

Estudio de recuperación ambiental de la Ría de Aranjuez

Molina, Beatriz^{a*}; Cortés, Francisco Miguel^a; Magdaleno, Fernando^b.

^aCentro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CEDEX), Consejería Técnica de Restauración Ambiental.

^bMinisterio para la Transición Ecológica, Dirección General del Agua

*Autor para contacto: Beatriz.molina@cedex.es

Resumen

El Palacio Real de Aranjuez presenta algunas afecciones relevantes en los últimos años, entre las que destaca el hundimiento que sufre el muro de la margen izquierda de la Ría que lo rodea parcialmente. Ante esta situación, Patrimonio Nacional, responsable de las obras de restauración de este enclave, encargó al CEDEX el estudio ambiental de este canal artificial, que sustenta importantes valores ambientales. El objetivo de este estudio es doble: i. la caracterización hidrogeomorfológica y ecológica del ámbito de estudio, y ii. el diseño de medidas de restauración ambiental que contribuyan a eliminar o mitigar la socavación de la base del muro, sin menoscabo de la recuperación ambiental de la Ría. Para ello, se analizaron las variables que condicionan su funcionamiento, y que son determinantes para la conservación de sus valores ecológicos y ambientales. El funcionamiento hidrológico de la Ría depende del régimen de caudales del río Tajo - muy alterado desde la puesta en marcha del trasvase Tajo-Segura. Esto supone una disminución de caudal en la Ría, que ha favorecido la colonización del lecho por una densa vegetación que concentra el flujo de mayor velocidad en la margen izquierda, afectando tanto al hundimiento del muro como a la erosión local del lecho. Tras la caracterización se proponen varias alternativas de restauración atendiendo a variables hidroecológicas, paisajísticas y económicas. La alternativa que aporta la máxima variabilidad ecológica al medio acuático es la instalación de gaviones flexibles acompañados de hidrotecnias, y de otras acciones de mejora integrada del ámbito de estudio.

Palabras clave: Restauración; socavación; hidromorfología.

Abstract

In recent years, the Royal Palace of Aranjuez has been affected by some relevant problems, the main one is the sinking suffered by the wall on the left side of the artificial stream known as "Ría". To cope with this situation, the Spanish National Heritage, competent authority for the restoration of this site, requested from CEDEX its technical advice to design its environmental recovery. The objective of the study was twofold: the hydrogeomorphological and ecological characterization of the "Ría", and the proposal of environmental restoration measures, harmonized with the elimination or mitigation of the ongoing problems in the study area. To this purpose, the analyzed variables are those which determine the functioning of the "Ría", and those which are determinant for the conservation of its ecological and environmental values. The hydrological functioning of the estuary depends on the flow regime of the Tagus River, which is very altered since the beginning of the Tagus-Segura Water Transfer. This has produced a decrease in the water level in the Ría, favouring the colonization of the riverbed by helophyte vegetation, while at the same time the flow has been concentrated on the left edge, causing the destabilization of the wall and a pattern of local erosion in the riverbed. After the characterization, several restoration alternatives have been proposed, taking into account hydro-ecological, landscape and economical variables. The alternative that provides the maximum ecological variability in the aquatic environment is the installation of flexible gabions accompanied by hydrotechnics, and other integrated amelioration measures of the study area.

Keywords: Restoration; scour; hydromorphology.

1. Introducción

El Palacio Real de Aranjuez se encuentra situado al sur de la Comunidad de Madrid, junto a las orillas del río Tajo y aguas arriba de la confluencia con el río Jarama, en el término municipal de Aranjuez. Representa un enclave de elevado valor paisajístico y cultural, fruto de la combinación de obras paisajísticas, arquitectónicas y artísticas, que le han hecho merecedor de una amplia serie de reconocimientos. Una de las características más singulares del Palacio es la denominada "Ría de Aranjuez". Se trata de un canal artificial construido a partir del azud de derivación de las aguas del Tajo, cuyo trazado separa el Jardín de la Isla del Palacio Real, y discurre en paralelo al ala norte de éste (Fig. 1). En lo que

respecta al régimen de caudales de la Ría, éste depende de las compuertas situadas en el bocacaz del puente de la Boticaría, que regulan la entrada de agua al canal, procedente de la derivación del Tajo. La longitud de la Ría apenas alcanza un kilómetro, pero a lo largo de su recorrido concentra algunos elementos arquitectónicos relevantes, y alberga una nada despreciable representación de comunidades biológicas de fauna y flora. La combinación de estos elementos, aumenta el atractivo de este paraje, haciendo fundamental su conservación.



Figura 1. Vista aérea de la ubicación de la Ría de Aranjuez, destacada en azul, y el ámbito de estudio enmarcado en rojo. Elaboración propia a partir de la ortofotografía de máxima actualidad del PNOA, extraída del IGN.

No obstante, durante las últimas décadas este enclave viene sufriendo algunas afecciones de importante magnitud. En concreto, el muro de la margen izquierda de la Ría, bajo el Patio de Pescadores, presenta desde hace años un notable hundimiento, debido a un problema de socavación en su base que compromete su estabilidad. Para efectuar la reparación del muro se precisan operaciones de inyección y relleno que requerirían acceder a la Ría para su realización. El acceso a la Ría, así como las operaciones a realizar, tanto desde ella como en su interior, conllevarían unas alteraciones ambientales que podrían ocasionar impactos relevantes en los hábitats acuáticos. Este problema también se da, pero en menor magnitud, en el muro de la margen derecha. Otras afecciones de notable importancia que podrían estar relacionadas con el descalce de la base del muro son la incisión local en el lecho de la Ría y la presencia de una amplia mancha de vegetación helófitas, relacionada con el desequilibrio hidromorfológico al que se enfrenta el ámbito de estudio, y que podría estar contribuyendo a las afecciones descritas con anterioridad.

Ante esta situación, Patrimonio Nacional se plantea llevar a cabo un proyecto de restauración del tramo de la Ría que discurre entre el bocacaz del puente de la Boticaría y el aliviadero de la Plaza Elíptica en el Real Sitio de Aranjuez. Para ello, realizó un encargo al Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CEDEX) con objeto de elaborar un diagnóstico sobre el posible origen de las afecciones y un estudio de recuperación ambiental de la Ría que permita a Patrimonio Nacional diseñar un proyecto adecuado y acometer las actuaciones previstas en él sin poner en peligro la conservación de los ecosistemas que alberga la Ría.

En respuesta al encargo recibido, el CEDEX elaboró un informe que tenía como objetivos específicos: i. la caracterización hidrogeomorfológica y ecológica del ámbito de estudio; ii. la propuesta de medidas de restauración estructural y funcional acordes a las necesidades técnicas del proyecto (Fig. 2).

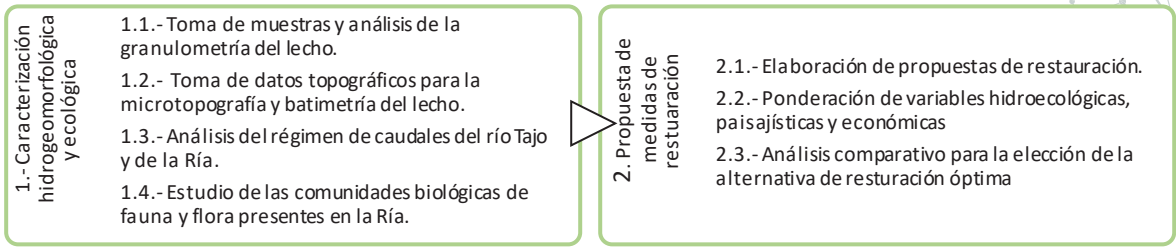


Figura 2. Esquema de la secuencia de acciones realizadas para la consecución de los objetivos del estudio. *Elaboración propia.*

2. Material y métodos

2.1 Ámbito de estudio

El ámbito de estudio se corresponde con el tramo de la Ría de Aranjuez comprendido entre el bocacaz del Puente de la Boticaría y el aliviadero de la Plaza Elíptica (Fig.3). Cabe destacar que se trata de un canal artificial naturalizado, por lo que no forma parte del Dominio Público Hidráulico (DPH), y tampoco está catalogado como masa de agua superficial. En consecuencia, las características geomorfológicas que se describen a continuación, no han tenido una influencia directa en la formación y estructura de esta corriente de agua, sino que hacen referencia a la zona en la que se encuentra el ámbito de estudio. La Ría está ubicada en la llanura de inundación del Tajo y se asienta sobre materiales sedimentarios detríticos de permeabilidad baja formados en el Cuaternario. Se trata de limos pardos, que lindan con gravas y arenas (material aluvial) por su margen izquierda. Esta litología hace posible que bajo el ámbito de estudio se localice una masa de agua subterránea “Aluvial del Tajo: Zorita de los Canes-Aranjuez”, que se encuentra en buen estado conforme al Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo (Real Decreto 1/2016, BOE nº 16, de 19 de enero de 2016).



Figura 3. Vista aérea del área de estudio. Los tramos de muro afectados por socavación en su base aparecen señalados en rojo. *Elaboración propia a partir de la ortofotografía de máxima actualidad del PNOA, extraída del IGN.*

El ámbito objeto de estudio tiene una longitud aproximada de 230 m y se ha tramificado a su vez en cuatro tramos (Fig. 4). Para ello se ha mantenido la subdivisión inicial propuesta por Patrimonio Nacional para llevar a cabo las obras de reparación del muro, efectuada con criterios físicos, como la diferencia de cota, las características del lecho, o el estado y delimitación de las márgenes, ya que se ha estimado que resultan igualmente significativos para estudiar las características hidráulicas de la Ría (granulometría, velocidad, etc.), y, en consecuencia, los tramos resultantes son adecuados para la consecución de los objetivos del estudio.

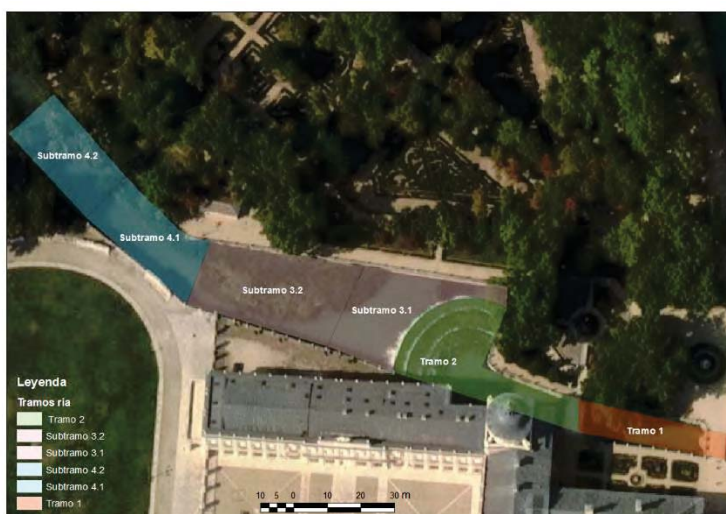


Figura 4. Tramificación del ámbito de estudio. *Elaboración propia.*

Los tramos 1 y 2 presentan el lecho enlosado en gran parte de su recorrido y están muy encajados entre los muros del Palacio y del Jardín de la Isla, por lo que la caracterización de la Ría se ha centrado en los tramos 3 y 4. A su vez, para el análisis de la granulometría estos tramos se han subdividido en 2 subtramos -dado que contaban con características estructurales y funcionales diferenciadas, relacionadas con diversas cuestiones hidráulicas, morfológicas y ecológicas-, con objeto de valorar si existían diferencias significativas en función de la situación en la Ría.

2.2 Caracterización ecohidrogeomorfológica

Con objeto de realizar la caracterización hidrogeomorfológica y ecológica del ámbito de estudio, se han analizado aquellas variables que son consideradas relevantes en el funcionamiento de la Ría y que podrían presentar una potencial influencia en el descalce del muro, y que a su vez son fundamentales en la conservación de los hábitats y valores ambientales y ecológicos de la Ría. Estos valores han contribuido a que la Ría se encuentre situada dentro de una Zona de Especial Conservación (ZEC), “Vegas, Cuestas y Páramos del Sureste de Madrid”, y en las proximidades de dos Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs), “Sotos y Carrizales de Aranjuez” y “Cortados y Cantiles de los Ríos Jarama y Manzanares”. Las variables analizadas en este estudio han sido: i. la granulometría del lecho, ii. la topografía del lecho, iii. el funcionamiento hidrológico de la Ría, y iv. las comunidades de fauna y flora presentes en ésta.

En cuanto al tamaño de los sedimentos que conforman el lecho de la Ría, se realizaron una serie de muestreos granulométricos siguiendo el método “*Pebble count*” de Wolman (1954).

Una vez realizados los muestreos se representaron las curvas granulométricas, y la distribución de frecuencias. A partir de ellas se evaluaron los parámetros estadísticos que permiten valorar la distribución del tamaño de sedimentos: i. la media; ii. el coeficiente de clasificación; iii. la asimetría y, iv. el coeficiente de Curtosis.

La toma de datos topográficos se ha realizado mediante un GPS diferencial (estación Leica GPS1200), con una estación fija y una móvil. Para conocer la microtopografía del terreno y la batimetría del lecho se tomó una nube de 261 puntos georreferenciados para el levantamiento de varios perfiles transversales y un perfil longitudinal del ámbito de estudio, así como para la delimitación de la zona donde se produce la erosión local en el lecho. El perfil longitudinal (Fig. 5) se compone de 50 puntos tomados en la margen izquierda donde se encuentra la línea de vaguada actual. Esto es debido a que la densidad de vegetación ha propiciado que el flujo se concentre en esta margen. A su vez, dada la imposibilidad de acceder a la zona donde se produce la erosión local del lecho (a la salida de la Cascada de las Castañuelas) con el nivel de agua que presentaba la Ría, se tomó un punto tras la Cascada para iniciar el perfil, y otro al final de la zona mencionada.

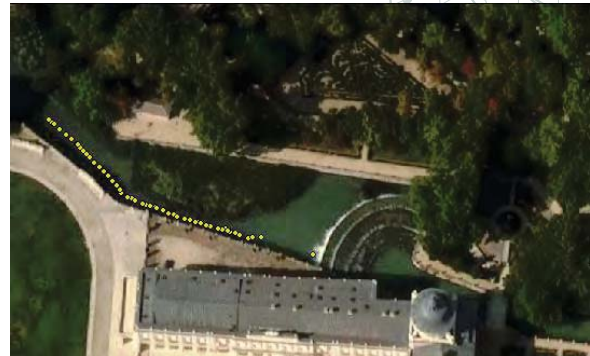
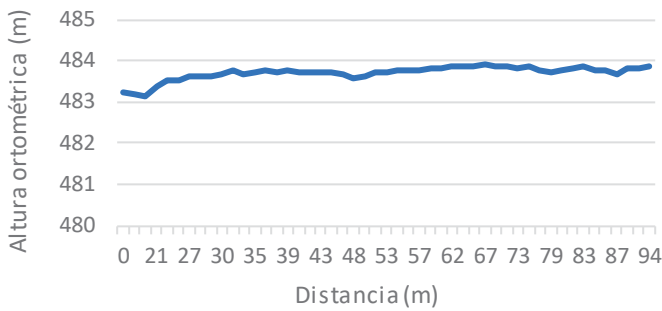
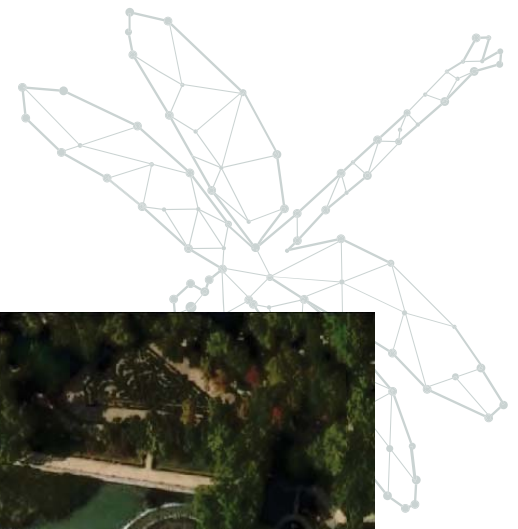


Figura 5. Perfil longitudinal del tramo de estudio de la Ría de Aranjuez.

Para entender el funcionamiento hidrológico de la Ría, es preciso analizar los patrones hidrológicos del río Tajo, ya que de ellos depende en buena medida el caudal de agua que entra a la Ría a través del azud de derivación. Por este motivo se han estudiado las series de datos de las dos estaciones de aforos más próximas, situadas aguas arriba de la derivación del Tajo, con la finalidad de establecer si la puesta en explotación del acueducto Tajo-Segura ha podido suponer alguna incidencia en las afecciones detectadas. La primera de estas estaciones (EA 3011 Aranjuez) se encuentra a 2.4 km aguas arriba del puente de la Boticaria y la siguiente (EA 3258 Embocador) a 6.8 km del mismo puente. Debido a la disponibilidad de datos (al menos quince años para el período pre-regulación y al menos quince años para el período post-regulación), se ha empleado el software IAHRIS 2.2 (Martínez Santa-María y Fernández Yuste, 2010) para evaluar el impacto del trasvase en el régimen de caudales. La caracterización hidrológica se ha realizado en dos niveles: el río Tajo en Aranjuez y la propia Ría. Sin embargo, debido a la inexistencia de datos de aforo en la Ría, se hizo una estimación del caudal tipo, entendido como aquel que fluye la mayor parte del tiempo por ella, conforme al grado de apertura habitual de las compuertas que regulan la entrada de agua al canal. La metodología empleada se basa en el método de los puntos (Remenieras, 1971), que calcula los valores de caudal a partir de los datos de velocidades y calados tomados en aforos directos. Estas mediciones se efectuaron en los tramos 3 y 4 del ámbito de estudio por concentrarse en ellos las principales alteraciones.

La identificación de las especies de fauna y flora se ha llevado a cabo mediante observación e identificación visual en las visitas de campo realizadas al ámbito de estudio, así como mediante la comparación y el análisis en gabinete de lo observado con lo establecido en el Plan de Gestión del espacio protegido (Decreto 104/2014), en la bibliografía de referencia, y en los estudios e informes previos realizados sobre esta zona. La evolución de la vegetación del cauce se ha estudiado a partir de las ortofotografías del Instituto Geográfico Nacional.

3. Resultados

Las curvas granulométricas muestran que el tamaño medio de los sedimentos que conforman el lecho de la Ría, oscila en el rango 22.6-64.0 mm, siendo el tamaño predominante 45.3 mm, lo que se corresponde con guijarros o cantos. No se aprecian diferencias significativas al comparar los subtramos muestreados con el conjunto completo de datos. El análisis de la granulometría por subtramos muestra que en los subtramos centrales (3.2 y 4.1) existe una menor variabilidad de tamaños en relación con los subtramos superior e inferior (3.1 y 4.2) como se puede observar en la figura 6. En otras palabras, el tamaño de los sedimentos es más heterogéneo en los extremos del tramo de Ría objeto de este estudio.

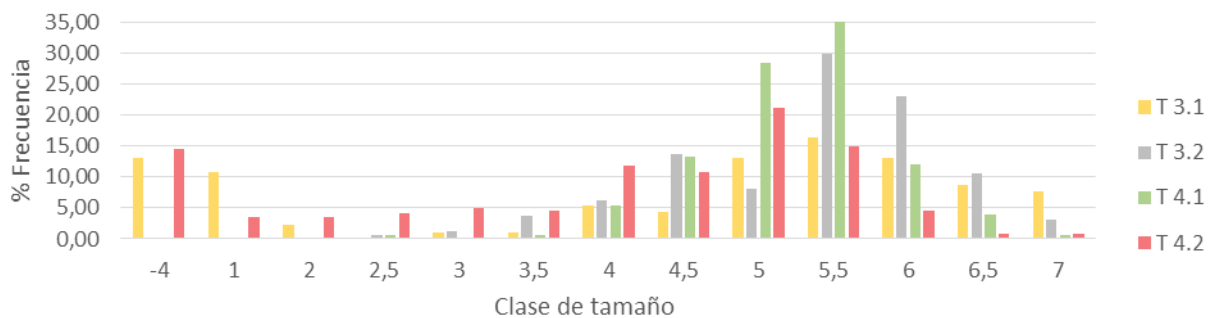


Figura 6. Comparativa de la distribución de frecuencias para los diferentes tamaños granulométricos en distintos subtramos de la Ría entre la Cascada de las Castañuelas y aguas abajo del aliviadero. *Elaboración propia.*

Los resultados de los parámetros estadísticos analizados, de acuerdo con la caracterización del sedimento fluvial establecida por Folk y Ward (1957), reafirman el resultado anterior. El coeficiente de clasificación indica que la distribución de sedimentos de los subtramos centrales (4.1 y 3.2) es muy pobre, o lo que es igual, la variabilidad de tamaños en esta zona es escasa. Asimismo, cabe destacar que durante los trabajos de campo se observó la existencia de un fenómeno de acorazamiento del lecho, lo que luego fue refrendado por las curvas granulométricas, que constataron una dominancia de tamaños gruesos (4-6) frente a tamaños más pequeños (2-3).

En lo que respecta a la topografía, el inicio del perfil longitudinal indica que existe un descenso notable de la cota que se corresponde con la zona de erosión local en el lecho. Tras este descenso la cota empieza a subir muy ligeramente y se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el recorrido. La pendiente calculada para el total del perfil es de 0.2 %. Por otra parte, los perfiles transversales apenas muestran diferencias de cota entre una margen y otra, ambas delimitadas por los muros de la Ría. La contrapendiente del perfil longitudinal no es coherente con la dinámica hidráulica de una corriente de agua, pero podría explicarse por la precisión que es posible alcanzar con el GPS diferencial (1-3 cm). Aunque este error suele ser despreciable en la mayoría de trabajos de campo, en este caso, dado que la cota es muy similar en todos los puntos tomados, se pueden producir variaciones considerables al calcular la pendiente. Asimismo, la altura medida toma como base el fondo y no la lámina de agua, que se acomoda al relieve y fluye aguas abajo cuando supera un determinado umbral. Además, la vegetación contribuye a que la lámina de agua se eleve y supere la pendiente positiva una vez pasada la zona del socavón formado en el lecho por la erosión local.

La inexistencia de datos hidrológicos de la Ría hizo necesario estudiar los patrones hidrológicos del río Tajo para entender el funcionamiento de aquella. Las series hidrológicas de las dos estaciones de aforos estudiadas se solapan entre los años hidrológicos 1979/80 y 1984/85. El coeficiente de correlación (0.93) para las dos series estudiadas, muestra que el caudal entre ambas estaciones de aforo en el período de solapamiento, se mantiene constante. Por este motivo, se han considerado como una única serie continua para la caracterización hidrológica. En el hidrograma de la figura 7, se observa un descenso notable de los caudales medios diarios que coincide con la puesta en explotación del acueducto Tajo-Segura (1980/81).

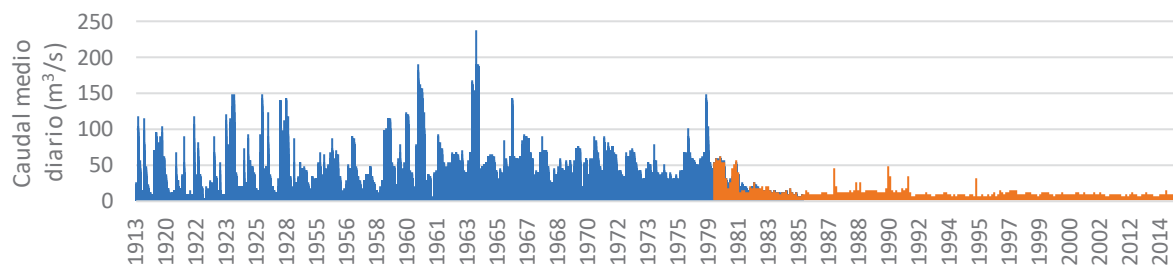


Figura 7. Hidrograma conjunto de las estaciones de aforo más próximas a la Ría, situadas en el río Tajo aguas arriba de la derivación. En azul está representada la serie hidrológica de la EA 3011 Río Tajo en Aranjuez, y en naranja la EA 3258 Río Tajo en Embocador.

La curva de caudales clasificados que se obtiene en el programa IAHRIS revela que los caudales en la subserie pre-regulación (1954/55-1979/80) son considerablemente superiores a los caudales de la subserie post-regulación (1980/81-2014/15). Esta diferencia es más notable en los caudales superiores y se suaviza hacia el final de la curva coincidiendo con los valores más bajos de caudal. Los índices de alteración hidrológica (IAH) más afectados para valores de caudal habituales son: la variabilidad de las aportaciones anuales, y la variabilidad y estacionalidad extremas. En menor medida se ven afectadas la magnitud de las aportaciones anuales y mensuales. Para valores extremos (sequías e inundaciones), los IAH expresan que el trasvase influye negativamente, afectando a la magnitud y duración de las avenidas, y en el caso de las sequías, a su duración y estacionalidad. La curva de caudales clasificados, y los valores de los IAH confirman la interpretación del hidrograma. El régimen de caudales y el estado actual de este tramo del río Tajo están muy alterados. Desde la entrada en funcionamiento del trasvase Tajo-Segura, los caudales del Tajo han sufrido una importante disminución y se mantienen desde entonces notablemente constantes. El funcionamiento hidrológico de la Ría está estrechamente vinculado a dos factores: i. el caudal circulante por el Tajo, y ii. la apertura de las compuertas situadas en el Puente de la Botica. Por tanto, los efectos del trasvase en el Tajo se reflejan en la Ría, cuyos



caudales son bajos y estables. Estas características condicionan la diversidad de hábitats y la composición de comunidades biológicas en la Ría, favoreciendo el crecimiento de vegetación helófitas en el cauce. Durante los trabajos de campo se ha constatado que el flujo de agua que atraviesa la Ría, tras pasar la Cascada de las Castañuelas, se concentra en la margen izquierda hasta el final del muro del Palacio, donde recupera su anchura, y recibe las aguas residuales del Palacio por el aliviadero. En el tramo 3, donde se concentran las medidas de restauración, el caudal aforado fue de 0.82 m³/s (aforo realizado el 14/09/2018). En general, en el conjunto del ámbito de estudio, el caudal medio es de aproximadamente 1 m³/s.

Dentro de las especies de fauna, destaca la presencia en la Ría de una numerosa comunidad piscícola. Se observaron numerosos ejemplares, principalmente en la Cascada de las Castañuelas y en sus inmediaciones, donde probablemente encuentran unas condiciones óptimas de oxigenación para sus ciclos biológicos y una elevada idoneidad de hábitat para diferentes procesos vitales. Conforme a las referencias bibliográficas y a las observaciones *in situ*, se presume que de las dos especies de barbos identificados en el río Tajo entre la presa de Bolarque y su confluencia con el río Jarama (*Luciobarbus bocagei* y *L. comizo*), podría tratarse de *Luciobarbus bocagei*, porque es frecuente en aguas de corriente lenta, buscando zonas de corriente más rápida para la época de freza. Se trata de una especie extendida en la cuenca del Tajo aunque su población se encuentra en regresión (Doadrio, 2011), fruto de la competencia con otras especies introducidas y de los obstáculos transversales que impiden o dificultan sus movimientos migratorios (Elvira et al. 2003). Las curvas de idoneidad de hábitat de *Luciobarbus bocagei* en función del sustrato (Martínez Capel, 1999) muestran que esta especie tiene preferencia por sustratos de mayor tamaño que el tamaño medio predominante en el lecho de la Ría (cantos medianos de 45,3 mm). No obstante, a pesar de no disponer del sustrato más adecuado, esta especie encuentra en la Ría unas condiciones favorables para su desarrollo. Otras especies identificadas en la Ría son la náyade *Potomida littoralis*, uno de los grandes bivalvos de agua dulce más amenazados, y la almeja asiática o *Corbicula fluminea*, especie invasora muy extendida en la cuenca del Tajo. La presencia de la náyade en la Ría refuerza la hipótesis anterior, debido a la elevada especificidad que existe entre esta especie y los peces del género *Luciobarbus*. Estas náyades emplean a los barbos como hospedadores para realizar la metamorfosis de uno de los estadios de su ciclo vital (Araujo et al., 2009).

En lo que respecta a la vegetación de la Ría, uno de los aspectos más destacados es la presencia de una extensa población de helófitas – espadañas (*Typha sp.*) y carrizos (*Phragmites australis*) en la margen derecha de la Ría. En esta zona el material del fondo es más fino y la velocidad de la corriente más lenta, lo que propicia el crecimiento de estas especies, que se han ido expandiendo desde 2006 hasta llegar a ocupar, en la actualidad, el 90% de la anchura del cauce en algunos puntos. Previamente al año 2006 no había vegetación en el canal, por lo que su aparición podría haber contribuido a la erosión del muro, al remansar el agua en la margen derecha y hacer que la mayor velocidad se concentre en el lado opuesto. A los efectos anteriores se puede sumar el de las filtraciones subterráneas procedentes de la galería de conducción de las aguas residuales del Palacio, detectadas por Patrimonio Nacional, que podrían haber acelerado el problema de desestabilización del muro.

4. Propuesta de medidas de restauración

Por otro lado, y teniendo en cuenta los datos obtenidos de granulometría, velocidades y calados en la caracterización del ámbito de estudio, se propusieron varias alternativas de actuación con objeto de frenar el avance del hundimiento del muro y contribuir a preservar el estado de conservación de la Ría. Estas alternativas plantean una serie de medidas de restauración fluvial que generan las características hidráulicas necesarias para crear microhábitats capaces de acoger a una amplia diversidad de comunidades biológicas y evitar el paulatino proceso de erosión. Las alternativas propuestas son las siguientes:

Alternativa nº 1: Protección de la base de los muros mediante gavión flexible. Estructuras de diversidad hidroecológica basadas en alineaciones continuas de grandes bolos.

Alternativa nº 2: Protección de la base de los muros mediante escollera vegetada. Estructuras de diversidad hidroecológica basadas en grandes bolos dispuestos de manera irregular.

Alternativa nº 3: Protección de la base de los muros mediante gavión flexible. Estructuras de diversidad hidroecológica basadas en hidrotecnias formadas por un conjunto de grandes bolos irregulares en número variable.

Alternativa nº 4: Protección de la base de los muros mediante escollera vegetada. Estructuras de diversidad hidroecológica basadas en hidrotecnias formadas por un conjunto de grandes bolos irregulares en número variable.

Para determinar cuál de estas alternativas resultaría óptima en relación a la máxima variabilidad ecológica posible, se elaboró un análisis comparativo de las diferentes alternativas desde el punto de vista hidroecológico y paisajístico. Así

mismo, para la elección final se tuvo en cuenta el coste de cada una de ellas. En este análisis se evaluaron las siguientes variables: i. la diversidad de calados, ii. la diversidad de velocidades, iii. la diversidad de formas y rugosidades, iv. la diversidad de hábitats, y v. la integración paisajística. El análisis comparativo de las alternativas de restauración (tabla 4) reveló que la alternativa óptima desde un punto de vista hidroecológico y paisajístico es la nº3.

Tabla 4. Comparativa de las alternativas de restauración planteadas.

VARIABLES	ALT. Nº1	ALT. Nº2	ALT. Nº3	ALT. Nº4
VARIABLES hidroecológicas	ALTO	BAJO	MEDIO/ALTO	MEDIO/ALTO
Integración paisajística	BAJO	BAJO	ALTO	BAJO
Coste de las obras	117119.83 €	186164.26 €	119713.33 €	191191.66 €
PONDERACIÓN FINAL	MEDIO/ALTO	BAJO	ALTO	MEDIO

5. Conclusiones

El desarrollo del estudio permitió obtener las siguientes conclusiones, enfocadas en todos los casos a la futura restauración ambiental de la Ría.

i. Debido al problema de hundimiento que presenta la Ría de Aranjuez en el muro de la margen izquierda, se hace necesario estudiar el funcionamiento hidroecológico de la Ría con objeto de paliar la evolución del descalce de la base del muro, así como el planteamiento de medidas de restauración para conservar los valores ambientales de la Ría.

ii. Los caudales circulantes por el Tajo a su paso por Aranjuez han disminuido notablemente a partir de la puesta en explotación del acueducto Tajo-Segura (1980/81). El funcionamiento hidrológico de la Ría depende directamente del comportamiento hidrológico del Tajo. En consecuencia, el caudal de la Ría ha experimentado una reducción del nivel de la lámina de agua, lo que ha podido contribuir al problema de erosión local en el lecho. Asimismo, la alteración del patrón hidrológico puede haber facilitado la expansión de vegetación helófitas en la margen derecha en las últimas décadas, reduciendo la anchura del canal y empujando el flujo hacia la margen izquierda. Por este motivo, se plantea eliminar o traslocar aguas abajo dicha vegetación, puesto que tiene función de refugio para diversas especies de fauna.

iii. La representación de comunidades biológicas de fauna y flora en el ámbito de estudio ha contribuido a la inclusión de la Ría en un espacio protegido. Destacan especialmente los barbos (*Luciobarbus bocagei*) y las náyades (*Potomida littoralis*), entre los que existe una elevada especificidad. Por ello, para preservar el estado de conservación de estas poblaciones se recomienda ejecutar las obras de restauración, respetando la época de reproducción y crecimiento de *L. bocagei* y *Potomida littoralis*.

iv. Con objeto de mantener la presencia de barbos en la Ría, se aconseja respetar el tamaño de sedimento predominante en la reposición del material del lecho que se lleve a cabo en cualquiera de las alternativas propuestas.

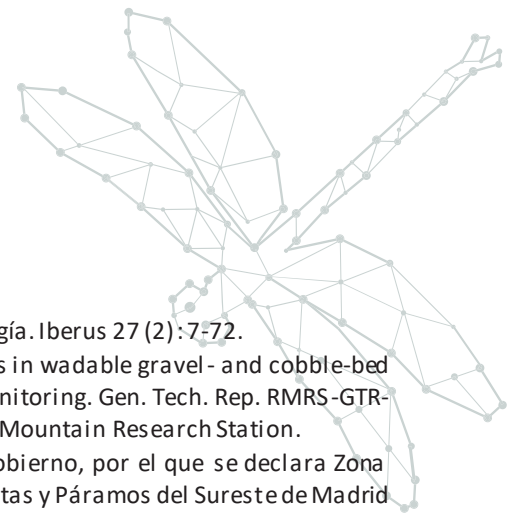
v. Entre las alternativas de restauración planteadas, se considera que la más idónea, desde un punto de vista hidroecológico y paisajístico, es la alternativa nº3, consistente en la instalación de gaviones flexibles, acompañados de hidrotecnias para la diversificación de calados y velocidades en la Ría que permitan la generación de microhábitats. Esta alternativa es la que presenta un mayor grado de integración física y ambiental en el entorno del Real Sitio de Aranjuez.

vi. Una vez ejecutada la alternativa de restauración, se sugiere llevar a cabo un seguimiento para conocer el efecto de las medidas sobre las características hidro-geomorfológicas y las comunidades biológicas existentes, valorando los siguientes parámetros: a. granulometría, b. topografía del lecho, c. régimen de caudales, d. evolución de la vegetación, e. composición y abundancia de fauna bentónica y f. composición, abundancia y estructura por edades de la ictiofauna.

vii. Las limitaciones existentes en cuanto al conocimiento de la dinámica hidromorfológica y ecológica del ámbito de estudio sugieren el interés que tendría la continuación de los análisis efectuados, y el desarrollo de nuevos estudios, durante los siguientes años, centrados en el funcionamiento conjunto del río Tajo y de la Ría de Aranjuez. Entre otras cuestiones, resultaría de especial relevancia conocer cuál es el patrón de incisión de los lechos de ambos cauces, el transporte sedimentario que se produce en ellos, y la respuesta biológica que puede seguir a la evolución hidrosedimentaria de este complejo sistema.

6. Referencias

Araujo R, Reis J, Machordom A, Toledo C, Madeira MJ, Gómez I, Velasco JC, Morales J, Barea JM, Ondina P y Ayala I.



2009. Las náyades de la península ibérica. Sociedad española de malacología. *Iberus* 27 (2): 7-72.
- Bunte K, Abt SR. 2001. Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Comunidad de Madrid. Decreto 104/2014, de 3 de septiembre, del Consejo de Gobierno, por el que se declara Zona Especial de Conservación el Lugar de Importancia Comunitaria, Vegas, Cuestas y Páramos del Sureste de Madrid y se aprueba su Plan de Gestión y el de las Zonas de Especial Protección para las Aves Carrizales y Sotos de Aranjuez y Cortados y Cantiles de los ríos Jarama y Manzanares. *Boletín oficial de la Comunidad de Madrid (BOCM) de 8 de septiembre de 2014, núm. 213. Pág: 336-487.*
- Doadrio I. 2001. Atlas y libro rojo de los Peces continentales de España. Departamento de Biodiversidad y Biología Evolutiva. Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC).
- Elvira B, Almodóvar A, Nicola GG. 2003. Ictiofauna del Tajo entre la presa de Bolarque y su confluencia con el río Jarama: catálogo, distribución y estado de conservación. In: Actas del Congreso sobre la Naturaleza en la provincia de Toledo, Diputación Provincial de Toledo, Toledo: 177-186.
- Folk RL, Ward WC, 1957. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27(1): 3-26.
- Gobierno de España. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro. *Boletín Oficial del Estado (BEO) núm. 16, de 19 de enero de 2016, págs. 2972-4301.*
- Martínez-Capel F, García de Jalón D. (1999). Desarrollo de curvas de preferencia de microhábitat para *Leuciscus pyrenaicus* y *Barbus bocagei* por buceo en el río Jarama (Cuenca del Tajo). *Limnetica*, 17: 71-83.
- Martínez Santa-María C, Fernández Yuste JA. 2010. IAHRIS 2.2 Índices de alteración hidrológica en ríos. Manual de referencia metodológica. Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones: CEDEX.
- Martínez Santa-María C, Fernández Yuste JA. 2006. Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales. Ministerio de Fomento, Centro de publicaciones: CEDEX.
- Martín-Vide, JP, 2007. Ingeniería Fluvial. Aspectos técnicos y medioambientales. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Remenieras G. 1971. Tratado de hidrología aplicada. Editores Técnicos asociados.
- Wolman MG, 1954. A method of sampling coarse bed material. *American Geophysical Union, Transactions*, 35: 951-956.