

Artikutza (Navarra): diagnóstico ambiental de la red fluvial previo al desmantelamiento de un embalse y resultados preliminares del efecto del vaciado

Artikutza (Navarra): Environmental Diagnosis of the River Network Prior to the Dismantling of a Dam and Preliminary Results of the Emptying Effects

Aitor Larrañaga^{1*}, Miren Atristain², Daniel von Schiller³ y Arturo Elosegui⁴

Resumen

Los embalses están ligados al desarrollo económico de una región, pero cada vez más están quedando en desuso en todo el mundo. Debido a que son infraestructuras que generan un notable impacto sobre los ecosistemas fluviales, su desmantelamiento es una acción restauradora necesaria cuando su vida útil llega a su fin. Este trabajo muestra el estado ambiental de la red fluvial antes del vaciado del embalse de Enobieta (Artikutza, Navarra) y el efecto del vaciado de esta sobre las comunidades acuáticas. La química del agua, el tamaño de sustrato, la cantidad de clorofila bentónica y la comunidad de macroinvertebrados demostraron que el embalse era el principal impacto negativo de la red fluvial de Artikutza. El vaciado aumentaba la turbidez del agua, pero no generaba efectos significativos sobre la cantidad de clorofila bentónica. Este trabajo demuestra que el desmantelamiento de los embalses en desuso es una acción restauradora necesaria para reducir el impacto ambiental que generan y que su vaciado no genera efectos ambientales significativos en las comunidades fluviales.

Palabras clave: tamaño de sustrato, química del agua, clorofila bentónica, macroinvertebrados, emisión de gases

Abstract

Dams are linked to the economic development of a region, but more and more are falling into disuse around the world. Since they are infrastructures that have a significant impact on fluvial ecosystems, their dismantling is a necessary restorative action when their useful life comes to an end. This work shows the environmental state of the fluvial network before the emptying of the Enobieta dam (Artikutza, Navarra) and the effects of this emptying on the aquatic communities. The chemistry of the water, the size of the substratum, the amount of benthic chlorophyll and the community of macroinvertebrates demonstrated that the dam was the main negative impact on the Artikutza fluvial network. Emptying increased the turbidity of the water, but effects on the quantity of benthic chlorophyll were negligible. This work shows that the dismantling of disused dams is a restorative action required to reduce the environmental impact they generate and that their emptying does not generate significant environmental effects on fluvial communities.

Keywords: substrate size, water chemistry, benthic chlorophyll, macroinvertebrates, gas emission

1. INTRODUCCIÓN

Los embalses son infraestructuras que van unidas al desarrollo económico de una región, ya que proporcionan agua, energía y previenen los efectos negativos de las crecidas. Se estima que en el mundo hay un total de 45.000 grandes presas junto con 800.000 presas y azudes

de dimensiones menores (Nilsson *et al.*, 2005; Zarfl *et al.*, 2015), y estos números siguen aumentando (Lehner *et al.*, 2019). Por otro lado, como cualquier otra infraestructura, los embalses generan impactos ambientales, afectando a la calidad del agua, la hidromorfología y la estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales (Brandt, 2000; Brittain & L'Abée-Lund, 1995; Mbaka & Mwaniki, 2015). Como todas las infraestructuras, los embalses tienen una vida útil limitada. Durante dicha vida útil el balance entre los beneficios y los impactos puede considerarse favorable, pero tras ésta el balance es siempre negativo. Por otro lado, la seguridad es un aspecto fundamental en la gestión de estas instalaciones, como han puesto en evidencia desastres como el de la presa de Tous, en Valencia, cuya rotura en 1982 causó la muerte de decenas de personas. Por ello, la reducción de efectos ambientales y la eliminación de riesgos aconsejan desmantelar las presas al final de su vida útil. Para eso, primero es necesario vaciar el embalse y

* Autor de contacto: aitor.larranagaa@ehu.es

¹ Licenciado y Doctor en Biología. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU.

² Graduada en Biología. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU.

³ Licenciado y Doctor en Biología. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU.

⁴ Licenciado y Doctor en Biología. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU.

posteriormente eliminar el efecto barrera de la presa, bien desmantelándola totalmente, o bien mediante otra solución técnica. El efecto de estas actividades sobre el ecosistema fluvial no se conoce aún en detalle (Bellmore *et al.*, 2019; Poff & Hart, 2002).

El primer desmantelamiento de una presa del que tenemos constancia data del año 331 a.C., y fue llevado a cabo por Alejandro Magno en el Valle del Tigris (Wildman, 2013). Sin embargo, es a partir del siglo XX cuando aumenta el número de presas desmanteladas en Europa y Norteamérica. Estados Unidos ha desmantelado más de 1.400 presas (Bellmore *et al.*, 2019), Europa más de 4.500 (Fernández Garrido *et al.*, 2018), en su mayor parte infraestructuras obsoletas y de pequeño tamaño (Bellmore *et al.*, 2017). Dentro de la demarcación hidrográfica del Cantábrico Oriental, región en la que se sitúa el embalse objeto de estudio del presente trabajo, se encuentran al menos 20 embalses que acumulan más de 87 hm³ (www.embalses.net). Entre las que están en proceso de desmantelamiento se encuentra la presa de Enobieta, en el norte de Navarra. Con sus 42 metros de altura va a ser la presa más grande a desmantelar hasta la fecha en Europa, por lo que el seguimiento de esta actividad cobra especial importancia a la hora de afinar protocolos de actuación y valorar costes y beneficios técnicos y ambientales.

El proyecto Desembalse, financiado por la Fundación BBVA, analiza los efectos ambientales del vaciado y desmantelamiento del embalse de Enobieta (Artikutza, Navarra), que se encuentra actualmente ultimando la fase del vaciado. Nuestros objetivos en este artículo son:

1. describir el estado de la red fluvial previo al vaciado del embalse y el impacto ambiental que genera la presa en las características fisicoquímicas del agua, la calidad del sustrato y la comunidad de macroinvertebrados fluviales, y
2. mostrar los efectos del vaciado del embalse en la turbidez del agua y el biofilm del sustrato.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La finca de Artikutza, de 3.700 hectáreas, se sitúa en el extremo noroccidental de Navarra, y fue adquirida en 1919 por el Ayuntamiento de San Sebastián para garantizar el suministro de agua de calidad. Para mantener la calidad del agua se prohibió todo tipo de actividad extractiva

(pesca, caza y minería), se aglutinó la población de la cuenca en el barrio de Artikutza y se restringió el acceso. Además, desde su adquisición, se ha reforestado gran parte de la cuenca y las acciones silvícolas y de gestión forestal han ido encaminadas en ese sentido. A consecuencia de la gestión extremadamente conservacionista realizada durante un siglo, Artikutza está hoy mayoritariamente cubierta de bosques autóctonos maduros y alberga una elevada biodiversidad, lo que ha valido su inclusión dentro de la red Natura 2000.

Los arroyos de Artikutza son los mejor conservados del entorno (Elosegi *et al.*, 2013). La calidad del agua en general es excelente, fruto de la escasez de actividades humanas en la cuenca. Destaca la calidad del hábitat físico, especialmente la abundancia de madera muerta en los cauces, que promueve la diversidad de hábitats, proporciona refugio a numerosos organismos, y retiene sedimentos y materia orgánica (Wohl *et al.*, 2016), que es la principal fuente de alimento para los organismos fluviales (Wallace *et al.*, 1997). La comunidad de macroinvertebrados es muy diversa e indicadora de aguas de muy buena calidad (Elosegi *et al.*, 2013). En cuanto a la comunidad de peces, faltan especies migratorias, como la anguila y el salmón, por la imposibilidad de salvar las barreras de aguas abajo, especialmente la que supone la presa de Añarbe (Elosegi *et al.*, 2013). Es de destacar la presencia del desmán ibérico (*Galemys pyrenaicus*), un topo acuático endémico de la Península Ibérica y del norte de los Pirineos, que está en franca regresión en toda su área de distribución, pero que en Artikutza mantiene una buena población (González-Esteban *et al.*, 2018).

El Ayuntamiento de San Sebastián, propietario de la finca, ha realizado numerosas labores para mejorar el estado de naturalidad del valle, garantizar la calidad del agua y potenciar la biodiversidad. Entre otras, en 2014 eliminó 7 azudes en desuso para potenciar la conectividad de organismos a lo largo de la red fluvial. El único obstáculo presente a día de hoy en la parte alta de la cuenca es la presa de Enobieta.

3. LA PRESA DE ENOBIETA

A mediados del siglo XX, el Ayuntamiento de San Sebastián estudió varias alternativas para construir un embalse en la finca de Artikutza. Entre 1947 y 1953 se construyó la presa de Enobieta (figura 1) para asegurar el abastecimiento de agua a largo plazo. Se trata de una presa



Figura 1. Fotos de la presa desde abajo (izq.) y del embalse desde la presa (dcha.).

de gravedad de pantalla de hormigón de 35 m de altura, cuya planta está diseñada con una única alineación recta de 137,45 m. La coronación se sitúa a la cota 357,12 m; la cota del lecho del río es 320,16 m por lo que la altura de presa sobre cauce es de 36,86 m y de 42,70 m sobre cimientos. Durante su construcción se apreciaron problemas de estabilidad en el estribo izquierdo, que se apoya en calizas karstificadas del paleozoico. Durante años se ensayaron diversas soluciones técnicas, pero ninguna de ellas funcionó, por lo que se decidió rebajar la capacidad útil del embalse de los 2,66 a los 1,63 hm³, un volumen que pronto resultó insuficiente para satisfacer el consumo creciente de San Sebastián. Ante esta situación, se decidió construir un segundo embalse, Añarbe, de 44 hm³ aguas abajo en el mismo río de Artikutza. El embalse de Añarbe entró en funcionamiento en 1975, momento en el que el de Enobieta cayó en desuso. La falta de mantenimiento del embalse de Enobieta ha originado que a día de hoy esté catalogada como de Categoría A, la de menor seguridad según el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses. Dentro de los problemas técnicos que la presa presenta se incluyen fugas que vierten a las galerías internas y problemas eléctricos que dificultan la manipulación de la compuerta de fondo (Martín Vide, 2016).

Diversos estudios (Elosegi *et al.*, 2013; Elosegi y Diez, 2016) han puesto en evidencia que a día de hoy el embalse de Enobieta es la principal afección al estado de conservación de los ecosistemas fluviales de Artikutza. Por un lado, la presa es una barrera infranqueable para peces, para el desmán ibérico, así como para muchos invertebrados, que de esta forma ven fragmentadas sus poblaciones y reducida su capacidad de subsistencia y de recuperarse de eventos extremos. Por otra parte, el embalse supone un hábitat fuertemente modificado, no apto para la vida de la mayor parte de las especies originarias del arroyo. También deteriora la calidad del agua, especialmente en verano, cuando la baja concentración de oxígeno en el fondo promueve la disolución de metales, muy abundantes en la zona por sus características geológicas, y la aparición de fenómenos de turbidez y de olores sulfurosos.

Así, tras varios requerimientos por parte del Ministerio de Medio Ambiente, el Ayuntamiento de San Sebastián, propietario y gestor de la presa, tuvo que decidir si invertir una fuerte suma de dinero en actualizar el estado de seguridad de la misma o desmantelarla. En 2016, en vista de que las necesidades de abastecimiento estaban sobradamente cubiertas por el embalse de Añarbe, de que el embalse de Enobieta es la principal afección ambiental del valle, y de que no se prevé ningún uso futuro para el mismo, el Ayuntamiento de San Sebastián se decantó por la segunda opción. Se tomó la decisión de vaciar el embalse lentamente, para evitar que los sedimentos acumulados en el fondo se movilizasen. Asimismo, se consideró que la eliminación total de la presa era una actividad demasiado cara e impactante. El volumen de hormigón en la misma equivale a 100.000 camiones y su eliminación ocasionaría fuertes impactos por daños en la carretera de acceso a Artikutza, ruido y polvo, entre otros impactos. Por ello, se decidió mantener la presa en pie, pero aumentando la conectividad a través de la misma. La solución final todavía no se ha tomado, pero entre las alternativas evaluadas se encuentra la construcción de un túnel a través del fondo de

la presa, que debería ser lo suficientemente ancho y rugoso como para permitir el paso de peces y del desmán.

El desmantelamiento de una gran presa puede tener efectos ambientales y sociales, y la recuperación de los ecosistemas afectados depende de múltiples factores (Bellmore *et al.*, 2019). En el caso de Enobieta, uno de las limitaciones a tener en cuenta es que no afecte negativamente al embalse de Añarbe, situado 12 km aguas abajo, y que abastece de agua potable a la mitad de la provincia de Gipuzkoa, incluyendo San Sebastián. En particular, había preocupación por la posible movilización de los sedimentos acumulados en Enobieta. Sin embargo, fruto del pequeño tamaño y del excelente estado de conservación de la cuenca, en Enobieta sólo hay 88.000 m³ de sedimentos acumulados, que además, no presentan ningún problema de contaminación (Girder-Ingenieros, 2016). Este volumen es considerablemente inferior a las entradas anuales al embalse de Añarbe (123.000 m³) (CEDEX, 2005), por lo que no debería causar ningún problema al abastecimiento de agua, aunque podría afectar al tramo fluvial entre Enobieta y Añarbe, produciendo una disminución temporal en la concentración de oxígeno, o cubriendo el lecho de sedimentos finos, aspectos que se consideró importante estudiar. Otra de las incógnitas es la velocidad a la que se recuperarán los hábitats y comunidades, tanto en la zona actualmente anegada por el embalse como en los tramos aguas abajo de la presa. Los arroyos de la zona son muy dinámicos (Elosegi *et al.*, 2017), como consecuencia de su elevada pendiente y de las intensas precipitaciones, lo que sugiere una rápida recuperación de los cauces fluviales. En cuanto a los sedimentos emergidos en el lecho del embalse, se espera que se revegeten rápido, aunque el desarrollo del bosque necesitará más tiempo. El vaciado y desmantelamiento de Enobieta ofrece una oportunidad única para estudiar y comprender todos estos procesos.

4. EL PROYECTO DESEMBALSE

El grupo de investigación de Ecología Fluvial de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) presentó el proyecto “DESEMBALSE. Efecto del vaciado del embalse de Enobieta (Navarra) sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales” a la convocatoria de 2017 de proyectos de investigación de la Fundación BBVA. El proyecto resultó financiado con 98.000 € y se desarrollará hasta finales de 2020. Además, hemos establecido una serie de colaboraciones con investigadores de la Universidad de Barcelona, del Instituto Catalán de Investigaciones Acuáticas (ICRA, Girona), del Centro Nacional de Investigación Científica Francés (CNRS, Moulis, Francia) y del Centro para Estudios Medioambientales (UFZ, Magdeburgo, Alemania) para ampliar el rango de variables estudiadas y de esta forma aprovechar esta oportunidad para evaluar los efectos del desmantelamiento de una gran presa en un entorno privilegiado desde el punto de vista ambiental.

El proyecto DESEMBALSE pretende analizar el efecto del embalse de Enobieta en la biodiversidad y funcionamiento ecosistémico de los arroyos de la cuenca de Artikutza, los impactos de la fase de vaciado, así como la recuperación, tanto de la zona anegada como de las zonas de la red fluvial afectadas por el embalse. Para ello, estudiamos tanto la zona anegada por el embalse como los

arroyos de la cuenca y analizamos una amplia gama de aspectos, desde la morfología de los cauces, las características del sedimento, la hidrología, la fisicoquímica del agua, las comunidades microbianas, de invertebrados y de vertebrados, así como procesos que definen el funcionamiento del ecosistema, desde la emisión de gases de efecto invernadero hasta la retención de nutrientes o la descomposición de materia orgánica. Este conjunto de variables viene determinado por nuestras hipótesis de trabajo, que se resumen en la figura 2.

La hipótesis de partida general es que el vaciado del embalse supondrá una transformación radical en la estructura y funcionamiento del área actualmente anegada por el embalse, un impacto inicial aguas abajo de la presa por el arrastre de sedimentos y materia orgánica, y una rápida recuperación del ecosistema fluvial como consecuencia del elevado dinamismo de estos arroyos de montaña. La recuperación del bosque terrestre en las zonas emergidas, por supuesto, ocurrirá en un marco temporal muy superior al de este proyecto.

Las hipótesis específicas son las siguientes (figura 2):

H1. En la zona actualmente anegada por el embalse se producirá la conversión de un ecosistema léntico en lótico. Se recuperarán los hábitats fluviales, formándose una secuencia de rápidos y pozas similar a la del arroyo Enobieta aguas arriba. Esta recuperación procederá de arriba abajo, conforme los sedimentos finos vayan siendo arrastrados por las crecidas.

H2. Conforme se reconfiguren los hábitats lóticos, serán recolonizados por invertebrados fluviales. Dado el carácter torrencial de los arroyos de la zona y la proximidad de fuentes de recolonizadores, hipotetizamos una rápida recolonización.

H3. El vaso del embalse y la parte alta del arroyo de Enobieta serán rápidamente recolonizados por el desmán

ibérico. Su población actual en Artikutza es buena (Arturo Elosegi, datos sin publicar), pero los jóvenes no tienen sitios nuevos que recolonizar.

H4. Conforme se recupere el hábitat físico y las comunidades, el tramo fluvial recuperará un funcionamiento ecosistémico natural, que se reflejará en retención de nutrientes y retención y descomposición de materia orgánica similares a los del arroyo de Erroiarrri, cuyo tamaño y topografía son casi idénticos al de Enobieta.

H5. Los sedimentos orgánicos emergidos comenzarán a descomponerse a mayor rapidez por su mayor aireación. Aumentará la emisión de CO_2 por parte de los mismos.

H6. A una escala temporal más larga, se iniciará la revegetación de los sedimentos emergidos y habrá cambios en las alisedas de cola del embalse, conforme el arroyo se encaje por arrastre de sedimentos.

H7. Durante la fase de vaciado se producirá el arrastre de sedimentos finos y orgánicos acumulados en el fondo del embalse, que aumentará la turbidez del río. Además, producirá la agradación del cauce y la disminución del tamaño de partículas aguas abajo. Este efecto irá desplazándose aguas abajo y suavizándose conforme los sedimentos sean redistribuidos por efecto de las crecidas. El impacto químico del embalse (precipitación de hierro y sales de manganeso por efecto de la termoclina en el verano-otoño) desaparecerá.

H8. Los peces (truchas y foxinos) actualmente presentes en el embalse colonizarán tramos aguas abajo, donde producirán un fuerte efecto sobre las redes tróficas. Las comunidades piscícolas acabarán ajustándose a la disponibilidad de alimento.

H9. Las comunidades de invertebrados cambiarán como consecuencia de los cambios geomorfológicos, los cambios químicos y la presión de predación por parte de los peces.

H10. Cambiará el funcionamiento del ecosistema. En el momento del vaciado se producirá un aumento de la

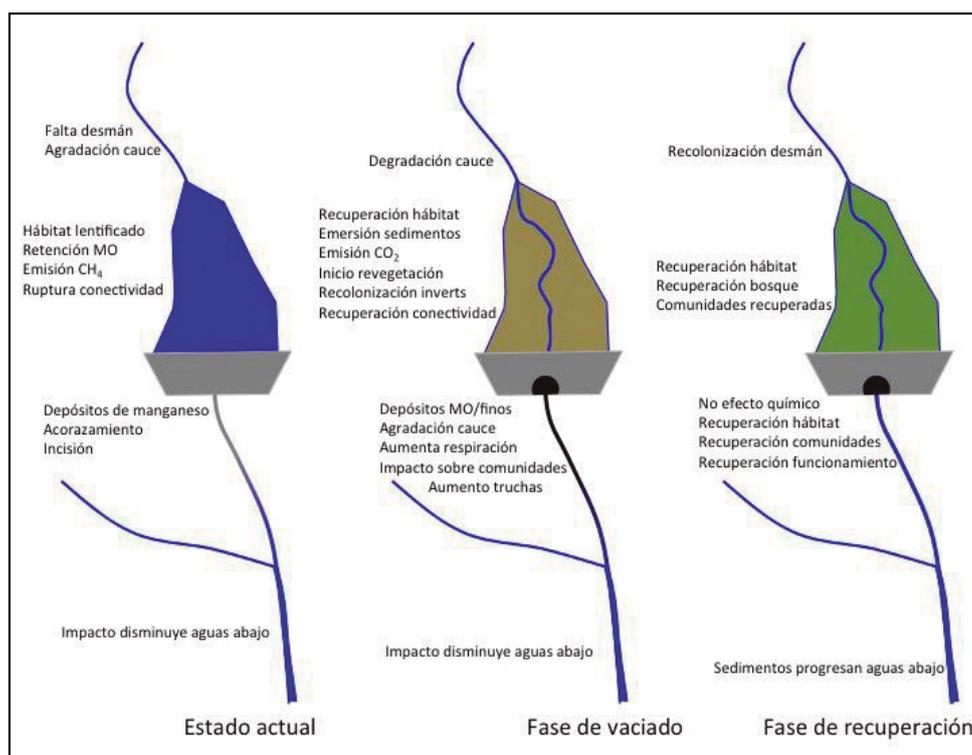


Figura 2. Esquema de las hipótesis de partida del proyecto Desembalse. MO = materia orgánica.

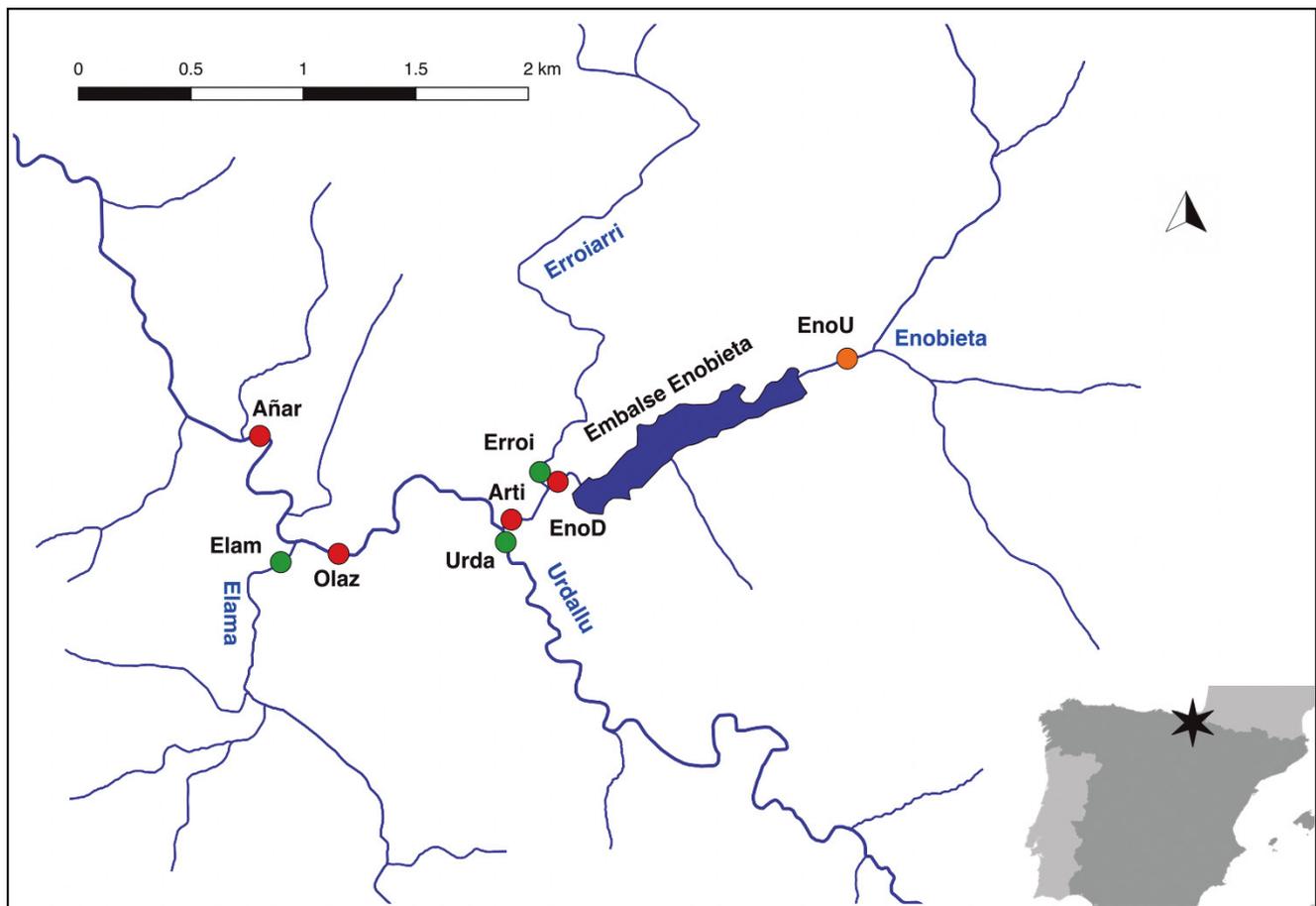


Figura 3. Área de estudio y localización de las 8 estaciones de muestreo (punto naranja: aguas arriba del embalse; rojo: aguas abajo del embalse; verde: tramos no afectados por el embalse).

heterotrofia por la acumulación de materia orgánica. Se reducirá la capacidad de retención de nutrientes por el aumento del sedimento fino y poco estable. Se reducirá la tasa de descomposición por el aumento en la disponibilidad de materia orgánica. Estos cambios serán transitorios y desaparecerán conforme las riadas redistribuyan los sedimentos y la materia orgánica.

Para tratar de responder estas hipótesis, el proyecto sigue un esquema general tipo BACI (del inglés Before-After/Control-Impact). El esquema BACI (Underwood, 1994) consiste en estudiar una serie de tramos afectados por el embalse, fundamentalmente tramos aguas abajo del mismo, y otros tramos similares pero no afectados, en nuestro caso, otros arroyos cercanos; compararlos antes del impacto y volver a compararlos tras el tras el vaciado. El diseño BACI es especialmente adecuado para evaluar el efecto de actividades humanas sobre el medio ambiente, ya que permite desligar los efectos de dichas actividades, en este caso del vaciado, de los cambios debidos a otras causas, por ejemplo, a diferencias meteorológicas entre los periodos anterior y posterior a la realización del impacto o a las diferencias basales entre los tramos de estudio.

En este estudio hemos establecido ocho estaciones de muestreo en la red fluvial: una estación aguas arriba del embalse, cuatro consecutivas aguas abajo de la misma y tres en ríos que drenan cuencas sin ningún tipo de efecto antrópico (figura 3). Además, se han realizado diversos muestreos en el embalse, desde embarcación tipo zodiac y desde el suelo, para poder evaluar los cambios que ocurren en el mismo.

5. ESTADO PREVIO AL VACIADO

En general, los arroyos de la cuenca de Artikutza tienen agua de excelente calidad, con una baja conductividad, elevada concentración de oxígeno, y baja concentración de nutrientes (figura 4), como consecuencia de la alta cobertura forestal de la cuenca. Sin embargo, aguas abajo de la presa la concentración de amonio es más alta que en el resto de las estaciones. Además, se detectan elevadas concentraciones de metales, especialmente hierro y manganeso, que a menudo aparecen a niveles superiores a los establecidos para aguas de boca (figura 5). Estos metales provienen del embalse, en cuyo fondo disminuye la concentración de oxígeno, aumentando así la solubilidad de los metales. Una vez debajo de la presa, el agua vuelve a oxigenarse y los metales se oxidan y precipitan. En el caso del manganeso, sus óxidos se acumulan en el lecho y confieren una turbidez negruzca al agua. Adicionalmente, en el tramo por debajo de la presa se aprecia una ausencia de sedimentos finos, tipo grava o arena, que son atrapados en el embalse.

Las comunidades de macroinvertebrados también muestran un efecto claro del embalse por debajo de la presa. El número total de taxones desciende notablemente de los 46 taxones en el tramo aguas arriba de la presa a sólo 7 taxones aguas abajo de la misma (figura 6). Además, del total de 61 taxones que se identificaron en la cuenca de Artikutza, 16 faltaban exclusivamente bajo la presa, y 8 de estos (*Atherix*, *Capnioneura*, *Habroleptoides*, Heptageniidae, *Leuctra*, *Sericostoma*, *Silo*

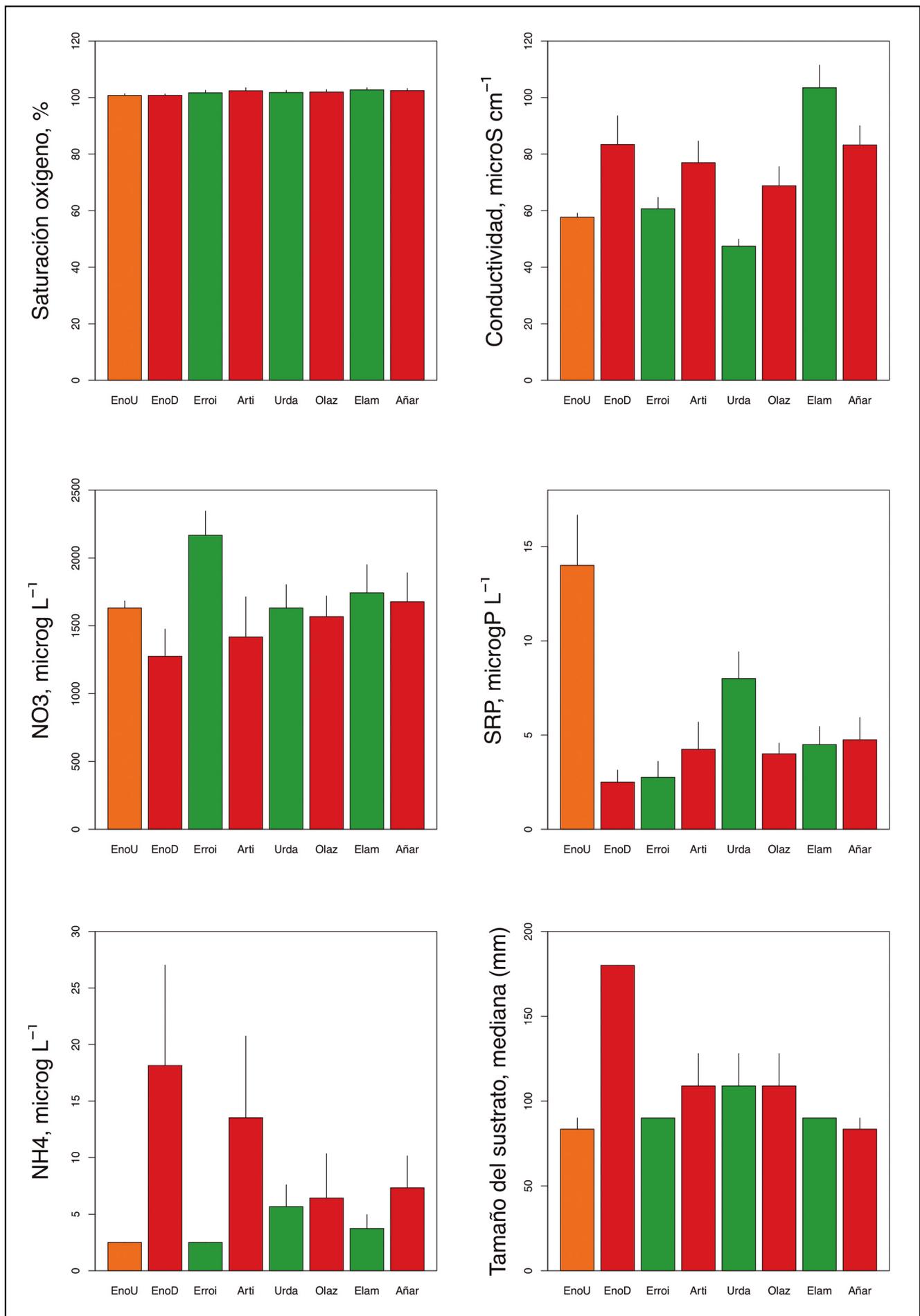


Figura 4. Características físico-químicas del agua y el tamaño del sustrato en los puntos de muestreo. NO₃ = nitrato, NH₄ = amonio, SRP = fósforo reactivo soluble.

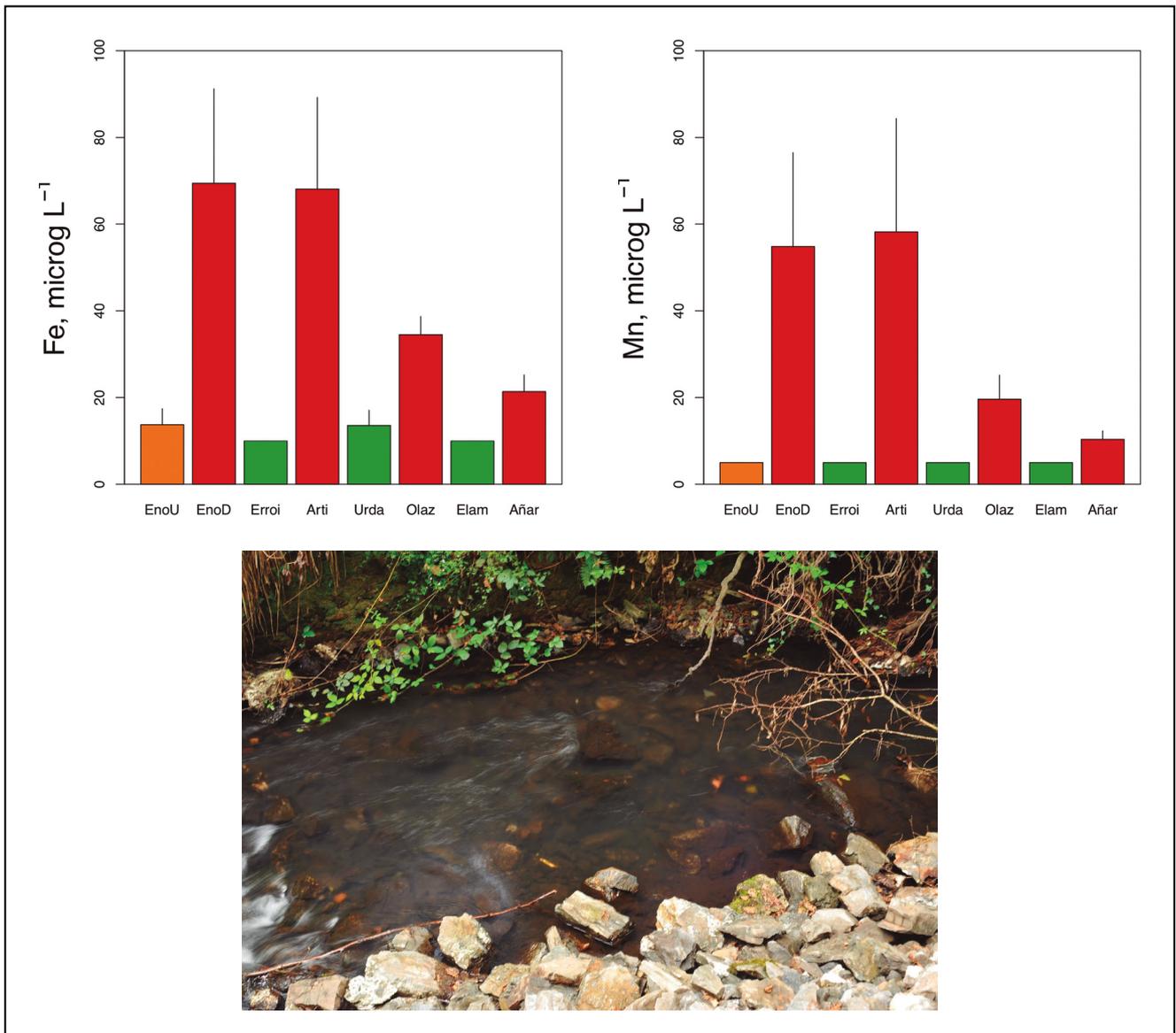


Figura 5. Arriba. Concentraciones de hierro y manganeso en los puntos de muestreo. Abajo. Óxidos de manganeso de color negruzco en el agua y sobre el sustrato aguas abajo de la presa de Enobieta.

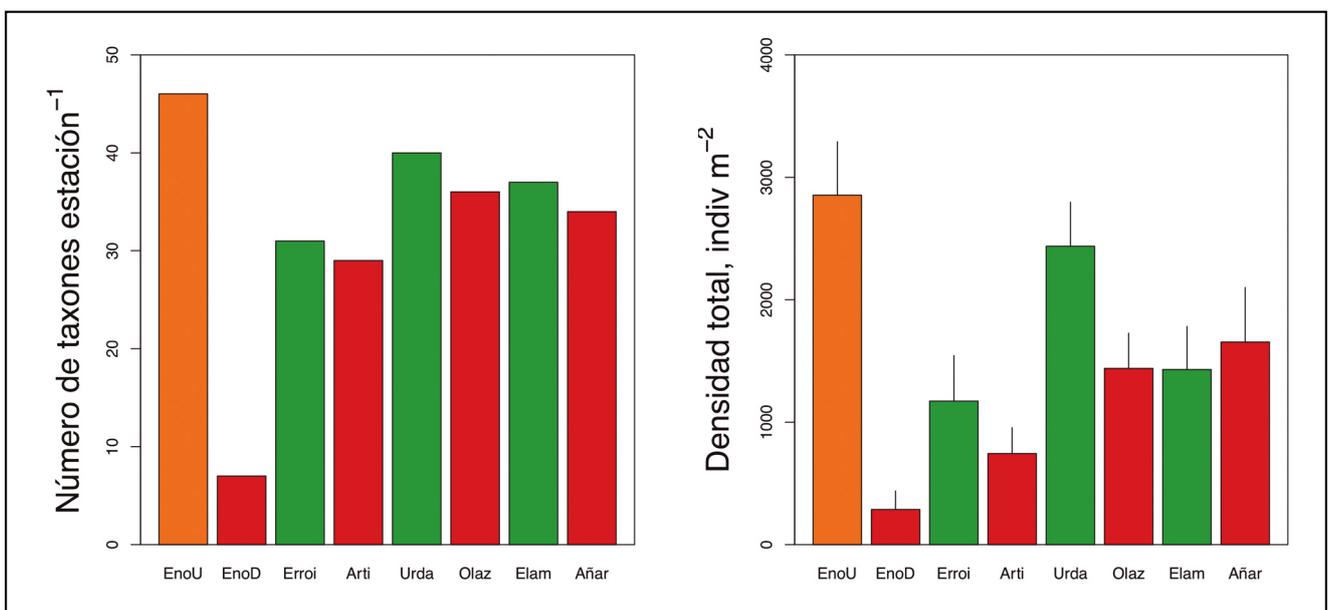


Figura 6. Riqueza de taxones (izquierda) y densidad de invertebrados en las estaciones de muestreo de la red fluvial de Artikutza (derecha). En ambos casos los números más bajos se detectan en el tramo EnoD, justo bajo la presa, y el impacto va disminuyendo aguas abajo.

y *Siphonoperla*) son muy sensibles a la contaminación. La densidad de macroinvertebrados también mostró una fuerte reducción debajo del embalse y una recuperación gradual aguas abajo, conforme se van incorporando otros tributarios. En conjunto, esta información sugiere que la contaminación por metales liberados en el embalse está afectando de forma negativa a las comunidades de invertebrados en la cuenca.

6. EFECTO DEL VACIADO

El mecanismo para regular el nivel del embalse de Enobieta es la compuerta de fondo, un rectángulo de 1 m de ancho por 1,5 m de alto con una doble compuerta que se acciona desde una cámara situada en el interior de la presa. Tras décadas de desuso, se consideró peligroso accionarla directamente para efectuar el vaciado. En su lugar, se activaron inicialmente cuatro sifones de 300 mm de diámetro, que en la época de explotación de la presa se utilizaban para suministrar agua superficial (figura 1). Estos sifones permitieron bajar el nivel del embalse unos 4 metros, tras lo cual se consiguió abrir la válvula de una de las tomas de 600 mm. Esto, junto con las fugas por filtraciones y por el tubo de aireación de la compuerta de fondo, que suponían unos 40 L/s (Martín Vide, 2016), permitieron reducir paulatinamente el nivel del embalse desde mayo hasta diciembre de 2018. En ese momento, con un embalse casi vacío, se reparó y activó la compuerta de fondo, vaciándose el embalse completamente el 18 de enero de 2019 (figura 7; figura 10). Sin embargo, un periodo de fuertes lluvias (más de 500 L/m² acumulados en dos semanas) hizo que el nivel del embalse volviera a subir 12 m, poniendo también en evidencia que la capacidad de desagüe de la compuerta de fondo estaba limitada por la acumulación de residuos en su boca de cascotes de hormigón, residuos producidos cuando se rebajó el nivel del aliviadero en los años 80. Para el 25 de febrero de 2019 los operarios del ayuntamiento consiguieron eliminar esos cascotes con lo que se abrió la compuerta de fondo y se vació definitivamente el embalse (figura 7).

El lento vaciado ha hecho aflorar buena parte de los sedimentos atrapados en el embalse. En la zona de cola del embalse los sedimentos consisten en paquetes densos de

hojarasca, que van siendo reemplazadas por limo fino conforme nos acercamos a la presa. Estos sedimentos se han compactado y están siendo rápidamente cubiertos por vegetación, especialmente juncos, hierbas del género *Polygonum*, así como algunos sauces (figura 8). Conforme el nivel del embalse baja, el arroyo de Enobieta está incidiéndose en estos sedimentos, formando unas orillas escarpadas. Se aprecia una gradación clara en la granulometría del lecho, estando este formado por bloques y cantos en las partes más distales, por guijarros y grava en las más próximas a la presa.

Había expectación por lo que pudiera suceder con la apertura de la compuerta de fondo, sobre todo por el volumen de sedimentos que se pudieran movilizar y por los efectos que pudieran causar los mismos sobre el hábitat y las comunidades aguas abajo del embalse. En el momento de la apertura, la turbidez del agua aumentó hasta 280 NTU, pero fue un pico muy pasajero, volviendo la turbidez a niveles de 5-10 NTU en 3-4 horas. Este aumento se detectó inmediatamente debajo del embalse de Enobieta, mientras que en la estación de aforo situada en la entrada del embalse de Añarbe, 8 km más abajo, la turbidez apenas pasó de los 40 NTU (figura 9). Además, la concentración de oxígeno se mantuvo constantemente a niveles cercanos a la saturación, y no se ha apreciado ningún acúmulo de sedimentos finos que pudiera afectar de forma negativa al hábitat fluvial.

El seguimiento de la turbidez del agua de la estación Artikutza, situada aguas abajo del embalse, y las de Urdallu, un tramo no afectado por el embalse, mostraron 3 periodos en las que se superaron los 40 NTU que parecían responder a altas precipitaciones (figura 10). Los valores basales de turbidez fueron similares para las dos estaciones a lo largo del vaciado, pero mostraban valores ligeramente superiores tras el vaciado completo (figura 10). La cantidad de clorofila en el bentos era más alta en las estaciones referencia y la estación aguas arriba del embalse, que en las estaciones de aguas abajo (figura 10). Los valores mínimos fueron medidos en la estación inmediatamente debajo del embalse. El vaciado no generó ningún efecto sobre la cantidad de clorofila en el bentos y los valores tras el vaciado completo (el último muestreo), se mantuvieron dentro del rango de valores de los muestreos anteriores.

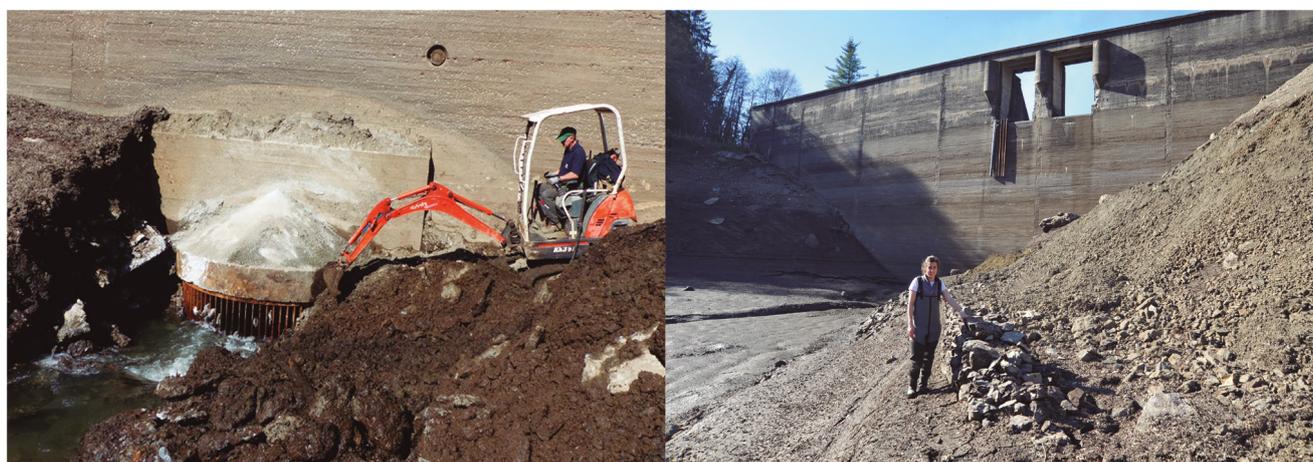


Figura 7. Izquierda: un operario del ayuntamiento limpia los cascotes que obstruían la entrada a la compuerta de fondo. Derecha: el embalse vacío.



Figura 8. Vista de la zona emergida del embalse. Apréciase la rápida revegetación de las zonas más distales, que en el momento de las fotos llevaban cuatro meses emergidas, y cómo el arroyo Enobieta va recuperando su cauce.

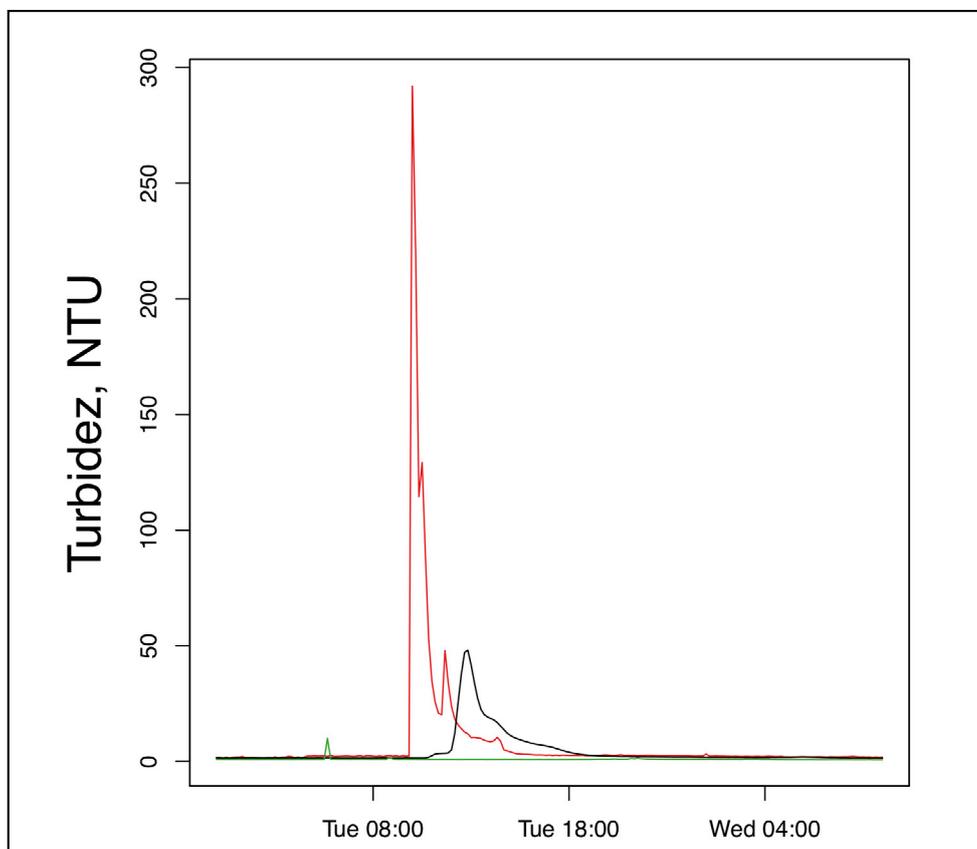


Figura 9. Turbidez en la estación Artikutza (línea roja), en la estación Urdallu (verde) y en la estación de aforo de Añarbe (negro) en la prueba de apertura de la compuerta (18/12/2018). La estación de aforo de Añarbe se encuentra 8 kilómetros aguas abajo de la estación de Artikutza.

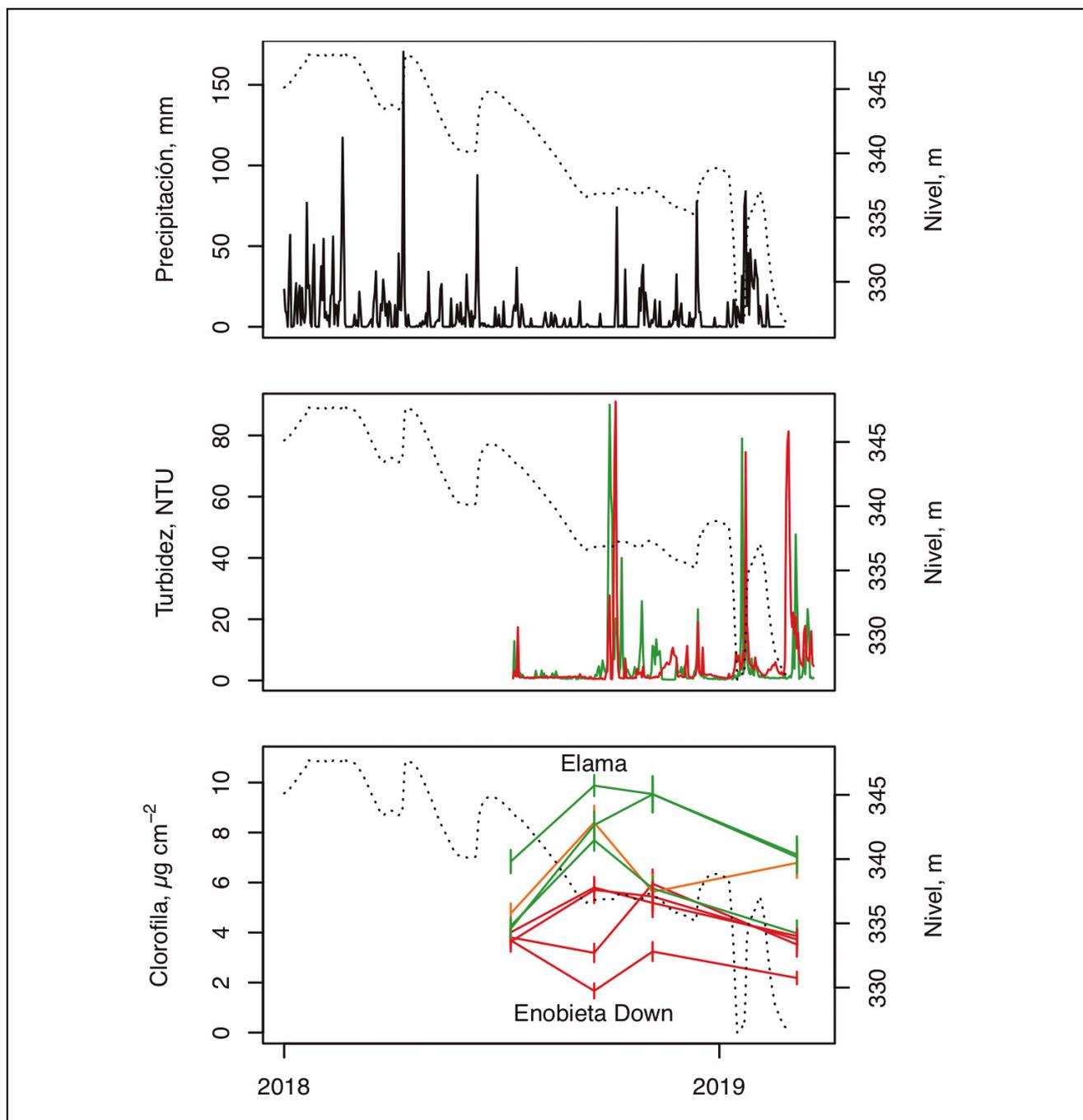


Figura 10. Seguimiento temporal de la precipitación diaria, la turbidez media diaria del agua y la cantidad de clorofila en el bentos a lo largo del vaciado del embalse de Enobieta. La línea de puntos muestra el nivel del agua en el embalse (escala de la derecha); la cota máxima mostrada corresponde a la capacidad máxima del embalse y la cota mínima al nivel del agua a la altura de la compuerta de fondo. Se muestran los datos de turbidez de Urdallu (verde) y Artikutza (rojo). Para la cantidad de clorofila se señalan las dos estaciones que mostraron los valores más altos (Elama) y más bajos (Enobieta Down) de las 8 estaciones muestreadas (línea naranja: aguas arriba del embalse; roja: aguas abajo; verde: tramos no afectados por el embalse).

7. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

El seguimiento de las emisiones de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) realizados antes y durante el vaciado del embalse de Enobieta está permitiendo constatar cambios relevantes en la cantidad total y relativa de estos flujos. En la fase previa al vaciado, el embalse emitía mucho CH_4 a la atmósfera, tanto de forma difusiva como por ebullición, desde la zona de la cola donde la acumulación de grandes cantidades de materia orgánica fresca y la baja concentración de oxígeno en el lecho favorecen la actividad de las bacterias metanógenas

(figura 11). Los resultados preliminares indican que dichas emisiones han remitido fuertemente durante el vaciado, cuando hemos medido flujos muy pequeños de CH_4 tanto en las zonas aún anegadas como en los lechos emergidos. Por el contrario, el vaciado del embalse está favoreciendo las emisiones de CO_2 en los lechos emergidos. A falta de nuevos muestreos y un balance final, y debido a que el CH_4 es un gas de efecto invernadero unas 20 veces más potente que el CO_2 , prevemos que el vaciado del embalse de Enobieta reducirá de forma significativa la huella de carbono de la ciudad de San Sebastián.

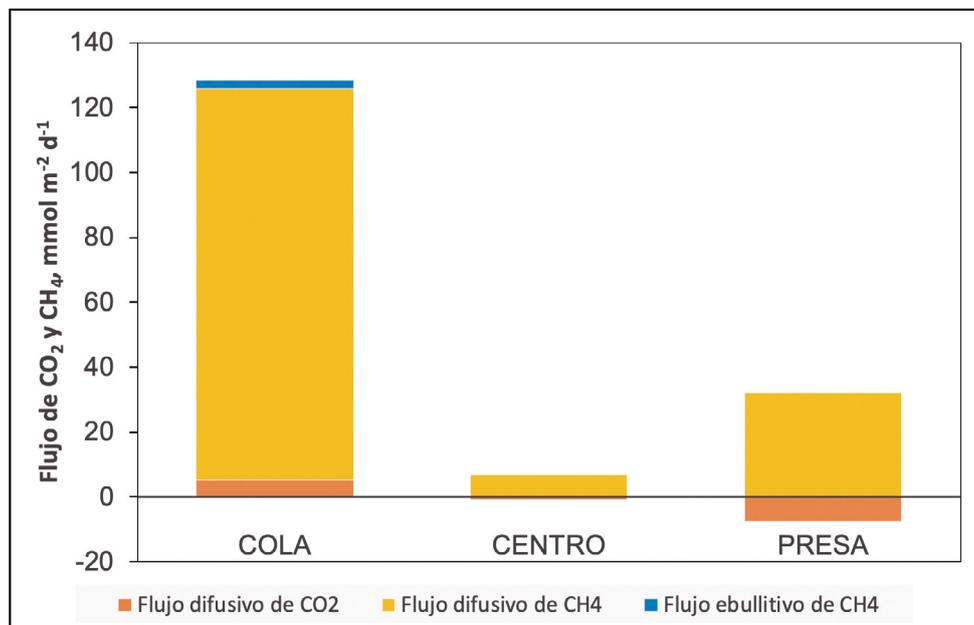


Figura 11. Flujos de CO₂ y CH₄ (en mmol m⁻² d⁻¹) entre la superficie del agua y la atmósfera en la fase previa al vaciado del embalse. Se muestra la media para las distintas zonas del embalse.

8. CONSIDERACIONES FINALES

Los embalses, como toda infraestructura humana, tienen un periodo de vida útil limitado, tras el cual deben ser desmantelados para paliar sus efectos ambientales. El vaciado y posterior desmantelamiento del embalse de Enobieta proporcionará una oportunidad única para aprender sobre las complicaciones técnicas y los efectos ambientales de esta actividad. Los resultados obtenidos por ahora en el proyecto DESEMBALSE muestran que el embalse causa afecciones ambientales en la cuenca de Artikutza, que en general tiene un estado de conservación envidiable, pero que el vaciado no ha originado ningún problema adicional. En las zonas emergidas del embalse los ecosistemas, tanto fluviales como terrestres se están recuperando a buen ritmo y es de esperar que los tramos aguas abajo de la presa se recuperen también rápidamente una vez se ejecute la solución final para ponerla fuera de servicio. Estos resultados deberían servir de precedente para los gestores de otras presas obsoletas a la hora de emprender acciones para su desmantelamiento.

9. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación BBVA (064—17), por el Gobierno Vasco (IT951-16) y por el Gobierno de Navarra (OTRI 2018.0370). Miren Atristain disfruta de una beca predoctoral de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Gracias a Diputación Foral de Gipuzkoa y Aguas del Añarbe SA por compartir la información disponible sobre la cuenca de Añarbe. Nuestro más sincero agradecimiento al Ayuntamiento de Donostia-San Sebastián y en especial a Asun Yarzabal, Iñaki Uranga y a todo el personal de mantenimiento de la finca de Artikutza, por su apoyo constante. Queremos también reconocer la labor de los dos revisores que han ayudado a mejorar el manuscrito.

10. REFERENCIAS

- Bellmore, J.R., Duda, J.J., Craig, L.S., Greene, S.L., Torgersen, C.E., Collins, M.J., y Vittum, K. (2017). Status and trends of dam removal research in the United States. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(2), e1164. DOI: 10.1002/wat2.1164
- Bellmore, J.R., Pess, G.R., Duda, J.J., Connor, J.I.M.E.O., East, A.M.Y.E., Foley, M.M., Wilcox, A.C., Major, J.J., Shafroth, P.B., Morley, S.A., Magirl, C.S., Anderson, C.W., Evans, J.E., Torgersen, C.E., y Craig, L.S. (2019). Conceptualizing ecological responses to dam removal: if you remove it, what's to come? *BioScience*, 69(1): pp. 26–39. DOI: 10.1093/biosci/biy152
- Brandt, S.A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40(4): pp. 375–401. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00093-X
- Brittain, J.E., y L'Abée-Lund, J.H. (1995). The environmental effects of dams and strategies for reducing their impact. En *Reservoirs in River Basin Development*. Róterdam: AA Balkema, pp. 129–138.
- CEDEX (2005). Asistencia técnica para el estudio de la capacidad del embalse de Añarbe (Navarra). Madrid: CEDEX (Ministerio de Fomento).
- Elosegi, A., Díez, J. R., Flores, L., y Molinero, J. (2017). Pools, channel form, and sediment storage in wood-restored streams: Potential effects on downstream reservoirs. *Geomorphology*, 279, pp. 165–175. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2016.01.007
- Elosegi, A., Díez, J., y González-Esteban, J. (2013). Diagnóstico de los ecosistemas ligados al agua de Artikutza. Informe para el Ayuntamiento de San Sebastián.
- Elosegi, A., y Díez, J.R. (2016). Estudio de alternativas del vaciado del embalse de Enobieta (Artikutza). Implicaciones ecológicas. Informe para el Ayuntamiento de San Sebastián.
- Fernández Garrido, P., Groot, L. de, Wannigen, H., Herk, J. van, y Geenen, B. (2018). Dam removal europe: Un movimiento necesario para apoyar a profesionales y desmentir mitos. Retos y experiencias de restauración fluvial en el ámbito de La Red Natu-

ra 2000, pp. 168-179. Disponible en //dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6700264

Girder-Ingenieros. (2016). Estudio de viabilidad de la puesta fuera de servicio de la presa de Artikutza.

González-Esteban, J., Elosegui, A., Esnaola, A., Aihartza, J., y Escudero, A.A. (2018). Need for speed: Preference for fast-flowing water by the endangered semi-aquatic Pyrenean desman (*Galemys pyrenaicus*) in two contrasting streams. *Aquatic Conservation*, 28(3): pp. 600-609. DOI: 10.1002/aqc.2893

Lehner, B., Reidy Liermann, C., Revenga, C., Vorosmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., Wisser, D. (2019). Global Reservoir and Dam Database, Version 1 (GRanDv1): Dams, Revision 01. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).

Martín Vide, J.P. (2016). Estudio de alternativas del vaciado del embalse de Enobieta (Artikutza). Implicaciones hidrológicas y técnicas. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Mbaka, J.G., y Mwaniki, M.W. (2015). A global review of the downstream effects of small impoundments on stream habitat conditions and macroinvertebrates. *Environmental Reviews*, 23(3): pp. 257-262. DOI: 10.1139/er-2014-0080

Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., y Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308(5720): pp. 405-408. DOI: 10.1126/science.1107887

Poff, N.L., y Hart, D.D. (2002). How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *BioScience*, 52(8): pp. 659-668. DOI: 10.1641/0006-3568(2002)052[0659:HD-VAWI]2.0.CO;2

Underwood, A.J. (1994). On Beyond Baci-sampling designs that might reliably detect environmental disturbances. *Ecological Applications*, 4(1): pp. 3-15. DOI: 10.2307/1942110

Wallace, J.B., Eggert, S.L., Meyer, J.L., y Webster, J.R. (1997). Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs. *Science*, 277(5322): pp. 102-104. DOI: 10.1126/science.277.5322.102

Wildman, L. (2013). Dam removal: A history of decision points. En J.V. De Graff y J.E.Evans, *The Challenges of Dam Removal and River Restoration* (pp. 1-10). DOI: 10.1130/2013.4121(01)

Wohl, E., Bledsoe, B.P., Fausch, K.D., Kramer, N., Bestgen, K.R., y Gooseff, M.N. (2016). Management of large wood in streams: an overview and proposed framework for hazard evaluation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 52(2): pp. 315-335. DOI: 10.1111/1752-1688.12388

Zarfl, C., Lumsdon, A.E., Berlekamp, J., Tydecks, L., y Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77(1): pp. 161-170. DOI: 10.1007/s00027-014-0377-0