figura 24.</b> Estimación de la concentración media anual de PT en el embalse de Sobrón como consecuencia de los diferentes escenarios de actuación comentados .....	47
<b>Figura 25.</b> Diagrama que muestra las relaciones entre variables en el modelo de excreción de la carpa planteado .....	49
<b>Figura 26.</b> Situación de las diferentes tomas disponibles en el embalse del Ebro para la suelta de agua al río Ebro (imagen superior), y esquemas de alzados de la presa a nivel de las tomas de la C.H. (inferior izquierda) e intermedia (inferior derecha) .....	51



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

El presente documento constituye el informe final del Contrato de Servicios para realizar el estudio del “ESTADO TRÓFICO DEL EMBALSE DE SOBRÓN Y PROGRAMA DE MEDIDAS”, adjudicado a Ecohydros, S. L. por la Confederación Hidrográfica del Ebro (en adelante, CHE).

Las zonas sensibles derivan de la aplicación de la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (modificada por la Directiva 98/15/CE), por riesgo de eutrofización por nutrientes.

La Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias, incluyó el embalse de Sobrón como “zona sensible”, de acuerdo a los criterios establecidos en el anexo II del Real Decreto 509/96, de 15 de marzo. Esto implica la adopción de medidas especiales para reducir la aportación de nutrientes en el área de captación y también un seguimiento específico de la calidad de sus aguas.

En general, en las zonas sensibles conviene incidir en la reducción de la aportación de fósforo, a no ser que se demuestre que dicha reducción no tendrá consecuencias significativas sobre el nivel de eutrofización; también la eliminación de nitrógeno en determinados casos puede ser relevante.

Para determinar esa conveniencia se requiere la realización de estudios específicos, que según el caso pueden requerir estimaciones semiempíricas o, cuando estos fueran insuficientes, la aplicación de modelos dinámicos de mayor resolución espacial y temática, especialmente si se concluyera que se debe afrontar el diseño de medidas correctoras.

El presente estudio tiene como objetivo general determinar las causas concretas por las que el embalse de Sobrón tiene un estado de mesotrofia y en qué medida intervienen los factores naturales y las diferentes presiones en la tendencia que presenta a la eutrofización.

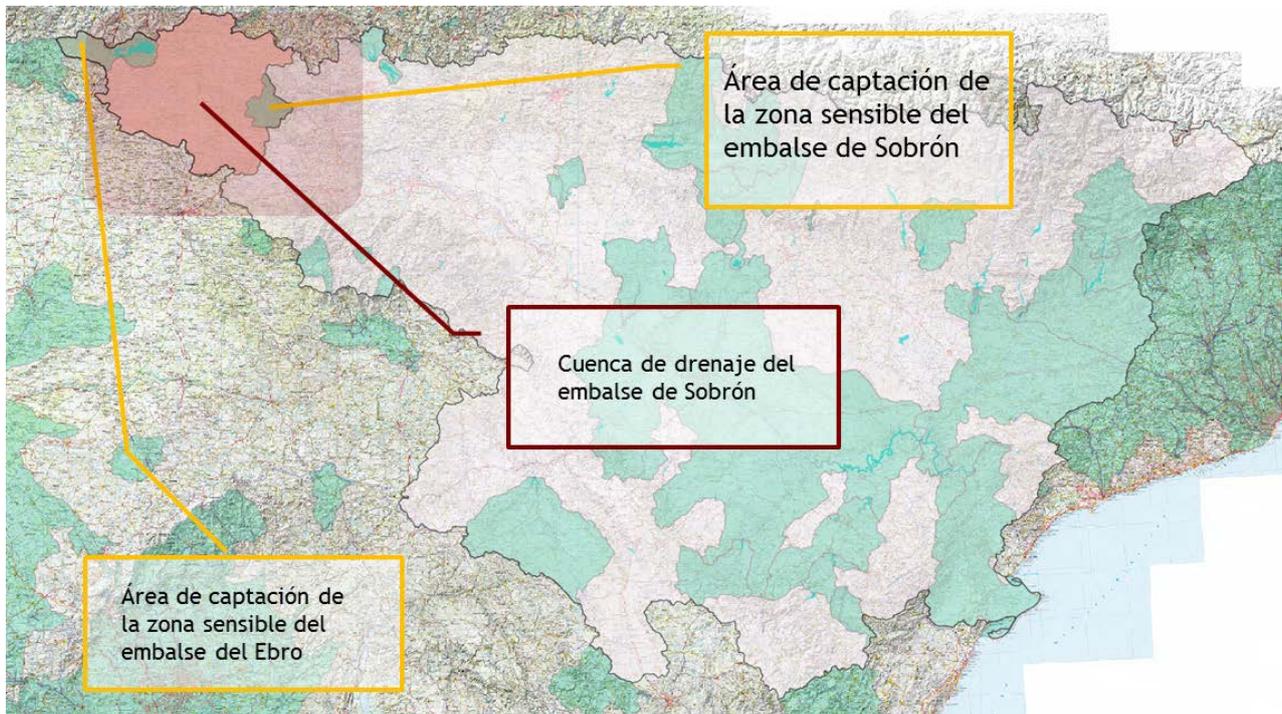
Se pretende averiguar si existe un margen de actuación para revertir esa tendencia, lo que podría conllevar la realización de estudios de mayor alcance dirigidos a diseñar y optimizar

medidas correctoras, o si por el contrario se puede plantear la exclusión del embalse de la lista de zonas sensibles.

Este informe recoge la descripción de los métodos aplicados, así como los resultados obtenidos, conclusiones y una serie de recomendaciones de gestión y programa de medidas.

## 2. ÁMBITO DE ESTUDIO

La presa y embalse de Sobrón se ubican en el río Ebro, y su funcionamiento se inició en el año 1961. La presa se localiza en los términos municipales de Lantarón (Álava) y Bozoo (Burgos), a una altitud de 511 msnm.



**Figura 1.** Situación del embalse y cuenca de Sobrón en la Demarcación Hidrográfica del Ebro, y áreas de captación de las zonas sensibles de los embalses del Ebro y Sobrón

El río Ebro, aguas abajo del embalse homónimo, recorre un tramo en dirección sur y en un nuevo giro hacia el norte recibe las aguas del río Rudrón, por su margen derecha. Ya en su entrada al sinclinorio de Villarcallo-Tobalina es represado en el embalse de Cereceda, tras el cual, recibe la afluencia del río Hómino, por su margen derecha, y escasos kilómetros más abajo las del Nela, esta vez por su margen izquierda y previo a su entrada en el embalse de Cillaperlata. Antes de su retenida en Sobrón, recibe todavía las aportaciones del río Jerea o

Losa, por su margen izquierda. En total, el río Ebro habrá discurrido unos 200 km desde su nacimiento hasta la presa de Sobrón.



GOBIERNO DE ESPAÑA  
MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE





**Ficha técnica de la presa: SOBRON**

MIRTES, 14 FEBRERO 2017

**1. DATOS ADMINISTRATIVOS**

Nombre de la presa: SOBROON

Otro Nombre: —

Fase vida presa: Explotación

Titular de la presa: IBERDROLA GENERACION S.A

Proyectista: P. MARTINEZ ARTOLA

Categoría en función del riesgo potencial: A

Aprobación de las normas de explotación: —

Aprobación del plan de emergencia: —

Fecha de finalización de las obras: 01-05-1961

**2. DATOS GEOGRÁFICOS**



Río en el que se encuentra la presa: EBRO

Municipio: LANTARON (ALAIN) Y BOZCOO (BURGOS)

Cuenca hidrográfica: EBRO

Provincia: BURGOS

Coordenadas UTM 30 - ED 50: 491914 - 4735189

**3. USOS DEL EMBALSE**

Usuarios: IBERDROLA —, —

Tipos: Hidroeléctrico, —, —

**4. DATOS HIDROLÓGICOS**

Superficie de la cuenca hidrográfica (km<sup>2</sup>): 4.774,000

Aportación media anual (hm<sup>3</sup>): 1.467,000

Precipitación media anual (mm): 700,000

Caudal punta avenida de proyecto (m<sup>3</sup>/s): 1.583,600

**5. DATOS DEL EMBALSE**

Superficie del embalse a NMN (ha): 280,000

Capacidad a NMN (hm<sup>3</sup>): 20,000

Cota del NMN (m): 511,000

**6. DATOS DE LA PRESA**

Tipo de presa: Gravedad

Cota coronación (m): 513

Altura desde cimientos (m): 39,300

Longitud de coronación (m): 204

Cota cimentación (m): 471,000

Cota del cauce en la presa (m): 475,800

Volumen del cuerpo presa (1000 m<sup>3</sup>): 77,000

**7. DATOS DEL ALIVADERO**

Número total de aliviaderos en la presa: 1

Regulación: Compuerta segmento.

Capacidad (m<sup>3</sup>/s): 1.630,000

**8. DATOS DEL DESAGÜE**

Número total de desagües en la presa: 1

Capacidad (m<sup>3</sup>/s): 45,700

**9. FOTOGRAFÍAS**



Figura 2. Ficha técnica de la presa de Sobrón (sig.mapama.es)

El embalse se tipifica en la clase 9, según la clasificación de embalses incluida en la orden ARM/2656/2008, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica. Esta clase se refiere a los embalses monomíticos de cuencas calizas, con alcalinidad superior a 1 meq/l, situados en la zona húmeda ( $IH > 0,75$ ) y en la red fluvial principal (área de cuenca  $> 1.000 \text{ km}^2$ ).

Aguas abajo del embalse del Ebro, que no es objeto de estudio detallado en este trabajo, la cuenca se caracteriza por su carácter rural y escarpado, con actividades agrícolas restringidas a las vegas de los ríos, pero en algunas zonas la actividad ganadera adquiere protagonismo.

Los núcleos urbanos más importantes (después de Reinosa, en la cuenca del embalse del Ebro) son Villarcayo y Medina de Pomar, con poblaciones de 4.600 y 6.000 habitantes respectivamente, ambos situados en la cuenca del río Nela. El primero de ellos mantiene una elevada industrialización en torno al sector agroalimentario, pero la actividad económica principal en Medina de Pomar es el comercio. En la cuenca del Nela se encuentra también la población de Espinosa de los Monteros ( $< 2.000$  habitantes).

En el embalse de Sobrón se ubica la Central Nuclear de Santa María de Garoña, cuyos reactores se refrigeran con el agua del embalse y demandaban  $750 \text{ hm}^3/\text{año}$ , aunque cesó su actividad en diciembre de 2012.

### 3. ESTADO TRÓFICO Y POTENCIAL ECOLÓGICO

Se dispone de diferentes estudios y seguimientos de la eutrofización y del potencial ecológico de este embalse, proporcionados por la CHE, y que se extienden desde el año 1.991 hasta la actualidad.

El primero de estos estudios es del año 1.991 (Synconsult, 1991); en ese momento se catalogó el embalse como eutrófico. En el año 1.996 Limnos (CHE, 1996) realizó un informe en el que se volvía a catalogar al embalse como eutrófico. En el año 2.003 hay otro estudio de la CHE (Infraestructura y Ecología, 2.003) en el que se cataloga el embalse como mesotrófico con tendencia a la eutrofia. Entre los años 1.999 y 2.015 (Nuclenor, 1999-2015), URS realizó para Nuclenor una serie de estudios limnológicos del embalse, que suman un total de 17 informes anuales. Por último, se cuenta con los informes de la Red de Control Biológico de la CHE entre los años 2.010 y 2.015 (CHE, 2010-2015). En ambas series de estudios, desde el año 2.007 hasta la actualidad todas las catalogaciones son de mesotrofia.

En cuanto al potencial ecológico, domina el estado “Moderado”, con únicamente dos años (2.009 y 2.010) en los que se clasificó en la clase superior (“Bueno o Máximo”) y otros dos (2.006 y 2.008) como “Deficiente”. El elemento que hace que el estado no alcance el buen estado es el indicador biológico “Fitoplancton”, y también suelen estar por debajo de Bueno los indicadores fisicoquímicos “Transparencia”, “Estado de oxigenación” y “Nutrientes”.

**Tabla 1.** Clasificación del potencial ecológico del embalse de Sobrón entre 2.003 y 2.015

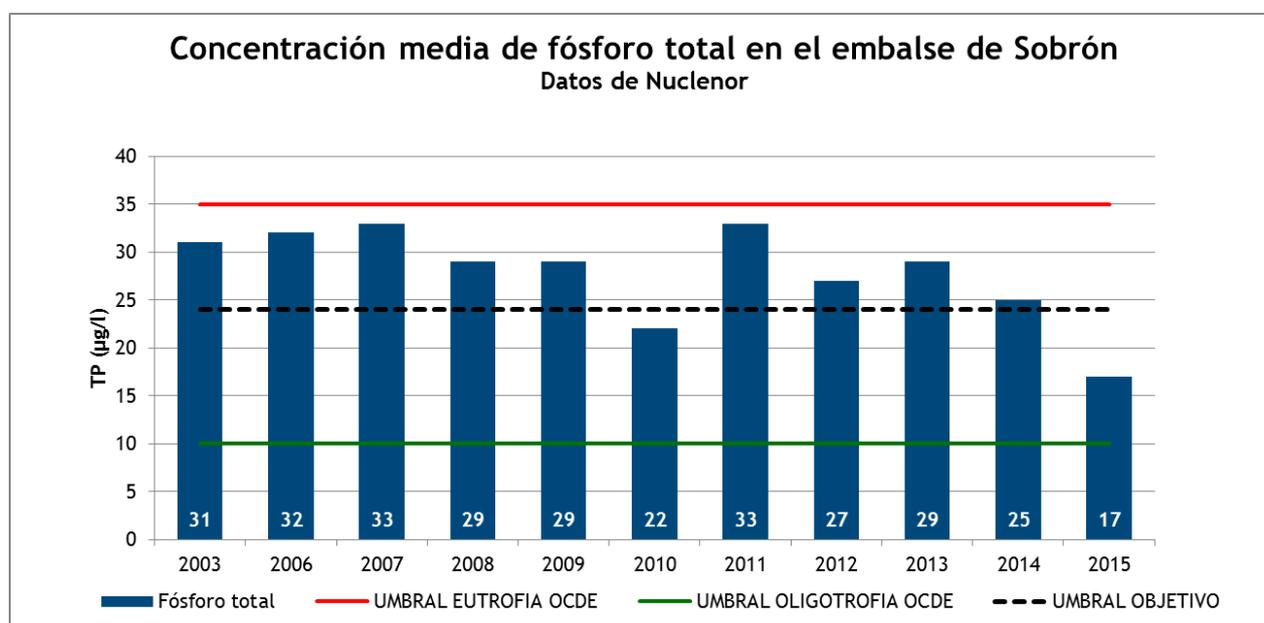
Año	Nuclenor	CHE
2003	Moderado	
2006	Deficiente	
2007	Moderado	
2008	Deficiente	
2009	Bueno o máximo	
2010	Bueno o máximo	Moderado
2011	Moderado	Moderado
2012	Moderado	Moderado
2013	Moderado	Moderado
2014	Moderado	Moderado
2015	Moderado	Moderado

Puesto que los datos proporcionados por Nuclenor relativos al fósforo total representan un promedio ponderado en el embalse a partir de varios muestreos anuales y diferentes estaciones

y profundidades, y además constituyen una serie completa desde el año 2003, son los que se utilizan para trazar la evolución de la concentración de fósforo en el embalse (Figura 3).

Los valores de fósforo total oscilan entre un mínimo de 17 µg/l y un máximo de 33 µg/l. El promedio de esta serie de años es de 28 µg/l, pero no se aprecia una tendencia clara a lo largo de estos años, aunque el valor mínimo se ha obtenido en el último año de la serie.

Si se aplica el procedimiento de clasificación del estado trófico de la OCDE (1982), la concentración media de fósforo está normalmente en el intervalo de la mesotrofia, excepto en los años 2010 y 2015 que se sitúa en la oligotrofia.



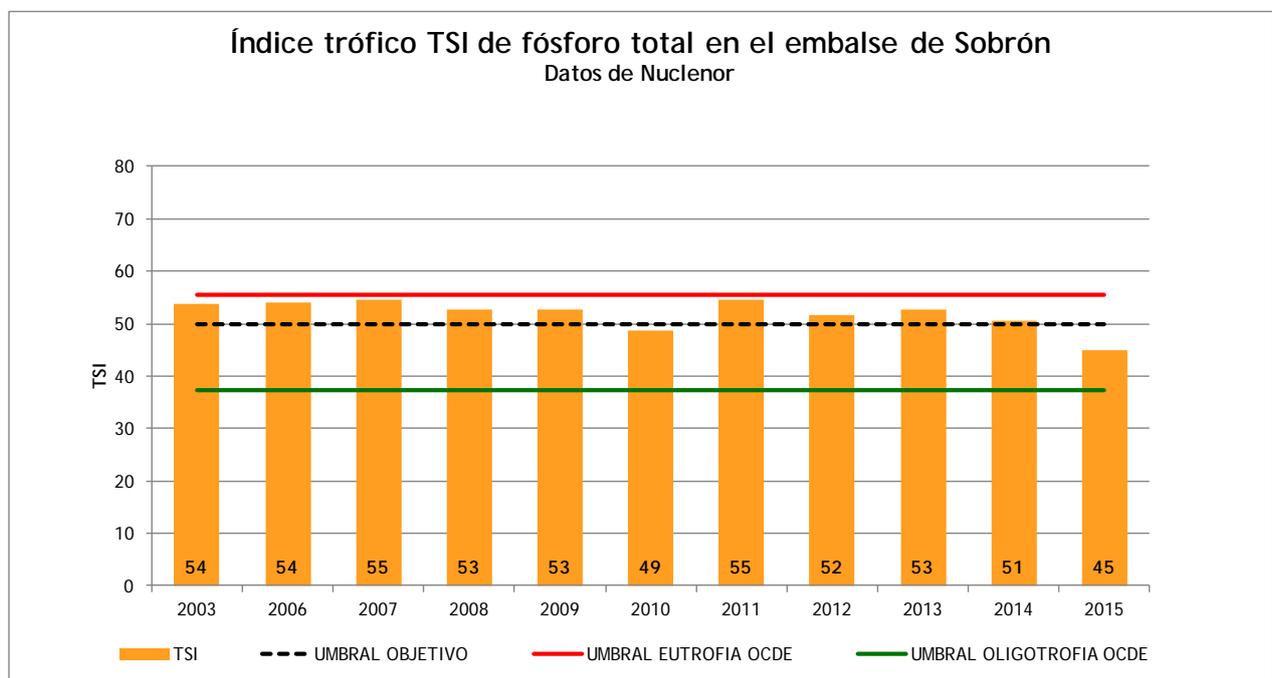
**Figura 3.** Evolución interanual de la concentración media de fósforo total en el embalse de Sobrón. Las líneas horizontales indican el umbral de la OCDE que separa la mesotrofia de la eutrofia (rojo) y de la oligotrofia (verde). La línea discontinua indica el umbral objetivo de 24 µg/l (ver más adelante)

Por otro lado, el índice TSI (Carlson, 1977) es ampliamente utilizado también para establecer el estado trófico en lagos y embalses, y en este caso podría ofrecer un criterio adicional sobre el que plantear un objetivo realista para el embalse. Este índice varía entre 0 y 100 es decir, de oligotrófico a hipereutrófico y en el caso del fósforo total se calcula de la siguiente manera:

$$TSI(TP) = 14,42 \ln[TP] + 4,15$$

donde TP es la concentración media anual de fósforo total en µg/l.

Tal y como se representa en la Figura 4, una concentración de 24 µg/l de fósforo total equivale a un valor del índice TSI de 50 y establece el límite entre mesotrofia y eutrofia según esa escala. Ese valor, entendido como umbral superior o alternativamente como un percentil 90, pero no como promedio interanual, bien podría ser un objetivo razonable a alcanzar en este embalse. Un objetivo mucho más exigente y que se considera poco realista o incluso incompatible con la vocación trófica del embalse, si se tiene en cuenta la situación de este embalse en el eje principal del río Ebro y alejado ya de las fuentes, sería alcanzar los 12 µg/l (TSI = 40), valor que separa en esa escala la oligotrofia de la eutrofia.



**Figura 4.** Evolución interanual del valor del índice TSI, calculado a partir de la concentración media de fósforo total. La línea horizontal roja señala el límite entre mesotrofia y eutrofia y la verde entre oligotrofia y mesotrofia.

Otra de las apreciaciones que se derivan de los datos contenidos en estos informes es que el ratio P/N es lo bastante bajo como para asumir que el fósforo es el macronutriente potencialmente limitante, lo que dota de pleno sentido al hecho de haberse centrado de entrada en la evaluación de este elemento.

## 4. METODOLOGÍA

El objetivo de estimar el peso relativo que las distintas fuentes generadoras de nutrientes tienen en las aportaciones de fósforo al embalse, obliga a considerar la magnitud de la generación y exportación en cada una de las fuentes y también los procesos que influyen en su recorrido hasta el embalse.

Para ello se ha optado por abordar el problema mediante un modelo de cuenca implementado sobre herramientas SIG, que superpone las funciones de carga de nutrientes a la simulación hidrológica. El análisis se ha realizado sobre un total de 12 subcuencas (Figura 5) en las que se ha dividido la cuenca del embalse, a efectos de incrementar la resolución en los análisis y procesos que son espacialmente agregados.

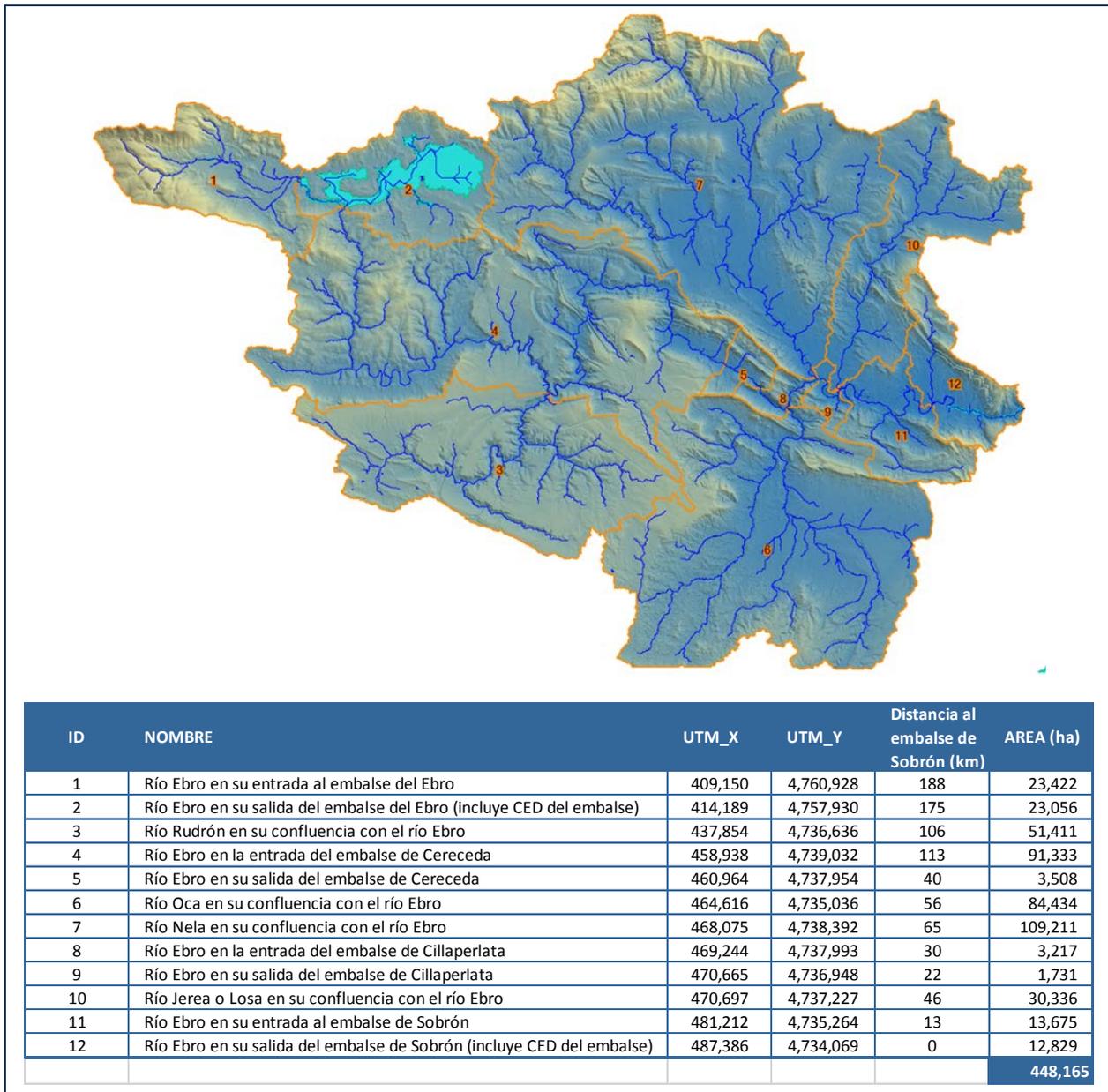
Las dos primeras subcuencas corresponderían al embalse del Ebro, y por su importancia y la complejidad que introduce la dinámica de dicho embalse, merecerían un estudio específico de mayor detalle.

El proceso se ha iniciado con la delimitación de la cuenca y subcuencas, y la generación de la red de drenaje sintética a partir del modelo digital del terreno a escala 1:25.000. Toda la cartografía del proyecto se ha referenciado al sistema ETRS89 y a la zona UTM30 norte.

Para cada una de las 12 subcuencas delimitadas se han realizado las siguientes tareas:

- Creación de tablas georreferenciadas relativas a las estaciones meteorológicas y a las diferentes fuentes exportadoras de nutrientes (vertidos, usos del suelo y ganadería).
- Parametrización de funciones de carga y concentración específica de fósforo según usos y tipos de suelo.
- Computación de la escorrentía superficial y de balances hídricos diarios para la zona no saturada y saturada subsuperficial del suelo.
- Estimación de carga sólida mediante el algoritmo USLE y un coeficiente de reparto.
- Cómputo de exportación de fósforo en fase líquida (fracción disuelta) y sólida (fracción particulada).

- Asignación de unidades ganaderas para cada mes y subcuenca, y parametrización de los patrones de actividad y de su contribución específica de fósforo.
- Estimación de la carga de vertido en aguas residuales urbanas en función de los habitantes fijos y estacionales y del sistema de tratamiento y vertido. Se ha estimado por otro lado utilizando valores de concentración proporcionados por la CHE.
- Cómputo de la pérdida de fósforo en el tránsito hasta la siguiente unidad o subcuenca.



**Figura 5.** Detalles de las subcuencas de análisis aplicadas en el Estudio

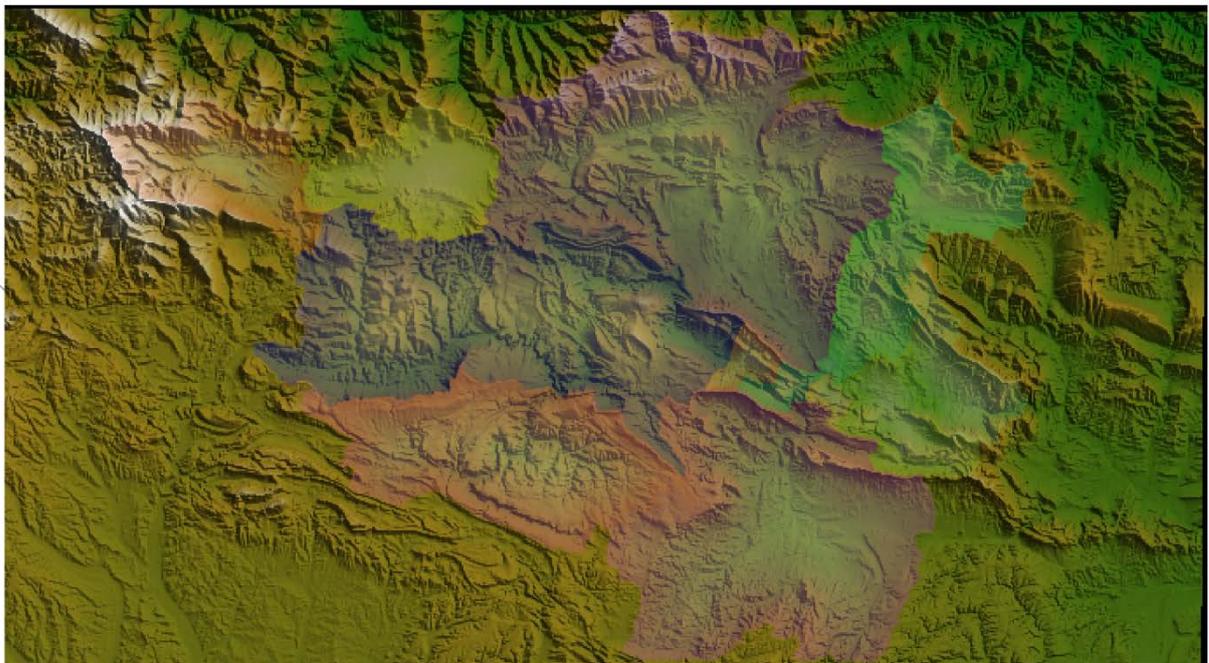
#### 4.1. GENERACIÓN CARTOGRÁFICA DE LA CUENCA Y RED HIDROGRÁFICA

Se ha partido del modelo de elevación digital del terreno (MDT) del SGN con paso de malla de 25 m (© Instituto Geográfico Nacional de España).

Mediante herramientas GIS de análisis del terreno aplicadas a MDTs, se realiza una delimitación de la cuenca, se corrigen las depresiones espurias y se determinan las direcciones de flujo (Tarboton, 1997; 2001).

De forma muy resumida, se describen a continuación los pasos que se han seguido en el proceso, ilustrando el resultado en toda la zona de análisis a escala 1:200.000 (aunque el análisis definitivo se ha realizado a escala 1:25.000), a la que se superponen con transparencia las subcuencas finalmente delimitadas y los embalses:

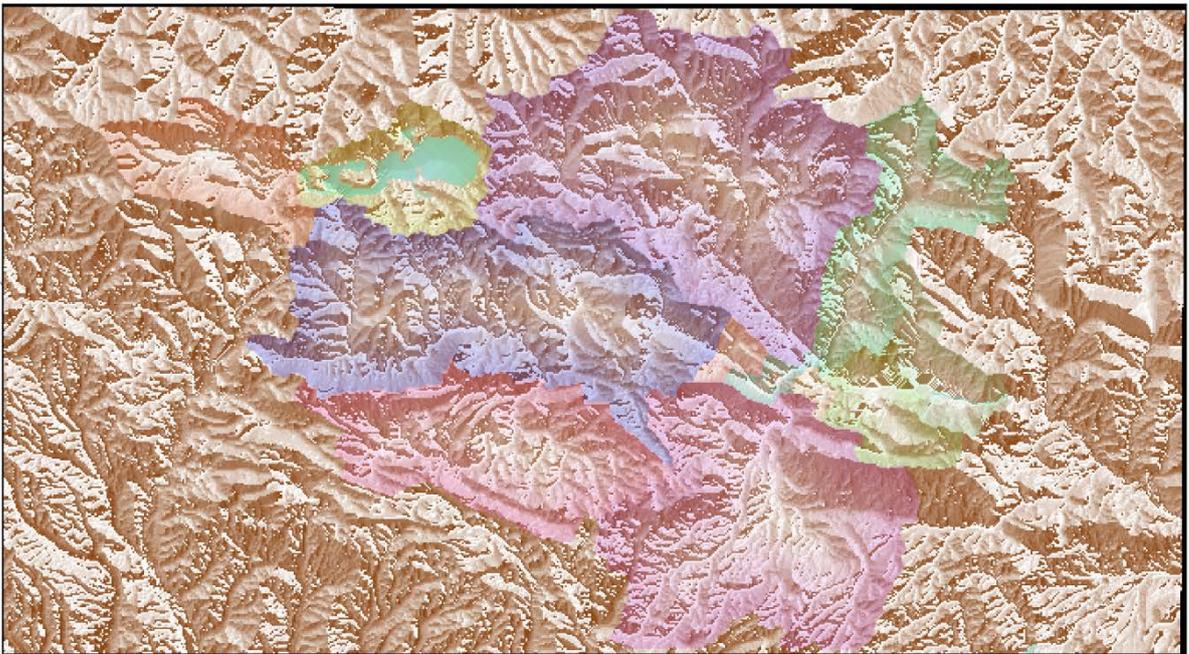
- Desarrollo de un MDT hidrológicamente corregido -Figura 6- (remoción de depresiones inexistentes) utilizando la aproximación del flujo hidrológico (sentido del flujo de una celda a otra o a otras contiguas).



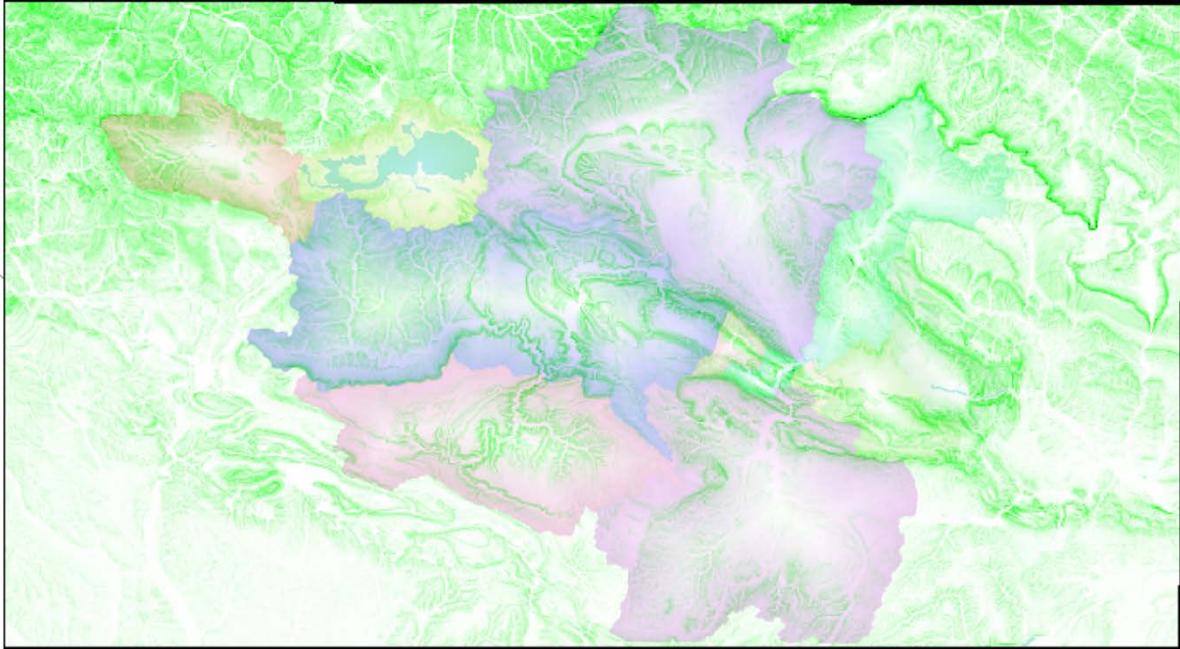
**Figura 6.** Resultado del proceso de representación adaptada del MDT y remoción de depresiones del terreno

- Cálculo de las sendas del flujo (direcciones) y pendientes (Figura 7). Se utiliza el método de flujo *D-infinity* que utiliza la máxima pendiente de las caras triangulares formadas en una celda centrada en un bloque de 9, para calcular la dirección del flujo y la proporción del flujo que va desde cada celda a cada una de las 8 contiguas.

Como subproducto de este proceso se obtiene también un mapa raster de pendientes del terreno (Figura 8) y otros mapas que utiliza el modelo hidrológico y de aportación de nutrientes: jerarquía de cauces (orden relativo de los cauces, según la clasificación de Strahler) y longitud de cauce aguas arriba de cada punto (píxel).

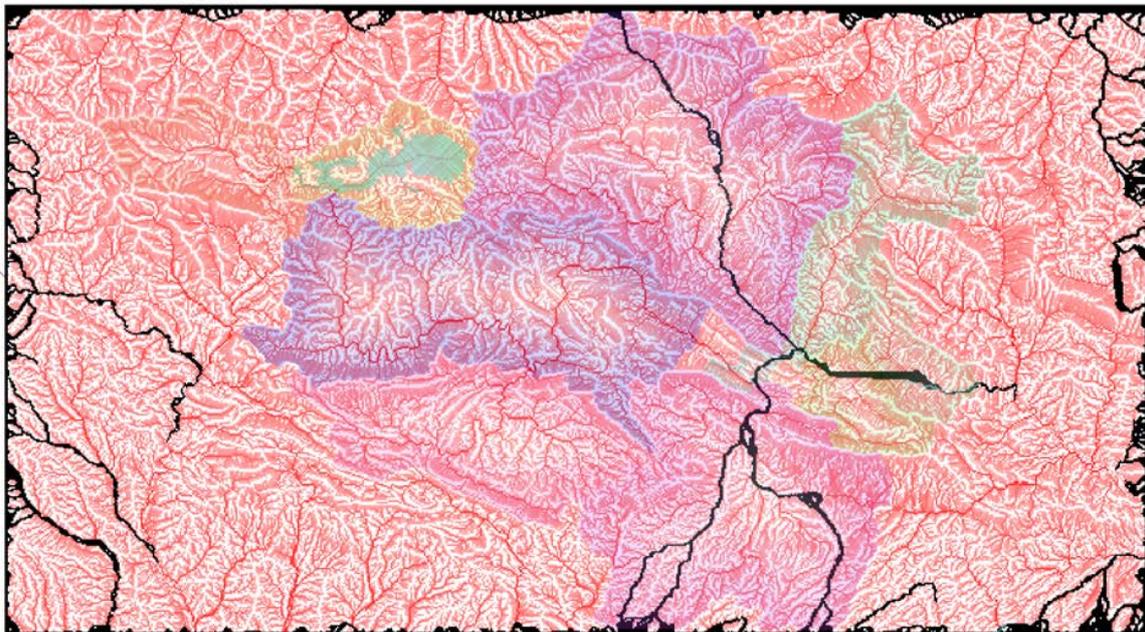


**Figura 7.** Resultado del proceso de análisis de la dirección de flujo



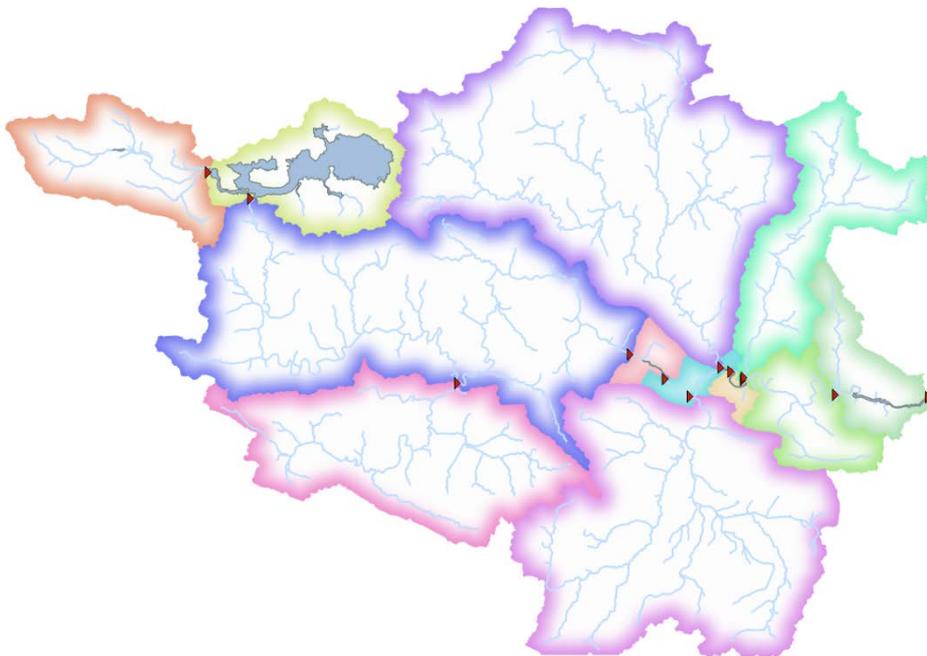
**Figura 8.** Mapa raster de pendiente del terreno generado en el análisis

- Cálculo del área de contribución utilizando diferentes métodos de flujo sencillo y múltiple, codificado como el número de celdas que drenan a cada una de ellas. Este raster se utiliza para definir los cauces.



**Figura 9.** Mapa raster del área de contribución específica de cada celda

- A partir de esta rejilla se obtiene directamente (aplicando un umbral provisional) un raster preliminar de los cauces, sobre el que ya se delimitan las subcuencas de análisis a partir de los 12 puntos reseñados anteriormente (exutorios). Los puntos se mueven a la posición real que les corresponde en la red de cauces.
- Definición de la red de cauces definitiva, mediante la aplicación de métodos basados en la forma topográfica, y sensibles a la densidad de drenaje espacialmente variable. El proceso continúa mediante la determinación de un umbral adecuado usando un método objetivo (“*Drop analysis*”), que se utiliza para obtener el mapa raster de cauces. El resultado es una red de drenaje coherente obtenida de forma objetiva y basada en la geomorfología del terreno.
- El último paso (Figura 10) es la delimitación de cuencas y subcuencas que drenan a cada exutorio definido y la asociación de atributos entre cuencas y segmentos de río, para la configuración de los modelos hidrológicos.



**Figura 10.** Subcuencas de drenaje y red sintética de ríos obtenida para la simulación hidrológica en la cuenca del embalse de Sobrón

## 4.2. MODELADO HIDROLÓGICO Y DE APORTACIONES DIFUSAS DE FÓSFORO

El modelo utilizado es el de Funciones de Carga Generalizadas a la Cuenca (GWLF), que permite estimar las cargas mensuales, disueltas y totales, de fósforo y nitrógeno. Este modelo fue desarrollado por Haith & Shoemaker (1987) y mejorado posteriormente por Haith & al. (1992), permitiendo su uso con resolución diaria cuando se trata de cuencas pequeñas. Posteriormente ha sido revisado en diferentes ocasiones y se han incluido nuevas rutinas utilizadas en otros modelos hidrológicos y de nutrientes (Evans & Corradini, 2012).

Se considera un modelo de cuenca combinado distribuido/agregado. Para la carga superficial es distribuido, en el sentido de que permite diferentes escenarios de tipo, uso y cobertura del suelo, pero cada zona es internamente homogénea en relación a diferentes atributos del modelo. Además, el modelo no distribuye espacialmente las zonas de aportación, sino que agrega las cargas de cada zona en el total de la subcuenca de análisis, es decir, no hay un enrutamiento espacial. En cuanto a la carga sub-superficial de fósforo, el modelo es completamente agregado porque no considera áreas o superficies diferenciadas.

Este modelo simula la escorrentía superficial mediante la ecuación del número de curva del Servicio Americano de Conservación del Suelo (*Soil Conservation Service*, 1986), a partir de datos diarios de precipitación y temperatura, para estimar la precipitación en forma de nieve (Ogrosky & Mockus, 1964).

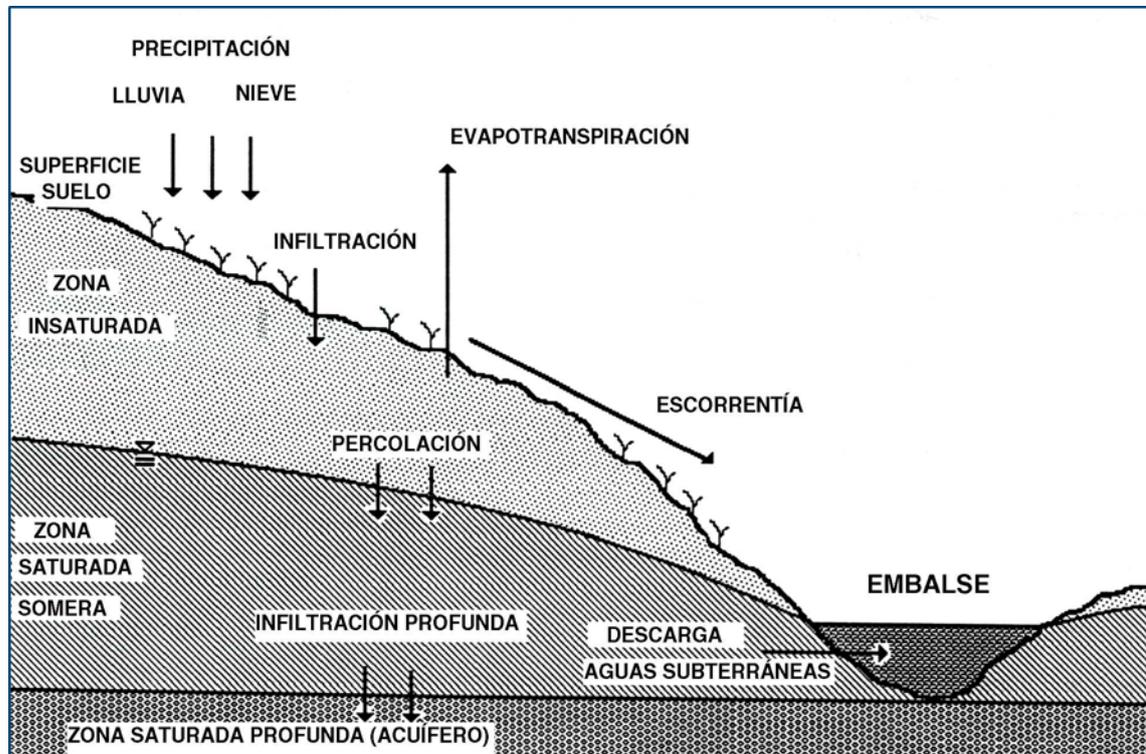
Para cada subcuenca se realiza un balance hídrico diario (Figura 11) a partir de la precipitación, deshielo, estado inicial y capacidad de la zona insaturada y la evapotranspiración.

La evapotranspiración se determina a partir de los datos meteorológicos diarios y un factor de cobertura que depende del tipo de uso/vegetación del terreno.

La infiltración hacia las zonas no saturada y saturada poco profunda iguala el exceso -si lo hubiera-, de la precipitación menos la escorrentía y la evapotranspiración. Cuando el agua de la zona no saturada excede su capacidad de campo -U-, se produce percolación. La zona saturada poco profunda se modela como un embalse subterráneo lineal (Hann, 1972).

Los efluentes de la zona saturada poco profunda son hacia el curso de agua superficial y/o hacia la zona saturada profunda -acuífero-, y se modelan mediante sendos coeficientes de recesión. Para el primero de ellos se usa un valor entre 0,01 y 0,20 en el proceso de calibrado,

mientras que para el segundo se adopta un valor 0,00, es decir, se asume que no hay conexión con un sistema acuífero regional.



**Figura 11.** Esquema de los procesos implicados en el balance hídrico del modelo GWLF

La aportación de fracción sólida (erosión y sedimento) se estima mediante el producto de la carga de sedimentos mensual y de la concentración media de nutrientes en los sedimentos. La erosión se computa mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (algoritmo USLE) que usa valores mensuales de los coeficientes KLSCP para cada área generadora, es decir, cada combinación de uso/cobertura y tipo de suelo.

Finalmente, la carga de sedimentos para cada superficie de aportación se estima aplicando a la erosión calculada un ratio de reparto de sedimentos -que se establece en función de la superficie de la cuenca-, y la capacidad de transporte -que se basa en la escorrentía media diaria-.

Las pérdidas de fósforo en superficie se determinan aplicando coeficientes de P disuelto a la escorrentía superficial y un coeficiente de sedimentos, específico para cada tipo de superficie de aportación (zonas homogéneas en cuanto a vegetación y usos del suelo).

Es posible también aplicar aportaciones puntuales a la fracción disuelta, así como prácticas de abonado y diferentes sistemas sépticos.

Las aportaciones de nutrientes por escorrentía de origen urbano se asumen como fracción sólida y el modelo aplica una función de acumulación exponencial y de lavado para estas cargas. En virtud de dicho modelo, los nutrientes se acumulan  $-N_k$  en las superficies urbanas según una constante de acumulación  $-n_k$  y una tasa de depleción  $-\beta$ , según la ecuación:

$$dN_k/dt = n_k - \beta N_k$$

La ecuación se resuelve considerando que el 90% de la máxima acumulación se alcanza en 20 días y luego se añade un término de sustracción que incluye los efectos del lavado en lluvias  $-Wkt$ , que se calcula recurriendo de nuevo a la estimación de la escorrentía mediante la ecuación del número de curva del Servicio Americano de Conservación del Suelo, según la siguiente ecuación:

$$Wkt = 1 - e^{-1.81Qkt}$$

Las pérdidas subsuperficiales se calculan mediante coeficientes específicos de fósforo para las contribuciones al cauce de aguas subterráneas y, como se ha dicho, el modelo subsuperficial considera únicamente una zona de aportación agregada en cada subcuenca.

#### **4.2.1. Mapa usos del suelo y asignación a grupos hidrológicos**

Para construir los mapas con las variables y parámetros que intervienen en el modelo USLE en los diferentes ámbitos geográficos de la cuenca, incluyendo el cálculo de variables a partir de perfiles de suelo, se ha recurrido a varias fuentes:

- ITACYL. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, dependiente de la Junta de Castilla y León: <http://suelos.itacyl.es/inventario>
- GeoEuskadi. Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Euskadi, dependiente del Gobierno Vasco: <http://www.geo.euskadi.eus>
- *European Soil Data Centre* (ESDAC) del *Joint Research Centre*, dependiente de la Comisión Europea: <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/>

Se han obtenido en la cuenca de estudio un total de 34 parcelas, en las que hay representados 3 tipos o clases hidrológicas (Figura 12), según la clasificación del *Soil Conservation Service* (1986). Cada una de las parcelas (Figura 12) lleva asociados valores de los siguientes parámetros:

- **MU-AWC:** Representa la capacidad hídrica (en cm) disponible en el perfil completo del suelo, lo que depende de la profundidad y textura del suelo. Donde no hay datos concretos, se asume que equivale al parámetro “S” de retención máxima posible, que se puede estimar a partir del número de curva (CN) según:

$$S = \frac{25.400 - 254 * CN}{CN}$$

El valor de CN depende del grupo hidrológico y del uso del suelo.

- **MU-KF:** Es una estimación de la erosionabilidad del suelo (factor “K”), que es uno de los factores utilizados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) para estimar la erosión del suelo producida por la lluvia. Los valores estimados en esta cuenca están en torno a 0,3, pero cuando se trata de roca desnuda se aplica un valor de 0,05.

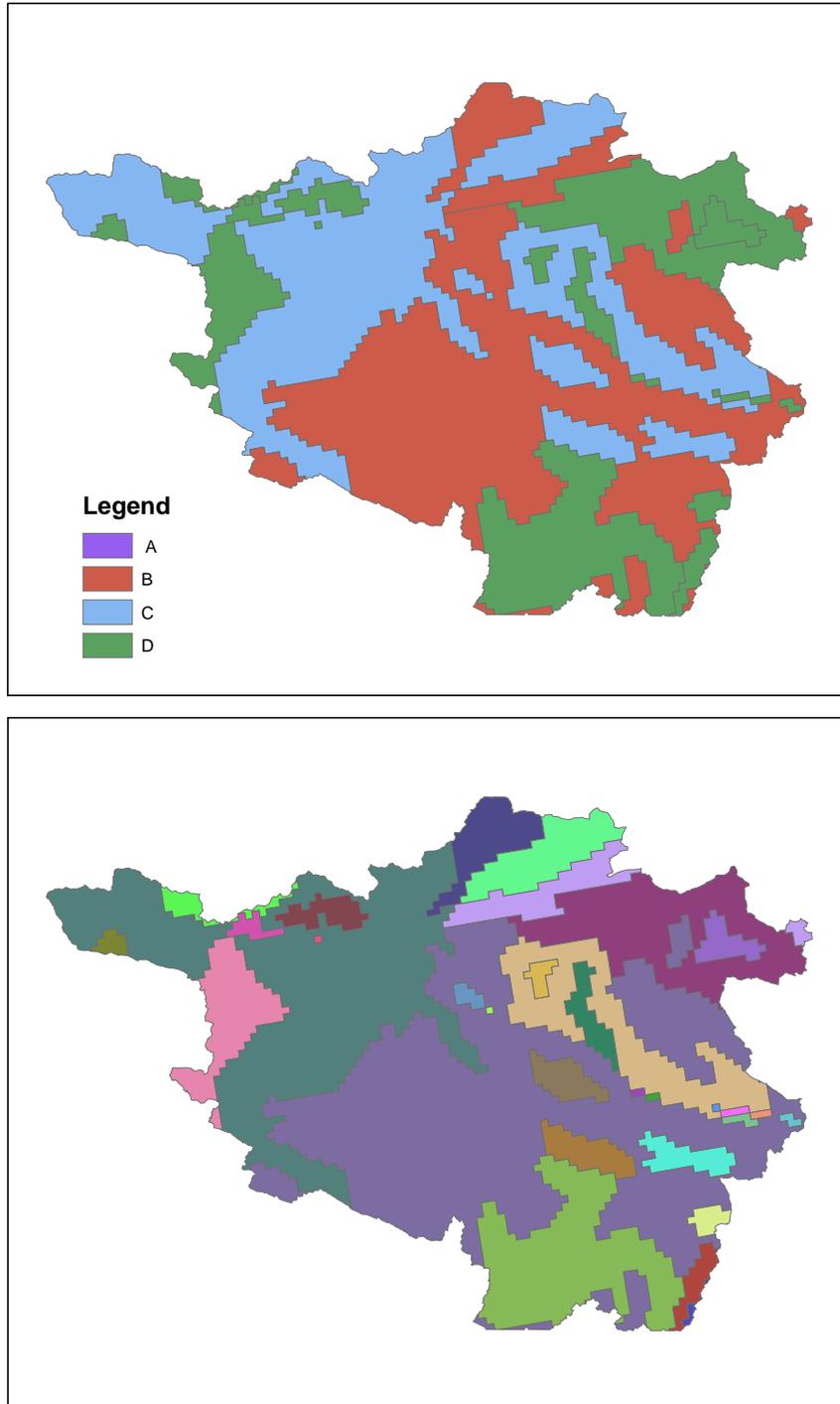
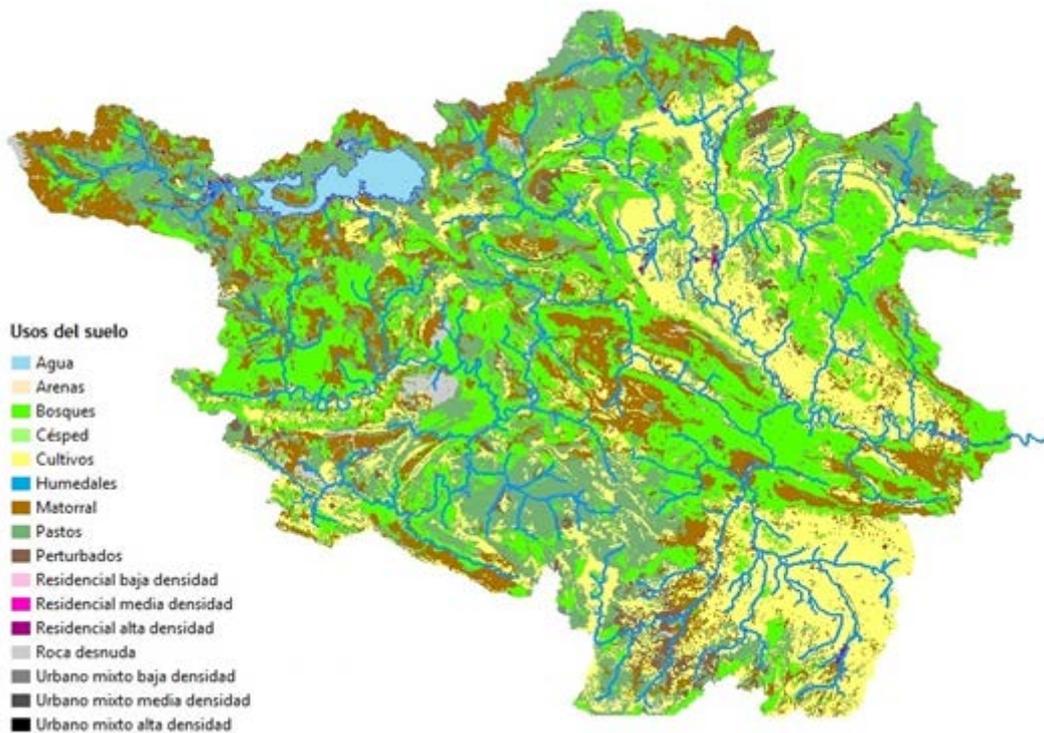


Figura 12. Tipos hidrológicos de suelo (superior), y clasificación según valores del factor "K" (inferior)

En cuanto a los usos del suelo, se utilizaron datos procedentes de la base de datos del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España), dependiente del Ministerio de Fomento. A partir de esta información, se han establecido una serie de equivalencias con los tipos de suelo admitidos por el modelo, con las que se ha generado una capa vectorial para alimentar el modelo hidrológico (Figura 13).



**Figura 13.** Mapa de usos del suelo utilizado en el ESTUDIO

El factor LS de la ecuación USLE se ha calculado mediante una función que se basa en las funciones propuestas por Moore & Wilson (1992), usando un algoritmo para MDTs de alta resolución contenido en un script de ESRI dentro del módulo “*Terrain Analysis*” de ArcView.

Por último, se ha introducido un factor de corrección en cada subcuenca para incluir el efecto de retención que tienen los embalses y lagos. Este factor es función de la superficie relativa que ocupan lagos y embalses respecto a la superficie total de la subcuenca en la que se encuentran.

#### **4.2.2. Parametrización y ajustes del modelo**

En cuanto a la fracción sedimentaria, se ha estimado en una primera aproximación una concentración de fósforo disponible en el suelo de 5 mg/kg, a partir de datos de la bibliografía para suelos similares (Salas Avilés, 2011 y otros).

El modelo hidrológico ha sido posteriormente sintonizado para mejorar en lo posible su ajuste a las series de caudales disponibles, variando algunos parámetros relativos a la evapotranspiración y a la constante de recesión del agua subterránea. En cualquier caso, no se ha realizado una calibración formal, dado que no es objeto de este trabajo y que precisamente se ha seleccionado este modelo por su carácter semiempírico, que permite su aplicación sin calibración, ofreciendo ajustes en fósforo total superiores al 75% (Schneiderman, 2006).

Asimismo, se han calculado las distancias medias a la salida a través de los cauces en cada subcuenca para obtener los factores de atenuación que se aplican posteriormente como pérdidas en los cauces en función del tiempo, aplicando coeficientes de pérdida incorporados en el modelo SPARROW (Preston & al., 2011).

Otra de las correcciones efectuadas para estimar el flujo agregado de todas las subcuencas es el factor de retención de sedimentos debido a la superficie ocupada por embalses en cada sub-cuenca. Este factor de retención de la carga de sedimentos inicial es de 0,88 y se pondera con el porcentaje de superficie de cuenca que drena al embalse, que en este caso es siempre del 100%, dado que en cada embalse se hace terminar la subcuenca de análisis correspondiente.

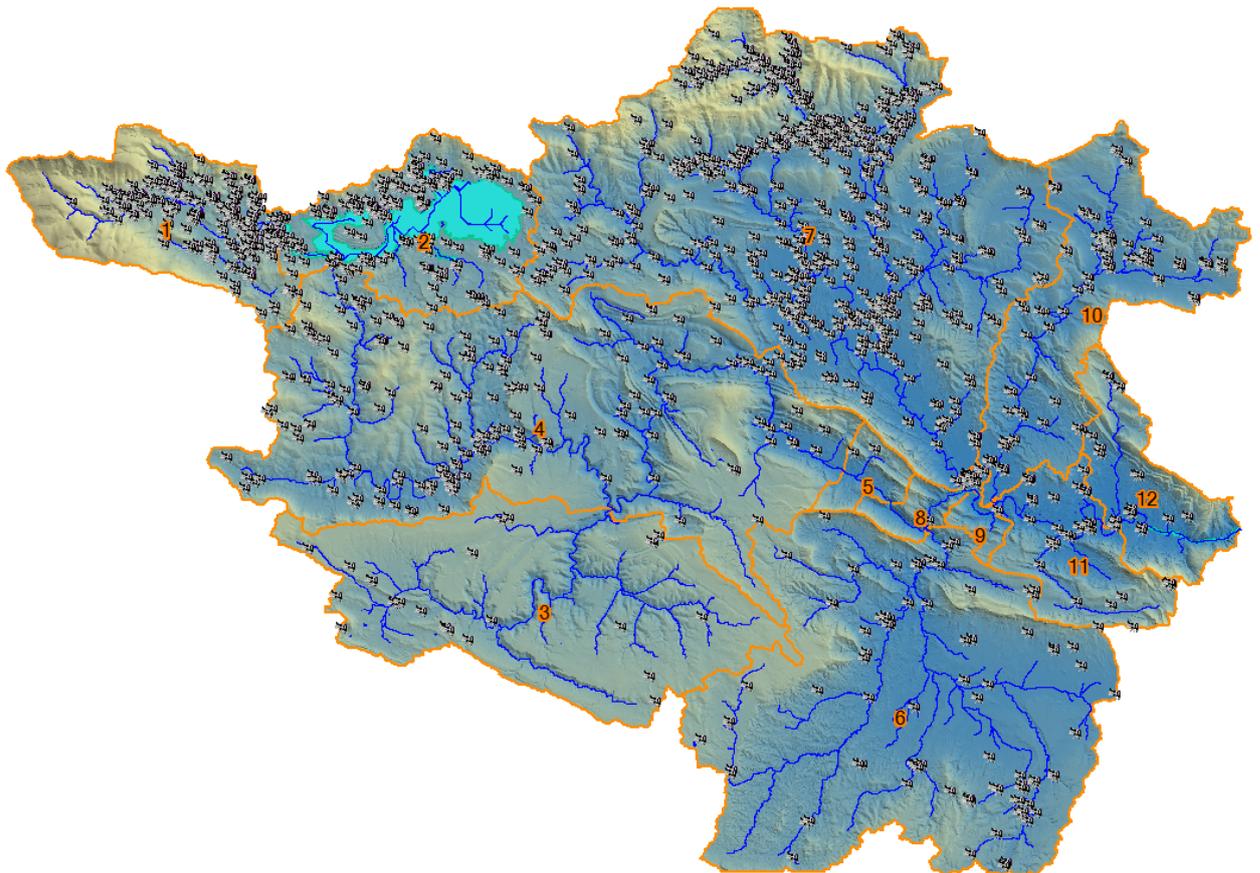
#### **4.2.3. Datos de contorno del modelo**

##### **3.2.3.1 METEOROLOGÍA**

El modelo se ha alimentado con la serie de 2007 a 2015 de datos meteorológicos diarios (precipitación máxima y mínima y temperatura media) pertenecientes a las estaciones disponibles de AEMET en la cuenca del embalse y de los pluviómetros de la red SAIH del Ebro. Para ello, y siguiendo las prácticas habituales en este tipo de simulaciones, se ha cebado el modelo con datos del año 2007 y se han retenido los resultados de los 8 años siguientes (2008 a 2015).

### 3.2.3.2 GANADERÍA

Se revisaron datos de las encuestas ganaderas del MAGRAMA y del censo agrario 2009 del INEbase, pero finalmente se utilizaron los datos de cabezas por explotaciones proporcionados por la CHE, recopilada de las comunidades autónomas para los inventarios del IMPRESS.



**Figura 14.** Ubicación de las explotaciones ganaderas censadas en las subcuencas de análisis

A los diferentes tipos ganaderos se les asigna un peso medio y una aportación específica de nutrientes en sus residuos (Tabla 2). A cada uno de los tipos se le asigna un régimen (extensivo o estabulado). Se asume que el 80% de los residuos generados por los animales estabulados se utilizan para abonado de campos y que además un 80% de esa cantidad se aplica mediante métodos como la inyección o disqueo que hacen que los nutrientes se retengan en el suelo y no se puedan movilizar y por tanto alcanzar las aguas superficiales.

**Tabla 2.** Número y características de los diferentes tipos ganaderos presentes en la cuenca

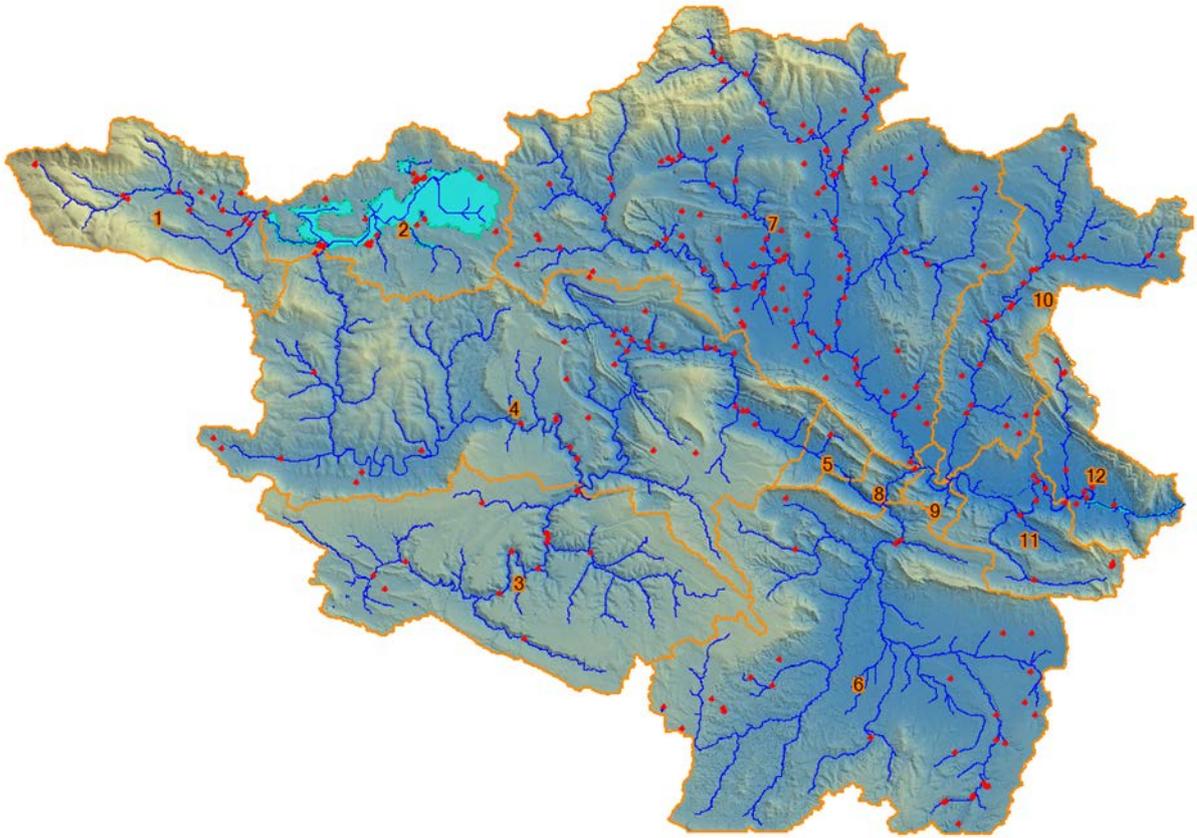
TIPO	CABEZAS	Peso medio (kg)	Carga N (g/kg)	Carga P (g/kg)	EXTENSIVO
VACUNO LECHE	66.453	640	0,44	0,07	NO
VACUNO CARNE	24.577	360	0,31	0,09	SI
POLLOS	485.358	1	1,07	0,30	NO
GALLINAS	485.358	2	0,85	0,29	NO
PORCINO	7.863	61	0,48	0,15	NO
OVINO	121.005	50	0,37	0,10	SI
EQUINO	52.641	500	0,28	0,06	SI
OTRAS AVES	43.444	7	0,59	0,20	NO

La fracción de fósforo susceptible de ser lavada hasta las aguas superficiales está sometida a una tasa de pérdida del 7%, que por lo tanto es el porcentaje de la carga de fósforo movilizable que alcanza las aguas superficiales (Soupir & al., 2006). Esta tasa de pérdida se produce cuando la precipitación diaria es de 30 mm, pero se aplica un factor de ajuste en función de la precipitación, que lo incrementa por encima de ese umbral de lluvia y lo reduce cuando se sitúa por debajo.

En el caso del ganado en régimen extensivo, se añade a la anterior consideración entre el 1 y el 3% del tiempo el ganado está en contacto directo con masas de agua superficiales y entonces el 100% de los nutrientes en los residuos se incorporan a ellas. El tiempo que pasa el ganado en el agua se estima a partir de un índice de estrés térmico (THI) basado en la temperatura y la humedad (Pandey, 2007).

### 3.2.3.3 VERTIDOS DE AGUAS RESIDUALES

Se ha partido de la base de datos de vertidos proporcionada por la CHE (Figura 15). El tipo, ubicación y volumen anual de vertido se han extraído de los inventarios del IMPRESS.



**Figura 15.** Ubicación de los puntos de vertido censados en las subcuencas de análisis

Para asignar concentraciones medias o tipo a los diferentes vertidos se barajó la opción de aplicar los rendimientos teóricos según las autorizaciones de vertido, pero finalmente se aplicaron concentraciones reales medidas en los vertidos, a partir de datos proporcionados por CHE. Se calcularon concentraciones de fósforo a partir de las analíticas disponibles para los cinco tipos de vertido. El número de analíticas era reducido, por lo que las estimas están sujetas a incertidumbre. Entre los datos de los vertidos principales había datos de fósforo para cinco expedientes que incluían tres de depuradoras urbanas y dos de piscifactorías (Tabla 3). A estos casos se les asignó el promedio de sus propias medidas, y se utilizó el promedio de los datos disponibles para cada tipo para asignar concentración al resto de vertidos de cada tipo. Finalmente, para los tipos de vertido sin información se aplicó a los rendimientos teóricos una variación proporcional a la de los otros tipos. Estas concentraciones se aplican al volumen de vertido para calcular la carga.

Se buscaron patrones de estacionalidad en los datos, pero no se encontraron, probablemente debido al bajo número (45 registros en total), y a una distribución temporal irregular.

La carga total por vertidos obtenida aplicando los valores reales supone alrededor de un 25% de la carga total que se obtendría aplicando los rendimientos teóricos. Estos números probablemente están subestimados, ya que raramente se toman muestras en picos de vertido, aunque se optó por utilizar preferentemente los datos reales. Resultaría necesario disponer de mayor número de datos, especialmente en diferentes situaciones hidrológicas y de vertido.

**Tabla 3.** Concentraciones de nutrientes por tipos de vertido a partir de las analíticas disponibles

Tipo de vertido	TP (mg/l)	Número de expedientes disponibles	Número de analíticas disponibles
< 4 h-e	2,17	0	0
Clase 1, 2, y 3	0,12	2	21
Entre 10000 y 49999 h-e	0,93	2	16
Entre 2000 y 9999 h-e	0,74	1	8
Entre 250 y 1999 h-e	2,17	0	0
Entre 5 y 249 h-e	2,17	0	0

También se realizó un análisis para buscar pautas de estacionalidad a partir de los datos de población residente, de las pernoctaciones mensuales y de la duración media de las pernoctaciones para Campoo (Instituto de Estadística de Cantabria) y para Castilla y León por municipios (Servicio de Estadística de la JCyL). Se calcularon los habitantes-día mensuales como:

$$\text{Residentes} \times \text{días} + \text{pernoctaciones} \times \text{duración media}$$

Pero la distribución mensual apenas varía respecto a la obtenida con el único criterio del número de días de cada mes (rango de variación de -0,08 a 0,04%, con un promedio de 0,00%), ya que la población turista es mucho menor que la permanente en esta zona. Por tanto no se aplicó más estacionalidad a los datos de vertidos que la resultante del diferente número de días por mes.

#### **4.2.4. Estimación de la concentración esperada en el embalse**

Aunque la predicción cuantitativa de la concentración de fósforo en el embalse no es el objeto del presente Estudio, resulta de utilidad para encuadrar la magnitud de las aportaciones realizar el ejercicio de asignar esa carga de fósforo anual al volumen del embalse, es decir, mezclar esa

cantidad de fósforo aportada anualmente con el volumen de agua del lago en el mismo periodo, pero teniendo en cuenta el tiempo que permanece en el mismo y en un supuesto estado estacionario.

Según la expresión propuesta por Vollenweider en el marco del programa de estudios de la eutrofización promovido por la OCDE, la carga de fósforo normalizada con el tiempo de residencia hidráulica (TRH) y con la profundidad media ( $\bar{z}$ ) es teóricamente equivalente, en un estado estacionario, a la concentración media de fósforo total en el lago (Vollenweider & Kerekes, 1980):

$$[P]l = \frac{L(P)/Q_s}{1 + \sqrt{\bar{z}/Q_s}} = \frac{[P]i}{1 + \sqrt{TRH}}$$

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 citado estudio de la OCDE se propusieron para el fósforo y el nitrógeno los siguientes ajustes empíricos de la anterior ecuación para el grupo de “lagos poco profundos y embalses”, en el que se encuadraría el embalse de Sobrón:

$$[P]l = 1,55 \cdot \left[ \frac{L(P)/Q_s}{1 + \sqrt{\bar{z}/Q_s}} \right]^{0,82} \qquad [N]l = 5,34 \cdot \left[ \frac{L(N)/Q_s}{1 + \sqrt{\bar{z}/Q_s}} \right]^{0,78}$$

Esta expresión se aplica a la serie de años simulados para obtener una idea de la concentración media anual de fósforo que corresponde a la carga estimada para ese año. Sin embargo, se insiste en que estos cálculos son orientativos y no deben tomarse como una

estimación de la concentración media real de fósforo en la columna de agua del embalse, para lo cual se debería recurrir a modelos biogeoquímicos dinámicos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. BALANCE HÍDRICO

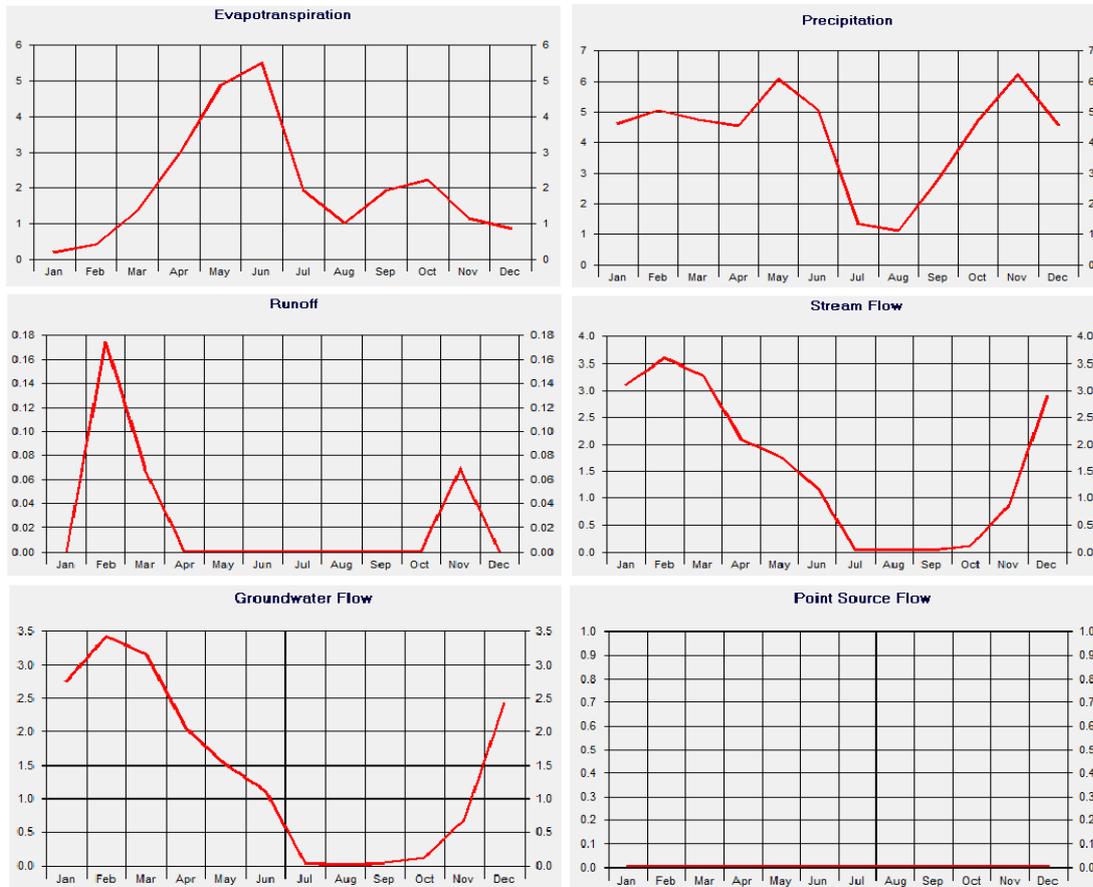
Para las 12 unidades de análisis (subcuencas) se ha simulado el periodo de 2007 a 2015 y se ha excluido del análisis el primer año, que se utiliza como cebador.

El resultado (Figura 16) se expresa en cm ( $10 \text{ l/m}^2$ ) y muestra una clara estacionalidad, con los máximos de lluvia (“*Precipitation*”) en los meses de mayo y noviembre. Sin embargo, en el mes de febrero se obtiene el valor máximo de escorrentía (“*Runoff*”) y se producen los caudales más altos (“*Stream Flow*”). Los mínimos de lluvia se dan en el mes de julio y los de caudal entre julio y septiembre.

Si se compara entre los diferentes años estudiados (Tabla 4), se aprecia que las diferencias son importantes y llegan a ser hasta del 41% en precipitación y del 150% en aportaciones. Si excluimos el año de cebado del modelo (2007), en el que se obtuvieron registros más altos de lluvia, el valor mínimo de la serie se ha dado en el año 2011 y el máximo en el 2008.

**Tabla 4.** Precipitación y aportación hídrica anual en la cuenca del embalse de Sobrón, a partir de la simulación hidrológica del Estudio

Año	Precipitación (mm/año)	Aportación hídrica ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )
2.008	752	1.767
2.009	524	841
2.010	611	1.397
2.011	441	656
2.012	456	783
2.013	676	1.425
2.014	564	1.110
2.015	497	1.130
<b>Promedio periodo</b>	<b>565</b>	<b>1.139</b>



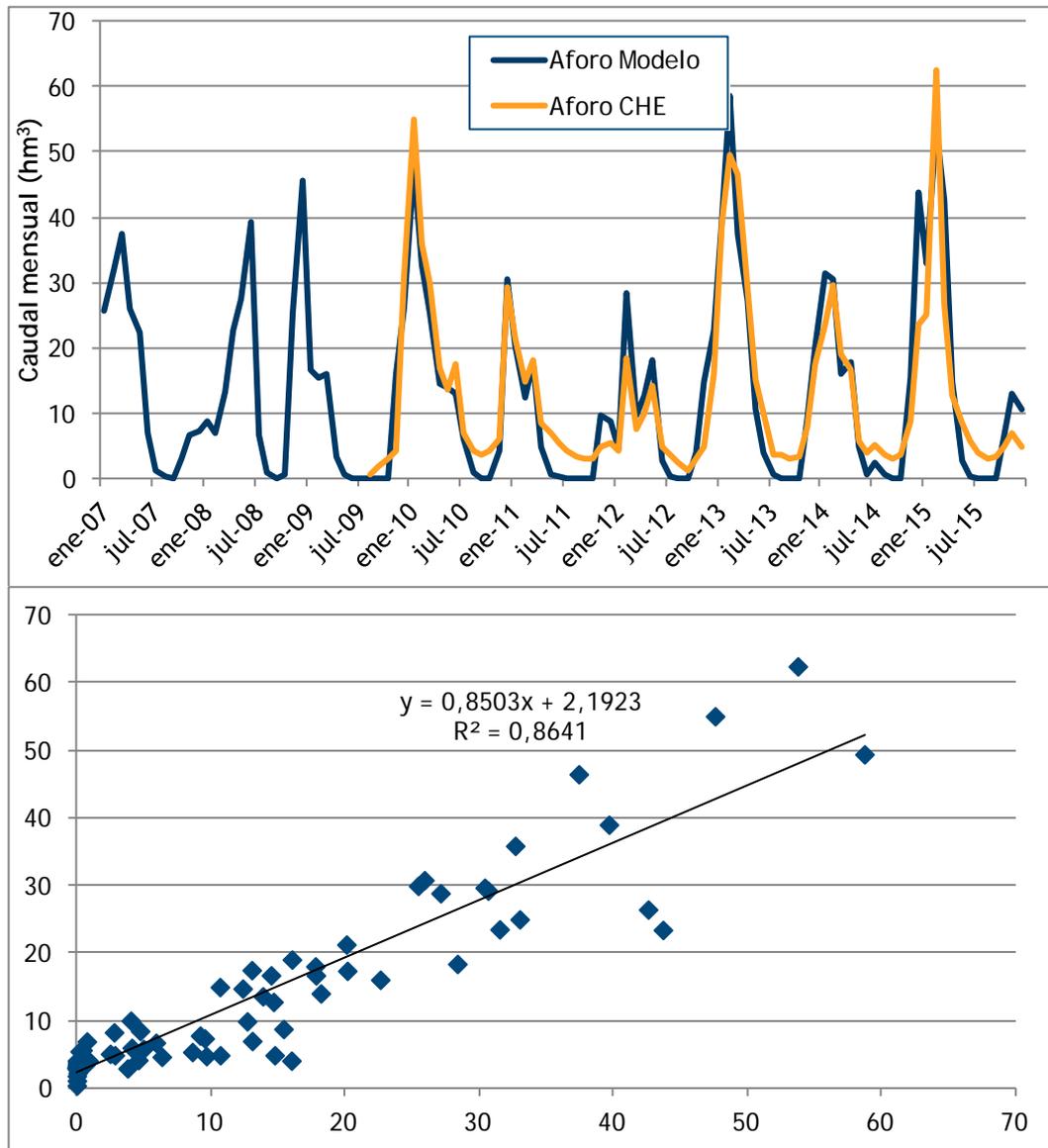
Period of analysis: 9 years from 2007 to 2015

Units in Centimeters								
Month	Precip	ET	Extraction	Runoff	Subsurface Flow	Point Src Flow	Tile Drain	Stream Flow
Jan	4,63	0,19	0,00	0,00	2,76	0,00	0,00	3,12
Feb	5,06	0,41	0,00	0,17	3,43	0,00	0,00	3,61
Mar	4,76	1,35	0,00	0,07	3,15	0,00	0,00	3,29
Apr	4,56	2,96	0,00	0,00	2,06	0,00	0,00	2,10
May	6,09	4,87	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	1,78
Jun	5,08	5,50	0,00	0,00	1,11	0,00	0,00	1,18
Jul	1,35	1,92	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04
Aug	1,12	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Sep	2,80	1,92	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04
Oct	4,73	2,23	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,11
Nov	6,25	1,14	0,00	0,07	0,70	0,00	0,00	0,87
Dec	4,58	0,86	0,00	0,00	2,43	0,00	0,00	2,90
<b>Totals</b>	<b>56,46</b>	<b>29,19</b>	<b>0,00</b>	<b>1,23</b>	<b>21,45</b>	<b>0,08</b>	<b>0,00</b>	<b>23,56</b>

Figura 16. Valores mensuales medios de las variables hidrológicas en el periodo estudiado

Por otro lado, el resultado del ajuste del modelo hidrológico empleado en el Estudio a los datos del balance aportado por CHE (Figura 17) refleja que se comporta de forma satisfactoria. En la

parte superior se representan los caudales mensuales obtenidos a partir de los resultados diarios en la subcuenca 3, como ejemplo, tanto para la serie simulada como para la medida por CHE. En la parte inferior se disponen los datos de una y otra serie y se calcula la regresión lineal entre ambas, que tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) superior al 86%.



**Figura 17.** Ajuste de la mejor ronda de simulación en la subcuenca 3, seleccionada entre las numerosas calibraciones realizadas

## 5.2. APORTACIONES DE FÓSFORO

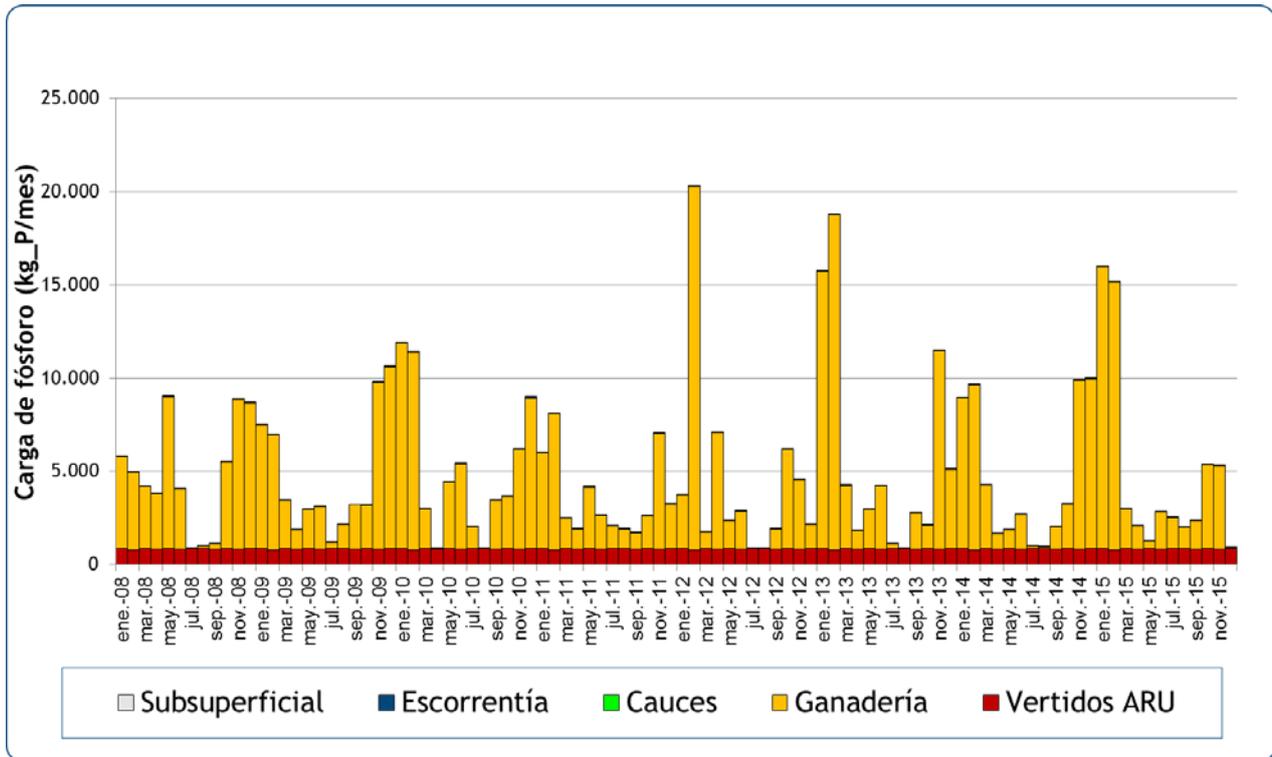
La aplicación metodológica descrita ha permitido obtener una estimación diaria para el periodo de 2.008 a 2.015 de las aportaciones de fósforo (kg) al embalse de Sobrón procedente de las diferentes fuentes difusas y localizadas que se han enumerado.

A partir del balance diario se han obtenido los valores mensuales de aportación de fósforo, sobre los que se realiza un análisis de la contribución relativa de cada una de las fuentes (Tabla 5). Se aprecia que la aportación total en el periodo estudiado es de unas 450 t de fósforo, y que la media es de 4,7 t/mes de fósforo aportado al embalse. Sin embargo la variación de esos valores es muy elevada, dado que están afectados por las diferencias hidrológicas estacionales, por lo que oscilan entre 0,7 y 20 t/mes.

**Tabla 5.** Estadísticas principales de las aportaciones mensuales de fósforo (kg) al embalse de Sobrón, estimadas mediante simulación (la suma se refiere a todo el periodo estudiado) para la cuenca total del embalse, agregando subcuencas

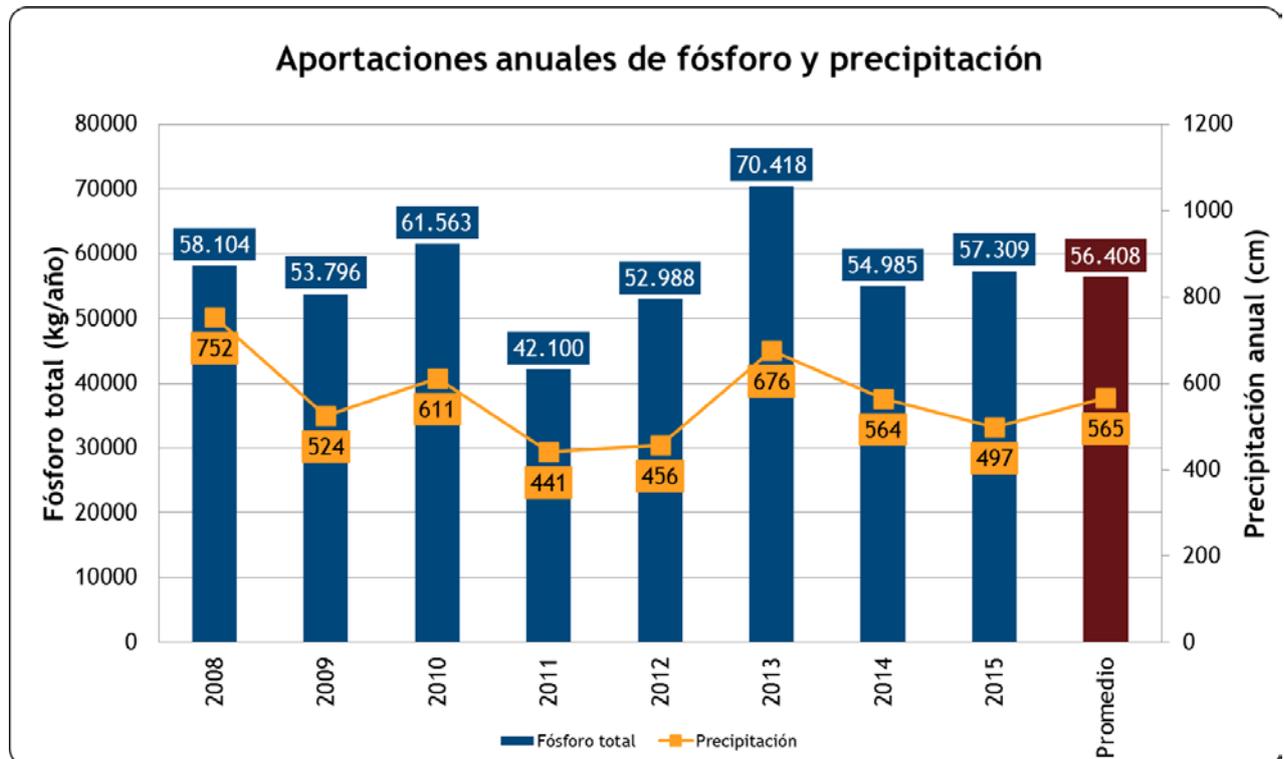
Estadística	Total	Ganadería	Erosión en cauces	Aguas de escorrentía	Flujo subsup.
Observaciones	96	96	96	96	96
Mínimo	728	0	0	0	0
Máximo	20.170	19.480	61	51	2
Amplitud	19.441	19.480	61	51	2
Mediana	3.034	2.356	0	5	0
Suma	451.263	378.653	460	813	44
Media	4.701	3.944	5	8	0
Desviación típica	4.141	4.123	11	10	0

En cuanto a la distribución mensual de las cargas (Figura 18), se aprecia que la máxima aportación se produce durante el invierno -normalmente en febrero, exceptuando en el primer año de la serie (2.008) que ocurre en mayo. Por otro lado, y exceptuando los meses de verano, el fósforo procedente de la ganadería es la fracción dominante, y de hecho el resto de fuentes de aportación resultan insignificantes, exceptuando las procedentes de vertidos de aguas residuales, que en todo caso son muy inferiores a las aportaciones ganaderas fuera de los meses estivales.

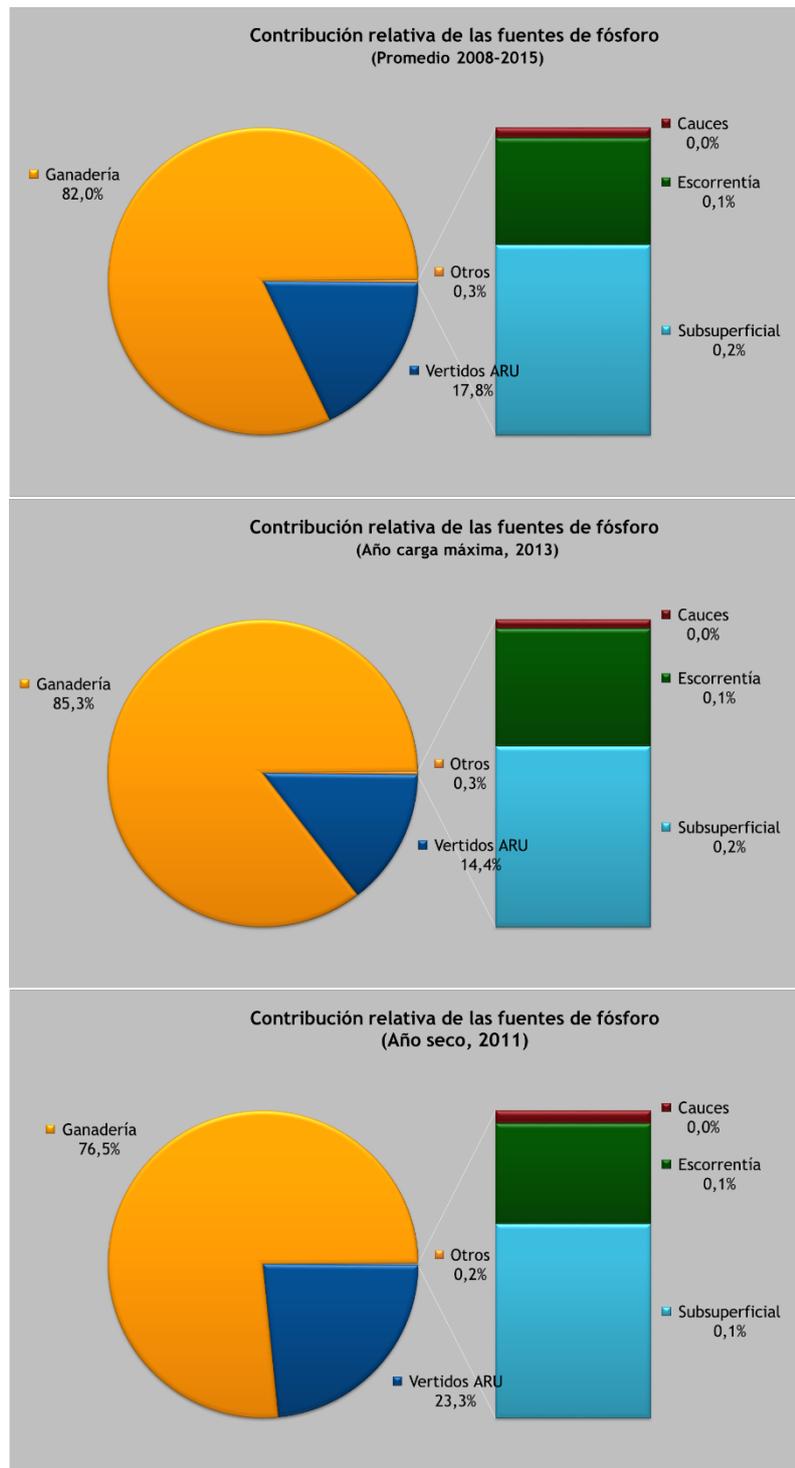


**Figura 18.** Aportaciones mensuales estimadas de fósforo total (kg) al embalse de Sobrón en el periodo de 2008 a 2015, diferenciando entre los diferentes tipos de fuentes generadoras

En relación a las aportaciones anuales de fósforo al embalse (Figura 19), hay también variaciones muy patentes, que transcurren desde menos de 42 t en el año 2.011 a más de 70 t en el 2.013. Se aprecia con claridad que estas variaciones están asociadas a las precipitaciones, con las que muestran una correlación positiva evidente, aunque con algunos matices, como por ejemplo el año 2.008, en el que a pesar de registrarse la máxima precipitación, la carga de fósforo es inferior a la de los años 2.010 y 2.013.



**Figura 19.** Aportaciones anuales estimadas de fósforo total (kg) al embalse de Sobrón y precipitación anual en la cuenca, en el periodo de 2008 a 2015 (promedio de la serie en color granate)

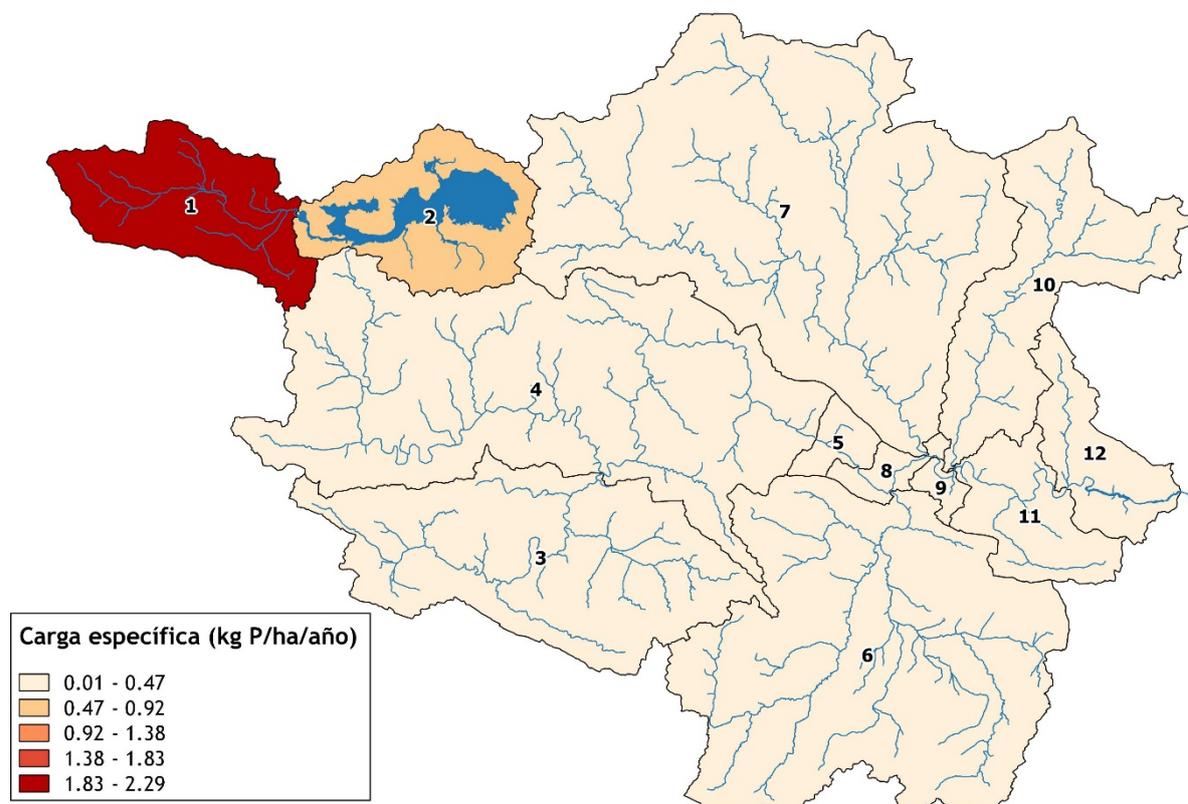


**Figura 20.** Porcentaje de la aportación al total de cada fuente generadora de fósforo. En el gráfico superior (18a) se calcula sobre el promedio de la serie de años estudiada, en el intermedio (18b) en el año en el que la carga estimada de fósforo es máxima, y en el inferior (18c) en el año más seco y de menor aportación de fósforo

El desglose del promedio de la aportación anual de fósforo por fuentes de aportación (Figura 20a) refleja que más de la mitad del fósforo que entra al lago procede de fuentes difusas relacionadas con el tipo y uso de suelo y las características morfológicas e hidro-meteorológicas de la cuenca (escorrentía y flujo subsuperficial). Se aprecia también que la ganadería representa más del 80% del total.

Por otro lado, las aportaciones procedentes de las aguas residuales representan el 18% del total. Si se hace el mismo análisis separadamente para el año más seco de la serie (Figura 20c) el porcentaje atribuido a los vertidos de aguas residuales sube 5 puntos, mientras que en el año de aportación máxima de la serie (Figura 20b), desciende unos 4 puntos porcentuales.

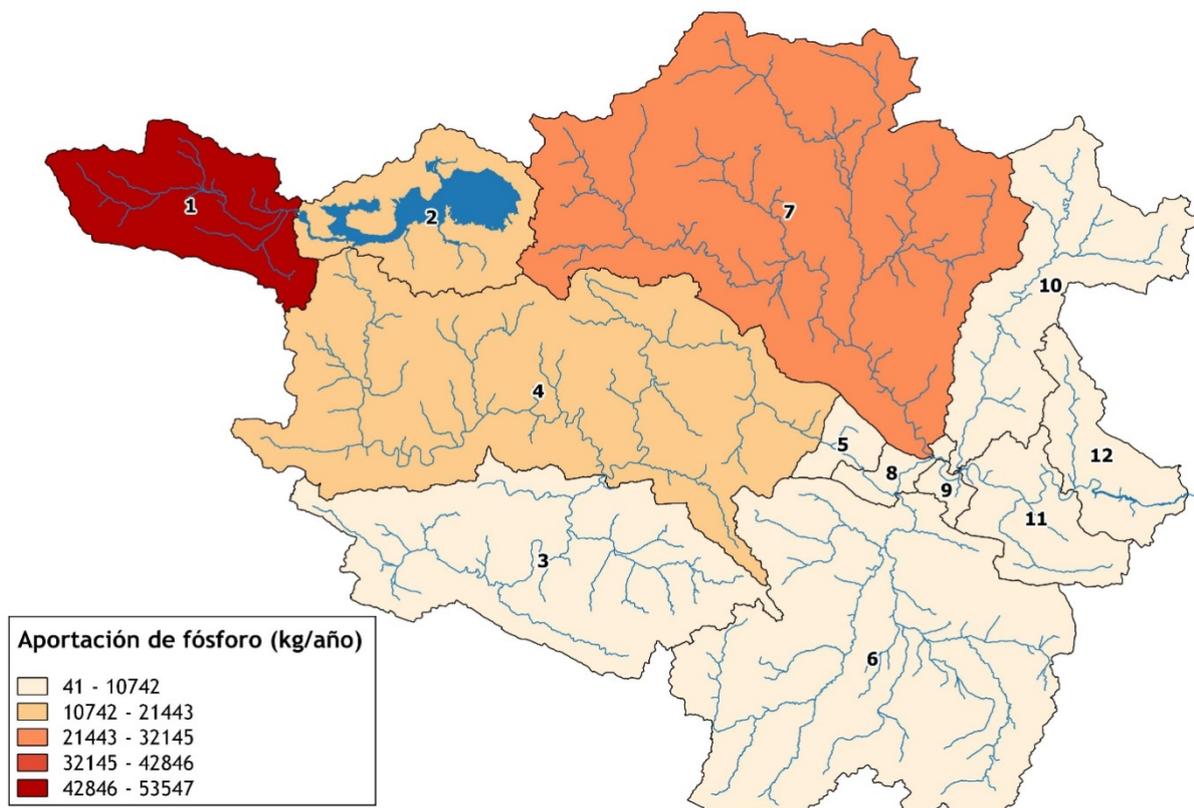
Finalmente, se proporcionan las cifras de la distribución espacial de la carga de fósforo en la cuenca del embalse de Sobrón para cada una de las subcuencas analizadas (Figura 21).



**Figura 21.** Aportación específica de fósforo (kg/ha/año) de cada una de las sub-cuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados)

Se puede apreciar que la subcuenca ID1, correspondiente tramo superior del río Ebro que drena al embalse homónimo, es la que mayor aportación específica genera, como es lógico porque es la que tiene mayor densidad de población y también ganadera. La subcuenca ID2 de escorrentía directa al embalse del Ebro es la segunda en aportación específica de fósforo, quedando el resto de subcuencas por debajo de 500 g/ha/año.

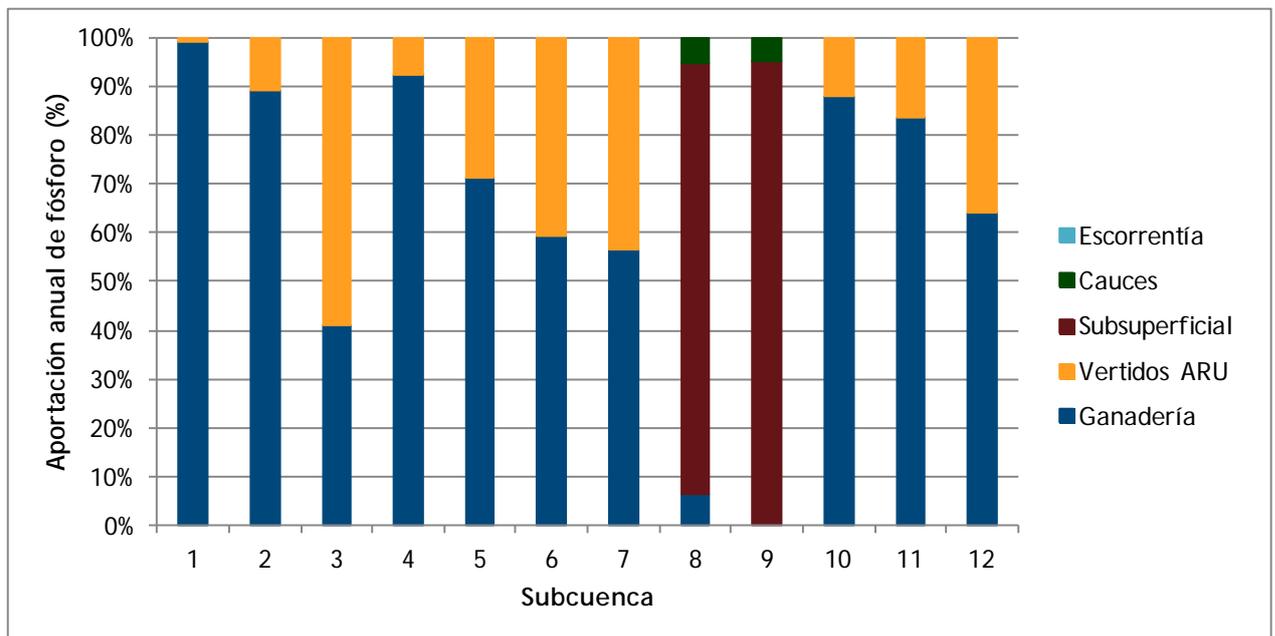
Si representamos la distribución de la carga de fósforo en términos absolutos (Figura 22) es también la subcuenca ID1 la que genera la máxima aportación (53 t/año), pero la subcuenca del río Nela (ID7) es la segunda en importancia, con una exportación estimada de 22 t/año). La subcuenca ID2 exporta unas 18 t/año y la ID4 (tramo del río Ebro entre el embalse del Ebro y el de Cereceda) está en ese mismo rango (13 t/año) como consecuencia de su gran superficie.



**Figura 22.** Aportación anual de fósforo (kg/año) de cada una de las sub-cuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados)

La importancia relativa de las distintas fuentes de fósforo consideradas en la aportación anual promedio es diferente entre subcuencas. En general domina la ganadería, como ya se había

comentado, pero esto es más acusado en las subcuencas más altas, especialmente en la 1, 2 y 4, que son también las que más fósforo aportan al embalse junto con la 7, en la que la presencia de mayores poblaciones hace que los vertidos ARU cobren mayor importancia. Los vertidos urbanos sólo son la fuente principal de fósforo en la subcuenca 3, con casi un 60% de la aportación anual promedio. En subcuencas muy reducidas y sin poblaciones importantes ni abundancia de ganado, como la 8 y la 9, la fuente mayoritaria es la subsuperficial, aunque en estas subcuencas la aportación anual es muy baja en términos relativos al total de la cuenca.



**Figura 23.** Importancia relativa de las distintas fuentes en la aportación anual de fósforo de cada una de las subcuencas analizadas (promedio de los 7 años evaluados)

### 5.3. CONCENTRACIÓN ESTIMADA EN EL EMBALSE BAJO DIFERENTES ESCENARIOS

A partir de estos datos de aportación anual hídrica y de fósforo al embalse de Sobrón, así como del tiempo de residencia hidráulica en el mismo, se ha calculado la concentración esperada de fósforo, mediante el modelo semi-empírico de Vollenweider.

Si se aplica la expresión a la serie de años simulados (Tabla 6), se obtiene una estimación de concentración de fósforo total media en el embalse -[P]- de 35  $\mu\text{g}_\text{P}/\text{l}$ , aunque se debe tener en cuenta que las fluctuaciones entre años son notables (entre 24 y 43  $\mu\text{g}_\text{P}/\text{l}$ ).

**Tabla 6.** Tiempo de residencia hidráulica (TRH, en años) en el lago para la serie estudiada, y valores corregidos de concentración de fósforo total [P] estimada en el lago (en  $\mu\text{g}_P/\text{l}$ ), a partir de la aportación anual de fósforo o L(P), expresada en  $\text{mg}/\text{m}^2$  y obtenida por simulación

Año	L(P)	TRH	[P]
2008	20,62	0,02	24
2009	19,09	0,09	38
2010	21,85	0,01	32
2011	14,94	0,02	42
2012	18,80	0,03	43
2013	24,99	0,03	34
2014	19,51	0,02	34
2015	20,34	0,01	36
<b>Promedio</b>	<b>20,02</b>	<b>0,03</b>	<b>35</b>

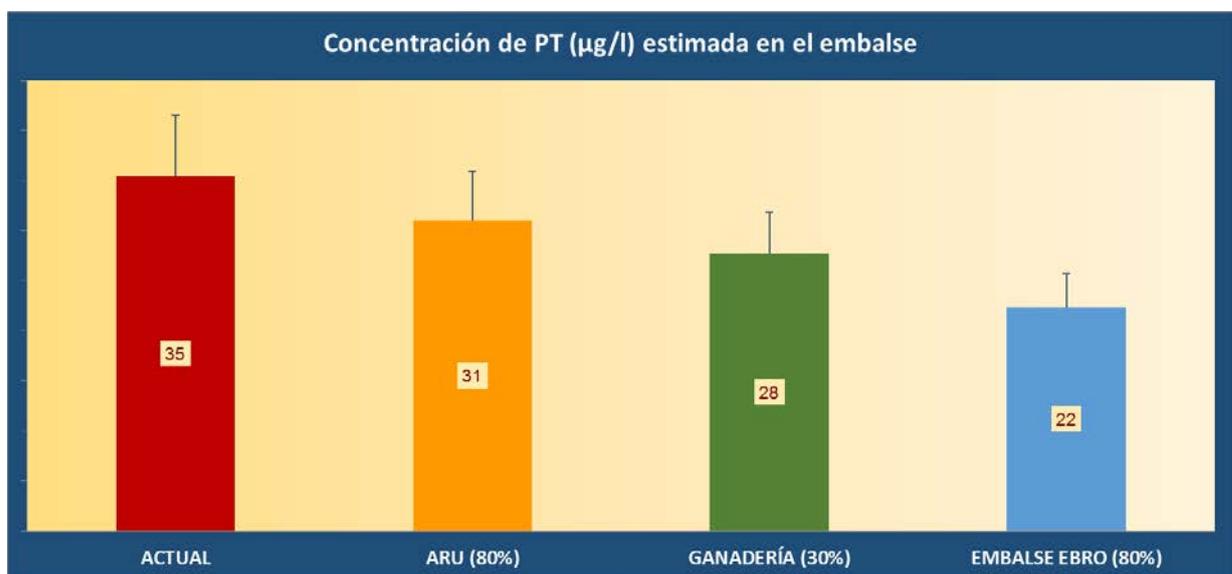
A pesar de que estas estimaciones son orientativas debido a su carácter semi-empírico, es decir, que incorporan parámetros estimados para una serie amplia de masas de agua de diferentes características y además asumen un estado estacionario, sirven al propósito de identificar las fuentes de nutrientes y zonas más relevantes, así como para plantear horizontes de reducción de cargas y escenarios de actuación, que luego deberían ser precisados utilizando herramientas de mayor resolución y datos suficientes para su calibrado y verificación.

Siguiendo esta línea de razonamiento, se plantean algunos escenarios de actuación a gran escala para estimar su potencial rendimiento en la disminución de la concentración de fósforo en el embalse de Sobrón (Figura 24).

Estos escenarios, expuestos en el mismo orden que en la Figura 24, son los siguientes:

- **Situación actual:** Resultado de la estimación realizada en el presente estudio para los años 2.008 a 2.015.
- **Actuación sobre las aguas residuales:** Se plantea un objetivo de reducción del 80% en la carga de fósforo aportada actualmente por las aguas residuales, respecto a la estimación de carga por ese concepto realizada en el estudio. Es preciso tener muy presente la incertidumbre que se maneja actualmente en cuanto a la concentración de fósforo representativa de estos vertidos.

- Actuación sobre la **ganadería**: Se plantea una reducción del 30% del fósforo de origen ganadero aportado al embalse, respecto a la estimación de carga por ese concepto realizada en el estudio.
- Actuación en las subcuencas y **embalse del Ebro**. Se plantea en este escenario una reducción del 80% en la contribución de fósforo al embalse de Sobrón procedente del embalse del Ebro.



**Figura 24.** Estimación de la concentración media anual de PT en el embalse de Sobrón como consecuencia de los diferentes escenarios de actuación comentados

El resultado de estas estimaciones ya indica que sería más efectivo en términos relativos actuar sobre la ganadería que sobre las aguas residuales, pero también puede resultar más complicado desde el punto de vista logístico. En cualquier caso, el nivel de complejidad solamente se podrá establecer a partir de estudios específicos y más detallados de estas actividades en la cuenca.

El objetivo de reducir la contribución del embalse del Ebro puede tener más sentido desde el punto de vista hidrológico y geográfico, dada su situación en la cabecera de la cuenca, y la consecuente propagación de las eventuales mejoras hacia aguas abajo, pero también desde el punto de vista de la calidad de la propia masa de agua.

De hecho, bajo un supuesto de reducción la contribución del embalse del Ebro al de Sobrón en un 80%, se podría conseguir un notable descenso de la concentración de fósforo total en el embalse de Sobrón y por lo tanto una reducción significativa de su estado trófico. Este objetivo no resulta descabellado, porque en el caso del embalse del Ebro es posible acometer un plan de actuación que afronte múltiples presiones, abordando tanto las fuentes exógenas como factores endógenos como la explotación hidráulica y el manejo pesquero, que se analizan a continuación.

### **5.3.1. Manejo pesquero**

Un ejercicio adicional que puede tener relevancia en este caso, es considerar la potencial aportación de fósforo debida a las poblaciones de peces del embalse del Ebro. Los censos cuantitativos realizados en este embalse (CHE, 2010) ofrecen una biomasa de 620 t de peces, de las que se estima que el 63% son carpas (*Cyprinus carpio*), es decir 390 t de carpas podrían habitar el embalse. Aparte de estar incluida esta especie en el listado de especies acuáticas invasoras, su especial ecología y fisiología la convierten en un factor muy activo en los flujos de nutrientes.

Las carpas tienen una alimentación omnívora y bentívora, es decir, consumen zoobentos y detritos del fondo. Sin embargo, la distribución de la excreta (y también de la egesta, aunque no se tiene aquí en cuenta por ser particulada y no tan rápidamente biodisponible para las bacterias y las algas) se produce más aleatoriamente en la columna de agua, lo que tendría un efecto de bombeo o de reciclaje interno.

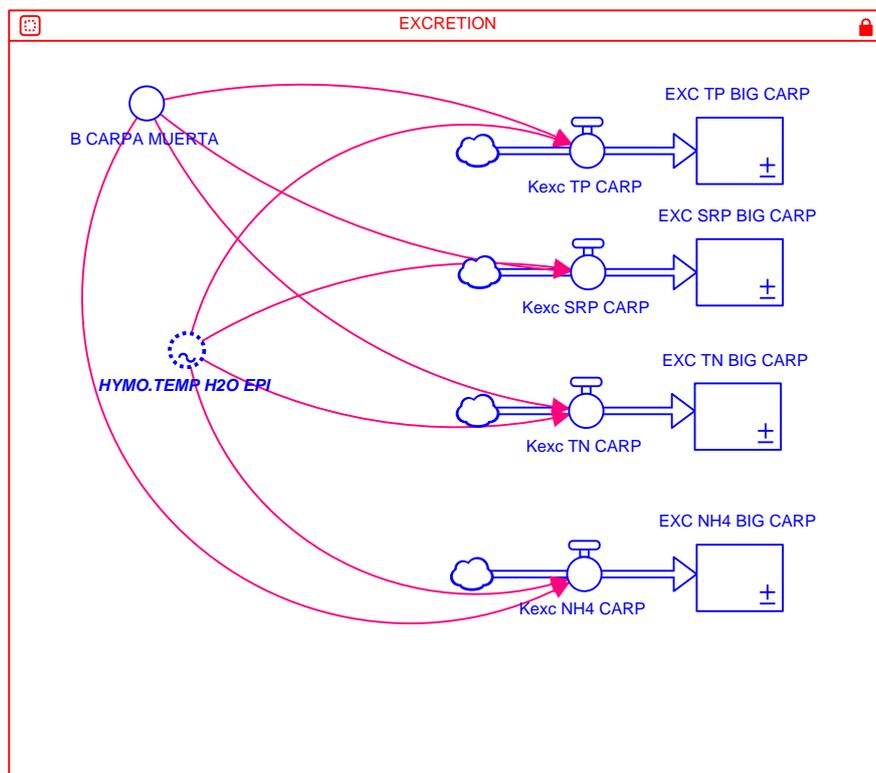
Por este motivo, se han realizado algunas estimaciones preliminares que puedan orientar sobre el potencial papel eutrofizante de estas poblaciones.

El modelo dinámico desarrollado por Ecohydros (Figura 25) para un embalse de parecidas características al del Ebro, permite estimar con resolución diaria la excreción de nutrientes a partir de la tasa de excreción de la carpa ( $P_e$ ) en kg de nutriente/kg de pez/día, para cuatro formas de nutrientes: TP, SRP, TN y  $NH_4$ , y una función de dependencia de la temperatura (Morgan & Hicks, 2013), que tiene una gran influencia en todos los procesos metabólicos al tratarse de animales poiquiloterms. Dichos autores realizaron una serie de experimentos en carpas que permitieron ajustar una regresión entre la tasa de excreción corregida con la temperatura y el peso húmedo del pez:

$$\ln(Pe^{E/kT}) = \ln(P_0) + b \ln(M)$$

Donde:

- M es la biomasa de peces
- T es la temperatura del agua (K)
- E es la energía de activación de las reacciones metabólicas (0.65 eV)
- k es la constante de Boltzmann ( $8.62 \times 10^{-5}$ )



**Figura 25.** Diagrama que muestra las relaciones entre variables en el modelo de excreción de la carpa planteado

Para que estos cálculos tuvieran mayor precisión se necesitaría ajustar el modelo a la realidad hidromorfológica del embalse del Ebro, pero se puede aplicar preliminarmente y en este contexto para tener una idea de la potencial magnitud de este tipo de procesos.

Para ello, se utiliza el valor de biomasa de carpa estimada para el embalse del Ebro como condición inicial del modelo, y el resultado es que solamente la excreción supone 5,3 t de fósforo al año.

Esto implica que si se programara la extracción de la biomasa de carpas esto tendría una reducción mínima esperada en la concentración media de fósforo en el embalse de Sobrón superior a 3 µg/l (solamente por este concepto de excreción, sin contar la egestión ni el fósforo acumulado en los organismos extraídos que acaban muriendo y retornando al sistema), casi como el efecto de aplicar una ulterior depuración del 80% del fósforo a las aguas residuales.

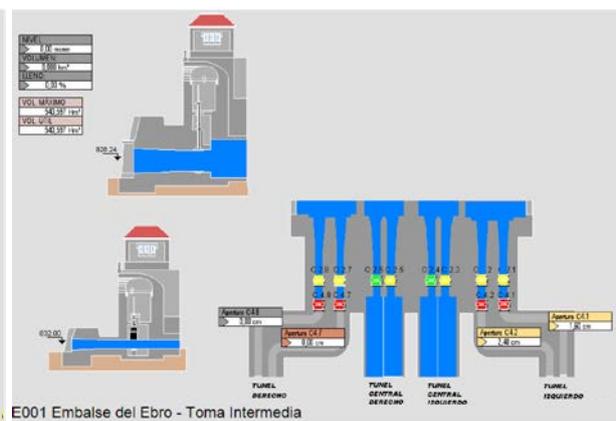
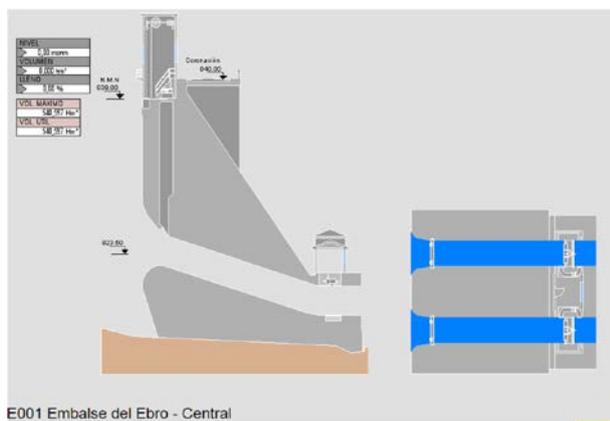
### **5.3.2. Explotación hidráulica**

La presa del embalse del Ebro cuenta con dos salidas principales (Figura 24): Toma de la Central Hidroeléctrica, situada en la cota 823,5 m, y toma intermedia situada en la cota 832 m. La descarga de la presa se produce generalmente por la toma de la C.H., siempre que el caudal no supere los 50 m<sup>3</sup>/s, algo que ocurre de forma muy esporádica. En los casos excepcionales en los que es necesario evacuar un caudal mayor, se recurre a la toma intermedia. Esto ha ocurrido únicamente en 10 días a lo largo de los años analizados (2008 a 2015).

Se ha realizado el ejercicio de estimar la incidencia que podría tener la utilización alternativa de la toma intermedia para la evacuación de agua en la concentración de fósforo en el embalse de Sobrón, ya que al menos en la época estival ambas tomas se encuentran en diferentes estratos de la columna de agua, que pueden tener diferentes concentraciones de fósforo.

Para ello, se ha analizado la información disponible en los informes de la Red CEMAS (CHE) y en un estudio limnológico del ciclo hidrológico 2007/08 (CHE 2008), que incluyó 4 muestreos en diferentes momentos del año y a diferentes profundidades. De esos informes se desprende que el embalse del Ebro no suele presentar una estratificación térmica estable, aunque los datos disponibles de fósforo sí muestran un gradiente vertical, con valores que se incrementan significativamente con la profundidad.

A partir de estos datos, se ha calculado la concentración promedio en la columna de agua en los meses de octubre a junio (24 µg/l), y las concentraciones promedio en las zonas fótica (16 µg/l) y afótica (35 µg/l) en los meses de verano. Estas concentraciones se aplican a la salida que corresponde en función de la profundidad a la que queden en cada momento, y se multiplican por los caudales vertidos (proporcionados por CHE) para obtener las cargas de fósforo que se exportarían desde el embalse del Ebro al cauce aguas abajo.



**Figura 26.** Situación de las diferentes tomas disponibles en el embalse del Ebro para la suelta de agua al río Ebro (imagen superior), y esquemas de alzados de la presa a nivel de las tomas de la C.H. (inferior izquierda) e intermedia (inferior derecha)

Si se utilizara la salida intermedia en vez de la de la C.H. cuando se hay un gradiente de concentración de fósforo en la columna de agua, algo que se estima ocurre en el 25% de los días (y dentro del periodo estival), se evacuaría una menor cantidad de fósforo, dado que en el estrato más superficial la concentración es menor en ese periodo.

Esta época coincide además con la de mayores sueltas de agua, por lo que con esta estrategia de toma alternativa el 52% del volumen anual evacuado procedería de este estrato con menor concentración de fósforo. En consecuencia, con esta estrategia de manejo hidráulico se estima que se reduciría la carga de fósforo en un 33% (en un promedio anual para la serie de años considerada), que es casi la mitad del objetivo planteado de reducción para la aportación del embalse del Ebro (80%).

Traducido en concentración esperada en el embalse de Sobrón, esta reducción de la carga supondría un descenso de 3,5 µg/l respecto al escenario actual.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio realizado en la cuenca hidrográfica del embalse de Sobrón ha permitido alcanzar estimaciones de las aportaciones de fósforo al embalse y de su procedencia, mediante la aplicación de procedimientos semi-empíricos de modelado a los datos disponibles. Estas estimaciones sirven al propósito de planificar la gestión futura del embalse como zona sensible.

Las principales conclusiones que se derivan del Estudio son las siguientes:

- i. La carga de fósforo que recibe el embalse supone que la concentración y el estado trófico de la masa de agua se sitúe en el entorno de la mesotrofia, pero con cierta tendencia a la eutrofia en determinadas condiciones hidro-meteorológicas.
- ii. La fuente que mayor aportación de fósforo genera es la actividad ganadera, que puede suponer hasta el 80% en promedio. Los vertidos de aguas residuales suponen el 18% de la carga que recibe el embalse, proporción que se incrementa hasta casi el 25% en los años más secos, debido a la dependencia que las aportaciones ganaderas tienen de la escorrentía.
- iii. La mayor parte de la carga se produce durante el invierno, exceptuando algún año en el que tiene mayor peso el periodo primaveral. Sin embargo, durante el verano es la aportación de las aguas residuales la que domina, coincidiendo con el periodo de estratificación térmica. Estas variaciones estacionales producirán en el embalse respuestas tróficas diferentes, independientemente de la magnitud de la carga anual, motivo por el que cualquier programa corrector de la eutrofización se debe basar en un análisis dinámico de la evolución estacional.
- iv. Las zonas que mayor aportación de fósforo generan son las unidades de análisis o subcuencas ID1 e ID2, correspondientes al embalse del Ebro. Aunque se ha aplicado un término de retención de fósforo en el propio embalse del Ebro, que es función del tiempo de residencia hidráulica en el mismo, el análisis asume un estado estacionario.

Esto quiere decir que no incluye el desfase temporal que pueda existir entre las entradas y las salidas de nutrientes al embalse, por lo que un pulso de fósforo que entre durante el invierno en el embalse del Ebro podría provocar un incremento de su

concentración en la salida meses después, y en ese caso llegaría al embalse del Sobrón en un periodo diferente y más sensible. Esto implica que la complejidad entre los factores causales y la respuesta trófica del embalse es mayor, lo que incide una vez más en la necesidad de realizar simulaciones dinámicas de los procesos en el embalse.

- v. La subcuenca del río Nela (ID7) es la segunda en importancia en cuanto a la aportación de fósforo, en términos absolutos, al embalse de Sobrón. A diferencia de las anteriores, no existe una retención ni desfase temporal y la carga que genera ingresa mucho más directamente al embalse de Sobrón. Es previsible por tanto que los vertidos de aguas residuales, aunque de menor importancia, tengan un efecto más acusado que los ganaderos sobre el estado trófico del embalse, pero nuevamente esto es algo que solamente una simulación dinámica de la respuesta del embalse puede probar.
- vi. A partir de estas estimaciones y de la tasa de residencia hidráulica, la concentración esperada de fósforo en un supuesto estado estacionario en el embalse ofrece un valor medio de 35  $\mu\text{g/l}$ , con fluctuaciones entre años que oscilan entre 24 y 43  $\mu\text{g/l}$ . Estos valores están en el rango de la eutrofia, pero no muy alejados de la mesotrofia.
- vii. El estado trófico del embalse según la serie de estudios disponibles desde 1991, ha pasado de la eutrofia a la mesotrofia, que es el estado dominante en la última década. El potencial ecológico es predominantemente Moderado, debido tanto al indicador biológico "Fitoplancton" como a los indicadores fisicoquímicos complementarios al biológico.

La concentración de fósforo media en el embalse en los estudios limnológicos realizados es de 28  $\mu\text{g/l}$ , y oscila entre un mínimo de 17  $\mu\text{g/l}$  y un máximo de 33  $\mu\text{g/l}$ . La mayor parte de los años (9 sobre un total de 11) este valor está por encima del límite de la mesotrofia con la eutrofia (24  $\mu\text{g/l}$ ), según la clasificación basada en el índice TSI.

## 7. RECOMENDACIONES Y PROGRAMA DE MEDIDAS

Los análisis y conclusiones alcanzadas en el presente Estudio permiten enfocar una serie de recomendaciones para progresar hacia una mejor gestión de la eutrofización del embalse de Sobrón, catalogado como zona sensible:

### 7.1. OBJETIVOS

El **objetivo operativo** en un primer ciclo de mejora sería bajar la concentración media esperada de fósforo total en el embalse de Sobrón a 24 µg/l, desde los 35 µg/l calculados aquí (o un descenso equivalente si se parte de una descripción distinta de la situación actual). Esa concentración objetivo equivale a un valor del índice TSI de 50 y establece el límite entre mesotrofia y eutrofia según esa escala. Dado que la variabilidad hidro-meteorológica interanual es considerable, este valor debería entenderse como un percentil 90, asumiendo así que puedan darse situaciones extraordinarias por factores no controlables.

Este objetivo, compatible con una mesotrofia estable, sería razonable para un embalse que por su situación y características no tiene un potencial de oligotrofia, si bien se podría plantear un objetivo más exigente en una segunda fase, en función de los resultados alcanzados en la primera, y que se derivaría de un horizonte seleccionado según un indicador de respuesta, como la biomasa y composición del fitoplancton, más que como la concentración de fósforo total únicamente.

Por las múltiples razones expuestas anteriormente, antes de plantearse actuar en otras subcuencas drenantes a Sobrón, cualquier actuación de mejora debería comenzar por la **cuenca y embalse del Ebro**. Como se ha mostrado en el estudio, una reducción en la exportación de fósforo desde el embalse del Ebro en el entorno del 70 al 80% podría ser suficiente para conseguir el objetivo planteado. Con esto se conseguiría además mejorar la calidad del propio embalse del Ebro, que a su vez es zona sensible también, y del tramo del río Ebro entre dicho embalse y el de Sobrón.

Además, la adopción de la estrategia que se plantea tendría un carácter demostrativo y piloto de gran relevancia para la gestión de otras zonas sensibles de la Demarcación del Ebro.

## 7.2. DATOS Y HERRAMIENTAS NECESARIAS

La definición precisa de un programa de medidas requeriría disponer de datos y conocimiento suficiente sobre los flujos de nutrientes en la cuenca y embalse, motivo por el que se propone realizar los siguientes trabajos durante al menos un ciclo hidrológico:

- Medición de alta frecuencia (continuada) de **caudal** y de los **nutrientes** que entran en el embalse por el **río Ebro**, y medición discrecional en algunos  **cursos menores** que representen **parcelas ganaderas**. Se puede adoptar una estrategia heurística (basada en reglas de relaciones entre parámetros) para la estimación de nutrientes a partir de otros parámetros de más sencilla y económica medición de alta frecuencia que el fósforo.
- Medición de alta frecuencia (continuada) y en perfil vertical de la respuesta del embalse en un punto crítico, y además a profundidad fija en al menos otro punto secundario. Estas mediciones deben recoger al menos la radiación, viento, temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, redox, turbidez, CDOM, nitratos y concentración de tipos algales por fluorescencia.
- Para el resto de nutrientes particulados y disueltos se realizarán perfiles del mismo tipo y análisis de agua y sedimentos discretionales en diferentes puntos del embalse y momentos del año, con el fin de tener datos para calibrar y verificar los modelos de simulación. También de forma discrecional, y con el mismo objeto, se deberán realizar determinaciones taxonómicas y estimación de biomasa (o biovolumen) del fitoplancton, zooplancton y zoobentos, y una actualización de la de peces.
- **Modelado de cuenca:** Se podría adoptar una estrategia similar a la aplicada en este estudio pero con mayor resolución (modelo físico de la hidrología y erosión) e incorporando información más detallada del comportamiento del ganado, funcionamiento de las explotaciones ganaderas y también de los volúmenes y concentración de nutrientes en los vertidos principales.
- **Modelado de embalse:** Se requiere la aplicación de un modelo hidrodinámico 3D de resolución subdiaria, acoplado a un modelo biogeoquímico que incluya los procesos principales relacionados con los nutrientes y el fitoplancton, tanto en el agua como en los sedimentos.

**Modelado de dinámica de peces:** A partir de la actualización de datos cuantitativos sobre las poblaciones de peces del embalse, se debería modelar el crecimiento, alimentación y excreción de las especies dominantes, con el fin de estimar la retirada de fósforo que se conseguiría con una determinada estrategia de manejo pesquero.

### 7.3. PROGRAMA DE MEDIDAS

Se enfoca de entrada en el embalse del Ebro y su cuenca, aunque eso no es óbice para que de forma complementaria (probablemente en una etapa posterior) se actúe sobre otros puntos de la cuenca del embalse de Sobrón.

Cuando se disponga de las herramientas de simulación descritas ya calibradas, se estará en situación de proponer y evaluar ambiental y económicamente diferentes combinaciones de medidas a adoptar en el embalse del Ebro. A raíz de las conclusiones del presente Estudio, hay tres aspectos sobre los que parece oportuno actuar en una primera instancia, antes incluso de abordar ulteriores tratamientos de las aguas residuales, al menos con los datos disponibles actualmente. Estos aspectos, con los que se podría alcanzar el objetivo planteado, se tratan con mayor detalle a continuación.

#### 7.3.1. Manejo de la carga ganadera

Una vez evaluadas las prácticas ganaderas concretas, se podrán proponer mejoras en dichas prácticas que redunden en una menor aportación de nutrientes a las aguas superficiales y en particular al embalse. Se debe tener en cuenta que una pequeña reducción de estas aportaciones puede suponer mucha diferencia en la masa de nutrientes que llega al embalse.

Entre las prácticas más asequibles están impedir el acceso a determinadas zonas del embalse (puede ser incluso solamente en determinados momentos o épocas) con un vallado perimetral y reubicación de abrevaderos, así como la instalación en puntos críticos de bandas de vegetación riparia o de macrófitos que requieran bajo mantenimiento. Por otro lado, es posible intervenir en el manejo de los residuos ganaderos, maximizando su reciclaje y diversidad de usos (por ejemplo para obtención de energía), y mejorando las técnicas de abonado para que los nutrientes se fijen en el suelo.

Otras medidas que pueden resultar útiles según los casos son el desvío de aguas de escorrentía limpias de las zonas de uso ganadero más intenso, como corrales y granjas, así

como la aplicación de enzimas con actividad fitasa en la comida para mejorar la absorción de fósforo en el intestino del ganado.

Idealmente, todas estas medidas se deberían organizar en un plan consensuado con las CCAA implicadas.

### **7.3.2. Manejo hidráulico del embalse**

Cualquier medida dirigida a que la toma de la Central Hidroeléctrica se produzca a un nivel superior al actual, o bien a homogeneizar la concentración de fósforo en esa porción de la columna de agua (al menos en los meses de verano), puede tener relevancia en la carga de fósforo que recibe el embalse de Sobrón.

A partir de los datos disponibles, se ha estimado que por este concepto existe un margen máximo del 33% sobre el total de la carga de fósforo que actualmente recibiría el embalse de Sobrón procedente del embalse del Ebro.

### **7.3.3. Manejo pesquero**

Se ha mostrado en el presente informe cómo la retirada de una parte de la producción de peces del embalse puede suponer una diferencia significativa en la concentración y evacuación de nutrientes al río Ebro aguas abajo del embalse homónimo. El manejo activo de las poblaciones de determinadas especies de peces puede entrañar beneficios para la calidad del agua de los embalses y eso tiene implicaciones en la forma en que se debe afrontar estas cuestiones, puesto que afecta tanto a las competencias en materia de pesca y biodiversidad como a la de calidad de las aguas y potencial ecológico.

En el caso de especies como la carpa, existe además un potencial efecto de bombeo interno de nutrientes durante el periodo de máximo crecimiento algal y de uso más intenso del agua, pero además de esto los peces constituyen en general un sumidero de nutrientes en el ecosistema (Sereda & *al.*, 2008).

Por ello, se recomienda vivamente avanzar en la definición y ejecución de un **Programa de descaste de invasoras y de retirada selectiva de biomasa de peces en el embalse del Ebro**, algo que habría que hacer en coordinación con las administraciones de pesca de las CCAA de Cantabria y de Castilla y León.

Aparte de la actividad pesquera deportiva, entre las técnicas de extracción selectiva de biomasa de peces se cuenta con diferentes posibilidades, como por ejemplo las siguientes:

- Pesca con redes de cerco desde embarcaciones y desde playas, apoyadas en mecanismos etológicos de concentración de ictiofauna, como pueden ser las cortinas de burbujas.
- Sistemas de guiado eléctrico de peces de largo alcance. Se trata de disponer líneas de electrodos en zonas críticas o inaccesibles, que en el momento del tratamiento (duración de pocas horas en sesiones discretionales) mediante un equipo eléctrico de alta potencia, se activan secuencialmente para guiar a los peces hacia trampas de captura donde se seleccionan y extraen.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

CHE. 1996. *Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca Hidrográfica del Ebro*. Embalse de Sobrón. Informe realizado por Limnos.

CHE. 2008. Caracterización limnológica, estimación del aporte de nutrientes y propuesta de medidas correctoras en el embalse del Ebro. Informe realizado por Infraeco.

CHE. 2010. Estudio de evaluación de la población piscícola de los embalses de Eugui, Irabia y Ebro de la Cuenca del Ebro. Informe realizado por Ecohydros.

CHE. 2010-2015. *Explotación de la Red de Control Operativo en Embalses en aplicación de la DMA en la cuenca del Ebro*. Informes anuales realizados por el Área de Limnología del Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva, de la Universitat de Valencia.

Dudley, Bernard; May, Linda. 2007. *Estimating the phosphorus load to waterbodies from septic tanks*. Centre for Ecology and Hydrology, 45pp. (CEH Project Number: C03273, C01352).

Evans, B.M. & K.J. Corradini. 2012. *MapShed. VERSION 1.0. USERS GUIDE*. Penn State Institute of Energy and the Environment. The Pennsylvania State University.

Gisbert Blanquer, J. M., S. Ibáñez Asensio, and H. Moreno Ramón. 2012. *El factor K de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.

Haith, D. A. and L. L. Shoemaker. 1987. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. *Water Resources Bulletin* 23 (3): 471-478.

Haith, D. A., R. Mandel and R. S. Wu. 1992. *GWLF. Generalized watershed loading functions. Version 2.0. User's Manual*. Cornell University. USA. 59 pp.

Infraestructura y Ecología. 2003. *Seguimiento de la calidad de las aguas en embalses de zonas sensibles. Documento de síntesis* (pp. 96). Madrid: Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de Medio Ambiente.

Jiang, F. et al. 2005. *Estimation of costs of phosphorus removal in wastewater treatment facilities: Adaptation of existing facilities*. Water Policy Working Pap. 2005 – 011. Georgia State Univ., Atlanta.

Judd, S.J., Bullock, G., 2003. The fate of chlorine and organic materials in swimming pools. *Chemosphere*, 5 (19): 869-879.

Moore, I. D. and J. P. Wilson, 1992. Length-slope factors for the revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 47, pp. 423-428.

Morgan, D. J. & Hicks, B. 2013. A metabolic theory of ecology applied to temperature and mass dependence of N and P excretion by common carp. *Hydrobiologia* 705(1): 135-145.

Nuclenor. 1999-2015. *Estudio limnológico del embalse de Sobrón*. Informes anuales realizados por URS.

Ogrosky, H.O. and V. Mockus. 1964. Hydrology of agricultural lands. In V.T. CHOW (Ed.) *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, NY. 21 pp.

Pandey, V. (2007). *Analysis and modeling of cattle distribution in complex agro-systems of South Florida*. (PhD), University of Florida.

Preston et al. 2011. Factors Affecting Stream Nutrient Loads: A Synthesis of Regional SPARROW Model Results for the Continental United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 47: 891-915.

Salas Avilés, E. 2011. *Morfología y grado de degradación de los suelos del término de Cuevas del Becerro (Malaga)*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Almería.

Schneiderman, E. M. 2006. Modeling Phosphorus with the Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) Model, p. 277-297. *Modeling Phosphorus in the Environment*. CRC Press.

Sereda, J. M., Hudson, J. J., Taylor, W. D., & Demers, E. (2008). Fish as sources and sinks of nutrients in lakes. *Freshwater Biology*, 53(2), 278-289.

Soil Conservation Service. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release No. 55 (2nd ed.). U.S. Department of Agriculture, Syracuse, NY.

Soupir, M.L., S. Mostaghimi, and E.R. Yagow, 2006. Nutrient transport from livestock manure applied to pastureland using phosphorus-based management strategies. *J. Environ. Qual.*, 35:1269-1278.

Synconsult. 1991. *Estado actual y tendencias de la calidad y grado de eutrofización en los embalses de la cuenca del Ebro: Embalse de Sobrón*. Confederación Hidrográfica del Ebro.

Tarboton, D. G. and D. P. Ames, (2001). Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. In *World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE.

Tarboton, D. G., (1997). A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.

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.

Wieskel, P. & Howes, B. 1992. Differential transport of sewage-derived nitrogen and phosphorus through a coastal watershed. *Environ. Sci. Technol.* 26, no. 2.