



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | **Plasencia**
Cáceres, Extremadura

7CFE01-311

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Modelo conceptual de la eutrofización y proliferación de cianobacterias. Un caso de estudio en el embalse de A Baxe

ÁLVAREZ BERMÚDEZ, X.¹, VALERO GUTIÉRREZ DEL OLMO, E.¹, CANCELA CARRAL, A.² y PICOS MARTÍN, J.¹.

¹ Grupo de Investigación de Ingeniería Agroforestal (AF-4). Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Vigo.

² Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Vigo

Resumen

La planificación integral de las cuencas hidrográficas de un modo sostenible es fundamental en la gestión de sus recursos naturales. Con el objetivo de contribuir a los esfuerzos de conocer y mitigar este proceso de eutrofización en los ecosistemas acuáticos, se desarrollan análisis e investigaciones en la cuenca hidrográfica del río Umia (aguas arriba del embalse de A Baxe).

Por un lado, se han estudiado medidas preventivas al proceso, concretamente el estudio y la evaluación de los factores que afectan a dicho fenómeno, se ha estudiado el origen y la evolución de la eutrofización en función de las condiciones meteorológicas, así como el análisis de la calidad del agua del embalse, correlacionándola con la concentración de la cianobacteria (*Microcystis aeruginosa*) y la producción de toxina (microcistina-LR) a lo largo del tiempo.

Dentro de las medidas preventivas, se realizó la evaluación de la calidad del hábitat fluvial como indicador de su estado de conservación. Finalmente, se han abordado y evaluado la eliminación de las algas mediante la electrofloculación, y se ha analizado el potencial de dichas algas para la generación de biodiesel. Los resultados esclarecen diferentes aspectos relevantes en la eutrofización de ecosistemas de agua dulce.

Palabras clave

Cuenca hidrográfica, *Microcystis aeruginosa*, bosque de ribera, restauración fluvial

1. Introducción

Durante las últimas décadas se ha constatado una evolución en el concepto de “conservación de la naturaleza”. Inicialmente imperaba la necesidad de disponer libremente de los beneficios que aportan los recursos naturales (electricidad, agua para el consumo humano, regadío de cultivos, etc.), todo ello sin una previa organización, gestión y/o previsión a largo plazo. Muchas sociedades alcanzaron un elevado nivel de desarrollo y de explotación de dichos recursos, con la consecuente amenaza de su viabilidad y supervivencia sostenible.

Una mayor sensibilización de la población hacia los problemas ambientales, así como la consecuente demanda social cada vez más exigente respecto a objetivos de mejora de la calidad de vida, propiciaron el reconocimiento de que los recursos naturales son imprescindibles por los múltiples beneficios sociales, culturales y científicos que nos reportan.

Esta concienciación nos ha derivado actualmente hacia un uso racional de los mismos, lo que resulta especialmente patente cuando se establecen los programas ambientales de las administraciones competentes de muy diferentes países.

En cuanto a los ecosistemas de agua dulce, la política sectorial de la Unión Europea (UE) ha permitido proteger dichos recursos hídricos de la presión que supone el continuo crecimiento de su demanda y de los impactos negativos que sufren. Un referente en este sentido es la Directiva Marco del Agua (DMA), una iniciativa ciertamente ambiciosa de la política medioambiental de la UE, cuyo objetivo general es lograr un “buen estado del agua” en las masas de agua europeas para el año 2015 (EUROPEAN COMMISSION, 2000). La DMA ofrece un único sistema integrado, que incorpora una amplia variedad de requisitos para la gestión del estado del agua. Además de la protección específica de ciertos hábitats, del agua potable, de las aguas de baño, también exige que, prácticamente todas las aguas tengan un “buen estado ecológico” y un “buen estado químico” en el año 2015.

Con todo ello, la DMA ha modificado los objetivos de gestión y control de la contaminación, con objeto de asegurar la integridad del ecosistema (BORJA et al., 2008). Además, ha reordenado el proceso de toma de decisiones en la gestión del agua en Europa (HÜESKER Y MOSS, 2015), principalmente mediante el fortalecimiento del papel de la propia Comisión Europea, ahora equipada con poderes específicos para vigilar el cumplimiento de los objetivos medioambientales definidos de acuerdo a unos plazos preestablecidos, así como para sancionar la no aplicación y el no cumplimiento de los mismos.

Centrándonos en el área objeto del presente estudio, el río Umia es uno de los ecosistemas fluviales más alterados de Galicia a todos los niveles: comunidad biológica, análisis de cuenca, incendios forestales, accidentes ambientales, etc. Este sistema se ha visto afectado durante los últimos cuarenta años con la construcción de presas y centrales hidroeléctricas, con la reducción del caudal ecológico, con la instalación de industrias en sus riberas que han originado vertidos e incluso accidentes ambientales (Brenntag en 2006), así como con la eliminación de los bosques en la cuenca, la erosión del suelo, etc., influyendo considerablemente en dicho ecosistema. A pesar de todo ello es característica la ausencia de estrategias o sistemas de recuperación y/o conservación del mismo.

Uno de los procesos de contaminación que en los años más recientes está afectando a la cuenca del río Umia es la eutrofización. Este fenómeno es natural cuando tiene lugar a lo largo de cientos de miles de años, y consiste en el aporte de materiales procedentes del suelo y otros transportados por las aguas que afluyen a dicho medio (RYDING Y RAST, 1992; PAERL et al., 2011; KHAN et al., 2014), originando la proliferación de algas, especialmente en aguas lentas o estancadas. Este proceso natural se ve fuertemente acelerado cuando la cuenca de drenaje está influenciada por la actividad humana (KHAN et al., 2014), convirtiéndose en una de las consecuencias ambientales del proceso de contaminación de las aguas de ríos, lagos, embalses, costas, pantanos, etc., (ILEC, 1994), que se generan a través de la deforestación, los vertidos, y el desarrollo de diferentes actividades, que influyen directamente en estos ecosistemas (GILL et al., 2011).

2. Objetivos

El trabajo desarrollado en esta Tesis consiste en el análisis de la eutrofización que afecta al embalse de A Baxe (Caldas de Reis, Pontevedra), concretamente el estudio y evaluación de los factores que afectan a dicho proceso (objetivo específico 1), así como el conocimiento de cómo tiene lugar y qué consecuencias provoca para el ecosistema fluvial (objetivo específico 2). En definitiva, se desarrolla una evaluación integral de la cuenca hidrográfica del río Umia, centrándonos en los ecosistemas fluviales y riparios. Todo ello, con la finalidad de analizar la viabilidad y la eficacia de la aplicación conjunta de técnicas y medidas de prevención (objetivos 4 y 5) y medidas correctoras (objetivo específico 3), entre las que se encuentran la restauración del hábitat fluvial en el primer caso, y la eliminación de las algas verdes para la atenuación de los “blooms” en el segundo.

3. Metodología

Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación es la cuenca hidrográfica del río Umia aguas arriba del embalse de A Baxe (Figura 1). Se ha limitado a la zona alta, ya que la eutrofización se manifiesta y concentra en dicha área. Los problemas ambientales que tienen su origen en la zona alta del río, influyen directamente en las condiciones del área de estudio, y por lo tanto, todas las actuaciones correctoras que se realicen en esta zona beneficiarán la calidad del río aguas abajo del mismo.

El embalse de A Baxe fue construido en el año 2000 para el abastecimiento de la Comarca del Salnés, así como para la prevención contra las reiteradas avenidas en Caldas de Reis. Subsidiariamente, la presa comprendía el aprovechamiento hidroeléctrico, que se empezó a explotar un año después.

Dicho embalse ha sufrido en los últimos diez años episodios de blooms de algas, tiñendo de un intenso tono verdoso el agua del mismo. Este impacto, inicialmente visual, alarmó a la sociedad en general, y de forma especial a los vecinos de la zona, que desconocían el origen y consecuencias de este fenómeno. Posteriormente, y dado el potencial impacto que esta circunstancia podría tener sobre la salud de los habitantes usuarios de este recurso, que abastece a 111.763 habitantes (INE 2010), la administración competente, Augas de Galicia, organizó un equipo de trabajo con la misión de estudiar las causas y origen del fenómeno de eutrofización. De dicho estudio (AUGAS DE GALICIA, 2011) se extraen como principales fuentes del proceso de eutrofización: (1) los aportes de nutrientes al ecosistema fluvial originados por las actividades agro-ganaderas, los vertidos, así como diferentes focos de contaminación difusa, (2) el insuficiente saneamiento de los núcleos rurales pertenecientes a la cuenca y (3) la eliminación del bosque de ribera. A ello habría que añadir el deficitario estado de conservación de los ecosistemas y masas forestales de toda la cuenca hidrográfica.

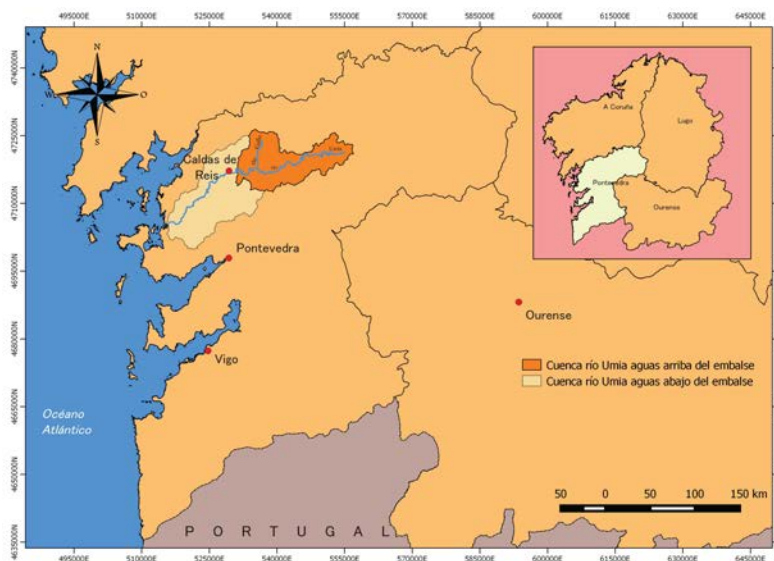


Figura 1. Áreas de estudio: mapa de situación de la cuenca hidrográfica del río Umia (aguas arriba del embalse de A Baxe y aguas abajo).

Teniendo en cuenta las causas que originan la eutrofización en el embalse de A Baxe, se consideró importante ampliar el área de estudio, no solo al ámbito del mismo, donde la eutrofización y proliferación de algas verdes tienen lugar, sino que se estimó necesario abarcar su cauce principal, el río Umia y su principal afluente, el río Gallo, dado que gran parte de los aportes de nutrientes que

llegan, y se acumulan en dicho embalse, provienen principalmente del área geográfica de influencia de ambos cauces, es decir, de las cuencas hidrográficas de los mismos.

Desarrollo objetivo 1. Influencia de las condiciones ambientales en la eutrofización.

En este estudio se ha analizado cómo los parámetros climatológicos afectan a la concentración de algas verdes y de cianobacterias durante el periodo comprendido entre 2008-2010, en el embalse de A Baxe (Galicia, España).

Así, factores meteorológicos tales como la temperatura de aire, la lluvia y la radiación solar, y factores de la calidad del agua como el nitrógeno total, fosforo total, pH del agua y la concentración de clorofila-a han sido analizados con objeto de comprobar su influencia en la presencia de las algas verdes, concretamente sobre la cianobacteria (*Microcystis aeruginosa*) así como en su concentración en dos estaciones de muestreo (Figura 2).

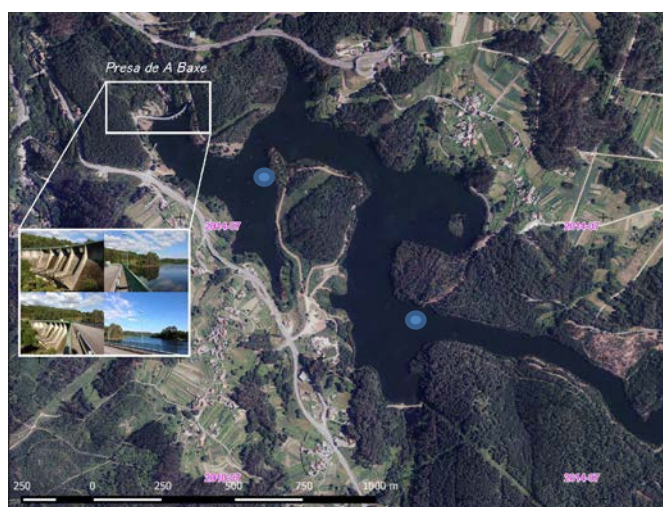


Figura 2. Ortofoto del embalse de A Baxe con la ubicación de las estaciones de muestreo de A Baxe y aguas abajo).

Para la consecución del objetivo 1

Se realizó el estudio del origen y la evolución de la eutrofización en función de las condiciones meteorológicas, específicamente de la temperatura del aire, de la radiación solar y de las precipitaciones, así como el análisis de la calidad del agua del embalse, correlacionándola con la concentración de la cianobacteria (*Microcystis aeruginosa*).

Para la consecución del objetivo 2

En este caso se procedió al análisis del crecimiento de las algas verdes en diferentes condiciones, recreando a escala laboratorio su desarrollo, es decir, la reproducción de los episodios de floraciones, tal y como tienen lugar en el propio embalse. Con el objetivo de conocer qué algas desarrollaban en el embalse objeto de estudio, así como esclarecer en qué medida factores como la temperatura y la luz solar afectan a la proliferación de las mismas, se ha estudiado en detalle su proceso de crecimiento. Concretamente, y a partir de muestras de agua tomadas del embalse en cuestión, se han cultivado las algas presentes en dichas muestras. Se ensayaron las floraciones en el laboratorio y se estudiaron variaciones en la temperatura y la luz, con objeto de comprender su influencia sobre dichos organismos.

Además, se evaluó la competencia en el crecimiento de las diferentes algas verdes-azuladas que se desarrollan en el área de estudio y la producción de toxina (microcistina-LR) a lo largo del tiempo.

Para la consecución del objetivo 3

Se analizaron las potenciales alternativas de eliminación de las algas verde-azuladas, sin afectar al ecosistema fluvial y a las especies que lo habitan. Con la premisa anterior, se eligió y testó el mejor método para recoger las algas del embalse, cuando tenía lugar el “bloom” de las mismas y se diseñó el proceso específico más eficaz. Con esta finalidad, la electrofloculación (EF) fue el método estudiado para eliminar las algas que están presentes en dicho embalse. Concretamente se evaluaron diferentes factores que pueden influir en la eficacia del proceso: el voltaje aplicado en el medio de cultivo, la duración de dichos voltajes, la separación entre los electrodos y se compararon sus resultados con la sedimentación natural.

Paralelamente, se abordó el análisis de la posible obtención de biodiesel a partir de las algas recogidas, con objeto de reutilizar dicho residuo, y optimizar el proceso mediante el método de transesterificación directa.

Para la consecución del objetivo 4

Se realizó la evaluación de la calidad del hábitat fluvial como indicador del estado de conservación del hábitat fluvial, mediante la aplicación de tres índices diferentes. Dos índices evalúan la calidad riparia: el índice QBR (índice de Calidad del Bosque de Ribera) y el índice RQI (Riparian Quality Index). Por otro lado se evaluó la heterogeneidad del hábitat a través del Índice de Hábitat Fluvial (IHF).

Consecuencia de lo anterior, se procedió a la elección del índice más adecuado para su aplicación en proyectos de restauración aplicables a diferentes ríos.

Para la consecución del objetivo 5

En los procesos anteriores se evaluó el índice más adecuado para la gestión de espacios fluviales, concretamente para la restauración y conservación de los mismos, resultando el índice QBR (índice de Calidad del Bosque de Ribera) el más adecuado para dicho propósito. Por lo tanto, en este trabajo se llevó a cabo la evaluación de la calidad y estado del bosque de ribera a través del índice QBR en el tramo alto del río Umia, donde se evaluaron un total de 55 estaciones de muestreo. Esta metodología se aplicó con el objetivo de trasladarla a futuros proyectos de restauración fluvial, como herramienta de apoyo en la gestión de los espacios fluviales, y como pilar fundamental en la toma de decisiones cuando las riberas requieran ser restauradas.

Se realizó la zonificación del área riparia del área de estudio en función de su estado de conservación.

4. Resultados y discusión

Las acciones humanas han causado fuertes alteraciones sobre los ecosistemas acuáticos. Concretamente, dichas actividades han tenido profundos impactos en los ciclos biogeoquímicos globales de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P) (VITOUSEK et al., 1997; ABELI et al., 2010; VITOUSEK et al., 2010; LEWIS et al., 2011; PAERL et al., 2011; SCHLESINGER, 2013 y KHAN et al., 2014), añadiendo nutrientes al sistema acuático y siendo, la eutrofización, una consecuencia de ello. El aumento de estos nutrientes aumenta el crecimiento de algas verdes propias de agua dulce, sobre

todo cuando las condiciones climáticas son favorables, como la temperatura (XUE et al., 2005) la radiación solar (LIU et al., 2011) y las precipitaciones. Todo ello conlleva a la proliferación de dichas algas, afectando a las condiciones físico-químicas (ALVAREZ COBELAS ARAUZO, 1994; LEE et al., 2012).

Además, las cianobacterias son uno de los grupos más grandes e importantes que se desarrollan en aguas dulces, y dentro de ellas, la más común en agua dulce eutrófica es la *Myrocystis aeruginosa*. Esta última es un alga tóxica que puede causar la intoxicación de animales y representa importantes riesgos para la salud humana (FALCONER, 2001 y OBERHOLSTER et al., 2004).

Debido a ello, y con el ánimo de contribuir a un modelo predictivo futuro, se ha considerado relevante hacer una aproximación, y conocer la evolución de la eutrofización en función de las condiciones meteorológicas, específicamente en lo que se refiere a la temperatura del aire, de la radiación solar y de las precipitaciones. Los resultados obtenidos mostraron que la calidad del agua en el embalse del río Umia ha ido empeorando a lo largo de los años, pero con diferencias significativas entre los parámetros analizados. Por otro lado, los resultados de análisis de correlación sugieren que la contaminación de nutrientes de origen antropogénico es el principal problema ambiental en el embalse.

En el siguiente paso resulta imprescindible el conocimiento sobre cómo estas algas compiten entre sí. Esta afirmación se fundamenta en que dichas algas no se encuentran aisladas en el sistema, sino que se desarrollan conjuntamente. Las investigaciones existentes en el campo se han conducido mediante la experimentación de cepas aisladas, objetando que dichos análisis no recrean la realidad de lo que sucede en el ecosistema, ya que, además de competir en el desarrollo, estas algas se encuentran interrelacionadas, influyéndose mutuamente. En este trabajo, al hacer el estudio con algas recogidas en el embalse, se ha recreado la realidad del ecosistema al no aislar las cepas (Figura 3).

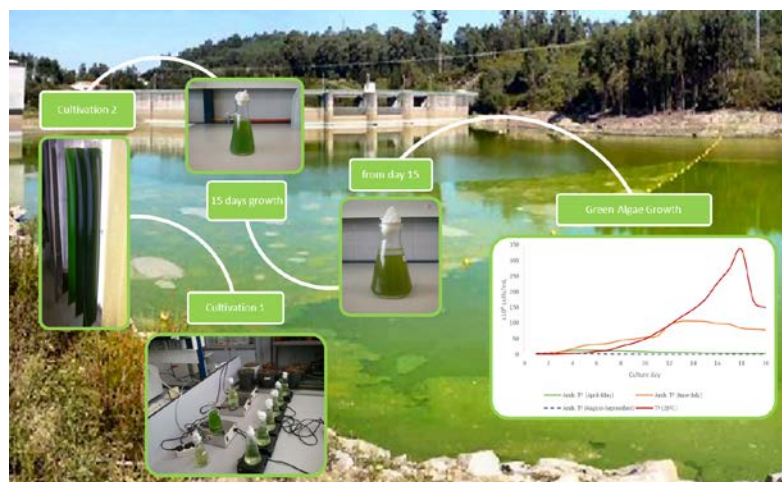


Figura 3. Proceso de cultivo de las algas recogidas en el embalse y resumen del crecimiento en diferentes condiciones de temperatura de crecimiento.

De este estudio se ha llegado a conocer que existen tres tipos diferentes de algas desarrollándose en el embalse de A Baxe: *Scenedesmus spp.*, *Kirchneriella sp.* y *Microcystis aeruginosa*. A pesar de que esta última no se encontraba en la mayor proporción al inicio del cultivo, se ha comprobado posteriormente que se ha multiplicado con mayor éxito, superando a las dos competidoras restantes.

Por otro lado, a lo largo del proceso de cultivo, la liberación de la toxina ha aumentado hasta alcanzar los niveles más altos de 570 mg. g⁻¹ en los últimos días del ensayo. Los “blooms” tuvieron lugar a temperaturas igual o superior a 28 °C y con ciclos de luz de más horas de día, dichas condiciones se dieron durante los meses de verano, de junio a septiembre. Mientras que con temperaturas por debajo de 18 °C las algas no muestran crecimiento. Bajo una perspectiva más amplia cabe señalar que las floraciones naturales de estas algas se recrearon a escala laboratorio, con el fin de ayudar a la toma de decisiones sobre el suministro de agua potable, lo que estructura la coherencia de las fases siguientes de la investigación.

En armonía con ello, se conoce cómo influyen las condiciones meteorológicas en la proliferación de algas de agua dulce, así como cuáles son las que se desarrollan en nuestra área de estudio, cómo crecen, compiten y cuáles son las condiciones óptimas para su desarrollo, así como cuáles son las ideales para que los blooms no tengan lugar. A partir de ese conocimiento, la investigación avanzará en varias líneas. Por una parte, se procederá a la extracción de las algas del embalse, y su reutilización como fuente de energía.

Por otra parte, se aborda una posible transferencia investigadora para la solución a dicho fenómeno, una vez las floraciones de las algas verdes se han producido. Así, se desarrollan, potenciales medidas correctoras aplicables en lagos, embalses, pantanos, etc.

Se han ensayado diversos métodos dirigidos a eliminar las algas testados por la comunidad científica. Por ejemplo, la sedimentación se ha erigido como un método eficiente para el tratamiento de aguas residuales, y no resulta muy costoso a la hora de construir la instalación requerida y ejecutar los procesos necesarios (TIMMONS et al., 2002). Pero en el caso que nos ocupa, la sedimentación de estas algas supondría un mayor aporte de nutrientes al agua. Otro método es la centrifugación, aunque, según los expertos, se considera un método muy caro cuando se trata de sistemas de producción de biocombustibles a partir de los aceites de algas (PIENKOS y DARZINS, 2009), y nuevamente, en los sistemas naturales objeto de este estudio resulta inviable económica y técnicamente.

Hay varios estudios recientes que prueban otras técnicas tales como la coagulación, floculación, electrocoagulación y electrofloculación. MATOS et al. (2013) estudiaron la electrocoagulación con microalgas marinas; WANG et al. (2012) investigaron la combinación de alguicida y floculantes para controlar las floraciones de cianobacterias; así como XU et al. (2010), quienes diseñaron un método de electrofloculación para la recogida de microalgas con gran importancia en el campo de la biotecnología.

El método estudiado para minimizar las algas que están presentes en el embalse de referencia fue la electrofloculación (EF). A través de la investigación se comprueba que la Electrofloculación supone un método eficaz para eliminar las algas verdes durante las floraciones en el embalse (95 % de recuperación del alga). Consecuentemente, se diseñó el proceso más eficaz según los resultados obtenidos (Figura 3). Finalmente se concluye que la biomasa resultante puede utilizarse para obtención de biodiesel y reducir, de este modo, tanto el residuo generado como los costes del proceso.

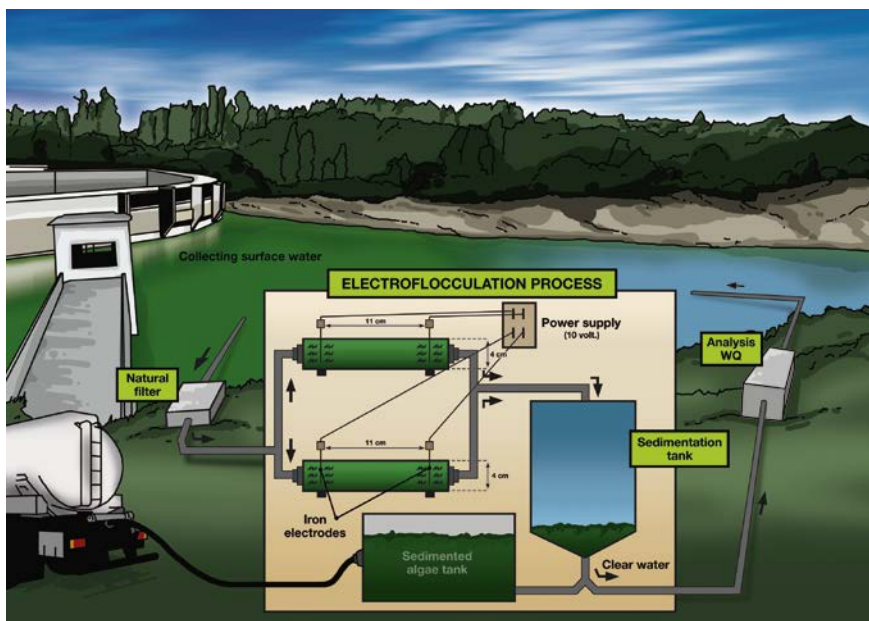


Figura 3. Proceso más óptimo de recogida de algas en un sistema anexo al embalse.

Bajo el enfoque holístico e integrador que ha sido desarrollado en la presente Tesis, se ha destacado la importancia de no solo poder aportar soluciones al problema de las floraciones de las algas verdes que aparecen en los embalses, sino también poder llevar a cabo medidas preventivas, gracias a las cuales el proceso de eutrofización se vea disminuido, y que el ecosistema en conjunto sea beneficiado. En esa última línea, la innovación aportada diverge en que, mientras numerosos estudios se centran en la disminución de los aportes de nutrientes, la investigación desarrollada se ha centrado en el papel que representa el bosque de ribera, cuya capacidad natural de filtro puede disminuir considerablemente los aportes de nutrientes, reteniendo entre el 10 y el 30% de nitratos del suelo, porcentaje que varía según sea la calidad de dicho bosque.

Diferentes investigaciones se han desarrollado en los últimos años para la caracterización de los hábitats fluviales, con el fin de conocer y comprender el estado de estos ecosistemas, así como cumplir con las directrices europeas. En ellas se han utilizado indicadores biológicos, como por ejemplo los índices de calidad de ribera (OLIVEIRA Y CORTES, 2005), los protocolos rápidos para la bioevaluación, o la identificación de los macroinvertebrados presentes (VARANDAS, 2006; VARANDAS Y CORTES, 2010), entre otros, ajustándolos a las peculiaridades de sus áreas de estudio.

Por ejemplo, MUNNE et al. (2003) y SUAREZ et al. (2002) comenzaron con el índice de calidad del bosque de ribera (índice QBR). Posteriormente, este índice se ha utilizado para establecer un protocolo para la evaluación de la calidad hidromorfológica de los ríos (MUNNE et al., 2006) y la condición del hábitat con el índice de HCI, para la evaluación de los tramos de hábitats en el norte de Portugal con diferentes escalas espaciales y niveles de perturbación (OLIVEIRA Y CORTES, 2005).

Otros autores, con la misma necesidad de una evaluación de estos ecosistemas en sus países de origen, como es el caso de ACOSTA (2009) en su Tesis doctoral, ha adaptado este índice con el índice QBR-Y, conformándolo a la vegetación neo-tropical altoandina. Posteriormente, SIROMBRA Y MESA (2012) también adaptaron el índice a las necesidades de la región de Argentina donde lo aplicaron. Además, en Portugal, el índice RHS se ajustó a su región en función de las características de sus ríos (Ferreira et al., 2011). Por otro lado, otro índice, el RQI (Índice de Calidad Ribereña) ha sido utilizado para evaluar la calidad de ribera (GONZÁLEZ DEL TÁNAGO et al., 2006; GONZÁLEZ DEL TÁNAGO Y GARCÍA DE JALÓN, 2011) y aplicado en diversas investigaciones como BLANCO et al. (2007) y BELMAR et al. (2013).

Por último, para evaluar la heterogeneidad del hábitat fluvial el “Índice de Hábitat Fluvial” (IHF) de Pardo et al. (2002) ha sido empleado en las investigaciones desarrolladas por MENDOZA-LERA et al. (2012) y VILLAMARÍN et al. (2013).

Reconociendo todas las investigaciones en este campo, así como la necesidad de alcanzar el buen estado ecológico de los ecosistemas fluviales, se considera ciertamente importante la transferencia de este conocimiento, y sus potenciales avances, a la gestión y manejo de estos espacios, con objeto de ser incorporados en los proyectos, estudios, valoraciones y otros trabajos que se realicen. Así, se estima que asegurar la función de filtro verde que posee el bosque de ribera precisa de un estudio previo que nos ayude a mejorar su estado de conservación.

Se han teniendo en cuenta las perspectivas futuras que otras investigaciones han destacado en el camino de la utilización de indicadores complementarios de la degradación de los sistemas acuáticos como fitobentos, peces, vegetación de ribera, aves ribereñas y otros (VARANDAS, 2006). Bajo este enfoque se analizó diferentes índices de calidad fluvial, que han sido previamente diseñados por diversos autores. Por esta razón, el principal objetivo que se persiguió es la aplicación de los tres índices (QBR, RQI e IHF), como indicadores del estado de conservación de los ríos. En este proceso, se pretendió seleccionar el más adecuado de dichos índices, o la combinación y/o modificación de los mismos, para obtener la mejor herramienta práctica en los proyectos de restauración y conservación del hábitat fluvial, con el objetivo último de asegurar y mejorar la condición de filtro natural que el bosque de ribera ejerce en los ecosistemas acuáticos.

Específicamente, los índices que evalúan la calidad ribereña (QBR y RQI) fueron comparados, así como fue evaluado el índice de heterogeneidad del hábitat (IHF) como un posible indicador complementario. Los resultados más destacados de esta parte de la investigación revelaron que el índice QBR es un excelente indicador del estado de conservación del bosque de ribera. Concretamente, el QBR total sugiere el nivel de urgencia de la restauración en la sección que se evalúa, así como cada uno de sus subíndices identifica qué elemento del río y/o de la vegetación riparia se encuentra afectada. Por lo tanto, se estima que la aplicación del índice QBR será una herramienta útil en la toma de decisiones para la conservación de estos espacios característicos, especialmente para los técnicos gestores que, como resultado de su experiencia en los procesos biológicos y ecológicos, están involucrados en el diseño y construcción de infraestructuras que afectan a los ecosistemas, en particular en los ríos y en sus riberas.

Por otro lado se destaca el potencial del índice IHF como un recurso de apoyo para el monitoreo de la heterogeneidad del hábitat antes y después de la toma de decisiones y posteriores acciones sobre un ecosistema en concreto. Para garantizar la función, entre muchas otras que ejercen estas áreas, de “filtro ecológico” en el ecosistema fluvial, reteniendo partículas y nutrientes provenientes de la escorrentía de las tierras adyacentes, se interpreta que la conservación y restauración de la vegetación de ribera es extremadamente relevante.

Para culminar la investigación realizada en esta Tesis, la parte final ha consistido en la evaluación de la calidad y estado del bosque de ribera a través del índice QBR en el tramo alto del río Umia, donde se evaluaron un total de 55 estaciones de muestreo. Los resultados de la aplicación de este índice indican que existe un claro deterioro de las orillas desde el embalse de A Baxe (tramo medio del río) hacia la cabecera del mismo (Figura 4).

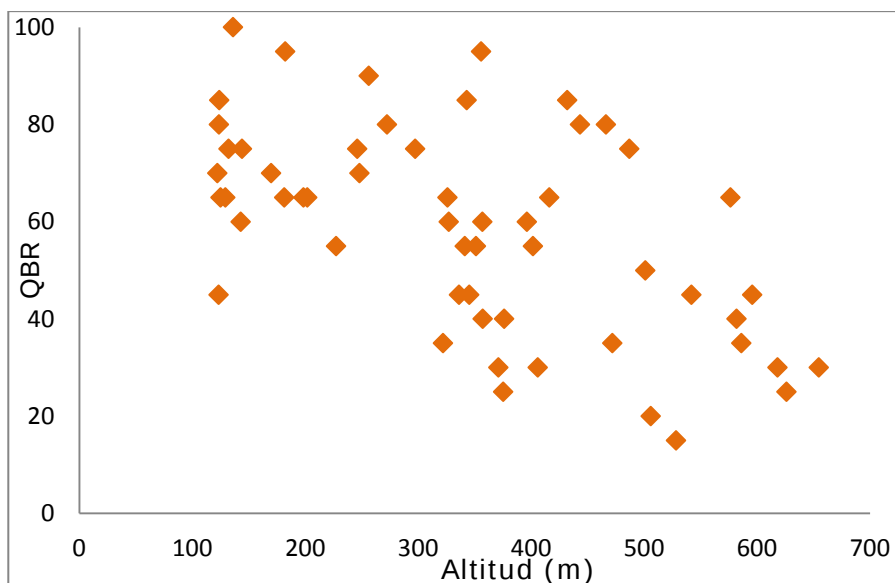


Figura 4. Calidad riparia (índice QBR) desde el embalse hasta el nacimiento del río Umia.

Por último, se realizó una zonificación de las orillas estudiadas (Figura 5) a cuyas áreas definidas se establecieron diferentes niveles de urgencia de actuación. Se estimó que el 64% del área ribereña necesita acciones de recuperación, mientras que más del 16% precisaba actuaciones de restauración y más del 18% eran tramos de conservación.

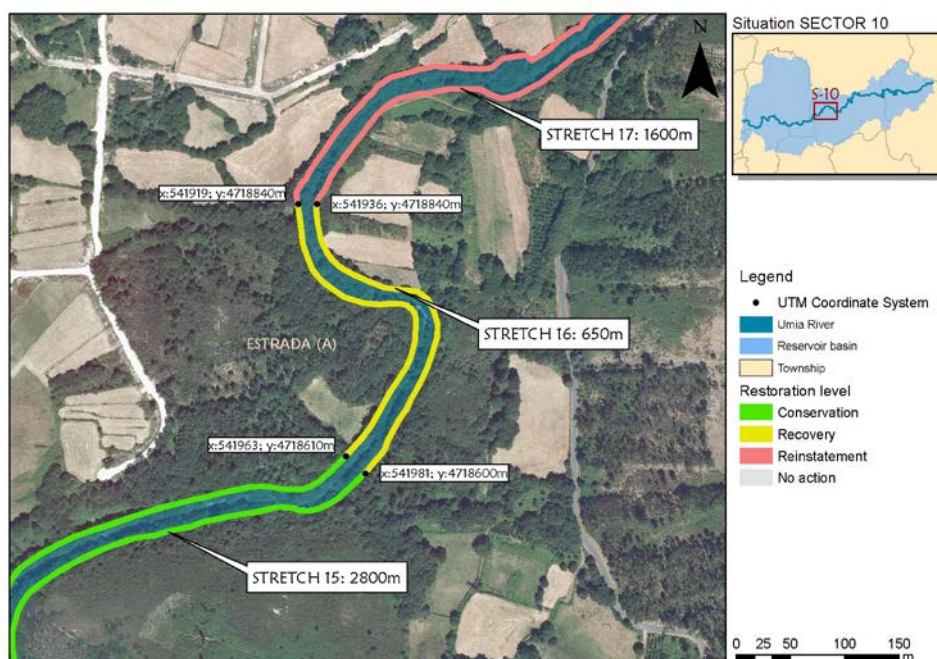


Figura 5. Modelo de zonificación de la zona de servidumbre (5 metros) de ambas orillas del río Umia en función de su calidad riparia (índice QBR)

Los resultados de la zonificación han de interpretarse en los términos que se resumen en los siguientes gradientes: (1) conservación, se entiende cuando el estado del bosque de ribera existente es bueno, o cercano al óptimo. En los tramos clasificados dentro de este tipo no será necesario realizar ningún tipo de actuación, más que la vigilancia de la correcta evolución natural del

ecosistema en conjunto. (2) Recuperación, cuando el bosque de ribera se encuentre degradado y necesite mejoras para poder asegurar y mejorar su estado de conservación. Estas zonas se caracterizan por poca densidad arbórea y/o por la presencia de especies no propias de ribera e incluso invasoras, así como por la ausencia del número adecuado de especies propias de estas áreas. Las actuaciones que resumidamente definen estos tramos serán la reforestación con especies propias de ribera, así como por la eliminación de las que no lo sean, en caso de que representen una afección negativa significativa. (3) Restauración, cuando el bosque de ribera es inexistente o se encuentra sumamente desestructurado y alterado, por lo que resulta necesario el restablecimiento del mismo. El objeto de las actuaciones necesarias en estos casos será, en la medida de lo posible, recuperar la composición, estructura, procesos y funciones naturales del bosque de ribera, permitiéndole así alcanzar su estado natural y mantener un equilibrio con el ecosistema.

5. Conclusiones

Recopilando, la investigación que se ha realizado en la presente Tesis, trata de dar una respuesta integradora desde diversos ángulos a aquellos vacíos actuales en el conocimiento de la comunidad científica, para una gestión integral de las cuencas fluviales. Se estima que de este modo, aunando y compatibilizando los esfuerzos y las alternativas que nos dan los proyectos de ingeniería con la investigación en los campos que la precisen, se puede alcanzar una gestión sostenible de los recursos naturales en cuestión. Varias metodologías para la gestión integral de la cuenca hidrográfica del río Umia se han desarrollado y probado en esta Tesis, centrándose principalmente en dar solución a la eutrofización, combinando diferentes técnicas de prevención y medidas correctoras.

Por un lado, para la prevención de dicho problema de contaminación ambiental, la aplicación de diferentes índices de calidad del hábitat fluvial son herramientas de gran utilidad en la gestión de dichos recursos naturales, ya que resultan buenos indicadores del estado de conservación del ecosistema fluvial. Para una adecuación al área de estudio, la utilización un índice de evaluación de la calidad riparia (QBR), adaptado a las áreas ribereñas estudiadas, se descubre como instrumento fundamental en la restauración y conservación del bosque de ribera. Asegurando de este modo, la función de filtro ecológico del mismo y disminuyendo, consecuentemente, las fuentes que originan la eutrofización de las aguas de río.

Por otro lado, se han alcanzado resultados novedosos en el conocimiento del desarrollo y proliferación de las algas verde-azuladas que causan la eutrofización del embalse objeto de estudio. Concretamente se conoce cómo influyen las condiciones meteorológicas, cuáles son las condiciones óptimas que desencadenan los “blooms”, así como en qué circunstancias las algas se mantienen en niveles bajos sin afectar al ecosistema fluvial. Además, se revela cómo las cianobacterias (*Microcystis aeruginosa*) compiten en su crecimiento con otras algas, así como se analiza la liberación de las toxinas a lo largo de su desarrollo.

Finalmente, se desvela un método eficaz de recogida de las algas cuando tienen lugar los “blooms”, la electrofloculación. Y además, se prueba la viabilidad de las algas verdeazuladas como fuente de biodiesel a partir de la transterificación directa de las mismas.

6. Agradecimientos

Especial agradecimiento a los miembros del tribunal de la Tesis, la Dra. Simone da Graça Pinto Varandas (UTAD) el Dr. Diego García de Jalón (UPM) y al Dr. Henrique Lorenzo Cimadevila (Uvigo) por sus valiosas aportaciones que han mejorado el trabajo presentado, así como sus recomendaciones futuras.

7. Bibliografía

ABELL, J. M., ÖZKUNDAKCI, D., & HAMILTON, D. P.; 2010. Nitrogen and phosphorus limitation of phytoplankton growth in New Zealand lakes: implications for eutrophication control. *Ecosystems*, 13, 966-977.

ACOSTA, R.; 2009. Estudio de la Cuenca Altoandina del río Canete (Perú): Distribución altitudinal de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y caracterización hidroquímica de sus cabeceras cársticas. (Tesis Doctoral) Departamento de Ecología, Facultad de Biología. Universidad de Barcelona, Barcelona, 153 pp.

ALVAREZ COBELAS, M., & ARAUZO, M.; 1994. Phytoplankton responses of varying time scales in a eutrophic reservoir. *Ergebnisse der Limnologie*, 40, 69-69

AUGAS DE GALICIA.; 2011. Plan Integral de Actuación sobre a *Microcystis* sp. no Encoro de Caldas de Reis no Río Umia. (PLAN UMIA). Santiago de Compostela, Galicia, Spain. 250 pp.

BELMAR, O., BRUNO, D., MARTÍNEZ-CAPEL, F., BARQUÍN, J., & VELASCO, J.; 2013. Effects of flow regime alteration on fluvial habitats and riparian quality in a semiarid Mediterranean region. *Ecol. Indic.* 30, 52-64.

BLANCO, S., BÉCARES, E., CAUCHIE, H.-M., HOFFMANN, L., & ECTOR, L.; 2007. Comparison of biotic indices for water quality diagnosis in the Duero Basin (Spain). *Arch.Hydrobiol. Suppl.* 161, 267-286.

BORJA, A., BRICKER, S. B., DAUER, D. M., DEMETRIADES, N. T., FERREIRA, J. G., FORBES, A. T. & ZHU, C.; 2008. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin*, 5, 1519-1537.

EUROPEAN COMMISSION.; 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Off. J. Eur. Comm.*, L 327/1-72.

FALCONER, I. R.; 2001. Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters: risks and impacts on human health. *Phycologia*, 40(3), 228-233.

GILL, S. S., LANZA, G. R., & RAST, W.; 2011. Eutrophication: causes, consequences and control (p. 394). The Netherlands: Springer.

GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M., GARCÍA DE JALÓN, D., LARA, F., GARILLETI, R.; 2006. Índice RQI para la valoración de las riberas fluviales en el contexto de la directiva marco del agua. *Ingeniería Civil* 143, 97-108.

GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M., GARCÍA DE JALÓN, D.; 2011. Riparian quality index (RQI): a methodology for characterizing and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica* 30, 235-251.

HÜESKER, F., & MOSS, T.; 2015. The politics of multi-scalar action in river basin management: Implementing the EU Water Framework Directive (WFD). *Land Use Policy*, 42, 38-47.

ILEC/LAKE BIWA RESEARCH INSTITUTE.; 1994. 1988–1993 survey of the state of the world's lakes. Volumes I-IV. International Lake Environment Committee, Otsu and United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

INE-INSTITUTO GALEGO DE ESTADÍSTICA.; 2010. Figures about Galicia: Population, Population Centers and Density (in Spanish);: Santiago de Compostela, Spain, 2010. Available online: <http://www.ige.eu/igebdt/selector.jsp?COD=4705&paxina=001&c=0501> (accessed on 23 February 2015).

LEE, S., LEE, S., KIM, S. H., PARK, H., PARK, S., & YUM, K.; 2012. Examination of Critical Factors Related to Summer Chlorophyll a Concentration in the Sueo Dam Reservoir, Republic of Korea. *Environmental engineering science*, 29(6), 502-510

LEWIS JR, W. M., WURTSBAUGH, W. A., & PAERL, H. W.; 2011. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters. *Environmental science & technology*, 45(24), 10300-10305.

LIU, X., LU, X., & CHEN, Y.; 2011. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful Algae*, 10 (3), 337-343.

KHAN, F. A., NAUSHIN, F., REHMAN, F., MASOODI, A., IRFAN, M., HASHMI, F., & ANSARI, A. A.; 2014. Eutrophication: Global Scenario and Local Threat to Dynamics of Aquatic Ecosystems. In *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* (pp. 17-27). Springer Netherlands.

MATOS, C.T., SANTOS, M., NOBRE, B.P., GOUVEIA, L.; 2013. Nannochloropsis sp. Biomass recovery by Electro-Coagulation for biodiesel and pigment production. *Bioresour. Technol.* 134, 219–226.

MENDOZA-LERA, C., LARRAÑAGA, A., PÉREZ, J., DESCALS, E., MARTÍNEZ, A., MOYA, O., AROSTEGUI, I., POZO, J.; 2012. Headwater reservoirs weaken terrestrial-aquatic linkage by slowing leaf-litter processing in downstream regulated reaches. *RiverRes. Appl.* 28, 13–22.

MUNNÉ, A., PRAT, N., SOLÀ, C., BONADA, N., RIERADEVALL, M.; 2003. A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBRindex. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 13, 147–163.

OBERHOLSTER, P. J., BOTHA, A. M., & GROBBELAAR, J. U.; 2004. *Microcystis aeruginosa*: source of toxic microcystins in drinking water. *African Journal of Biotechnology*, 3(3).

OLIVEIRA, S.V., CORTES, R.M.V.; 2005. A biologically relevant habitat condition index for streams in northern Portugal. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 15, 189–210.

PAERL, H. W., XU, H., MCCARTHY, M. J., ZHU, G., QIN, B., LI, Y., & GARDNER, W. S.; 2011. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy. *Water Research*, 45(5), 1973-1983.

PARDO, I., ÁLVAREZ, M., CASAS, J., MORENO, J.L., VIVAS, S., BONADA, N., ALBA-TERCEDOR, J., JÁIMEZ-CUÉLLAR, P., MOYÀ, G., PRAT, N., ROBLES, S., SUÁREZ, M.L., TORO, M., VIDALABARCA, M.R.; 2002. El hábitat de los ríos mediterráneos. Diseño de un índice de diversidad de hábitat. *Limnetica* 21, 115–133.

PIENKOS, P., DARZINS, A.; 2009. The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* 3, 431–440.

RYDING, S. O., & RAST, W.; 1992. Control de la eutrofización en lagos y pantanos. In *Control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Pirámide/UNESCO.

SCHLESINGER, W. H., & BERNHARDT, E. S.; 2013. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Academic press.

SIROMBRA, M.G., MESA, L.M.; 2012. A method for assessing the ecological quality of riparian forests in subtropical Andean streams: QBRy index. *Ecol. Indic.* 20, 324–331.

SUÁREZ, M.L., VIDAL-ABARCA, M.R., SÁNCHEZ-MONTOYA, M.M., ALBA-TERCEDOR, J., ÁLVAREZ, M., AVILÉS, J., BONADA, N., CASAS, J., JÁIMEZ-CUÉLLAR, P., MUNNÉ, A., PARDO, I., PRAT, N., RIERADEVALL, M., SALINAS, M.J., TORO, M., VIVAS, S.; 2002. Las riberas de los ríos mediterráneos y su calidad: el uso del índice QBR. *Limnetica* 21, 135–148.

TIMMONS, M., EBELING, J., WHEATON, F., SUMMERFELT, S., VINCI, B.; 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*, second ed. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York.

VARANDAS, S.; 2006. *Avaliação da integridade ecológica em ecossistemas aquáticos*. Tese de doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

VARANDAS, S. G., & CORTES, R. M. V.; 2010. Evaluating macroinvertebrate biological metrics for ecological assessment of streams in northern Portugal. *Environmental monitoring and assessment*, 166(1-4), 201-221.

VILLAMARÍN, C., RIERADEVALL, M., PAUL, M.J., BARBOUR, M.T., PRAT, N.; 2013. A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: the IMEERA index. *Ecol. Indic.* 29, 79–92.

VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A., LUBCHENCO, J., & MELILLO, J. M.; 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.

VITOUSEK, P. M., PORDER, S., HOULTON, B. Z., & CHADWICK, O. A.; 2010. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5-15.

WANG, Z., LI, D., QIN, H., LI, Y.; 2012. An integrated method for removal of harmful cyanobacterial blooms in eutrophic lakes. *Environ. Pollut.* 160, 34–41.

XU, L., WANG, F., LI, H.Z., HU, Z.M., GUO, C., LIU, C.Z.; 2010. Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 85 (11), 1504–1507.

XUE, L., ZHANG, Y., ZHANG, T., AN, L., & WANG, X.; 2005. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on algae and cyanobacteria. *Critical reviews in microbiology*, 31(2), 79-89