



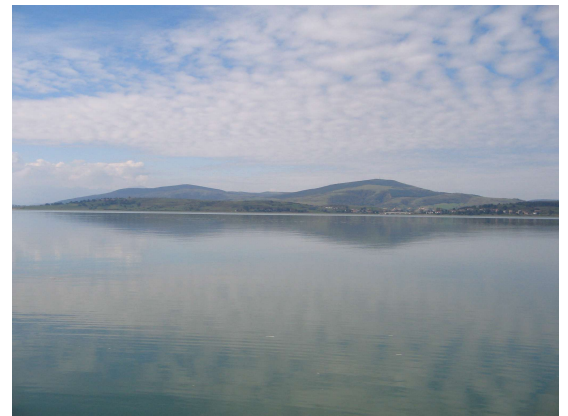
MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL EBRO

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA, ESTIMACIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES Y PROPUESTA DE MEDIDAS CORRECTORAS EN EL EMBALSE DEL EBRO

MEMORIA



ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EMBALSE Y SU CUENCA	3
2.1. Ámbito geográfico	3
2.2. Actividades en la cuenca	6
3. CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	9
3.1. Indicadores hidromorfológicos	9
3.2. Indicadores físico-químicos	10
3.3. Indicadores de calidad biológica	11
3.4. Estratificación del ámbito y planteamiento de estaciones de muestreo	11
3.5. Estaciones de muestreo	12
3.6. Frecuencia de muestreos y trabajos de campo	13
3.7. Análisis de laboratorio	17
3.8. Procesamiento de datos	19
3.9. Índices y diagnóstico del grado trófico	20
4. ESTIMACIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES. METODOLOGÍA EMPLEADA	22
4.1. Cálculo de aportes de nutrientes por el tributario	22
4.2. Cálculo de aportes de nutrientes en la cuenca de escorrentía	23
4.2.1. Delimitación del área fuente o cuenca de escorrentía directa	26
4.2.2. Cálculo de las aportaciones hídricas	26
4.2.3. Cálculo de los aportes de sedimento	32
4.2.4. Cálculo de aportes de nutrientes	34
4.3. Aportes por recarga interna desde el embalse	40
4.4. Balance de nutrientes en el embalse	40
4.5. Estimación de la carga crítica	40

5. RESULTADOS. CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA	41
5.1. Características morfométricas e hidrológicas	41
5.2. Características físico-químicas de las aguas	43
5.2.1. Embalse	43
5.2.2. Tributarios	45
5.3. Hidroquímica de las aguas	47
5.3.1. Embalse	47
5.3.2. Tributarios	55
5.4. Sedimentos	60
5.4.1. Embalse	60
5.4.2. Tributarios	63
5.5. Fitoplancton y clorofila <i>a</i>	64
5.5.1. Composición y estructura poblacional	65
5.5.2. Calidad bioindicadora	68
5.6. Zooplancton	68
5.7. Diagnóstico del grado trófico	72
6. RESULTADOS. ESTIMACIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES	75
6.1. Aportes de nutrientes por el tributario	75
6.2. Aportes de nutrientes en la cuenca de escorrentía directa	82
6.2.1. Aportes por usos del suelo	82
6.2.2. Aportes procedentes de excretas ganaderas	83
6.2.3. Aportes de fuentes puntuales en cuenca de escorrentía directa	85
6.2.4. Aportes totales en la cuenca de escorrentía directa	87
6.2.5. Aportes totales al embalse e importancia relativa de las fuentes	88
6.3. Evacuación de nutrientes por la presa	89
6.4. Estimación de la recarga interna de fósforo	90
6.5. Balance de nutrientes en el embalse	91
6.6. Estimación de la carga crítica	91
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	92

8. PROPUESTA DE MEDIDAS CORRECTORAS	94
8.1. Tanque de tormenta en la depuradora de Reinosa-Campoo de Enmedio	95
8.2. Puesta en funcionamiento de las depuradoras de Arija	97
8.3. Sistema de saneamiento de municipios aledaños al embalse	99
8.4. Gestión y control de explotaciones ganaderas	101
8.5. Instalación de un cerramiento rústico en el perímetro del embalse	103
8.6. Creación de bandas de vegetación en las márgenes del embalse	104
8.7. Preembalse en la cola de Lanchares	105
8.8. Reducción de carga al embalse con las medidas propuestas	107
8.9. Coste estimado de las medidas propuestas	108

Anejo 1. Protocolos analíticos

Anejo 2. Resultados físico-químicos

Anejo 3. Resultados químicos

Anejo 4. Resultados biológicos

Anejo 5. Caracterización de vertidos

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Evolución histórica del grado trófico del embalse de Ebro	1
Tabla 2. Descripción de los puntos de muestreo.	13
Tabla 3. Analítica realizada y métodos de referencia.	18
Tabla 4. Localización de la estación meteorológica.....	29
Tabla 5. Número de curva asignada a cada tipo de uso del suelo.	30
Tabla 6. Coeficiente de Evapotranspiración, horas de luz y periodos de crecimiento vegetal.	31
Tabla 7. Valores del factor R para una latitud de 42°.....	33
Tabla 8. Valores del factor LS en función de la pendiente.	33
Tabla 9. Valores del Factor C o Factor vegetación.	34
Tabla 10. Concentración de nutrientes en las aguas de escorrentía, según usos del suelo.....	35
Tabla 11. Carga de nutrientes según el tipo de ganado.	36
Tabla 12. Carga de nutrientes en los sedimentos, para el cálculo en la CED.....	37
Tabla 13. Aportación de nutrientes por habitante y año en viviendas alejadas la masa de agua.	39
Tabla 14. Carga unitarias de nutrientes y dotación de agua per capita.	39
Tabla 15. Carga de nutrientes retirada por las plantas.	39
Tabla 16. Campañas y fechas de muestreo.....	41
Tabla 17. Parámetros hidráulicos mensuales en el periodo de estudio.	42
Tabla 18. Valores medios anuales de los descriptores del grado trófico.....	49
Tabla 19. Valores medios anuales obtenidos en los tributarios.....	55
Tabla 20. Especies de zooplancton determinadas en el embalse del Ebro.....	71
Tabla 21. Catalogación del grado trófico del embalse según los diferentes índices.	73
Tabla 22. Aportes de nutrientes por el río Ebro tras su paso por Reinosa (T1).	75
Tabla 23. Aportes de nutrientes del río Ebro antes de Reinosa (T5).	76
Tabla 24. Aportes de nutrientes del río Híjar antes de Reinosa (T6).	76
Tabla 25. Aportes de nutrientes del río Izarilla antes de Reinosa (T7).....	77
Tabla 26. Contribución de las distintas subcuencas de T1.....	77
Tabla 27. Datos analíticos del agua aliviada por la depuradora de Reinosa.	78
Tabla 28. Cabezas de ganado según tipo en la subcuencas aguas arriba de Reinosa	79
Tabla 29. Estimación de aportes ganaderos aguas arriba de Reinosa.....	79
Tabla 30. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T5.....	80
Tabla 31. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T6.....	80
Tabla 32. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T7.....	81
Tabla 33. Distribución de los aportes de las subcuencas ubicadas aguas arriba de Reinosa,	81
Tabla 34. Usos del suelo y parámetros para la estimación de la escorrentía y la erosión.	82
Tabla 35. Balance hidráulico en la cuenca de escorrentía directa (año 2007-2008).	83
Tabla 36. Resultados de los aportes en la CED según los distintos tipos de suelo.	83

Tabla 37. Nº de cabezas de ganado en la cuenca de escorrentía directa.	83
Tabla 38. Resultados de los aportes ganaderos en la cuenca de escorrentía directa.	84
Tabla 39. Aportes por vertidos urbanos en la cuenca de escorrentía directa.	86
Tabla 40. Resumen de los aportes de nutrientes según las distintas fuentes.	88
Tabla 41. Contribución de cada subcuenca al aporte total.	88
Tabla 42. Estimación de salida de nutrientes en el embalse.	89
Tabla 43. Estimación de la recarga interna de fósforo (en t)	90
Tabla 44. Balance de nutrientes bruto y por unidad de volumen en el embalse.	91
Tabla 45. Parámetros de cálculo y carga crítica.	92
Tabla 46. Síntesis de las medidas propuestas.	95
Tabla 47. Reducción de fósforo según las medidas propuestas.	107
Tabla 48. Estimación de costes de las medidas correctoras propuestas.	108

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Distribución municipal de la población.	6
Gráfico 2. Distribución de la cabaña ganadera en la cuenca de Ebro.	8
Gráfico 3. Volumen embalsado y tiempo de retención del agua.	43
Gráfico 4. Evolución anual de los sólidos en suspensión y valores medios de disco de Secchi. .	45
Gráfico 5. Datos físico-químicos de tributarios. Comparativa entre las campañas realizadas.	46
Gráfico 6. Composición iónica de las aguas en términos porcentuales.	47
Gráfico 7. Evolución temporal de la DBO ₅	48
Gráfico 8. Evolución temporal de la DQO.	49
Gráfico 9. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total.	50
Gráficos 10. Evolución temporal del fósforo total en la capa fótica.	51
Gráfico 11. Evolución temporal de los ortofosfatos en la capa fótica.	52
Gráfico 12. Evolución anual del ratio NIT/PO ₄ en la capa fótica.	53
Gráfico 13. Evolución temporal de la sílice en la capa fótica.	54
Gráfico 14. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total en los tributarios.	56
Gráfico 15. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total aguas arriba de Reinosa.	56
Gráfico 16. Evolución temporal del fósforo total de los tributarios.	57
Gráfico 17. Evolución temporal del fósforo total aguas arriba de Reinosa.	58
Gráfico 18. Evolución temporal de los ortofosfatos en los tributarios del embalse.	59
Gráfico 19. Evolución temporal de los ortofosfatos aguas arriba de Reinosa.	59
Gráfico 20. Materia orgánica en sedimentos.	60
Gráfico 21. Fósforo inorgánico intercambiable en sedimentos.	61
Gráfico 22. Valores de hierro en sedimento.	62
Gráfico 23. Valores de manganeso en sedimento.	62
Gráfico 24. Comparación entre tributarios de la materia orgánica.	63
Gráfico 25. Comparativa de fósforo inorgánico intercambiable entre tributarios.	64
Gráfico 26. Evolución temporal de los principales grupos algales determinados en el embalse. .	67
Gráfico 27. Abundancia relativa de los principales grupos algales.	67
Gráfico 28. Sucesión temporal de los principales grupos de zooplancton.	70

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva Marco de Aguas 60/2000/CE designa como zonas protegidas “todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial en virtud de una norma comunitaria específica relativa a la protección de sus aguas superficiales”. El Anexo IV de esta norma comunitaria indica que el registro de zonas protegidas incluirá, entre otras, “las zonas sensibles en lo que a nutrientes respecta, incluidas... las zonas declaradas sensibles en el marco de la Directiva 91/271/CEE.”

Mediante resolución de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, de fecha 10 de julio de 2006 (B.O.E. de 28 de julio), se declararon las zonas sensibles en las cuencas hidrográficas intercomunitarias. En la cuenca del Ebro esta declaración comprende 25 embalses, entre los que se encuentra el embalse del Ebro, además del Delta del Ebro y un tramo del río Bergantes.

Los estudios limnológicos realizados por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el embalse del Ebro, desde el año 1996, indicaron su alto grado trófico, lo que justificó su declaración como zona sensible.

Tabla 1. Evolución histórica del grado trófico del embalse de Ebro¹

Año de estudio	1996	2001	2004	2005
Grado trófico	Eutrófico	Eutrófico	Mesoeutrófico	Eutrófico

La eutrofización es un proceso de enriquecimiento de las aguas en sustancias nutritivas primarias (nitrógeno y fósforo principalmente), que si es excesivo conduce a modificaciones en los ecosistemas acuáticos, tales como un aumento incremento del desarrollo algal y una simplificación de la estructura de las comunidades biológicas del sistema. A su vez, y como consecuencia del incremento del desarrollo algal, hay una pérdida de transparencia del agua y pueden aparecer olores y sabores desagradables, e incluso compuestos tóxicos por el desarrollo de ciertas algas cianofíceas que, con sus

¹ Fuente: Plan hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla

peores consecuencias, dificultan y limitan los posibles usos a los que se están destinados los recursos.

Por su parte, el enriquecimiento de nutrientes en las aguas puede tener un origen natural, pero normalmente se ve incrementado por las actividades humanas en el área de drenaje. Las actividades humanas que favorecen el aumento de las aportaciones de fósforo y nitrógeno son, en términos generales, los efluentes domésticos e industriales, el incorrecto uso del suelo, que acrecienta los procesos de erosión, y el uso abusivo de fertilizantes, que en conjunto determinan la aceleración de los procesos de eutrofización natural.

Como uno de los principales objetivos que la Directiva Marco pretende es alcanzar el buen estado de las masas de agua (buen potencial ecológico en el caso de embalses), es necesaria la adopción de un programa de medidas para corregir la tendencia a la eutrofización de las zonas sensibles.

De aquí surge la necesidad de realizar el presente trabajo, cuyos principales objetivos son:

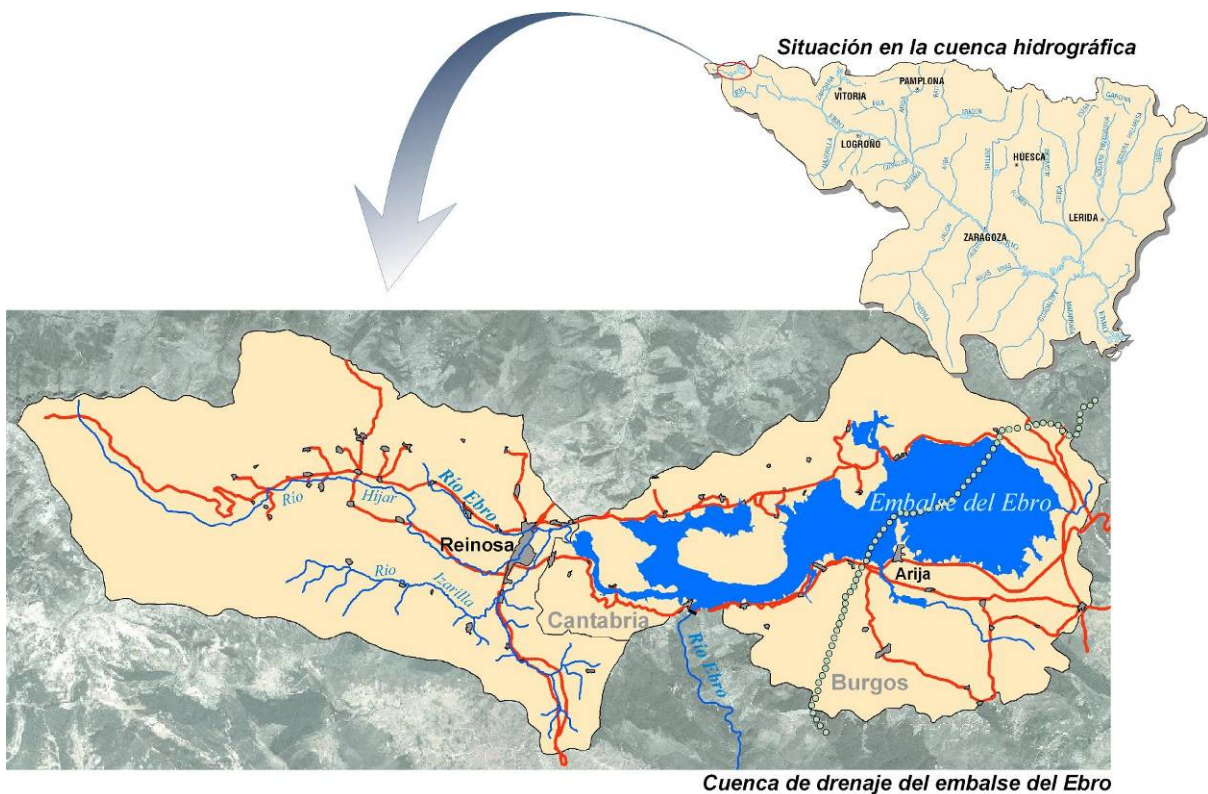
- a. Analizar los principales parámetros que afectan a la eutrofización en el embalse del Ebro.
- b. Obtener un conocimiento adecuado de su estado trófico.
- c. Estimar la carga total de nutrientes que ingresa el embalse.
- d. Proponer una serie de medidas correctoras, con objeto de minimizar el grado trófico del embalse.

Para dar respuesta a estos objetivos se genera el presente documento, donde se precisa la metodología empleada, así como los resultados, conclusiones obtenidas y una serie de medidas para mejorar el grado trófico del embalse. Por último citar que, en un volumen independiente, se presentan cinco anejos con los resultados de las distintas campañas analíticas realizadas.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EMBALSE Y SU CUENCA

2.1. Ámbito geográfico

El embalse se sitúa en la cabecera del río Ebro y regula principalmente sus aguas, aunque también las de otros ríos y arroyos de menor entidad, entre los que destacan los ríos Virga y Nava, por la margen izquierda y el arroyo Lanchares, por la margen derecha. Cabe mencionar que el río Ebro, antes de su ingreso al embalse tan sólo recibe aportaciones, de cierta magnitud, de los ríos Híjar e Izarilla.



La presa, terminada en 1.945, se sitúa en la localidad de Arroyo de Valdearroyo, pedanía del término municipal de Las Rozas (Cantabria), mientras que el embalse se extiende hasta anegar terrenos de la provincia de Burgos.

Se trata de un embalse de grandes dimensiones y morfología heterogénea. En su parte más occidental presenta un brazo estrecho y alargado, conformado por el río Ebro, que se ensancha a la altura de la presa, hasta llegar a presentar, en su parte más oriental, una amplia extensión de agua, que anega terrenos de la provincia de Burgos. También

presenta como rasgo característico la península que conforma en la parte central del embalse, denominada “Península de La Lastra”.

Las aguas del embalse se destinan principalmente al riego, previo suministro de éstas a los canales de Lodosa, Imperial, Tauste y Pina de Ebro. También se destinan a la producción hidroeléctrica, mediante una central instalada a pie de presa, y al abastecimiento a poblaciones, entre el que destaca el abastecimiento a Zaragoza. El embalse dispone de un trasvase reversible que permite trasvasar aguas a la cuenca del Besaya. A su vez, en el embalse se realizan actividades recreativas (pesca y navegación principalmente).

La cuenca de drenaje al embalse del Ebro tiene una superficie total de 46.320 ha. Su altitud media es de 1.200 msnm, presentando la cota máxima el Pico Tres Mares (2.275 msnm), ubicado en la Sierra de Peña de Labra, mientras que la cota del embalse se sitúa a 839 msnm.

Los parámetros climáticos más relevantes de la cuenca, definidos por la estación climática de Las Rozas de Valdearroyo, son:

- Temperatura media anual: 9,8 °C
- Precipitación media anual: 949 mm
- Período de heladas: 8 meses
- ETP media anual: 623 mm
- Período seco: 2 meses
- Tipo de clima (según clasificación de Papadakis): Mediterráneo templado fresco

El periodo estudiado puede considerarse seco, si se compara la precipitación media acaecida, 666 mm, y la precipitación media anual (949 mm) registrada en la estación de Arroyo de Valdearroyo, para una serie de 18 de años.

La vegetación en la parte alta de la cuenca presenta bosques mixtos de coníferas y frondosas adaptadas a la altitud, que son sustituidos, en la parte baja por bosques de caducifolias y pastos en las zonas menos escarpadas. En la zona donde se instala el embalse, predominan los litosuelos cálcicos de poca profundidad, limitados por una roca

caliza continua, mientras que la cuenca de drenaje del río Híjar el suelo es de tipo luvisol crómico, con acumulación de arcillas y un grado de saturación de más del 50%.

Parte de la cuenca y, en su totalidad, el embalse del Ebro, se encuentran protegidos, a través de los siguientes Lugares de Interés Comunitarios (LICs):

- *Valles altos del Nansa y Saja y Alto Campoo* (LIC ES1300021), que protege la parte alta de la cuenca. Se trata de una zona de alta y media montaña, con importante representación de bosques caducifolios y pastizales de alta montaña.
- *Río y embalse del Ebro* (LIC ES1300013): Este espacio protege en su totalidad la parte cantábrica del embalse, incluyendo en su protección las riberas de los ríos Ebro e Híjar. El espacio también protege las riberas del Ebro, y alguno de sus afluentes, aguas abajo del embalse. Se caracteriza por la presencia de matorral y bosques de ribera de alto interés, siendo además un lugar de invernada de aves acuáticas.
- *Embalse del Ebro* (ES412009): Incluye la parte burgalesa del embalse, así como su entorno cercano, englobando pastizales, turberas, zonas de matorral y algún bosque bien desarrollado inmediato al embalse.

Además, en el área de drenaje se encuentran cuatro zonas de especial protección para las aves (ZEPAs). Dos de ellas se ubican en la parte alta de la cuenca, *Sierra de Híjar* (ES0000250) y *Sierra del Cordel y cabeceras del Nansa* (ES0000251), mientras que las otras dos protegen al embalse del Ebro, tanto la parte cantabra (ES0000252) como la burgalesa (ES0000191), ya que se trata de una zona de importancia para el paso migratorio de aves de la costa cantábrica hacia el interior y un lugar de reproducción de interés para ciertas especies acuáticas.

Por último citar, que el embalse del Ebro forma parte del registro de zonas protegidas establecido por la Confederación del Ebro, en 2005, para dar respuesta a lo dispuesto en el artículo 6 de la DMA. Su inclusión en el registro se debe a que presenta captaciones para el abastecimiento de más de 50 habitantes (o de más de 10 m³/día); está declarado como zona sensible, (según la resolución de la Secretaría General para el

Territorio y la Biodiversidad, de fecha 10 de julio de 2006), debido a sus problemas de eutrofización; y se trata de una zona de protección de hábitat o especies relacionadas con el medio hídrico, descritas en los párrafos anteriores.

2.2. Actividades en la cuenca

La cuenca engloba a los términos municipales de Hermandad de Campoo de Suso, Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Las Rozas de Valdearroyo y Reinosa, pertenecientes a Cantabria, y Arija, Alfoz de Santa Gadea, Valle de Valdebezana y Alfoz de Bricia.

Según los datos del censo de población de 2006, el número de habitantes de todos ellos es de 17.590, lo que supone que la cuenca de drenaje presente una baja densidad de población (38 hab/km²). Prácticamente, la totalidad de los habitantes (97%) se concentra en los términos cantabros, y más concretamente en la población de Reinosa que, con 10.370 habitantes, alberga en torno al 60% de toda la población del área de drenaje. En la parte burgalesa destaca el municipio de Arija, con 192 hab.

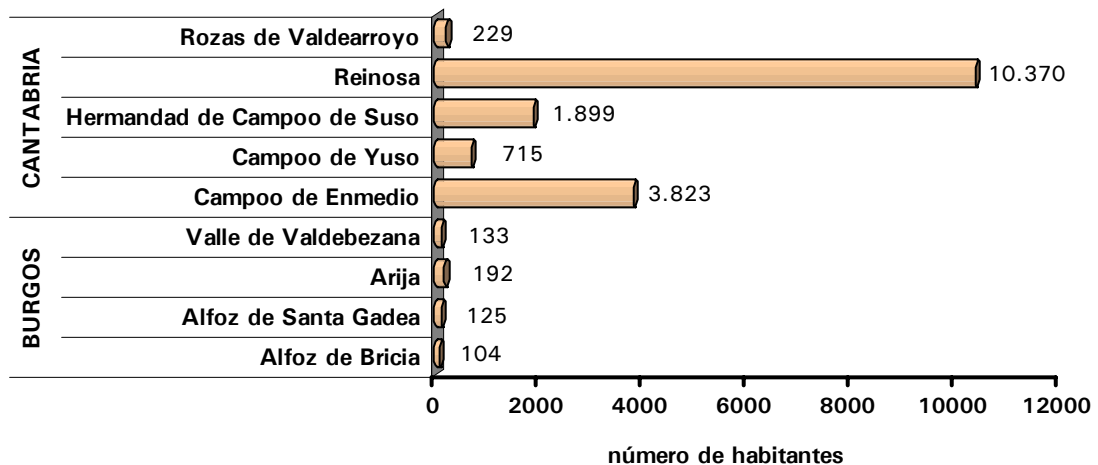


Gráfico 1. Distribución municipal de la población.

La actividad preponderante en la zona es la del sector servicios. Entre los que destaca la estación invernal de esquí Alto Campoo, situada en la cabecera de la cuenca, cuyos remontes tienen una capacidad de transporte en torno a 13.000 esquiadores a la hora.

Respecto al sector agrícola destacan los municipios de Campoo de Yuso, Alfoz de Bricia y Alfoz de Santa Gadea. El sector industrial predomina en Arija, aunque el mayor número de afiliados a la seguridad social lo presentan los términos de Reinosa y Campoo de Enmedio².

Las principales empresas se ubican en Reinosa, siendo los ramos más significativos a los que pertenecen el siderometalúrgico, el alimenticio y el de elaboración de material eléctrico. En Arija la principal actividad industrial es la extracción de áridos, que se obtienen del fondo del embalse, lo que incrementa ostensiblemente la turbidez de sus aguas.

Entre las actividades que originan aportes significativos de nutrientes al embalse destaca la E.D.A.R. de Reinosa-Campoo de Enmedio, que trata las aguas de los núcleos de Reinosa, Bolmir, Nestares, Requejo y Matamorosa, dando servicio a una población de 13.504 hab. Está diseñada para 21.076 habitantes equivalentes y dispone de tratamiento terciario con eliminación de nutrientes. Aunque el tratamiento es muy efectivo, existe un problema consistente en que la red de saneamiento, además de las aguas residuales, recoge las aguas del freático en épocas de exceso, con lo que el volumen de agua que ingresa en la depuradora es excesivo, produciéndose un vertido sin tratar por el aliviadero.

El resto de núcleos presentes en la cuenca son de poca entidad y, en términos generales, poseen red de saneamiento y sistema de depuración. Normalmente se trata de fosas sépticas, aunque la mayoría de ellas se encuentran en desuso y no tienen un mantenimiento adecuado. Todas estas infraestructuras se realizaron en la década de los ochenta, aproximadamente entre los años 1982-1986. Entre estos núcleos, Corconte y Arija son los núcleos ribereños con los sistemas de depuración más modernos, aunque cabe destacar que las depuradoras de Arija se encuentran totalmente abandonadas, con lo que sus aguas residuales ingresan directamente al embalse.

² Fuente: Plan hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla-Escalada

La actividad ganadera representa también una fuente importante de nutrientes al embalse. La carga ganadera que soporta la cuenca supera las 36.000 cabezas de ganado. La categoría predominante es la bovina, que representa el 56% del total de la cabaña ganadera asentada en la cuenca vertiente, en orden de importancia la sigue la categoría equina (27%). Las categorías ovinas y caprinas representan el 14%, (9% y 5%, respectivamente). El 4% restante se reparte entre las categorías de porcino y aves que, teniendo en cuenta su régimen de explotación (intensivo) y la proporción que representa respecto al total, su contribución a los aportes de origen ganadero puede considerarse prácticamente nula.

La proporción de las distintas categorías en la cuenca de escorrentía directa presenta rangos similares al total. Con las categorías bovina y equina como predominantes, ya que, entre ambas, representan el 81% del total de la cabaña ganadera en esta subcuenca (57 y 24%, respectivamente).

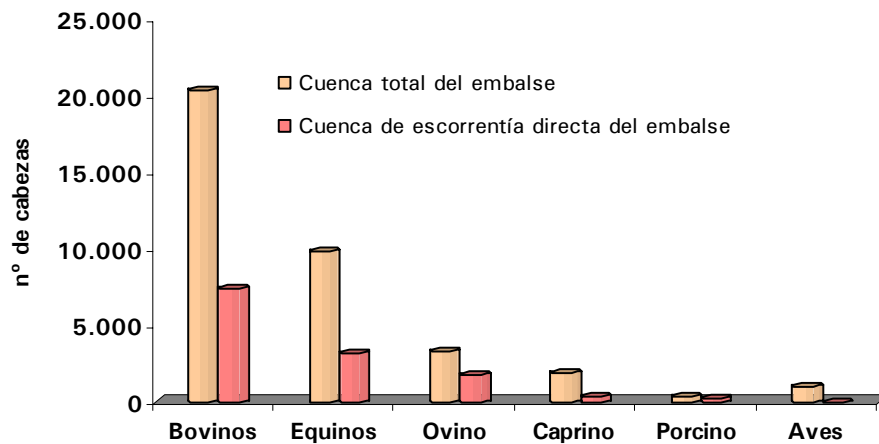


Gráfico 2. Distribución de la cabaña ganadera en la cuenca de Ebro.

3. CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

Se parte de la base de que, para alcanzar un diagnóstico no sesgado, se requiere información muy diversa acerca de los factores naturales y antrópicos, así como de las peculiaridades de cada embalse que pueden modificar la respuesta a esos factores.

La caracterización limnológica del embalse del Ebro se ha llevado a cabo empleando los parámetros e indicadores más relevantes para el diagnóstico trófico de las aguas. Los parámetros empleados se pueden agrupar según el siguiente formato:

3.1. Indicadores hidromorfológicos

Tasa de renovación hidráulica: que indica el número de veces que se renueva totalmente la masa de agua en un periodo determinado. Lo habitual es que se considere un año hidrológico y su estimación se realiza considerando los caudales de entrada (T_e) y de salida (T_s).

Profundidad media: utilizada como un indicador básico de las posibles heterogeneidades verticales y de la capacidad de asimilación del sistema. En principio, cuanto más somero es un embalse menor capacidad de asimilación y mayor potencial trófico.

Desarrollo de volumen: índice que refleja la forma del cuenco del embalse. Establece una comparación entre el volumen del embalse y el de un cono ideal con la misma superficie y profundidad máxima del embalse. La expresión empleada es: $D_v = 3 \times Z/Z_m$

Un valor del índice cercano a 1 indica una forma del cuenco en V, en corte transversal. Los embalses con las paredes laterales adelgazadas en el perfil transversal tienen un $D_v < 1$, mientras que los de perfil más parecido a una U poseen un $D_v > 1$.

3.2. Indicadores físico-químicos

Estratificación térmica: que informa de la dominancia entre los flujos de tipo laminar (estratificación) o turbulento (mezcla), en función de la temperatura de la columna de agua.

Transparencia: la penetración de la luz en el agua define un estrato, zona fótica, en el que se produce la fotosíntesis durante el periodo diurno. Normalmente, se trata de un parámetro de respuesta de los procesos de eutrofización.

Concentración de oxígeno disuelto: que depende de la cantidad de las materias oxidables (orgánicas o inorgánicas) que fluyen desde las capas superficiales y desde los tributarios y sedimentos. Estos aportes son más altos en las aguas de mayor grado trófico que traen como consecuencia descensos acusados de oxígeno.

Se entiende por condiciones anóxicas cuando la concentración de oxígeno en el agua es inferior a 1 mg/l O₂. Por su parte, concentraciones por debajo de 4 mg/l O₂ pueden ser perjudiciales para los peces ciprinícolas, según establece la Directiva 2006/44/CEE, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces

Grado y tipo de mineralización: los elementos denominados de proporcionalidad constante son los que definen la composición mineralógica del agua y condicionan el potencial de eutrofización natural de la masa de agua. Por este motivo, se caracteriza la impronta mineral de las aguas.

Concentraciones de nutrientes –fósforo y nitrógeno-: como los principales implicados en las condiciones limitantes del crecimiento de los productores primarios (fundamentalmente el fitoplancton en los sistemas acuáticos de tipo léntico) y evaluadores, en particular del estado trófico. Además de las distintas formas de nutrientes nitrogenados y fosforados se han valorado las concentraciones de sílice reactiva, como posible elemento limitante para el crecimiento de las bacillarofíceas (diatomeas).

3.3. Indicadores de calidad biológica

Comunidad fitoplanctónica: término general que engloba aquellos organismos unicelulares o coloniales que ocupan la superficie de las aguas continentales o marinas constituyendo la comunidad sostenida o flotante de los ecosistemas acuáticos. Su densidad poblacional y la estructura de la comunidad está íntimamente relacionada con el estado trófico de las aguas.

La abundancia algal se ha expresado cel/ml, la cual se usa habitualmente como indicador de la biomasa del fitoplancton.

Comunidad zooplanctónica: además de la cualidad bioindicadora de alguno de sus componentes, mantiene una relación estrecha con el fitoplancton por su capacidad de presionar o consumir directa o indirectamente al mismo.

Pigmentos fotosintetizadores: junto con el fitoplancton son descriptores de la biomasa algal. La concentración de clorofila *a* se ha utilizado, junto a otros parámetros, para catalogar el estado trófico de las aguas.

3.4. Estratificación del ámbito y planteamiento de estaciones de muestreo

Para establecer un diagnóstico es necesario cubrir las heterogeneidades en el plano horizontal que, en los embalses, suelen ser notorias a lo largo del eje mayor (eje cabecera-cola) y en masas de agua con diferentes tasas de renovación hidráulica. Por ello, se han establecido 6 estaciones de muestreo en el embalse, para obtener una estimación de la media en el embalse, ya que el embalse del Ebro presenta una morfológica muy heterogénea.

Por otro lado, los aportes totales de nutrientes constan de una fracción procedente de fuentes puntuales y otra de fuentes difusas. Su estimación puede ser empírica (determinaciones de concentración y caudal) en el primer caso, pero en el segundo hay que recurrir a métodos indirectos.

El primer aspecto de la evaluación de los aportes es establecer la carga anual al embalse. En este caso, la comentada diferencia se traduce, a efectos prácticos, en si los aportes se producen a través de uno de los tributarios principales al embalse, o si ingresan directamente a la masa de agua. Para tratar este problema se ha procedido a dividir la cuenca hidrográfica del embalse en subcuencas, sobre las que se aplica un determinado programa de trabajos.

Mediante este sistema, la subcuenca de los tributarios principales quedan representadas por una estación de muestreo (código T), mientras que la evaluación de los aportes en la porción restante de la cuenca total del embalse (la denominada cuenca de escorrentía directa (CED) ha de someterse a una evaluación de aportes difusos.

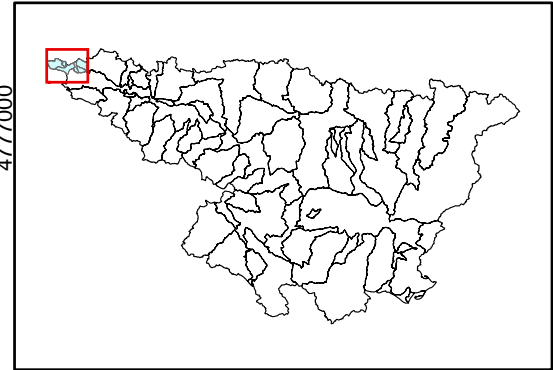
3.5. Estaciones de muestreo

Según lo expuesto anteriormente, el número de estaciones de muestreo en el embalse (6) se han ajustado en función de las heterogeneidades que presenta el embalse en el plano horizontal, también se han situado (4) estaciones de muestreo en los principales ríos que tributan al embalse (ríos Ebro, Nava, Virga y Lancharés), además de ubicar tres estaciones más (3) en los ríos Ebro, Híjar e Izarilla, antes de su paso por Reinosa. En sucesivas campañas se han añadido dos puntos más, uno a la salida del embalse y otro, a partir de la tercera campaña de muestreo, en el aliviadero de la depuradora de Reinosa, aporte directo al río Ebro, situado antes del punto codificado como T1.

En total se han muestreado 15 puntos, seis (6) de ellos ubicados en el embalse, siete (7) en ríos -tributarios-, uno (1) más a la salida del embalse y, además, se ha caracterizado el agua aliviada de la depuradora de Reinosa. La disposición de los puntos, junto con la subcuenca que representan, se plasma en la lámina adjunta, mientras que en el siguiente cuadro, se presentan su descripción y coordenadas.

Características de las estaciones de embalse

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Distancia a presa (km):	0,2	4,4	3,3	7,1	12,5	13,5
Volumen (hm³):	72,5	13,1	63,0	124,5	5,6	261,9
Volumen (%):	13,4	2,4	11,7	23,0	1,0	48,4
Superficie (ha):	561	236	750	1.325	166	3.126
Superficie (%):	9	4	12	21	3	51



Situación en la cuenca del Ebro

Superficies de las cuencas

	Superficie (ha)	Porcentaje
Cuenca total:	46.328	100
Esorrentia directa. CED:	23.245	50,2
T2:	2.114	4,6
T3:	246	0,5
T4:	331	0,7
Tributario principal. T1:	23.083	49,8
T5:	2.038	4,4
T6:	14.821	32,0
T7:	5.936	12,8

Leyenda

- Tipo de estación**
- Estación de embalse
 - Estación de tributario
 - Salida embalse
 - Río
 - Núcleos urbanos
 - Límites municipales
 - Carreteras
- Subcuencas**
- Cuenca de esorrentia directa (CED)
 - Cuenca tributario principal (T1)

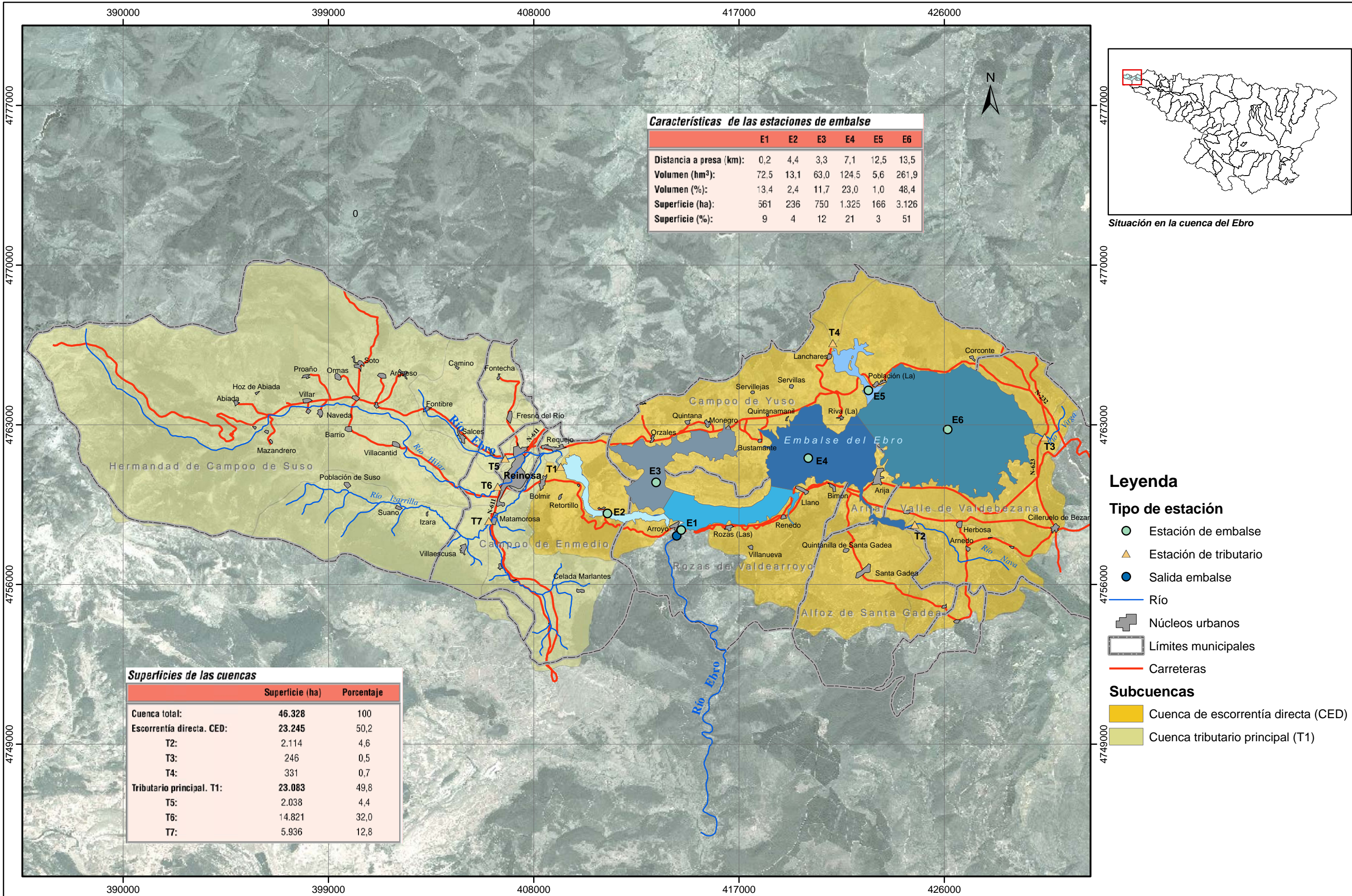


Tabla 2. Descripción de los puntos de muestreo.

Estación	Descripción	UTM30 X	UTM30 Y	Tipo de estación
E1	Frente a presa (200 m aprox.)	414470	4758386	Embalse
E2	Frente al puente de Horna de Ebro	411233	4759113	Embalse
E3	Entrada de la ensenada de Orzales	413363	4760477	Embalse
E4	Zona central del embalse. Frente a Bimón	420037	4761538	Embalse
E5	Entrada de la ensenada de Lancharés. Frente a La Población	422674	4764509	Embalse
E6	Ensenada este del embalse	426151	4762795	Embalse
T1	Río Ebro antes de su ingreso al embalse	409181	4761155	Tributario
T2	Río Nava antes de su ingreso al embalse	424707	4758623	Tributario
T3	Río Virga antes de su ingreso al embalse	430398	4762457	Tributario
T4	Río Lancharés antes de su ingreso al embalse	421118	4766585	Tributario
T5	Río Ebro antes de su paso por Reinosa	406751	4761515	Tributario
T6	Río Híjar antes de su paso por Reinosa	406425	4760290	Tributario
T7	Río Izarilla antes de su paso por Reinosa	406030	4758791	Tributario
X	Salida del embalse	414268	4758132	Salida
AL	Agua aliviada por la depuradora de Reinosa	409073	4761271	Aliviadero

3.6. Frecuencia de muestreos y trabajos de campo

Se han realizando cuatro campañas de muestreo, distribuidas entre los años 2007 y 2008, correspondientes a cada estación del año. Las fechas de los trabajos han sido:

- 1ª Campaña: **Verano**. La toma de muestra se realizó la segunda semana de agosto de 2007, entre los días 6 y 8.
- 2ª Campaña: **Otoño**. Muestreo realizado entre la segunda y tercera semana de octubre de 2007. Por razones técnicas se precisó una semana más para realizar los trabajos de campo, los días de muestreo fueron del 8 al 11 y del 15 al 17.
- 3ª Campaña: **Invierno**. Efectuada el mes de febrero de 2008, días 4,6 y 7.
- 4ª Campaña: **Primavera**. Realizada los días del 14 al 18 de abril de 2008, tercera semana del mes.

La localización de las estaciones se ha efectuado mediante un sistema de posicionamiento por satélite (G.P.S.), con un error real de unos 20 m. Los trabajos sistemáticos realizados en cada una de ellas han sido:

a) Estaciones de embalse:

- Perfil metro a metro de parámetros físico-químicos de temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, sólidos totales disueltos y turbidez. Realizado con sonda multiparamétrica Hidrolab H2O.
- Medición de la transparencia mediante la profundidad de visión de un disco de Secchi de 30 cm de diámetro.
- Toma de muestras de agua para análisis químicos, con botella hidrocaptora tipo Van Dorn, en cada punto de muestreo y a distintas profundidades.



Obtención de muestras de agua, mediante botella hidrocaptora.

- Toma de muestras biológicas:
 - Fitoplancton y clorofila *a*. Las muestras biológicas se han obtenido integrando en una sola muestra, los volúmenes de agua (1l), extraídos mediante botella hidrocaptora, metro a metro en la capa trofogenica (2,5 veces la profundidad del disco de Secchi, según Protocolo de muestreo y análisis de fitoplancton. Elaborado por la Confederación Hidrográfica del Ebro en 2005).

- Zooplancton. Las muestras de zooplancton se han obtenido realizando un arrastre de red vertical (luz de malla 250 micras) en la capa trofogénica.
- Arrastres de red para toma de muestras cualitativas de fitoplancton (luz de malla 53 micras), en dos puntos de muestreo (estaciones E1 y E4).



Detalle de arrastres de red realizados. Estación E4.

- Toma de muestras de sedimento superficial, mediante draga, para su análisis químico.



Extracción y aspecto del sedimento en el punto E5 (frente al núcleo de Población).

b) Estaciones de tributario:

- Medición "in situ" de los siguientes parámetros físico-químicos: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, sólidos totales disueltos y turbidez.
- Toma de muestras de agua para análisis químicos en cada punto de muestreo.

- Toma de muestras de sedimento para análisis químicos.
- Estimación del caudal instantáneo



Estimación de caudal en el río Nava, punto de muestreo T2.

La nomenclatura utilizada para la identificación de las muestras se ha ajustado a la siguiente secuencia: (Ej.: EB2E1S)



Las muestras de agua se han recogido en frascos de polietileno, excepto las de fósforos y sulfuros, para los que se han utilizado recipientes de vidrio. Las muestras biológicas se han recogido, también, en frascos de vidrio y han sido fijadas inmediatamente con lugol al 5%, tanto para el fitoplancton como para el zooplancton. Todas las muestras han sido fijadas convenientemente y enviadas al laboratorio, el mismo día de su toma, para que en 24 h se procediera a la realización de los análisis de laboratorio.

3.7. Análisis de laboratorio

Ya en el laboratorio, en cada una de las muestras, se han determinado los siguientes analitos, (en cursiva se presentan los que no se analizan en las muestras de tributario):

- **Muestras de agua:** Sólidos en suspensión, alcalinidad total, DBO₅, oxidabilidad (o DQO al permanganato), fósforo total, fosfatos, nitrógeno kjeldahl, amonio total, nitratos, nitritos, *sílice, clorofila a, clorofila b, clorofila c, feofitinas, índice de pigmentos, sulfuros, hierro disuelto*. Determinación de *fito y zooplancton*. Además, en la primera campaña de muestreo se analizaron los principales elementos que definen la composición iónica del agua: *Bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, potasio, sodio y calcio*.
- **Muestras de sedimento:** pH, redox, materia orgánica, fósforo inorgánico intercambiable (o asimilable), nitratos, nitritos, *hierro, manganeso*.

En la tabla 3, de forma sucinta, se especifica el parámetro y el método empleado en su determinación. Las principales características de estos parámetros y de los métodos analíticos empleados en las determinaciones realizadas en el laboratorio, se recogen en el **Anexo 1**.

Tabla 3. Analítica realizada y métodos de referencia.

Muestras de agua

Determinaciones analíticas	Procedimientos de laboratorio	Métodos de referencia
Alcalinidad (mg/l)	PN/02	(Ref: 2320 S.M.)
Amonio (mg/l N-NH ₄)	PN/04	(Ref:4500-NH ₃ F S.M.)
Bicarbonatos (mg/l)	PN/02 bis	(Ref: 2320 B. S.M.)
Calcio (mg/l)	PN/12	(Ref: 3111 B S.M.).
Carbonatos (mg/l)	PN/02 bis	(Ref: 2320 B. S.M.)
Cloruros (mg/l)	PN/15	(Ref: 4500-Cl- B S.M.)
DBO5 (mg/l)	PN/22	(Ref: 5210 B S.M.)
DQO (mg/l)	PN/23	(Ref 5220 B S.M.)
Fosfatos (mg/l P-PO ₄)	PN/31	(Ref: 4500- P E S.M.)
Fósforo total (mg/l P-PO ₄)	PN/32	(Ref: 4500-P E S.M.)
Hierro (mg/l)	PN/34	(Ref: 3111 B S.M.)
Magnesio (mg/l)	PN/35	(Ref: 3111 B S.M.).
Manganeso (mg/l)	PN/36	(Ref: 3111 B S.M.)
Nitratos (mg/l N-NO ₃)	PN/40	(Ref:4500-NO ₃ B S.M.)
Nitritos (mg/l N-NO ₂)	PN/41	(Ref: 4500- NO ₂ ⁻ B S.M.)
Nitrógeno kjeldahl (mg N/l)	PN/42	(Ref: 4500-Norg B S.M.).
Oxidabilidad (mg O ₂ /l)	PN/44	(Ref: B.O.E. n° 163, jueves 9 de julio de 1987)
Potasio (mg/l)	PN/50	(Ref: 3500-K D S.M.).
Sílice (mg/l Si-SiO ₄)	PN/54	(Ref: 4500-Si D S.M.)
Sodio (mg/l)	PN/55	(Ref: 3500-Na D S.M.).
Sólidos en suspensión (mg/l)	PN/56	(Ref: 2540 S.M.)
Sulfatos (mg/l)	PN/59	(Ref: 4500 SO ₄ ²⁻ E S.M)
Sulfuros (mg S ²⁻ /l)	Potenciometría	(Ref: 4500- S ₂ ⁻ S.M.).
Clorofila (mg/m ³)	PN/14	(Ref: SM 10200-H ap 2)
Fitoplancton	Empleo de microscopia de óptica invertida	Método Utermöhl
Zooplancton	Empleo de lupa binocular	Sedimentación en cámaras Utermöhl

Muestras de sedimentos

Determinaciones analíticas	Procedimientos de laboratorio	Métodos de referencia
Potasio (mg/kg)	PN/67	(Ref: 3113 B S.M.)
Sodio (mg/kg)	Absorción atómica	(Ref: M.O.A.)
Hierro (mg/kg)	PN/67	(Ref: 3111 B S.M.)
Manganeso (mg/kg)	PN/36	(Ref: 3111 B S.M.)
Potencial redox (mV)	Potenciometría	(Ref: Rodier)
pH (ud pH)	Electrom. sobre pasta saturada	(Ref: M.O.A.)
Granulometría	Tamizado	(Ref: M.O.A.)
Materia orgánica (%)	Gravimetría	(Ref.: Maldonado, A.)
Humedad (%)	Gravimetría	(Ref: M.O.A.)
Densidad real	Gravimetría	(Ref: M.O.A.)
Carbonato cálcico (mg CO ₃ Ca/Kg)	Calcímetro Bernard	(Ref: M.O.A.)
Nitratos (gN-NO ₃ /Kg)	Extracción + espectrofotometría	(Ref: M.O.A.)
Nitritos (gN-NO ₂ /Kg)	Extracción + espectrofotometría	(Ref: M.O.A.)
Fósforo asimilable (mg/Kg)	Extracción + espectrofotometría	(Ref: M.O.A.)

3.8. Procesamiento de datos

Los datos se han sometido a un cribado inicial para corregir errores y obtener los valores medios por estratos y estaciones de embalse, mediante ponderación por los volúmenes que representan. Al no detectarse estratificación térmica durante el periodo estudiado los estratos considerados han sido la capa fótica y afótica. Para la realización de esta ponderación se ha empleado la batimetría del embalse, proporcionada por la Confederación del Ebro y realizada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, en el denominado "Estudio de capacidad útil del embalse del Ebro".

A su vez, y para obtener los valores medios anuales, estos valores se han ponderado con el periodo de tiempo que representa cada campaña.

3.9. Índices y diagnóstico del grado trófico

La catalogación trófica se ha alcanzado mediante la aplicación e interpretación de una serie de indicadores de amplia aceptación. Los principales índices empleados se basan en la concentración de fósforo total, en la biomasa algal y en la transparencia.

La **concentración de fósforo total** en el embalse es un parámetro crucial en la eutrofización puesto que suele ser el elemento que limita el crecimiento de las algas. Los índices más aceptados que contemplan su concentración media anual, y empleados en el trabajo, son:

- EPA con tres categorías tróficas y límites de 10 y 20 $\mu\text{g/l}$.
- LEE, JONES & RAST, con cinco categorías tróficas y límites de 8, 12, 28 y 40 $\mu\text{g/l}$.
- MARGALEF, con dos categorías tróficas y límite de 15 $\mu\text{g/l}$.
- OCDE, con cinco categorías tróficas y límites de 4, 10, 35 y 100 $\mu\text{g/l}$.
- TSI, con cinco categorías tróficas y límites de 20, 40, 60 y 80, que representan valores de una escala relativa de 0 a 100 calculados según la transformación $10(6-\log_2(54,9/PT))$.

En general, el índice de la OCDE refleja suficientemente el grado trófico real y es el más utilizado.

La **biomasa algal**, a diferencia del anterior, es un indicador de respuesta trófica y, por lo tanto, integra todas las variables causales, de modo que está influido por otros condicionantes ambientales, además de estarlo por los niveles de nutrientes.

Se utilizan dos parámetros como estimadores de la biomasa algal en los índices al uso: densidad celular (n° células/ml) y concentración de clorofila *a* ($\mu\text{g/l}$) en la zona fótica; en esta última se usan los valores medio y máximo anuales. Se han aplicado los siguientes índices:

- EPA con tres categorías tróficas y límites de 3 y 20 para la clorofila (máximo anual) y de 2000 y 5000 para la densidad celular.

- LEE, JONES & RAST, con cinco categorías tróficas y límites de 2.1, 3, 6.7, 10 $\mu\text{g/l}$ de clorofila (media anual).
- MARGALEF, con dos categorías tróficas y límite de 5 para la clorofila (media anual) y 5000 para la densidad celular.
- OCDE, con cinco categorías tróficas y límites de 1, 2.5, 8 y 25 para la media anual de clorofila y de 2.5, 8, 25 y 75 para el máximo anual.
- TSI, con cinco categorías tróficas y límites de 20, 40, 60 y 80, que representan valores de una escala relativa de 0 a 100 calculados según la transformación $10(6-\log_2 7.7(1/\text{Chla}^{0.68}))$.

Otro parámetro relacionado con la biomasa algal, aunque más indirectamente es la **transparencia**, medida con el disco de Secchi (media y mínimo anual en m), que da lugar a los siguientes índices:

- LEE, JONES & RAST, con cinco categorías tróficas y límites de 1.8, 2.4, 3.8 y 4.6.
- MARGALEF, con dos categorías tróficas y límite de 3.
- OCDE, con cinco categorías tróficas y límites de 1.5, 3, 6 y 12 para la media anual y de 0.7, 1.5, 3 y 6 para el mínimo anual.
- TSI, con cinco categorías tróficas y límites de 20, 40, 60 y 80, que representan valores de una escala relativa de 0 a 100 calculados según la transformación $10(6-\log_2 \text{DST})$.

4. ESTIMACIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES. METODOLOGÍA EMPLEADA

Las fuentes de nutrientes se han diferenciado, principalmente, en dos categorías: aportes procedentes del tributario principal y aportes procedentes de la cuenca de la escorrentía directa. Como se citó previamente, las diferentes formas de transporte de los nutrientes que ingresan a un cuerpo de agua exigen diferentes metodologías de cálculo. Su estimación puede ser empírica (determinaciones de concentración y caudal) en el primer caso, pero en el segundo hay que recurrir a métodos indirectos.

4.1. Cálculo de aportes de nutrientes por el tributario

En los casos en los que se ha establecido una estación de muestreo en alguno de los tributarios ha sido factible realizar una estimación empírica de la carga de nutrientes aportada por la subcuenca que define el tributario considerado.

La carga anual de nutrientes se puede calcular según dos criterios, ambos basados en dividir el año en intervalos en los que los días de muestreo corresponden al punto medio de cada intervalo -SCHEIDER ET AL, 1979-. El primer procedimiento utiliza los datos de aportes hidráulicos correspondientes al día del muestreo (Q_i) con lo que se obtienen cargas estimadas con aportes instantáneos de la forma:

$$\sum Q_i \cdot C_i \cdot (f_{i+1} - f_{i-1}) / 2$$

siendo,

C_i : Concentración de la sustancia en el muestreo i (mg/l)

f_i : Fecha del muestreo i ,

$(f_{i+1} - f_{i-1}) / 2$: Intervalo de tiempo días

o bien se puede utilizar la suma de las aportaciones hidráulicas diarias, en un periodo de tiempo que abarca la mitad del intervalo que transcurre desde el muestreo anterior hasta el actual y desde éste al posterior, para obtener la carga estimada con los aportes medios ($Q_M = Q_d$) de la forma

$$\sum C_i \cdot Q_M$$

El cálculo de la carga de nutrientes a través de esta ponderación temporal supone que la concentración de la sustancia es independiente del caudal de agua que la transporta. Se obtienen los resultados en aportes brutos (kg/año) y específicos (g/m²), es decir, por unidad de superficie de cuenca, calculados según ambos criterios.

4.2. Cálculo de aportes de nutrientes en la cuenca de esorrentía³

La metodología para el cálculo de los aportes difusos precisa el empleo de métodos de estimación indirecta. Para el presente trabajo se ha optado por emplear el modelo matemático Generalized Watershed Loading Functions (GWLF) -Funciones Generalizadas de Carga a la Cuenca-.

El modelo GWLF fue desarrollado por HAITH & SHOEMAKER (1987) y se ha empleado la versión mejorada de HAITH ET AL. (1992). Este modelo proporciona la posibilidad de evaluar mensualmente las cargas de nutrientes (P Y N) aportadas por fuentes difusas y puntuales en una cuenca de drenaje, para un año hidrológico o las cargas medias para un periodo de años.

Entre las fuentes difusas son consideradas, las sustancias nutritivas de origen natural (erosión del suelo, caídas de las hojas, etc.) así como los aportes que no provienen de las descargas definidas y que son consecuencia de la actividad humana, tales como los debidos a la lixiviación de abonos, excretas animales, etc. En el presente trabajo las cargas han sido agrupadas distinguiéndose tres tipos de fuentes, los usos del suelo, la ganadería y los vertidos urbanos.

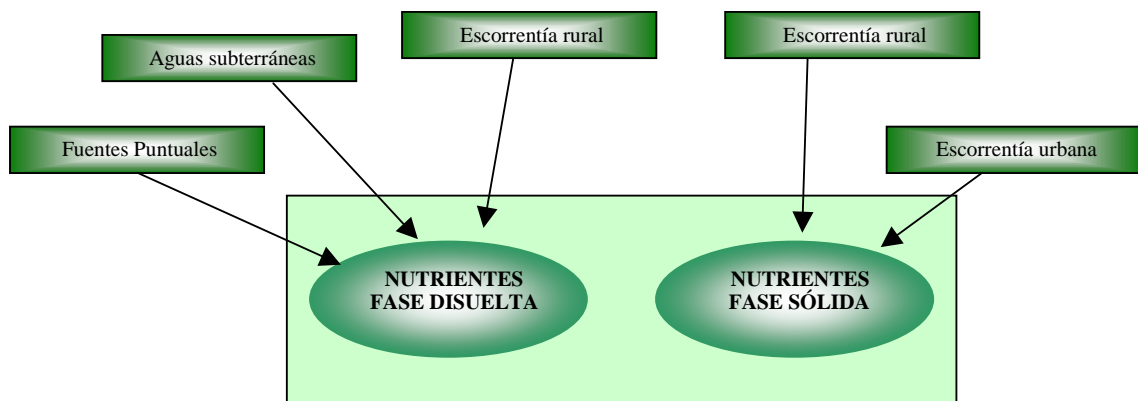
Además, es necesario tener en cuenta las distintas formas en que pueden ser transportados los nutrientes. El fósforo y el nitrógeno pueden ser arrastrados a las masas de agua en forma disuelta, a través de las aguas superficiales o subterráneas; o en forma particulada, asociados a fenómenos de erosión. La forma particulada es suelo erosionado y está constituida por los materiales que lo componían junto a aquellas

³ Fuente: "Evaluación de la carga de nutrientes en determinados embalses de la Confederación Hidrográfica del Ebro". CEDEX -Infraestructura y Ecología. 2003.

sustancias que se le hayan incorporado, en su caso, durante el cultivo (fertilizantes), por la ganadería en régimen extensivo, así como por arrastre en zonas urbanas. El excedente de agua arrastra esas partículas del suelo hacia arroyos, ríos y embalses, contaminándolos con material mineral y materia orgánica (sedimentos). La forma disuelta es arrastrada por la escorrentía o se infiltra en el suelo y parte de ella es transportada en forma de flujo subsuperficial o subterráneo.

Procedimiento de cálculo:

La procedencia de las cargas de nutrientes y las diferentes formas de transporte exigen de la utilización de diferentes métodos de cálculo para la evaluación de las cargas de nutrientes que ingresan en una lámina de agua.



Esquema de las distintas fuentes de nutrientes.

El proceso seguido considera las siguientes etapas:

1. Delimitación de las áreas fuente o subcuencas.
2. Cálculo de los aportes hídricos.
3. Cálculo de los aportes de sedimento.
4. Cálculo de las cargas procedentes de fuentes difusas y puntuales:
 - a) Aportes disueltos procedentes del lavado de suelos en aguas de escorrentía.
 - b) Aportes disueltos procedentes de la ganadería en aguas de escorrentía.
 - c) Aportes de nutrientes disueltos por aguas subsuperficiales.
 - d) Aportes de nutrientes en forma particulada en sedimentos.

- e) Aportes de nutrientes en forma particulada por escorrentía urbana.
- f) Aportes de aportes puntuales en cuenca de escorrentía directa.

En primer lugar se presenta de forma breve el procedimiento general de cálculo, posteriormente, y para cada uno de los procesos, se realiza una introducción conceptual y se especifican los datos necesarios para alimentar el modelo. El desarrollo del modelo matemático puede verse en Haith et al, 1992.

Los medios de transporte de nutrientes considerados han sido los flujos de agua y los flujos de sedimento. A partir de la entrada de datos diarios de precipitación y temperatura, y una serie de algoritmos para el cálculo de la evaporación e infiltración, el modelo calcula las aportaciones por escorrentía y subsuperficiales mediante la ejecución de un balance hídrico diario. El aporte de sedimento a una masa de agua se estima mediante el cálculo mensual de la erosión utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y un coeficiente de entrega basado en el tamaño de la cuenca. El coeficiente de entrega se aplica a la erosión estimada para determinar la producción final de sedimento que llegaría al embalse.

Las pérdidas de nutrientes superficiales son determinadas aplicando, para cada tipo de uso del suelo y categoría ganadera, unos coeficientes de N y P disueltos, al agua de escorrentía, y unos coeficientes de carga a la porción de sedimento que llega a la lámina de agua (kg de nutriente/t de sedimento). Los nutrientes procedentes de la escorrentía están en forma particulada y son modelados mediante una función exponencial de acumulación y lavado.

Se calculan las cargas subsuperficiales aplicando unos coeficientes de N y P disuelto al volumen de agua aportado por esta vía. En cuanto a las cargas puntuales, se aplican unos coeficientes de N y P disueltos a los efluentes de aguas residuales urbanas.

4.2.1. Delimitación del área fuente o cuenca de escorrentía directa

El primer paso a la hora de abordar el presente trabajo ha sido definir los límites del área de drenaje. Definiéndose, a su vez, la cuenca de escorrentía directa donde se realiza la modelización (ver punto 3.4.).

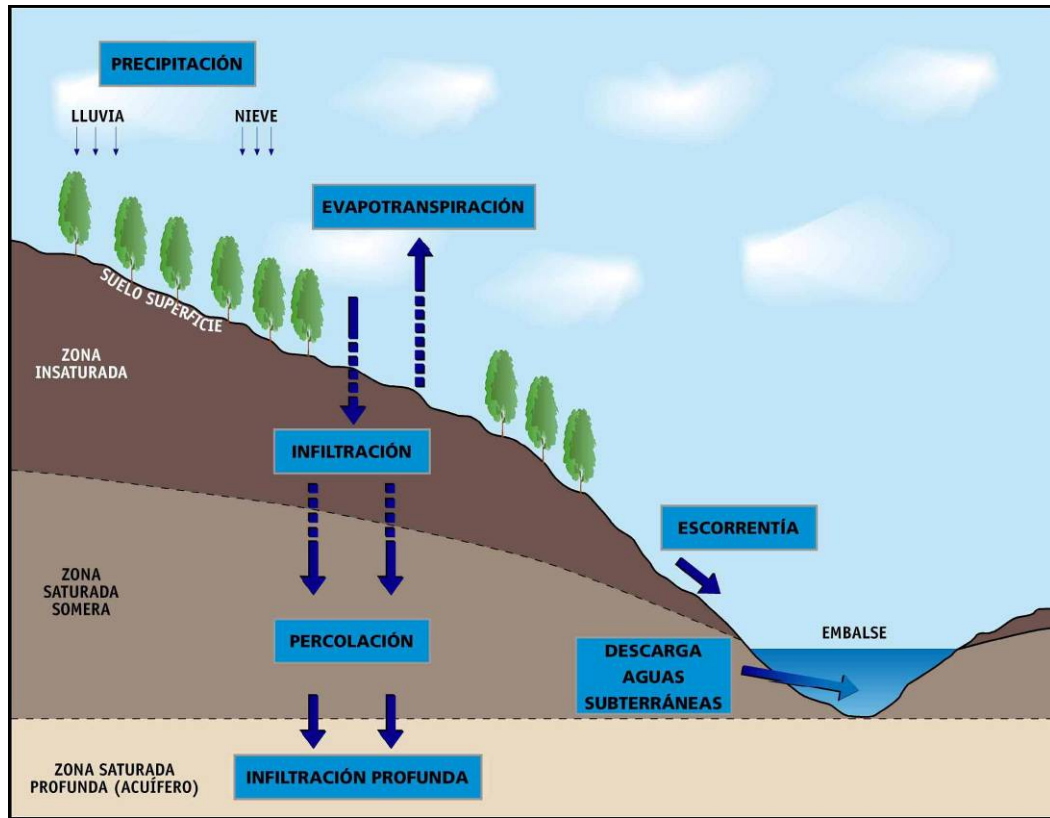
Datos de alimentación del modelo:

- 1) **Delimitación de la cuenca vertiente.** La delimitación de la cuenca de drenaje y subcuencas asociadas se realizó mediante un SIG, utilizando como base la capa digital de subcuencas del CEDEX, escala 1:50.000. Para la delimitación de la Cuenca de Escorrentía Directa se empleó la capa de altimetría disponible en la web del Ebro.

4.2.2. Cálculo de las aportaciones hídricas

Mediante la aplicación del modelo GWLF se han calculado las aportaciones medias mensuales y anuales para el periodo estudiado (junio 2007-julio 2008). Se trata de un modelo continuo de simulación que utiliza datos diarios de temperatura y precipitación y coeficientes de evaporación e infiltración para el cálculo del balance hídrico diario.

El agua que alcanza un embalse lo puede hacer bien por escorrentía superficial, por flujo subsuperficial o subterráneo. Parte de la precipitación que llega a la superficie de la tierra produce escorrentía, otra parte es interceptada por la vegetación, otra se evapora y otra se infiltra pudiendo generar flujos subsuperficiales o subterráneos.



Representación esquemática del ciclo del agua.

El cálculo de la escorrentía superficial se realiza mediante el método de Número de Curva elaborado por la U.S. Soil Conservation Service. Este método se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal según la siguiente ecuación:

$$Q = (P + N - 0,2 * S)^2 / P + 0,8 * S$$

Donde:

Q: escorrentía superficial

P: precipitación líquida en mm

N: precipitación en forma de nieve

S: número de Curva

En un complejo suelo-vegetación totalmente impermeable toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial, por el contrario un complejo totalmente permeable

no daría escorrentía fuera cual fuera su precipitación. Entre estos dos casos extremos existen infinitas respuestas o curvas de la escorrentía superficial, ante una precipitación según el tipo de asociación suelo-vegetación.

A partir de cartografía digital de la Confederación Hidrográfica del Ebro, se han establecido unidades de vegetación; a las cuales asumiendo que se comportan de una misma forma frente a la infiltración se les asigna el valor del Número de Curva determinado por la USDA-SCS (1964).

Además, el modelo corrige la capacidad de infiltración (número de curva) en función del estado de humedad del suelo previo a la lluvia en estudio, considerando la cantidad de lluvia caída en el período de cinco días anteriores. Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado debido a las lluvias precedentes, la escorrentía será mayor, por el contrario si el suelo está especialmente seco la escorrentía será menor.

Parte del agua interceptada por el complejo suelo-vegetación escurre dando lugar a flujos subsuperficiales. En el suelo pueden diferenciarse dos capas, la denominada zona insaturada y la zona saturada. El agua que se infiltra se almacena en la primera capa, rellenando los microporos existentes hasta superar la capacidad de campo, una vez superada ésta se produce percolación hacia la zona saturada. La capacidad de campo se define en función de la textura del suelo y del tipo y cobertura vegetal. El programa realiza balances hídricos diarios entre ambas capas, el flujo de la zona saturada poco profunda se modela como un embalse subterráneo linear hacia el embalse (HANN, 1972) y/o hacia la zona saturada profunda -acuífero-, y se modelan mediante sendos coeficientes de recesión.

Datos de alimentación del modelo:

- 1) ***Datos de precipitación y temperatura diaria.*** Los datos de precipitación y temperatura diaria utilizados para el cálculo de las aportaciones proceden de la estación termopluviométrica de Arroyo de Valdearroyo. El periodo estudiado es el correspondiente a junio de 2007 - julio de 2008. Se ha seleccionado esta estación porque dispone de series completas diarias de temperatura y precipitación y es, por

su posición, la que mejor representan la climatología imperante en la cuenca de escorrentía directa. En la siguiente tabla se recoge la localización de la estación meteorológica considerada.

Tabla 4. Localización de la estación meteorológica.

Indicativo	Estación	UTM30_X	UTM30_Y	Altitud (m.s.n.m.)
9008	Arroyo de Valdearroyo	413688	4757866	845

***Los datos de precipitación y temperaturas diarios correspondientes han sido suministrados por Instituto de Meteorología de Cantabria*

- 2) **Área total de la cuenca vertiente y subcuencas consideradas.** La superficie de la cuenca evaluada es calculada mediante la utilización de un sistema GIS (Arcview) a partir del mapa de delimitación de cuencas generado en la fase anterior.
- 3) **Usos del suelo.** Para estimar la hidrología y las cargas de nutrientes en una cuenca de drenaje, es necesario calcular la superficie de las áreas fuente o subunidades definidas según los distintos usos del suelo. La superficie de estas diferentes subunidades es calculada mediante la superposición de la capa digital de usos del suelo disponible en la web de la C.H.Ebro y la capa de subcuencas generada en fases anteriores.
- 4) **Asignación del Número de Curva de Escorrentía.** A cada tipo de uso del suelo se le ha asignado un número de curva de escorrentía seleccionado en base a valores medios publicados en U.S. Soil Conservation Service's Technical Release nº 55, 1986, asumiendo condiciones hidrológicas de moderada permeabilidad e infiltración.

Tabla 5. Número de curva asignada a cada tipo de uso del suelo.

Usos del suelo	Número de curva de escorrentía
Bosque caducifolio	60
Arbolado forestal claro o monocultivo	65
Matorral denso	48
Pastizal	75
Improductivo	90

- 5) **Cálculo de la Evapotranspiración.** Para el cálculo de la evapotranspiración, además de los datos de temperatura y precipitación diaria, el modelo utiliza una serie de algoritmos que incluyen la entrada de dos nuevos parámetros: el Coeficiente de Evapotranspiración y el Fotoperiodo.

La estimación de los coeficientes de evapotranspiración (ET) en una determinada zona es una labor bastante costosa, ya que requiere la estimación de la cobertura, estado de crecimiento de las plantas, madurez, etc., datos que no son fácilmente asequibles. En el presente trabajo se han asignado valores de ET medios de los recomendados por Haith et al (1992) en el Manual del usuario del GWLF. Los rangos típicos van desde 1 para áreas de bosque en la estación de crecimiento hasta 0,3 para cultivos anuales durante el periodo vegetativo.

El modelo, utiliza también para el cálculo de la evapotranspiración un algoritmo que tiene en cuenta el crecimiento de la vegetación en base a las horas de luz durante la estación de crecimiento. Las horas de luz son asignadas en función de la situación geográfica de la zona en estudio.

Tabla 6. Coeficiente de Evapotranspiración, horas de luz y periodos de crecimiento vegetal.

Meses	Coeficiente de Evapotranspiración	Horas de Luz	Crecimiento
Octubre	0,8	10,9	Sí
Noviembre	0,7	9,7	No
Diciembre	0,7	9	No
Enero	0,7	9,3	No
Febrero	0,7	10,4	No
Marzo	0,7	11,7	No
Abril	0,8	13,1	Sí
Mayo	0,8	14,3	Sí
Junio	0,8	15	Sí
Julio	0,8	14,6	Sí
Agosto	0,8	13,6	Sí
Septiembre	0,8	12,3	Sí

6) **Condiciones previas de humedad del suelo.** El modelo calcula la escorrentía teniendo en cuenta las condiciones de humedad del suelo previas al periodo de simulación, en base a la lluvia ocurrida en los cinco días anteriores. En el caso de no disponer de estos datos de entrada el programa se autorrellena después de haber sido corrido para una año hidrológico.

- *Condiciones iniciales de reserva de las capas insaturada y saturada:* cuando la cantidad de agua almacenada en estas capas no es conocida, el manual GWLF recomienda un valor por defecto de 10 cm para la capa insaturada y un valor de 0 cm para la capa saturada.
- *Coeficientes de recesión o donación.* El coeficiente de recesión entre la capa insaturada y saturada, toma valores de 0,1 l/día. Asumiendo que no existe conexión entre la capa saturada y el acuífero profundo, el valor del coeficiente de recesión entre estas capas ha sido considerado como 0.

7) **Disponibilidad de agua en la zona insaturada.** La capacidad de la mezcla de suelo -U- es equivalente a la media en la cuenca de la profundidad máxima de la zona radicular multiplicada por la media volumétrica de capacidad hídrica del suelo, lo

que requiere una estimación de la profundidad media de la zona no saturada, lo cual no suele ser viable. Por ello, se usa un valor por defecto de 10 cm para zonas permeables, que corresponde a una profundidad radicular de 100 cm y a una capacidad hídrica de 0,1 cm/cm. Estos valores son típicos para un amplia variedad de plantas (JENSEN ET AL., 1989) y suelos (RAWLS ET AL., 1982).

4.2.3. Cálculo de los aportes de sedimento

El aporte de sedimentos a una masa de agua, expresado normalmente en toneladas por unidad de superficie de la cuenca por año, es el volumen de sedimentos cuantificados en el punto final de la cuenca dividido por la superficie de ésta. Éste es siempre inferior a la erosión total debido a la acumulación de sedimentos durante el transporte. El aporte de sedimento a una masa de agua es calculado mediante el producto entre la erosión y un ratio de reparto o coeficiente de aportes, que se establece en función de la superficie de la cuenca.

La erosión o volumen de suelo transportado se computa mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo –USLE–.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

- donde:
- A = Pérdida de suelo calculada en t/ha
 - R = Factor energía de las lluvias
 - K = Factor erosionabilidad del suelo
 - LS = Factor longitud-pendiente
 - C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal)
 - P = Factor práctica de lucha contra la erosión

El coeficiente de aporte de sedimentos es siempre inferior a 1, lo que indica que el suelo que se erosiona no suele hacer grandes desplazamientos antes de quedar depositado. De hecho, es muy importante el almacenamiento de sedimentos en los surcos del suelo, en las márgenes de las fincas y al pie de las laderas. También se produce almacenamiento en los cauces de los ríos (deposición en el lecho del río o fuera de él, cuando se desborda) y en las tierras húmedas.

Datos de alimentación del modelo:

- 1) **Pérdida de suelo.** La erosión o volumen de suelo transportado se computó mediante la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE): $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$

Factor R, Coeficiente de erosión Pluvial. Este factor es utilizado para estimar la intensidad de las lluvias, y varía en función de localización geográfica y los meses. Los valores asignados aparecen reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 7. Valores del factor R para una latitud de 42°. (Haith et al, 1992)

OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Factor K o de erosionabilidad del suelo. Es una medida de la erosión potencial de un suelo, en función de su textura y composición. Este factor que es uno de los utilizados por la ecuación de la USLE ha sido determinado para los suelos españoles, los datos incluidos proceden del Mapa de Estados Erosivos del Suelo de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (ICONA, 1987).

Factor topográfico LS. Este factor es función de la pendiente y la longitud de declive. El factor LS es calculado en función de la pendiente según los valores reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 8. Valores del factor LS en función de la pendiente. (Mintegui et al, 1984)

Pendiente (%)	LS
0-3	0,5
3-12	2,4
12-18	4,4
18-24	6,7
24-60	18,5
70	21,8
100	28,5

Factor C o de protección de la erosión por la cubierta vegetal y factor P o de Prácticas de conservación del suelo. La cubierta vegetal protege el suelo de la erosión, los valores asignados a cada tipo de uso se reflejan en la tabla adjunta. Como factores de práctica de conservación de suelos en el estudio se asume que no hay prácticas de cultivo, dándose a este factor el valor de 1.

Tabla 9. Valores del Factor C o Factor vegetación.
(Mintegui et al, 1984)

USOS DEL SUELO	Factor C
Bosque caducifolio	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral denso	0,08
Pastizal	0,20
Improductivo	0
Urbano	0

Ratio de reparto de sedimento. Se establece un ratio de reparto en función de la superficie de la cuenca de drenaje. El ratio de reparto asignado en función de la superficie ha sido de 0,11.

4.2.4. Cálculo de aportes de nutrientes

A) Cálculo de aportes disueltos procedentes del lavado de suelos en aguas de escorrentía

Las cargas se transportan desde diferentes superficies de aportación, cada una de las cuales se considera uniforme respecto al uso del suelo, cobertura vegetal y pendiente. Las superficies con vegetación intervenida y las dedicadas a la agricultura, tienen grandes pérdidas por escorrentía en comparación con las tierras forestadas. Las cargas disueltas se obtienen del producto de la escorrentía calculada para ese área por una concentración media de fósforo y nitrógeno.

Las cargas totales anuales son el resultado de la suma diaria de carga aportadas por todos los usos.

Datos de alimentación del modelo:

- 1) **Superficie por tipo de uso del suelo:** Ver apartado de hidrología.
- 2) **Concentración media de nutrientes por tipo de uso del suelo:** Los valores de concentración de nutrientes aparecen reflejados en la siguiente tabla, son una combinación de los sugeridos en el Manual GWLF.

Tabla 10. Concentración de nutrientes en las aguas de escorrentía, según usos del suelo.

Zona	NDT ⁽¹⁾ (mg/l)	PDT ⁽²⁾ (mg/l)
Bosque caducifolio	0,11	0,009
Arbolado forestal claro	0,13	0,011
Matorral denso	0,24	0,014
Pastizal	2,60	0,1
Improductivo	2,90	0,260

(1) Nitrógeno Total Disuelto

(2) Fósforo Total Disuelto

B) Cálculo de aportes disueltos procedentes de la ganadería en aguas de escorrentía.

Los residuos ganaderos pueden ser origen de alteraciones llegando a provocar diversos grados de contaminación en las masas de aguas (superficiales y subterráneas).

Las aportaciones procedentes de la ganadería han sido calculadas a partir de la aplicación de factores de carga asignados a las diferentes categorías ganaderas. Se define como factor de carga para cada categoría de ganado a la cantidad de nutrientes producido anualmente por un individuo, resultado de la cantidad y composición media de sus excretas.

Datos de alimentación del modelo:

- 1) **Número de cabezas ganaderas.** Los datos de número de cabezas empleados proceden del censo de ganado proporcionado por la Confederación

Hidrográfica del Ebro. El censo ganadero proporcionado computa todas las explotaciones ganaderas presentes en el área de drenaje del embalse del Ebro, dando información de su localización, capacidad y nº de cabezas del ganado bovino presentes en todas ellas.

2) **Factores de carga por cabeza (kg/ind año).** Se han incluido los datos publicados en el informe de la CCE, 1986.

Tabla 11. Carga de nutrientes según el tipo de ganado.

Tipo de ganado	NT (Kg/indiv. año)	PT (Kg/indiv. año)
Bovino	66	19
Equino	66	19
Ovino	5	1,5
Caprino	5	1,5
Porcino	11	5,6
Aves	0,4	0,06

3) **Factor de reducción.** La mayor parte de los nutrientes aportados por las excretas animales son lixiviados, sólo una pequeña fracción de éstos es transportada por las aguas superficiales. A la carga total de nutrientes estimada se le aplica una reducción que considera que únicamente el 25 % del N y el 5 % del P llegan a las aguas superficiales (BENNETON, 1986).

C) Aportes de nutrientes disueltos por aguas subsuperficiales

Parte de los nutrientes procedentes de los usos del suelo y ganadería son lixiviados, y pasan a las aguas subsuperficiales. El cálculo de las aportaciones totales por esta vía se realiza mediante el producto del volumen de agua por unas concentraciones medias.

Datos de entrada del modelo:

- **Concentración media de nutrientes por tipo de uso del suelo.** Para evaluar las cargas de fósforo y nitrógeno aportadas por las aguas subsuperficiales se requiere tener datos de concentraciones medias en estas aguas. Debido a la

imposibilidad de obtener datos reales se utilizaron valores típicos por defecto de 0,34 mg/l de N y 0,013 mg/l de fósforo. Las pérdidas relativas de P en las aguas subterráneas son muy pequeñas en comparación con el N, mucho más soluble.

D) Aportes de nutrientes en forma particulada asociados a fenómenos de erosión.

La carga de nutrientes en forma particulada es el resultado de la concentración de nutrientes por cantidad de sedimento transportado.

Datos de entrada del modelo:

- 1) **Concentración media de nutrientes en los sedimentos.** Al no disponer de datos propios se ha utilizado los valores típicos recomendados por defecto en el Manual del usuario del GWLF.

Tabla 12. Carga de nutrientes en los sedimentos, para el cálculo en la CED.

Nitrógeno Total	Fósforo Total
3000 mg/kg de sedimento	1300 mg/kg de sedimento

E) Aportes de nutrientes en forma particulada por escorrentía urbana:

Se modelizan mediante funciones de acumulación exponencial y de lavado (AMY ET AL. 1974). Los nutrientes se acumulan -Nk- en las superficies urbanas según una constante de acumulación -nk- y una tasa de depleción - β día⁻¹-, según la ecuación:

$$dNk/dt = nk - \beta Nk$$

Datos aportados por los autores indican que el 90 % de la máxima acumulación se alcanza a los 20 días. En la figura adjunta se muestra esta acumulación como función del tipo de uso y el tiempo transcurrido desde la última lluvia.

A esta ecuación se le añade un término de sustracción, que considera los efectos del lavado por la escorrentía, según la siguiente ecuación:

$$W_{kt} = 1 - e^{-1,81Q_{kt}}$$

La escorrentía Q_{kt} (cm) se calcula recurriendo de nuevo a la aplicación del método de Número de Curva del Servicio Americano de Conservación del Suelo y asumiendo que 1,29 cm de escorrentía podría lavar el 90 % de los contaminantes.

Las cargas mensuales de nutrientes en el polvo o suciedad se calculan aplicando unos coeficientes expresados en mg de nutrientes a los k de sedimento transportado.

Datos de entrada del modelo:

- 1) **Número de Curva de Escorrentía Directa.** Se ha asignado un valor al número de curva de escorrentía basándose en valores medios publicados en U.S. Soil Conservation Service's Technical Release nº 55, 1986. Valor de 90.
- 2) **Concentración media de nutrientes en los sedimentos.** Se han empleado los valores típicos recomendados, ver tabla 12.

F) Cálculo de carga procedente de aportes puntuales en la Cuenca de Escorrentía Directa (CED).

En función de que el vertido se realice directamente al embalse, o se haga a través de vertidos indirectos se han considerado varias posibilidades.

- **Sistemas sépticos en viviendas o núcleos de viviendas alejadas de masas de aguas.** Tipo de vertido indirecto (S1)
- **Sistemas sépticos de corto recorrido.** Se trata de aquellos que están muy cerca de las aguas superficiales (< 15 m) y sólo se retira la fracción de N y P que toman las plantas Tipo de vertido indirecto (S3).

- **Sistemas de descarga directa.** Son los efluentes que bien directamente o bien tras algún tipo de depuración se producen directamente al embalse.

Datos de alimentación del modelo:

- 1) **Número de habitantes por origen del vertido:** Se ha considerado el número de habitantes censados.
- 2) **Cargas contaminantes.** Para los vertidos procedentes de viviendas alejadas de una masa de agua se han tomado los valores reflejados en la siguiente tabla.

Tabla 13. Aportación de nutrientes por habitante y año en viviendas alejadas la masa de agua. (Guía Harp nº 4).

Aporte de nutrientes	Nitrógeno Total (kg/hab.año)	Fósforo Total (kg/hab.año)
Viviendas alejadas de masas de agua	0,05	0,02

Para el resto de vertidos se ha asignado un valor de carga de nutrientes unitaria por habitante y día.

Tabla 14. Carga unitarias de nutrientes y dotación de agua per capita. (guía HARP nº 4)

Nitrógeno Total (g/h-e día)	Fósforo Total (g/h-e día)	Dotación
12	2,5	200 l/hab día

- 3) **Reducción de nutrientes en sistemas sépticos de corto recorrido.** Mediante estos sistemas se asume que sólo se retira la fracción de N y P que toman las plantas.

Tabla 15. Carga de nutrientes retirada por las plantas.

Nitrógeno Total (g/día)	Fósforo Total (g/día)
1,6	0,4

4.3. Aportes por recarga interna desde el embalse

Este tipo de aportes incluye tanto la regeneración de nutrientes en los sedimentos, que en determinadas condiciones vuelven al agua por difusión, como la resuspensión mecánica de sedimentos que contribuyen a la cantidad de fósforo total en el agua.

La sedimentación neta de nutrientes es equivalente a la sedimentación total menos la recarga interna, de modo que cuando se dispone de datos periódicos de cargas externas, cargas evacuadas (detracciones) y cargas en el agua, se puede realizar un balance en el periodo comprendido entre fechas de muestreo contiguas.

4.4. Balance de nutrientes en el embalse

Una vez estimados los aportes externos (tributarios, escorrentía directa y precipitación), junto a aquellas pérdidas que se producen a través de las detracciones de agua del embalse, es posible realizar un balance global que informa en cada caso sobre la importancia que adquiere cada una de las fuentes consideradas en el cómputo global.

4.5. Estimación de la carga crítica

Como aproximación ha sido utilizado el concepto de carga crítica de Vollenweider, que establece un límite de carga de fósforo (L) por encima del cual se considera que la masa de agua tenderá a eutrofizarse. Este límite aumenta en función de la profundidad media del embalse (z) y del tiempo de residencia hidráulica (Tw), según la siguiente expresión, que considera una concentración crítica de 10 µg-P/l:

$$L(P)_i = 10q_s \left(1 + \sqrt{\frac{z}{q_s}}\right), \text{ donde } q_s = z/Tw$$

5. RESULTADOS. CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA

Las 4 campañas de muestreo realizadas en el embalse se han distribuido a lo largo de los años 2007 y 2008. Las fechas concretas del muestreo se presentan en la siguiente tabla, donde se indica también si hay estratificación térmica en el embalse.

Tabla 16. Campañas y fechas de muestreo.

Campaña	Fechas de muestreo	Estratificación
1ª Campaña	6-8/08/2007	No
2ª Campaña	16-17/10/2007	No
3ª Campaña	4-7/02/2008	No
4ª Campaña	14-16/04/08	No

Los resultados físico-químicos, químicos y biológicos de cada una de las campañas de muestreo se presentan en los **Anejos 2, 3 y 4**, respectivamente.

5.1. Características morfológicas e hidrológicas

El embalse tiene una gran extensión (6.253 ha en su máximo nivel normal, y durante el periodo estudiado 5.187 ha de media), con una longitud máxima de 17 km, una profundidad media baja (9 m), y una profundidad máxima que alcanza los 24 m. La capacidad máxima original del embalse es de 540 hm³. Se trata por tanto de un embalse de grandes dimensiones, con gran superficie y poca profundidad como indica su desarrollo de volumen superior a la unidad.

Por su situación geográfica se trata de un embalse potencialmente monomíctico, típico de zonas templadas⁴. Sin embargo, durante el periodo estudiado se ha comportado como un sistema holomíctico (ausencia de estratificación), situación ya registrada en anteriores estudios⁵. Ésta se debe a la acción combinada de los vientos constantes y la

⁴ Significa que presenta un único ciclo anual de mezcla-estratificación vertical

⁵ Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica del Ebro, 1996; Asistencia técnica para la actualización limnológica de embalses, 2001; Determinación del potencial ecológico de los embalses del Ebro 2006

escasa profundidad de la columna de agua que favorece la ausencia de estratificación. Por su parte, la zona fótica en el periodo de estudio a alcanzado un grosor de 4 m, aunque esta capa presenta una distribución heterogénea en el embalse, oscilando entre los 2,1 m y 5,7 m.

En la siguiente tabla se presentan las medias mensuales de la explotación hidráulica correspondientes al periodo estudiado (2007-2008).

Tabla 17. Parámetros hidráulicos mensuales en el periodo de estudio.

Periodo 2007-2008	Volumen hm ³	Salidas totales hm ³	Entradas totales hm ³	Ts años	Te años
Julio	391,75	43,12	9,15	0,77	3,64
Agosto	349,26	35,84	7,36	0,83	4,03
Septiembre	325,98	22,63	9,79	1,18	2,74
Octubre	321,60	10,71	9,28	2,55	2,94
Noviembre	319,44	6,55	14,33	4,01	1,83
Diciembre	330,34	2,74	11,88	10,23	2,36
Enero	337,79	4,31	14,15	6,65	2,03
Febrero	348,20	3,61	11,92	7,66	2,32
Marzo	361,82	4,35	41,16	7,07	0,75
Abril	407,18	3,11	40,50	10,76	0,83
Mayo	440,11	3,02	36,64	12,36	1,02
Junio	474,33	2,86	25,46	13,65	1,53
Anual	367,26	142,87	231,62	2,57	1,59

La estrategia de explotación del embalse es plurianual, almacenando agua en los años más lluviosos para los años más secos. A escala anual el principal suministro de agua se realiza durante los meses de verano, almacenando el agua en otoño, invierno y primavera. Esto provoca que el tiempo de residencia del agua sea alto, entorno a dos años. Según los datos del periodo estudiado (julio 2007-junio 2008), y considerado las salidas, el tiempo mínimo de residencia se obtiene en el mes de julio de 2007 (0,77 años) y el máximo en el mes de junio de 2008 (13,65 años). Según las entradas el tiempo mínimo se obtiene en marzo de 2007 (0,75 años) mientras que el máximo se da en agosto de 2007 (4,03 años).

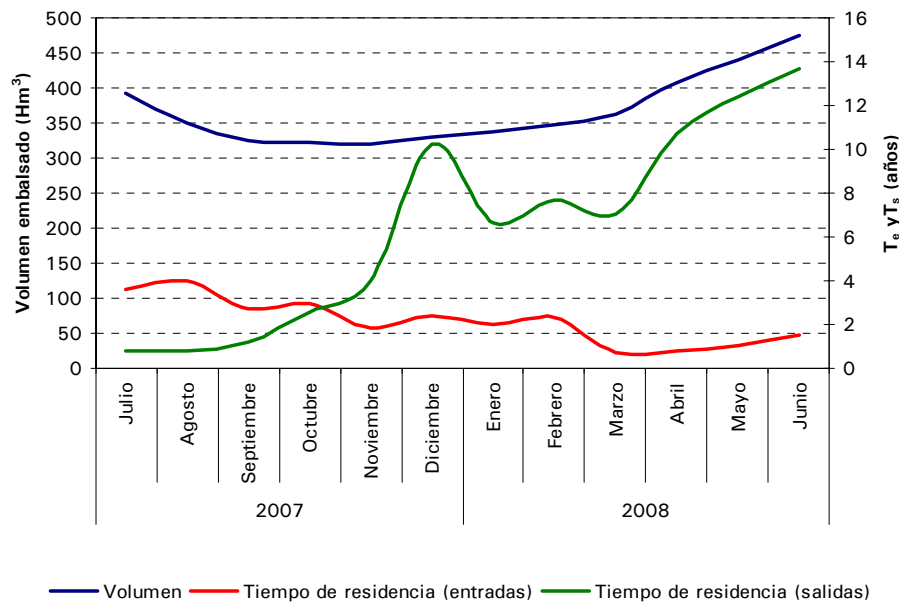


Gráfico 3. Volumen embalsado y tiempo de retención del agua.

5.2. Características físico-químicas de las aguas

Los resultados físico-químicos de cada una de las campañas de muestreo se presentan en el **Anexo 2**. Del comportamiento observado se desprenden las siguientes apreciaciones:

5.2.1. Embalse

- La **temperatura** del agua es baja y oscila desde los 4,9 °C en invierno hasta los 20°C en julio. Durante el periodo de estudio el embalse no ha presentado estratificación térmica, exceptuando una leve termoclina detectada en primavera de 2008 y en la estación E2, que no es representativa de toda la masa de agua. Aunque se trata de un embalse bastante heterogéneo, en cuanto a su morfología, no existen diferencias ostensibles entre los distintos puntos muestreados.
- El **pH** del agua es ligeramente básico con valores invernales de 7,3, en los estratos más profundos, y máximos epilimnéticos estivales de 8,9 ud.

- El **oxígeno disuelto** se mantiene alto en toda la masa de agua, alcanzando la media anual un valor de 10 mg/l O₂. En términos generales, no se han detectado condiciones desfavorables en las estaciones muestreadas, a excepción de la estación más profunda y próxima a la presa (E1), donde en la época estival se detectan condiciones anóxicas (<1 mg/l O₂) en los tres últimos metros de profundidad.
- La **conductividad** del agua es moderada, oscila en un rango que va desde los 185 hasta los 364 μ S/cm, éste máximo se registra en octubre y en la estación más próxima a Reinosa (E2). Dicha estación es, por norma general, la que presenta los registros de conductividad más altos de todas las estaciones muestreadas.
- La **transparencia** media anual para el embalse es baja 1,7 m. lo que supone un grosor de la capa trofógena en torno a 4,2 m. En todas las mediciones realizadas la transparencia se ha encontrado por debajo del umbral establecido por la OCDE, 3 m (como media anual), para identificar condiciones eutróficas. De entre las distintas estaciones muestreadas la que presenta los registros mínimos es la estación E2, con un valor de disco de Secchi, medido en invierno, de 0,5 m, en el polo opuesto se sitúa la estación E4, ubicada en la zona central del embalse, con un valor de disco de 3,1 m, registrado en octubre. Aunque conviene aclarar que gran parte de la escasa transparencia que presenta el embalse es de carácter inorgánico, como reflejan los gráficos adjuntos, donde los registros obtenidos de sólidos en suspensión guardan una estrecha relación con los valores de disco de Secchi.

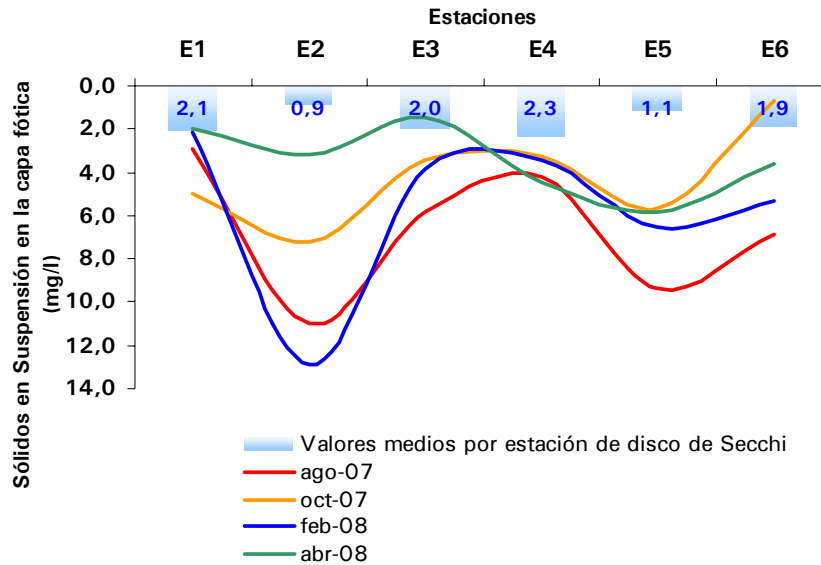


Gráfico 4. Evolución anual de los sólidos en suspensión y valores medios de disco de Secchi.

5.2.2. Tributarios

- La **temperatura** del agua que han registrado los tributarios es baja y oscila desde los 5,3 °C en invierno, registrados en T1, hasta los 19,5°C registrados en julio, en el río Hajar, aguas arriba de Reinosa (T6).
- El **pH**, al igual que en el embalse, es ligeramente básico. Los valores oscilan entre 6,9 ud., mínimo otoñal registrado en el río Nava (T2), y 9 ud, registradas en T6 en la campaña de verano.
- Todos los tributarios presentan una buena oxigenación, aunque los puntos adyacentes al embalse (T1, T2 y T3), presentan los registros mínimos durante las campañas de verano y otoño, el mínimo (5 mg/l O₂) se ha dado en el río Virga (T3).
- La **conductividad** del agua es moderada, aunque ligeramente superior en los puntos situados aguas arriba de Reinosa. El rango de conductividad en estos puntos oscila entre 335 y 517 μS/cm (T5 y T7, respectivamente), según los valores medios anuales. Por su parte, entre los puntos más cercanos al embalse el máximo se da en T1 (449 μS/cm) , mientras que el mínimo, 186 μS/cm, lo presenta el río Virga (T3).

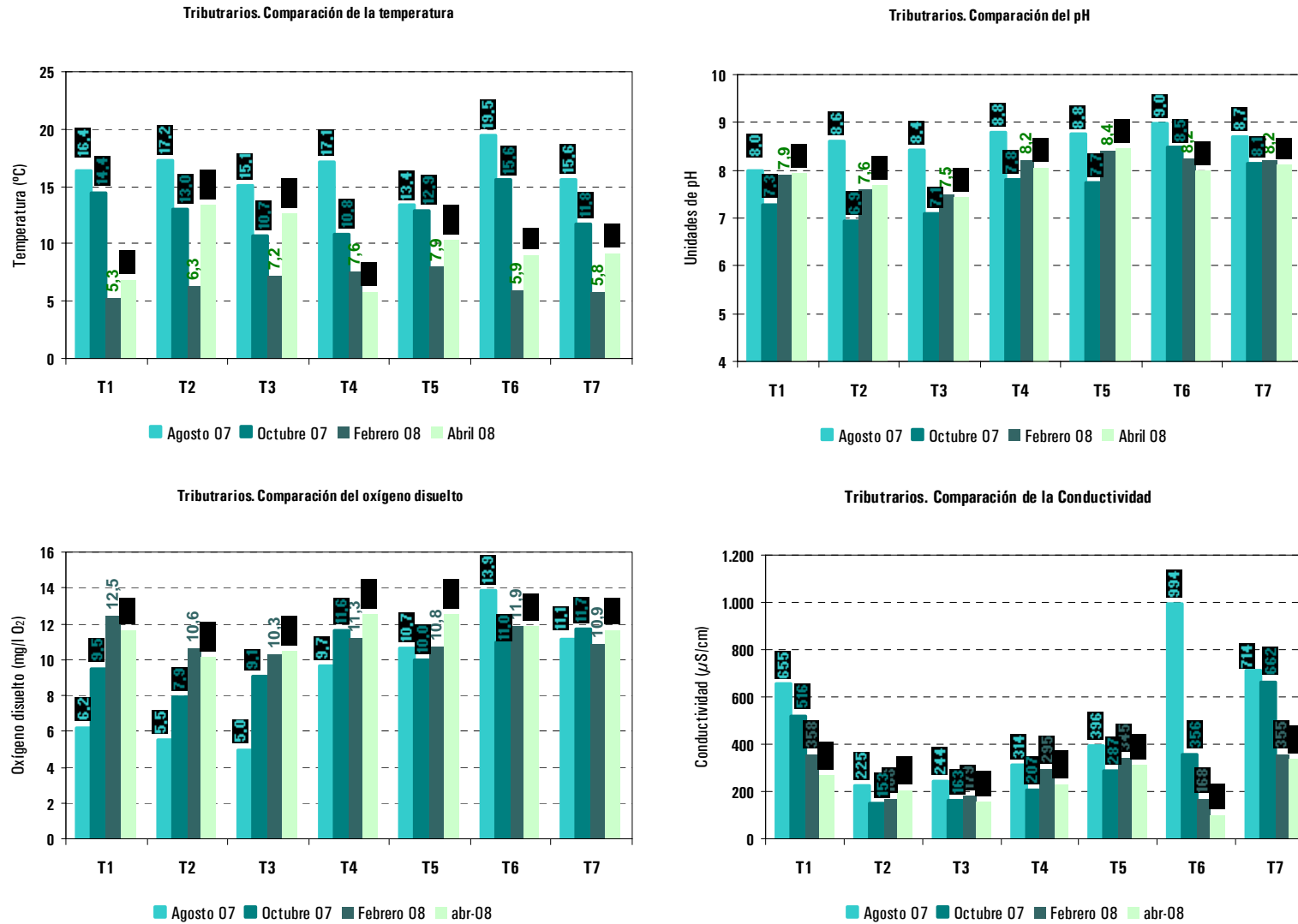


Gráfico 5. Datos físico-químicos de tributarios. Comparativa entre las campañas realizadas.

5.3. Hidroquímica de las aguas

Los resultados químicos obtenidos para cada campaña de muestreo, junto con los resultados ponderados por el volumen, se presentan en el **Anexo 3**. De ellos se desprenden las siguientes consideraciones.

5.3.1. Embalse

Los elementos denominados de proporcionalidad aproximadamente constante son los que definen la **composición mineralógica** del agua. De ellos, se han valorado alcalinidad, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos. En el gráfico adjunto se describe la composición iónica del agua en términos porcentuales. Las aguas son de carácter bicarbonatadas-cálcicas y poco mineralizadas. La alcalinidad es moderada, presentando un valor medio anual de 58,6 mg/l CaCO_3 . Éste factor condiciona la capacidad de precipitación de fosfatos, rasgo de gran importancia en la determinación del potencial trófico de las aguas.

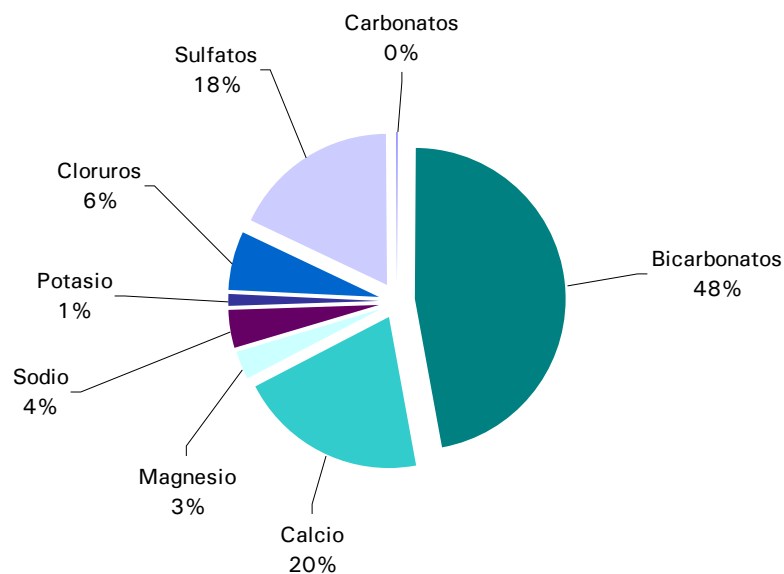


Gráfico 6. Composición iónica de las aguas en términos porcentuales.

El contenido en **materia orgánica** del agua del embalse es bajo, 1,4 mg O_2 /l de DBO_5 y 2,9 mg O_2 /l de oxidabilidad, con una relación DBO_5/DQO de 0,5 normal en aguas naturales.

Durante el periodo estudiado las estaciones que han presentado los mayores registros han sido E2, estación más próxima a Reinosa, y E5, estación de muestreo ubicada frente a La Población. La primera presenta el máximo de DBO₅ (3 mg/l O₂) en invierno, posiblemente debido a una menor actividad microbiana por el descenso de la temperatura; por su parte, la estación E5 ha presentado el máximo anual para la DQO, 5,3 mg/l O₂, en la campaña de otoño.

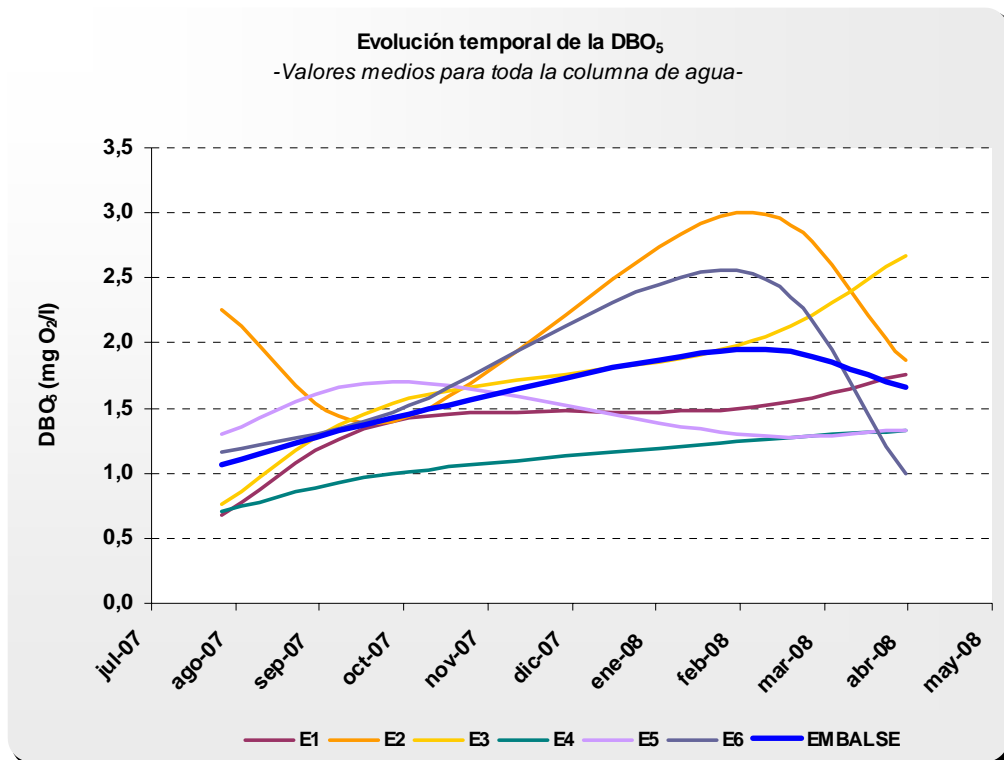


Gráfico 7. Evolución temporal de la DBO₅.

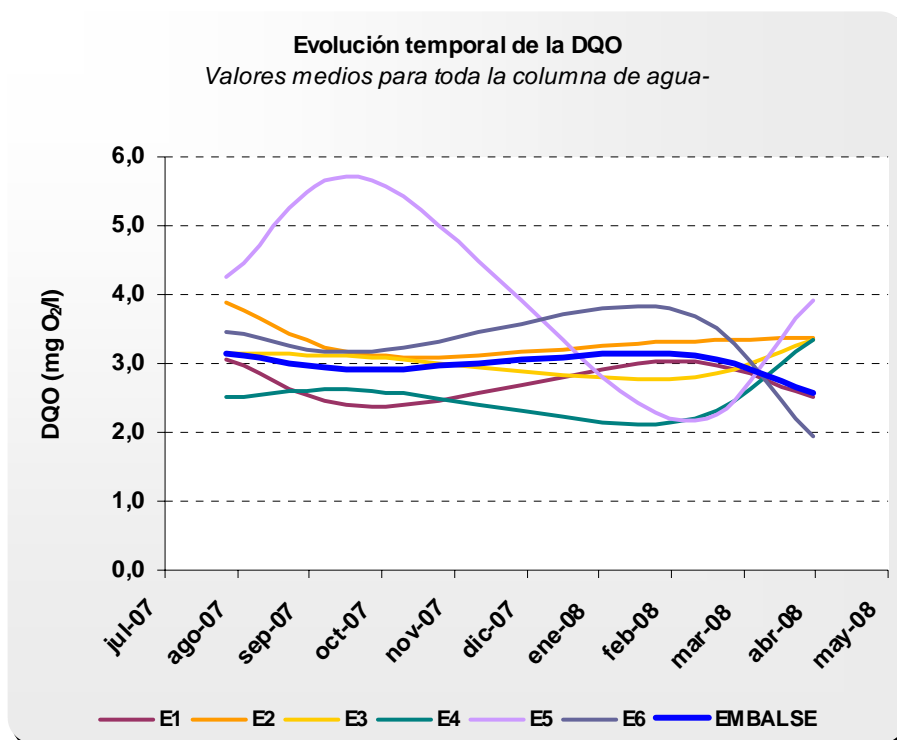


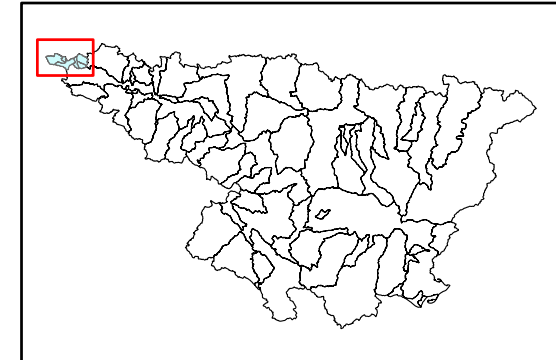
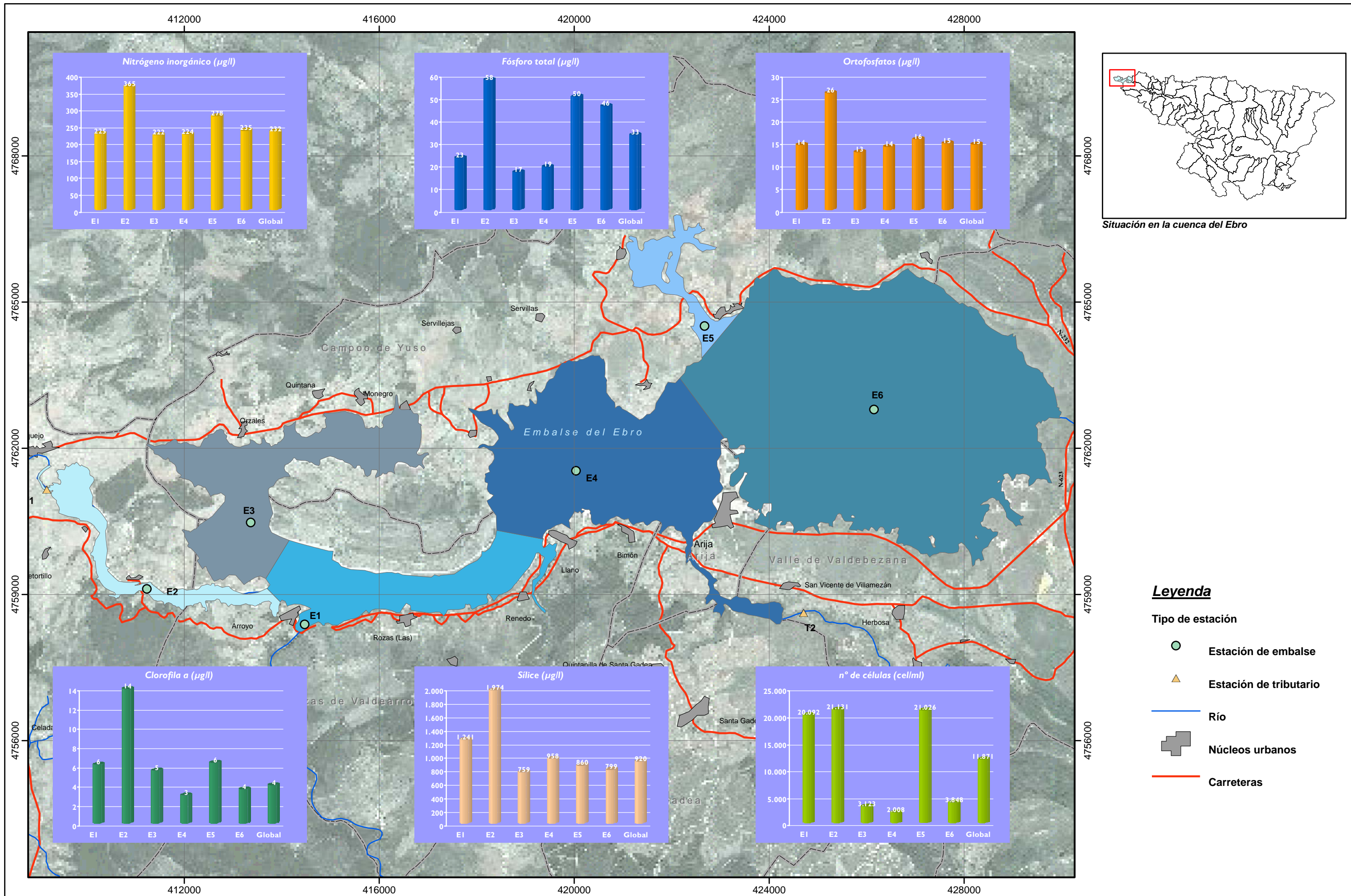
Gráfico 8. Evolución temporal de la DQO.

En la siguiente tabla se presentan los valores medios anuales de los parámetros más directamente relacionados con el estado trófico del embalse, en el periodo estudiado, para toda la columna de agua y la capa fótica.

Tabla 18. Valores medios anuales de los descriptores del grado trófico.

AÑO 2007/2008	Disco Secchi	NIT	PT	PO4	Cla	Si	NIT/PO ₄
Descripción	(m)	(µg N/l)	(µg P/l)	(µg P/l)	(µg/l)	(µg/l)	
Media ponderada anual en embalse:	2,0	232	33	15	-	920	16
Valor medio ponderado anual en E1:	2,1	225	23	14	-	1.241	16
Valor medio ponderado anual en E2:	0,9	365	58	26	-	1.974	14
Valor medio ponderado anual en E3:	2,1	222	17	13	-	759	17
Valor medio ponderado anual en E4:	2,4	224	19	14	-	958	16
Valor medio ponderado anual en E5:	1,1	278	50	16	-	860	18
Valor medio ponderado anual en E6:	1,9	235	46	15	-	799	16
Media ponderada anual en capa fótica:	-	221	26	14	4	887	16
Media ponderada anual en capa fótica E1:	-	216	23	13	6	1.313	16
Media ponderada anual en capa fótica E2:	-	335	59	23	14	1.334	15
Media ponderada anual en capa fótica E3:	-	229	15	13	5	820	18
Media ponderada anual en capa fótica E4:	-	224	19	14	3	918	16
Media ponderada anual en capa fótica E5:	-	207	48	17	6	602	12
Media ponderada anual en capa fótica E6:	-	220	32	15	4	800	15

La concentración media de **nitrógeno inorgánico total (NIT)** que ha presentado el embalse, 232 mg/l N, se encuentra en rangos moderados. De las distintas formas que lo



Situación en la cuenca del Ebro

Leyenda

- Tipo de estación
- Estación de embalse
 - Estación de tributario
 - Río
 - Núcleos urbanos
 - Carreteras

componen predominan los nitratos ($\text{NO}_3/\text{NIT} = 86\%$), siendo la proporción de amonio moderada ($\text{NH}_4/\text{NIT} = 12\%$) y la de nitritos pequeña ($\text{NO}_2/\text{NIT} = 1\%$).

Las estaciones E5 y E2 presentan una elevada proporción anual de amonio (39 y 29%, respectivamente), lo que denota la proximidad de vertidos a estos puntos. El máximo absoluto se ha registrado en la campaña de verano en la estación E2, donde el amonio llega a representar hasta el 65% del NIT.

Como se observa en el gráfico adjunto, en términos generales las mayores concentraciones de NIT se dan en verano. La única estación que no mantiene esta pauta es E2, que presenta el máximo, 0,64 mg N/l, en invierno. La línea roja señala el umbral (250 $\mu\text{g/l}$) por debajo del cual la concentración de NIT puede empezar a resultar limitante para el crecimiento de las algas no fijadoras de nitrógeno.

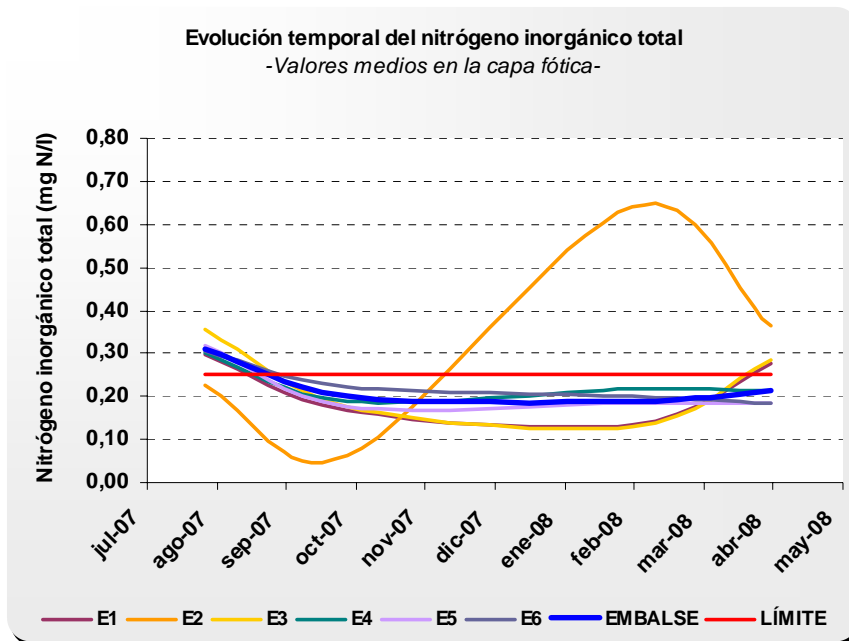


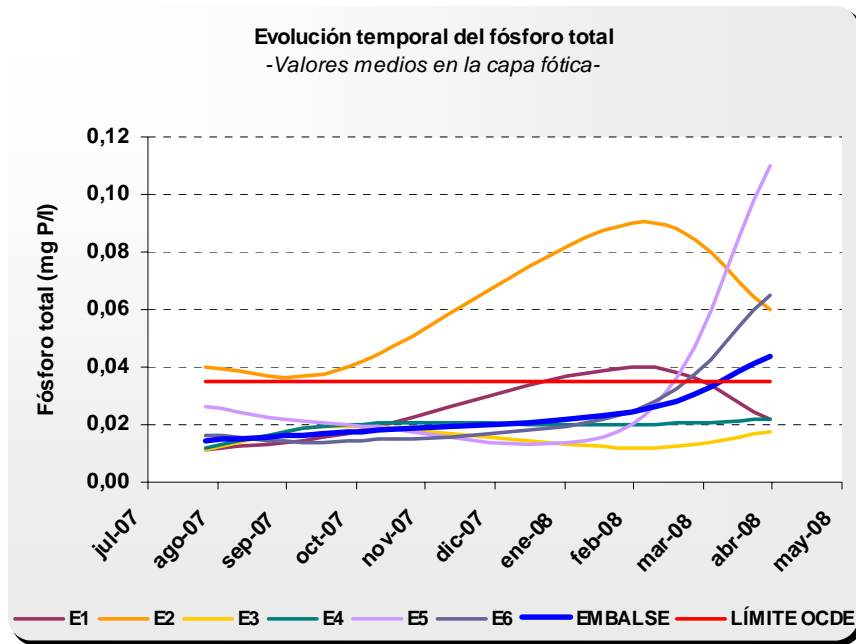
Gráfico 9. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total.

En términos generales, las mayores concentraciones se han registrado en verano, exceptuando la estación E2, que presenta sus máximos en invierno.

La concentración de **fósforo total** es moderada, situándose en 33 $\mu\text{g/l}$ P la media anual del embalse. Los resultados medios anuales obtenidos por estación reflejan que E2 y E5, al igual que ocurre con el NIT, son las que presentan unas mayores concentraciones de nutrientes, alcanzando el fósforo total un valor de 58 y 50 $\mu\text{g P/l}$, respectivamente. En orden de magnitud las sigue la estación E6, ubicada al este del embalse, y muy cercana

a la estación E5, con una concentración de 46 $\mu\text{g P/l}$. El resto de estaciones (E1, E3 y E4) presentan unas concentraciones ostensiblemente menores, con unos valores medios anuales de 23, 17 y 19 $\mu\text{g P/l}$, respectivamente.

Destaca la estación E2 por presentar valores siempre por encima del límite establecido por la OCDE para rangos eutróficos (0,035 mg P/l). Aunque los máximos absolutos se han dado en las estaciones E5 y E6 en la campaña de primavera (muestras de superficie en E5 y de media profundidad en E6).



Gráficos 10. Evolución temporal del fósforo total en la capa fótica.

Como se aprecia en el gráfico, las concentraciones de fósforo total obtenidas en la estación más próxima a Reinososa (E2), se han encontrado siempre en rangos eutróficos.

Los **ortofosfatos** mantienen una pauta espacial similar a la del fósforo total, siendo la estación E2 la que presenta el valor medio anual más alto (26 $\mu\text{g P/l}$). Respecto a la evolución temporal el mínimo anual (3,9 $\mu\text{g P/l}$) se registra en verano y el máximo en invierno (18,26 $\mu\text{g P/l}$), debido a un menor consumo algal en esta época del año. Situación mucho más evidente en E2, donde en invierno se registra la máxima concentración absoluta de ortofosfatos (44 $\mu\text{g P/l}$).

Cabe destacar que no se han detectado diferencias ostensibles entre las concentraciones medias para toda la columna de agua y las obtenidas para la capa fótica.

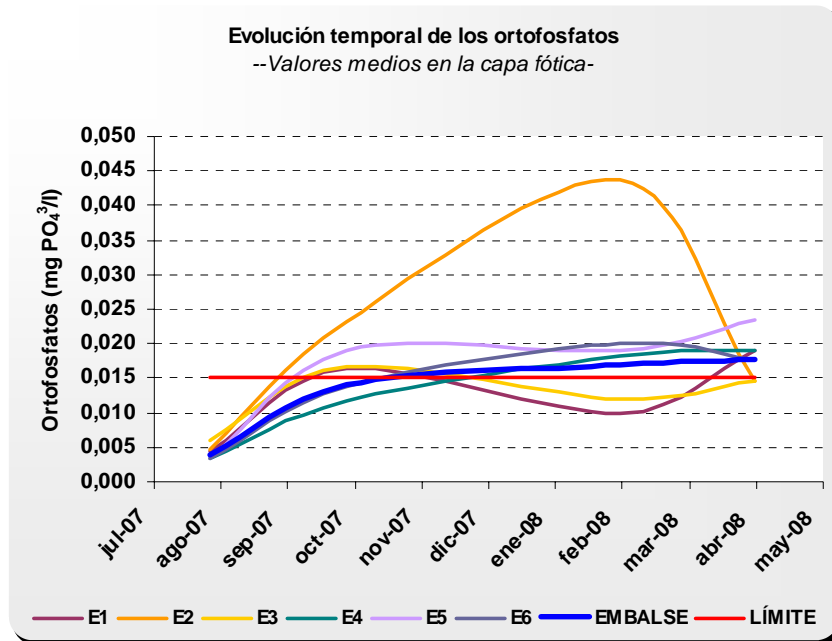


Gráfico 11. Evolución temporal de los ortofosfatos en la capa fótica.

En el gráfico puede observarse que en verano, en la totalidad del embalse, existe un alto consumo algal, manifestado por las bajas concentraciones determinadas.

Como se puede apreciar en el gráfico, donde la línea roja señala el umbral por debajo del cual la concentración de ortofosfatos puede empezar a resultar limitante para el crecimiento de las algas, siendo en verano cuando pueden ejercer como limitantes.

Por otra parte, una relación entre las formas biológicamente disponibles de nitrógeno y fósforo mayor de 7 sugiere que es el fósforo el elemento limitante potencial, situación que se da en el embalse para el periodo estudiado. Todas las estaciones mantienen esta pauta, exceptuando la estación E2; donde el nitrógeno puede pasar a ejercer como elemento limitante en otoño (gráfico 12).

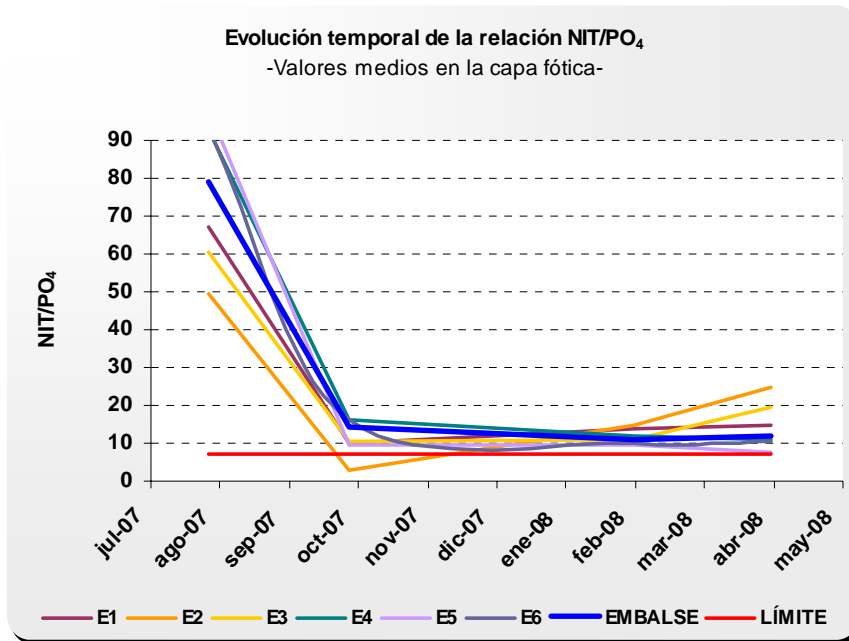


Gráfico 12. Evolución anual del ratio NIT/PO₄ en la capa fótica.

La **sílice** presenta un valor medio anual de 920 $\mu\text{g Si/l}$, la estación que presenta una mayor concentración anual es E2 (1974 $\mu\text{g Si/l}$), situándose en el polo opuesto E3, con un registro de 759 $\mu\text{g Si/l}$.

Respecto a la evolución anual en la capa fótica, cabe mencionar que las concentraciones han oscilado entre 781, mínimo otoñal, y 1114 $\mu\text{g Si/l}$, máximo primaveral, que coincide con un menor consumo por parte de las diatomeas, como demuestra el bajo número de células algales registrado para este grupo en primavera.

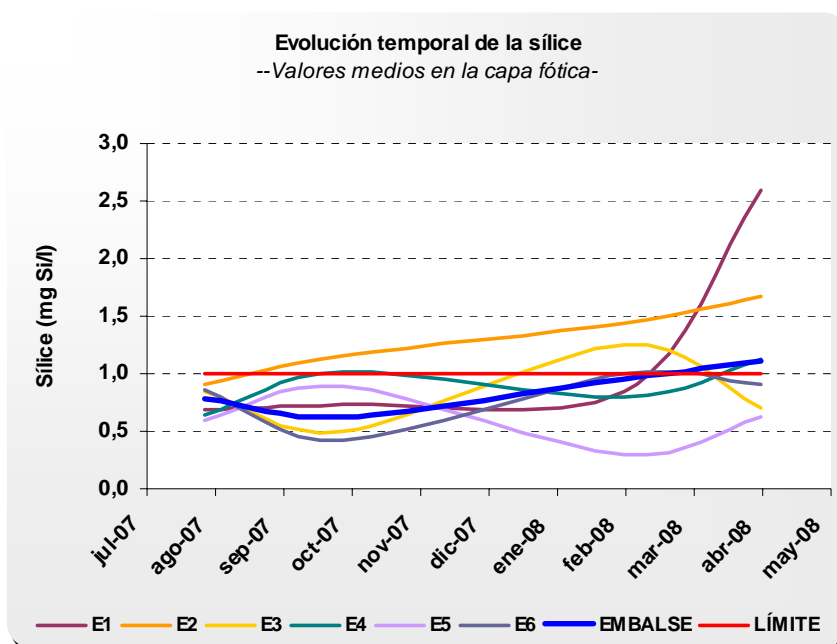


Gráfico 13. Evolución temporal de la sílice en la capa fótica.

Por último, conviene hacer referencia que ninguna de las muestras tomadas para la determinación de **sulfuros**, en fondo, ha superado el límite de cuantificación (0,06 mg S²⁻/l). Por su parte, de las veinticuatro (24) muestras tomadas para las determinaciones de **hierro** en fondo, tan sólo tres (3) muestras han superado levemente los umbrales dispuestos para producción de agua potable tipo A1 (0,3 mg/l Fe); dos de ellas en la campaña de verano, localizadas en las estaciones E2 y E5, y la tercera, en octubre, en la estación de presa (E1), con una concentración de 0,36 mg/l Fe.

En el caso de **manganeso** ninguna muestra tomada en fondo ha superado el umbral para producción de agua potable tipo A1 (0,05 mg Mn/l). A excepción de la muestra de verano de la estación de presa, que con un registro de 0,057 mg Mn/l, supera levemente el citado umbral.

5.3.2. Tributarios

En la tabla siguiente se presentan los valores medios anuales obtenidos para los distintos puntos de ríos muestreados, distinguiendo entre los situados antes de Reinosa (T5, T6 y T7) y los puntos más próximos al embalse.

Tabla 19. Valores medios anuales obtenidos en los tributarios.

PARÁMETRO	UNIDAD	MEDIA ANUAL						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Sólidos en suspensión	mg/l	16,8	2,3	3,9	3,8	6,8	4,5	8,5
Alcalinidad total	mg CO ₃ Ca/l	92,8	52,7	50,5	70,4	98,7	68,1	123,7
DBO ₅	mg O ₂ /l	3,5	1,4	2,2	1,7	1,8	1,9	1,6
Oxidabilidad	mg O ₂ /l	5,6	3,0	11,7	4,4	2,5	2,6	3,4
Fósforo total	mg P/l	0,29	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,06
Fosfatos	mg PO ₄ ³⁻ /l	0,318	0,032	0,056	0,040	0,028	0,045	0,117
Fosfatos	mg P/l	0,104	0,011	0,018	0,013	0,009	0,015	0,038
Nitrógeno kjeldahl	mg N/l	2,9	2,2	2,3	2,2	1,9	2,1	1,9
Amonio total	mg NH ₄ /l	0,784	0,036	0,055	0,035	0,052	0,032	0,027
Amonio total	mg N/l	0,610	0,028	0,043	0,027	0,041	0,025	0,021
Nitrógeno orgánico	mg N/l	2,28	2,22	2,26	2,13	1,82	2,07	1,89
Nitratos	mg NO ₃ /l	3,7	1,0	1,1	1,1	2,5	0,8	2,7
Nitratos	mg N/l	0,8	0,2	0,2	0,2	0,6	0,2	0,6
Nitritos	mg NO ₂ /l	0,046	0,075	0,006	0,008	0,014	0,006	0,031
Nitritos	mg N/l	0,014	0,023	0,002	0,002	0,004	0,002	0,010
Nitrógeno inorgánico	mg N/l	1,46	0,27	0,28	0,28	0,62	0,21	0,64

Entre los puntos tributarios más próximos al embalse es T1, río Ebro tras su paso por Reinosa, el que mayor concentración anual de **nitrógeno** presenta (1,46 mg N/l), éste punto es el más cercano a la estación E2, lo que justifica las altas concentraciones registradas en esta estación de embalse. El resto de puntos (T2, T3 y T4) presentan unas concentraciones ostensiblemente menores, con valores medios anuales en torno a 0,28 mg N/l.

La evolución temporal que se ha dado en (T1) no presenta una buena correlación con la obtenida en la estación de embalse E2, lo que sugiere que pueden existir otros aportes en el tramo entre estaciones. Como se aprecia en el gráfico adjunto ésta estación ha presentado una concentración de nitrógeno muy superior al resto de puntos analizados, siendo en verano, al igual que ocurre en el embalse, cuando se registra el máximo (3,22 mg/l N).

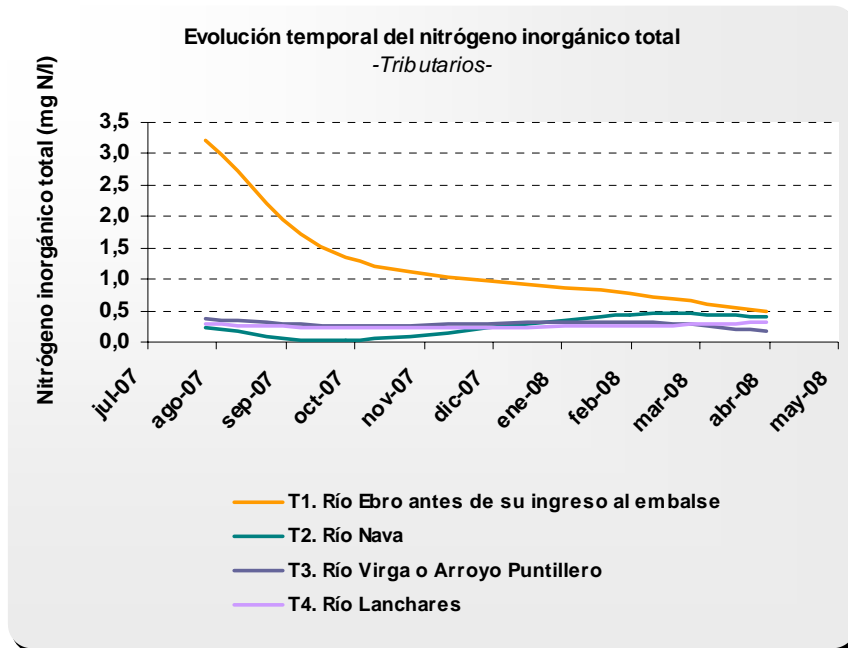


Gráfico 14. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total en los tributarios.

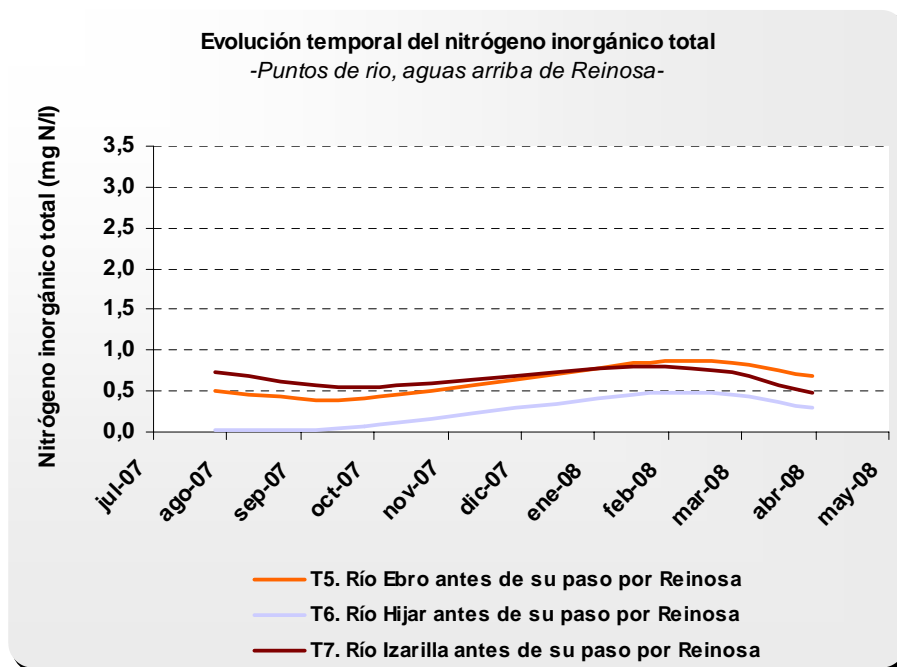


Gráfico 15. Evolución temporal del nitrógeno inorgánico total aguas arriba de Reinosa. El río Híjar es el que ha presentado una menor concentración de nitrógeno.

Por su parte, los puntos de río situados antes de Reinosa (T5, T6 y T7) han presentado una concentración media anual de 0,62, 0,21 y 0,64 mg N/l, respectivamente. Los valores máximos se sitúan en invierno, mientras que los registros mínimos se dan en otoño. El registro máximo se ha dado en la campaña de invierno en el punto T5 (0,87

mg N/l). En términos generales, las concentraciones en estos puntos han sido inferiores que los obtenidos para T1, situación mucho más acusada en verano.

El **fósforo total** ha mantenido prácticamente la misma pauta que la descrita para el NIT, registrándose las mayores concentraciones en T1, con un máximo veraniego de 0,57 mg P/l. Tan sólo en la campaña de invierno se ha registrado una concentración más alta en el río Lanchares (0,07 mg P/l)

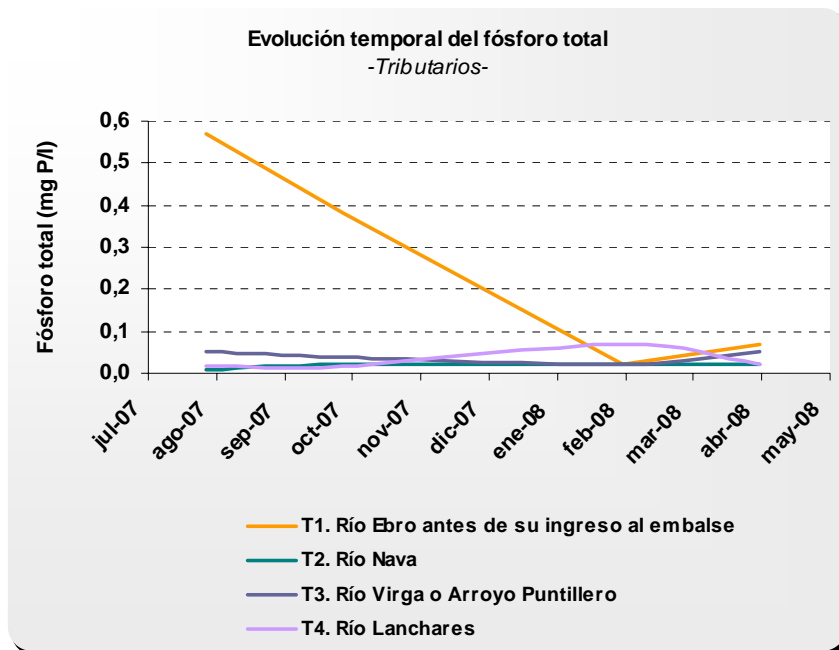


Gráfico 16. Evolución temporal del fósforo total de los tributarios.

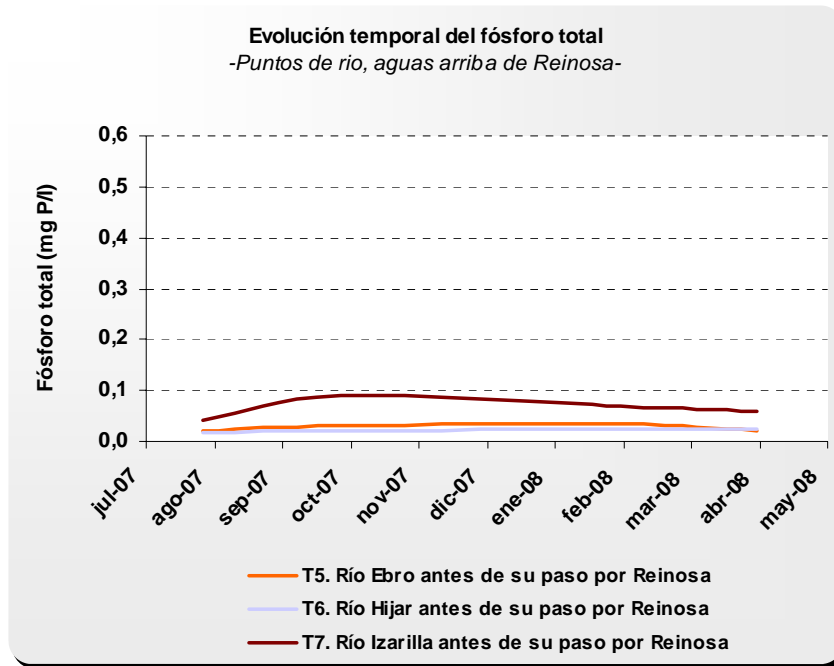


Gráfico 17. Evolución temporal del fósforo total aguas arriba de Reinosa.

Entre los puntos situados aguas arriba de Reinosa el que presenta una mayor concentración de **fósforo total** es el río Izarilla T7, con un valor medio anual de 0,06 mg P/l. El máximo valor absoluto, 0,09 mg P/l, lo ha presentado en otoño.

Todos estos puntos de muestreo presentan unas concentraciones de fósforo inferiores a las determinadas en el punto T1, ubicado aguas abajo de Reinosa, situación mucho más ostensible en verano y otoño. Tan sólo en invierno las concentraciones de fósforo en el punto T1 han sido inferiores a las registradas para los puntos T5 y T7.

Los **ortofosfatos** mantienen idéntica pauta que la descrita para el fósforo total registrándose las mayores concentraciones en T1, con un máximo veraniego de 0,21 mg P/l. Entre los puntos situados aguas arriba de Reinosa se dan las mayores concentraciones en el río Izarilla (T7), pero siempre muy por debajo de las obtenidas en T1, a excepción de la campaña de invierno.

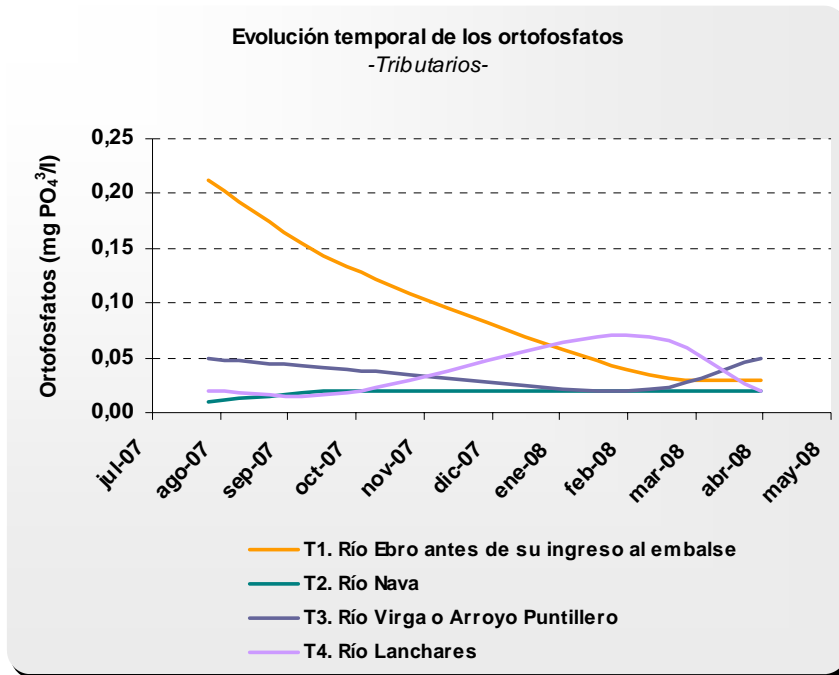


Gráfico 18. Evolución temporal de los ortofosfatos en los tributarios del embalse.

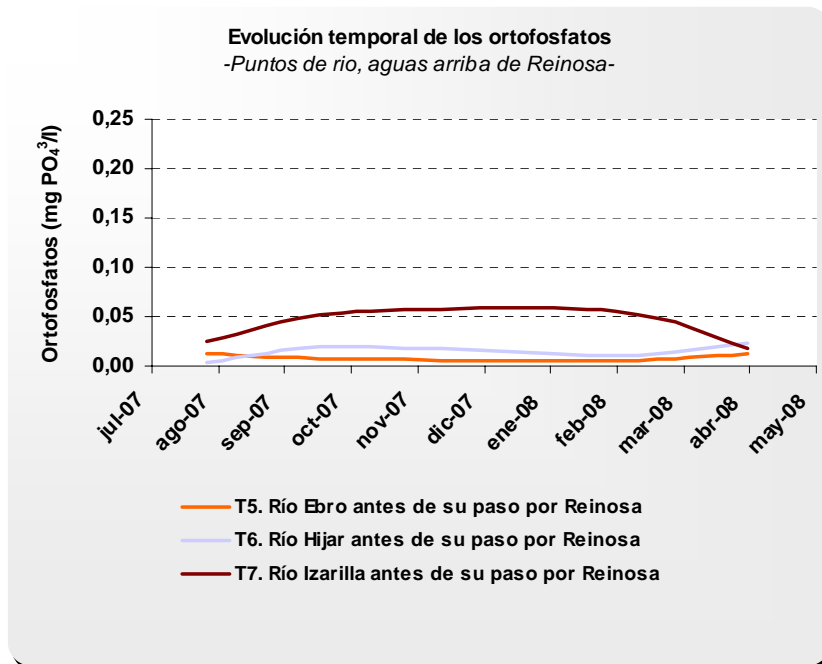


Gráfico 19. Evolución temporal de los ortofosfatos aguas arriba de Reinosa. Al igual que para el fósforo total los máximos valores de ortofosfatos se han dado en el río Izarilla (T7).

5.4. Sedimentos

5.4.1. Embalse

El análisis granulométrico de los sedimentos realizado en las distintas estaciones de muestreo ha puesto de manifiesto la preponderancia en el embalse del sedimento de tipo arcilloso, tan sólo en las estaciones E4 y E6, el sedimento se ha clasificado como franco arcilloso.

Los resultados obtenidos en el estrato superficial de los sedimentos se recoge en los gráficos siguientes, en los que se puede ver que el contenido en **materia orgánica** es, en términos generales, moderado, aunque las estaciones E4 y E5 han presentados valores bajos. Las estaciones más profundas, E1, E3 y E6, presentan un máximo en verano, como consecuencia de la sedimentación de la producción biológica estival, y un mínimo invernal. La estación E1 ha sido la que ha presentado una mayor variación, oscilando sus valores entre el 4% y el 18,3%.

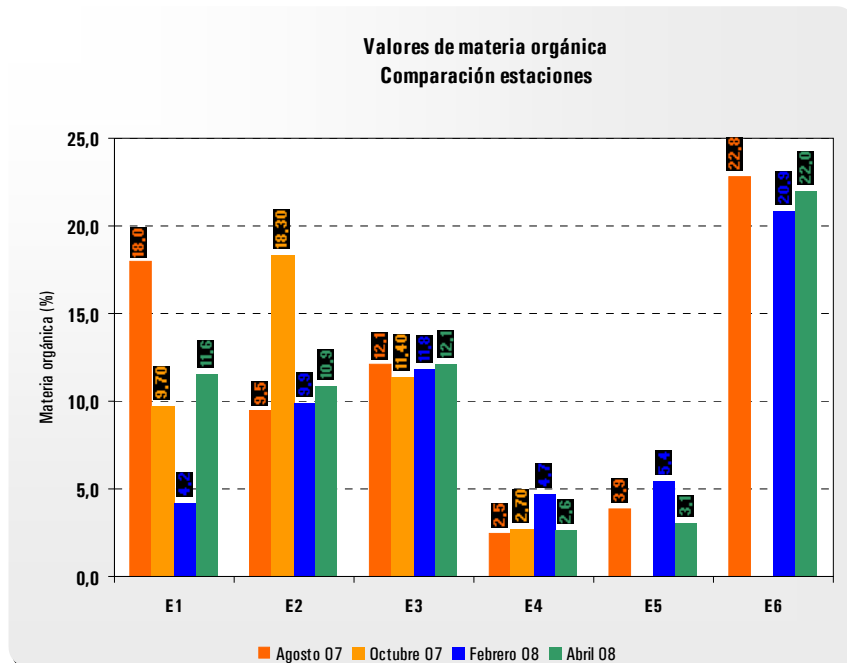


Gráfico 20. Materia orgánica en sedimentos.

El **fósforo inorgánico intercambiable (o asimilable)** presenta en términos generales, unos valores moderados-bajos, a excepción de la estación E2 que los presenta más elevados, con unas concentraciones que oscilan entre los 54,9 $\mu\text{g/g}$ y los 63,6 $\mu\text{g/g}$. Al igual que para la materia orgánica, la estación que mayor variación presenta es E1, con un registro mínimo de 7,1 $\mu\text{g/g}$ y un máximo de 28 $\mu\text{g/g}$. El resto de estaciones presenta unas concentraciones, prácticamente, constantes.

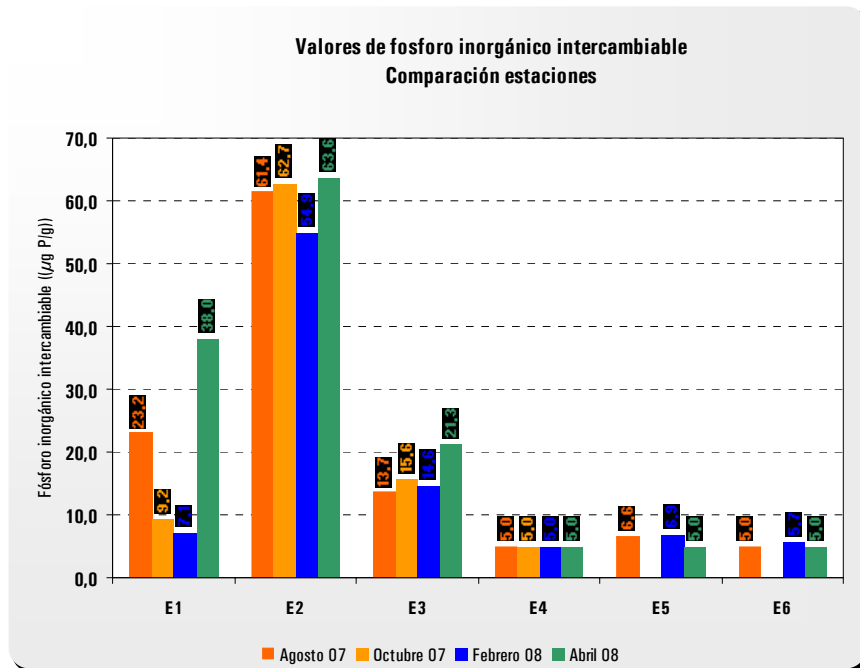


Gráfico 21. Fósforo inorgánico intercambiable en sedimentos.

Como puede observarse es E2, estación más cercana a Reinosa, la que presenta la concentración más alta de fósforo asimilable en el sedimento.

Respecto a los **compuestos nitrogenados** que se han analizado en los sedimentos (nitratos y nitritos), mencionar que todos los valores obtenidos se han encontrado por debajo del límite de cuantificación, ($< 500 \mu\text{g/g NO}_3$ y $< 10 \mu\text{g/g NO}_2$, respectivamente).

Por su parte, las concentraciones determinadas de **hierro y manganeso** se pueden considerar moderadas, aunque en algunas estaciones, en concreto E1 y E3, el hierro alcanza concentraciones moderadas-altas. No obstante, la buena oxigenación que presentan las capas más profundas no favorece la reducción de estos metales, lo que dificulta su solubilización en el agua. Como corroboran las bajas concentraciones obtenidas para estos metales en el agua de fondo que, como se citó anteriormente, en

prácticamente todas las muestras, no han superado los umbrales establecidos para producción de agua potable tipo A1.

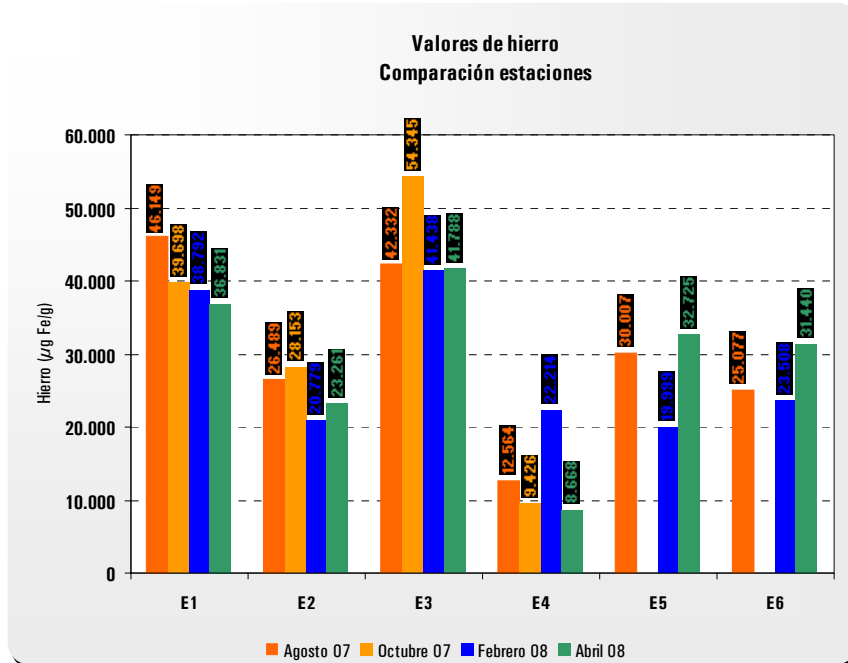


Gráfico 22. Valores de hierro en sedimento.
Como se puede apreciar el valor máximo se da en octubre en la estación E3.

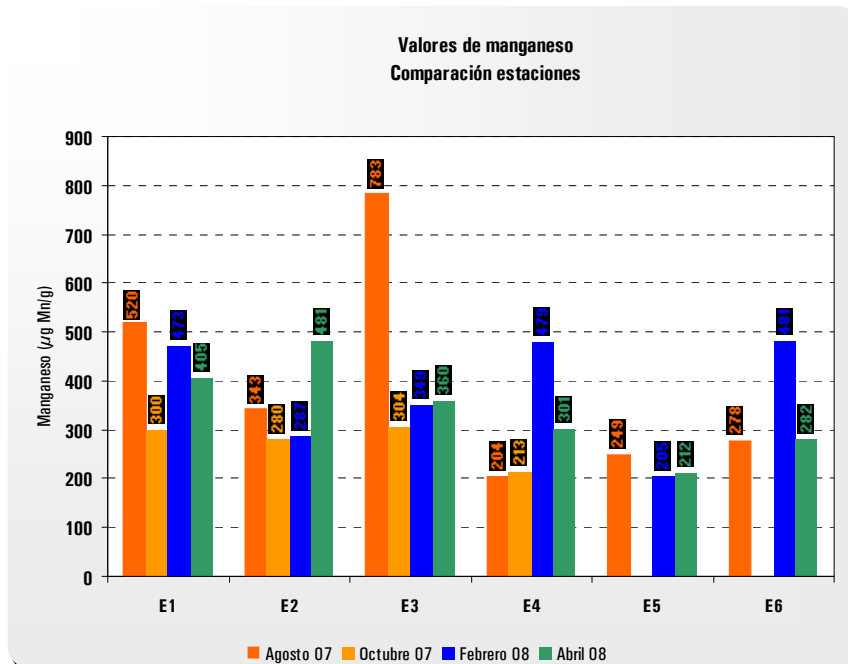


Gráfico 23. Valores de manganeso en sedimento.
Al igual que en el caso del hierro el máximo absoluto se da en la estación E3, aunque en esta ocasión en verano.

5.4.2. Tributarios

Respecto a las muestras de sedimentos tomadas en los tributarios destacan los siguientes aspectos:

El contenido en **materia orgánica** presente en los tributarios es, en términos generales, moderado-bajo. Destacan los valores obtenidos en el río Virga (T3) en octubre y en el río Lanchares (T4) en febrero, con unos valores de 51,5 y 35,7%, respectivamente, este incremento en los registros se debe, posiblemente, a los acúmulos de vegetación existentes en el punto de muestreo a la hora de la recogida de muestras.

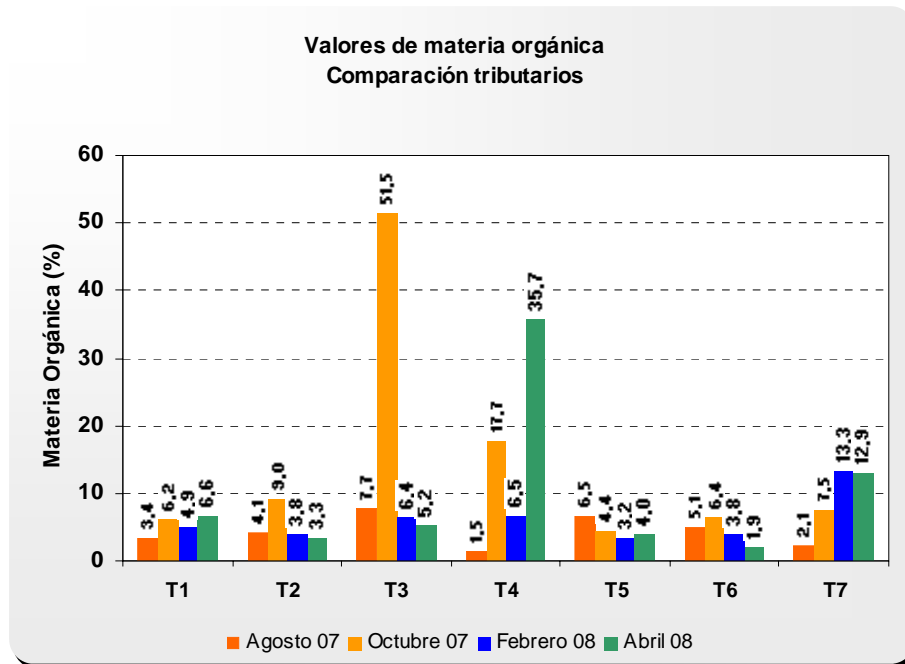


Gráfico 24. Comparación entre tributarios de la materia orgánica.

El contenido del **fósforo inorgánico intercambiable es moderado**. Entre los tributarios adyacentes al embalse (T1, T2, T3 y T4), los valores máximos los presenta el punto T1, con un valor medio anual de 31,4 $\mu\text{g P/g}$, dándose el registro máximo en la campaña de abril (49,6 $\mu\text{g P/g}$).

Por su parte, entre los puntos situados antes de la población de Reinosa, destacan T5 y T7 (río Ebro e Izarilla) con unas concentraciones de 30 y 34 $\mu\text{g P/g}$, respectivamente.

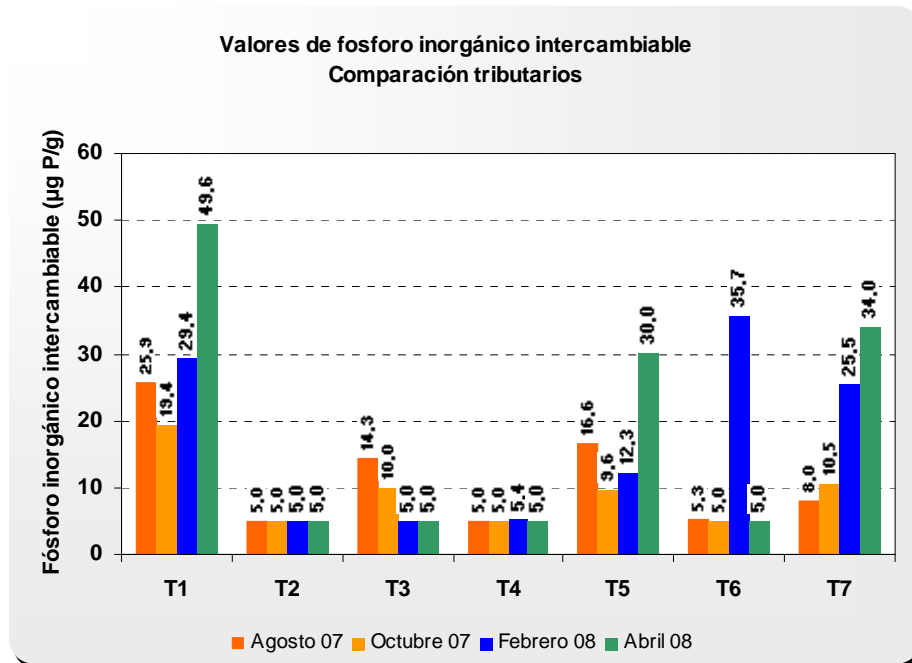


Gráfico 25. Comparativa de fósforo inorgánico intercambiable entre tributarios.

5.5. Fitoplancton y clorofila *a*

Los resultados de los análisis cuantitativos de fitoplancton se presentan en el **Anexo 4**.

De la totalidad de análisis realizados (32, repartidos en 24 cuantitativos y 8 cualitativos), se han identificado un total de 211 especies, distribuidas entre los siguientes grupos taxonómicos:

- 67 diatomeas
- 23 cianobacterias
- 81 clorofíceas
- 10 criptofíceas
- 15 crisofíceas
- 4 dinofíceas
- 2 euglenofíceas
- 9 zigofíceas

5.5.1. Composición y estructura poblacional

La composición y estructura poblacional han mantenido las siguientes pautas temporales:

Verano (agosto 2007): Se registra el mayor valor de densidad algal -37.351 cel/ml-. Cualitativamente la comunidad fitoplanctónica se caracteriza por la dominancia de las cianobacterias (97% de la densidad total), debido, principalmente, a la abundancia de *Aphanocapsa incerta*.

Las estaciones que presentan una mayor densidad son E1, E2 y E5, con unos valores de 75.131, 59.396 y 77.442 cel/ml, respectivamente. El mayor número de células en estas estaciones lo presentan las cianobacterias, siendo la especie más abundante, en E1 y E5, *Aphanocapsa incerta*, mientras que en E2 la predominante es *Microcystis aeruginosa*, especie potencialmente tóxica, con 22.607 cel/ml.

En el polo opuesto se sitúan las estaciones E3 -1.599 ce/ml- y E4 -1394 cel/ml-, donde la dominancia es compartida por cianofíceas y clorofíceas. En la estación E3 la especie más abundante es *Sphaerocystis planctonica*, mientras que en la estación E4, vuelve a ser *Aphanocapsa incerta*.

La clorofila *a* en verano presenta un registro medio de 9,5 $\mu\text{g/l}$. En términos generales, se observa una buena correspondencia entre la densidad algal y la clorofila *a*. El máximo de clorofila *a* (33 $\mu\text{g/l}$) se sitúa en la estación E2 que, aunque no presenta el mayor número de células totales, presenta el máximo número de clorofíceas.



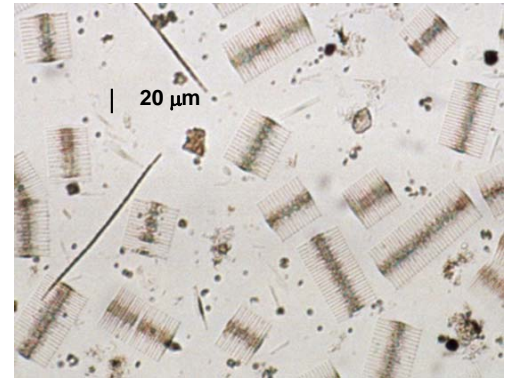
Microcystis aeruginosa, especie predominante en la estación E2, en agosto y octubre de 2007.

Otoño (octubre 2007): La densidad celular densidad fitoplanctónica presenta valores ligeramente más bajos que en verano -8.158 cel/ml-, aunque siguen manteniendo la dominancia las cianobacterias (86% de la población). La estación que presenta un mayor número de células es E2, con un registro total de 22.046 cel/ml (93%

del total celular registrado en la estación). Siendo, al igual que en verano, *Microcystis aeruginosa* la especie más representativa en esta estación (6.673 cel/ml).

Por su parte, el valor medio de clorofila *a* (7,7 $\mu\text{g/l}$) ha sufrido un ligero descenso respecto a la primera campaña de muestreo, aunque la pauta observada en verano se mantiene, siendo el punto E2 el que presenta el máximo valor, 25 $\mu\text{g/l}$.

Invierno (febrero 2008): continúa el descenso de la densidad celular con un registro medio de -1.342 cel/ml-. Las cianobacterias ceden la dominancia a las diatomeas y crisofíceas que, con el 39 y 36%, son los grupos algales con un mayor número de células. La estación E3 es la que presenta un mayor número de diatomeas (1.416 cel/ml), siendo *Fragilaria crotonensis* la especie más representativa.

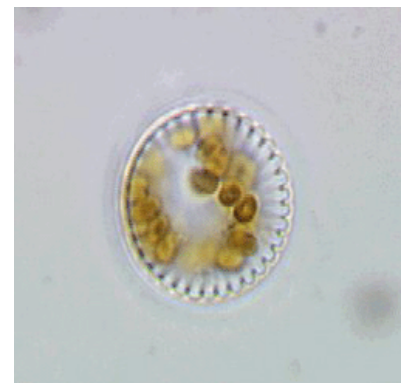


Fragilaria crotonensis, especie mayoritaria en invierno en la estación E3.

Por su parte, el valor medio de clorofila *a* (5,9 $\mu\text{g/l}$) sufre un ligero descenso respecto a las campañas precedentes, siendo el punto E1 el que presenta el registro máximo (9 $\mu\text{g/l}$).

Primavera (abril 2008): se dan los registros más bajos de densidad celular fitoplanctónica -638 cel/ml-. Las especies más abundantes en primavera pertenecen al grupo de las criptofíceas, representando el 34% del total de células determinadas. Dominancia compartida con las diatomeas, grupo predominante en invierno, que representan el 30% del total de la población.

La estación E3 es la que presenta un mayor número de criptofíceas (582 cel/ml), siendo *Rhodomonas lacustris* la especie más representativa. Por su parte, la estación E2 es la que presenta un mayor número de diatomeas, con *Cyclotella meneghiniana* como la especie más abundante (486 cel/ml).



Cyclotella meneghiniana.

El valor medio de clorofila *a* ($4 \mu\text{g/l}$) es el mínimo de todas las campañas realizadas, siendo el punto E5 el que presenta el registro máximo ($6,2 \mu\text{g/l}$).

Los gráficos siguientes recogen los cambios estacionales -climatológicos- de las comunidades fitoplanctónicas del embalse a lo largo del periodo estudiado -2007-2008-, tanto en términos absolutos como relativos.

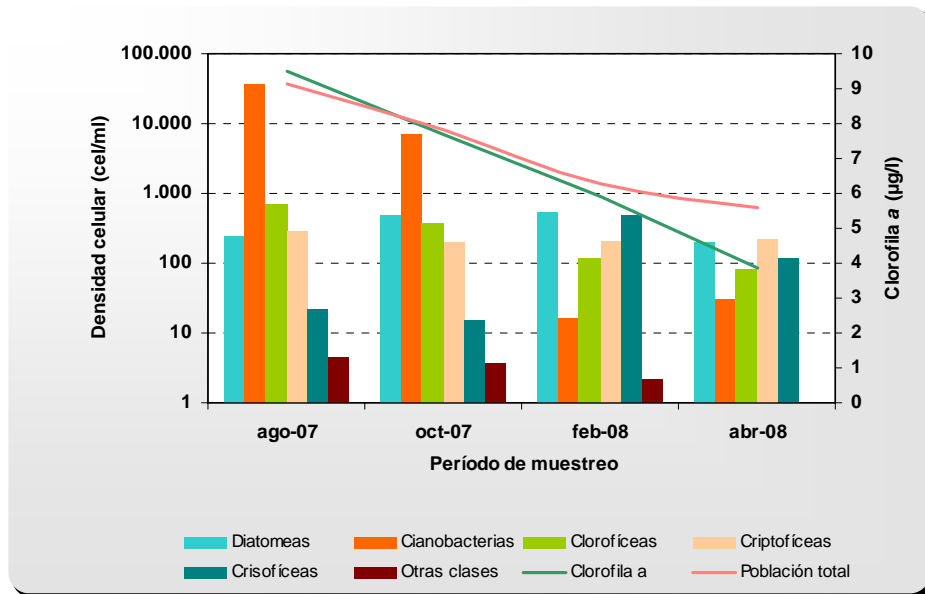


Gráfico 26. Evolución temporal de los principales grupos algales determinados en el embalse.

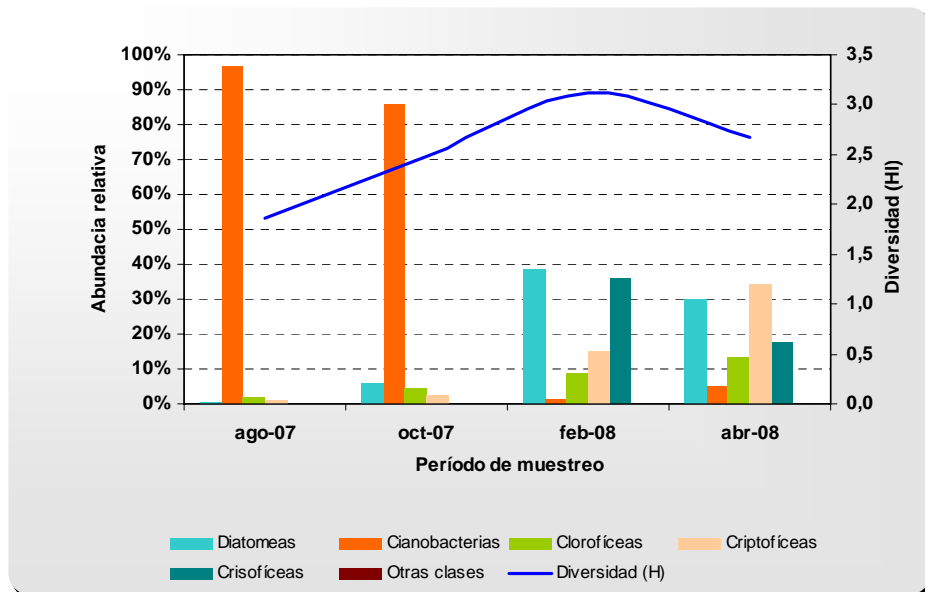


Gráfico 27. Abundancia relativa de los principales grupos algales.

5.5.2. Calidad bioindicadora

Los valores de densidad algal media, biomasa media y la sucesión de especies a lo largo del periodo de estudio indican que el embalse del Ebro es un medio mesotrófico con tendencia a la eutrofia en el otoño y estío.

La alta predominancia en verano y otoño de las cianobacterias, informan de un medio eutrófico, con *Aphanocapsa incerta* como la especie mayoritaria. En este periodo se determinan, además, cianobacterias potencialmente tóxicas en, prácticamente, todas las estaciones del embalse. Destacando la estación E2 que, en verano, presenta hasta 22.607 cel/ml de *Microcystis aeruginosa*. En invierno decrecen las poblaciones de todos los grupos algales, dando paso al predominio de las diatomeas y crisofíceas, que informan de condiciones mesotróficas. La especie mayoritaria de diatomeas es *Fragilaria crotonensis*, especie cosmopolita que puede crecer desde aguas oligotróficas hasta eutróficas, y es más frecuente en medios débilmente alcalinos. El grado trófico del periodo invernal se mantiene en primavera, como indica la presencia mayoritaria de las criptofíceas, frecuentes en medios bien mezclados y con una disponibilidad de nutrientes moderada, con *Rhodomonas lacustris* como especie representativa.

5.6. Zooplancton

Los resultados de los análisis cuantitativos de zooplancton se presentan en el **Anexo 4**.

De la totalidad de análisis realizados (24), se han identificado un total de 29 especies, distribuidas entre los siguientes grupos taxonómicos:

- 11 Rotíferos
- 11 Cladóceros
- 7 Copépodos

La composición y estructura poblacional han mantenido las siguientes pautas temporales:

Verano: Presenta una mayoría de especies de rotíferos y copépodos. La especie más representativa es el rotífero *Keratella cochlearis tecta*, presente en todas las estaciones, menos en E6, y con un número máximo en E2, donde se determinó una abundancia total de 8.900 individuos en un litro de muestra. Esta especie suele estar presente en ambientes particularmente ricos en materia orgánica o fitoplancton y a una temperatura relativamente elevada. Dentro del grupo de los copépodos *Copidodiaptomus numidicus* se registra en todas las estaciones analizadas que tiene preferencia por aguas eutróficas y relativamente poco mineralizadas.

Otoño: Se aprecia un descenso de los rotíferos, incrementándose la población de cladóceros. No obstante, son los copépodos los que mantienen una mayor representación en el embalse y, aunque el mayor número se obtiene para el estado larvario (copepoditos), la especie más significativa continúa siendo *Copidodiaptomus numidicus*, presente en todas las estaciones.



Copidodiaptomus numidicus

Invierno: Se aprecia un incremento en la población de cladóceros, en detrimento de la población de copépodos, mayoritarios en verano y otoño. La especie que mayor números de individuos presentado es *Daphnia pulicaria*, registrándose en E4 la mayor abundancia en 1 l de muestra (2.100 ind.). Destaca el bajo número de individuos registrados en la estación E2, donde el grupo dominante continúa siendo el de los copépodos.

Primavera: El número de individuos contabilizados se incrementa sustancialmente, respecto al invierno. En términos relativos se aprecia un ligero descenso de los cladóceros, aunque sigue siendo el grupo taxonómico predominante, representando el 45% de la población total. Destaca en la estación E2 el cambio en la predominancia de los copépodos, que, en primavera, corre a cargo de los



Daphnia pulicaria

cladóceros. La especie que mayor número de individuos presenta, dentro este grupo, es *Daphnia pulicaria*, que registra su mayor abundancia en 1 l de muestra, en la estación E3 (4.800 ind.).

En el gráfico siguiente se representa la evolución temporal que han mantenido los tres grupos principales de la comunidad zooplanctónica.

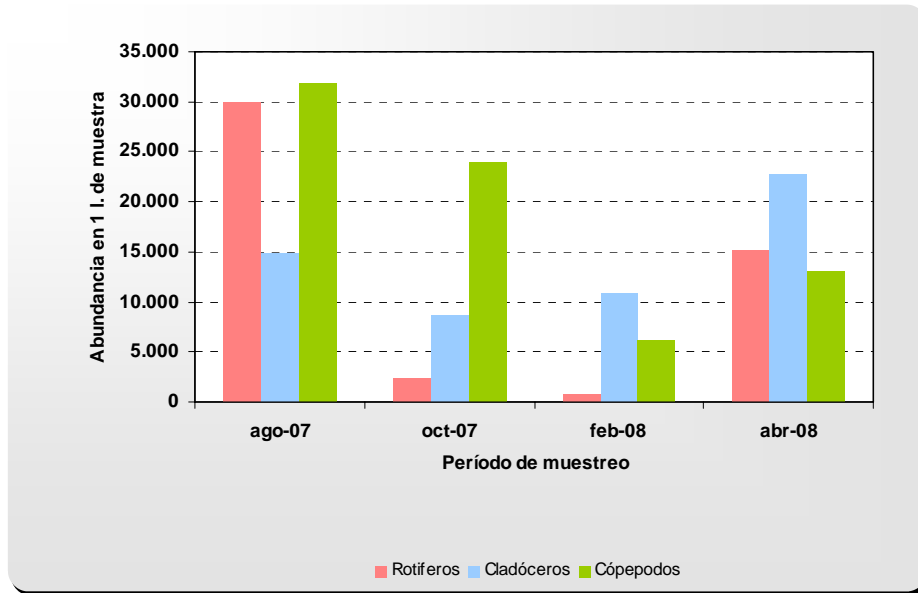


Gráfico 28. Sucesión temporal de los principales grupos de zooplancton.

Por último, en la siguiente tabla se presentan las especies determinadas en el embalse.

Tabla 20. Especies de zooplancton determinadas en el embalse del Ebro.

Clase	Especies	Campaña	Abundancia 1l muestra	ind/l
Copépodo	<i>Copepodito (Calanoide)</i>	1,2,3,4	34.720	118,4
Cladóceros	<i>Daphnia pulicaria</i>	1,2,3,4	22.724	89,7
Copépodo	<i>Copidodiaptomus numidicus</i>	1,2,3,4	21.040	74
Rotífero	<i>Asplanchna priodonta</i>	1,2,3,4	13.100	52
Rotífero	<i>Keratella cochlearis tecta</i>	1,2	13.060	35
Copépodo	<i>Nauplius</i>	1,2,3,4	11.940	27,9
Cladóceros	<i>Branquiopodito</i>	1,2,3,4	9.700	41
Cladóceros	<i>Diaphanosoma brachyura</i>	1,2	8.360	17
Rotífero	<i>Polyarthra dolichoptera</i>	1,2,3,4	6.940	17,1
Rotífero	<i>Keratella cochlearis cochlearis</i>	1,2,3,4	6.400	16,8
Cladóceros	<i>Daphnia galeata</i>	1,2,3,4	5.860	35
Rotífero	<i>Conochilus dossuarius</i>	1,2,4	5.680	22
Copépodo	<i>Copepodito (Cyclopoide)</i>	1,2,3,4	4.060	16
Cladóceros	<i>Branquiopodito (Daphnia juvenil)</i>	3	2.700	10
Cladóceros	<i>Chydorus sphaericus</i>	1,2,3	2.020	10
Cladóceros	<i>Sida crystallina</i>	1,2	2.020	7
Rotífero	<i>Polyarthra major</i>	1	1.960	4
Cladóceros	<i>Bosmina longirostris</i>	1,2,3,4	1.680	6
Cladóceros	<i>Ceriodaphnia pulchella</i>	1,2	1.580	6
Copépodo	<i>Cyclops strennus</i>	3,4	1.200	4,2
Copépodo	<i>Acanthocyclops robustus</i>	1,2	1.140	5
Copépodo	<i>Cyclops scutifer</i>	1,2	1.000	5
Cladóceros	<i>Ceriodaphnia sp. (no adulto)</i>	1	400	1
Rotífero	<i>Synchaeta pectinata</i>	1,3	400	1
Rotífero	<i>Pompholyx sulcata</i>	1	300	1
Rotífero	<i>Lecane lunaris</i>	1,2	200	1
Rotífero	<i>Keratella tropica</i>	1	100	0
Cladóceros	<i>Daphnia (juvenil)</i>	3	20	0,4
Rotífero	<i>Testudinella mucronata mucronata</i>	1	20	0,1

Campaña: 1. Agosto 07; 2. Octubre 07; 3. Febrero 08; 4. Abril 08. El número de individuos es la suma de las determinaciones de las cuatro campañas

5.7. Diagnóstico del grado trófico

Atendiendo a criterios de la OCDE, índice de mayor aceptación y amplio uso, el parámetro causal básico (PT) sitúa al embalse en rangos mesotróficos, aunque el valor obtenido ($33 \mu\text{g P/l}$) se encuentra, prácticamente, en el límite ($35 \mu\text{g P/l}$) de la eutrofia. Por su parte, el parámetro de respuesta clorofila *a* también lo sitúa en rangos mesotróficos. El máximo rango, eutrofia, se obtiene con la transparencia (considerando tanto la media como el mínimo anual), no obstante éste parámetro sobreestima el grado trófico del embalse, ya que la baja transparencia se debe, en gran medida, a sólidos inorgánicos en suspensión.

Asimismo teniendo en cuenta el índice TSI (Carlson, 1974), estimado a partir de la clorofila *a*, del fósforo total y de la profundidad del disco de Secchi, el embalse podría definirse como mesotrófico.

No obstante, la heterogénea morfología del embalse ha permitido diferenciar una serie de sectores en la masa de agua, representados por las distintas estaciones de muestreo, lo que facilita realizar un análisis más detallado de los resultados obtenidos. Estos reflejan que ciertas zonas del embalse presentan un grado trófico más elevado que el obtenido teniendo en cuenta, tan sólo, los valores globales del embalse.

Así, y como queda reflejado en la tabla 21, las estaciones E2, E5 y E6 han presentado unos altos valores de fósforo total, lo que establece su grado trófico, según criterio de la OCDE, en rangos eutróficos. Los volúmenes que representan estas estaciones supone que el 52% del volumen de la masa de agua se encuentra en rangos eutróficos. Además, en verano y otoño, se registra un aumento sustancial de las poblaciones de cianobacterias que también sugieren un mayor grado trófico. De aquí que se pueda catalogar al embalse del Ebro como **eutrófico**.

Tabla 21. Catalogación del grado trófico del embalse según los diferentes índices.

Índice	Definición criterio	Rango	Media anual embalse		Media anual E1		Media anual E2		Media anual E3	
			Valor	Grado Trófico	Valor	Grado Trófico	Valor	Grado Trófico	Valor	Grado Trófico
EPA (1976)	PT (ug/l); media anual	<10-MESO-20>	33	EUTRÓFICO	23	EUTRÓFICO	58	EUTRÓFICO	17	MESOTRÓFICO
EPA (Weber, 1976)	Nº células algales/ml	<2000-MESO-15000>	9.532	MESOTRÓFICO	15.305	EUTRÓFICO	17.395	EUTRÓFICO	3.097	MESOTRÓFICO
EPA (Weber, 1976)	Clorofila (ug/l); máx. fót.	<3-MESO-20>	14	MESOTRÓFICO	9	MESOTRÓFICO	33	EUTRÓFICO	8	MESOTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	Clorofila (ug/l); media anual	<2,1- 3 - 6,7 -10>	4	MESOTRÓFICO	6	MESOTRÓFICO	14	EUTRÓFICO	5	MESOTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	PT (ug/l); media anual	<8- 12 - 28 -40>	33	MESO-EUTRÓF.	23	MESOTRÓFICO	58	EUTRÓFICO	17	MESOTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	SDT (m); media anual	<1,8- 2,4 - 3,8 -4,6>	1,7	EUTRÓFICO	2,1	MESO-EUTRÓF.	0,9	EUTRÓFICO	2,0	MESO-EUTRÓF.
Margalef (1983)	Nº células algales/ml	5000 (lím. eut.avan.-mod.)	9.532	E. AVANZADA	15.305	E. AVANZADA	17.395	E. AVANZADA	3.097	E. MODERADA
Margalef (1983)	Clorofila (ug/l); anual fót.	5 (lím. eut.avan.-mod.)	4	E. MODERADA	6	E. AVANZADA	14	E. AVANZADA	5	E. AVANZADA
Margalef (1983)	PT (ug/l); media anual	15 (lím. eut.avan.-mod.)	33	E. AVANZADA	23	E. AVANZADA	58	E. AVANZADA	17	E. AVANZADA
Margalef (1983)	NO ₃ -N (ug/l); media anual	140 (lím. eut.avan.-mod.)	199	E. AVANZADA	184	E. AVANZADA	255	E. AVANZADA	186	E. AVANZADA
Margalef (1983)	SDT (m); media anual	3 (lím. eut.avan.-mod.)	1,7	E. AVANZADA	2,1	E. AVANZADA	0,9	E. AVANZADA	2,0	E. AVANZADA
OCDE (1980)	Clorofila (ug/l); anual fót.	<1;<2.5;2.5-8;8-25;>25	4	MESOTRÓFICO	6	MESOTRÓFICO	14	EUTRÓFICO	5	MESOTRÓFICO
OCDE (1980)	Clorofila (ug/l); máx. anual	<2.5;<8;8-25;25-75;>75	14	MESOTRÓFICO	9	MESOTRÓFICO	33	EUTRÓFICO	8	OLIGOTRÓFICO
OCDE (1980)	PT (ug/l); media anual	Uol. <4-10-35-100>Heu.	33	MESOTRÓFICO	23	MESOTRÓFICO	58	EUTRÓFICO	17	MESOTRÓFICO
OCDE (1980)	SDT (m); media anual	>12;>6;;6-3;3-1.5;<1.5	1,7	EUTRÓFICO	2,1	EUTRÓFICO	0,9	HIPEREUT.	2,0	EUTRÓFICO
OCDE (1980)	SDT (m); mínimo anual	>6;>3;3-1.5;1.5-0.7;<0.7	0,9	EUTRÓFICO	1,5	EUTRÓFICO	0,5	HIPEREUT.	1,4	EUTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): DST	TSI = 10(6-log ₂ (DST))	Uol. <20-40-60-80>Heu.	52	MESOTRÓFICO	49	MESOTRÓFICO	62	EUTRÓFICO	50	MESOTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): CLA	10(6-log ₂ 7,7(1/Cl ^a 0,68))	Uol. <20-40-60-80>Heu.	44	MESOTRÓFICO	48	MESOTRÓFICO	56	MESOTRÓFICO	47	MESOTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): PT	TSI = 10(6-log ₂ (54,9/PT))	Uol. <20-40-60-80>Heu.	53	MESOTRÓFICO	48	MESOTRÓFICO	61	EUTRÓFICO	43	MESOTRÓFICO

Tabla 21 (continuación). Catalogación del grado trófico del embalse según los diferentes índices.

Índice	Definición criterio	Rango	Media anual E4		Media anual E5		Media anual E6	
			Valor	Grado Trófico	Valor	Grado Trófico	Valor	Grado Trófico
EPA (1976)	PT (ug/l); media anual	< 10-MESO-20 >	19	MESOTRÓFICO	50	EUTRÓFICO	46	EUTRÓFICO
EPA (Weber, 1976)	N° células algales/ml	< 2000-MESO-15000 >	1.953	OLIGOTRÓFICO	16.146	EUTRÓFICO	3.298	MESOTRÓFICO
EPA (Weber, 1976)	Clorofila (ug/l); máx. fót.	< 3-MESO-20 >	6	MESOTRÓFICO	9	MESOTRÓFICO	6	MESOTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	Clorofila (ug/l); media anual	< 2,1- 3 - 6,7 -10 >	3	OLIGO-MESOT.	6	MESOTRÓFICO	4	MESOTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	PT (ug/l); media anual	< 8- 12 - 28 -40 >	19	MESOTRÓFICO	50	EUTRÓFICO	46	EUTRÓFICO
Lee, Jones & Rast (1978)	SDT (m); media anual	< 1,8- 2,4 - 3,8 -4,6 >	2,3	MESO-EUTRÓF.	1,1	EUTRÓFICO	1,9	MESO-EUTRÓF.
Margalef (1983)	N° células algales/ml	5000 (lím. eut.avan.-mod.)	1.953	E. MODERADA	16.146	E. AVANZADA	3.298	E. MODERADA
Margalef (1983)	Clorofila (ug/l); anual fót.	5 (lím. eut.avan.-mod.)	3	E. MODERADA	6	E. AVANZADA	4	E. MODERADA
Margalef (1983)	PT (ug/l); media anual	15 (lím. eut.avan.-mod.)	19	E. AVANZADA	50	E. AVANZADA	46	E. AVANZADA
Margalef (1983)	NO ₃ -N (ug/l); media anual	140 (lím. eut.avan.-mod.)	195	E. AVANZADA	167	E. AVANZADA	209	E. AVANZADA
Margalef (1983)	SDT (m); media anual	3 (lím. eut.avan.-mod.)	2,3	E. AVANZADA	1,1	E. AVANZADA	1,9	E. AVANZADA
OCDE (1980)	Clorofila (ug/l); anual fót.	< 1; < 2.5; 2.5-8; 8-25; > 25	3	MESOTRÓFICO	6	MESOTRÓFICO	4	MESOTRÓFICO
OCDE (1980)	Clorofila (ug/l); máx. anual	< 2.5; < 8; 8-25; 25-75; > 75	6	OLIGOTRÓFICO	9	MESOTRÓFICO	6	OLIGOTRÓFICO
OCDE (1980)	PT (ug/l); media anual	Uol. < 4-10-35-100 > Heu.	19	MESOTRÓFICO	50	EUTRÓFICO	46	EUTRÓFICO
OCDE (1980)	SDT (m); media anual	> 12; > 6;; 6-3; 3-1.5; < 1.5	2,3	EUTRÓFICO	1,1	HIPEREUT.	1,9	EUTRÓFICO
OCDE (1980)	SDT (m); mínimo anual	> 6; > 3; 3-1.5; 1.5-0.7; < 0.7	1,4	EUTRÓFICO	0,9	EUTRÓFICO	1,3	EUTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): DST	TSI = 10(6-log ₂ (DST))	Uol. < 20-40-60-80 > Heu.	48	MESOTRÓFICO	59	MESOTRÓFICO	51	MESOTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): CLA	10(6-log ₂ 7,7(1/Cl ^{0,68}))	Uol. < 20-40-60-80 > Heu.	41	MESOTRÓFICO	49	MESOTRÓFICO	43	MESOTRÓFICO
TSI (Carlson, 1974): PT	TSI = 10(6-log ₂ (54,9/PT))	Uol. < 20-40-60-80 > Heu.	45	MESOTRÓFICO	59	MESOTRÓFICO	57	MESOTRÓFICO

6. RESULTADOS. ESTIMACIÓN DEL APORTE DE NUTRIENTES

6.1. Aportes de nutrientes por el tributario

Las mediciones realizadas en el tributario considerado, río Ebro tras su paso por Reinosa, durante las campañas de muestreo y los datos de aportaciones hidráulicas proporcionados por la C.H.E., sirven para estimar, con la metodología descrita anteriormente, la carga anual de nutrientes aportada al embalse. El proceso de cálculo se pueden seguir en los siguientes cuadros, en los que se presentan estimaciones realizadas con los caudales instantáneos o puntuales (QT puntual) y con los caudales medios para el periodo que representa la campaña de muestreo correspondiente (QmT).

Tabla 22. Aportes de nutrientes por el río Ebro tras su paso por Reinosa (T1).

CAMPAÑA:	1	2	3	4	APORTES BRUTOS (kg/año)	APORTES ESPECIFICOS (g/m2/año)
FECHA:	07-ago-07	08-oct-07	07-feb-08	16-abr-08		
INICIO PERIODO:	01-jul-07	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08		
FINAL PERIODO:	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08	30-jun-08		
Nº DIAS:	68	92	96	110		
QT1 puntual (m3x1000/d)	121	142	347	696		
QmT1 periodo (m3x1000/d)	135	178	268	834		
Fósforo reactivo soluble (mg/l)	0,212	0,134	0,039	0,030		
Fósforo total (mg/l)	0,570	0,380	0,120	0,070		
Amonio (mg/l)	1,590	0,696	0,103	0,051		
Nitratos (mg/l)	1,62	0,63	0,68	0,43		
Nitritos (mg/l)	0,017	0,029	0,004	0,006		
N. kjeldhal (mg/l)	4,64	1,45	2,26	3,22		
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES PUNTUALES (Qi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	25,63	18,97	13,48	20,68	7046	0,03
Fósforo total (kg/día)	68,87	53,89	41,66	48,74	18977	0,08
Amonio (kg/día)	192,10	98,71	35,64	35,74	29479	0,13
Nitratos (kg/día)	195,36	88,70	234,39	297,15	76484	0,33
Nitritos (kg/día)	2,02	4,14	1,48	4,03	1102	0,00
N. kjeldhal (kg/día)	560,66	205,61	784,59	2241,97	377858	1,64
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES MEDIOS (QMi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	28,67	23,80	10,40	24,76	7848	0,03
Fósforo total (kg/día)	77,05	67,60	32,13	58,37	20934	0,09
Amonio (kg/día)	214,90	123,83	27,49	42,80	33331	0,14
Nitratos (kg/día)	218,55	111,27	180,76	355,84	81415	0,35
Nitritos (kg/día)	2,26	5,20	1,14	4,82	1270	0,01
N. kjeldhal (kg/día)	627,21	257,94	605,06	2684,79	418452	1,81

Siguiendo la misma línea de calculo, y al disponer de puntos de muestreo aguas arriba de la localidad de Reinosa, se está en disposición de realizar una comparativa entre los distintos puntos muestreados.

Tabla 23. Aportes de nutrientes del río Ebro antes de Reinosa (T5).

CAMPAÑA:	1	2	3	4	APORTES BRUTOS (kg/año)	APORTES ESPECIFICOS (g/m2/año)
FECHA:	07-ago-07	08-oct-07	07-feb-08	16-abr-08		
INICIO PERIODO:	01-jul-07	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08		
FINAL PERIODO:	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08	30-jun-08		
Nº DIAS:	68	92	96	110		
QT5 puntual (m3x1000/d)	97	119	142	172		
QmT5 periodo (m3x1000/d)	111	108	125	179		
Fósforo reactivo soluble (mg/l)	<i>0,012</i>	<i>0,008</i>	<i>0,005</i>	<i>0,012</i>		
Fósforo total (mg/l)	<i>0,021</i>	<i>0,030</i>	<i>0,035</i>	<i>0,020</i>		
Amonio (mg/l)	<i>0,040</i>	<i>0,054</i>	<i>0,036</i>	<i>0,033</i>		
Nitratos (mg/l)	<i>0,45</i>	<i>0,36</i>	<i>0,83</i>	<i>0,65</i>		
Nitritos (mg/l)	<i>0,006</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>	<i>0,002</i>		
N. kjeldhal (mg/l)	<i>0,44</i>	<i>2,18</i>	<i>2,82</i>	<i>2,01</i>		
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES PUNTALES (Qi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	1,14	0,89	0,69	2,02	447	<i>0,02</i>
Fósforo total (kg/día)	2,03	3,58	4,92	3,44	1316	<i>0,06</i>
Amonio (kg/día)	3,91	6,40	5,07	5,62	1957	<i>0,10</i>
Nitratos (kg/día)	43,92	42,54	117,74	112,20	30490	<i>1,50</i>
Nitritos (kg/día)	0,59	0,76	0,34	0,42	189	<i>0,01</i>
N. kjeldhal (kg/día)	42,58	259,93	399,58	345,59	103011	<i>5,05</i>
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES MEDIOS (QMi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	1,30	0,81	0,61	2,10	452	<i>0,02</i>
Fósforo total (kg/día)	2,32	3,25	4,33	3,58	1263	<i>0,06</i>
Amonio (kg/día)	4,47	5,81	4,46	5,84	1906	<i>0,09</i>
Nitratos (kg/día)	50,17	38,60	103,55	116,70	29682	<i>1,46</i>
Nitritos (kg/día)	0,67	0,69	0,30	0,44	186	<i>0,01</i>
N. kjeldhal (kg/día)	48,64	235,87	351,41	359,44	98102	<i>4,81</i>

Tabla 24. Aportes de nutrientes del río Hijar antes de Reinosa (T6).

CAMPAÑA:	1	2	3	4	APORTES BRUTOS (kg/año)	APORTES ESPECIFICOS (g/m2/año)
FECHA:	07-ago-07	08-oct-07	07-feb-08	16-abr-08		
INICIO PERIODO:	01-jul-07	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08		
FINAL PERIODO:	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08	30-jun-08		
Nº DIAS:	68	92	96	110		
QT6 puntual (m3x1000/d)	1	1	139	387		
QmT6 periodo (m3x1000/d)	1	45	93	504		
Fósforo reactivo soluble (mg/l)	<i>0,004</i>	<i>0,020</i>	<i>0,011</i>	<i>0,023</i>		
Fósforo total (mg/l)	<i>0,019</i>	<i>0,021</i>	<i>0,024</i>	<i>0,024</i>		
Amonio (mg/l)	<i>0,020</i>	<i>0,026</i>	<i>0,028</i>	<i>0,024</i>		
Nitratos (mg/l)	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	<i>0,45</i>	<i>0,27</i>		
Nitritos (mg/l)	<i>0,000</i>	<i>0,002</i>	<i>0,003</i>	<i>0,002</i>		
N. kjeldhal (mg/l)	<i>0,48</i>	<i>2,56</i>	<i>2,92</i>	<i>2,41</i>		
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES PUNTALES (Qi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	0,00	0,02	1,59	9,09	1151	<i>0,01</i>
Fósforo total (kg/día)	0,02	0,02	3,37	9,10	1322	<i>0,01</i>
Amonio (kg/día)	0,02	0,03	3,89	9,33	1400	<i>0,01</i>
Nitratos (kg/día)	0,00	0,03	62,51	104,88	17488	<i>0,12</i>
Nitritos (kg/día)	0,00	0,00	0,38	0,94	140	<i>0,00</i>
N. kjeldhal (kg/día)	0,50	2,65	406,18	932,84	141418	<i>0,95</i>
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES MEDIOS (QMi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	0,00	0,92	1,06	11,85	1484	<i>0,01</i>
Fósforo total (kg/día)	0,02	0,95	2,25	11,85	1603	<i>0,01</i>
Amonio (kg/día)	0,02	1,20	2,60	12,16	1693	<i>0,01</i>
Nitratos (kg/día)	0,00	1,44	41,78	136,62	19104	<i>0,13</i>
Nitritos (kg/día)	0,00	0,07	0,25	1,23	165	<i>0,00</i>
N. kjeldhal (kg/día)	0,52	116,39	271,52	1215,13	169867	<i>1,15</i>

Tabla 25. Aportes de nutrientes del río Izarilla antes de Reinosa (T7)

CAMPAÑA:	1	2	3	4	APORTES BRUTOS (kg/año)	APORTES ESPECIFICOS (g/m2/año)
FECHA:	07-ago-07	08-oct-07	07-feb-08	16-abr-08		
INICIO PERIODO:	01-jul-07	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08		
FINAL PERIODO:	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08	30-jun-08		
Nº DIAS:	68	92	96	110		
QT7 puntual (m3x1000/d)	11	10	54	126		
QmT7 periodo (m3x1000/d)	12	13	39	139		
Fósforo reactivo soluble (mg/l)	0,025	0,054	0,056	0,018		
Fósforo total (mg/l)	0,040	0,090	0,070	0,060		
Amonio (mg/l)	0,034	0,025	0,009	0,016		
Nitratos (mg/l)	0,68	0,51	0,79	0,47		
Nitritos (mg/l)	0,024	0,011	0,002	0,002		
N. kjeldhal (mg/l)	0,53	2,61	2,51	2,01		
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES PUNTUALES (Qi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	0,28	0,51	3,04	2,22	601	0,01
Fósforo total (kg/día)	0,45	0,86	3,81	7,57	1304	0,02
Amonio (kg/día)	0,38	0,24	0,51	2,06	322	0,01
Nitratos (kg/día)	7,61	4,87	43,14	59,53	11626	0,20
Nitritos (kg/día)	0,27	0,10	0,10	0,23	62	0,00
N. kjeldhal (kg/día)	5,95	24,81	136,62	253,55	43567	0,73
CARGAS ESTIMADAS CON APORTES MEDIOS (QMi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	0,30	0,70	2,20	2,46	565	0,01
Fósforo total (kg/día)	0,48	1,17	2,75	8,36	1321	0,02
Amonio (kg/día)	0,41	0,32	0,37	2,28	342	0,01
Nitratos (kg/día)	8,15	6,66	31,18	65,78	11364	0,19
Nitritos (kg/día)	0,29	0,14	0,07	0,25	67	0,00
N. kjeldhal (kg/día)	6,38	33,92	98,74	280,18	43713	0,74

Como se aprecia en la siguiente tabla existe una gran diferencia entre los aportes estimados para en el punto T1, situado aguas abajo de Reinosa, y tras su depuradora, y la aportación de los puntos T5, T6 y T7, situados todos ellos aguas arriba de la citada población.

Tabla 26. Contribución de las distintas subcuencas de T1.

SUBCUENCA	CARGA ANUAL BRUTA			
	Nitrógeno total		Fósforo total	
	(kg/año)	(%)	(kg/año)	(%)
T1	501.137	-	20.934	-
T5 Río Ebro	127.971	25,5%	1.263	6,0%
T6 Río Hajar	189.136	37,7%	1.603	7,7%
T7 Río Izarilla	55.144	11,0%	1.321	6,3%

Porcentaje referido al total de T1

La subcuenca representada por T1, como se ha mencionado anteriormente, engloba el aporte de la depuradora de Reinosa. El aporte estimado de su efluente para un año tipo, según datos proporcionados por la Confederación, sería de unos 18.000 kg/año de nitrógeno total y en torno a 3.000 kg/año para el fósforo total (4 y 15% del total de T1,

respectivamente). Estos datos hacen suponer que gran parte de los aportes de T1 pueden deberse al agua aliviada de la depuradora de Reinosa, ya que como se citó anteriormente, aunque el tratamiento es muy efectivo, existe un problema en la red de saneamiento que, además de las aguas residuales, recoge las aguas del freático en épocas de exceso con lo que se produce un vertido sin tratar.

Este planteamiento debe considerarse como una hipótesis, que precisa para su confirmación una caracterización intensiva del agua aliviada. No obstante, en el presente trabajo se han tomado muestras del agua aliviada en tres ocasiones, y en meses de alta probabilidad de lluvia:

Tabla 27. Datos analíticos del agua aliviada por la depuradora de Reinosa.

FECHA:	07-feb-08	27-feb-08	14-abr-08
QAL puntual (l/s)	1	1	10
Fósforo reactivo soluble (mg PO ₄ ⁻³ /l)	3,268	0,018	0,272
Fósforo total (mg P/l)	3,500	2,730	0,620
Amonio (mg NH ₄ /l)	13,800	10,703	2,510
Nitratos (mg NO ₃ /l)	1,46	0,75	1,78
Nitritos (mg NO ₂ /l)	0,002	0,030	0,068
N. kjeldhal (mg N/l)	46,10	22,50	4,99
Nitrógeno total (mg N/l)	47,6	23,3	6,8

Como puede observarse dos de las tres muestras han superado los umbrales dispuestos en la Directiva 91/271 para las concentraciones de fósforo total (2 mg/l P) y nitrógeno total (15 mg/l N).

Por otro lado, se ha estimado la distribución de cargas de las subcuencas ubicadas aguas arriba de Reinosa (T5, T6 y T7), considerando las fuentes más significativas, aportes ganaderos y urbanos. Para ello se han empleado los coeficientes de carga descritos en las tablas 11 y 13 de la presente memoria.

La estimación pone de manifiesto la preponderancia del aporte ganadero frente al urbano. En la tabla 28 se presenta la carga ganadera que soporta cada una de las subcuencas, presentándose los resultados obtenidos en la tabla 29.

Tabla 28. Cabezas de ganado según tipo en la subcuencas aguas arriba de Reinosa

Tipo de ganado	T5	T6	T7
Bovinos	2.249	6.758	2.621
Equinos	1.616	3.100	983
Ovino	381	323	523
Caprino	1.126	87	271
Porcino	25	39	7
Aves	0	1.000	0
Total	5.397	11.307	4.405

Tabla 29. Estimación de aportes ganaderos aguas arriba de Reinosa

Subcuenca	Especie	NT (t/año)	PT (t/año)
T5	Bovinos	37,1	2,1
	Equinos	26,7	1,5
	Ovino	0,5	0,0
	Caprino	1,4	0,1
	Porcino	0,1	0,0
	Aves	0,0	0,0
	Total T5	65,7	3,8
T6	Bovinos	111,5	6,4
	Equinos	51,2	2,9
	Ovino	0,4	0,0
	Caprino	0,1	0,0
	Porcino	0,1	0,0
	Aves	0,1	0,0
	Total T6	163,4	9,4
T7	Bovinos	43,2	2,5
	Equinos	16,2	0,9
	Ovino	0,7	0,0
	Caprino	0,3	0,0
	Porcino	0,0	0,0
	Aves	0,0	0,0
	Total T7	60,5	3,5
Total aguas arriba de Reinosa		289,6	16,7

Así mismo, y empleando las cargas contaminantes presentadas en la tabla 13, se han estimado los aportes procedentes de los núcleos urbanos correspondientes a cada subcuenca. En las sucesivas tablas (30-33) se presentan los núcleos de cada una de ellas y los resultados obtenidos tras la aplicación de los índices correspondientes.

Tabla 30. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T5

Municipio	Nombre	Habitantes	Ingreso	Distancia ¹	Distancia ²	Nitrógeno (kg/año)	Fósforo (kg/año)
				m	m		
CAMPOO DE ENMEDIO	Fontecha	37	S1	4.791	8.561	2	1
CAMPOO DE ENMEDIO	Fresno del Río	190	S1	2.443	6.214	10	4
CAMPOO DE SUSO	Camino	48	S1	9.076	12.847	2	1
CAMPOO DE SUSO	Fontibre	84	S1	5.061	8.832	4	2
CAMPOO DE SUSO	Salces	244	S1	2.339	6.109	12	5
TOTAL		603				30,2	12

¹ Distancia desde el vertido al punto de muestreo (T5), siguiendo el recorrido natural

² Distancia desde el vertido al embalse, siguiendo el recorrido natural

Tabla 31. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T6

Municipio	Nombre	Habitantes	Ingreso	Distancia ¹	Distancia ²	Nitrógeno (kg/año)	Fósforo (kg/año)
				m	m		
CAMPOO DE SUSO	Edificio multiservicios Alto Campoo	25	S1	23.098	27.762	1	1
CAMPOO DE SUSO	Estación de esquí Alto Campoo	250	S1	24.382	29.045	13	5
CAMPOO DE SUSO	Abiada	88	S1	17.755	22.419	4	2
CAMPOO DE SUSO	Argueso	76	S1	13.148	17.812	4	2
CAMPOO DE SUSO	Barrio	83	S1	10.725	15.389	4	2
CAMPOO DE SUSO	Celada de Los Calderones	87	S1	13.935	18.599	4	2
CAMPOO DE SUSO	Entrambasaguas	81	S1	16.753	21.417	4	2
CAMPOO DE SUSO	Camping "Puente Romano"	200	S1	15.910	20.573	10	4
CAMPOO DE SUSO	Espinilla	129	S1	11.821	16.485	6	3
CAMPOO DE SUSO	Hoz de Abiada	50	S1	17.151	21.815	3	1
CAMPOO DE SUSO	Lomba (La)	57	S1	17.388	22.052	3	1
CAMPOO DE SUSO	Mazandrero	43	S1	17.823	21.417	2	1
CAMPOO DE SUSO	Camping invierno (Mazandrero)	105	S1	16.407	21.070	5	2
CAMPOO DE SUSO	Naveda	79	S1	13.273	17.936	4	2
CAMPOO DE SUSO	Ormas	30	S1	13.296	17.960	2	1
CAMPOO DE SUSO	Paracuelles	44	S1	11.040	15.704	2	1
CAMPOO DE SUSO	Proaño	59	S1	14.243	18.907	3	1
CAMPOO DE SUSO	Serna (La)	13	S1	12.674	17.338	1	0
CAMPOO DE SUSO	Soto	118	S1	13.433	18.097	6	2
CAMPOO DE SUSO	Villacantid	184	S1	8.228	12.892	9	4
CAMPOO DE SUSO	Villar	76	S1	14.989	19.653	4	2
TOTAL		1877				94	38

¹ Distancia desde el vertido al punto de muestreo (T6), siguiendo el recorrido natural

² Distancia desde el vertido al embalse, siguiendo el recorrido natural

Tabla 32. Aportes por vertidos urbanos en la subcuenca T7

Municipio	Nombre	Habitantes (total)	Ingreso	Distancia ¹ m	Distancia ² m	Nitrógeno (kg/año)	Fósforo (kg/año)
CAMPOO DE ENMEDIO	Celada Marlantes	43	S1	6.363	12.137	2	1
CAMPOO DE ENMEDIO	Cervatos	83	S1	2.211	7.984	4	2
CAMPOO DE ENMEDIO	Sopeña	1	S1	7.593	13.367	0	0
CAMPOO DE ENMEDIO	Fombellida	29	S1	6.071	11.845	1	1
CAMPOO DE ENMEDIO	Villaescusa	58	S1	2.492	8.266	3	1
CAMPOO DE SUSO	Izara	109	S1	5.155	10.928	5	2
CAMPOO DE SUSO	Población de Suso	20	S1	10.603	16.377	1	0
CAMPOO DE SUSO	Suano	97	S1	7.593	13.367	5	2
TOTAL		440				22,0	9

¹ Distancia desde el vertido al punto de muestreo (T7), siguiendo el recorrido natural

² Distancia desde el vertido al embalse, siguiendo el recorrido natural

Como se citó anteriormente, y se puede apreciar en la tabla 33, la fuente principal de nutrientes en las subcuencas establecidas aguas arriba de la localidad de Reinosa es la debida a la cabaña ganadera.

Tabla 33. Distribución de los aportes de las subcuencas ubicadas aguas arriba de Reinosa, según las fuentes consideradas

Concepto	Subcuenca	Nitrógeno	Fósforo
		t/año	t/año
Ganadería	T5	65,7	3,8
	T6	163,4	9,4
	T7	60,5	3,5
	Subtotal	289,6	16,7
Vertidos urbanos indirectos	T5	0,03	0,01
	T6	0,94	0,04
	T7	0,02	0,01
	Subtotal	0,99	0,06
TOTAL		290,6	16,7

Conviene aclarar que estos resultados, obtenidos teóricamente, son superiores a los obtenidos empíricamente, ya que, aunque consideran una retirada de nutrientes por parte de las plantas, no contempla en toda su amplitud los procesos de autodepuración. Por esto para el posterior balance, y según la metodología descrita, se emplean los resultados empíricos.

6.2. Aportes de nutrientes en la cuenca de escorrentía directa

6.2.1. Aportes por usos del suelo

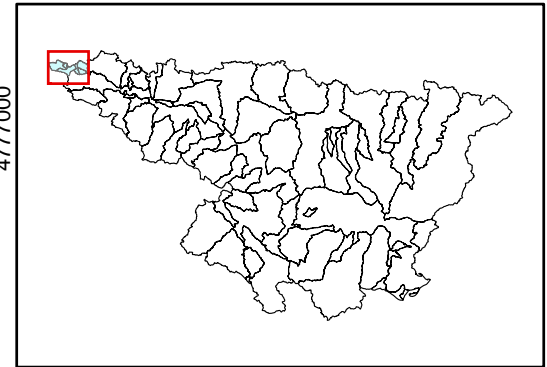
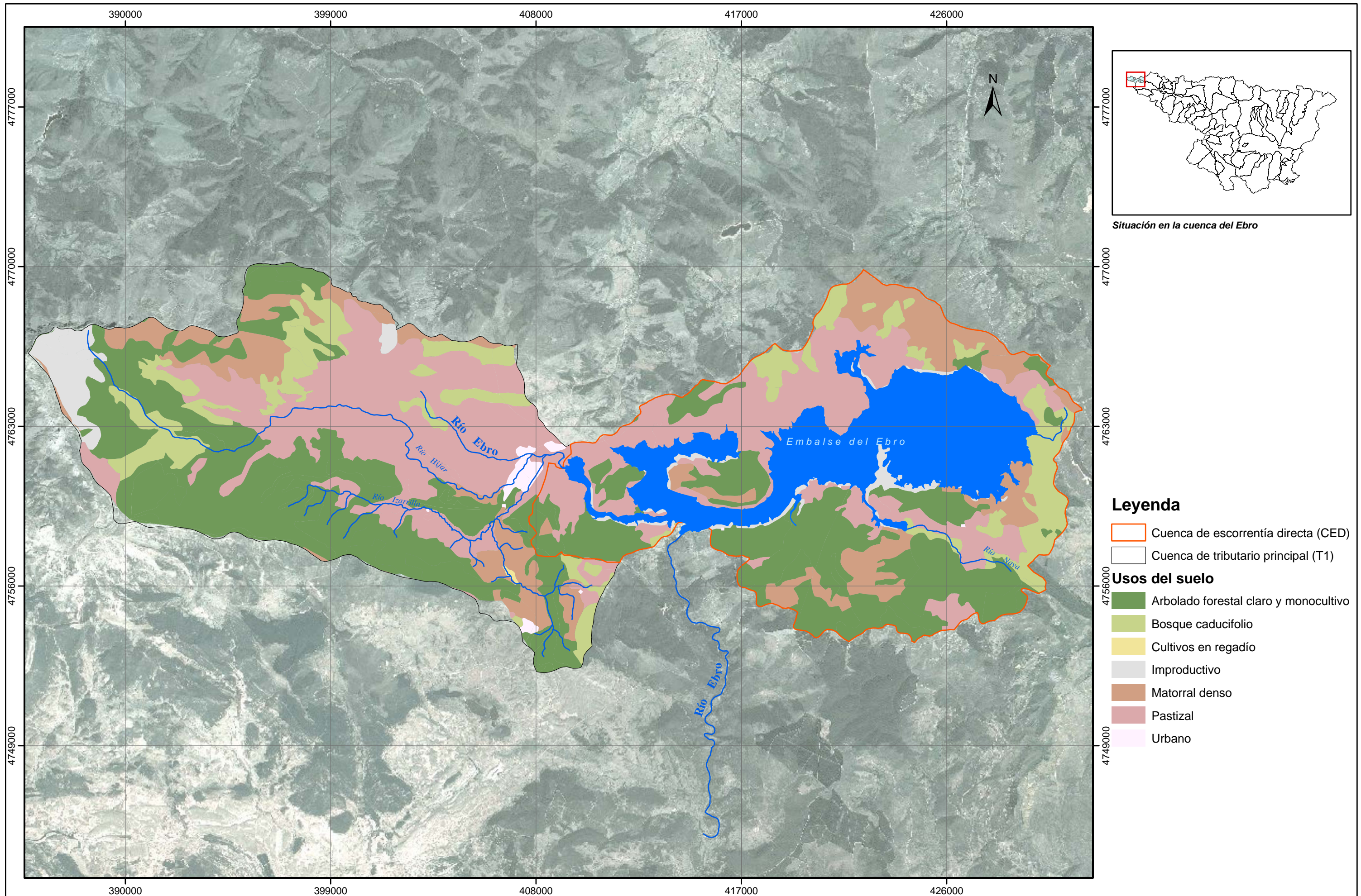
En el cuadro siguiente se facilita la extensión de los diferentes tipos de uso considerados y los valores de los parámetros empleados para alimentar el modelo USLE en la cuenca de escorrentía directa del embalse de Ebro.

Tabla 34. Usos del suelo y parámetros para la estimación de la escorrentía y la erosión.

Designación de zona	Superficie (ha)	Pendiente (%)	Nº				Manejo (P)	Valor USLE KLSCP
			Curva (USCN)	Erosionabilidad (K)	Topografía (LS)	Cubierta (C)		
Bosque caducifolio	2024	6,83	60	0,30	0,50	0,009	1,00	0,0014
Arbolado forestal claro	6504	6,59	65	0,30	0,50	0,027	1,00	0,0041
Matorral denso	2897	7,97	48	0,30	0,50	0,064	1,00	0,0096
Pastizal	6022	4,31	75	0,30	0,50	0,048	1,00	0,0072
Improductivo	5630	1,19	90	0,30	0,00	0,000	1,00	0,0000
Urbano	135	1,97	90	0,20	0,50	0,000	1,00	0,0000

En la siguiente lámina se representan los usos del suelo en las diferentes subcuencas consideradas. Se puede apreciar que en la CED los usos del suelo predominantes son el arbolado forestal claro y el pastizal. El suelo urbano en la CED es, con diferencia, el uso menos significativo.

En la tabla siguiente se presentan los resultados mensuales de aplicar el modelo con los datos de precipitación diarios del periodo considerado. Como se puede observar, el flujo subsuperficial es más importante que la escorrentía superficial, y en los meses de septiembre y octubre la aportación ha sido nula.



Situación en la cuenca del Ebro

Leyenda

- Cuenca de escorrentía directa (CED)
- Cuenca de tributario principal (T1)

Usos del suelo

- Arbolado forestal claro y monocultivo
- Bosque caducifolio
- Cultivos en regadío
- Improductivo
- Matorral denso
- Pastizal
- Urbano

Tabla 35. Balance hidráulico en la cuenca de escorrentía directa (año 2007-2008).

Mes	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Flujo subsuperficial (cm)	Escorrentía (cm)	Aporte embalse (cm)
Julio	0,21	6,98	0,17	0	0,17
Agosto	4,4	3,92	0,01	0	0,01
Septiembre	6,2	2,05	0	0	0
Octubre	5,22	2	0	0	0
Noviembre	6,04	1,31	1,06	0	1,06
Diciembre	2,42	0,9	2,02	0	2,02
Enero	3,68	1,2	2,78	0	2,78
Febrero	3,61	1,53	1,77	0	1,77
Marzo	10,59	2,11	5,82	0,38	6,2
Abril	8,8	3,34	7,09	0	7,09
Mayo	11,15	5,07	3,83	0	3,83
Junio	3,67	6,45	3,37	0	3,37
Total	65,99	36,86	27,92	0,38	28,3

Los resultados obtenidos para cada uso del suelo, tras el empleo de los coeficientes de exportación considerados (ver apartado 4.2.4.) han sido:

Tabla 36. Resultados de los aportes en la CED según los distintos tipos de suelo.

Concepto	Nitrógeno t/año	Fósforo t/año
Usos del Suelo	6,17	2,12
Bosque caducifolio	0,14	0,06
Arbolado forestal claro y monocultivo	1,27	0,54
Matorral denso	1,3	0,56
Pastizal	3,15	0,92
Residencia unifamiliar (impermeable)	0,32	0,04

6.2.2. Aportes procedentes de excretas ganaderas

Según el censo ganadero proporcionado por la CHE el número de cabezas totales en la cuenca de escorrentía directa es el siguiente:

Tabla 37. Nº de cabezas de ganado en la cuenca de escorrentía directa.

Tipo de ganado	nº cabezas
Bovino	7.383
Equinos	3.110
Ovino	1.778
Caprino	373
Porcino	228
Aves	4

Tras aplicar los factores de cargas y de reducción descritos en el apartado 4.2.4 B, se han obtenido los siguientes resultados:

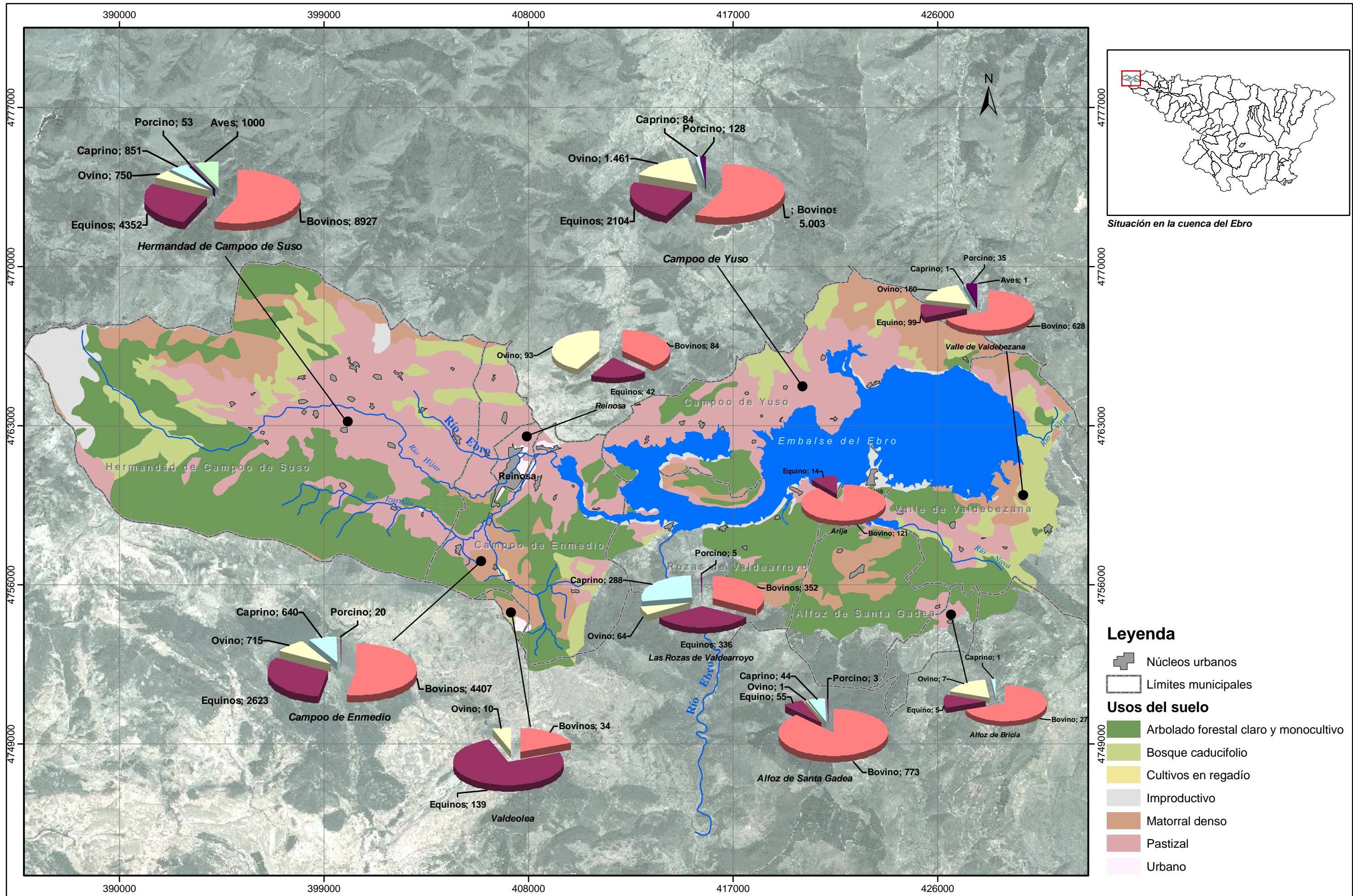
Tabla 38. Resultados de los aportes ganaderos en la cuenca de escorrentía directa.

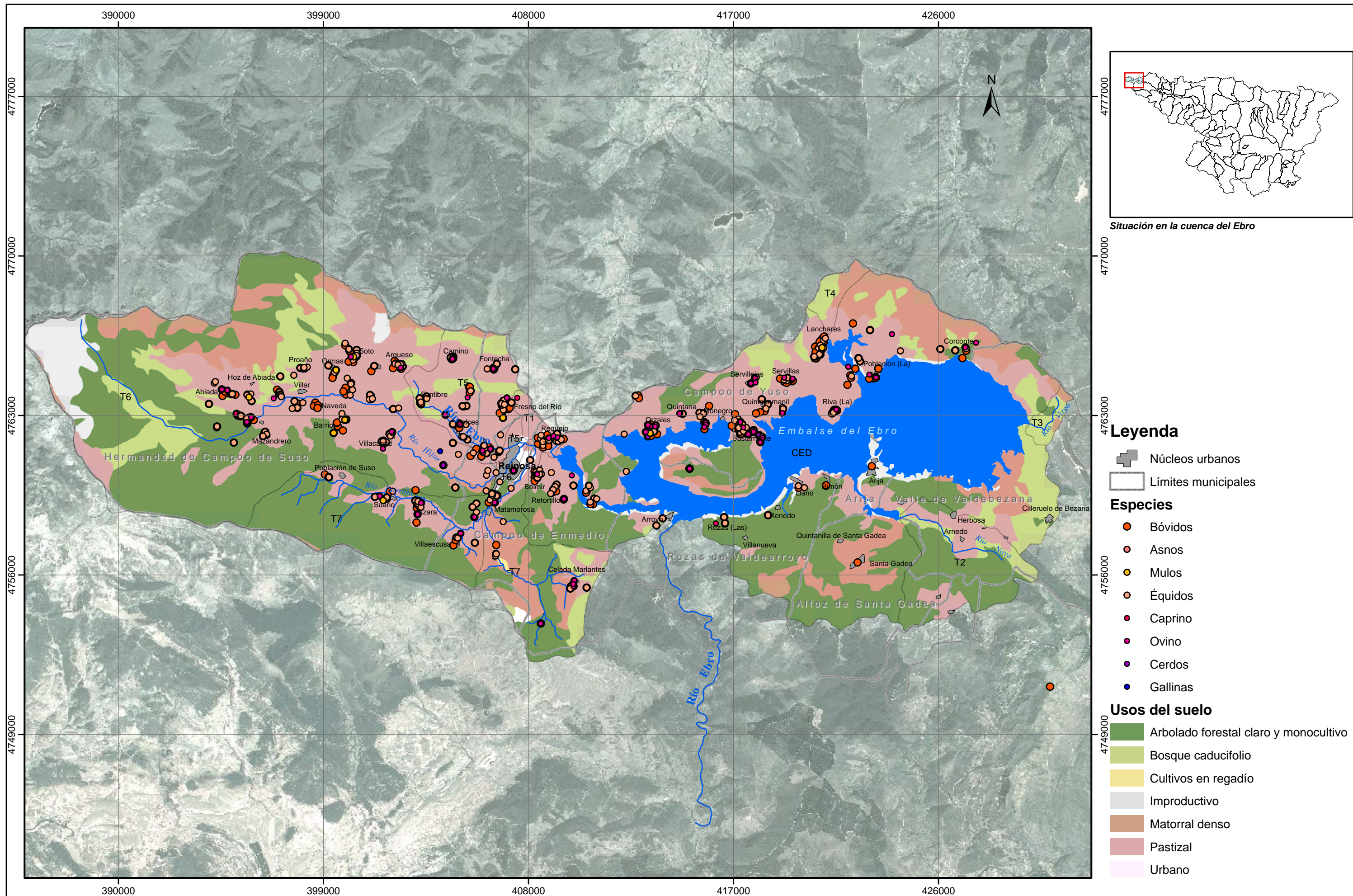
Tipo de ganado	nº cabezas	NT (t/año)	PT (t/año)
Bovino	7.383	121,8	7,01
Equinos	3.110	51,3	2,95
Ovino	1.778	2,2	0,13
Caprino	373	0,5	0,03
Porcino	228	0,6	0,06
Aves	4	0,0	0,00
Total		176,46	10,19

El resultado pone de manifiesto el carácter relevante de la ganadería en la cuenca directa de escorrentía, donde el nº de cabeza bovinas censadas es, prácticamente, cinco veces superior al total de la población en la cuenca.

Conviene comentar, respecto al aporte de nutrientes procedentes de las excretas ganaderas, que se han realizado distintas hipótesis en su valoración; se ha tratado como única fuente al ganado bovino, por un lado, y se ha supuesto que la mitad de la cabaña ganadera es en régimen intensivo, por otro, y en ambas el resultado ha sido que la ganadería es la fuente más importante de nutrientes en la cuenca de escorrentía directa. Incluso en la opción más favorable, en la que se redujo la cabaña ganadera a la mitad, el porcentaje procedente de esta fuente suponía el 53% del aporte total. No se presentan las distintas hipótesis efectuadas por considerarse que la opción más realista es el empleo de todo el número de cabezas censadas en la CED.

Por último, se adjuntan dos láminas donde se presenta gráficamente la distribución municipal de la cabaña ganadera (lámina 4) y la localización de las distintas explotaciones presentes en el área de drenaje (lámina 5). En ambas, y principalmente en la lámina 5, queda reflejada la gran relevancia que adquiere esta fuente en el área de drenaje del embalse del Ebro.





Situación en la cuenca del Ebro

Legenda

- Núcleos urbanos
- Límites municipales

Especies

- Bóvidos
- Asnos
- Mulos
- Équidos
- Caprino
- Ovino
- Cerdos
- Gallinas

Usos del suelo

- Arbolado forestal claro y monocultivo
- Bosque caducifolio
- Cultivos en regadío
- Improductivo
- Matorral denso
- Pastizal
- Urbano

6.2.3. Aportes de fuentes puntuales en cuenca de escorrentía directa

En la siguiente tabla se presentan los vertidos considerados, su clasificación y los resultados obtenidos tras la aplicación de los coeficientes definidos en el apartado 4.2.4.

Tabla 39. Aportes por vertidos urbanos en la cuenca de escorrentía directa.

Municipio	Núcleo	Habitantes	Ingreso	Distancia* m	Nitrógeno (kg/año)	Fósforo (kg/año)
ALFOZ DE SANTA GADEA	Quintanilla de Santa Gadea	21	S1	2.685	1	0
ALFOZ DE SANTA GADEA	Santa Gadea	70	S1	2.638	4	0
ARIJA	Arija	192	Directo	0	841	175
ARIJA	Camping caravaning playa de Arija	120	S3	150	525	109
VALLE DE VALDEBEZANA	Cilleruelo de Bezana	74	S1	2.277	4	1
VALLE DE VALDEBEZANA	San Vicente de Villamezán	13	S1	400	1	0
CAMPOO DE YUSO	Bustamante	39	S3	90	170	35
CAMPOO DE YUSO	Corconte	40	S1	200	2	1
CAMPOO DE YUSO	Balneario de Corconte	120	S3	300	525	109
CAMPOO DE YUSO	Costana (La)	44	S1	500	2	1
CAMPOO DE YUSO	Lanchares	104	S3	135	455	95
CAMPOO DE YUSO	Monegro	55	S1	150	3	1
CAMPOO DE YUSO	Orzales	113	S3	47	494	103
CAMPOO DE YUSO	Población (La)	130	Directo	0	569	119
CAMPOO DE YUSO	Quintana	7	S1	400	0	0
CAMPOO DE YUSO	Quintanamanil	11	Directo	30	48	10
CAMPOO DE YUSO	Riva (La)	44	S1	480	2	1
CAMPOO DE YUSO	Servillas	33	S1	1.670	2	1
CAMPOO DE YUSO	Servillejas	13	S1	2.219	1	0
CAMPOO DE YUSO	Villapaderne	21	S1	1.842	1	0
CAMPOO DE YUSO	Villasuso	61	S1	420	3	1
CAMPOO DE ENMEDIO	Horna de Ebro	59	Directo	50	258	54
CAMPOO DE ENMEDIO	Retortillo	111	S1	590	6	2
ROZAS DE VALDEARROYO	Arroyo	95	Directo	17	416	87
ROZAS DE VALDEARROYO	Bimón	20	S1	100	1	0
ROZAS DE VALDEARROYO	Llano	43	S1	100	2	1
ROZAS DE VALDEARROYO	Renedo	12	S1	108	1	0
ROZAS DE VALDEARROYO	Rozas (Las)	25	S3	91	109	23
ROZAS DE VALDEARROYO	Villanueva	34	S1	120	2	1
CAMPOO DE ENMEDIO	Villafría	68	Directo	17	298	62
ALFOZ DE BRICIA	Montejo de Bricia	104	S1	6.259	5	2
ALFOZ DE SANTA GADEA	Higón	34	S1	5.873	2	1
VALLE DE VALDEBEZANA	Arnedo	10	S1	3.929	1	0
VALLE DE VALDEBEZANA	Herbosa	21	S1	3.102	1	0
VALLE DE VALDEBEZANA	Quintanilla de San Román	10	S1	5.949	1	0
VALLE DE VALDEBEZANA	Villamediana de San Román	5	S1	4.972	0	0
TOTAL		1976			4754,4	998

*Distancia desde el vertido al embalse, siguiendo el recorrido natural

En este punto cabe mencionar que, a la hora de la clasificación de los vertidos, ha sido de gran utilidad la inspección y caracterización de vertidos realizada en el presente trabajo, cuyos resultados analíticos, junto con las fichas descriptivas generadas por cada punto inspeccionado, se presentan en el **Anejo 5**. De esta campaña de caracterización destacan los siguientes aspectos:

- Todos los núcleos aledaños al embalse poseen red de saneamiento y sistema de depuración, normalmente fosas sépticas, aunque la mayoría de ellas se encuentran en desuso, y no tienen un mantenimiento adecuado.
- Prácticamente todas estas infraestructuras fueron realizadas en la década de los ochenta, aproximadamente entre los años 1982-1986.
- Corconte y Arija son los núcleos ribereños inspeccionados con los sistemas de depuración más recientes, aunque cabe destacar que las depuradoras de Arija se encuentran en desuso.
- El efluente que presentó una mayor concentración de nutrientes fue el correspondiente al Balneario de Corconte (24,52 g P/l), seguido por el de la localidad de Horna de Ebro (8,92 mg P/l)

6.2.4. Aportes totales en la cuenca de esorrentía directa

Como se puede seguir en el siguiente cuadro, la cuenca de esorrentía directa contribuye al embalse con un total de 204,06 t/año de nitrógeno y 13,94 t/año de fósforo. La contribución de los vertidos urbanos es baja; la ganadería es la principal fuente de aporte de nutrientes, con un 86% de nitrógeno y un 73% de fósforo, por su parte los usos del suelo representan el 3% y el 15%, respectivamente.

Tabla 40. Resumen de los aportes de nutrientes según las distintas fuentes.

Concepto	Nitrógeno		Fósforo	
	t/año	%	t/año	%
Usos del Suelo	6,17	3	2,12	15
Bosque caducifolio	0,14	0	0,06	0
Arbolado forestal claro y monocultivo	1,27	1	0,54	4
Matorral denso	1,3	1	0,56	4
Pastizal	3,15	2	0,92	7
Residencia unifamiliar (impermeable)	0,32	0	0,04	0
Ganadería	176,46	86	10,19	73
Vertidos directos	2,43	1	0,51	4
Vertidos indirectos	2,32	1	0,47	3
S1	0,05	0	-	-
S3	2,28	1	0,47	4
Aguas subsuperficiales	16,68	8	0,64	5
TOTAL	204,06		13,94	

6.2.5. Aportes totales al embalse e importancia relativa de las fuentes

En la tabla 41 se resumen los aportes de nutrientes al embalse. Se puede constatar que en torno al 71% del nitrógeno y al 60% del fósforo que recibe anualmente el embalse ingresan a través del tributario principal, y que alrededor del 40% del fósforo lo hace desde la cuenca de escorrentía directa, mayoritariamente procedente de fuentes ganaderas, como se ha visto anteriormente.

Tabla 41. Contribución de cada subcuenca al aporte total.

SUBCUENCA	CARGA ANUAL BRUTA				CARGA UNITARIA*	
	Nitrógeno		Fósforo		Nitrógeno	Fósforo
	(kg/año)	(%)	(kg/año)	(%)	(g/m ³ .año)	(g/m ³ .año)
Escorrentía (CED)	204.060	28,9%	13.940	40,0%	0,56	0,04
T1	501.137	71,1%	20.934	60,0%	1,36	0,06
TOTAL AÑO	705.197	100%	34.874	100%	1,92	0,09

* Carga referida a la reserva anual media de agua en el embalse

6.3. Evacuación de nutrientes por la presa

Siguiendo una línea de cálculo paralela a la descrita para el caso de las aportaciones por los tributarios, se estima la pérdida anual de nutrientes por el efluente. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos. El resultado final refleja que la salida de nutrientes es baja y supone un 29% del nitrógeno y un 12% del fósforo total que ha entrado durante el periodo de estudio en el embalse.

Tabla 42. Estimación de salida de nutrientes en el embalse

CAMPAÑA:	1	2	3	4	DESCARGA BRUTA (kg/año)	DESCARGA ESPECIFICA (g/m2/año)
FECHA:	07-ago-07	08-oct-07	07-feb-08	16-abr-08		
INICIO PERIODO:	01-jul-07	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08		
FINAL PERIODO:	07-sep-07	08-dic-07	12-mar-08	30-jun-08		
Nº DIAS:	68	92	96	110		
Qe puntual (Dm ³ /d)	1516	95	95	102		
QMe periodo (Dm ³ /d)	1257	348	130	99		
Fósforo reactivo soluble (mg/l)	0,004	0,018	0,008	0,018		
Fósforo total (mg/l)	0,018	0,060	0,020	0,030		
Amonio (mg/l)	0,036	0,041	0,062	0,071		
Nitratos (mg/l)	0,30	0,18	0,18	0,23		
Nitritos (mg/l)	0,004	0,009	0,001	0,005		
N. kjeldhal (mg/l)	0,92	1,49	2,20	1,61		
DESCARGAS ESTIMADAS CON VALORES PUNTUALES (Qe.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	6,43	1,74	0,78	1,80	868	<i>0,00</i>
Fósforo total (kg/día)	27,29	5,70	1,90	3,06	2898	<i>0,01</i>
Amonio (kg/día)	54,84	3,92	5,91	7,22	5447	<i>0,02</i>
Nitratos (kg/día)	453,67	17,17	17,38	23,94	36720	<i>0,16</i>
Nitritos (kg/día)	6,46	0,84	0,06	0,53	580	<i>0,00</i>
N. kjeldhal (kg/día)	1395,01	141,61	209,09	164,14	145935	<i>0,14</i>
DESCARGAS ESTIMADAS CON VALORES MEDIOS (QMi.Ci)						
Fósforo reactivo soluble (kg/día)	5,33	6,36	1,06	1,75	1240	<i>0,01</i>
Fósforo total (kg/día)	22,63	20,87	2,59	2,98	4033	<i>0,02</i>
Amonio (kg/día)	45,47	14,34	8,06	7,02	5954	<i>0,03</i>
Nitratos (kg/día)	376,17	62,82	23,70	23,30	36186	<i>0,16</i>
Nitritos (kg/día)	5,36	3,07	0,08	0,51	710	<i>0,00</i>
N. kjeldhal (kg/día)	1156,70	518,18	285,10	159,75	171190	<i>0,74</i>

6.4. Estimación de la recarga interna de fósforo

Una vez establecido el balance general, se procede a estimar el valor de sedimentación neta de fósforo, mediante el cálculo de la diferencia del contenido de fósforo del embalse entre fechas de muestreo, considerando las entradas y salidas en ese periodo. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 43. Estimación de la recarga interna de fósforo (en t)

FECHA (Duración intervalo)	EMBALSE	ENTRADAS	SALIDAS	BALANCE NETO
07-ago-07 (62)	4,4	4,6	1,3	-3,3
08-oct-07 (122)	4,3	6,3	1,4	-2,0
07-feb-08 (69)	7,2	4,9	0,2	1,3
16-abr-08	13,2			
253	12,2	15,8	3,0	-4,0
FLUJO HACIA LOS SEDIMENTOS (valor absoluto):				5,3
RECARGA INTERNA (valor absoluto):				1,3

NOTA: los flujos negativos son hacia los sedimentos y los positivos desde los sedimentos a la columna de agua

Se puede observar que la recarga interna de fósforo es moderada y se produce una resuspensión por agitación del viento, ya que el embalse se encuentra totalmente oxigenado. En este caso, el sentido de recarga interna representa a la fracción particulada que se resuspende en determinadas zonas y es independiente de la oxigenación hipolimnética. La diferencia es importante porque esos nutrientes no son disueltos y no están biodisponibles y además son más fácilmente sedimentables de nuevo. No obstante, para realizar un análisis más detallado de la recarga interna se precisaría de un mayor número de periodos dentro del ciclo anual, con lo que el análisis debe entenderse como meramente orientativo.

6.5. Balance de nutrientes en el embalse

Como resultado final de los cálculos expuestos anteriormente, se puede realizar un balance de nutrientes en el embalse. Esta información se adjunta en la siguiente tabla.

Tabla 44. Balance de nutrientes bruto y por unidad de volumen en el embalse.

CONCEPTO	CARGA ANUAL BRUTA				CARGA UNITARIA *	
	Nitrógeno		Fósforo		Nitrógeno	Fósforo
	(kg/año)	(%)	(kg/año)	(%)	(g/m ³ año)	(g/m ³ año)
<i>Entradas hidráulicas</i>	705.197	96	34.874	96	1,9	0,09
<i>Deposición atmosférica</i>	31.142	4	1.567	4	0,1	0,00
<i>Salidas hidráulicas</i>	208.087	28	4.033	11	0,6	0,01
<i>Retención en embalse</i>	498.262	72	30.658	89	1,4	0,09
<i>Pelágico (total en la columna de agua)</i>	85.156	12	12.205	33	0,2	0,03
<i>Sedimentación neta estimada con balance anual</i>	413.106	60	18.453	55	1,1	0,06

*por unidad de volumen embalsado

Se puede destacar que la retención de nutrientes en el embalse es alta, tanto para el fósforo (89%) como para el nitrógeno (72%). La sedimentación neta es alta para el fósforo (55%) en términos medios anuales, aunque una gran parte (33%) se mantiene en la columna de agua. Sin embargo, se estima que la fracción biodisponible se comporta de otra manera porque no hay recarga interna por anoxia.

6.6. Estimación de la carga crítica

La carga de fósforo aportado supera el límite crítico propuesto por Vollenweider para el mantenimiento de condiciones de oligotrofia. La diferencia entre las aportaciones específicas y la carga máxima admisible es de 438,59 mg/m² año para el periodo estudiado, lo que supone un exceso de carga al embalse de 27,4 t/año. Por su parte, si consideramos una concentración crítica de 35 µg-P/l -condiciones de mesotrofia-, y aplicamos la misma formula, la carga máxima admisible sería de 210,76 mg/m² año y el exceso de carga de 13 t/año.

Tabla 45. Parámetros de cálculo y carga crítica.

Parámetros	Ud.	Oligotrofia	Mesotrofia
Carga total	t/año	34,87	34,87
Superficie embalse	ha	6.253	6.253
Aportación específica fósforo	mg/m ² año	557,71	557,71
Profundidad media embalse	m	9	9
Volumen máximo embalse	hm ³	540	540
Salidas	hm ³ /año	142,87	142,87
T. Renovación (tw)	año	2,57	2,57
Carga máxima admisible	mg/m ² año	91,13	318,97
Diferencia de cargas	mg/m ² año	466,58	238,74
Carga crítica	t/año	6	20
Exceso	t	29,2	14,9

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Resumiendo lo tratado con anterioridad se pueden realizar las siguientes apreciaciones:

- El embalse presenta un grado trófico de **mesotrofia con tendencia a la eutrofia**, expresado por el valor medio anual de fósforo total obtenido para el embalse (33 $\mu\text{g P/l}$).
- Las características climatológicas del ámbito de estudio, entre los que destacan los vientos prácticamente constantes en el embalse, junto con su baja profundidad media, favorece que la columna de agua se encuentre totalmente oxigenada y que no presente estratificación térmica durante, prácticamente, todo el año. Dificultando así la resolubilización de las formas biodisponibles de fósforo, lo que favorece que el embalse presente, en términos generales, un menor grado trófico.
- La sectorización realizada en el embalse, en función de su morfología, refleja que ciertas zonas del embalse presentan un grado trófico más elevado que el obtenido con los valores globales del embalse. En concreto, las zonas representadas por las estaciones E2, (estación más próxima a la localidad de Reinos), E5 (ensenada del Lanchar) y E6 (estación que representa la ensenada Este del embalse), han presentado una alta concentración anual de fósforo (58, 56 y 48 $\mu\text{g P/l}$), que supone que más de la mitad de la **masa de agua se encuentre en rangos eutróficos**. Así

mismo, es evidente que se producen síntomas de eutrofia, como lo corrobora la predominancia de cianobacterias durante el verano y el otoño.

- La estimación de aportes de nutrientes al embalse del Ebro refleja que la fuente más importante de fósforo la constituye el tributario principal, representando el 60% de la carga total que ingresa al embalse. Conviene recordar que la cuenca representada por el tributario principal engloba a la localidad de Reinoso y que se han estimado los aportes de nutrientes en puntos situados aguas arriba de ella, existiendo una gran diferencia entre estos y los determinados en el punto T1, lo que sugiere que gran parte de los aportes que recibe el embalse se deben a la citada localidad. Aunque las aguas residuales tienen un tratamiento terciario para la reducción de nutrientes bien dimensionado, la ausencia de un sistema de colectores separativo unida a la alta pluviosidad de la zona, obligan a aliviar gran parte de esta agua sin tratamiento.
- El aporte de fósforo desde la cuenca de escorrentía directa (40%) se debe, en gran parte, a la extensa cabaña ganadera que presenta.
- En la caracterización de vertidos efectuada en el presente estudio, los municipios aledaños al embalse presentan, prácticamente en su totalidad, un deficiente sistema de saneamiento, donde los sistemas de depuración están constituidos generalmente por fosas sépticas, y en la mayoría de los casos sin ningún tipo de mantenimiento. Entre los núcleos más próximos al embalse destaca la población de Arija que, aunque dispone del sistema de depuración más moderno, actualmente se encuentra inactivo, con lo que el vertido urbano de su población llega directamente al embalse.
- Por último, citar que la carga que recibe el embalse, supera el límite crítico propuesto por Vollenweider para el mantenimiento de condiciones de oligotrofia. Del mismo modo esta carga supera el mantenimiento de las condiciones de mesotrofia, si se considera una concentración crítica de 35 $\mu\text{g P/l}$.

8. PROPUESTA DE MEDIDAS CORRECTORAS

Considerando los resultados obtenidos se puede optar por una serie de medidas que permitan reducir la concentración de fósforo en el agua y que sirvan para evitar las proliferaciones de cianofíceas que se producen en algunos sectores de embalse.

Las medidas correctoras de la eutrofización de embalses se pueden agrupar en dos grandes tipos:

- Actuaciones encaminadas a reducir la carga externa de nutrientes: tributarios o vertidos que ingresan en el embalse, gestión de la cuenca, etc.
- Actuaciones que tratan directamente los síntomas más acuciantes para la gestión de embalses, especialmente los relacionados con las proliferaciones de algas y los descensos acusados de oxígeno disuelto.

Dentro de las distintas medidas la experiencia práctica indica que la disminución de la carga externa es a largo plazo una medida efectiva del control de la eutrofización, mientras que las de control en el propio embalse suelen ser efectivas a medio-corto plazo, y con ellas no se elimina el problema básico, ya que se ignoran las causas del mismo.

Debido a esto, y a tenor de los resultados obtenidos en el presente trabajo, las medidas correctoras que aquí se plantean van dirigidas a reducir la carga externa de nutrientes que recibe el embalse del Ebro.

Las medidas propuestas se han agrupado en función de su tipo: puntual o difusa. A modo de síntesis éstas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 46. Síntesis de las medidas propuestas.

Tipo de Actuación	Tipo de fuente	Medida correctora	Subcuenca	Sector embalse
Externa	Puntual	Creación de un tanque de tormenta en la Depuradora de Reinosa	T1	E2
	Puntual	Puesta en funcionamiento depuradora Arija	CED	E6
	Puntual	Sistema de saneamiento de municipios aledaños al embalse	CED	Embalse
	Difusa	Gestión y control explotaciones ganaderas	CED	Embalse
	Difusa	Instalación de un cerramiento rústico en el perímetro del embalse	CED	Embalse
	Difusa	Bandas de vegetación	CED	Embalse
	Difusa	Preembalse en Lancharés	CED	E5, E6

8.1. Tanque de tormenta en la depuradora de Reinosa-Campoo de Enmedio

La E.D.A.R. de Reinosa-Campoo de Enmedio trata las aguas de los núcleos de Reinosa, Bolmir, Nestares, Requejo y Matamorosa, dando servicio a una población de 13.504 hab. Está diseñada para 21.076 habitantes equivalentes y dispone de tratamiento terciario con eliminación de nutrientes. No obstante, como se ha venido citando en páginas anteriores, existe un problema en la red de saneamiento que, además de las aguas residuales, recoge las aguas del freático en épocas de exceso con lo que se produce un vertido directo al río Ebro, inmediatamente antes de su ingreso al embalse, lo que supone una de las principales fuente de nutrientes al embalse. Este tipo de situaciones son comúnmente conocidas como DSU (Descargas de los Sistemas Unitarios).



Aliviadero de la depuradora de Reinosa y punto de ingreso al río Ebro (febrero de 2008).

Normalmente, los DSU se producen en tiempo de lluvia y su caracterización depende de varios factores: Hora del día, duración de tiempo entre dos fenómenos lluviosos que producen escorrentía, magnitud y características del agua residual en tiempo seco, tipo

de lluvia, características de la red de saneamiento, forma y área de la cuenca drenante y sedimentos existentes en la red de saneamiento.

Estos parámetros determinan la existencia del primer lavado, que comúnmente se define como el periodo inicial de un suceso de lluvia-escorrentía en la que la concentración de contaminante es significativamente superior a la observada durante las etapas posteriores del aguacero. Un elemento utilizado para minimizar y controlar los impactos de las DSU en el medio receptor es el tanque de tormentas.

De aquí surge el planteamiento de esta medida correctora, que consistiría en la construcción de un tanque de tormenta en la depuradora de Reinosa, cuya finalidad sea dar respuesta a un doble objetivo:

- Laminar las puntas de caudal que llegan a la estación depuradora de aguas residuales (EDAR).
- Minimizar los contaminantes que se vierten al medio receptor, proporcionando algún tipo de tratamiento o recirculando el agua a la EDAR, tras la finalización del suceso de lluvia.

Como criterio generalizado el volumen del tanque de tormenta deberá ser capaz de retener como mínimo la contaminación producida por la primera lluvia. En este sentido se inclinan la norma *British Standard* y los criterios de diseño de colectores de la Confederación Hidrográfica del Norte. Así, se señala que este volumen corresponde al necesario para que una lluvia de 20 minutos de duración y con una intensidad de 10 litros por segundo y hectárea no produzca vertidos por el aliviadero de tormentas⁶.

Un aspecto importante a la hora de proyectar este tipo de infraestructuras es la disponibilidad de superficie, situación que en el caso que nos ocupa parece, como primera aproximación, fácilmente subsanable, ya que en las inmediaciones de la

⁶ "Las redes unitarias de saneamiento: Criterios de diseño y control". Miguel Salaverria Monfort. Revista Del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.1995

depuradora existen terrenos que podrían acoger al tanque de tormentas, según muestra el esquema adjunto.



Zona de posible ubicación del tanque de tormentas.

8.2. Puesta en funcionamiento de las depuradoras de Arija

Entre los municipios ribereños destaca el municipio de Arija (Burgos) por ser el que mayor población presenta, con un número de habitantes censados de 192 (INE 2006), población que durante la época estival puede llegar a alcanzar la cifra de 1000, según indica la autorización de vertido para dicha localidad.

El municipio de Arija dispone de dos depuradoras, Arija de Arriba y Arija de Abajo, ambas de reciente construcción. La EDAR de Arija de Arriba consiste en un pretratamiento seguida de una decantación primaria (tanques Imhoff) y un tratamiento biológico (filtros biológicos). La EDAR de Arija de Abajo presenta el mismo tipo de pretratamiento y decantación primaria que la anterior, mientras que para el tratamiento biológico dispone de biodiscos y finaliza el proceso con una decantación secundaria. La red de colectores del municipio es de tipo separativa, siendo las aguas pluviales evacuadas directamente al embalse. Por su parte, las aguas fecales de Arija de Abajo se impulsan a su depuradora a través de una estación de bombeo.



Depuradora de Arija de Abajo.



Depuradora de Arija de Arriba.

En la actualidad, el sistema de depuración de Arija se encuentra inactivo, por lo que los vertidos de la localidad ingresan directamente al embalse.



Vertido de Arija, unos 100 metros antes de su ingreso al embalse, a favorecido el crecimiento de carrizos.
En la esquina derecha de la imagen puede apreciarse la estación de bombeo.



Vista aérea del ingreso del vertido de Arija al embalse.

Resulta obvio que el vertido sin depurar de Arija resulta una importante fuente de nutrientes al embalse, por lo que se propone como medida correctora la puesta en funcionamiento de las depuradoras de Arija.

Por otra parte, cabe la posibilidad de sustituir el sistema actual de depuración por otras soluciones de bajo coste de funcionamiento y mantenimiento.

8.3. Sistema de saneamiento de municipios aledaños al embalse

En términos generales, la cuenca de drenaje del embalse del Ebro se caracteriza por presentar poblaciones de escasa entidad, exceptuando a Reinosa y a los municipios más próximos a ella (Bolmir, Requejo, Nestares y Matamorosa) que, como se comentó con anterioridad, depuran sus aguas residuales en la EDAR de Reinosa. La propuesta que nos ocupa se ciñe a los municipios ribereños, pero no se descarta la necesidad de la actualización de los sistemas de saneamiento y depuración de todos los núcleos englobados en el área de drenaje, ya que como se pudo constatar en la caracterización de vertidos, y como indica el Plan hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla, estos municipios presentan un sistema de saneamiento deficiente.



En la imagen de la izquierda se puede apreciar el ingreso del vertido de Horna de Ebro al embalse. A la derecha ingreso del vertido de La Población (margen norte) al embalse, este vertido, cuando el embalse se encuentra a cota máxima, queda sumergido

Se considera de especial importancia la corrección de los vertidos ribereños ya que su afección es directa sobre la masa de agua. Por lo que dentro de un marco de corrección del saneamiento en la cuenca del embalse del Ebro estos serían prioritarios. Los

municipios a actuar, agrupados en función de la margen en que se sitúan, serían los siguientes:

PROV,	MUNICIPIO	NUCLEOS	POBLACIÓN INE 2006	Margen embalse	Distancia al embalse* (m)
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Población (La)	130	Norte	0
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Quintanamanil	11	Norte	30
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Orzales	113	Norte	47
Cantabria	CAMPOO DE ENMEDIO	Horna de Ebro	59	Norte	0
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Bustamante	39	Norte	90
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Monegro	55	Norte	127
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Lanchares	104	Norte	135
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Quintana	7	Norte	400
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Villasuso	61	Norte	420
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Riva (La)	44	Norte	480
Cantabria	CAMPOO DE YUSO	Costana (La)	44	Norte	500
Cantabria	ROZAS DE VALDEARROYO	Arroyo	95	Sur	17
Cantabria	CAMPOO DE ENMEDIO	Villafria	68	Sur	17
Cantabria	ROZAS DE VALDEARROYO	Bimón	20	Sur	50
Cantabria	ROZAS DE VALDEARROYO	Rozas (Las)	25	Sur	91
Cantabria	ROZAS DE VALDEARROYO	Llano	43	Sur	100
Cantabria	ROZAS DE VALDEARROYO	Renedo	12	Sur	108
Burgos	VALLE DE VALDEBEZANA	San Vicente de Villamezán	13	Sur	400

*Distancia desde el vertido al embalse, siguiendo el recorrido natural

No se listan aquí las poblaciones de Arija y Corconte, por tratarse de excepciones a la regla general, ya que ambos núcleos disponen un adecuado sistema de depuración, aunque en el caso de Arija sea necesaria su puesta en funcionamiento. Tampoco se consideran los núcleos más alejados de la masa de agua y pertenecientes a la cuenca de escorrentía directa.

Para la corrección de estos vertidos se pueden considerar dos líneas de actuación, por un lado tratar los vertidos de manera individualizada, donde se podían emplear sistemas de tratamiento blandos, como puede ser el empleo de bandas de vegetación, filtros verdes, etc., y por otro se podría considerar la opción de realizar dos depuradoras mancomunadas, ubicadas en las márgenes norte y sur del embalse.

En principio, el vertido que deberían tratar estas depuradoras sería el equivalente al de una pequeña o mediana colectividad, pudiendo emplearse un tipo de depuración extensivo (humedales artificiales, filtros de macrofitas flotantes, lagunajes, etc.). Estos sistemas presentan el inconveniente de que ocupan más superficie que los procesos intensivos clásicos, pero sus costes de inversión son, generalmente, inferiores a los

costes de los sistemas clásicos. También sus condiciones de explotación son más flexibles y económicas, además de precisar menos personal, y menos especialización, que las técnicas intensivas clásicas.

8.4. Gestión y control de explotaciones ganaderas

Como se ha podido constatar en el presente estudio, los aportes de nutrientes procedentes de las excretas ganaderas adquieren un notable peso, principalmente en la cuenca de escorrentía directa, donde se estima que un 73% de la carga total se debe a esta fuente. Valga citar, a modo de ejemplo, que en un municipio como Lanchares, con tan sólo una población de 104 habitantes, se encuentran censadas 885 cabezas de ganado bovino. Tónica general de los municipios ribereños donde, en todos, ellos existen explotaciones ganaderas, con el ganado bovino como predominante.

De aquí surge la necesidad de realizar en todo el área de drenaje del embalse y en concreto, en la cuenca de escorrentía directa, una correcta gestión de la actividad ganadera.

Una primera aproximación a la solución del problema es fomentar la aplicación de los códigos de buenas prácticas agrarias. Estos códigos no tienen carácter obligatorio de cumplimiento, aunque las consideraciones que recogen son de gran utilidad para minimizar los impactos procedentes de las fuentes ganaderas. Las dos comunidades autónomas del ámbito estudiado disponen de códigos de buenas prácticas agrarias. Cantabria lo publicó en el B.O.C número 6 de dos de abril de 1997 y Castilla y León en el B.O.CyL. nº 112 de 16 de junio de 1998. En términos generales recogen los siguientes aspectos:

1. Los períodos en que no es conveniente la aplicación de fertilizantes a las tierras.
2. La aplicación de fertilizantes a tierras en terrenos inclinados y escarpados.
3. La aplicación de fertilizantes a tierras en terrenos hidromorfos, inundados, helados o cubiertos de nieve.
4. Las condiciones de aplicación de fertilizantes a tierras cercanas a cursos de aguas.
5. La capacidad y el diseño de los tanques de almacenamiento de estiércol, las medidas para evitar la contaminación del agua por escorrentía y filtración en aguas superficiales o subterráneas

de líquidos que contengan estiércol y residuos procedentes de productos vegetales almacenados como el forraje ensilado.

6. Los procedimientos para la aplicación a las tierras de fertilizantes químicos y estiércol que mantengan las pérdidas de nutrientes en las aguas a un nivel aceptable considerando tanto la periodicidad como la uniformidad de la aplicación.

No obstante, para una correcta selección y aplicación de medidas correctoras resulta necesario obtener una gran variedad de datos: grado de estabulación del ganado, manejo de purines en la zona, sistemas de tratamiento en las distintas explotaciones ganadera, distancia de las explotaciones a la masa de agua, etc. Lo que implica un estudio concreto de las explotaciones ganaderas.

Uno de los objetivos del estudio sería determinar las explotaciones que deberían considerarse como fuente puntual, y cuales causan un impacto significativo sobre la masa de agua, para así determinar el tratamiento adecuado a su vertidos.

Entre los procesos unitarios de depuración a emplear se pueden citar: Balsas, adición de aditivos a balsas y piensos, separadores sólido/líquido, compostaje, Nitrificación-desnitrificación, Digestión anaerobia, digestión aerobia, evaporación y secado, Stripping y absorción, ultrafiltración y ósmosis inversa y Ozonización. La solución idónea de tratamiento depende básicamente del coste, que depende a su vez de caudal a tratar, de los precios y costes de la energía, de las distancias hasta la aplicación y de la conveniencia de un tratamiento colectivo⁷.

Por su parte, en el caso de las fuentes difusas ganaderas, las medidas se pueden orientar a la limitación del acceso del ganado al embalse, a la intercepción en las zonas de pastoreo de sus drenajes mediante cunetas verdes y/o bandas de vegetación.

⁷ “Guía de los tratamientos de las deyecciones ganadera” elaborada por el Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya (2004)

8.5. Instalación de un cerramiento rústico en el perímetro del embalse

La instalación de un vallado perimetral en el embalse tiene por objeto evitar las intrusiones por parte del ganado, principalmente, a las márgenes del embalse. Como se ha podido constatar durante la realización de los trabajos de campo, es habitual encontrar ganado, principalmente bovino y equino, pastando en las inmediaciones del embalse, incluso en el vaso del embalse cuando éste se encuentra por debajo de su nivel máximo.



En la fotografía se puede observar al ganado pastando en el vaso del embalse, cuando este no se encuentra al máximo de su capacidad (agosto 2007).



Ganado equino pastando en la ribera del embalse. (febrero de 2008)

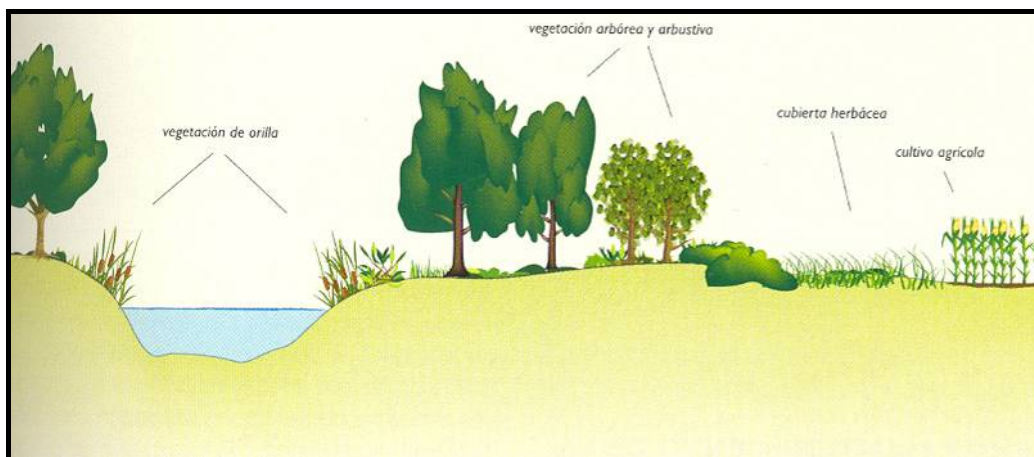
Realizando un cerramiento, principalmente, en praderas y pastizales, zonas con mayor presencia ganadera, se evitaría que sus deyecciones ingresen directamente a la masa de agua. Este tipo de actuación posibilita, además, la recuperación de márgenes.

El cerramiento, preferentemente, debería ser de estilo rústico, provisto de puertas de escape para el ganado y que permitieran el acceso a las inmediaciones del embalse para la realización de otro tipo de actividades. En la misma línea de actuación se podrían, situar abrevaderos fuera del dominio público hidráulico y en las zonas de mayor presencia ganadera.

Este tipo de actuación se está llevando a cabo en la cola del embalse de Ullívarri (Álava) y en el embalse de Valmayor (Madrid).

8.6. Creación de bandas de vegetación en las márgenes del embalse

Las bandas de vegetación son unos corredores de vegetación que se crean, tanto en los ríos tributarios como en las riberas de los lagos o embalses, para separar los cuerpos de agua de zonas potencialmente contaminantes, principalmente agrícolas, que son una importante fuente de nutrientes, además de reforzar el efecto del vallado anteriormente propuesto.



Esquema tipo de banda de vegetación en zona agrícola.

Obtenido de "Restauración de ríos. Guía metodológica para la elaboración de proyectos" Ministerio de Medio Ambiente

La eficacia de estas bandas depende de su anchura, empezando a notarse algún efecto positivo a partir de los 8 metros de ancho. Aunque, para obtener unos buenos

resultados, el ancho de banda debería ser como mínimo de 30-40 m. La extracción de fósforo y nitrógeno varía sustancialmente (entre el 20 y 90%), con promedios de, aproximadamente, el 30 %, la máxima extracción de nutrientes depende principalmente de la realización de un diseño correcto.

Estas bandas de vegetación reforzarían el efecto del vallado propuesto anteriormente, además de retener aportes de carácter difuso. Al igual que el vallado, y como una primera aproximación, estas bandas vegetales se podrían ubicar principalmente en las zonas de prados y pastizales, con el objetivo de retener los aportes difusos procedentes de la ganadería.

Para el diseño de la banda de vegetación se deberá tener en cuenta la vegetación potencial de la zona, así como la pendiente y tipos de suelo.

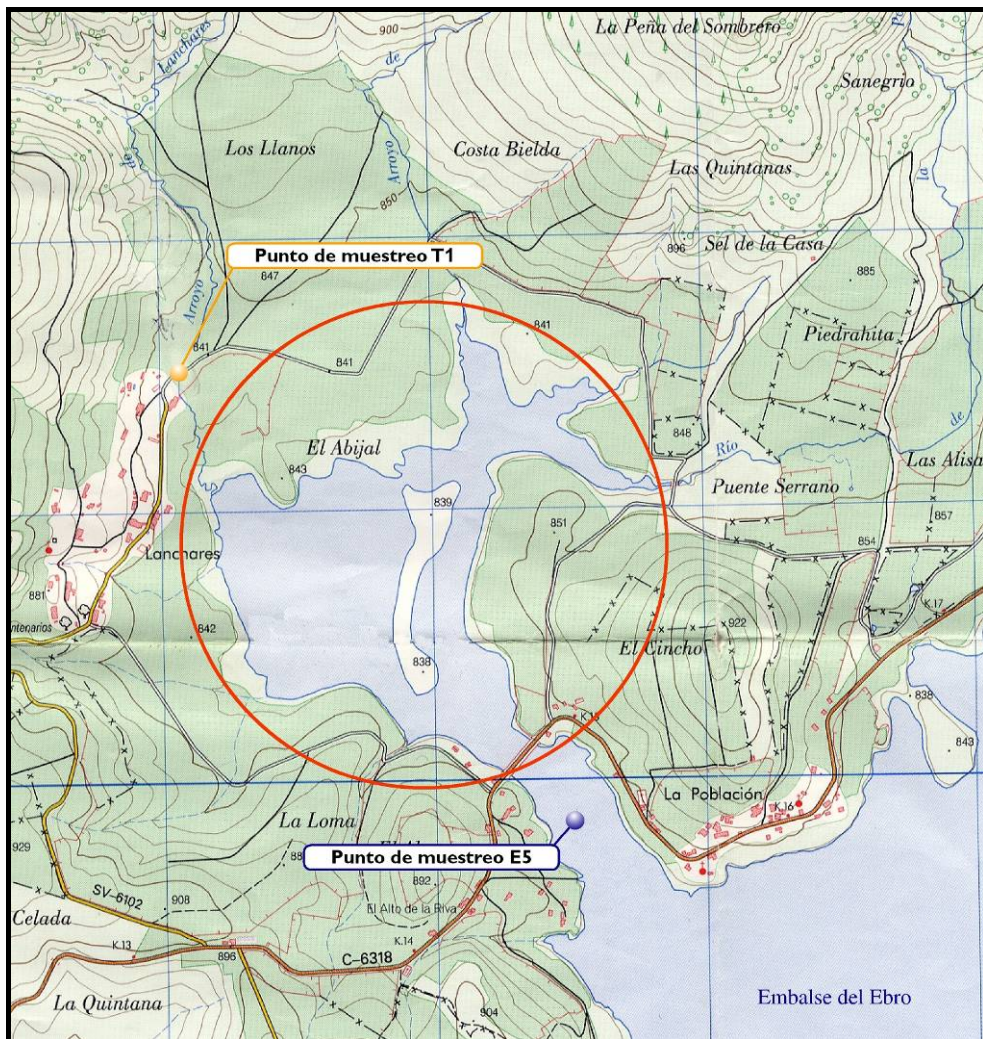
8.7. Preembalse en la cola de Lanchares

La propuesta consiste en la creación de un preembalse en la cola de Lanchares, con el objeto de favorecer la retención del agua rica en nutrientes durante un corto periodo de tiempo, antes de que estas ingresen en el cuerpo central del embalse. El fósforo se pierde hacia los sedimentos por precipitación y sedimentación, tras quedar fijado en la biomasa fitoplanctónica.

Un segundo objetivo, al que daría respuesta el preembalse, sería la creación de zonas acuáticas adecuadas para la cría y el anidamiento de aves acuáticas. Ya que como se citó anteriormente, el embalse del Ebro es una zona de importancia para el paso migratorio de aves de la costa cantábrica hacia el interior y un lugar de reproducción de interés para ciertas especies acuáticas, encontrándose catalogado como Zona Especial de Protección para la Aves. En esta zona podrían habilitarse observatorios de aves y realizarse actividades de interpretación de la naturaleza y educación ambiental, fomentando así la actividad turística del embalse.

Conviene citar que esta actuación queda recogida en el "Plan hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla-Escalada", dentro de las soluciones propuestas para el embalse del Ebro.

La represa podría ubicarse en el puente de la carretera C-6318, frente a la localidad de La Población. La profundidad máxima de la ensenada se situaría entre 3 y 4 metros, lo que el efecto depurador sería similar al de un lagunaje. Además en el perímetro de la ensenada se podrían plantar macrófitos emergentes que, además de servir de refugio a la avifauna, favorecerían la retención de nutrientes.



Zona de actuación propuesta.

8.8. Reducción de carga al embalse con las medidas propuestas

La batería de medidas propuestas pretenden mitigar en la medida de lo posible el grado trófico del embalse, su planteamiento se realiza a tenor de los resultados obtenidos en el presente trabajo y al acercamiento a la problemática existente en el entorno del embalse. No obstante, se considera conveniente establecer el nivel de reducción que se conseguiría, en la carga anual que recibe el embalse, tras la total aplicación de las citadas medidas.

Para la estimación de la ésta reducción se toma como referencia los valores obtenidos para el fósforo total, parámetro clave en los problemas de eutrofización. Así mismo, como el tipo de medidas propuesto presenta un rango variable en la eliminación de nutrientes, se ha optado por establecer unos rendimientos medios para cada una de la ellas, según se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 47. Reducción de fósforo según las medidas propuestas

Tipo de fuente	Medida correctora	Subcuenca	Sector embalse	% Reducción	Carga (t)	Reducción media de la técnica %	Reducción media esperada t
Puntual	Creación de un tanque de tormenta en la Depuradora de Reinosa	T1	E2	30-90	13,70	60	8,22
Puntual	Puesta en funcionamiento depuradora Arija (Biodiscos)	CED	E6	10-30	0,18	20	0,04
Puntual	Sistema de saneamiento de municipios aledaños al embalse	CED	Embalse	10-30	0,59	20	0,12
Difusa	Gestión y control explotaciones ganaderas	CED	Embalse	20-80	10,19	50	5,10
Difusa	Instalación de un cerramiento rústico en el perímetro del embalse	CED	Embalse	5-20	10,19	10	1,02
Difusa	Bandas de vegetación	CED	Embalse	20-90	2,12	30	0,64
Difusa	Preembalse en Lanchares	CED	E5, E6	30-70	0,12	50	0,06
TOTAL							15,2

Como se puede observar en la tabla previa, la carga a tratar por cada medida correctora se encuentra ligada a una fuente concreta, con el objeto de no sobrestimar la efectividad de las medidas planteadas. Según esto la carga total tratada se situaría en torno a las 27 toneladas de fósforo, que se vería reducida en 15,2 t. Si tenemos en cuenta que el exceso de carga que recibe el embalse es de 14,9 t (ver punto 6.6 de la presente memoria), estas medidas podrían considerarse como efectivas para el mantenimiento de unas condiciones mesotróficas en el embalse. Así mismo, la carga anual bruta resultante sería de 19,7 t (34,9-15,2), que se encontraría por debajo de la carga crítica calculada en el citado punto 6.6.

8.9. Coste estimado de las medidas propuestas

El coste estimado para la puesta en marcha de las actuaciones propuestas se situaría entre los 8,5 y 8,7 M€, la distribución de costes, según las distintas medidas, queda reflejada en la siguiente tabla.

Tabla 48. Estimación de costes de las medidas correctoras propuestas

Medida correctora		Inversión (Miles €)
1.	Creación de un tanque de tormenta en la Depuradora de Reinosa	3.250
2.1.	Puesta en funcionamiento depuradora Arija (Biodiscos)	12
2.2.	Sustitución del sistema de depuración de Arija	200
3.	Sistema de saneamiento de municipios aledaños al embalse	2.000
4.	Gestión y control explotaciones ganaderas	240
5.	Instalación de un cerramiento rústico en el perímetro del embalse	477
6.	Bandas de vegetación	750
7.	Preembalse en Lancharés	1.800
Total (Miles €) -sin sustitución del sistema de Arija-		8.529
Total (Miles €) -con sustitución del sistema de Arija-		8.717

Para la valoración de la **creación del tanque de tormentas** se ha empleado la fórmula propuesta en el borrador de la "Guía Técnica para la caracterización de medidas" (v 2.9. de Noviembre de 2008, elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino), según la siguiente expresión:

$$I = 1258,8 X^{0,8492}$$

donde I representa el coste en euros, mientras X representa la capacidad de almacenamiento del tanque en m³. El volumen de depósito considerado ha sido de 10.000 m³. El coste asociado a la creación del tanque de tormenta se sitúa en 3.138.750 €. Además, en el coste total, se ha incluido una partida de 150.000 € para la realización de un estudio previo sobre el desbordamiento de la capacidad de la depuradora de Reinosa.

Por su parte, la valoración de la **puesta en funcionamiento de la depuradora de Arija** se obtiene del "Borrador del Plan Hidrológico de la cabecera del Ebro hasta Quintanilla-Escalada", donde también se recoge ésta solución.

Respecto a la **posible sustitución del sistema de depuración de la localidad de Arija** se han empleado los valores orientativos que dispone la “Guía de Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales. Adaptadas a las pequeñas y medias colectividades 500-5.000 he”. Oficina Internacional del agua 2001. Cabe la posibilidad que el sistema sustituto sea una combinación de filtros plantados de flujo vertical u horizontal, cuya instalación podría ubicarse en la zona de carrizos que, espontáneamente, ha surgido por el vertido sin depurar de Arija (ver página 98). Este tipo de depuración, frente al actual, presenta la ventaja de precisar un menor consumo energético y un menor coste de mantenimiento.

En lo concerniente a la valoración de la **depuración de los vertidos aledaños al embalse**, se ha tenido en cuenta el “Plan Director de saneamiento, depuración y calidad de las aguas de Cantabria” (2006-2010). Como se comentó en la descripción de la actuación (página 99) los vertidos se podrían tratar de manera individualizada o de forma colectiva, mediante la creación de dos depuradoras mancomunadas, ubicadas en las márgenes norte y sur del embalse. El citado Plan Director ya contempla la necesidad de depuración de éstas pequeñas poblaciones, estimando un coste de 1,23 millones de euros para los municipios de la margen norte del embalse (entre los que cita como más significativos Orzales, La Población, Monegro y Lanchares) y una partida de 0,73 millones de euros para los municipios ubicados en la zona sur del embalse (entre los que destacan las poblaciones de Arroyo, Llano y Las Rozas).

La partida destinada a la **gestión y control de las explotaciones ganaderas** contempla la realización de un estudio concreto de los vertidos ganaderos en la cuenca, cuyo objetivo final sería establecer medidas concretas para su corrección. Además, prevé la realización de una campaña de sensibilización sobre el efecto perjudicial de este tipo de vertidos, donde se podrían efectuar charlas informativas, trípticos y carteles informativos, divulgación de las Guías de Buenas Prácticas Agrarias, etc.

Para la estimación de la **instalación del cerramiento del embalse** se ha tenido en cuenta la Base de Precios de Paisajismo (BPP), que valora el precio de kilómetro de valla, totalmente colocada, en 7.945,65 €. Como una primera aproximación se estima en torno a 60 km de vallado, correspondientes a las zonas de pastizal presente en el entorno del embalse.

La creación de **bandas de vegetación**, asociada también a las zonas de pastizal (60 km) del entorno del embalse, consistiría básicamente en una plantación en buffer de, aproximadamente, 40 metros de anchura, marco de 4 metros y líneas de plantación al tresbolillo, con un total de 10 líneas de plantación en el buffer, con los que resultaría una plantación de 625 pies/ha, estimándose un valor para cada pie de 5 euros.

Por último, citar que para la valoración del **preembalse en Lanchares** se ha considerado la creación de un dique de materiales sueltos, espaldones inclinados 1/3, de 240 metros de longitud de coronación y unos 15 metros de altura, incluido camino de coronación, desvío del río y aliviadero. Este dique retendría un volumen aproximado de 5,6 hm³ que representaría, tan sólo, el 1% del volumen total embalsado. La ubicación del dique podría establecerse en las proximidades del puente de la carretera C6318 (ver página 106), donde se encuentra la menor longitud entre márgenes (inferior a 200 m).