



## Gestión Avanzada de la Eutrofización de Aguas Superficiales a escala integral de Cuenca Hidrográfica

**Autor:** Lucía López González

**Institución:** Instituto Tecnológico de Galicia

**Otros autores:** Analía López Fidalgo (Fundación Instituto Tecnológico de Galicia- ITG); Agustín P. Monteoliva Herreras (Ecohydros S.L.); Alex Monná (Ecohydros S.L.)

## Resumen

Nuestros ecosistemas acuáticos están expuestos a escenarios negativos que trascienden la problemática medioambiental, constituyéndose en algunas ocasiones en problemas potencialmente muy graves para la salud pública. De este modo, se ha venido observando en los últimos años cómo la eutrofización de algunos embalses está provocando situaciones de riesgo potencial relacionadas con la proliferación de niveles preocupantes de cianobacterias ('microalgas verde-azuladas'), grupo del fitoplancton con especies capaces de producir potentes biotoxinas, nocivas para la salud humana y animal. El principal objetivo del proyecto ROEM+ es demostrar la viabilidad y eficiencia de un enfoque innovador de gestión integral de la cuenca que permita abordar con una metodología de alta resolución espacio-temporal y temática el extendido y creciente problema de la proliferación masiva de algas nocivas causadas por la eutrofización de las masas de agua, con toxicidad asociada en aguas de baño y abastecimiento, y conseguir el buen estado ecológico de del agua (objetivo medioambiental de la Directiva Marco del Agua). Como valor añadido, se prevé que algunas de estas medidas podrían constituir nuevas actividades económicas locales en zonas rurales y además aportar beneficios ambientales en aspectos de aprovechamiento/reciclaje de materiales y de energía. ROEM+ permitirá la puesta en marcha de una 'e-plataforma' de gestión eficiente e integral de información, basada en redes de sensores de última generación (alta resolución espacio-temporal) en combinación con técnicas de simulación predictiva. Esta innovadora herramienta permitirá ordenar y asignar prioridades en relación con áreas y usos, de manera que las masas de agua puedan absorber y amortiguar realmente las presiones antrópicas combinadas, y moduladas por factores naturales. Se solventará entonces la excesiva incertidumbre de los métodos prospectivos clásicos, lo que contribuirá Será entonces posible disponer de una mayor certidumbre en la gestión, evitar inversiones ineficientes en plantas de tratamiento de aguas residuales (localización, tamaño, necesidad, etc.). Estas mejoras se traducen directamente en un incremento de la sostenibilidad. Finalmente, cabe mencionar que ROEM+ se beneficia del éxito de los resultados recientemente obtenidos en iniciativas de I+D lideradas por ITG y ECOHYDROS en el ámbito de la sensórica y comunicaciones aplicada a la calidad del agua, los cuales fueron presentados en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7, artículo 'Redes de Sensores sin Cables para Predicción de Eutrofización en Embalses y Lagos'.

**Palabras claves:** eutrofización; cuenca hidrográfica; redes de sensores de última generación; simulación predictiva; e-plataforma

## 1. Introducción

Nuestros ecosistemas acuáticos están expuestos a escenarios negativos que trascienden la problemática medioambiental, constituyéndose en algunas ocasiones en problemas potencialmente muy graves para la salud pública. De este modo, se ha venido observando en los últimos años cómo la eutrofización de algunos embalses está provocando situaciones de riesgo potencial relacionadas con la proliferación de niveles preocupantes de cianobacterias (“microalgas verde-azuladas”), grupo del fitoplancton con especies capaces de producir potentes biotoxinas, nocivas para la salud humana y animal.

El principal objetivo del proyecto LIFE ENV/ES/590 ROEM+, en adelante ROEM+, es demostrar la viabilidad y eficiencia de un enfoque innovador de gestión integral de la cuenca que permita abordar con una metodología de alta resolución espacio-temporal y temática el extendido y creciente problema de la proliferación masiva de algas nocivas causadas por la eutrofización de las masas de agua, con toxicidad asociada en aguas de baño y abastecimiento, y conseguir el buen estado ecológico del agua (objetivo medioambiental de la Directiva Marco del Agua). Como valor añadido, se prevé que algunas de estas medidas podrían constituir nuevas actividades económicas locales en zonas rurales y además aportar beneficios ambientales en aspectos de aprovechamiento/reciclaje de materiales y de energía.

Como resumen, ROEM+ permitirá la puesta en marcha de una “e-plataforma” de gestión eficiente e integral de información, basada en redes de sensores de última generación (alta resolución espacio-temporal) en combinación con técnicas de simulación predictiva. Esta innovadora herramienta permitirá ordenar y asignar prioridades en relación con áreas y usos, de manera que las masas de agua puedan absorber y amortiguar realmente las presiones y el impacto de la naturaleza y el ser humano, evitando errores de gestión del pasado debidos a una excesiva incertidumbre relacionada con métodos analíticos y prospectivos clásicos, tal es el caso de equivocadas inversiones en plantas de tratamiento de aguas residuales (localización, tamaño, necesidad, etc.). Estas mejoras se traducen directamente en un incremento de la sostenibilidad.

El proyecto ROEM+ supone la primera aplicación del sistema descrito a escala completa en un escenario de cuenca (Cuerda del Pozo, Soria) de gran relevancia como es de la Cuenca del Río Duero, de importancia estratégica siendo la cabecera de la Cuenca Hidrográfica del Duero, la mayor extensión de la Península Ibérica, de carácter internacional al desembocar en Portugal. Se plantea monitorizar y capturar los procesos principales a nivel de cuenca que inciden en la eutrofización y el crecimiento de las cianobacterias tóxicas en el embalse de Cuerda del Pozo, que se ha tomado como caso piloto demostrativo por ser una masa de agua en la que convergen varios usos críticos desde el punto de vista de la calidad de las aguas (aguas de abastecimiento, recreativas y de baño, uso ganadero, etc). El proyecto se estructurará en torno a los flujos de fósforo como regulador principal de dichos procesos (requiere además trazar el carbono y nitrógeno), pero toda la e-infraestructura a implementar será modular y admitirá añadir nuevos ciclos, procesos, elementos y contaminantes a medida que se requieran.

ROEM+ aporta en su conjunto un salto cualitativo en las posibilidades de controlar la calidad de las aguas de los embalses, y se inserta en una tendencia muy acentuada ya en otros ambientes (especialmente marinos). Gracias a este tipo de iniciativas

tecnológicas multidisciplinares, el “siglo del inframuestreo biológico” puede caer pronto en el olvido, según la terminología al uso en los grupos de trabajo de plataformas sensoriales autónomas para el medio ambiente (Dickey et al., 2008).

Es importante destacar que el proyecto proporciona un nuevo enfoque en el ámbito de la gestión de las aguas continentales facilitando el camino hacia un desarrollo económico y medioambientalmente sostenible. Como consecuencia inmediata de los resultados de ROEM+ se obtendrá una gestión optimizada de la eutrofización y contaminación (algas tóxicas), gracias a posibilidad de predecir el rendimiento de diferentes combinaciones de medidas correctoras, tanto en la cuenca como en el propio embalse, con la consiguiente minimización de incertidumbres y costes.

Finalmente, cabe mencionar que ROEM+ se beneficia del éxito de los resultados recientemente obtenidos en iniciativas de I+D lideradas por ITG y ECOHYDROS en el ámbito de la sensorica y comunicaciones aplicada a la calidad del agua, los cuales fueron presentados en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7, artículo “Redes de Sensores sin Cables para Predicción de Eutrofización en Embalses y Lagos”, y que ahora permiten una implementación demostrativa a nivel de cuenca de las herramientas desarrolladas mediante una plataforma integral y robusta para la gestión del reto medioambiental descrito.

En el proyecto también participa Xóvenes Agricultores, quien jugará un papel vital en el acceso a información y usuarios relacionados con actividades agroganaderas y de explotación maderera, dos actividades cruciales en este territorio rural (muy representativo además en este aspecto de buena parte de la demarcación hidrográfica del Duero y del conjunto de la Península Ibérica) que deberán ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar medidas correctoras, relacionadas con cargas de origen difuso, que afectan a estos sectores.

## **2. Problema medioambiental abordado**

En los últimos años, se ha venido observando cómo la eutrofización de algunos embalses está provocando situaciones de riesgo potencial relacionadas con la proliferación de niveles preocupantes de cianofíceas (“algas verde-azuladas”), grupo taxonómico capaz de generar potentes biotoxinas perjudiciales para la salud humana y animal. El problema es generalizado, dado que el número de los principales embalses y lagos europeos registrados en la base de datos “WISE” de la EEA (European Environmental Agency) es de 2.227, de los que los 359, serían españoles, estando en riesgo de eutrofización más de la mitad. De hecho, casi el 40% de los embalses españoles presentan dominancias de cianobacterias según el CEDEX (2010).

En los últimos estudios realizados sobre la calidad de las aguas del embalse de Cuerda del Pozo, promovidos por la Confederación Hidrográfica del Duero (en adelante, CHD), se estableció un diagnóstico de eutrofia y la necesidad de impulsar acciones correctoras para revertir esa tendencia y evitar sus consecuencias menos deseables, como las proliferaciones de algas cianofíceas, que posteriormente se han identificado como productoras de toxinas.

Además, se sentaron también las bases de un programa progresivo de recuperación del sistema, que habría de sostenerse sobre un sistema de información de alta resolución, que permitiera su optimización sobre un conocimiento suficiente de la respuesta del sistema a las acciones de manejo y de la incidencia de factores naturales (especialmente climáticos) en esta respuesta.

Cabe destacar que, mientras tanto y en este contexto de recuperación de unas condiciones aceptables de la calidad del agua, se han implementado infraestructuras de saneamiento y depuración: “Proyecto de Depuradoras de Aguas Residuales y Emisarios de las Poblaciones del Alto Duero, aguas arriba del embalse de Cuerda del Pozo. Vinuesa (Soria)”, Sin embargo, a pesar de estas acciones se siguen produciendo crecimientos de algas tóxicas que demuestran que el objetivo medioambiental no se ha alcanzado.

La respuesta trófica del embalse de Cuerda del Pozo y el riesgo de proliferaciones de algas, especialmente cianofíceas, es un problema de carácter complejo que requiere ser abordado con métodos de estudio técnicamente avanzados. Por un lado, las relaciones causa-efecto, es decir, entre la presión antrópica por aportación de nutrientes y el grado de eutrofización no son lineales, y están influidas por factores que tienen que ver con una diversidad de elementos, como los factores climáticos locales, la propia naturaleza de las aguas, la acumulación histórica de nutrientes en sedimentos o el papel de organismos superiores en el control de la dinámica del fitoplancton.

Además, las proliferaciones de cianobacterias se desarrollan en escalas de tiempo muy cortas (días) y con una diferenciación espacial dentro del embalse, de modo que no es posible avanzar en su control únicamente con campañas de muestreo discrecionales.

Por el contrario, para tener un conocimiento adecuado para la gestión de estos eventos, es necesario recurrir a técnicas avanzadas que permitan combinar mediciones en continuo con otras discrecionales, optimizadas para reproducir los procesos clave, como requisito ineludible para alcanzar una gestión activa y eficiente del problema.

En previsión de un empeoramiento progresivo de la calidad de las aguas en nuestro territorio, debida a la evolución de los ciclos hidrológicos provocada por el cambio climático, el seguimiento continuado de los indicadores de biomasa de estas algas junto al resto de parámetros ambientales se muestra indispensable para conocer, predecir y gestionar los episodios de toxicidad. Estos sucesos, seguramente pasarían desapercibidos a las técnicas prospectivas tradicionales, quedando sobradamente demostrada así, la oportunidad y valor del empleo de herramientas novedosas de monitorización remota para el control de estas problemáticas ambientales, que permiten aumentar de una manera muy importante la capacidad de monitorización (observación) y con ello un mayor potencial de análisis de procesos de riesgo.

Por un lado, las opciones de restauración y lucha contra los efectos de la eutrofización de lagos y embalses adolecen de un dimensionamiento inadecuado y una infrutilización de técnicas de abordaje ecosistémico, que incidan en los procesos clave que modulan la respuesta trófica de la masa de agua. Por otro, las estaciones de tratamiento de aguas residuales suponen una gran inversión que no se adapta a las notables variaciones estacionales de la demanda en cuencas rurales y turísticas, y no tratan de forma suficientemente eficaz el problema de los nutrientes, especialmente del fósforo. Cuando

disponen de un tratamiento terciario con ese fin, los costes de funcionamiento se disparan.

Por el contrario, cuando se dispone de un conocimiento suficiente de los procesos funcionales que regulan los ecosistemas en la cuenca, es posible diseñar medidas correctoras basadas en técnicas blandas, tanto en la intercepción de los flujos de nutrientes excedentarios, como en su reciclaje y en su tratamiento "limnológico" en la propia masa de agua. De hecho, esta aproximación puede generar nuevas actividades económicas asociadas a los sectores agropecuarios y forestales, que al mismo tiempo contribuyan a cerrar ciclos de materias y energía a nivel de cuenca hidrográfica y a paliar los efectos más problemáticos de la eutrofización, como ocurre con la toxicidad asociada a las cianobacterias en el caso piloto.

Aplicar ese conocimiento a un caso concreto que reúne en un espacio contenido diferentes elementos de esta problemática ambiental tan extendida, tiene en consecuencia un valor innovador y demostrativo inigualable, que abre una nueva vía de gestión adaptativa capaz de optimizar tanto las inversiones como las actividades que se desarrollen en la cuenca y masa de agua, mejorando las posibilidades de una explotación sostenible de los recursos naturales pero manteniendo al mismo tiempo el máximo aprovechamiento y compatibilización económica en las zonas rurales.

Igualmente relevante es la obligación de los estados miembros de ejecutar un programa de medidas que permita recuperar el buen estado ecológico en las masas de agua para el año 2015, en el contexto de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CEE), que a diferencia de otras directivas relacionadas directamente con los flujos de nutrientes (Directiva sobre zonas sensibles 91/271/CEE y vulnerables 91/676/CEE) implica la adopción de estrategias coste eficientes específicas de la cuenca.

Esto obliga a implementar herramientas que permitan trazar los procesos y flujos de nutrientes a nivel de cuenca hidrográfica, aplicar medidas de mejora y conocer además los costes de esas medidas. El problema es que no hay una forma evidente y directa de escalar el impacto ambiental de las medidas ambientales a nivel de cuenca para predecir la repercusión en otra ubicación o masa de agua, y esto no es posible si no se consideran los procesos que intervienen entre las actividades humanas (vertidos puntuales y difusos, prácticas agropecuarias, etc.) y la carga de nutrientes que recibe una masa de agua. Lo mismo ocurre entre la carga de nutrientes que entra en un embalse y su estado trófico y riesgo de proliferaciones de cianobacterias tóxicas.

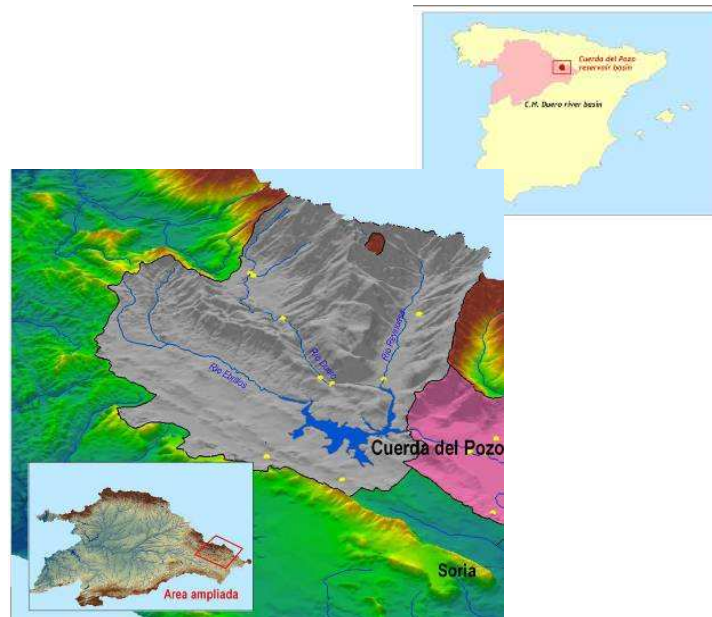
Los procesos que intervienen son numerosos, complejos y dinámicos y eso obliga a recurrir a herramientas de simulación dinámica, cuya implementación constituye el núcleo de este proyecto. Obteniendo como resultado una plataforma tecnológica capaz de aportar una cantidad de datos de resolución circa-diaria (incluso circa-horaria) que establece las bases para el establecimiento de un sistema de vigilancia eficaz y pionero en el ámbito nacional (en lo relativo a aguas continentales embalsadas), resultando de la máxima utilidad para la detección de niveles muy elevados de cianobacterias embalses.

Esta herramienta proporciona la posibilidad de detectar en tiempo real las causas ambientales que llevan a la degradación del metabolismo de un embalse, hasta el punto de generar explosiones demográficas de cianobacterias. Cabe recordar que dichos eventos se ven condicionados por fenómenos ambientales y meteorológicos a diferentes escalas temporales y espaciales. Posibilita una monitorización mucho menos invasiva en



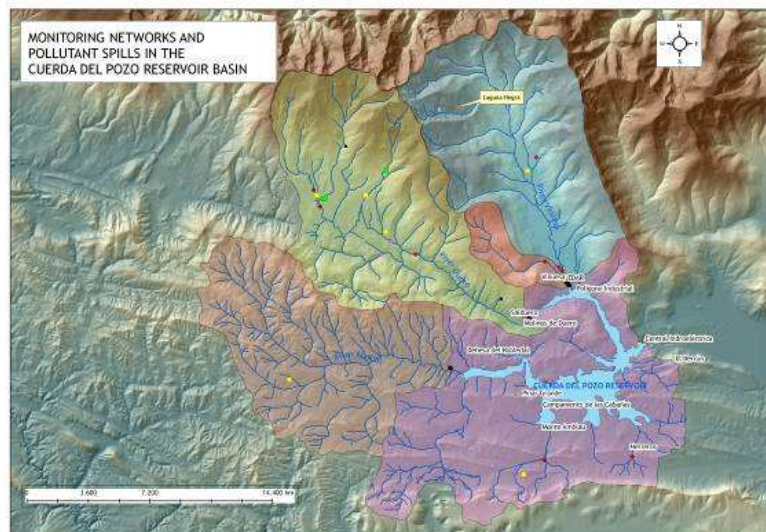
relación a los métodos clásicos de toma de datos. Si pensamos en la implantación de este tipo de sistemas de vigilancia remota en ecosistemas frágiles, como por ejemplo lagos o ibones, se contaría con un reducido riesgo de provocar daños en los mismos debidos a las propias actividades de muestreo.

En las figuras 1, 2 y 3 se aporta información sobre el área de trabajo del proyecto ROEM+.



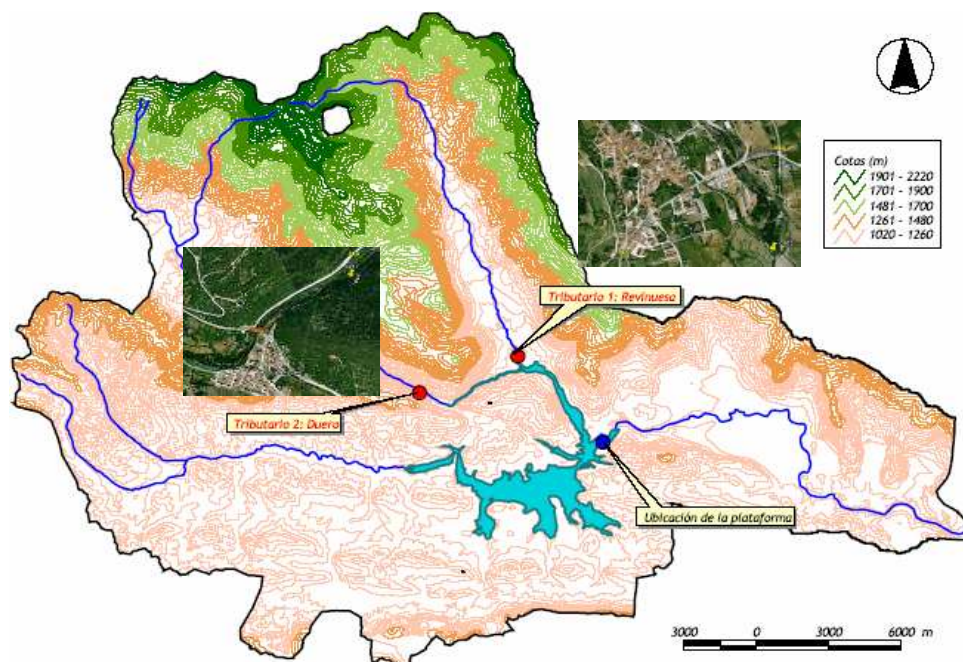
**Figura 1. Localización Geográfica del embalse Cuerda del Pozo**

El embalse de Cuerda del Pozo (año 1.941), se ubica en la provincia de Soria, unos 40km aguas arriba de su capital. Su cuenca se emplaza (zona gris en la figura siguiente) en el Alto Duero, en las estribaciones de los Picos de Urbión y Cebollera, en el Sistema Ibérico (Figura 1).



**Figura 2. Cuenca vertiente al Embalse de Cuerda del Pozo**

La cuenca vertiente al embalse de Cuerda del Pozo tiene una superficie total de 550km<sup>2</sup>. La cuenca total se ha dividido en tres subcuencas. El embalse tiene una extensión de 2.176ha en su máximo nivel normal, con una longitud máxima de 12km, una profundidad media moderada -10m-, y su profundidad máxima es de 36m (Figura 2).



**Figura 3. Zonas de monitorización de ROEM+**

En este proyecto se plantea implementar una red de estaciones de monitorización remota en continuo dirigida a controlar de forma permanente y con alta resolución la respuesta del embalse y en la entrada de los tributarios que aportan la principal carga de nutrientes, en las zonas en las que se aplicarán medidas correctivas dirigidas a moderar las aportaciones por esas vías (Figura 3).

### 3. Estado del arte: Punto de partida

#### 3.1. Punto de partida

Las acciones planteadas en ROEM+ se benefician y a la vez tienen como punto de partida los resultados de investigación de dos proyectos que han sido parcialmente financiados por programas de I+D:

Por un lado, el proyecto EUROPEO DORII (“Deployment of Remote Instrumentation Infrastructure”, <http://www.dorii.eu/>), en el que ha participado ECOHYDROS en colaboración con el IFCA (Instituto de Física de Cantabria). En él, se han investigado y desarrollado soluciones avanzadas al problema de gestión de instrumentación remota y procesado de datos en una e-Infraestructura general.

Por otro lado, el proyecto de investigación industrial NACIONAL ROEM (“Red de Observación de parámetros medioambientales para el estudio de la Eutrofización en eMbalses”) 2008-2011, liderado por ECOHYDROS en colaboración con ITG, en la convocatoria AVANZA I+D, en el que se han investigado, diseñado y validado tecnologías



de la información y comunicaciones para captación distribuida de información ambiental con aplicación a la monitorización en tiempo real, remota y ubicua (vía Internet) de los principales parámetros que influyen en la eutrofización de embalses. La línea fundamental de investigación y desarrollo técnico en el proyecto ROEM se ha centrado en la combinación de tecnologías de sensores sin hilos WSN (Wireless Sensing Networks / estándar IEEE 802.15.4) y GPRS-3G para el desarrollo de estaciones de medida multiparamétricas que integran sensores de última generación, y que permiten alimentar un sistema Web-GIS (Geographic Information System) que cumple con tecnologías SOA y WOA y con los estándares recomendados por el OGC (Open Geospacial Consortium), permitiendo además la integración de información proveniente de repositorios externos de contenido científico, meteorológico, etc. La arquitectura desarrollada permite a futuro la integración a gran escala de microsensores y sistemas de actuación infomecánica, para soportar los requerimientos de autonomía, autoconfigurabilidad y autosuficiencia energética en el contexto real de aplicación indicado.

El proyecto ROEM+ que se plantea en esta propuesta tiene por objetivo salvar la distancia que media entre estos resultados de investigación y desarrollo explicados y las políticas relacionadas con la problemática a abordar (eutrofización de aguas superficiales) y su aplicación generalizada (gestión integral de cuenca hidrográfica), introduciendo la dimensión pública (implicación de la Confederación Hidrográfica del Duero, principal usuario final). Esto será posible mediante la IMPLEMENTACIÓN de un PROTOTIPO A ESCALA COMPLETA en la Cuenca del Río Duero (Cuerda del Pozo) con objeto de evaluar la viabilidad técnica y económica de su introducción en un escenario completo y real de aplicación, carácter demostrador.

Las actuaciones innovadoras y que representan el valor añadido de ROEM+ con respecto a los proyectos ROEM y DORII se resumen a continuación:

- ✓ Herramientas de Gestión y Predicción Remotas basadas en Web
- ✓ Capacidad Analítica Intensiva
- ✓ Sistema de Monitorización de Alta Resolución Espacio-Temporal
- ✓ Calibración de sensores y modelos
- ✓ Diseño de Medidas Correctoras / Actuación

En las acciones de implementación de ROEM+ se emplearán los siguientes resultados de ROEM y DORII:

1. Los prototipos desarrollados en ROEM y DORII (figura 4), se integrarán en la infraestructura de monitorización remota de ROEM+.
2. Para la construcción de la e-plataforma y las nuevas estaciones de medida en ROEM+ se emplearán las arquitecturas desarrolladas en ROEM, presentadas en CONAMA 2010: ISBN 978-84-614-6112-7, artículo “Redes de Sensores sin Cables para Predicción de Eutrofización en Embalses y Lagos”:
  - ✓ Integración Electrónica de Sensores Modular y Escalable
  - ✓ Alimentación Autónoma de bajo consumo
  - ✓ Transmisión Remota sin Cables
  - ✓ Esquemas de gestión de procesos e información basados en tecnología de Servicios Web

- ✓ Esquemas basados en GIS compatibles con la arquitectura WEB. Flexible, amigable y eficiente y cumple con tecnologías SOA y WOA y con los estándares recomendados por el OGC (Open Geospatial Consortium) y directiva INSPIRE



**Figura 4. Plataformas producto de los proyectos DORII (izda) y ROEM (dcha)**

### **3.2. Estado del arte en Procedimientos de Control Biológico de Calidad de Aguas**

En lo que se refiere a los procedimientos de control biológico de la calidad de las aguas, se vienen aplicando métodos directos, basados en la toma de muestras y análisis de laboratorio. Los programas de control de la Directiva Marco del Agua suponen inversiones de gran calado en la adquisición de este tipo de datos, que se muestran claramente insuficientes a la hora de detectar y explicar fenómenos de gran impacto ambiental y social (proliferaciones de algas potencialmente tóxicas, mortandades masivas de peces, desaparición de especies de interés en conservación, proliferación de especies invasoras exóticas, etc). La necesidad de adoptar procedimientos de refuerzo en la adquisición de este tipo de información es acuciante y reconocida por los gestores del agua, y de hecho se está viviendo la antesala de una verdadera revolución en este campo, que debe permitir un notable incremento en el rendimiento de los programas de control biológico, especialmente en masas de agua no vadeables, como los embalses.

El proyecto ROEM+ en su conjunto aporta un salto cualitativo en las posibilidades de controlar la calidad de las aguas superficiales (i.e. embalses), y se inserta en una tendencia muy acentuada ya en otros ambientes (especialmente marinos). Importando la terminología al uso en los grupos de trabajo de plataformas sensoriales autónomas para el medio ambiente (Dickey et al., 2008), gracias a este tipo de iniciativas tecnológicas multidisciplinares, el “siglo del inframuestreo” puede caer pronto en el olvido.

### **3.3. Metodologías actuales y avanzadas en la Detección e Identificación de BLOOMS de cianobacterias y sus toxinas**

La identificación de los organismos causantes de blooms tóxicos, es con frecuencia el mejor modo de monitorizar una zona susceptible de sufrir dichas proliferaciones. Los estudios en este campo, han estado orientados a la identificación de las especies por microscopia, apoyados con la valoración de la toxicidad mediante bioensayos. Estos métodos son bastante intensivos y lentos, por lo que se están dedicando muchos esfuerzos en el desarrollo de metodologías automatizadas.

Ante la sospecha de un bloom de cianobacterias, actualmente se aplican diferentes procedimientos de laboratorio que comprenderían:

1. Un muestreo periódico.

2. Análisis microscópico con identificación.
3. Un recuento de colonias de cianobacterias.
4. Un ensayo de toxicidad aguda por exposición intraperitoneal en ratón.
5. Según sintomatología, confirmación de presencia de hepatotoxinas o neurotoxinas mediante HPLC-DAD y otras técnicas accesorias como el ensayo de la fosfatasa o ELISA.

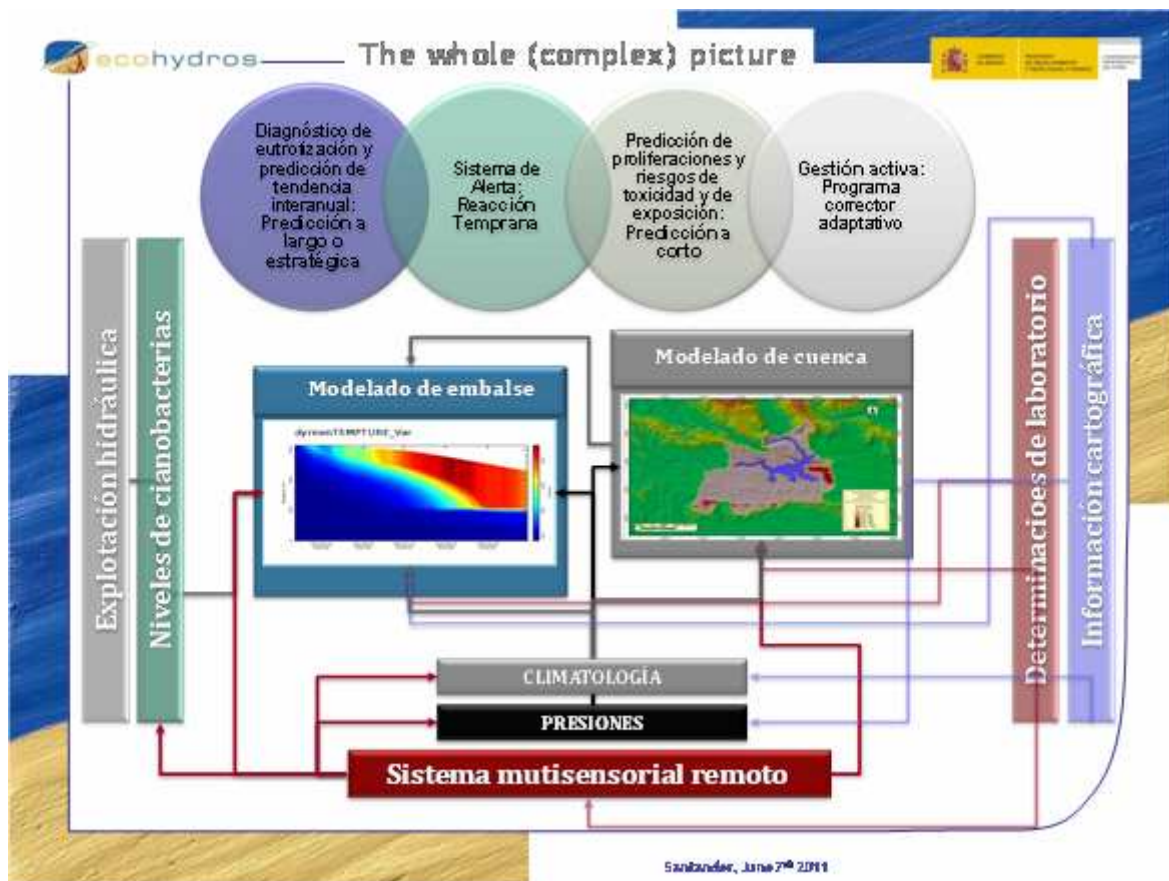
En caso de determinarse la presencia de un bloom tóxico, se deberían desplegar un conjunto de medidas para evitar el acceso de personas y animales, así como limitar los usos del agua. Finalmente, resultaría fundamental favorecer la investigación, el desarrollo y la innovación de técnicas de detección, cuantificación y eliminación de toxinas y cianobacterias, sistemas de predicción de riesgos, e incorporar sistemas de vigilancia y control de la presencia de cianobacterias y sus toxinas, al menos en las redes de suministro de agua potable, especialmente en las épocas más calurosas del año.

La implantación del sistema de monitorización y alerta propuesto por ROEM+ contribuirá a facilitar enormemente las tareas de detección de estas proliferaciones. Las redes de observación basadas en sensores remotos afrontan considerables retos de diseño y operación debido a la heterogeneidad de la instrumentación y a la complejidad del procesado del flujo de datos. Estos sistemas incorporan instrumentos que atraviesan un gran espectro de complejidad, desde el sensor más sencillo de temperatura hasta un perfilador acústico, pasando por sensores ópticos multiespectrales, mecanismos de navegación y perfilado, cámaras y sensores videográficos de diferente tipo. Además estos instrumentos en general proceden de diferentes fabricantes, y la red final requiere de diferentes repositorios externos de datos y de la integración de DAQs de subredes preexistentes.

Gestionar y procesar la señal de esta gama tan amplia de instrumentos de forma remota en tiempo cuasi-real es un gran desafío que está condicionando una aplicación más extendida de estos sistemas de vigilancia y estudio ambiental de elevado interés. La tecnología base a emplear en ROEM+ permitirá gestionar y controlar en remoto una instrumentación distribuida y procesar los datos que genera, utilizando soluciones no propietarias de software, middleware y comunicaciones/conectividad que dotan al sistema de escalabilidad, modularidad y accesibilidad, y suponiendo por tanto un gran avance con respecto a los sistemas disponibles en la actualidad.

El proyecto ROEM+ reúne en su conjunto las mejores técnicas disponibles para la monitorización (partiendo de la tecnología ROEM) y simulación de los procesos medioambientales en una cuenca hidrográfica rural (remota), como estrategia para la optimización de medidas correctoras sostenibles desde el punto de económico y ecosistémico. Para ello, se superponen una e-infraestructura de monitorización remota con un sistema de simulación dinámica y espacialmente distribuida de todos los aspectos ambientales y socio-económicos involucrados, al tiempo que se generan herramientas de gestión, tanto de alertas y predicciones como de diseño de medidas correctoras para el cumplimiento de la normativa Europea en materia de calidad de aguas. En la Figura 5 se representan los diferentes elementos involucrados y sus interacciones principales, lo que refleja la coherencia general del proyecto y de todas las acciones propuestas. Se hace constar la revisión realizada sobre proyectos relacionados con la temática que aborda ROEM+ (especialmente en el ámbito europeo, y programa LIFE), concluyendo en la novedad aportada por ROEM+, explicada en los anteriores puntos, y relacionada con **una**

**MAYOR RESOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL de la tecnología de monitorización remota, de comunicaciones, información y simulación predictiva.** Uno de los proyectos analizados, “LIFE09 ENV/FI/000569:GISBLOOM–Participatory monitoring, forecasting, control and socio-economic impacts of eutrophication and algal blooms in river basins districts”, en FINLANDIA, propone el empleo de datos y modelos nacionales para hidrología, cambios del usos del suelo y cargas de nutrientes con objeto de predecir proliferaciones de algas en cuencas hidrográficas. ROEM+ supone un diferencial cualitativo al implementar un avanzado sistema de monitorización de alta resolución que proporcionará información muy valiosa en tiempo real enriqueciendo así los modelos existentes y permitiendo a la vez el desarrollo de modelos de predicción más avanzados. ROEM+ permitirá obtener como resultado un mayor entendimiento de las proliferaciones de algas y una mayor capacidad de precisión al no basarse únicamente en datos de fuentes disponibles (redes SAIH,SAICA y otros).



**Figura 5. Elementos involucrados en el proyecto**

#### 4. Carácter demostrativo y resultados esperados

El proyecto ROEM+ supone la primera aplicación del sistema descrito a escala completa en un escenario de cuenca de gran relevancia como es de la Cuenca del Río Duero, concretamente en Cuerda del Pozo, de gran importancia estratégica en la Península (ver figuras 1, 2 y 3). El embalse de Cuerda del Pozo (año 1.941), se ubica en la provincia de



Soria, unos 40km aguas arriba de su capital. Este embalse regula el río Duero, abastece de agua potable a Soria y parcialmente a Valladolid y sirve para regar 26.000 hectáreas hasta su confluencia con el río Pisuegra. La importancia de esta cuenca resulta estratégica porque es la cabecera de la cuenca hidrográfica del Duero, la de mayor extensión de la Península Ibérica y que además es internacional porque desemboca en Portugal. Aparte de las limitaciones en los usos del agua antes mencionados, cualquier programa de mejora de la calidad del agua en el río Duero debe comenzar por esta cuenca, dada su situación en el tramo superior de dicho río, incluyendo su nacimiento.

La finalidad del proyecto es demostrar una solución técnicamente realizable e innovadora con respecto a los sistemas actuales en el ámbito de la gestión de cuencas hidrográficas. El enfoque propuesto aborda la construcción e implantación de un e-sistema de información de suficiente resolución espacio-temporal y temática, basado en infraestructura remota de monitorización de cuenca piloto que sirva como prototipo y demostración de una metodología innovadora que permitirá priorizar y ordenar usos (urbanos, agrícolas, ganaderos, forestales) y zonas en relación a la capacidad real de la masa de agua para absorber presiones, considerándose como una aproximación óptima para dar respuesta a los requerimientos legales en la materia, que contienen objetivos medioambientales directamente relacionados con la eutrofización de las aguas y plazos concretos para su consecución.

ROEM+ plantea alcanzar unos resultados mensurables, utilizando una tecnología fácilmente transferible a otros países europeos con el mismo problema medioambiental, permitiendo predecir el efecto, diseñar y, en su caso, monitorizar y evaluar los cambios generados por actuaciones de restauración clásicas y también alternativas. Entre las medidas alternativas de gestión y restauración que se contemplan para la estimación de su potencial rendimiento, se destacan las siguientes:

1. Complementar tratamientos de aguas residuales con humedales controlados y bandas/orlas de vegetación.
2. Tratar en origen las actividades generadoras de carga de nutrientes.
3. Ordenar y mejorar las actividades ganadera y agroforestal en la cuenca y en el entorno del embalse (zona pecuaria de gran trascendencia histórica).
4. Regeneración de comunidad de peces (mixta ciprínidos/salmónidos, mediante descaste de lucioperca) y explotación de su biomasa (reciclaje de nutrientes a escala de cuenca).
5. Optimización de la explotación hidráulica del embalse y minimización de su impacto ambiental.
6. Otras actuaciones limnológicas en el embalse (sedimentos, tratamientos activos, etc.).

ROEM+ constituye así una manera perfecta de demostrar que puede protegerse el medio ambiente aplicando un método innovador DE GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCA, utilizando técnicas recién desarrolladas y estableciendo una colaboración única entre agentes públicos y privados (ITG, ECOH, XXAA, CHD). El proyecto servirá para poner de manifiesto a las comunidades locales Y OTROS AGENTES OBJETIVO la importancia de los resultados alcanzados, de manera que esos resultados puedan ser sostenibles y sensibilicen a la población.

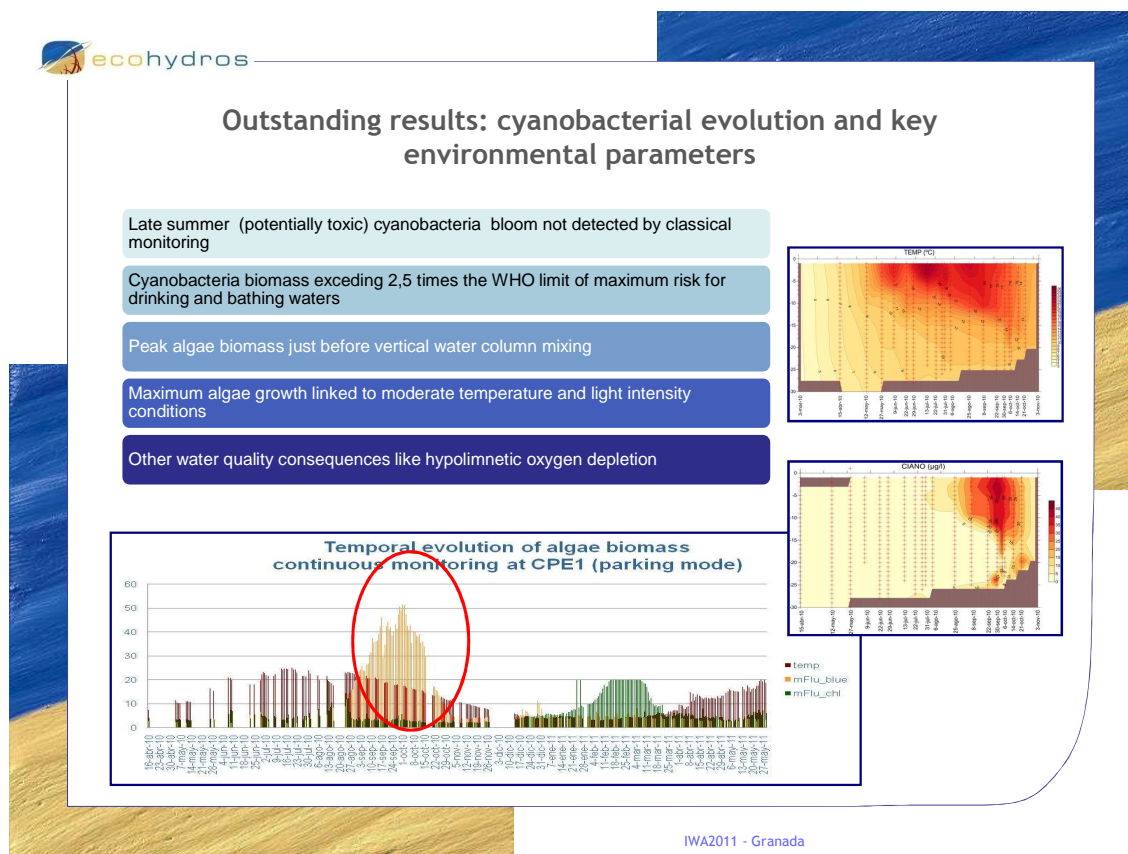
La compatibilidad de la solución tecnológica con sistemas de información empleados por organismos de cuenca y similares, especialmente el GIS MIRAME de la CHD



([http://www.mirame.chduero.es/DMAduero\\_09/index.faces](http://www.mirame.chduero.es/DMAduero_09/index.faces)) es otro factor clave, ya que se implica al principal usuario final (CHD) a través de sus propias herramientas de trabajo y consulta, lo que permite hacer fácilmente extensible la solución a otras zonas y cuencas problemáticas (valor demostrativo del proyecto) pudiendo llegar a contener toda la información disponible de diferente tipo sobre las masas de agua.

Partiendo de los notables avances conseguidos en la fase de I+D, ROEM+ plantea una serie de acciones preparatorias y de implementación que permitirán disponer de un prototipo de sistema de gestión de esta cuenca hidrográfica. Todas y cada una de las acciones se implementan mediante técnicas avanzadas que incorporan los métodos prospectivos de última generación (sensores ópticos multispectrales, técnicas acústicas para el levantamiento de hábitats y stocks de peces, infraestructuras de comunicación adaptadas a zonas remotas, técnicas de adquisición y gestión de datos, flexibles, abiertas y potentes, programación en Open GisWeb, etc.).

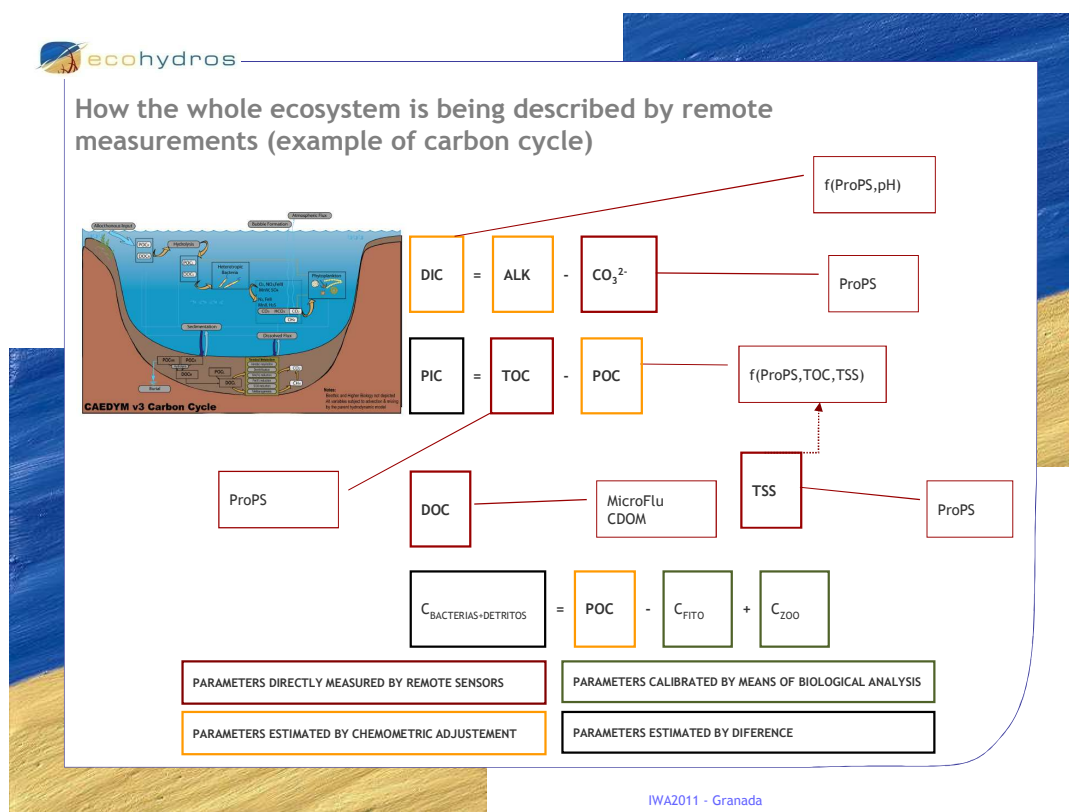
Durante las fases de desarrollo previas ya se ha podido comprobar que los procedimientos de monitoreo de las redes de vigilancia y operativa de la DMA son insuficientes para detectar y abordar la solución de problemas de este tipo. De hecho, la proliferación de cianobacterias (círculo rojo en Figura 6) detectada mediante la plataforma sensorial remota instalada en el embalse pasó desapercibida a dichos controles.



**Figura 6. Detección de Cianobacterias**

Todas las acciones de implementación planteadas desempeñan un papel funcional en el conjunto del proyecto y quedan vinculadas a sus tres capas conceptuales (monitorización, modelado, actuación/gestión). En la Figura 5 se plasman las relaciones más importantes entre ellas y se muestran los principales tipos de resultados esperables. La información que se genera en los análisis cartográficos (sistema GISWEB) y de las campañas de muestreo y análisis de laboratorio son la base sobre la que se configuran y calibran las herramientas de monitoreo (sistemas sensoriales remotos) y de modelado. Desde el sistema multisensorial remoto se alimentan los modelos de cuenca y embalse pero también los sistemas de alerta, especialmente el que tiene que ver con el problema sanitario del riesgo de toxicidad en aguas de abastecimiento y baño.

Otra de las novedades que aporta potencia al sistema es la capacidad de obtener información remota en continuo de las variables físicas y biogeoquímicas clave, a través de un trabajo de calibrado y ajuste que se basa en estrategias mixtas de lectura directa (nueva generación de sensores ópticos), quimiometría y balances. En la Figura 7 se ejemplariza esta solución con el ciclo del carbono, pero igualmente se aplica al del nitrógeno y fósforo.



**Figura 7. Ciclo del Carbono**

Los sistemas de simulación son una parte central del proyecto. Tienen un común denominador al basarse en rutinas dinámicas que recogen los procesos y variable clave para reproducir el funcionamiento de los sistemas modelados y son espacialmente distribuidos, de modo que se vinculan directamente a expresiones cartográficas en 4D (3D espacial más el dominio del tiempo). Su implementación será abierta y modular de modo que se pueda incorporar nuevos módulos a medida que se amplíe el conocimiento.

La última parte de la implementación es la que se refiere a las medidas de actuación dirigidas a corregir el problema de la eutrofización. Para ello, se contempla el sistema cuenca-embalse como un superorganismo y puesto que se está en condiciones de conocer su estado (monitorización remota) y el funcionamiento de los procesos que lo provoca (modelos) se puede actuar coordinadamente en diferentes frentes (elementos del medio y ubicaciones) con soluciones sostenibles y de coste optimizado. Tanto el sistema de monitorización/modelado como las acciones correctoras a emprender pueden contribuir a una revalorización económica de la zona (nuevas actividades económicas ecosostenibles, centro de formación e investigación, etc).

Asimismo, ROEM+ contempla un completo conjunto de acciones destinadas a realizar un seguimiento ambiental de la implementación:

1. Estudios de impacto ambiental de las acciones correctoras: Conjunto de medidas orientadas a disminuir los impactos que actualmente se producen en la Cuenca de Cuerda del Pozo, y a restituir, en todo o en parte, los niveles naturales de referencia. Ninguna de las acciones correctoras consideradas está incluida como tal en los Anejos I y II del R. D. L. 1/2008 (estatal) ni en los Anejos III y IV de la LEY 11/2003 (Castilla y León), por lo tanto, la legislación no contempla explícitamente la realización de Estudio de Impacto Ambiental para las acciones propuestas.
2. Plan de Vigilancia Ambiental: El contenido del P.V.A. está regulado por el R.D.1131/1988, Reglamento de realización de E.I.A. No obstante, su diseño final estará también sometido al pronunciamiento del órgano ambiental. Por otra parte, el esquema del Plan se adaptará a la heterogeneidad de las medidas correctoras que se implementarán. El P.V.A. se diseñará en el marco del Estudio de Impacto Ambiental.
3. Seguimiento ambiental mediante indicadores definidos.
4. Seguimiento del impacto sobre población y economía local mediante indicadores definidos.

## 5. Financiación

El proyecto aquí presentado, LIFE ENV/ES/590 ROEM+ "Gestión Avanzada de la Eutrofización de Aguas Superficiales en Territorio Rural de la Cuenca Hidrográfica del Duero", cuenta con la contribución del instrumento financiero LIFE de la Unión Europea.



## 6. Referencias

- [1] **Dickey, T. D., E. C. Itsweire, et al. (2008).** "Introduction to the Limnology and Oceanography Special Issue on Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors (ALPS)." *Limnology and Oceanography* 53(5): 2057-2061.
- [2] **Morgui, J.A., J. Armengol, & J.L. Riera. 1990.** Evaluación limnológica de los embalses españoles: composición iónica y nutrientes. Comunicacions III Jornadas Españolas de Presas. Barcelona.
- [3] **Arnau, P. y Canals, M., 2002.** Large vs small river systems in the Spanish Mediterranean: Damming impact on deltaic and coastal vulnerability; Joint European/North American EUROSTRATAFORM meeting, incorporating EURODELTA and PROMESS, Winchester, Reino Unido, 8-13 Septiembre, Conf. Progr., Abstr. and Gen. Inf. Vol., p. 24.

- [4] **Liquete C., Canals M., Arnau P., Urgeles R., Durrieu de Madron X. 2004.** The Impact of Humans on StrataFormation Along Mediterranean Margins Oceanography (TOS) , Vol: 17 , N°: 4 pp: 70-79.
- [5] **Hurrell, J. W., 1995.** Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- [6] **Hurrell, J. W., and H. van Loon, 1997.** Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Climatic Change*, 36, 301-326.
- [7] **Heisler, J., P. Gilbert, et al. (2008).** "Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus." *Harmful Algae* 8: 3–13.
- [8] **Anderson, D., P. Glibert, et al. (2002).** "Harmful Algal Blooms and Eutrophication Nutrient Sources, Composition, and Consequences." *Estuaries* 25(4): 704-726.
- [9] **Chen, S., X. Chen, et al. (2009).** "A mathematical model of the effect of nitrogen and phosphorus on the growth of blue-green algae population." *Applied Mathematical Modelling* 33: 1097–1106.
- [10] **Dillenberg H.O. & Dehnel, M.K., 1960.** "Toxic waterbloom in Saskatchewan",1959, *Canad. med. Ass.J.*, 83, 1960,p.1151.
- [11] **Senior, V.E., "Algal poisoning in Saskatchewan", Canad. med. Ass. J., 24, 1968, p.26**
- [12] **Ministerio de Medio Ambiente.** Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Libro Blanco del Agua, 1998.
- [13] **Monteoliva A.P., Muñoz C., 2.000.** La gestión limnológica y el mantenimiento de la integridad ecológica en los ecosistemas acuáticos artificiales (embalses y canales). Monografía de la Revista Obra Pública, "La Gestión Del Agua", 51(2). REVISTA DEL COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS.
- [14] **Codd GA, Metcalf JS and Beattie KA (1999).** Retention of Microcystis aeruginosa and microcystin by salad lettuce (*Lactuca sativa*) after spray irrigation with water containing cyanobacteria. *Toxicon* 37, 1181-1185.
- [15] **Costa SM and Azevedo SMFO (1994).** Implantação de um Banco de Culturas de Cianofíceas Tóxicas. *Iheringia - Série Botânica*, 45: 69-74.
- [16] **Codd GA, Bell SG, Kaya K, Ward CJ, Beattie KA and Metcalf JS (1999).** Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. *European Journal of Phycology* 34, 405-415.
- [17] **Falconer IR (1994).** Health implications of Cyanobacterial (blue-green algae) toxins. In: Toxic Cyanobacteria current status of research and management. Eds. Steffensen DA & Nicholson BC. Proceedings fo an International Workshop. Adelaide. Australia.
- [18] **Teixeira MGLC, Costa MCN, Carvalho VLP, Pereira MS and Hage E (1993).** Gastroenteritis epidemic in the area of the Itaparica, Bahia, Brazil. *Bulletin of PAHO*, 27(3): 244-253.
- [19] **Azevedo SMFO (1996).** Toxic cyanobacteria and the Caruaru tragedy. IV Simpósio da Sociedade Brasileira de Toxinologia.
- [20] **Paerl HW and David F Millie (1996).** Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia*. Volume 35, 160-167.
- [21] **Robillot C, Winh J, Puiseus-Dao S and Marie-Claire Hennion (2000).** Hepatotoxin production kinetic of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* PCC 7820, as determined by HPLC- Mass Spectrometry and protein phosphatase bioassay. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3372-3378.
- [22] **Heisler, J., P. Gilbert, et al. (2008).** "Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus." *Harmful Algae* 8: 3–13.
- [23] **Kenneth S. Johnson, J. A. N., Stephen C. Riser, William J. Showers, (2007).** Chemical Sensor Networks for the Aquatic Environment. *ChemInform* 38(19).