



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**PLAN DE ACTUACIÓN
PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO
DEL DELTA DEL EBRO**

2 de febrero de 2021



ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	5
2. INTRODUCCIÓN.....	12
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA.....	15
3.1. INTRODUCCIÓN.....	15
3.2. RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (ZARAGOZA). SEPTIEMBRE- OCTUBRE DE 1970 (CEDEX, 1971)	16
3.3. RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CEDEX, 1982)	17
3.4. EL MEDIO AMBIENTE HÍDRICO EN EL DELTA DEL EBRO (CEDEX, 2002; INÉDITO)	19
3.5. ESTUDIO DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA Y BATIMETRÍA DE PRECISIÓN DEL EMBALSE DE RIBARROJA (GRUPO FLUMEN, 2009)	19
3.6. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS LODOS ACUMULADOS EN LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2011)	21
3.7. NIVELACIÓN DE PRECISIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2012).....	22
3.8. EVALUACIÓN PRELIMINAR SOBRE LAS POSIBILIDADES DE RESTAURACIÓN DEL TRÁNSITO SEDIMENTARIO EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2018)	23
3.9. RESUMEN Y CONCLUSIONES	24
4. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA.....	26
4.1. INTRODUCCIÓN.....	26
4.2. REEVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INICIAL DEL EMBALSE DE MEQUINENZA.....	26
4.3. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 1982	27
4.4. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 2012	30
4.5. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTE DE LA TASA DE SEDIMENTACIÓN.....	33
4.6. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTES HIDROLÓGICOS	34
4.7. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DE LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA	38
4.8. RESUMEN.....	40
5. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA.....	42
6. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO.....	46
6.1. TASAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO SIN EMBALSES.....	46
6.2. TASAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO CON EMBALSES	48
7. CONCLUSIONES SOBRE LA CARACTERIZACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.	51
8. ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD ASOCIADA A LA POSIBLE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBARROJA- FLIX.	54
8.1. CONDICIONANTES A LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA- RIBARROJA – FLIX.....	54
8.2. COMPLEJIDAD DEL VACIADO DEL EMBALSE DE RIBARROJA.	56
8.3. CONCLUSIONES SOBRE LA COMPLEJIDAD DEL MOVILIZADO DE LOS SEDIMENTOS EN AMBOS EMBALSES.	64
9. RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS CONTROLADAS EN EL RÍO EBRO Y GESTIÓN DE LOS DESAGÜES DE FONDO DE LOS EMBALSES	65



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

10. ESTUDIOS DE I+D+i A REALIZAR PARA LA MEJORA DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DERIVADA DEL RIO EBRO.....	66
10.1. ESTUDIO DE LA POSIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE SEDIMENTOS Y SU TRANSPORTE EN LA RED FLUVIAL AGUAS ABAJO DE FLIX Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN LAS PRESAS DE CIURANA, MARGALEF Y GUIAMETS.	68
10.2. ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN SOBRE BATIMETRÍAS Y SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y FLIX.....	70
10.3. PROPUESTAS DE ESTUDIOS I+D+i PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE LOS SEDIMENTOS Y BASES PARA LA ELABORACIÓN DE PROTOCOLOS DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS.	72
11. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DEL DELTA DEL EBRO: IMPULSO A LA RED RIADE Y CREACIÓN DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO DEL DELTA DEL EBRO.	75
12. REFERENCIAS	84



1. RESUMEN EJECUTIVO

Este documento, en cuya elaboración ha participado el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Dirección General del Agua resume el estado del conocimiento en materia de dinámica sedimentaria del río Ebro, así como las líneas de actuación futuras para la mejora de su gestión, que pretende ser un punto de partida para lograr una acción coordinada entre todas las administraciones y los agentes implicados para lograr una mejora del tránsito sedimentario del río Ebro y la mejora con ello de los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Este Plan de actuación tiene como objetivo central el impulso a aquellos aspectos de la gestión del régimen hidrológico y sedimentario que pueden colaborar con la protección y mejora de la gestión del Delta del Ebro que son responsabilidad de la Dirección General del Agua y de la Confederación Hidrográfica del Ebro, en coordinación con la Dirección General de la Costa y el Mar, en el marco del “Plan para la protección del Delta del Ebro”. Este Plan está siendo redactado con el apoyo del CEDEX, e incluye un análisis morfológico y medioambiental del Delta, un estudio del clima marítimo en torno al Delta, una caracterización de la dinámica litoral y fluvial, así como de los previsibles efectos del cambio climático y de la evolución de la costa (históricamente y recientemente) y de los probables problemas en las playas y su evolución futura.

Ambas Direcciones Generales están trabajando de forma conjunta, para desarrollar a corto, medio y largo plazo distintas acciones que, fomentando el conocimiento y la transparencia, permitan paliar o gestionar los problemas derivados de la gestión del Delta en la actualidad y ante los previsibles efectos del cambio climático. En el desarrollo de estas acciones se tendrán especialmente en cuenta los trabajos realizados con anterioridad por todas las administraciones, y en especial, con la experiencia y coordinación de la Generalitat de Cataluña y en especial, de la Agencia Catalana del Agua.

La gestión del Delta del Ebro es compleja y necesita de un sólido equilibrio, basado en los distintos planes de actuación, tanto derivados de la gestión del litoral, como de la gestión de sus espacios naturales y de los usos del Delta -en especial de la pesca y el regadío- y de la gestión hidrológica del río Ebro y afluentes, más afectados aún con el cambio climático.

En este documento se proponen una serie de medidas a partir de lo indicado en el Esquema de Temas Importantes informado por el Consejo del Agua de la cuenca del Ebro el 30 de diciembre de 2020, como primer hito del tercer ciclo del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro, cuyo objetivo esencial es mejorar la resiliencia del delta del Ebro y su costa, de especial actualidad tras su inundación por la tormenta Gloria, a finales de enero de 2020.

Según diversos estudios consultados, por ejemplo, los recientemente realizados por la Oficina Catalana del Canvi Climàtic y por la propia Agencia Catalana del Agua (en



particular, por ejemplo, puede destacarse la reciente exposición virtual “El Delta del Ebro y el cambio climático” organizada por dichas instituciones con la colaboración del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña), el cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de los temporales, y una mayor temperatura y acidificación. En los últimos años se ha registrado un aumento del nivel del mar de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea, por efectos regionales. Respecto al oleaje, en las últimas 6 décadas se han observado importantes cambios tanto en su intensidad como en su dirección. Las zonas más vulnerables son la parte exterior costera, el cauce inferior o zona estuárica, las lagunas y las bahías.

En este Plan de actuación que se presenta en este documento y que formará parte del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro del tercer ciclo, establece las siguientes conclusiones:

CARACTERIZACIÓN ACTUAL DE LOS SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA:

Respecto al embalse de Mequinenza:

1. La capacidad inicial del embalse de Mequinenza, hasta la cota 121.15 msnm, se ha reevaluado en 1483.29 hm³ (frente a los 1530 hm³ teóricos). Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la práctica totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.
2. En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza, en el año 1982 los estudios batimétricos del CEDEX lo estimaban en 95 hm³, la CHE en 2012 lo calculaba entre 75 y 100 hm³ y para la elaboración del presente plan de actuación, el CEDEX estima que en 2012 ascendería a 211 hm³, y que en la actualidad (2020) estará en torno a los 240 hm³.

Las diferencias entre todos estos valores recomiendan ser prudentes en su interpretación y realizar los estudios complementarios indicados a continuación, para precisar con mayor rigor los valores reales.

3. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012.
4. En el lapso de tiempo de 30 años, desde 1982 a 2012, se acumularon en los últimos 42 km de la cola del embalse 46,28 hm³, totalizando 84,21 hm³, desde 1966 hasta 2012. Se estima que en el resto del embalse de Mequinenza se depositaron 73,97 hm³, totalizando 116,25 hm³ en el periodo 1982-2012. Si acumulamos a estos sedimentos los 95,42 hm³ del periodo anterior a 1982, totalizan 211,67 hm³.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

5. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4,36 Mt/año, equivalente a 3,87 hm³/año.
6. Los sondeos realizados entre los puntos kilométricos 72 y 90 del embalse en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que, de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,7 hm³ son de arena y 3,7 hm³ son de grava.
7. La información batimétrica disponible hoy en día no permite conocer con certeza la sedimentación existente en Mequinenza. En el presente estudio se ha realizado un análisis de la información disponible, al objeto de calibrar un modelo simplificado de su evolución sedimentaria. Es por ello necesario realizar nuevos estudios batimétricos para disponer de valores más precisos que están ya en fase de licitación por parte de la Dirección General del Agua.

Respecto al embalse de Ribarroja:

8. La batimetría de 2007 incluida en el “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja” (Grupo Flumen, 2009) indica que el volumen de sedimento retenido estaba, en esa fecha, entre 13 y 16,6 hm³.
9. Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja se encuentra entre 15 y 19,3 hm³. No obstante, la información batimétrica disponible no permite conocer con plena certeza la sedimentación existente en el embalse.
10. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a la mitad, 0.26 Mt/año, en el período 2004-2016.
11. No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse, por lo que al igual que en Mequinenza, se encuentra en licitación los trabajos para la caracterización adecuada de los sedimentos existentes.

En cuanto al tránsito de sedimentos hacia el curso bajo del Ebro:

12. En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0,37 Mt/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0,83 Mt/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.



13. En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.

LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA:

14. La CHE ha evaluado en el estudio “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”, la posibilidad de restaurar el tránsito sedimentarios en la zona, llegando a la conclusión de que “Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix)”. La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”.
15. La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante la técnica hidrodinámica de lavado es la actuación más factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud.
16. Puede considerarse como el punto más crítico la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós, al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja, que les da respaldo de seguridad.
17. Los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse.
18. Dependiendo de la duración del vaciado, pueden producirse graves efectos en el espacio natural de los Aiguabarreig Cinca-Segre.
19. Si la operación de lavado fuera exitosa, existía un riesgo elevado de una acumulación excesiva de sedimentos a lo largo del cauce aguas abajo que afecte a numerosos elementos: espacios naturales y ecosistemas acuáticos, tomas de abastecimiento y regadíos, navegación recreativa.



EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR EL RÍO EBRO HASTA EL DELTA DEL EBRO Y EL PAPEL DE LA CUENCA AGUAS ABAJO DE FLIX.

20. La movilización de los sedimentos en el río Ebro desde el embalse de Flix hasta su llegada al Delta del Ebro debe ser estudiada con profundidad. Es necesario conocer detalladamente la geometría del río Ebro y el estado del lecho del mismo, de forma que puedan realizarse modelos numéricos y ensayos que permitan conocer la capacidad de transporte del río y los tiempos de tránsito del sedimento hasta su llegada al Delta.
21. Es necesario igualmente estudiar la cuenca aguas abajo de Flix, no solo como una posible fuente de sedimentos, sino también como ensayo piloto de metodologías que puedan aplicarse posteriormente al río Ebro.
22. Igualmente, es importante el estudio de los azudes y otros obstáculos existentes en el río Ebro y afluentes, para, en su caso, mejorar la continuidad fluvial y favorecer el transporte de sedimentos asociado, de forma que se facilite el tránsito sedimentario y se optimicen los tiempos de llegada de los sedimentos al Delta.
23. Existen ya experiencias positivas, en especial las incluidas en el proyecto Life Ebro ADMICLIM, en el que se han realizado varias pruebas piloto de inyección de sedimento en el tramo final del río Ebro y en la red de canales de riego del Delta, cuyos resultados y experiencias deben ser la base de las acciones futuras.
24. Las crecidas controladas del río Ebro deben desarrollar un relevante papel en este proceso, como fuente esencial de energía para la movilización del sedimento futuro, pero por el contrario, deben ser compatibles con los usos del suelo y con el equilibrio del lecho del río.

RESUMEN DEL PLAN DE ACTUACION PREVISTO:

A partir de la información anteriormente citada, se presentan las siguientes actuaciones a ejecutar en los próximos meses:

1. Caracterización cartográfica y sedimentaria de la cuenca aguas abajo de Flix. Se encuentra ya contratado la realización de estudios de detalle de la caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Ciurana, Guiamets y Margalef y de sus cauces asociados, como posibles casos piloto para el estudio de la circulación de sedimentos hasta el Delta del Ebro.
2. Cartografía de detalle del eje el Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro. Se encuentra ya contratado la realización de la cartografía de detalle del eje del Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro, incluyendo la granulometría y estado



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

del sustrato del río, de forma que permita una adecuada modelización matemática del transporte de sedimentos a lo largo del eje del Ebro y sus afluentes.

3. Cartografía del embalse de Mequinenza y caracterización de sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja. Igualmente, en estos momentos está en licitación la realización de una batimetría actualizada de Mequinenza (en Ribarroja recientemente se ha realizado una nueva batimetría por el titular del embalse) y la caracterización del estado de los sedimentos, volumen y granulometría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.
4. Modelación hidrodinámica del tránsito de sedimentos desde los 5 embalses estudiados hasta el Delta del Ebro. Con toda esta información, el CEDEX procederá, con el asesoramiento de distintas universidades y expertos, a realizar los estudios hidrodinámicos necesarios para valorar la posibilidad de estudiar con detalle alternativas que permitan mejorar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, tanto de la cuenca propia como de los embalses aguas arriba, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico, y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puede producir contaminación de los sedimentos en esta zona, considerando además la posibilidad de mejorar el régimen de las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix, para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido, así como continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro. En estos estudios se tendrán en cuenta de manera especial aquellos trabajos similares que haya realizado con anterioridad la Agencia Catalana del Agua u otros organismos de la Generalitat, garantizando la coordinación necesaria para evitar duplicidades y avanzar sobre el conocimiento y la experiencia existente.
5. Estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.
6. Diseño de un protocolo de gestión de los sedimentos. A partir de los resultados anteriormente citados, y con todas las experiencias existentes, se procederá a redactar un protocolo de actuación que establezca un marco técnico científico de actuación que permita la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro. Este protocolo deberá basarse en pruebas y ensayos piloto que permitan buscar metodologías eficaces y que minimicen los efectos económicos y ambientales de estas actuaciones.
7. Creación del Observatorio Hidrológico del Delta del Ebro, puesto que es imprescindible recuperar y mantener un sistema de seguimiento y monitorización de todos los datos hidrológicos del Delta del Ebro, a través de la potenciación de la RIADE y realización de estudios para medir la subsidencia con datos empíricos o a partir de las imágenes de satélite y con ello, dotarnos



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

de herramientas técnico científicas coordinadas entre la Dirección General del Agua, Dirección General de la Costa y el Mar, Confederación Hidrográfica del Ebro, la Generalitat de Catalunya, en especial a través de Agencia Catalana del Agua, que permitan monitorizar la evolución del Delta y el impacto tanto del cambio climático como de las medidas que se van implantando.

Y que todo ello colabore en el resto de medidas incluidas en el ETI, en el nuevo Plan Hidrológico del Ebro y en el Plan de Protección del Delta del Ebro, y con ello, poder implantar medidas que permitan además dar seguimiento a los trabajos y recomendaciones elaboradas en el marco de la “Taula de consens pel Delta”.



2. INTRODUCCIÓN

El esquema de temas importantes (ETI) del tercer ciclo de la planificación hidrológica de la cuenca plantea la mejora de la resiliencia del delta del Ebro y su costa, de especial actualidad aún tras su inundación por la tormenta Gloria a finales de enero de 2020.

Tal y como se recoge en el ETI, el crecimiento del delta del Ebro se relaciona directamente con un régimen hidrometeorológico asociado con avenidas frecuentes, y con una evolución particular de los usos del suelo y las masas forestales en la cuenca, como consecuencia de la actividad humana. Hoy en día el delta es un espacio muy antropizado, donde se ha estimado una pérdida de los hábitats originales más continentales (marismas de tipo *Cladium*, praderas salinas y vegetación ribereña) del 90% mientras que en los hábitats más costeros (lagunas costeras, ambientes arenosos, tipo *Salicornia*) la reducción sería de alrededor del 70%.

El cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de temporales, y una mayor temperatura y acidificación. Se ha registrado un aumento del nivel del mar de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea, por efectos regionales. Respecto al oleaje, en las últimas 6 décadas se han observado importantes cambios tanto en su intensidad como en su dirección. Las zonas más vulnerables son la parte exterior costera, el cauce inferior o zona estuárica, las lagunas y las bahías.

La existencia de periodos secos o cálidos, conjuntamente con las actuaciones agroforestales humanas, han sido determinantes en la tasa de desarrollo del delta, a lo que se ha unido la construcción de embalses de regulación para satisfacer el desarrollo socio-económico de la demarcación. Todos estos factores contribuyen a disminuir la génesis de sedimentos en la cuenca y, por tanto, han afectado a la dinámica sedimentaria del delta, un medio frágil en constante adaptación a las fuerzas que lo configuran.

Por otro lado la invasión de especies exóticas invasoras se vincula a flujos globales, destacando los asociados a los medios de transporte, a la elevada actividad de navegación recreativa y pesca, aunque la causa concreta de la presencia de cada una de las especies invasoras es de muy compleja determinación. Recientemente se ha cuantificado en 200 el número de especies exóticas invasoras presentes en el Delta del Ebro.

De cara al tercer ciclo de planificación hidrológica, el ETI informado por el Consejo del Agua de la cuenca del Ebro el 30 de diciembre de 2020, plantea las siguientes actuaciones:

1. Plantear una propuesta piloto de zona de amortiguamiento en la franja costera del delta del Ebro para valorar su efectividad ante el incremento del riesgo de inundación del mar.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

2. Continuar con el mantenimiento y explotación de las estaciones priorizadas de la red RIADE y valorar la posibilidad de poner en funcionamiento alguna nueva estación.
3. Evaluar el impacto de la modernización de las instalaciones de riego del delta del Ebro.
4. Continuar con los estudios de I+D+i relacionados con el delta del Ebro. Entre ellos destacan: i. los estudios para valorar la posibilidad de recuperar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puede producir contaminación de los sedimentos en esta zona, especialmente en Flix; ii. los estudios para medir la subsidencia con datos empíricos entre los que destaca realizar una medición de los puntos de la red topográfica creada con la RIADE (Acuamed, 2012); y iii. los estudios de subsidencia a partir de las imágenes de satélite. Todo esto tiene su concreción en el documento preliminar del “Plan para la protección del delta del Ebro”.
5. Continuar e intensificar las campañas de prevención, seguimiento, control y erradicación de especies exóticas invasoras del delta y la realización de estudios de I+D+i.
6. Ejecución de los proyectos relacionados con el saneamiento y depuración de los núcleos de población del delta: Poblenou, Deltebre, urbanizaciones de Riumar y Eucaliptus.
7. Plantear posibles medidas de reducción del retroceso de costa en algunos sectores del hemidelta izquierdo, desde la playa de las Marquesas a Riumar, y en el hemidelta derecho, barra del Trabucador e Illa de Buda.
8. Plantear medidas para ralentizar la colmatación de la bahía del Fangar y para mejorar la calidad de sus aguas desde el punto de vista de la consecución del buen estado, de manera compatible con la producción marisquera que en ella existe.
9. Ejecución de caminos de guarda de protección perimetral en las bahías de los Alfaques y el Fangar.
10. Ejecución de una ruta fluvial verde en la margen izquierda del río entre Tortosa y la desembocadura.
11. Creación de una zona de amortiguamiento en la zona de “Bombita” en el frente costa-laguna, interacción de masas de agua de laguna y costera.
12. Desarrollar nuevas propuestas de gestión de algunos humedales del delta del Ebro para mejorar sus condiciones ambientales (CGRCDE-CRSAE, 2017).



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

13. Mantener e incluso potenciar los medios de coordinación de los programas de medidas de la planificación de las estrategias marinas y de la planificación hidrológica. Plantear propuestas de soluciones para reducir el impacto de los plásticos en la demarcación marítimo-balear. Continuar con las campañas “Por un delta limpio”.
14. Dar seguimiento a los trabajos y recomendaciones elaboradas en el marco de la “Taula de consens pel delta”. En la valoración de sus conclusiones deberán de contemplarse los criterios de la Administración costera, ya que su incidencia resulta especialmente relevante.
15. Continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro y su gestión eficaz, para evacuar los sedimentos que son susceptibles de ser movilizados mediante este mecanismo.
16. Continuar con las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido.
17. Tener en consideración los ecosistemas marinos y costeros asociados a la desembocadura para la determinación del caudal ecológico de la desembocadura del río Ebro.

Este documento recoge el plan de acción a seguir para desarrollar coordinadamente con el resto de autoridades y, en especial, con la Dirección General para la Costa y el Mar y la Generalitat de Cataluña en las medidas relacionadas con el régimen sedimentario del Delta, en especial la segunda y la cuarta anteriormente citadas.



3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

3.1. Introducción

Durante los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios técnicos, promovidos fundamentalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro y por la Dirección General del Agua, encaminados a caracterizar el tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro y en las entradas en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. En concreto, los principales estudios desarrollados han sido los siguientes:

- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)
- Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (Dirección General de Costas, 1978)
- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)
- El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)
- Balanç de sediment del tram final del riu Ebre (ACA, 2009)
- Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Flumen, 2009). Este estudio incluye una batimetría de Ribarroja realizada en 2007
- Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)
- Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008 (Tragsatec, 2012). Este estudio incluye una batimetría del embalse de Mequinenza realizada por la empresa EcoHydros en 2008
- Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)
- Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del Tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

De la relación de los anteriores estudios, los que mayor valor tienen para la caracterización de los sedimentos, en el bajo Ebro y en el entorno de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, son los que incluyen estudios batimétricos.

En una Nota Técnica emitida en mayo de 2020 elaborada por el CEDEX se incluyó un resumen de los principales contenidos de todos estos trabajos; en este documento únicamente se han recogido las conclusiones de los trabajos utilizados en los estudios realizados por el CEDEX.

Además de estos estudios técnicos, durante los últimos 50 años la comunidad científica ha realizado un gran número de publicaciones en revistas técnicas y de



presentaciones en congresos científicos, en relación con el tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Muchos de estos trabajos han sido tenidos en cuenta en el desarrollo de los anteriores estudios.

Por último, para un mejor seguimiento del contenido de este apartado (y de todo este documento) en el esquema de la figura adjunta se ha representado la ubicación de las principales infraestructuras, emplazamientos y cursos fluviales del entorno del bajo Ebro que intervienen en el presente estudio.

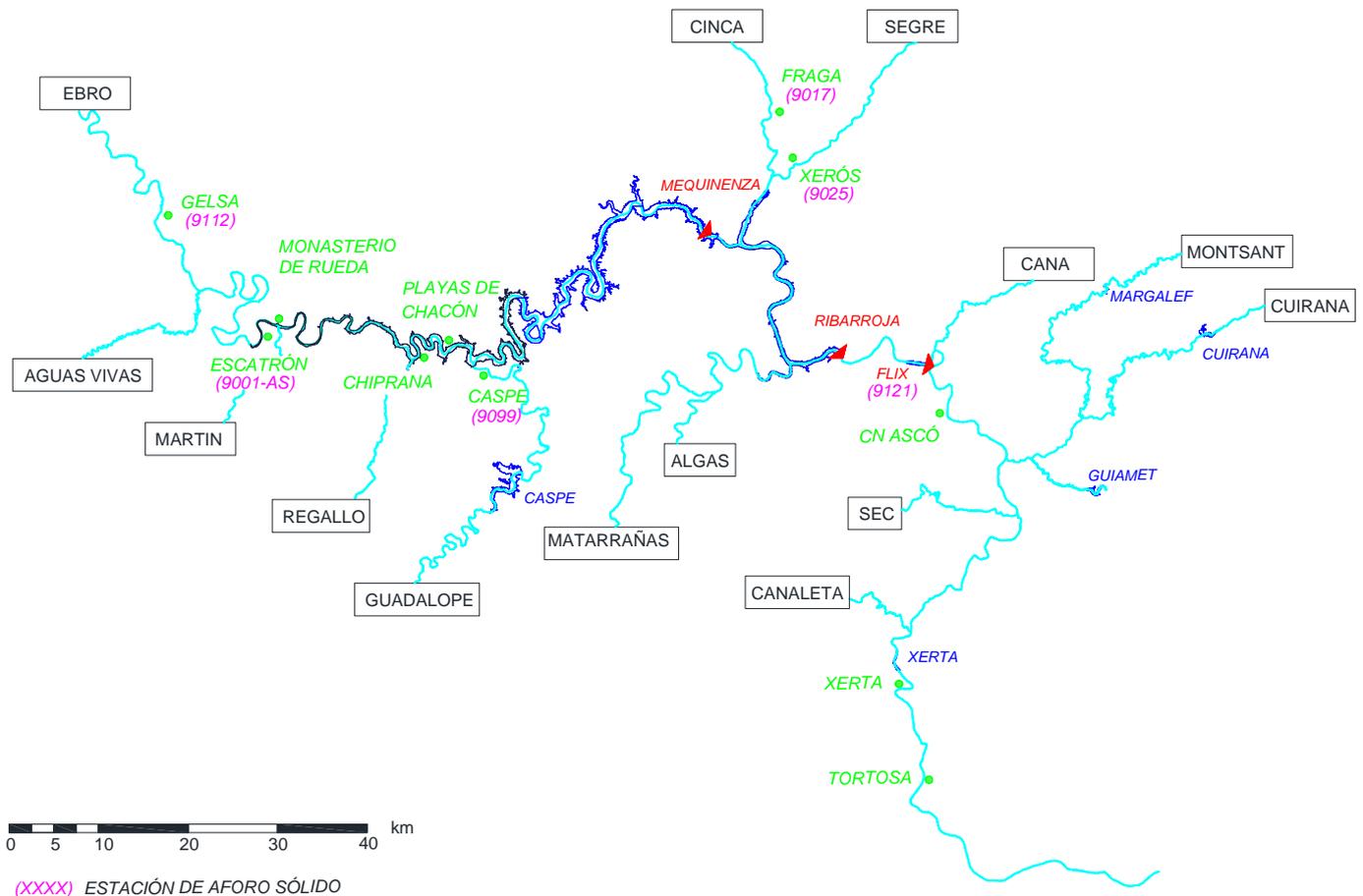


Figura 1. Esquema de la zona de estudio del río Ebro. Incluye indicaciones de los principales afluentes y embalses.

3.2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)

Este estudio realizado por el CEDEX tras los primeros años de puesta en servicio del embalse de Mequinenza tenía como fin evaluar su capacidad. Para ello se realizó un vuelo fotogramétrico y una batimetría con sonar, con la que se obtuvieron perfiles transversales. La figura 2 muestra los tramos que se emplearon para su cubicación. La capacidad obtenida con el embalse a la cota 121.15 msnm fue de 1565.91 hm³, frente a los 1530 hm³ de capacidad teórica.



En el presente trabajo se han agrupado algunos de estos tramos en un total de 51, cuyas características (longitud de los tramos y volúmenes) pueden verse en la Nota Técnica de mayo de 2020.

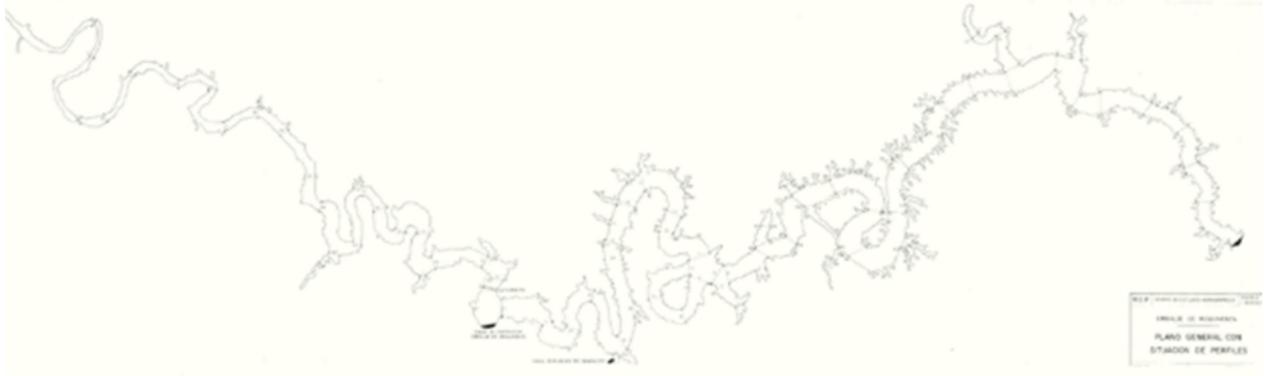


Figura 2. Tramificación del embalse de Mequinenza

3.3. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)

Los trabajos de campo de este nuevo estudio consistieron en un vuelo fotogramétrico y un levantamiento batimétrico con sonar, que permitieron restituir las curvas de nivel del vaso. Estas curvas fueron digitalizadas posteriormente y se dispone de ellas en formato vectorial (figura 3). En este trabajo se estimó que la sedimentación acumulada en el período 1966-1982 fue de 92 hm³.

Para facilitar el análisis comparativo que se mostrará posteriormente en el apartado 3 de este documento, en los estudios recopilados en la Nota Técnica de mayo de 2020 se cubió la capacidad de los mismos tramos indicados en la figura 2, concluyendo que la capacidad de embalse a la cota 121.15 msnm es de 1387.87 hm³.

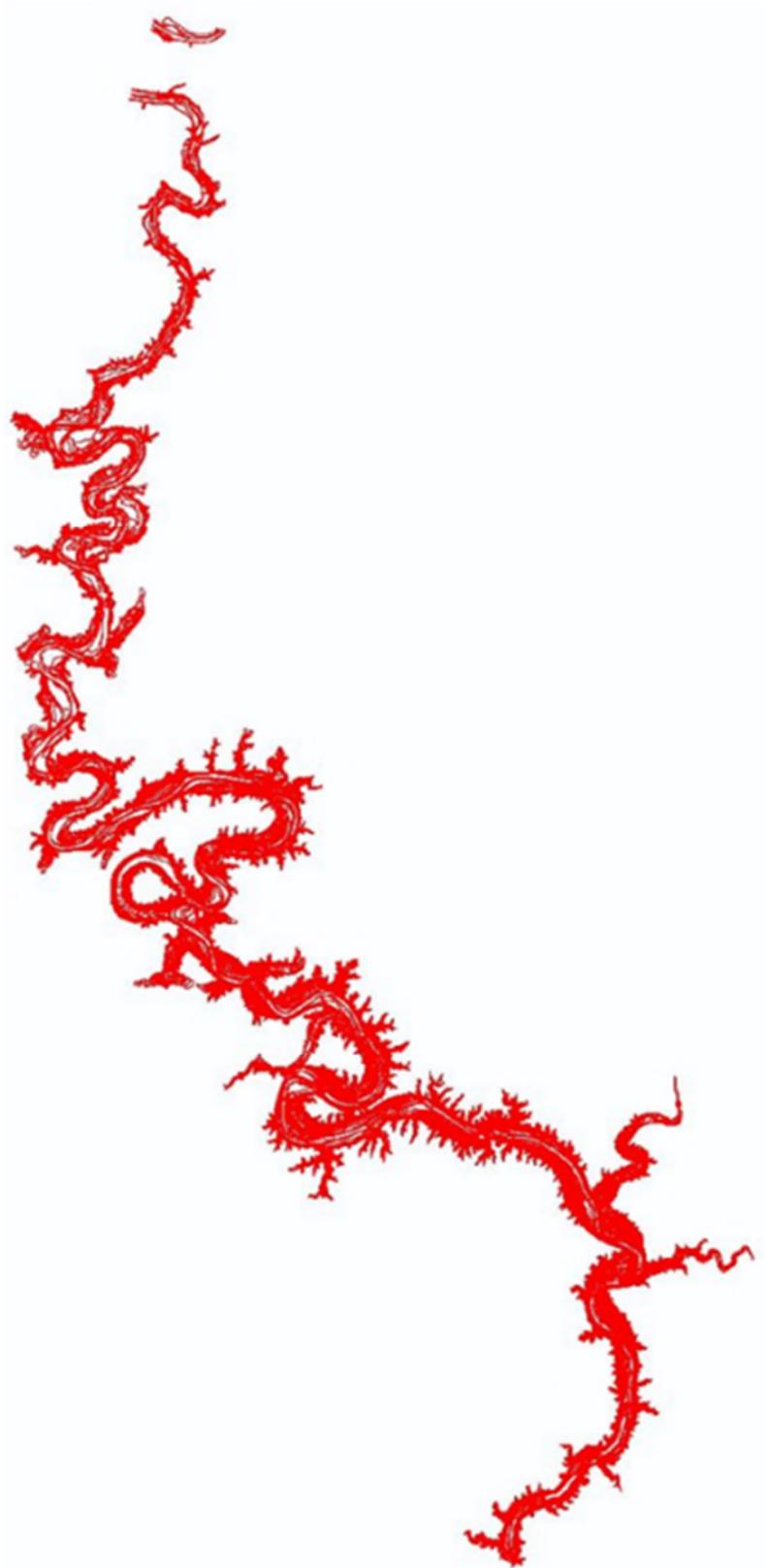


Figura 3. Curvas de nivel de la batimetría CEDEX del embalse de Mequinenza (1982)



3.4. El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)

En el marco de la Documentación Técnica elaborada para la realización del Plan Hidrológico Nacional, el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX redactó en 2002 el documento “El medio ambiente hídrico en el delta del Ebro” en el cual se estudiaron los aportes sólidos al Delta del Ebro, entre otros aspectos. Este estudio contiene aportaciones propias que son relevantes para el presente trabajo. Al ser un documento interno de carácter inédito, en la Nota Técnica de mayo de 2020 se transcribió íntegramente el apartado de “Aportes Sólidos en el Delta” para facilitar su consulta.

La estimación de los aportes sólidos del río (tanto en la situación natural o de referencia como en la situación actual con los embalses existentes en la cuenca), se realizó en este documento mediante dos procedimientos. En primer lugar, analizando los registros batimétricos de sedimentación de los embalses y, en segundo lugar, mediante los registros de aforos sólidos.

Del primero de los análisis se concluye que se han producido aterramientos significativos en todos los embalses de la cuenca. Y que en la situación real (con embalses), en Mequinenza los aterramientos casi alcanzan los 7 Mt/año, mientras que los que recibe el embalse de Ribarroja, y que provienen fundamentalmente de la cuenca no controlada del Segre, son del orden de 1,35 Mt/año. Finalmente estima los aportes en Tortosa en unos 0,2 Mt/año. Además indica que, en los embalses donde se ha realizado estudios sedimentológicos, el porcentaje de arenas es inferior al 10 % en la mayoría de los embalses.

Mediante el registro de sedimentación de los embalses, se obtuvo un mapa de aportes sólidos por unidad de superficie (t/ha/año) generados en la cuenca del Ebro. Esto permite calcular que en la situación de referencia -sin embalses- la aportación de sedimentos al delta del Ebro sería de 14 Mt/año, de los que 9 Mt/año corresponderían a la cuenca del Ebro en el punto en donde se sitúa el embalse de Mequinenza y del orden de 5 Mt/año a la cuenca del Segre. Los aportes generados por unidad de superficie en la cuenca del Segre serían, por tanto, más del doble de los generados en la cuenca del Ebro vertiente a Mequinenza, lo que tiene su explicación en la mayor magnitud de las crecidas del Segre, en comparación a las del resto de la cuenca.

Como resultado del análisis realizado con aforos sólidos, se concluyó que, con carácter general, este procedimiento proporciona valores muy inferiores a los obtenidos a partir de las batimetrías (los sólidos en suspensión en el Ebro y en el Segre son por este método del orden de 0,8 y 0,4 Mt/año). De acuerdo con este documento, la causa de esta diferencia reside en que las campañas de aforo no se realizan durante los episodios de avenida, donde las cargas de sedimento son mucho mayores.

3.5. Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Grupo Flumen, 2009)

Este estudio realizado por el Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña, analizó en detalle el transporte de sedimentos en el entorno del embalse de Ribarroja



en el periodo comprendido entre el 25/11/1997 y el 19/09/1999. Desde un punto de vista de aportación de caudales, este periodo puede considerarse moderadamente seco tanto para el río Ebro como para el Cinca y el Segre. Solo se presentó una avenida (diciembre de 1997), que puede calificarse de moderada: caudales medio diarios de 1423 m³/s en el Ebro, 890 m³/s en el Cinca y 974 m³/s en el Segre. Las principales conclusiones alcanzadas fueron:

1. Los embalses de Mequinenza y Ribarroja retienen la totalidad del transporte de fondo y la mayor parte del transporte sólido en suspensión, estimando que el transporte de fondo en la entrada al embalse de Mequinenza representa menos del 1% de los sedimentos aportados por el Ebro.
2. En el embalse de Mequinenza, a lo largo del periodo estudiado, se depositó el 95,4% de las 1.400.000 t de sólidos en suspensión que entraron. La concentración media a la entrada fue de 96 mg/l mientras que a la salida fue de 5.9 mg/l.
3. En dicho período de casi 22 meses se almacenaron 510.000 t de sedimento aportado por transporte en suspensión. La retención en Ribarroja fue del 40,7%, debido a que el tiempo de residencia en el embalse de Ribarroja es notablemente más corto que en el de Mequinenza, especialmente durante las crecidas cuando el aporte sólido es mayor. Las concentraciones medias fueron:
 - a. En el Ebro, a la salida de Mequinenza : 5,9 mg/l
 - b. En el Segre, en Serós: 45,3 mg/l
 - c. En el Cinca, en Fraga: 262 mg/l
 - d. En el Ebro, a la salida de Ribarroja: 19 mg/l
4. La mayor parte de la aportación sólida en suspensión a los embalses (y por tanto también su retención) se produce durante las crecidas. En el periodo estudiado, el 50% de la retención total se produjo en el 7% del total de días en Mequinenza y en el 3% en Ribarroja.
5. En los embalses se incrementa la carga orgánica de los sedimentos en suspensión.
6. De acuerdo con la batimetría realizada entre finales de octubre y principios de noviembre de 2007, el volumen de sedimento en el embalse de Ribarroja se acota ente 13 y 16,6 hm³. Aproximadamente 5 hm³ de sedimentos (un 30% del total) se sitúan en los 5 primeros kilómetros del embalse y otro tercio se sitúa en torno a la desembocadura del Matarraña.
7. En la mayor parte del embalse, el sedimento es de textura limo-arcillosa, con un tamaño medio de partículas inferior a 25 micras. Excepcionalmente, en las zonas litorales, en el frente anterior de la lengua de sedimento procedente del río Segre y en una pequeña área de la zona de meandros, se observa un incremento de la proporción de arena en detrimento de la de limos, determinando un tamaño medio de partículas que varía entre 45 y 100 micras.



3.6. Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)

En el marco de este estudio de Control de Obra Civil para la CHE se realizó una campaña de 10 sondeos y 27 catas, entre los PK 74 al 94, medidos por el eje del río Ebro, con origen en la presa de Mequinenza. La figura 4 muestra la ubicación de los puntos donde se realizó la prospección. El detalle de las características de las columnas estratigráficas de los sondeos puede consultarse en la Nota Técnica de mayo de 2020, apreciándose en todos los casos una primera capa de arenas y limos y fangos sobre una capa de gravas que debe corresponderse con el cauce natural. No se dispone de curvas granulométricas que permitan determinar el tamaño de las arenas y las gravas.

Esta información ha sido de gran utilidad para poder realizar la caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequinenza (ver apartado 3.6).



Figura 4. Situación en planta de las catas y sondeos



3.7. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)

Se trata de un trabajo encargado por la CHE, que complementa otros estudios realizados anteriormente (ver apartado 2.1) por Ecohidros (2008), Control de Obra Civil (2011) y Tragsatec (2012). En el momento de la realización de ese estudio, el nivel del embalse se encontraba a la cota 100.5 msnm, dejando emergido los últimos 55 km del embalse. Esto permitió realizar una nivelación de precisión del tramo, con la que se ha podido generar una topografía con curvas de nivel vectorizadas (figura 6). Con el fin de establecer un escenario de comparación se digitalizó la topografía de 1961 (figura 5), aunque solamente se vectorizó el tramo final del embalse. Con cada una de estas geometrías se generó un MDT y por diferencia se obtuvo el volumen de sedimento en la cola del embalse. Para completar la cubicación del sedimento se empleó la batimetría de Ecohidros de 2008. Este trabajo arroja un volumen de sedimentos en el embalse de Mequinenza de 76.8 hm³, con el reparto espacial que se indica en la figura 7.

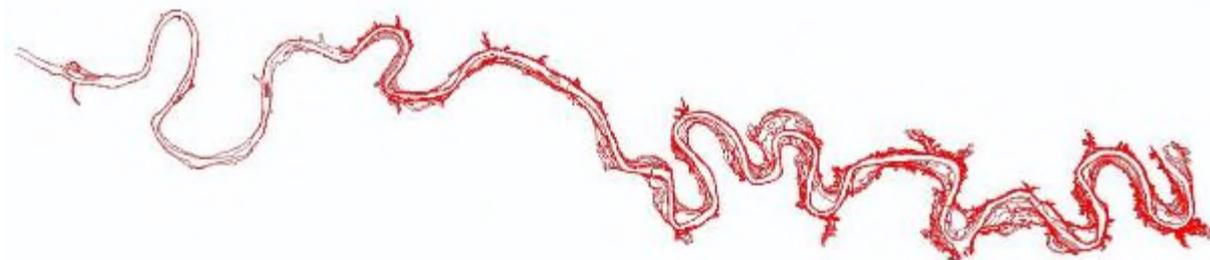


Figura 5. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 1961

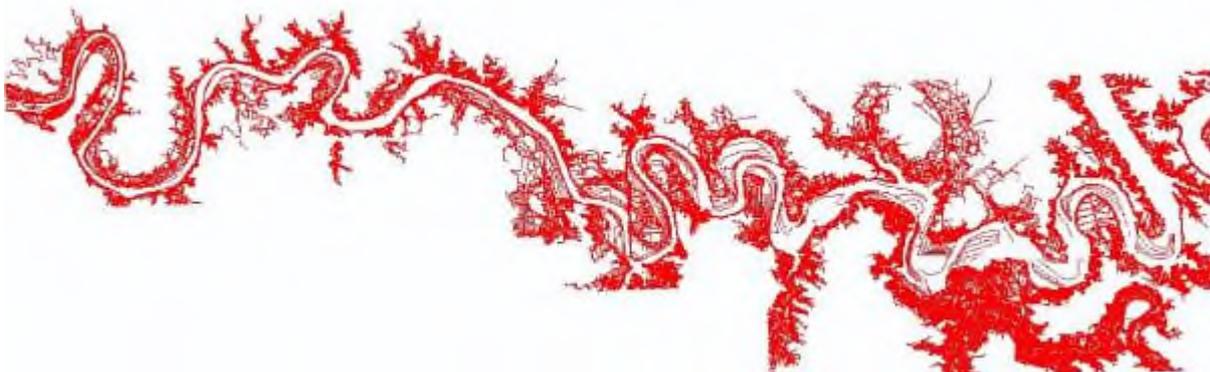


Figura 6. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 2012

Este estudio hace, además, una descripción del tipo de sedimento y de su distribución a lo largo del eje del embalse. Comenzando el recorrido desde la cola, hay un tramo con poca sedimentación debido a que las oscilaciones del nivel de embalse permiten que el sedimento se arrastre durante los episodios de avenida. Del PK 100 al 90 comienza a detectarse más sedimento en el cauce aunque de poca entidad. Posteriormente hay una zona en la que se produce la mayor acumulación del sedimento, desde el PK 90 a 45, especialmente entre Chiprana (PK 80) y la desembocadura del Guadalope (PK57). Destaca la acumulación de sedimentos que



se produce entono al PK 50 manteniéndose en niveles de sedimentación más bajos hasta la presa (figura 7).

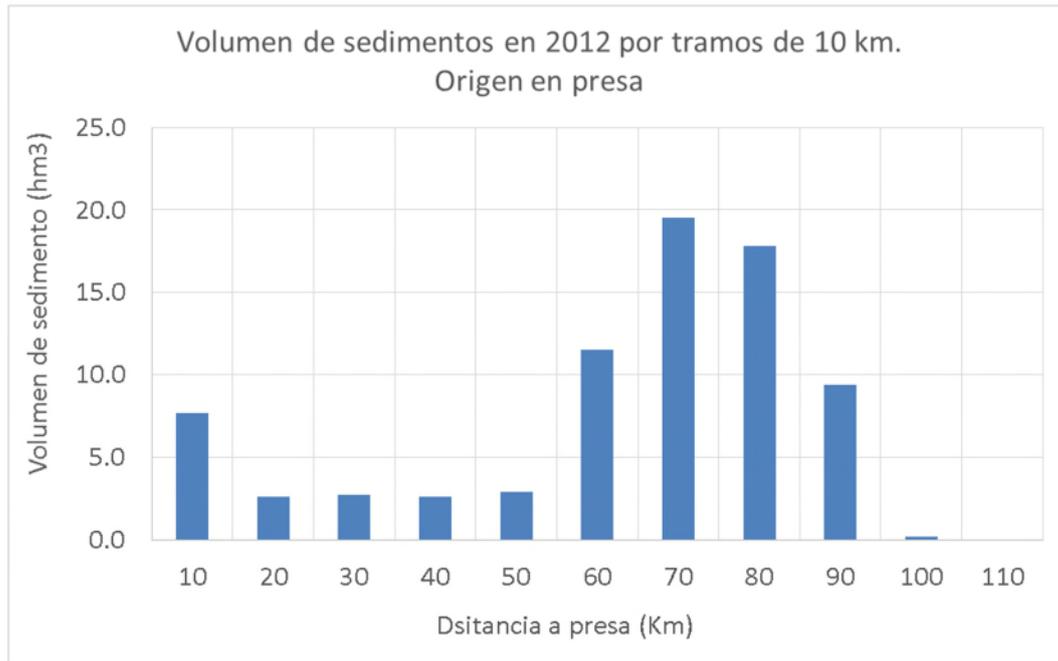


Figura 7. Reparto del sedimento en el embalse de Mequinenza en 2012. Elaborado con los datos del estudio de Control de Obras (2012)

En 1969 se proyectó un paso de barcas para conectar las dos orillas a 2 km aguas abajo de la población de Chiprana. La sedimentación lo hizo inviable, obligando finalmente a construir un puente que se proyectó en 1975. El estudio de Control de Obras de 2012 incluye las referencias al proyecto del puente de Chiprana, entre las que se incluyen los sondeos realizados para el proyecto de este puente.

El análisis de estos sondeos indica que, desde el llenado del embalse en 1966 y hasta 1975, se produjo una sedimentación de limos con un espesor variable entre 2.5 y 7.5 m a lo largo de la sección transversal. Debajo de esa capa de limos se aprecia un estrato de gravas en el cauce principal. En los sondeos de 2011 de Control de Obra Civil (ver apartado 2.6) se obtuvieron resultados similares, lo que corroboró que desde entonces se mantiene la sedimentación en la zona de Chiprana.

3.8. Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

El objeto del estudio fue analizar las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix mediante la integración de los datos de sedimentos acumulados y las características del flujo hidrológico que se dan en estos en estos embalses.

Este estudio hace una revisión exhaustiva de la literatura técnica sobre el sedimento y la información hidrológica del sistema de embalses MRF, con el fin de caracterizar el flujo sedimentario en el mismo. Así mismo, revisa las experiencias de movilización de sedimentos a nivel internacional, para finalmente analizar las posibilidades reales de movilización del sedimento.



Las conclusiones fundamentales de este estudio son:

- En la actualidad este flujo se ha reducido de manera considerable, tanto aguas arriba como aguas abajo de los embalses del sistema MRF. Las entradas al sistema están en torno a 1 Mt/a, que es menos de la décima parte del flujo inicial.
- La mayor parte de los sedimentos (80%) entran al sistema por el río Ebro. El río Cinca aporta un 15% del total y el resto de la cuenca del Segre, otro 5%. Se estima que Mequinenza retiene el 95% del sedimento en suspensión y Ribarroja el 40%.
- La carga media anual aguas abajo de las presas es inferior a 0,5 Mt/a, con el 60% transportado en suspensión y el 40% como carga de fondo. Según los investigadores, la mayor parte de este material procede de la erosión en el lecho del propio río.
- El sedimento acumulado en Mequinenza se encuentra en el rango comprendido entre 75 hm³ y 100 hm³, lo que supone entre un 5% y un 6,5% de su capacidad original. La acumulación en Ribarroja es de unos 13,1 hm³, un 4,5% de su capacidad original.
- Las únicas alternativas técnicamente viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema MRF son la retirada mecánica mediante excavación en seco o dragado (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix).

3.9. Resumen y conclusiones

De la revisión de los estudios incluidos en los anteriores apartados puede concluirse, en primer lugar que, por diferentes motivos, entre los que pueden destacarse factores climáticos o los usos del suelo de la cuenca, el río Ebro fue en el pasado un río hidromorfológicamente muy activo, con una gran carga de sedimentos que generó la formación deltaica de su desembocadura. Hay estimaciones del transporte de sedimentos en la desembocadura del Ebro de finales del siglo XIX, que lo evalúan (Gorría, 1877) en 25 Mt/año. Sin embargo, la evolución de estos mismos factores, y la acción antrópica, ha ido reduciendo este transporte. Bayerri (1935) estimó el transporte entre 15 y 20 Mt/año en Tortosa a principios de Siglo XX. Catalán (1969) estima esta carga con mediciones en el período (1961-1963) en 2 Mt/año. Esta reducción de transporte se hace notar en la evolución del Delta, por ejemplo, el mapa topográfico de 1950 muestra un ligero retroceso del cabo de Tortosa.

El transporte de sedimento en suspensión se produce de manera continua por el cauce, aunque con mayores concentraciones en situaciones de avenida. Sin embargo, el transporte de fondo que es el que configura hidromorfológicamente el cauce, se produce únicamente durante los episodios de avenida. Se estima que entre 80 y 95% de la carga de sedimento que transporta el río es material fino (arcillas y limos) en suspensión, y entre el 5 y el 15% arena y grava (Lechuga y López, 1997).

En la actualidad existen en la cuenca del Ebro más de 100 embalses (de más de 1 hm³), con una capacidad total que supera los 7.500 hm³. Por tanto, el régimen de



caudales del río se encuentra muy modulado, y el efecto barrera de los embalses hace que el transporte de sedimento se vea muy reducido en el curso bajo del Ebro.

Los embalses que más alteración generan en el curso bajo son los de Mequinenza (1964-66) y Ribarroja (1958-67). La influencia de Flix (1945-48) es mucho menor, al estar situado aguas abajo de ellos y tener una capacidad muy reducida.

Muchos de los estudios consultados incluyen estudios o información sobre el volumen de sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, estimándose que, en la actualidad, estas acumulaciones de sedimentos oscilan entre las horquillas de 80 a 150 hm³ y de 13 a 19 hm³ para el primero y el segundo, respectivamente.

Sanz y otros (2001) evidencian el cambio de comportamiento hidromorfológico del cauce aguas abajo del complejo Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF), antes y después de su construcción. La avenida del 29 de octubre de 1937, con un caudal de 10.000 m³/s, generó una importante transformación hidromorfológica del cauce, movilizándolo y transformando barras aguas arriba de la desembocadura del río Ciurana. En esta avenida se produjo el cambio de orientación de la desembocadura del Ebro hacia el norte, que dio lugar a la involución del cabo de Tortosa. Las fotografías aéreas de 1982, 1987 y 1997, muestran cómo las avenidas posteriores a la construcción de los embalses han erosionado el tramo de cauce comprendido entre el embalse de Flix y la incorporación del río Ciurana, perdiéndose las barras, y rectificando su trazado, dando inicio al proceso de acorazamiento del lecho. Además se aprecia un incremento significativo de la vegetación en el cauce como consecuencia de la falta de movilidad del sedimento.

Serra y otros (1990) estudiaron la evolución y las características sedimentarias del río Ebro entre Tortosa y Amposta en el período de tiempo 1983-1988 detectando ya el acorazamiento del cauce próximo a la desembocadura.

El transporte de sedimentos aguas abajo de los embalses se ha reducido considerablemente. Palanques (1987) lo sitúa en torno a 0.15 Mt/año en la desembocadura, en el período 1983-86. Guillén (1992) obtuvo en el período 1988-89, 0.12 Mt/año. Tena (2012) con mediciones de sonda de turbidez obtuvo una tasa de 0.166 Mt/año para el período 1998-2008, tasa que se reduce a 0.066 Mt/año para el período 2008-2012, según Tena y Batalla (2013). Hay algunos estudios que incluyen valores algo superiores, de manera que el tránsito sedimentario en el curso bajo del Ebro podría acotarse en la actualidad, de acuerdo con diferentes autores, en una horquilla que iría de 0,15 a 0,50 Mt/año.



4. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA

4.1. Introducción

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX para actualizar la estimación del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020 en el embalse de Mequinenza, así como para caracterizar el tipo de sedimento existente.

La estimación del volumen de sedimentos en la actualidad en el embalse se ha realizado por dos procedimientos (extrapolando la tendencia de las tasas anuales de sedimentación obtenidas en la cola del embalse anteriores a 2012 y mediante una correlación del régimen hidrológico) y se ha calculado tanto el volumen total de sedimentos depositado en el embalse, como el acumulado en los 42 km de su cola. Previamente, se han estimado también los volúmenes de sedimentos acumulados en 1982 y en 2012 y se ha reevaluado la capacidad inicial del embalse en el momento de su puesta en servicio.

Para ello se ha utilizado la información topográfica y batimétrica que se detalla a continuación:

1. Salto de Mequinenza: Concesión aprovechamiento del río Ebro y afluente (Expediente CHE1957-A60).
2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1970) CEH (CEDEX).
3. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1982) CEH (CEDEX).
4. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (2012) Control de Obras.

4.2. Reevaluación de la capacidad inicial del embalse de Mequinenza

Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas (figura 8), se ha generado un Modelo Digital del Terreno (MDT), que ha permitido cubicar la capacidad del embalse hasta la cota 121.15 msnm. El resultado de esta cubicación indica que el volumen inicial del embalse era de 1483.29 hm³, frente a los 1530 hm³ teóricos. Las técnicas empleadas hoy en día, con Sistemas de Información Geográfica, permiten realizar estos cálculos con una precisión mucho mayor que hace 50 años, por lo que se empleará en este estudio como capacidad inicial de referencia 1483,29 hm³, que corresponde al momento de puesta en servicio del embalse en 1966. En este estudio se toma esta fecha como punto de partida de los procesos de sedimentación del embalse y esta geometría de referencia para el cálculo de la sedimentación en los diferentes escenarios temporales.

Para facilitar el análisis y comparación de las diferentes batimetrías, se ha calculado el volumen de embalse por tramos, según la sectorización empleada por el CEDEX para su cubicación en 1971 (figura 2), agrupados en 51 tramos. El tramo 16 corresponde a una rama lateral del vaso y se ha agrupado para este análisis con el tramo 15. En la Nota Técnica de mayo de 2020 se incluye el detalle de la cubicación



obtenida en cada tramo, que servirá para analizar la sedimentación de forma espacialmente distribuida.

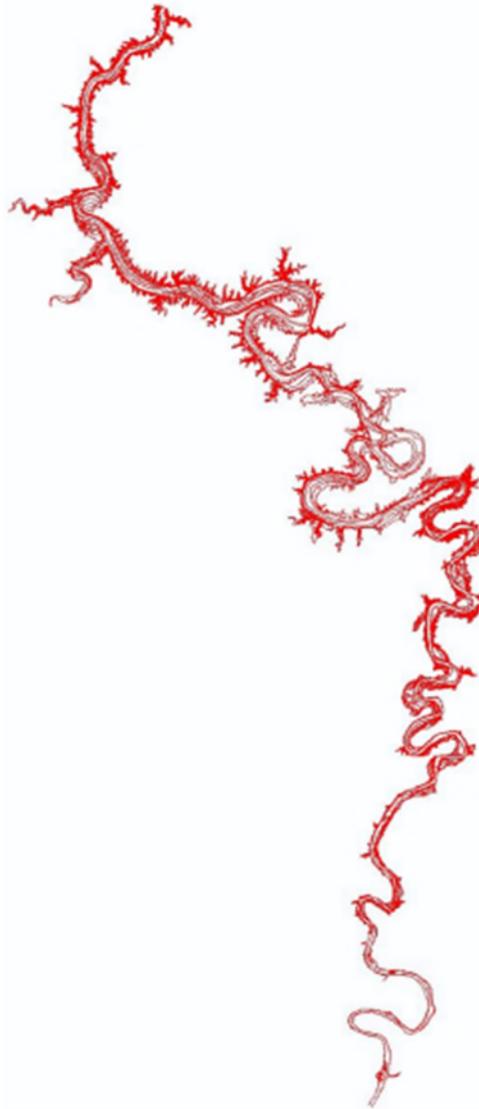


Figura 8. Batimetría original del embalse de Mequinenza en situación de puesta en explotación en 1966.

4.3. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 1982

A partir de la cubicación por tramos resultante de las batimetrías del CEDEX de 1970 y 1982 incluida en la Nota Técnica de mayo de 2020 se compara en la figura 9 la capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en los tres escenarios temporales: 1966 que corresponde a la situación inicial, 1970 y 1982, tras 4 y 16 años respectivamente desde la puesta en explotación.

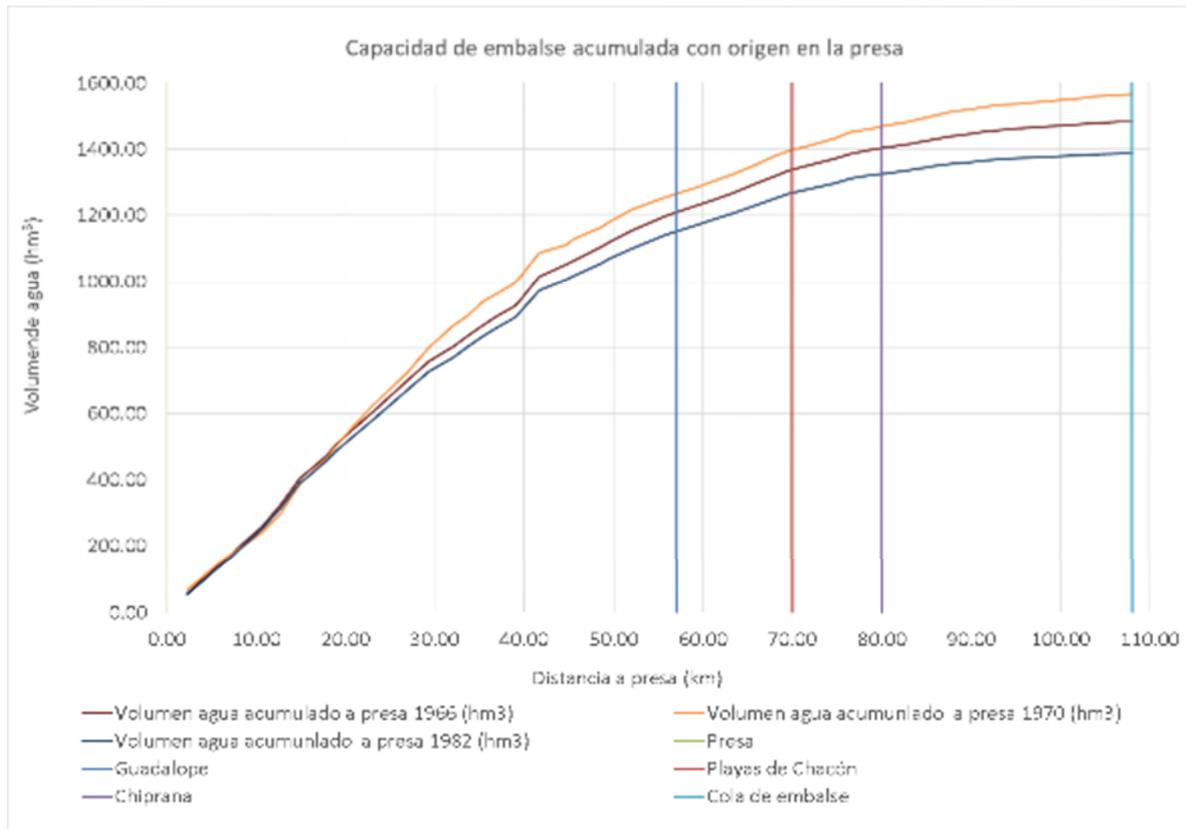


Figura 9. Capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en 1966, 1970, y 1982

La batimetría de 1970 proporciona una capacidad de embalse de 1565.91 hm³, 82.62 hm³ superior a la inicialmente estimada, a partir de la topografía de 1961, en 1483.29 hm³. Esta discrepancia de un 5.6%, está asociada, por un lado, a la precisión de los medios técnicos disponibles cuando se realizaron tales trabajos y por otro, a la metodología empleada para el cálculo de los volúmenes. En el reconocimiento batimétrico de 1970 se obtuvieron perfiles transversales, cubicando los volúmenes por tramos, lo que puede introducir un error bastante grande en un embalse de 108 km de largo con una geometría tan compleja.

Con los datos de los valores de sedimento retenido en 1982 en cada uno de los tramos de embalse (partiendo de la topografía de 1961 y de la batimetría de 1970) incluidos en la Nota Técnica de mayo de 2020 se han elaborado las figuras 10 y 11 en las que se incluyen las referencias de la presa en el PK 0, de la incorporación del Guadalope PK 57, Playas de Chacón PK 70, Chiprana PK 80 y la cola del embalse en el azud del Monasterio de Rueda.

Los valores de sedimentación obtenidos a partir del reconocimiento batimétrico de 1970 de la figura 10 presentan una gran dispersión de los valores de la sedimentación, proporcionando tramos con grandes volúmenes de erosión y sedimentación difícilmente explicables, si no es por la falta de precisión en los perfiles obtenidos en el reconocimiento.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

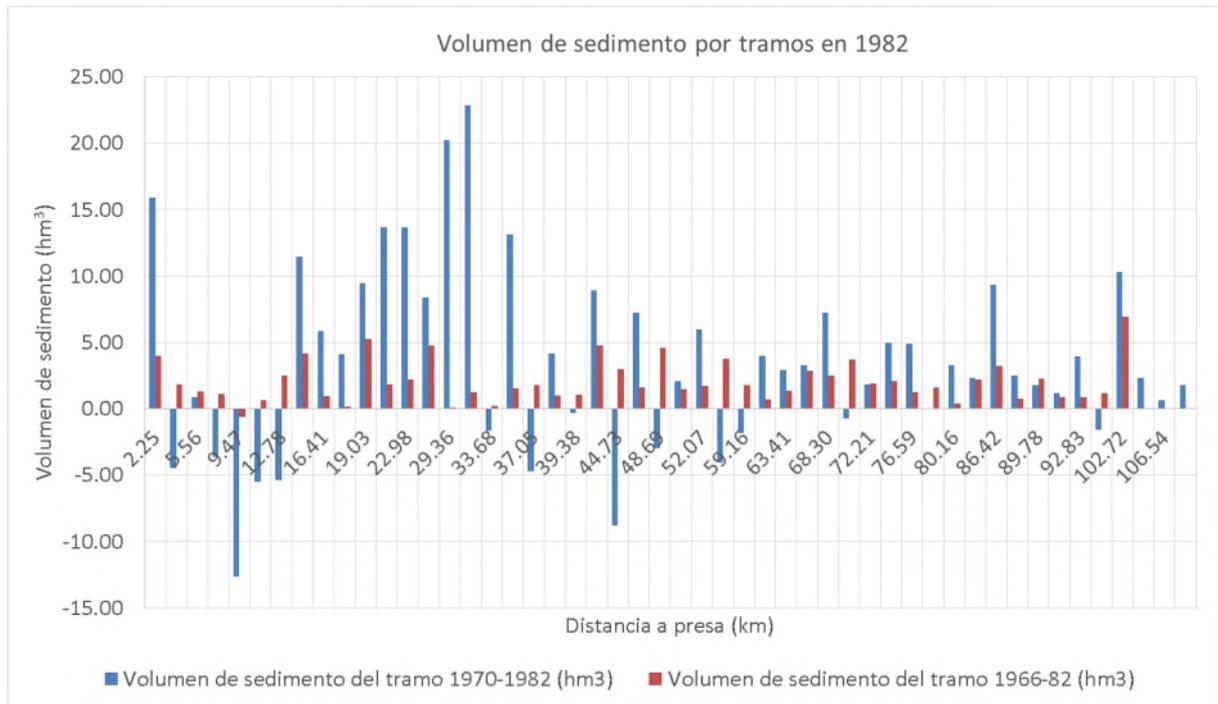


Figura 10. Volumen de sedimento por tramos (1982)

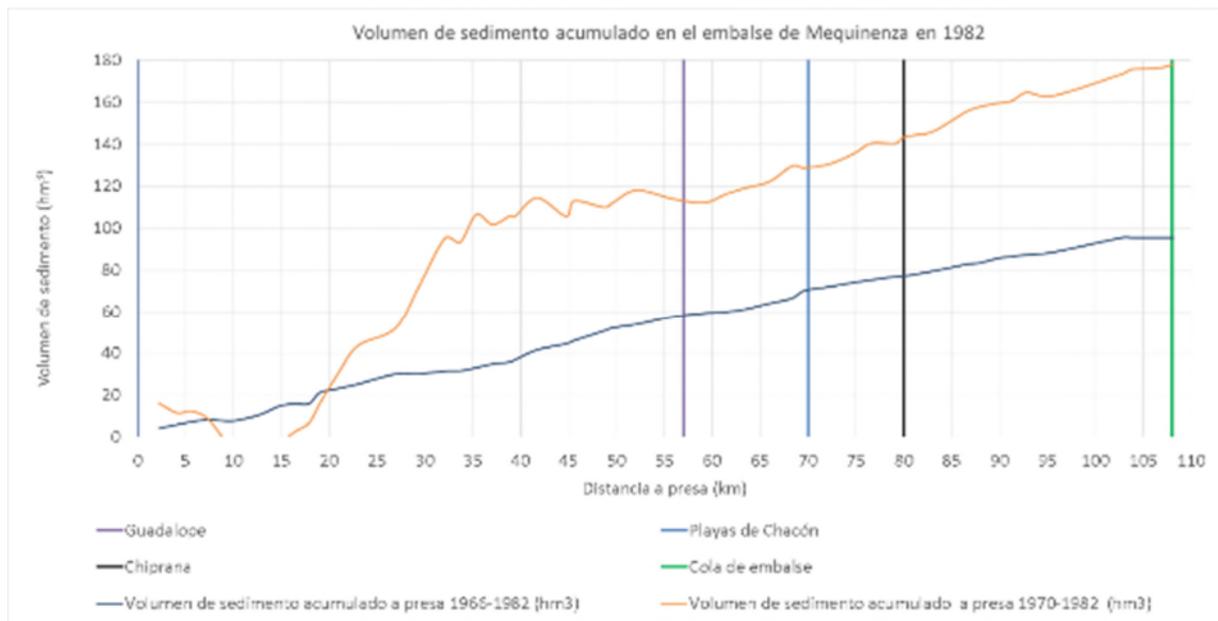


Figura 11. Volumen de sedimento acumulado con origen en la presa de Mequinenza (1982)

El volumen de sedimento con la batimetría de 1982 referido a la topografía de 1961, proporciona un volumen de sedimento de 95 hm³, lo que se corresponde con la valoración de sedimento que se obtuvo en el estudio de 1982. Sin embargo, este valor se duplica con la batimetría de 1970.

Por todas estas razones, se ha decidido no emplear en el presente estudio el reconocimiento batimétrico de 1970. Asimismo, se concluye que la calidad técnica de la metodología empleada para el reconocimiento batimétrico del CEDEX de 1982, como la de la cartografía digital generada, permiten considerar adecuado el valor 95 hm³ de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en 1982.



4.4. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 2012

Además de las dos batimetrías completas del embalse, se dispone de la topografía parcial de la segunda mitad del embalse, en concreto desde la desembocadura del Guadalope al Ebro obtenida en el estudio de Control de Obras de 2012 (apartado 2.7). Esta topografía pudo obtenerse por técnicas convencionales gracias a que en 2012 quedó emergido la cola del embalse por encima de la cota 100.5 msnm, por lo que se supone de gran precisión. Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas de la figura 6, se han obtenido los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm desde el tramo 30 (PK 59) hasta la cola del embalse.

La figura 15 representa la capacidad acumulada, con origen en el tramo en los tres escenarios temporales. Por diferencia de la capacidad de cada tramo se ha calculado el volumen de sedimento acumulado en cada uno de ellos, en los intervalos temporales 1966-1982, 1982-2012 y 1966-2012. El resultado se muestra en la figura 16 (el detalle de los valores acumulados anuales puede verse en la Nota Técnica de mayo de 2020).

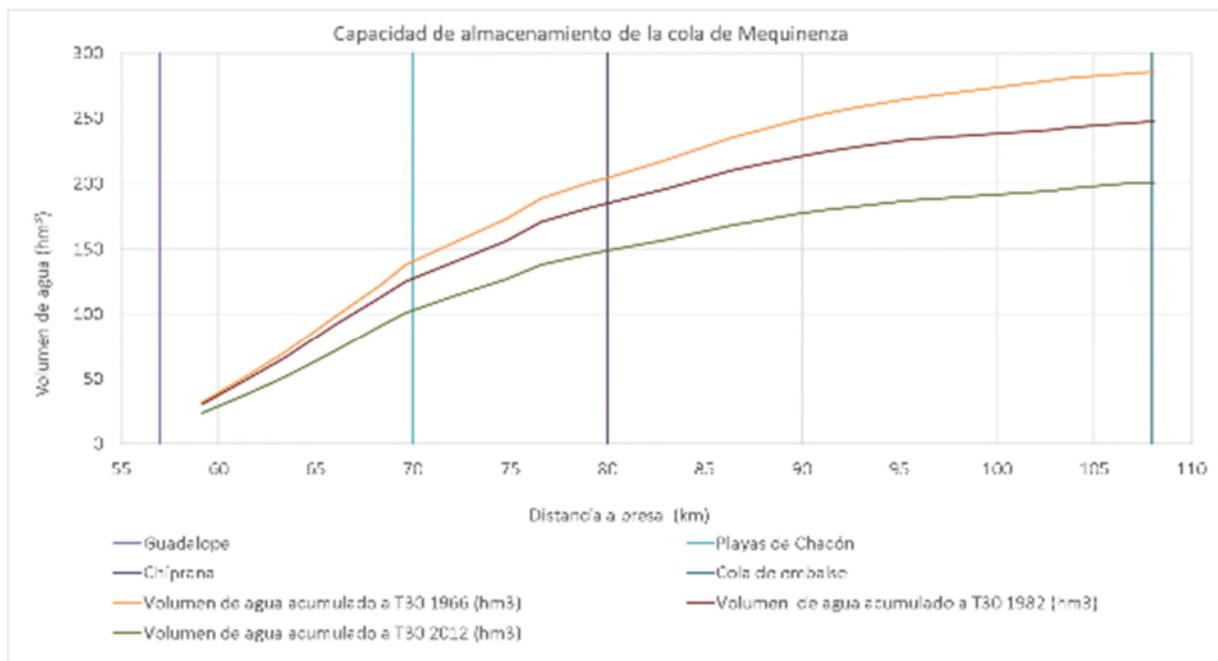


Figura 12. Evolución temporal de la capacidad de la cola del embalse de Mequinenza

Se aprecia que en los últimos 42 km de la cola del embalse se acumularon 37.92 hm³ de sedimento hasta 1982 y otros 46.28 hm³ desde 1982 hasta 2012, totalizando 84.21 hm³.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

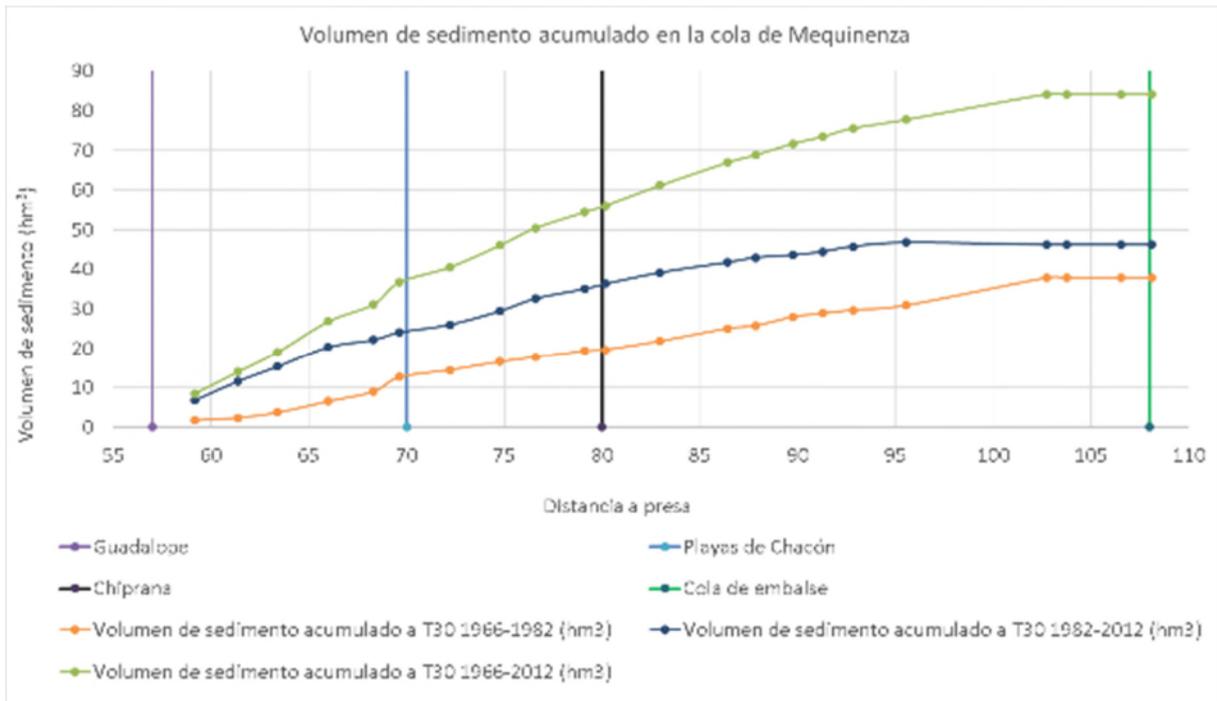


Figura 13. Sedimento acumulado en la cola del embalse de Mequinenza en diferentes períodos

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el estudio de Control de Obras de 2012, se aprecia que existe un desajuste en el volumen de sedimentos. En aquel estudio se estimó que el volumen total de sedimentos en el embalse era 76.8 hm³, con el reparto indicado en la figura 7. Se ha calculado el volumen de sedimento empleando esa misma discretización espacial, y se ha generado la figura 14 para facilitar la comparación.

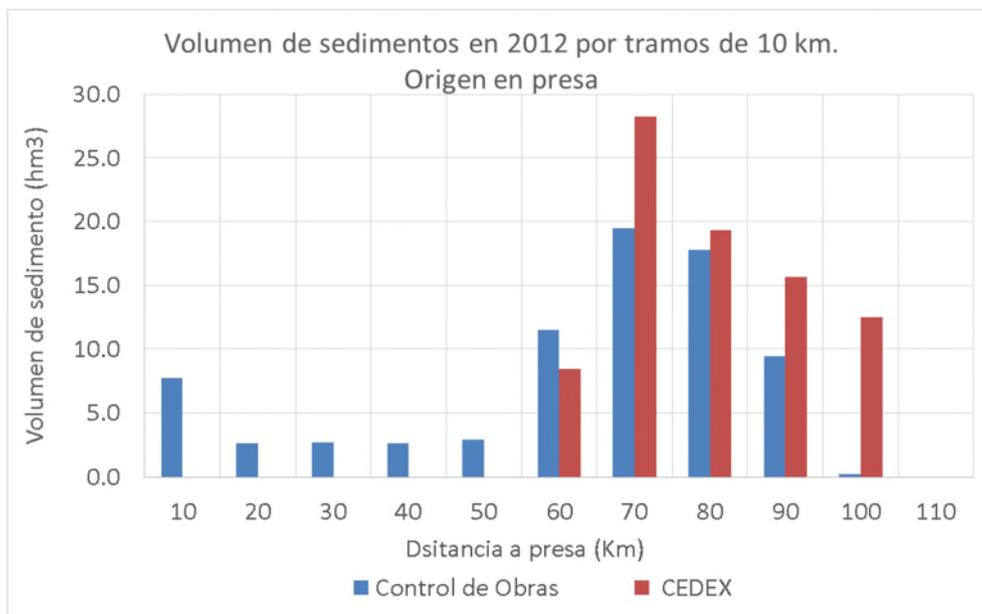


Figura 14. Comparación de la cubicación del sedimento en la cola del embalse de Mequinenza.

Teniendo en cuenta que para hacer estos cálculos se ha empleado la misma información cartográfica, el desfase debe explicarse por el método empleado para la cubicación. En el trabajo de Control de Obras se indica que el volumen del sedimento



de la cola se obtuvo por sustracción de los MDT generados a partir de las curvas de nivel obtenidas en 2012 y las vectorizadas de la topografía de 1961 (figuras 5 y 6). Es posible que un error en la georreferenciación de ambos MDT haya alterado el resultado real. En el actual estudio, para evitar que desajustes en la georreferenciación puedan afectar a los resultados, se han cubicado los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm, con ambos MDT y el volumen de sedimento se obtiene por la diferencia de capacidades. Esta operación se ha realizado de forma global en la cola y por tramos proporcionando resultados consistentes por ambos métodos. Por tanto, se considera más adecuada la estimación de 84.21 hm³ de sedimento almacenados en los últimos 42 km de embalse en 2012.

De acuerdo con estos resultados la tasa de sedimentación anual media en la cola del embalse del período 1966-1982 fue de 2.37 hm³/año, mientras que el segundo período (1982-2012) desciende a 1.54 (65.08%), lo que pone de manifiesto una reducción en la aportación de sedimento que llega al embalse.

Si la forma de explotación del embalse se mantiene en el tiempo, se puede suponer que los procesos hidrodinámicos y fisicoquímicos que afectan a la sedimentación en el embalse no se verán alterados, y por tanto si se produce una modificación de la tasa de aportes de sedimentos al embalse, es razonable suponer que esta variación afectará de forma lineal a la tasa de sedimentación de cada uno de los tramos en los que se ha dividido.

En la Nota Técnica de mayo de 2020 se calculan las tasas de sedimentación anual de cada uno de los tramos del embalse en el período 1966-1982 y las de los tramos de cola en el lapso 1982-2012. Aplicando la reducción observada de la tasa de sedimentación obtenida para el tramo de cola al resto de tramos, se obtiene una aproximación de la tasa de sedimentación de los primeros tramos del embalse sin batimetría en el período 1982-2012. Con estas tasas se obtuvo una estimación del sedimento en todo el embalse en 2012.

Como resultado de estos cálculos se desprende que durante el período de 1982 a 2012, se depositaron en la cola del embalse de Mequinenza 42.28 hm³, y otros 73.97 hm³ en el resto del embalse, totalizando 116.25 hm³ en todo el período. Si acumulamos estos sedimentos a los 95 hm³ del período anterior a 1982, totalizan 211.87 hm³.

La figura 15 muestra la evolución temporal del sedimento en el embalse, acumulados con el origen en la presa, en 1982 y 2012.

Repartiendo linealmente el volumen de sedimentos en ambos períodos se obtiene que de 1966 a 1982 la aportación anual de sedimentos al embalse fue de 5.93 hm³/año, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m³, resulta 6.68 Mt/año. Esta aportación media se reduce en el segundo período a 3.88 hm³/año, unos 4.37 Mt/año. Lógicamente estos valores son promediados y vendrán asociados los procesos de avenida ocurridos en ese período de tiempo. La tabla 1 muestra la clasificación de los caudales de entrada en Mequinenza en ambos períodos. La tabla indica el número de ocasiones en que se han producido avenidas con puntas dentro de los intervalos de caudal indicados. Se aprecia que en el segundo intervalo las



avenidas han sido menos frecuentes, como consecuencia de la mayor regulación de la cuenca, lo que justifica el descenso de aportes de sedimentos registrados.

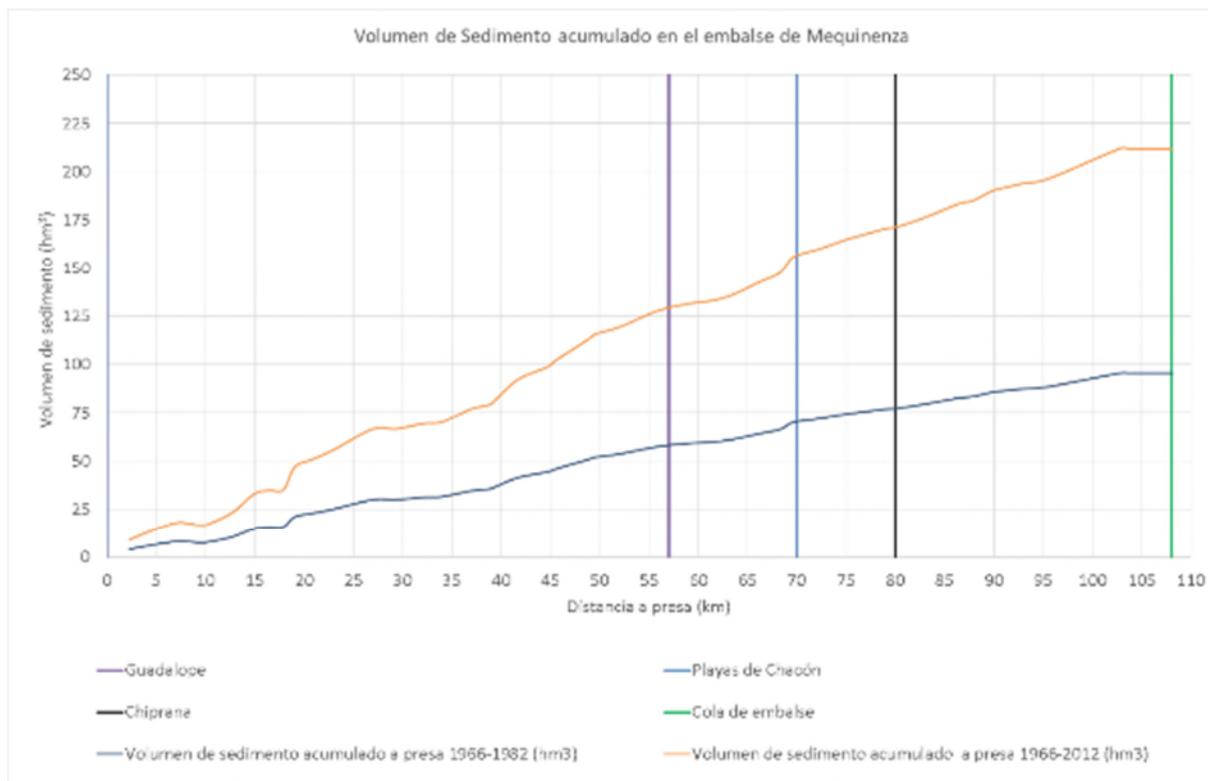


Figura 15. Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza en 1982 y 2012

Tabla 1. Clasificación de caudales por períodos

Caudal (m³/s)	Caudales de entrada en Mequinenza	
	1966-1982	1983-2012
500-1000	285	222
1000-1500	52	51
1500-2000	28	14
2000-2500	4	1
2500-3000	2	0

4.5. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajuste de la tasa de sedimentación

Teniendo en cuenta que el régimen hidrológico de la cuenca no se ha visto alterado desde 2012 hasta la actualidad, parece adecuado emplear las mismas tasas de sedimentación del periodo anterior. En la Nota Técnica de mayo de 2020 pueden consultarse los cálculos de los volúmenes almacenados por tramos y acumulados a lo largo del embalse empleando la misma tasa de sedimentación, totalizando 242.92 hm³. La figura 16 muestra la evolución sedimentológica del embalse en los tres hitos temporales considerados, 1982, 2012 y 2020.

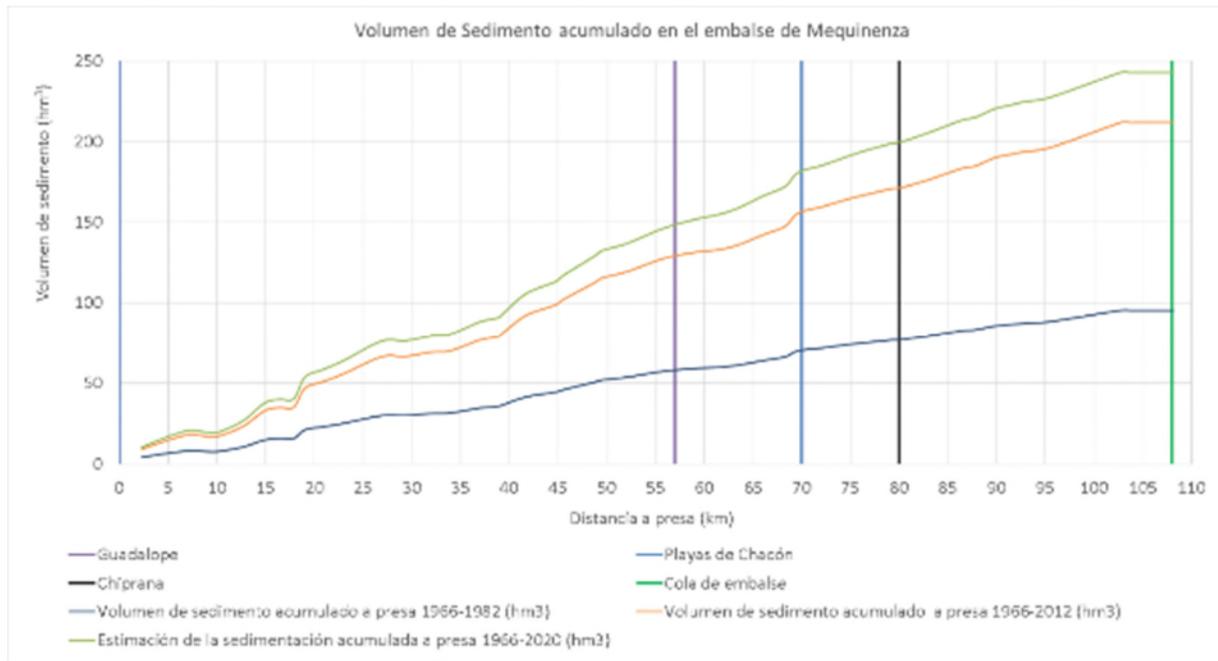


Figura 16. Evolución temporal de la sedimentación del embalse de Mequinenza. Valores acumulados con origen en la presa

4.6. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajustes hidrológicos

El anuario de aforos del CEDEX dispone de la serie de caudales diarios en la estación de Sástago, de código Indroea 9112, con datos desde 1945 hasta 1997. Para poder disponer de una serie completa desde 1966 hasta la actualidad, los técnicos de la CHE han generado una serie de caudales, partiendo de la serie de caudales desaguados y del nivel de embalse, esto ha permitido completar esta parte del estudio.

La figura 17 muestra la serie de caudales medios diarios desde 1966 hasta la actualidad. Tal y como se comentó anteriormente, se aprecia un descenso de los caudales punta en avenidas. La pendiente de la línea correspondiente al ajuste lineal presenta una pendiente negativa de 6.2 l/s/día.

El caudal medio de la serie desde 1966, hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. Las figuras 18 y 19 presentan la aportación en acumulada en hm³, referida al caudal medio. Se aprecia un cambio de pendiente de la ley de aportaciones acumuladas en torno a 1982, precisamente. El caudal medio de aportación del período 1966-1982 fue de 27.2 hm³/día (figura 18), mientras que en el período 1985-2020 es de 17.7 hm³/día (figura 19). Este cambio puede deberse a cambios de los usos del suelo, a una mayor regulación de la cuenca, o incluso a fenómenos de cambio climático. En cualquier caso, el análisis de las causas excede el ámbito de este estudio.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

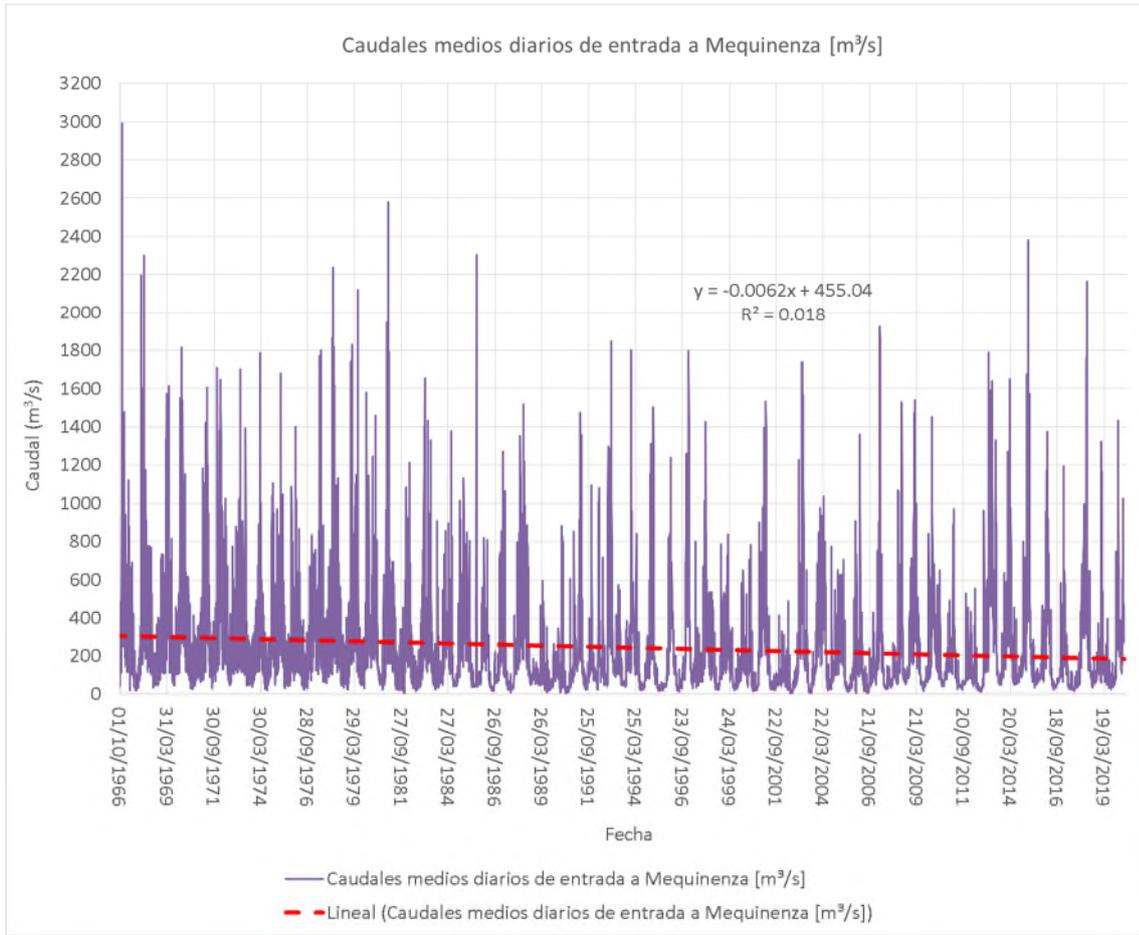


Figura 17. Serie histórica de cadules de entrada en el embalse de Mequinenza

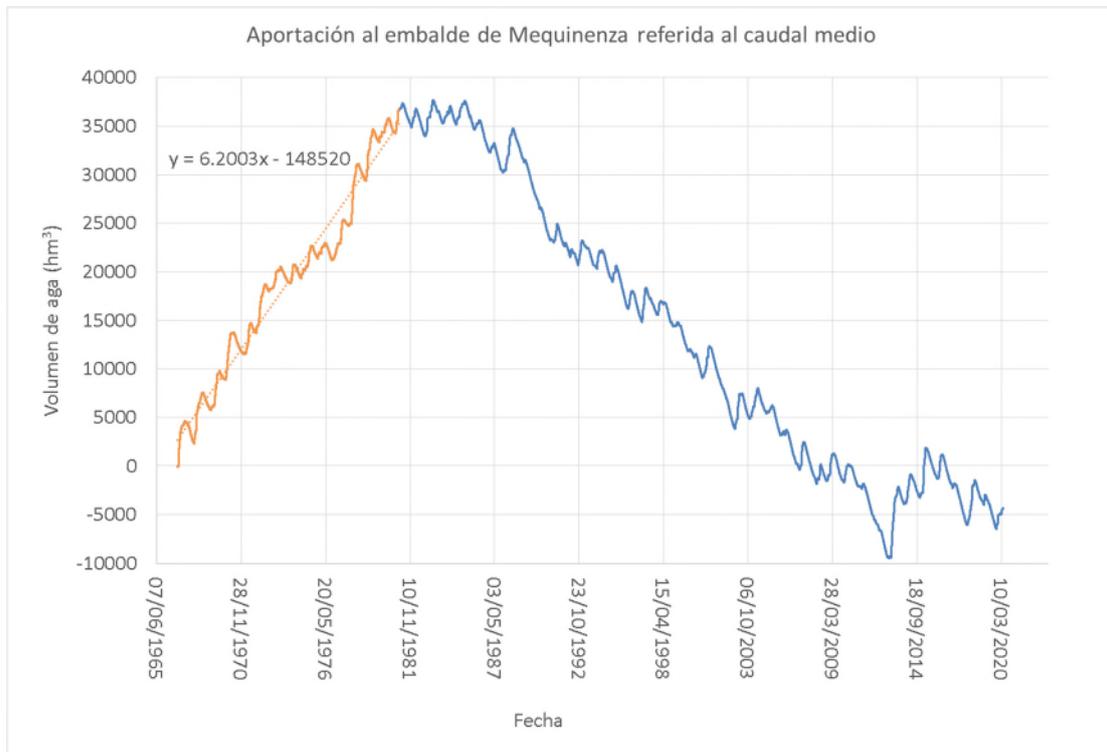


Figura 18. Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1967-1982



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

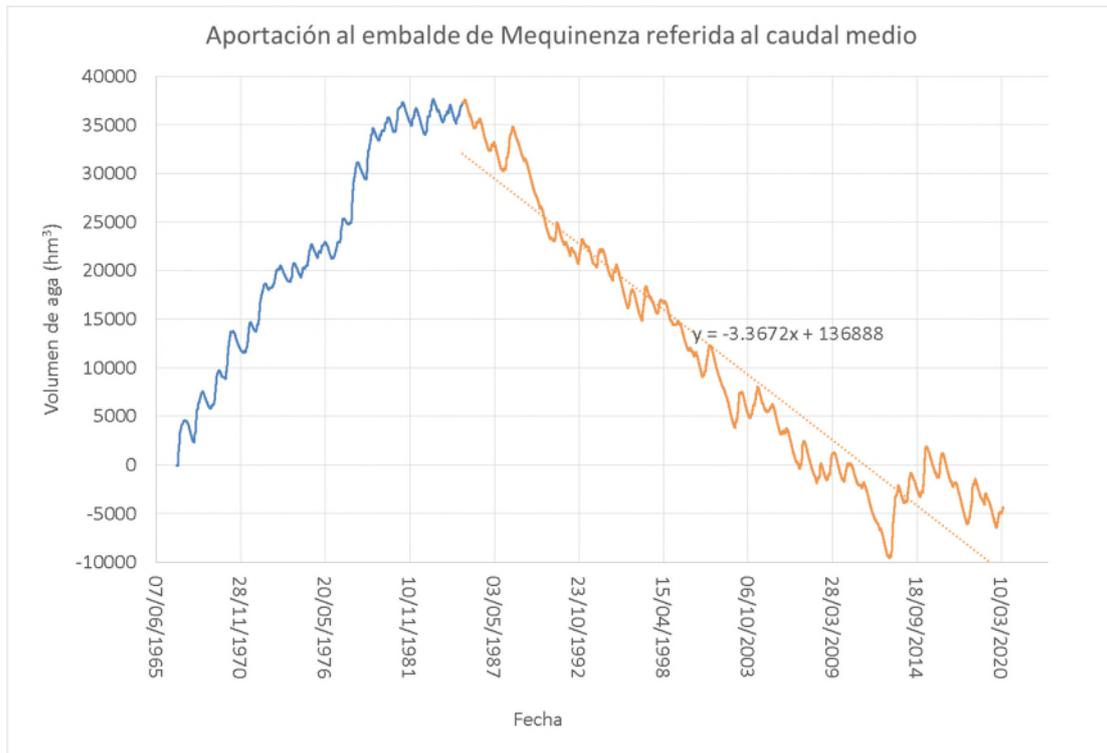


Figura 19. Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1985-2020.

Considerando que este embalse retiene la totalidad de sedimento aportado, bien sea por arrastre de fondo o en suspensión, se puede obtener una relación entre caudal líquido y caudal sólido que proporciona un volumen determinado de sedimento aportado al embalse. Tomando como fecha de inicio de las aportaciones, el 01/10/1966, con una relación:

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

se obtiene un volumen de sedimento acumulado aportado al embalse de 94.5 hm³ el 01/10/1982. Con esta relación se obtiene que el volumen 207.2 hm³ de sedimento en el 01/10/2012 y de 244.9 hm³ el 14/04/2020, valores que concuerdan con los obtenidos con la otra metodología descrita en los apartados anteriores, como se aprecia en la figura 23. Puesto que todo el volumen de sedimento que llega al embalse queda retenido, se ha comprobado que existe una relación lineal entre la aportación de agua y la de sedimento.

Es conveniente aclarar en este punto que aunque aquí se ha obtenido un coeficiente medio que reproduce correctamente el balance sedimentológico del embalse, este valor no es constante, siendo mayor durante los episodios de avenida que con caudales más bajos. Sin embargo, a los efectos de este estudio, esta aproximación resulta adecuada.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

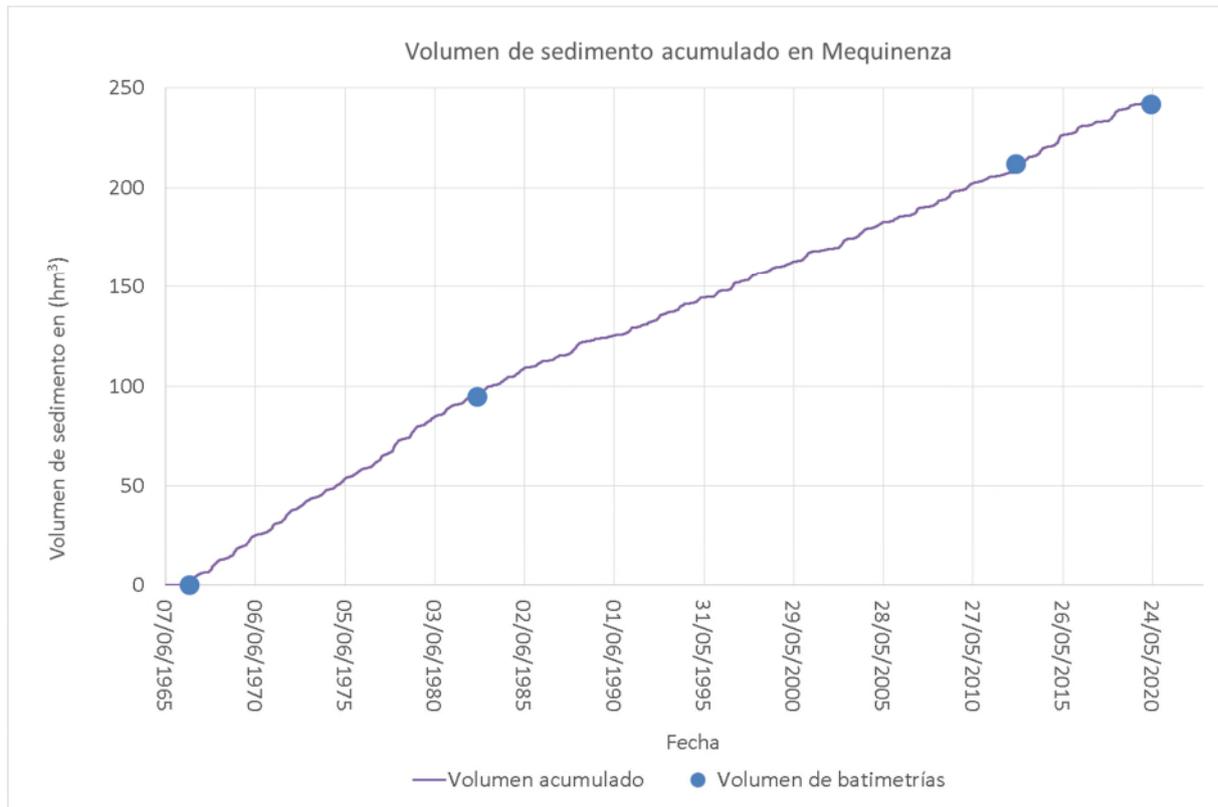


Figura 20. Evolución del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza

Si se calcula el volumen medio diario de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza de la serie histórica desde su puesta en explotación, se obtiene un valor de 12524 m³/día. Si se refiere la serie de sedimentación acumulada al caudal medio se pone de manifiesto el cambio de tendencia de aportaciones que se había descrito anteriormente, y que se muestra en la figuras 21 y 22. Las tasa anual media en el período 1966 a 1982 resulta de 5.99 hm³/año ó 6.75 Mt/año, y en el segundo período resulta de 3.87 hm³/año ó 4.36 Mt/año, un 64,6% de la inicial.

En el estudio inédito del CEDEX (2002) se estimaba el aporte de sedimentos en Mequinenza en 6,86 Mt/año, valor muy ajustado al calculado en este estudio para el período 1966-1986.

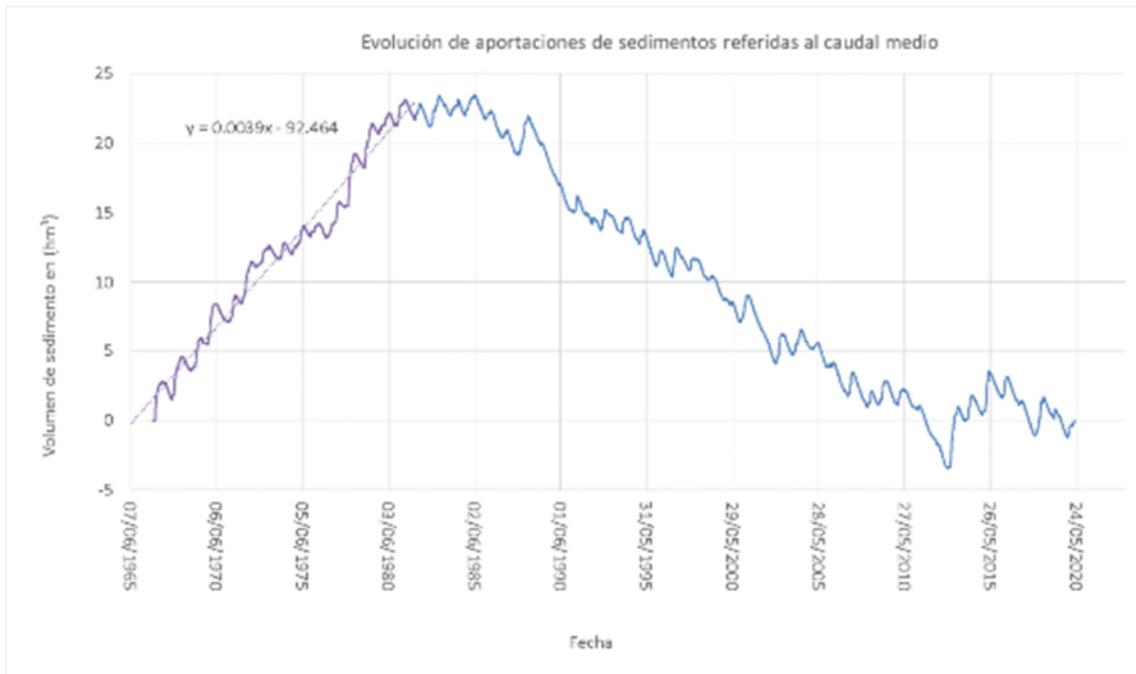


Figura 21. Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1966-1982

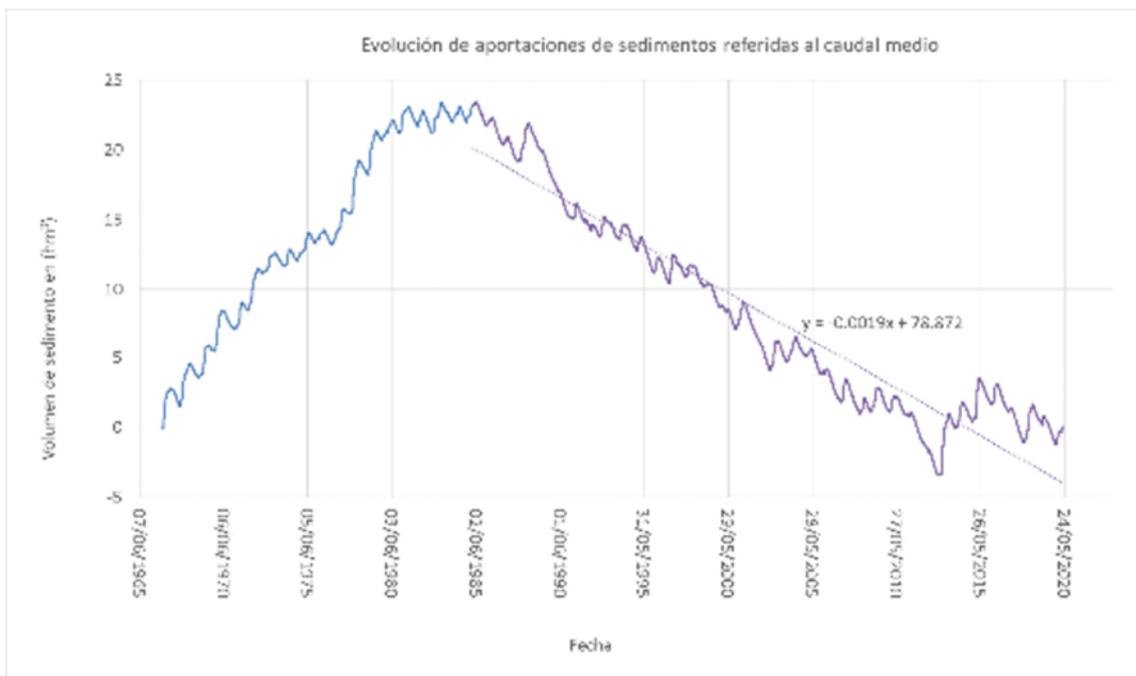


Figura 22. Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1985-2020

4.7. Caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequinenza

En este apartado se analiza con más detalle el sedimento localizado en la cola del embalse. La figura 23 muestra el volumen de sedimento entre los tramos 30 y 51, correspondientes a los últimos 42 km del embalse, en los tres intervalos temporales



considerados. Se aprecia en esta figura que en el entorno de Chiprana (PK 80), se localiza una zona de menor depósito. Esto proporciona una explicación al análisis realizado por Control de Obras en el que se indica la pequeña variación de sedimentación observada entre el sondeo realizado para el proyecto del puente y el realizado en 2011. En el estudio de Control de Obras se concluía que la sedimentación se había producido en un primer momento de llenado del embalse, pero se aprecia que en esta zona existe menor sedimentación que en los tramos colindantes.

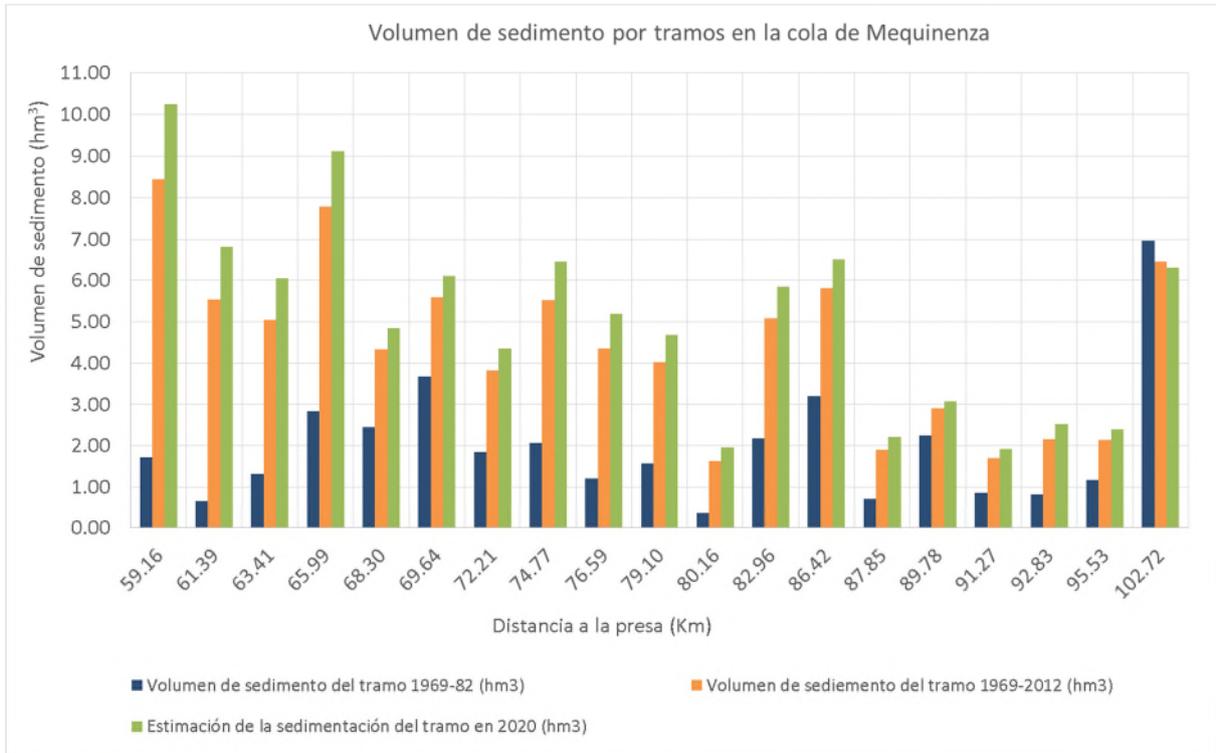


Figura 23. Volumen de sedimento por tramos en 1982, 2012 y 2020.

La figura 24 presenta estos valores de sedimentación acumulados con origen en el tramo 30, en torno a la desembocadura del Guadalope. Se aprecia que el volumen de sedimento acumulado en este tramo hasta 1982 fue de 37.92 hm³, este valor asciende a 84.21 hm³ en 2012. En la actualidad se estima que existen en este tramo un total de 96.55 hm³.

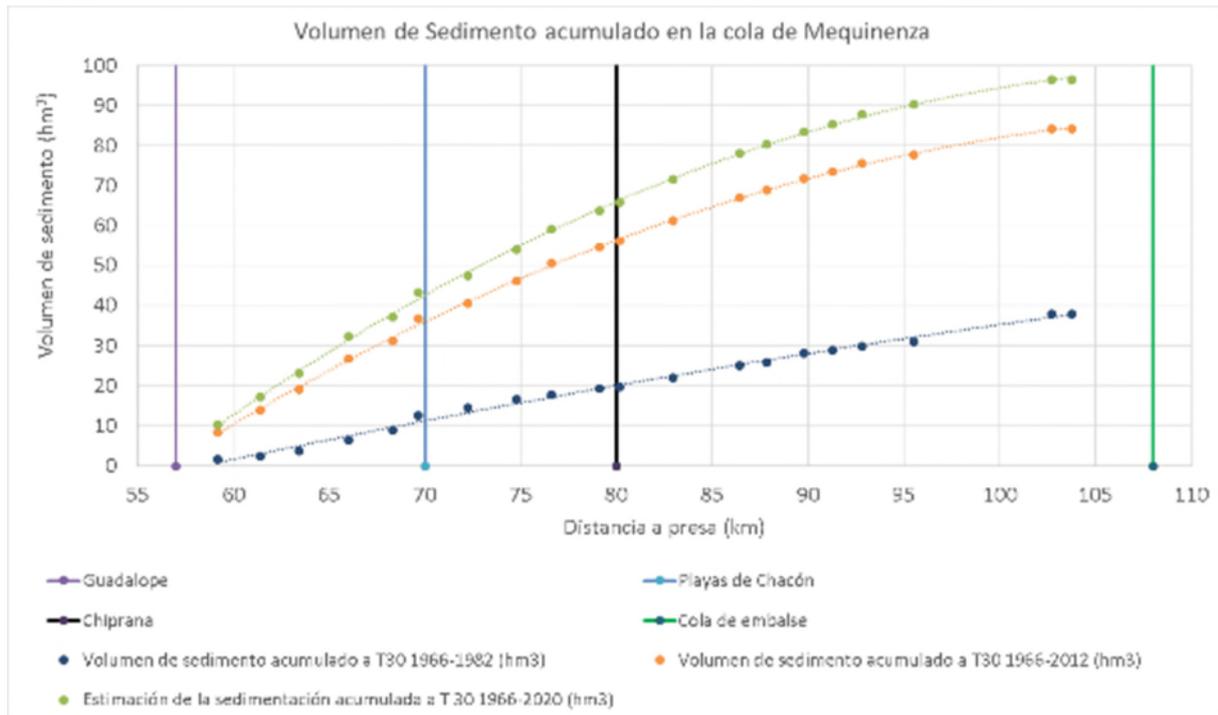


Figura 24. Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza

Para la caracterización del sedimento, partiendo de la naturaleza de las columnas estratigráficas obtenidas en los sondeos realizados en el año 2012 para la caracterización del sedimento en la cola del embalse de Mequinenza (ver apartados 2.6 y 2.7) se han calculado los porcentajes de cada tipo de sedimento encontrado concluyendo (ver el detalle de los estudios en la Nota Técnica de mayo de 2020) que de los 40.2 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 10.67 hm³ serían de arena y 3.73 hm³ de grava.

4.8. Resumen

Como resumen de los trabajos realizados en este apartado para la caracterización del sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza pueden establecerse los siguientes valores:

Capacidad del embalse de Mequinenza:

- Capacidad inicial del embalse de Mequinenza (1966) estimada en este informe: 1483,29 hm³
- Capacidad teórica del embalse de Mequinenza (1966) en su puesta en servicio: 1530 hm³

Volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 1982 calculados en este informe en dicha fecha a partir de la batimetría de 1982 y la topografía de 1961: 95 hm³



- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2012 estimados en este informe: 211 hm³ (determinado a partir de la tendencia de las tasas de sedimentos en la cola del embalse calculadas en este estudio con la información disponible: 6,68 M/año en el periodo de 1966 a 1982 y 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012)
- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2020 estimados en este informe: entre 242 hm³ (calculado con las mismas tasas de aportación de sedimentos de antes) y 245 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico)

Caracterización de los sedimentos acumulados en el tramo de cola del embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza calculado en este informe: 38 hm³ (1982) y 84 hm³ (2012).
- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza estimados en este informe en 2020: 97 hm³.
- Caracterización del sedimento en la cola del embalse. En el presente informe se calcula que de los 40 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 11 hm³ serían de arena y 4 hm³ de grava.



5. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX para actualizar los cálculos del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020, en el embalse de Ribarroja.

Para este análisis se ha partido del estudio batimétrico realizado por el grupo Grupo Flumen en 2007, que acotaba los depósitos sedimentarios en el embalse de Ribarroja entre 13 y 16.6 hm³. No ha sido posible recopilar la información batimétrica digital para realizar un análisis semejante al de Mequinenza que permitiera obtener las tasas de sedimentación por tramos a lo largo del embalse. Sin embargo, esta información es suficiente para estimar la tasa de sedimentación global del embalse, la cual se calculó en la Nota Técnica de mayo de 2020 mediante una correlación del régimen hidrológico, de manera similar a como se hizo en el apartado 3.5 para el embalse de Mequinenza

La serie de caudales diarios de entrada al embalse de Ribarroja se ha obtenido del anuario de aforos del CEDEX, como combinación de los registros de las estaciones 9017 en río Cinca en Fraga y la 9025 en el río Segre en Seros, para el período 1967 hasta 2016. En primer lugar se han completado las series de caudales, conservando el valor medio de la relación de los caudales de los ríos Cinca y Segre. La serie de caudales de entrada al Embalse de Ribarroja se presenta en la figura 28. Se aprecia, que como en el caso del río Ebro, el ajuste lineal de la serie de caudales presenta una pendiente decreciente de 6.8 l/s/día. Este valor es semejante a la reducción de caudal observada en el Ebro de 6.2 l/s/día (apartado 3.6).

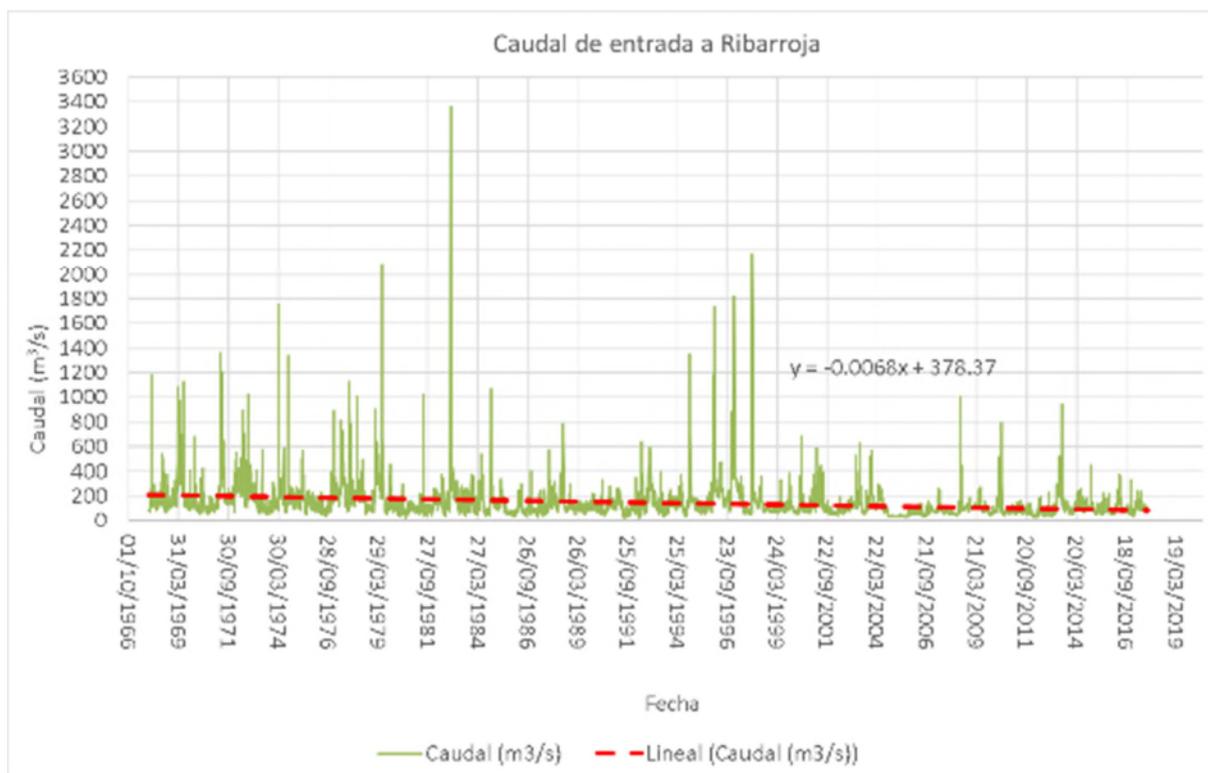


Figura 25. Serie histórica de caudales de entrada al embalse de Ribarroja



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

El caudal medio de la serie histórica es de 12.69 hm³/día. La figuras 26 y 27 muestran la aportación aculada al embalse de Ribarroja, referida al caudal medio. Se aprecia, como en el caso del Ebro, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se aprecia una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era 17.71 hm³/día, mientras que en el período 2004-2016 es de 8.25 hm³/día.

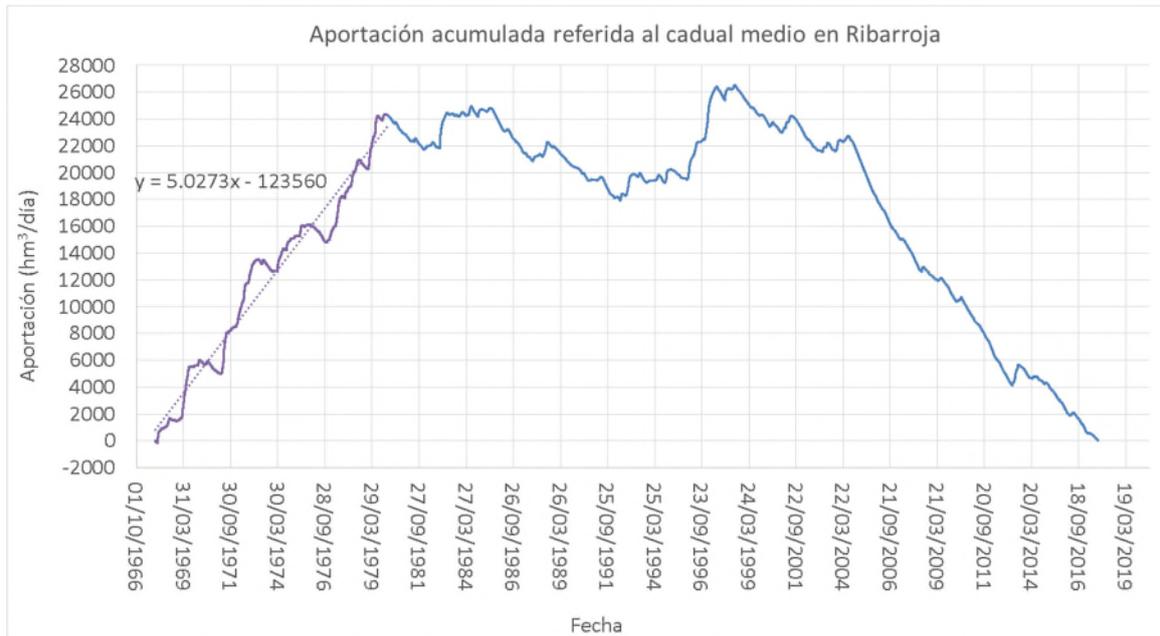


Figura 26. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 1967-1980



Figura 27. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 2004-2016

Con estos datos se ha calculado la relación de caudal líquido y sólido que proporciona una sedimentación acumulada en octubre de 2007, acotada entre 13 y 16.6 hm³:



$$0.65 \cdot 10^{-4} < \frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} < 0.832 \cdot 10^{-4}$$

La figura 28 muestra la horquilla de variación de la sedimentación del embalse. De acuerdo con estos valores, a fecha de octubre de 2016 la sedimentación en Ribarroja está acotada entre 15 y 19.3 hm³.

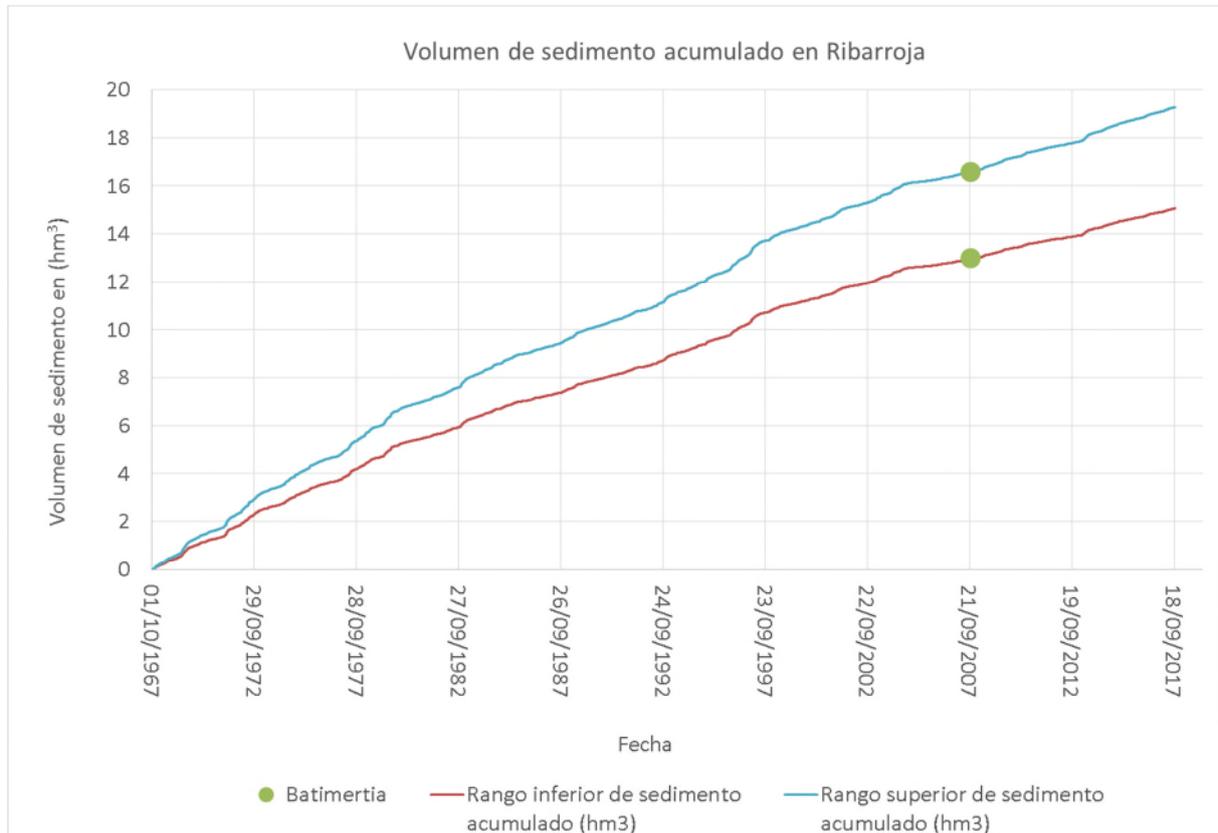


Figura 28. Rango de sedimentación acumulada en el embalse de Ribarroja

Partiendo del valor del rango medio de sedimentación, se ha obtenido la evolución de la sedimentación del embalse referida al caudal medio de sedimentación. Este caudal es de 940 m³/día. La figura 29 muestra el ajuste del caudal de sedimentación de los primeros años de explotación (1967-1980), que resultó de 1340 m³/día. La figura 30 corresponde al ajuste de los últimos años (2004-2016). El ritmo de sedimentación de este último período es de 640 m³/día. De acuerdo con esto, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.

Por tanto, considerando un porcentaje de retención de sedimento del 40 % (Flumen, 2009) en la entrada se Ribarroja el aporte de sedimento fue de 1.35 Mt/año, valor que coincide con el estudio inédito del CEDEX (2002).



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

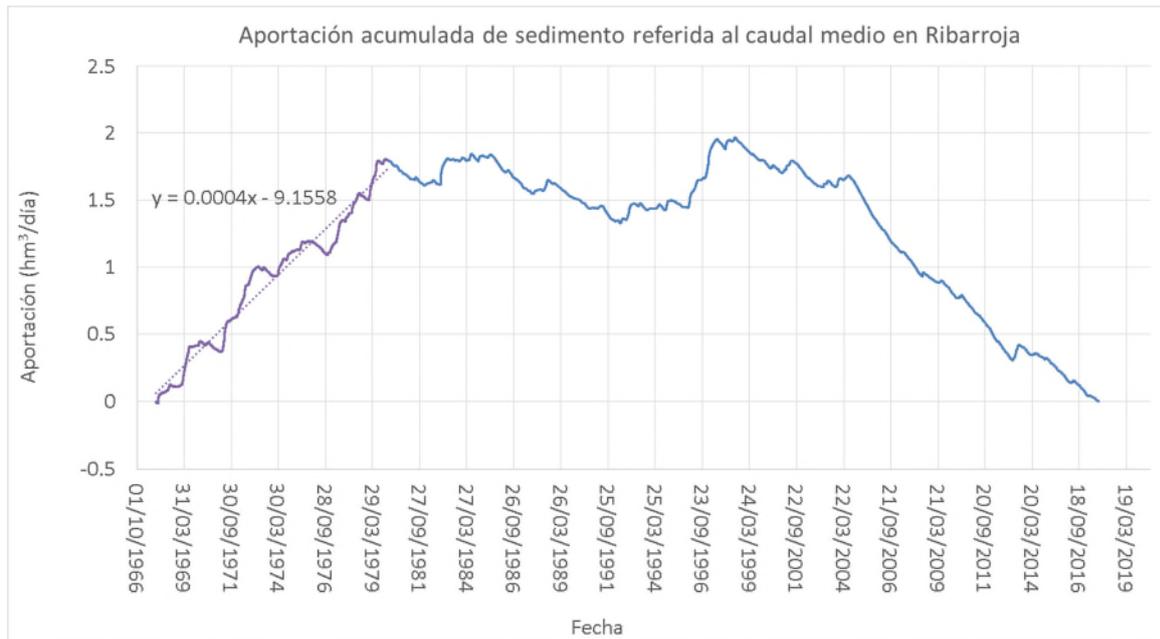


Figura 29. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 1967-1980

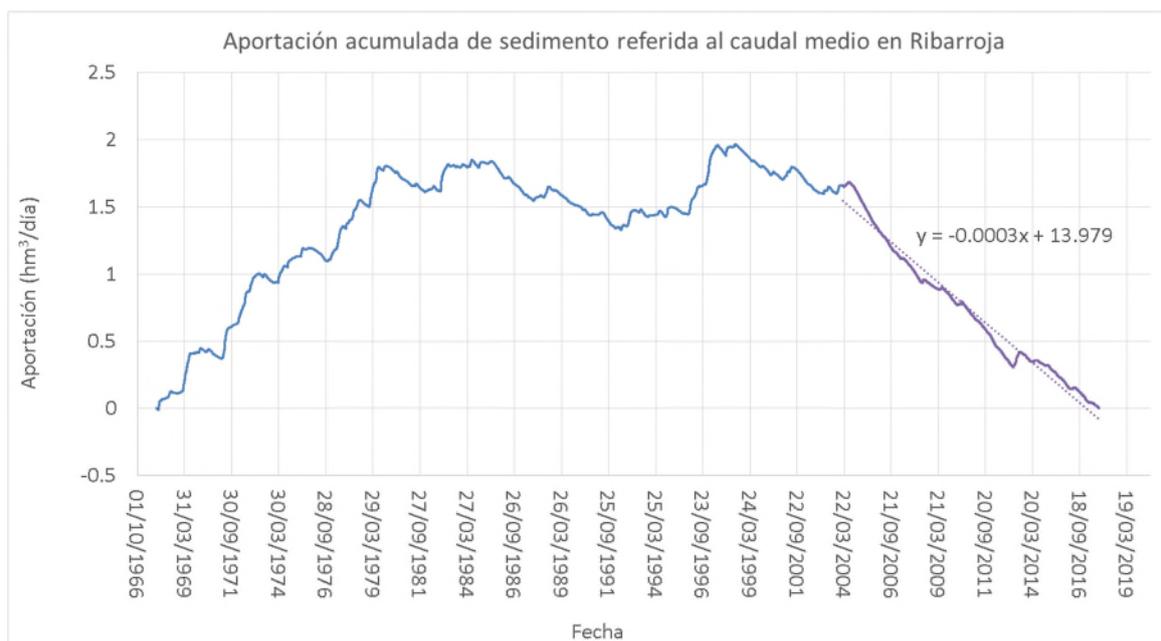


Figura 30. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 2004-2016



6. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RIO EBRO

En los apartados anteriores se ha analizado el transporte de sedimento aguas arriba de los embalses de Mequinenza y de Ribarroja. En el presente apartado va a realizarse una estimación de la evolución del tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro desde 1967 hasta la actualidad, analizando la influencia que ha tenido la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Para ello, se realizará en primer lugar una estimación del transporte de sedimentos que se tendría en la actualidad en la hipótesis de que no existieran estos embalses, seguida de un segundo análisis estudiando la situación actual, con los embalses en servicio.

Dado que las tasas de transporte obtenidas de los aforos sólidos parecen menos consistentes que las resultantes de los estudios batimétricos, para este análisis emplearemos las últimas.

La presa de Mequinenza retiene la totalidad de sedimentos que llegan a su embalse. Por tanto, el volumen retenido permite realizar un cálculo muy ajustado del volumen de sedimento transportado por la corriente del río Ebro. Con los datos de los reconocimientos batimétricos y las series temporales de caudal, se ha obtenido en el apartado 3.5, una relación lineal entre el caudal sólido y el caudal líquido de $0.6 \cdot 10^{-3}$, que reproduce el proceso de sedimentación del embalse (figura 24). Este ajuste nos permite generar la ley de caudal sólido en la ubicación de Mequinenza.

Aunque se ha realizado el mismo cálculo en el embalse de Ribarroja, la incertidumbre sobre la validez de la serie generada de caudal sólido es algo mayor, pues solamente se dispone de una batimetría del año 2007, y la retención de sedimento es parcial. El estudio de Flumen de 2009 aporta el dato de un 40.7% de retención.

Combinando las dos series se ha obtenido la serie de caudal sólido aguas abajo de Ribarroja en dos escenarios, considerando o no la no existencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

6.1. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro sin embalses

La serie de caudales combinada se ha generado desde 1967 hasta 2016. En este período la aportación media diaria del río Ebro aguas abajo de Flix es de $33.36 \text{ hm}^3/\text{día}$. La serie de caudales sólidos del Ebro aguas arriba de Mequinenza se ha obtenido con la relación obtenida en 3.5:

$$\frac{Q_{\text{sólido}}}{Q_{\text{líquido}}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

La serie de caudales sólidos aguas arriba de Ribarroja se obtuvo, considerando el coeficiente de sedimentación correspondiente al valor medio ($0.0741 \cdot 10^{-3}$), de acuerdo con la horquilla de sedimentación que proporcionaba el estudio batimétrico de 2007. Considerando que solamente se retiene el 40% de la aportación sólida, se ha



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

incrementado este coeficiente para que represente la carga total de la aportación y no solo la de la parte sedimentada:

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = \frac{0.0741 \cdot 10^{-3}}{0.4} = 0.185 \cdot 10^{-3}$$

La aportación sólida media resultante aguas abajo de la confluencia de los ríos Ebro y Segre es de 14700 m³/día. La figura 31 muestra las aportaciones de sedimento acumuladas y referidas al caudal sólido medio. Se aprecia que el transporte de sedimentos era mucho mayor, en las décadas de los años 60 y 70, se estabiliza en los años 80, y desciende desde entonces hasta la actualidad, en un ritmo sostenido. La figura 35 muestra el ajuste lineal que proporciona un caudal de 19700 m³/día. En el período 1986-2016 el caudal sólido medio es de 12600 m³/día (figura 36).

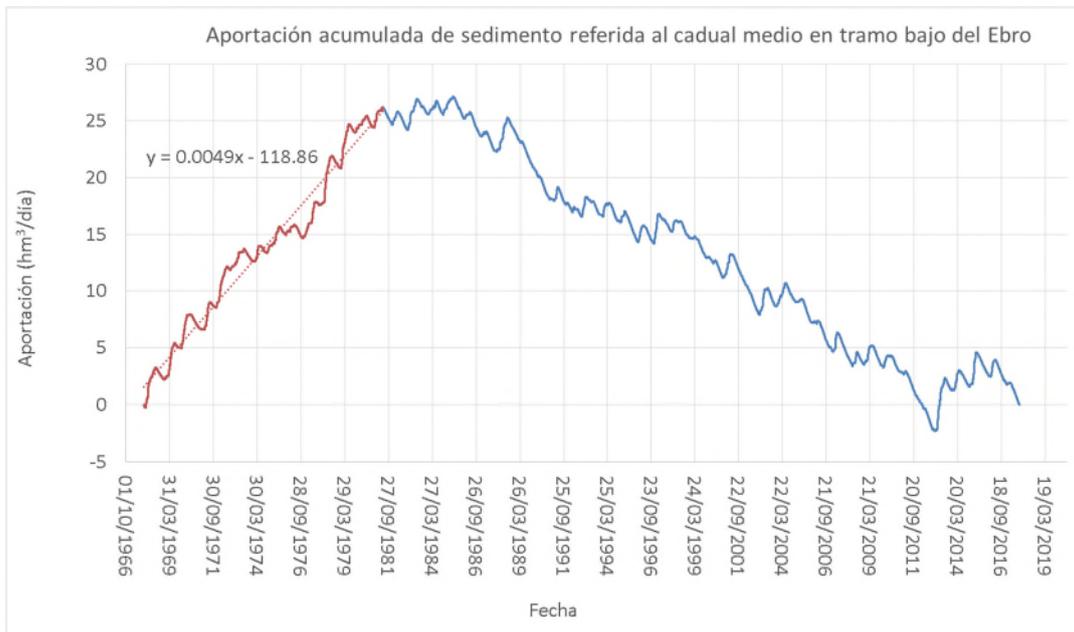
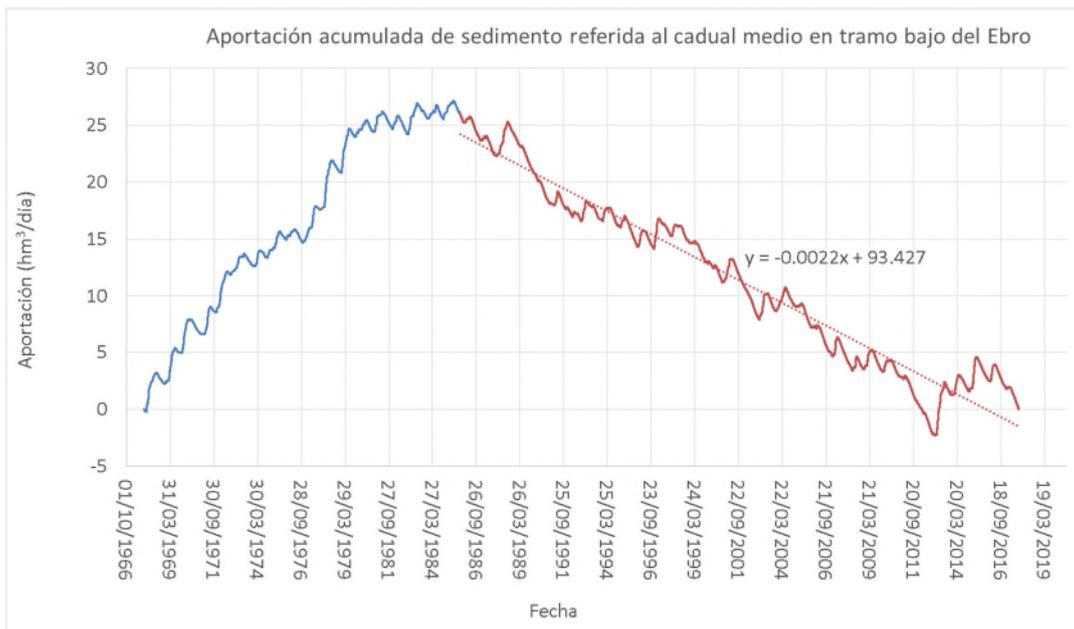


Figura 31. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981





PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

Figura 32. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016

De acuerdo con lo anterior se ha obtenido la tabla 2, que indica las tasas de transporte de sedimento que se habrían producido en el curso bajo del río Ebro desde 1967 a 2016 de no existir los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix.

Tabla 2. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo sin embalses

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	19700	7.17	8.08
1986-2016	12600	4.58	5.16

Varela y otros (1986) estiman que el año 1964 el aporte de sedimentos, a la altura de Flix era del orden de 8,7 Mt/año, valor que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

En caso de no existir embalses, en la actualidad el tramo bajo del río Ebro transportaría 5.16 Mt/año, más los aportes menores de las cuencas del tramo bajo.

6.2. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro con embalses

En la situación real, con los embalses de Mequinenza y Ribarroja en servicio, el cálculo de la aportación de sedimento se ha realizado considerando que Mequinenza retiene la totalidad del sedimento aportado por el Ebro, por lo que el único sedimento circulante por el cauce en Flix será el que no es retenido en Ribarroja, es decir, el 60% de las aportaciones conjuntas de los ríos Cinca y Segre. La figuras 33 y 34 muestran la aportación de sedimento acumulada referido al caudal medio del tramo bajo del río Ebro, que de este cálculo resulta ser de 1411.5 m³/día. El caudal medio de sedimento en el período 1967 a 1981 fue de 2111.5 m³/día (figura 33), que equivale a 0.827 Mt/año, mientras que el período de 2004 a 2016 es de 0.375 Mt/año (figura 34), menos de la mitad que en los años 70. De acuerdo con esto, se estima que en la actualidad la aportación de sedimento de río Ebro al delta será de 0.375 Mt/año, más las aportaciones de las pequeñas subcuencas del tramo bajo. La tabla 3 resume estos resultados.

Tabla 3. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo con embalses

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	0.0020	0.7342	0.8270
1986-2016	0.0009	0.3327	0.3747



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

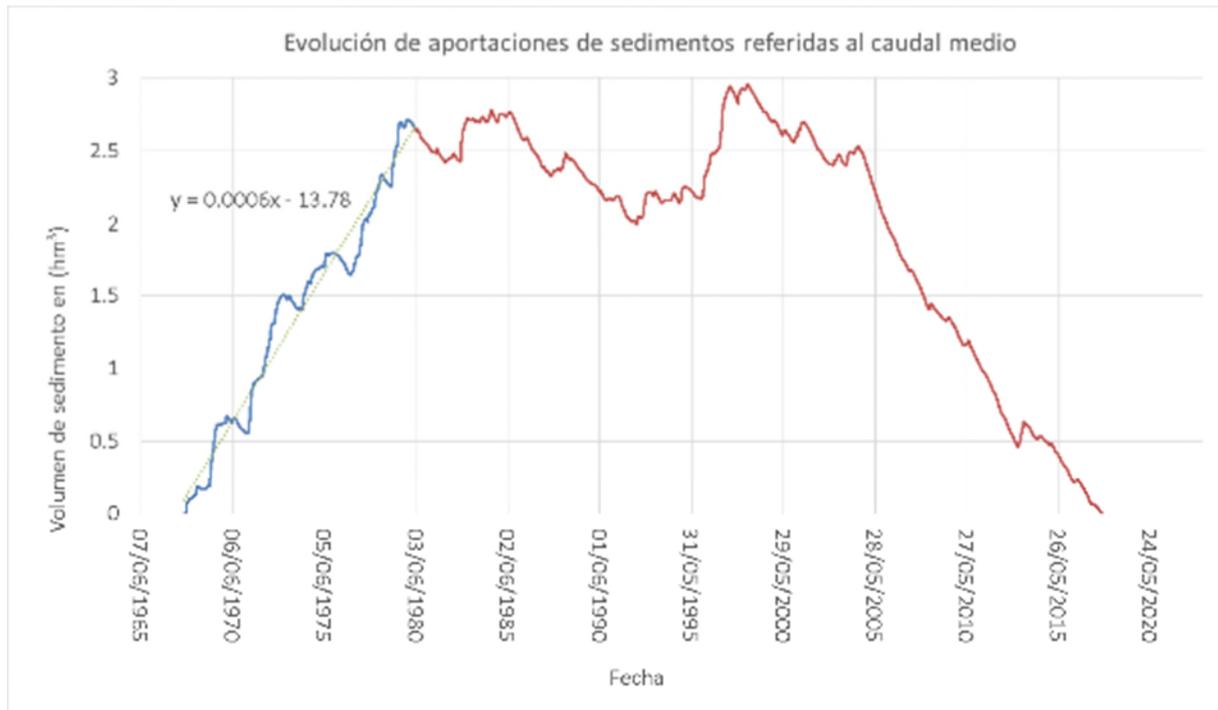


Figura 33. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981

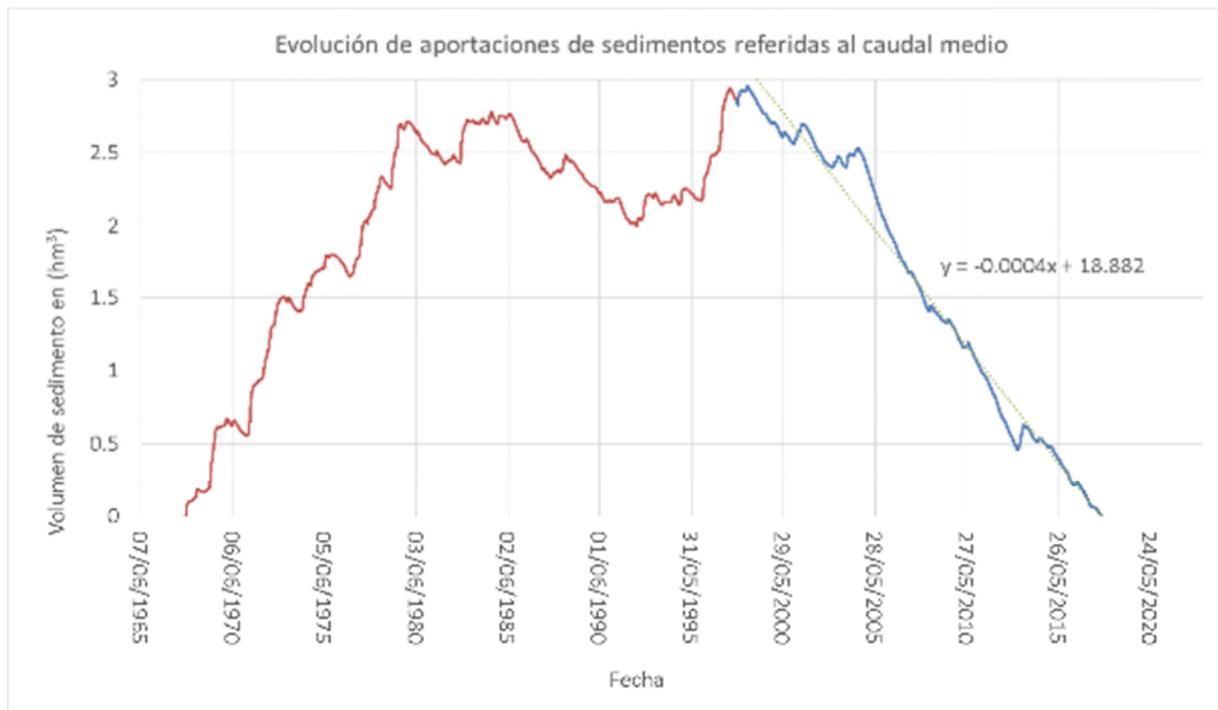


Figura 34. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016



7. CONCLUSIONES SOBRE LA CARACTERIZACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

El objeto del presente documento es analizar el transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro, con especial atención a la influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja y la caracterización de los sedimentos existentes en ellos. A tal fin, se ha recopilado y analizado la información disponible. Aunque resulta necesario realizar estudios complementarios, los datos disponibles han permitido realizar nuevos análisis como consecuencia de los cuales, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

Respecto al embalse de Mequinenza:

1. La capacidad inicial del embalse de Mequinenza, hasta la cota 121.15 msnsm, se ha reevaluado en 1483.29 hm³ (frente a los 1530 hm³ teóricos) Este valor se ha obtenido vectorizando las curvas de nivel de una digitalización de alta resolución facilitada por la CHE, de la topografía realizada en 1961 en el trabajo "Salto de Mequinenza: Concesión del aprovechamiento del río Ebro y afluentes" (Expediente CHE1957-A60), que utilizó el levantamiento topográfico a escala 1:5.000 de toda la zona del embalse apoyado en una triangulación general realizada por el Instituto Geográfico Nacional.
2. Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.
3. En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza, en el año 1982 los estudios batimétricos del CEDEX lo estimaban en 95 hm³ y en el presente informe se ha calculado que en 2012 ascendería a 211 hm³ y en la actualidad (2020) estaría en una horquilla entre 242 hm³ (calculado a partir de los valores de las tasas de aportación de sedimentos estimadas) y 245 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico).

Las diferencias entre todos estos valores recomiendan ser prudentes en su interpretación y realizar los estudios complementarios indicados en el apartado 7 para poder precisar con mayor rigor los valores reales.

4. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4.37 Mt/año entre 1982 y 2012
5. La aportación media de la cuenca del Ebro en Mequinenza desde su puesta en explotación hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. Este valor era de 27.2 hm³/día hasta el año 1982 donde se aprecia un acusado cambio de tendencia. Desde 1985 hasta la actualidad la aportación media se ha reducido a 17.7 hm³/día. La menor aportación de la cuenca en el período 1982-2012 frente al anterior (1969-1982) hace que la tasa retención haya descendido notablemente.



6. En el año 1982 se habían acumulado 95.42 hm^3 , 37.92 hm^3 de los cuales se acumularon en los últimos 42 km del embalse. La tasa anual de sedimento retenido en el embalse en este período fue de $5.96 \text{ hm}^3/\text{año}$, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m^3 , resulta 6.7 Mt/año .
7. En el lapso de tiempo de 30 años, desde 1982 a 2012, se acumularon en los últimos 42 km de la cola del embalse 46.28 hm^3 , totalizando 84.21 hm^3 , desde 1966 hasta 2012. Se estima que el resto del embalse de Mequinenza se depositaron 73.97 hm^3 , totalizando 116.25 hm^3 en el período 1982-2012. Si acumulamos a estos sedimentos los 95.42 hm^3 del periodo anterior a 1982, totalizan 211.67 hm^3 .
8. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4.36 Mt/año , equivalente a $3.87 \text{ hm}^3/\text{año}$.
9. Los sondeos realizados entre los PK 72 y 90 en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que de los 40.2 hm^3 de sedimento que existen en este tramo, 10.7 hm^3 son de arena y 3.7 hm^3 son de grava.
10. La información batimétrica disponible hoy en día no permite conocer con certeza la sedimentación existente en Mequinenza y Ribarroja. En el presente estudio se ha realizado un análisis de la información disponible al objeto de calibrar un modelo simplificado de la evolución sedimentaria de los mismos. Será necesario realizar nuevos estudios batimétricos para disponer de valores más precisos.

Respecto al embalse de Ribarroja:

11. El embalse de Ribarroja regula las aportaciones de los ríos Cinca y Segre. Su aportación media desde 1967 a 2016 es de $12.69 \text{ hm}^3/\text{día}$. Se aprecia, como en el caso de Mequinenza, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se identifica una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era $17.71 \text{ hm}^3/\text{día}$, mientras que en el período 2004-2016 es de $8.25 \text{ hm}^3/\text{día}$.
12. La batimetría de 2007 incluida en el “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja” (Grupo Flumen, 2009) indica que el volumen de sedimento retenido estaba en ese fecha entre 13 y 16.6 hm^3 .
13. Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja esté entre 15 y 19.3 hm^3 .
14. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año , valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.
15. No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse.



En cuanto al tránsito de sedimentos en el curso bajo del Ebro:

16. Se ha realizado un análisis con los registros de aforo sólidos elaborados por el CEDEX hace años en numerosas estaciones de muestreo para obtener las tasas de aporte de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, si bien los resultados obtenidos deben manejarse con precaución, ya que estos registros infravaloran el transporte de sedimento en suspensión en comparación con los valores obtenidos de los estudios batimétricos de los embalses.
17. Respecto al tránsito de sedimento en el curso bajo sin la existencia de Mequinenza y con los cálculos realizados en el presente informe se concluye que, de no existir los embalses de Mequinenza y Ribarroja, la tasa de transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro habría sido de 8.8 Mt/año en el período 1967-1982, valor que habría descendido desde 1986 hasta la actualidad a 5.16 Mt/año. A estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.
18. En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0.37 Mt/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0.83 Mt/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.
19. En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.



8. ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD ASOCIADA A LA POSIBLE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX.

A la vista de lo anteriormente expuesto, se procede en este capítulo a analizar la viabilidad técnica y la complejidad asociada de llevar a cabo acciones de movilización de los sedimentos desde estos embalses, aspecto que se ha estudiado con rigor en el trabajo promovido por la CHE (2018), “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”, llegando a las conclusiones de viabilidad que se citan seguidamente:

“Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix)”. La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”.

A continuación se detallan para cada embalse o sistema de embalse las posibles afecciones.

8.1. Condicionantes a la movilización de sedimentos del complejo de embalses Mequinenza- Ribarroja – Flix

En Mequinenza, de acuerdo con el estudio anteriormente citado, la retirada mecánica mediante excavación es una operación simple que utiliza medios convencionales de excavación y transporte para conducir los sedimentos a un punto por determinar, que en cualquier caso estará sumamente alejado. Al margen de su muy significativo coste, requiere obviamente el vaciado de los embalses para dejar libre el sedimento y trabajar sobre él. El periodo de embalse vacío debe ser largo si se quieren extraer los sedimentos en una magnitud significativa por medios mecánicos; se requerirían más de 45.000 viajes de un camión volquete con capacidad de 17,5 m³ para transportar 0,80 hm³, que con una densidad aparente aproximada de 1,25 g/cm³ equivaldrían a 1 millón de toneladas.

Esto hace que la retirada mecánica sea una opción en la práctica difícilmente considerable, especialmente en el embalse de Mequinenza, por el coste de extracción y la lejanía para el transporte, puesto que la distancia es de unos 80 km por carretera para trasladar esos sedimentos mecánicamente hasta Xerta, en la toma de los canales del delta, para su hipotética distribución por los canales, más de dos horas entre ida y vuelta. El embalse de Mequinenza tiene 1.533,8 hm³ de capacidad, ocupa una superficie de 7.720 ha y tiene una longitud de unos 106 km, localizándose el 80% de los sedimentos a más de 50 km de la presa.



Además, el vaciado parcial o completo de Mequinenza por un periodo prolongado causaría grandes efectos socioeconómicos, pues de su regulación dependen actividades como:

- La propia producción hidroeléctrica en su central de 324 MW. La producción media de las últimas décadas se cifra en 700 GWh, siendo una de las centrales consideradas estratégicas por Red Eléctrica Española.
- Los regadíos del delta del Ebro, por medio de sus canales de sus márgenes derecha e izquierda, por un total de 27.000 ha de arrozales y otros regadíos del bajo Ebro.
- El minitrasvase a Tarragona para el abastecimiento y la industria del Campo de Tarragona y otros abastecimientos.
- La refrigeración de la central de Ascó.
- Las múltiples elevaciones que tienen su toma directamente en la lámina del embalse.
- Los usos recreativos de navegación y especialmente pesca que tienen lugar en el embalse.
- La garantía del régimen de caudales ecológicos en la desembocadura del Ebro.

La retirada hidrodinámica mediante lavado es hasta cierto punto posible en el caso de Ribarroja y Flix, como se determina en CHE (2018), pero requiere también el vaciado. Esta modalidad técnica permite arrastrar el material depositado en el embalse aprovechando caudal de avenida, para lo que es necesario disponer de desagües de fondo operativos a cota suficientemente baja y con capacidad de evacuación a baja carga hidráulica para que la operación resulte efectiva. Con las cautelas que se establecen en CHE (2018), y los efectos que luego se detallan, se podrían realizar todas las operaciones para movilizar 1Mt en unos días, trasladándose aguas abajo con el propio flujo de agua.

La técnica de lavado es obviamente mucho más coste-eficiente que la excavación mecánica. El lavado es técnicamente factible en Ribarroja, si bien su efectividad estaría seriamente limitada por una serie de circunstancias desfavorables: “la escasa acumulación de sedimentos, la situación de los sedimentos, distribuidos a lo largo de los 30 km de vaso, la escasa pendiente o la probable compactación de los sedimentos tras haber transcurrido varias décadas sin ninguna acción de lavado”.

Las fórmulas empíricas que se evalúan en CHE (2018), método de Tsinghua, indican “que con un caudal de lavado de 200 m³/s se podría esperar una concentración de sedimento de unos 60 kg/m³, lo que permitiría evacuar 1 Mt en un día”...”sin embargo como se apunta pueden plantearse dudas sobre la viabilidad de la operación en Ribarroja, ya que la situación de los sedimentos es muy desfavorable”. A la operación en Ribarroja debería unirse la de Flix, al estar aguas abajo. En CHE (2018) también se señala que para un rendimiento del 1% en movilización del sedimento habría que utilizar como mínimo un 3% de la aportación anual (unos 350 hm³).

La presa de Ribarroja es de gravedad. Tiene 60 m de altura sobre cimientos, 38,3 m sobre cauce y 362 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 76,0 m y el cauce a cota 37,7 m. El nivel máximo normal está situado a cota 70,0 m.



El vaso tiene una capacidad de 209,56 hm³ a Nivel Máximo Normal (70,0 m), ocupando una superficie de 2.029 has. El embalse tiene unos 29 km de longitud, lo que supone una pendiente media de $8,3 \times 10^{-4}$ y un ancho medio de 700 m.

El aliviadero de Ribarroja está formado por siete vanos regulados por compuertas de con una capacidad de evacuación de 7.756 m³/s a cota 70,0 m. Además, dispone de varios desagües adicionales o de medio fondo que permiten evacuar 2.635 m³/s. Finalmente dispone de dos desagües de fondo a cota umbral 41,43 con capacidad para 273 m³/s.

La central hidroeléctrica tiene cuatro turbinas Kaplan fabricadas por Escher Wyss para un caudal de 900 m³/s suministrados por cuatro conductos cuyo umbral se sitúa a cota 41,47 m, prácticamente la misma cota que los desagües de fondo. El salto bruto máximo es 30 m y la potencia es 262,8 MW. Al igual que en el caso de Mequinenza, la producción media de los últimos años se sitúa en el entorno de los 700 GWh.

Por su parte la presa de Flix es de gravedad. Tiene 26,3 m de altura sobre cimientos y 400 m de longitud de coronación. El nivel máximo normal está situado a cota 41,05 m. La capacidad del vaso es de 11,41 hm³, ocupa una superficie de 320 has y su longitud es de unos 13 km. El aliviadero de Flix está formado por siete vanos regulados por compuertas con una capacidad de 9.800 m³/s. La central hidroeléctrica tiene cuatro grupos Kaplan fabricados por Escher Wyss, con un caudal de equipo de 400 m³/s. El salto bruto máximo es 12,1 m y la potencia es 42,52 MW.

A la vista de todo lo anterior, conviene por tanto, centrarse primordialmente en Ribarroja y analizar la complejidad que tendría la operación de vaciado para la movilización hidrodinámica de los sedimentos mediante lavado.

8.2. Complejidad del vaciado del embalse de Ribarroja.

La operación de lavado hidrodinámico requiere de un vaciado prácticamente total del embalse, seguido de un periodo de evacuación de sedimentos a través de sus desagües de fondo (y posiblemente intermedios), finalizando con la recuperación del volumen embalsado. Toda esta operación podría estar concluida en un mes, dependiendo de cuanto se quiera alargar el lavado, o también de si se quiere hacer en fases replicando la operación a lo largo de varias semanas durante el año. La operación debería comenzar en un momento favorable en el que se hubieran detectado caudales altos aguas arriba, tanto para el lavado como para el llenado posterior, o con unas condiciones de máximo volumen embalsado en Mequinenza para apoyar la operación con sus desembalses.

Toda operación de vaciado de un embalse reviste su complejidad, de lo que se tienen ejemplos en la propia cuenca del Ebro, y en particular del embalse de Barasona en 1995-1997, tanto por los efectos socioeconómicos como por los medioambientales que pueden provocar. Los socioeconómicos se derivan de los servicios que el embalse deja de prestar a los diferentes usos y actividades o la alteración de los



mismos, así como por los efectos que la deposición de sedimentos puede resultar aguas abajo sobre tomas de agua y las actividades económicas que se desarrollan en el cauce. Los medioambientales se manifiestan principalmente en los efectos del vaciado sobre las comunidades de peces y otras especies que acostumbran a residir embalse y sus hábitat, y aguas abajo también por efectos en la calidad y la acumulación de lodos sobre los ecosistemas del río, agravándose el problema en todos los niveles si estos sedimentos se encuentran contaminados.

Los efectos del vaciado en el propio embalse serían también aplicables a la opción de la retirada mecánica de sedimentos, incluso en mayor grado por requerir un periodo más prolongado. Los efectos aguas abajo solo para el lavado hidrodinámico, o en el caso del mecánico si estos sedimentos se depositaran en el pie de presa de Ribarroja o Flix para su conducción por el flujo del agua.

Todos estos elementos se analizan a continuación con detalle:

A) EFECTOS EN EL PROPIO EMBALSE:

A.1) Efectos sobre la producción eléctrica:

La central hidroeléctrica de Ribarroja tiene una potencia de 262,8 MW, con una producción variable dependiendo de la climatología anual, pero que de media se sitúa en el entorno de los 700 GWh/año, lo que la sitúa cerca del 10% de toda la producción hidroeléctrica de toda la cuenca del Ebro. Es una de las centrales consideradas estratégicas por Red Eléctrica de España para los servicios de arranque autónomo, regulación secundaria y garantía a medio plazo. Se trata además de un embalse que contando con la presa de Mequinenza, inmediatamente aguas arriba, se explota a nivel constante, a una cota media que en el periodo 1999-2018 fue de 66,24 m, CHE (2018).

En CHE (2018) se evalúan las pérdidas de producción en la operación de lavado, tanto por turbinar con menor salto durante el vaciado y llenado, como por dejar de turbinar durante el lavado. Se estiman las pérdidas en unos 10.000 Mwh, por un valor de 500.000 € para evacuar 1 Mt de sedimentos durante la operación de lavado.

En todo caso, en un año medio de producción cifrado en 700 GWh, cada día se producen de media sobre 2.000 MWh, que a un precio medio del mercado diario en 2018 de 58,12 €/Mwh arrojarían 116.000 €/día, al margen de otros posibles pagos por su carácter estratégico, por cada día en que no existe producción de ningún tipo, que es lo que habría que aplicar si se alarga la operación de lavado para tratar de evacuar más sedimentos.

En CHE (2005) se evalúan también las pérdidas de producción que resultarían de bajar durante 15 días el embalse de Ribarroja a la cota 60 para el control del mejillón cebra, obteniendo entre 77.846,10 € y 30.520,27 €, para un precio del mercado eléctrico de 69,6 €/Mwh y varias hipótesis de turbinación y teniendo en cuenta lo que puede turbinar también Mequinenza. Todo el desagüe en este caso se produce turbinando.



Pero estas pérdidas no son lo más importante, pues aparte de su propia producción, en su carácter estratégico está que la central de Ribarroja tiene el cometido de dar respaldo de seguridad a las centrales de Ascó y Vandellós, para situaciones de pérdida de suministro eléctrico exterior o la necesidad de reponer un cero de tensión en la red, estando prevista por parte del operador eléctrico para estos casos la operación en isla desde la central hidráulica de Ribarroja.

Concretamente, dentro de los procedimientos del operador del sistema eléctrico por la pérdida de suministro eléctrico exterior y la necesidad de reposición de tensión en caso de un cero en la red que da prioridad a la alimentación de las centrales nucleares, en particular para las centrales de Ascó y Vandellós “está prevista de modo preferente la alimentación de la central en isla desde la central hidráulica de Ribarroja, disponiéndose de tres modos (automático, por telemando y manual) para formación de la alimentación “en isla”, los cuales se prueban periódicamente” CSN (2011).

El vaciado de Ribarroja, que requeriría por tanto previamente su valoración con Red Eléctrica Española y el Consejo de Seguridad Nuclear, podría entonces afectar el funcionamiento de estas centrales y posiblemente implicar su parada en condiciones de seguridad. Así, antes de preparar cualquier escenario de vaciado de Ribarroja, sería necesario tratarlo con los interlocutores referidos, pues la parada de dos de los más importantes grupos nucleares del país puede tener con certeza un coste inasumible para la operación. Solo los dos grupos de Ascó produjeron en 2018, 16.718,7 GWh, lo que vendrían a ser más de 2,5 millones de € al día a precios del mercado. De hecho, su falta afectaría incluso al precio diario del mercado eléctrico. Se trata por tanto de un elemento que puede resultar crítico.

A.2) Efectos sobre las tomas directas:

En la propia lámina del embalse de Ribarroja existen diversas tomas para abastecimiento y usos agrarios, que además están diseñadas teniendo en cuenta la escasa carrera del embalse. Entre las tomas agrarias destacan los regadíos de la Terra Alta (cota mínima 61,0 m) o los regadíos de Fayón (cota mínima 63,0 m), pero pueden no verse afectados con tal de programar la operación fuera de la temporada de riego. El caso de las tomas de abastecimiento es distinto, y debe proveerse un abastecimiento alternativo para el tiempo que dure el vaciado.

De acuerdo con CHE (2005) las poblaciones que necesitarían toma alternativa de abastecimiento por bajar de cota la lámina de embalse serían: Granja d’Escarpi, Torrente de Cinca, Mequinenza, Almatret, Fayón, Pobla de Massaluca, Ribarroja de Ebro, Nonaspe, considerando factible un abastecimiento alternativo mediante cisternas durante 15 días por un coste aproximado de 233.687,20 €, o lo que es lo mismo 15.579 €/día a precios de 2005. La mayor bajada de cota por el vaciado total no implicaría un mayor coste.



A.3) Efectos sobre los usos recreativos:

El embalse de Ribarroja es uno de los que congregan mayores actividades recreativas en la cuenca del Ebro, especialmente en torno a la pesca de especies alóctonas, principalmente siluro, pero también black-bass o lucioperca, estimándose 72.000 usuarios anuales. También cuenta con actividades de navegación, asociadas o no con la pesca. Además de los varios clubes y sociedades de pesca, existen cámpines y otros alojamientos para los usuarios, muchos de ellos centroeuropeos. CHE (2005) estima las pérdidas en 418.900 € para un periodo de 2 semanas en el que la cota de la lámina de agua se baja a 60 m. Este estudio no encuentra efectos sobre infraestructuras como pantalanés por la bajada de cota. Los efectos radicaban en la merma de actividad, pues las fechas que se contemplaban para la operación de regulación de cota para la lucha contra el mejillón cebrá, eran entre el 15 de septiembre y el 15 de octubre por ser las que mejor se adecuaban para su erradicación, pero que todavía pueden considerarse temporada alta a efectos recreativos

Obviamente, puede programarse el vaciado a otras fechas, pero en este caso la situación es muy diferente y no es trasladable el análisis de CHE (2005), porque en nuestro caso un vaciado total afectará de forma drástica a las especies de peces que nutren las expectativas recreativas del embalse, manteniéndose estos efectos probablemente por varios años hasta recuperar la situación de partida.

Ya en CHE (2005) se preveían efectos sobre la ictiofauna al bajar el nivel del agua hasta la cota 60 m, previendo la necesidad de conectar pozas, realizar operaciones de rescate y salvamento, y con todo mortandades y necesidad de repoblaciones, estimando un coste de las medidas correctoras en estos aspectos en el entorno de los 500.000 €. El caso de vaciado completo hasta la cota 40 m tendrá efectos muchísimo más dramáticos y puede necesitar de medidas de compensación por valor de varios millones de euros, especialmente si se decide concentrar el rescate y las repoblaciones solo en especies autóctonas, dejando que el embalse recupere una fauna más naturalizada, al menos temporalmente, y compensando a los usuarios turísticos por pérdidas de carácter más permanente y aunque parte de los usos turísticos pudieran reconducirse a Mequinenza.

A.4) Efectos sobre el medio ambiente:

Estos efectos en el propio embalse son en parte similares a los comentados en el punto anterior. Con la reducción del volumen embalsado y la superficie inundada se producirán cambios sustanciales en las comunidades biológicas existentes, provocando la muerte de una gran parte, si bien en este caso se trata de un embalse en el que proliferan las especies alóctonas invasoras como el mejillón cebrá y el siluro. Se necesitarán actuaciones para paliar los efectos negativos mediante medidas centradas en el rescate de especies autóctonas o en peligro de extinción, como pueda ser el pez fraile o algunos bivalvos.

Si bien, como se ha indicado, podría aprovecharse el vaciado para realizar una cierta renaturalización de especies, y limitar la presencia del mejillón cebrá en el embalse,



no se considera posible que esta renaturalización pudiera mantenerse a largo plazo, dada la amplia presencia aguas arriba y abajo del embalse de las citadas especies alóctonas, por lo que pasados unos años se recuperaría la situación de partida.

Por otro lado, el vaciado afectará al espacio natural de los Aiguabarreig del Segre-Cinca, pues se trata de un espacio ribereño situado en el entorno de la lengua del embalse que penetra en el tramo final de estos dos ríos una vez ya unidos. La disminución de la corriente provocada por el embalse de Ribarroja ha incrementado la sedimentación y con ello la masa y extensión forestal ribereña, aumentando las islas fluviales existentes y la aparición de otras nuevas, donde estos hábitats de ribera cuentan con gran desarrollo, favorecidos por una lámina de agua constante. Un vaciado prolongado sin duda los afectará.

A.5) Efectos sobre el estado de la masa de agua ES091MSPF949 Embalse de Ribarroja:

Esta masa de agua de carácter muy modificada se califica en el Plan Hidrológico 2015-2021 en un estado químico bueno, pero con un potencial ecológico inferior a bueno, con incumplimientos en los indicadores biológicos de densidad algal, clorofila a, biovolumen algal, fitoplacton, zooplacton, transparencia y concentración de fósforo. El vaciado alterará estos indicadores. Durante el tiempo de la operación de lavado la masa de agua, pasará de ser embalse a ser río, para luego recuperar su carácter de embalse. Conviene determinar el estado cero de estos indicadores en el momento previo al vaciado y hacer su seguimiento después del posterior llenado, evaluando cómo la masa de agua resulta afectada.

B) EFECTOS AGUAS ABAJO DEL EMBALSE

Los efectos aguas abajo del embalse tienen un grado mayor de incertidumbre, pues dependen principalmente de la magnitud y el comportamiento de los sedimentos una vez movilizados. Sus efectos serían también transitorios pero posiblemente de gran intensidad.

B.1) Efectos sobre el estado y la calidad de las masas de agua:

Durante el vaciado de los embalses a través de los desagües de fondo, el agua procede de las capas inferiores, en general de menor calidad y con concentraciones bajas de oxígeno disuelto, incluso anóxicas, pudiendo causar mortandades de peces.

En principio, se ha llegado a constatar la turbinación de aguas anóxicas, CHE (1996), siendo la cota de toma similar a la de los desagües de fondo; sin embargo en los últimos datos de control del estado en el embalse de Ribarroja, categorizado como eutrófico, en los muestreos realizados el 2 de agosto de 2017 y el 25 de julio de 2018, no se encontró estratificación ni condiciones anóxicas. El tiempo renovación de sus aguas es inferior a un mes. Por tanto, es poco probable que se den mortandades de peces por el desagüe de aguas con bajo contenido en oxígeno disuelto, especialmente



porque hasta ahora no se ha experimentado con la turbinación, y porque como también se señala en CHE (1996), el riesgo de los efectos de la anoxia sobre los peces puede atenuarse por el embalse de Flix, donde los peces pueden encontrar refugio hasta que la situación se normalice.

El riesgo a la calidad aguas abajo es mayor por otros dos factores: la turbidez y la contaminación que puede estar presente en los sedimentos.

El incremento en los niveles de turbidez que provocará el tránsito de sedimentos tendrá varios efectos significativos:

- Afectará a los abastecimientos aguas abajo. No a abastecimientos que tienen pozos en el aluvial, como es el caso de Tortosa, pero sí al Consorcio de Aguas de Tarragona que abastece a unas 700.000 personas e industrias y que toma desde los canales del delta. Una mayor turbidez puede dificultar o impedir el funcionamiento de las estaciones potabilizadoras.
- Puede afectar a la refrigeración de la central de Ascó.
- Se producen efectos en las comunidades biológicas al alterar el paso de la luz. Algunos investigadores también han descrito pérdida de eficiencia en las agallas de los peces, abrasión en los animales e incluso cambios en la composición química del agua (Béjar et al., 2018).

Por otro lado, los materiales sedimentados en el fondo pueden contener contaminantes que pueden movilizarse con el conjunto. En el caso del embalse de Ribarroja, el trabajo CHE (2010) analiza la presencia en los sedimentos de metales que pueden ser debidos a la contaminación de origen antropogénico y señala que *“las concentraciones superficiales de zinc, plomo, cromo, níquel y cobre en el sedimento son inferiores a las descritas para el material transportado por los ríos (...). La concentración de plomo, tanto en superficie como en profundidad (hasta 30 cm) es siempre inferior al nivel umbral de toxicidad. El zinc presenta un patrón similar, aunque hay que destacar un incremento subsuperficial en la estación localizada en la entrada del Matarraña que se acerca al nivel umbral de toxicidad. Las concentraciones de cobre y níquel presentan una variación muy similar entre sí, con valores próximos al umbral de toxicidad en el caso del cobre y concentraciones que superan el umbral y se aproximan al límite de toxicidad probable en el caso del níquel. La concentración de cromo supera el umbral de toxicidad en todo el embalse, pero nunca alcanza el límite de toxicidad probable”*. En definitiva, aunque debe vigilarse, no parecen anticiparse problemas significativos por la composición química de los sedimentos almacenados en Ribarroja.

Un cariz distinto es que la operación de lavado en Ribarroja debe acompañarse con el embalse de aguas abajo de Flix, y en este embalse está desarrollándose la última fase de los trabajos de “Eliminación de la contaminación química del embalse de Flix” mediante la extracción, tratamiento, transporte y vertido controlado de los residuos acumulados en el vaso. En los sedimentos de este embalse se encontraron cantidades apreciables de compuestos organoclorados, metales pesados y radionucleidos, procedentes de la industria química centenaria de Flix. Si, a pesar de



los trabajos efectuados, no se hubieran eliminado por completo, la operación de lavado podría movilizar estos compuestos y dependiendo de la concentración resultante de los mismos afectar:

- A todos los abastecimientos aguas abajo para una población cercana al millón de habitantes. En este caso, para llevar a cabo la actuación de eliminación de los sedimentos de Flix, se desarrollaron una serie de instalaciones de emergencia para su uso en caso de que se produjera la activación de estos contaminantes y su transporte aguas abajo. Estas instalaciones servirían también para este caso.
- A las explotaciones de acuicultura, principalmente moluscos, del delta, a la pesca y a los regadíos, tanto para su desarrollo como para la comercialización de productos.
- A las comunidades biológicas y los propios ecosistemas. La sedimentación modifica el sustrato del lecho.

En conjunto, al resultar afectados elementos de calidad biológicos y físico químicos de las masas de agua, podrá dar lugar al deterioro temporal de su estado y sería necesario evaluar este deterioro y las posibilidades de recuperación en función del régimen de desembalses de sedimentos que se realizara (Tabla 4).

Tabla 4. Estado o potencial ecológicos determinados en el Plan Hidrológico 2016-21 para las masas de agua existentes desde el embalse de Flix, hasta la desembocadura del río Ebro en el mar Mediterráneo.

Código	Nombre	Estado o Potencial Plan Hidrológico 2016-21
ES091MSPF74	Embalse de Flix	Inferior a bueno
ES091MSPF459	Río Ebro desde la presa de Flix al desagüe de la central hidroeléctrica de Flix	Inferior a bueno
ES091MSPF460	Río Ebro desde el desagüe de la central hidroeléctrica de Flix hasta Ascó	Bueno
ES091MSPF461	Río Ebro desde Ascó hasta el azud de Xerta	Inferior a bueno
ES091MSPF463	Río Ebro desde el azud de Xerta hasta la estación de aforos 27 de Tortosa	Bueno
ES091MSPF891	Río Ebro desde Tortosa hasta desembocadura (aguas de transición)	Bueno

Y además habría que tener en cuenta las posibles afecciones en el resto de masas de agua subterráneas, de transición y costeras relacionadas con la operación de desembalse de sedimentos.

B.2) Efectos por la deposición de sedimentos:

La operación de lavado genera una alta concentración de sedimentos en los caudales de desagüe. Su tránsito en los 140 km de río hasta la desembocadura no estará exento de dificultades y los sedimentos se irán depositando en diferentes lugares del río, especialmente en las zonas más cercanas a la presa de Ribarroja, incluyendo el



embalse de Flix, y en todos los obstáculos aguas abajo que hagan disminuir la velocidad del flujo, afectando especialmente a las riberas y tomas de agua.

La experiencia de vaciados anteriores como el de Barasona, o el más reciente de Santolea, indican que estos efectos serán inevitables aunque también reversibles en el medio plazo y con sucesivas crecidas que puedan ir movilizando los depósitos. No obstante, dependiendo de la dimensión final de la operación de lavado, pueden también resultar de una magnitud difícilmente asumible, y ser mayores y más continuos dependiendo de las posibles repeticiones del proceso de lavado, llegando a requerir su retirada mecánica en algunos puntos.

Esta acumulación de sedimentos puede tener varios puntos críticos, entre los que destacan:

- Espacios naturales. En particular pueden verse afectadas la reserva natural de Sebes y el meandro de Flix, y la zona de especial conservación de Riberas e Illes de l'Ebre. Es probable que el tránsito sedimentario y la deposición afecte a los valores naturales de estas zonas, que cuentan con ecosistemas acuáticos de alto interés. Otros espacios ribereños no protegidos pero también de interés pueden verse igualmente afectados. Pueden colmatarse pequeños brazos y sistemas microlagunares ribereños. También pueden resultar afectados los ecosistemas del propio delta.
- La toma de refrigeración de la central nuclear de Ascó. La posible obturación por sedimentos puede ser causa de la necesidad de parar la central nuclear. Dados los protocolos de funcionamiento y seguridad de estas instalaciones, la sola previsión de estos problemas motivaría su parada.
- El azud de Xerta. Los sedimentos que llegasen al azud de Xerta se repartirían entre los caudales derivados en los canales (~50 m³/s) y hacia la desembocadura. En el azud se produce un remanso, reduciéndose la velocidad, y además se produce también un cambio brusco de dirección del flujo que favorecerá la sedimentación en el propio azud, afectando también a las tomas de los canales y la central hidroeléctrica.

Por los canales el tránsito sedimentario tendría un recorrido hasta llegar a los arrozales a través de su red de canales, que para la margen derecha es de 52 km en el canal principal y de 49 km en las 8 acequias secundarias, y para la margen izquierda, de 27 km el canal principal y de 39 km en acequias secundarias, donde pueden producirse depósitos.

La entrada en los canales, con su escasa pendiente y la disminución de velocidad, favorecerá la deposición en los propios canales, especialmente en los tramos iniciales pudiendo llegar a obstruirlos. Más adelante, podría también afectar a las derivaciones para el riego de los propios canales del delta y a las tomas de los canales del Consorcio de Aguas de Tarragona.



La acumulación de sedimentos en el propio lecho del río en la desembocadura y en particular en la bocana, puede impedir la navegación recreativa y aumentar las necesidades del dragado del cauce que se realizan periódicamente.

Debe tenerse presente que una vez movilizados los sedimentos de Ribarroja y después de las deposiciones en tránsito, solo una fracción circulará por los canales del delta y sus acequias secundarias y a través del riego de los arrozales podrá ser incorporada a la planicie deltaica. El resto, la parte más sustancial, llegará hasta la desembocadura y allí será la propia dinámica litoral la encargada de depositarla libremente y no en la llanura deltaica.

Todos los efectos descritos requerirían un análisis más detallado para tratar de ajustar su magnitud y realizar una valoración económica de los mismos.

8.3. Conclusiones sobre la complejidad del movilizado de los sedimentos en ambos embalses.

A la vista de lo anteriormente expuesto, cabe llegar a las siguientes conclusiones iniciales:

1. La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante la técnica hidrodinámica de lavado puede ser factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud.
2. Puede considerarse como el punto más crítico la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja que les da respaldo de seguridad. Si realmente esto es así, lo que debería asegurarse con los operadores antes de cualquier otra discusión, la operación de vaciado puede considerarse económicamente inasumible; afectaría incluso al precio del mercado diario de electricidad. Parecido resultaría si el flujo de sedimentos resultante afecta de tal forma a la refrigeración de Ascó que también debe parar su producción.
3. Los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse.
4. Dependiendo de la duración del vaciado, pueden producirse graves efectos en el espacio natural de los Aiguabarreig Cinca-Segre.
5. Si la operación de lavado fuera exitosa, existía un riesgo elevado de una acumulación excesiva de sedimentos a lo largo del cauce aguas abajo que



afecte a numerosos elementos: espacios naturales y ecosistemas acuáticos, tomas de abastecimiento y regadíos, navegación recreativa.

Por lo que tal y como se refleja en el documento, la magnitud de los efectos es tan grande que es esencial realizar numerosos estudios que permitan analizar la problemática con profundidad.

9. RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS CONTROLADAS EN EL RÍO EBRO Y GESTIÓN DE LOS DESAGÜES DE FONDO DE LOS EMBALSES

En España la discusión sobre el diseño e implantación de crecidas generadoras se inició a mediados de los años 90. Posteriormente, y una vez asentado su fundamento normativo, las primeras experiencias de descarga de crecidas generadoras han mostrado su importancia para la mejora hidromorfológica y ecológica de las masas de agua asociadas, pero también la trascendencia de realizar un estudio detallado de sus efectos, para introducir mejoras sustanciales en su diseño.

Hasta el momento son pocas las experiencias existentes sobre crecidas controladas, siendo las más relevantes las realizadas en el río Pisuerga (Embalse de la Requejada), en el río Luna (Embalse de Barrios de Luna), en el río Esla (Embalse de Riaño), en el río Cardener (Embalse de la Llosa del Cavall), en el río Llobregat (Embalse de La Baells) y sobre todo en el sistema de embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix del río Ebro.

En estos casos, la descarga de las crecidas se ha conseguido gracias al acuerdo y a la colaboración entre el Organismo de cuenca y los usuarios más directamente afectados por su puesta en marcha. En el caso de las sueltas en el río Ebro destaca, en este sentido, el papel proactivo de Endesa durante el diseño, ejecución y seguimiento de las crecidas controladas. En la tabla 5 se presenta, de manera esquemática, las características y las consecuencias más significativas de la descarga de dichas crecidas generadoras en el río Ebro (Tena et al., 2013; Magdaleno, 2017).

Tabla 5. Características de las crecidas controladas que se vienen liberando en el tramo bajo del río Ebro.

<i>Crecida controlada Río Ebro</i>	
Fecha de descarga	2 por año, a partir de 2002
Caudal punta (m ³ /s) y periodo de retorno asociado (años)	900-1300 / 1.5-2
Duración (h)	16
Volumen (hm ³)	36 (cada una)
Estacionalidad	Primavera y Otoño
Tasas de cambio	Variable, en relación con otros requerimientos técnicos de la crecida
Objetivo principal	Control de macrófitas y mejora de la dinámica hidrosedimentaria
Principales efectos geomorfológicos	Elevada capacidad para la génesis y el transporte sedimentario, pero con un impacto geomorfológico limitado en el conjunto del tramo
Principales efectos ecológicos	Efectos relevantes pero irregulares sobre el control de macrófitas



Nuevas crecidas previstas

Sí

Otras observaciones o comentarios

Se ha evidenciado que el tramo bajo del Ebro se encuentra aún en proceso de ajuste geomorfológico

Hasta el momento esta crecida generadora está teniendo un impacto positivo sobre el control de macrófitas del cauce, si bien, parece que el lecho del río aguas abajo está teniendo problemas al no recibir aportes sedimentarios, que puede motivar la creación de una coraza sobre el lecho, puesto que dichas crecidas pueden movilizar los sedimentos del fondo, sin recibir aportes superiores, pero aún no se conoce con detalle el estado general del lecho y la movilidad existente, siendo necesario desarrollar mediciones directas de campo, experimentos y modelización.

10. ESTUDIOS DE I+D+i A REALIZAR PARA LA MEJORA DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DERIVADA DEL RIO EBRO.

Las construcciones deltaicas en las desembocaduras de los ríos se producen en periodos de estabilidad del nivel del mar, cuando existe un exceso de sedimentos aportados por el río que no pueden ser evacuados mar adentro por el oleaje, las corrientes costeras o las corrientes de marea. El equilibrio dinámico entre estos factores determina en gran parte la forma que adquiere la desembocadura de un río y su llanura deltaica.

Tal y como se ha analizado en el presente documento, el aporte de material sólido del Ebro en su desembocadura se ha reducido de forma importante durante el siglo XX. Se estima que la aportación sólida media anual que ha alcanzado el Delta en las últimas décadas es muy inferior a la que existía a finales del siglo XIX y principios de siglo XX. Este hecho se debe fundamentalmente a la menor magnitud de las crecidas del río y a la retención producida en los embalses, especialmente en Mequinenza y Ribarroja, durante la segunda mitad del siglo XX.

La falta de aportes sólidos en el río y por tanto de sedimentos que llegan al Delta provocó una adaptación a las nuevas condiciones en los años posteriores a la construcción de los embalses. Este hecho supuso el retroceso del cabo de Tortosa en 1,5 km y una readaptación de la morfología del delta, con un balance neto de sedimentos. Es decir, lo que se erosionaba en unas zonas se sedimentaba en otras. Este ritmo de adaptación fue disminuyendo progresivamente. Con respecto a la subsidencia no existen cuantificaciones totalmente precisas de este proceso, siendo necesario mejorar esta cuantificación para hacer un diagnóstico acertado del proceso y poder llegar a plantear soluciones racionales y eficaces.

El problema de la falta de sedimentos en el Delta ha provocado alcanzar un nuevo equilibrio. Resulta preciso tener una mayor comprensión de todos los factores involucrados y de sus interrelaciones. No obstante, los efectos de este problema deben en cualquier caso contemplarse desde una perspectiva histórica amplia, en la que el Delta se ha manifestado como un espacio vivo y cambiante, extraordinariamente influido por las modificaciones naturales o artificiales de los dos agentes, fluvial y marítimo, que lo modelan. Esta influencia es tal que la configuración



y desarrollo que actualmente muestra el Delta derivan en parte de la deforestación asociada con la puesta en cultivo de la cuenca del Ebro.

Los aportes sólidos están muy relacionados con las crecidas de un río, por lo que es conveniente estudiar previamente su régimen de caudales máximos, que se ha ido progresivamente transformando a lo largo del tiempo, tanto por el clima como por la gestión de los embalses.

Cuando no se producen crecidas extraordinarias en el río, el aporte de sólidos es más reducido. Consecuentemente, los aportes producidos durante la segunda mitad del siglo XX deben ser notablemente inferiores a los de épocas anteriores. Siendo en este punto las crecidas de mayor magnitud ocurridas, cuando también la cuenca del Segre aporta caudales importantes.

El aporte de sólidos en la desembocadura del río Ebro, además del régimen de crecidas del río, es función de cómo se produce la erosión en la cuenca, de las retenciones de los sedimentos en los embalses y de la capacidad para el transporte de material sólido a través de los cauces.

La erosión en las cuencas ocurre principalmente durante los eventos de precipitación máxima y durante las crecidas de los ríos, con una mayor facilidad y rapidez en aquellas zonas donde el suelo se encuentra más desprotegido por tener una menor cobertura vegetal. La sedimentación ocurre en tramos de baja pendiente de los cauces, en las llanuras de inundación, al producirse el desbordamiento en los cauces, y también en los embalses, donde se retienen cantidades importantes de material sólido.

El transporte de material sólido en los cauces puede producirse básicamente de dos formas: por arrastre de fondo y en suspensión. El transporte por arrastre afecta al sedimento de mayor tamaño que viaja por el fondo del cauce. Este transporte no suele llegar a la desembocadura del río en porcentajes significativos y, en una primera aproximación, podría considerarse que los sólidos en suspensión en el tramo final del Ebro deberían ser del orden de los aportes sólidos totales.

Tal y como se recoge en el ETI, la génesis del delta ha estado vinculada con los usos humanos y los ciclos climáticos. La existencia de periodos secos o cálidos, conjuntamente con la acción forestal del hombre han sido determinantes en la intensidad de desarrollo del delta. Todos estos factores contribuyen a disminuir la tasa de erosión de la demarcación y, por tanto, la actividad de la dinámica sedimentaria del delta. La falta de aportes de sedimentos del delta, se ve reforzada por la construcción del embalse de Mequinenza en 1966, a lo que se le añade la posterior construcción del embalse de Ribarroja en 1969.

Con respecto a la subsidencia, se estima valores entre 1-3 mm/año a partir de los últimos estudios realizados con técnicas interferométricas mediante satélite. No se detectan patrones de movimiento de gran extensión ni intensidad.

En este sentido, es de destacar el debate producido en los últimos años respecto a la recuperación del aporte de sedimentos a la desembocadura del Ebro, que necesita la



realización de nuevos estudios cartográficos y de I+D+i, que permitan establecer el conocimiento necesario para poder desarrollar las futuras actuaciones.

10.1. Estudio de la posibilidad de la generación de sedimentos y su transporte en la red fluvial aguas abajo de Flix y caracterización de los sedimentos en las presas de Ciurana, Margalef y Guiamets.

En primer lugar, es necesario estudiar los sedimentos que puede aportar la importante red fluvial existente aguas abajo del Embalse de Flix, que tiene una superficie de cuenca de más de 3.000 km² y casi 400 kilómetros de cauces declarados como masa de agua de la DMA y analizar en ellos la posibilidad de incrementar el transporte en esta red fluvial.

Tal y como se recoge en la tabla 6 y en la figura 35, esta importante red fluvial de 400 km de longitud, tiene al menos 40 obstáculos longitudinales que deben estudiarse para analizar si su permeabilización puede generar la llegada de más sedimentos al Delta. Igualmente existen dos azudes en el eje del Ebro (azud de la Central Nuclear de Ascó y el Azud de Xerta) que deben estudiarse con detalle, para analizar la cantidad de sedimentos que ahora mismo están reteniendo y el efecto barrera que generan ahora y el que generarían en el futuro.

Tabla 6. Tipo y número de obstáculos transversales existentes en la red fluvial del Ebro, aguas abajo del embalse de Flix.

Tipo de obstáculo transversal	Número
Salto vertical	21
Paso sobre paramento	19
Paso entubado	2
Total	42

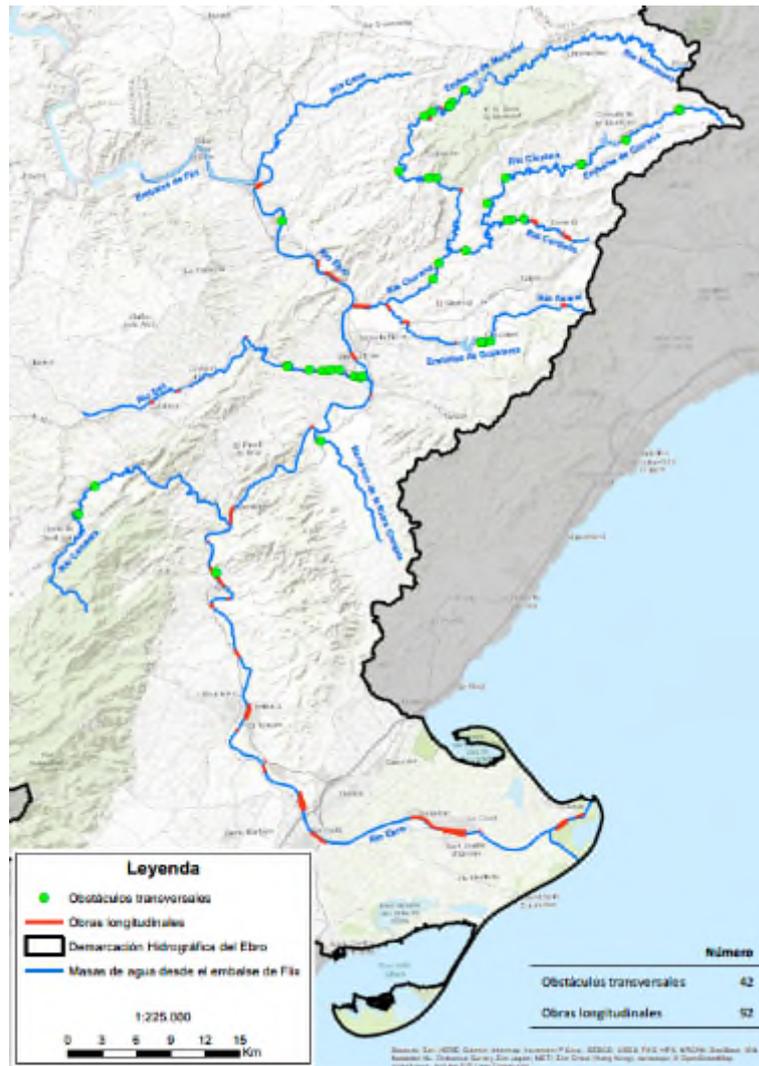


Figura 35: Obstáculos transversales y obras longitudinales existentes en la red fluvial aguas abajo del embalse de Flix.

Igualmente, es necesario realizar un reconocimiento batimétrico de los embalses de Ciurana, Margalef y Guiamets con objeto de conocer el estado de sedimentación de estos embalses. Por ello se van a realizar las correspondientes batimetrías, así como una recopilación de la topografía previa al embalse, con una precisión de unos 5 a 10 cm, siendo necesario para alcanzar esta precisión el empleo de una ecosonda multihaz, que permita un barrido en continuo del fondo del embalse. El producto final será un MDT de 0.5x0.5 m del fondo de los embalses.

Posteriormente es necesario realizar un estudio sedimentológico de los embalses de Ciurana, Margalef y Guiamets con el fin de caracterizar el sedimento de los embalses con especial atención a su granulometría. Se obtendrán muestras en los deltas de cola de los embalses para determinar las proporciones de arcillas y limos, arenas y gravas, y se realizarán ensayos granulométricos de las porciones de arena y grava. En los embalses de Margalef y Guiamets se tomarán una o dos tratando de extraerlas de las zonas más representativas. El embalse de Ciurana tiene dos colas por lo que el número de muestras será el doble.



Una vez desarrolladas estas actuaciones, se procederá a la caracterización de los cauces y los sedimentos de los ríos Ciurana, Montsant, Riera l'Ull del Asma, aguas abajo de los embalses para disponer de la geometría de los tres cauces aguas abajo de los tres embalses anteriores. El producto final será un MDT de 0.5 x0.5 m. Puesto que se trata de ríos con poco caudal, es probable que la información disponible de los vuelos LiDAR de primera y segunda cobertura sean adecuados para que con unos apoyos de campo se pueden generar los MDT. También es importante disponer de información del tipo de sedimento de estos cauces, en especial de la fracción de gravas y arenas, por lo que obtendrán algunas muestras del eje de los mismos para su posterior análisis granulométrico. Se tomarán al menos 5 muestras en el río Ciurana, 3 en el Montsant y 2 en el Riera l'Ull del Asma.

Igualmente es necesario actualizar y disponer de una batimetría actual y detallada del curso bajo del río Ebro, de forma que se tenga información actualizada de la geometría del cauce con precisión suficiente para poder realizar simulaciones numéricas bidimensionales de este tramo de río. La extensión del reconocimiento es de unos 116 km y debe cubrir desde aguas abajo del embalse de Flix hasta la desembocadura. La precisión exigida a los equipos de medida es de unos 5 a 10 cm. Para alcanzar esta precisión resulta necesario el empleo de ecosondas multihaz, que permita un barrido en continuo del fondo del cauce, y que además permita su ejecución en un tiempo razonable. El producto final será un MDT de 0.5x0.5 m del fondo del cauce del río Ebro.

Igualmente que en el caso anterior, se debe realizar una campaña de toma de muestra de sedimentos en el curso bajo del río Ebro para caracterizar el material del lecho del río desde aguas abajo del embalse de Flix hasta la desembocadura del delta. Para ello se realizará una toma de muestras, tanto de la capa superficial del cauce del río, como del estrato subsuperficial. De cada una de las muestras se realizará un análisis granulométrico tanto de las arenas como de las gravas.

10.2. Actualización de la información sobre batimetrías y sedimentos en los embalses de Mequinenza y Flix.

Tal y como se ha presentado en este documento, es necesario actualizar y conocer la situación actual de los sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja, para lo cual es necesario primeramente realizar una batimetría actualizada de Mequinenza, puesto en Ribarroja acaba de ser realizada por el titular del embalse y luego los correspondientes análisis sedimentológicos.

En el caso de Mequinenza, el levantamiento batimétrico se contará con un equipo de sonda de ultrasonido multihaz montado sobre embarcación que permita coleccionar datos de coordenadas georreferenciadas y cotas relativas al nivel del mar. La precisión de las medidas que se deben exigir a los equipos de medida debe estar acotada entre 5 a 10 cm. En las zonas donde la profundidad no permita el empleo eficiente de una sonda multihaz se empleará una sonda mono haz. La línea de agua así como los



terrenos emergidos del fondo del embalse se levantarán mediante vuelo LIDAR montado sobre dron que proporcione una presión altimétrica de entre 5 y 10 cm.

En esta fase, se realizarán los cálculos y correcciones sobre la base de los datos recolectados, se elaborarán los planos y ficheros informáticos con la información de campo y se generarán modelos 3D corregidos, dando forma al modelo digital del terreno. Se generará un modelo digital del terreno con curvas de nivel vectorizadas de 0,5 m de equidistancia. También se generará un Modelo Digital del Terreno en formato raster de cuadrículas de 0,5 x 0,5 m. Además, se presentará una colección de planos con los datos de campo que dan origen al modelo de terreno, con indicación de puntos acotados obtenidos en campo. Se completará la información topográfica del terreno con fotografías de los depósitos de sedimentos que se encuentre emergidos durante los trabajos de campo y se comparará con la situación del embalse en las batimetrías anteriormente indicadas.

Los trabajos sedimentológicos, tal y como se ha comentado, se realizarán en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y se descomponen también en dos etapas. La primera corresponde a los trabajos de campo necesarios para la toma de muestras de los sedimentos y la segunda de laboratorio para la realización de los análisis necesarios para caracterizar la textura y densidad del sedimento.

Antes de realizar el trabajo de campo se debe tener una idea previa de la distribución que los sedimentos pueden adoptar en el vaso al depositarse. La obtención de la batimetría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja servirá de base a este efecto. Los distintos tipos de depósitos y su distribución espacial exigen un muestreo en toda la extensión del vaso con objeto de garantizar la representatividad de los datos. Para cada embalse, se realizará un plano director a escala 1:5000 que se presentará una propuesta de los puntos de muestreo, posteriormente se realizará el muestreo, en el que para caracterizar el sedimento fino depositado en toda la superficie del embalse se tomarán muestras del fondo. El número de muestras a tomar viene condicionado por el tamaño del embalse, considerándose en general suficiente la extracción de una muestra cada 4 ha de superficie, en embalses de menos de 100 ha, y en embalses mayores una muestra cada 10 - 50 ha. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones de Mequinenza (7540 ha) y de Ribarroja (2029 ha) se considera suficiente la toma de 120 muestras en Mequinenza y 40 muestras en Ribarroja. La cantidad de material que se debe recoger en cada punto de muestreo será de unos 1.000 g.

En las zonas en las que el sedimento está sumergido las muestras se toman mediante una embarcación, dotada de grúa y un torno accionado manual y/o eléctricamente con el que se extraen las muestras mediante dragas y sondas. En las zonas en las que el sedimento está al descubierto o con un mínimo de agua, las muestras se toman mediante muestreadores manuales. Las dragas utilizadas tradicionalmente permiten muestrear superficialmente los depósitos de sedimentos obteniendo un volumen suficiente de muestra.

Con el fin de caracterizar el sedimento grueso (arenas y gravas) del delta de cola de los embalses de Mequinenza y Ribarroja se realizarán sondeos que permitirán obtener las columnas estratigráficas hasta el fondo previo a la construcción de los embalses. Como mínimo está previsto realizar 10 sondeos en la cola de Ribarroja y 20 en la de



Mequinenza, tratando de no solaparse con los realizados por Control de Obra Civil en 2011, entre los PK 74 y 90, medidos por el eje del Ebro con origen en la presa de Mequinenza. De las columnas estratigráficas de los sondeos se obtendrán muestras de cada tipo de material identificado en los estratos del sondeo que también se analizarán en laboratorio. Se estima que de cada sondeo se obtengan un máximo de 5 muestras.

Con toda la información se realizarán mapas digitales con la siguiente información sedimentológica:

- la clasificación de la textura del sedimento (reparto de cada tipo en cada celda)
- densidad del sedimento
- caracterización físico-química del sedimento
- potencia del estrato de sedimento en comparación con 1961,1982 y 2012

Posteriormente se preparará un informe de conclusión de resultados, comparando con la información de otros estudios precedentes, tanto del volumen como de las características físicas de los sedimentos.

10.3. Propuestas de estudios I+D+i para la mejora de la gestión de los sedimentos y bases para la elaboración de protocolos de gestión de sedimentos.

Sobre la base de los puntos anteriores, y empleando todos los antecedentes disponibles, se podrán iniciar estudios o nuevas propuestas para la mejora de la gestión de los sedimentos, tanto de aguas abajo de Flix como, en su caso, desde Ribarroja o Mequinenza.

En este sentido, es imprescindible realizar inicialmente un estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.

Por otro lado, como antecedente esencial, sobre la mejora de la gestión del sedimento en los grandes embalses, en el ETI se hace referencia a una propuesta de plan de gestión de sedimentos desarrollado por la Generalidad de Cataluña en el que se plantea la movilización de los sedimentos del embalse de Ribarroja mediante un vaciado del mismo, la aplicación de una serie de pulsos para empujar los sedimentos hacia el azud de Xerta y la distribución por el delta a través de los canales de riego. Igualmente, en el proyecto LIFE ADMICLIM (Proyecto piloto de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático del delta del Ebro) se han realizado inyecciones experimentales de sedimento en la red de canales de riego del delta del Ebro y en el propio río Ebro que deben ser utilizadas como referente en las próximas actuaciones.

Como se ha comentado con anterioridad, en la cuenca del Ebro hay experiencias de vaciados de embalses en varios casos entre los que destacan las de los embalses de



Santa Ana, Barasona, Alloz y Moneva. Todas estas experiencias, conjuntamente con una recopilación de casos a nivel mundial, han sido recogidas en un informe de la CHE citado en el ETI, en el que, con la comparación con 137 casos de embalses del mundo en los que se han realizado experiencias de gestión de sedimentos permite concluir que, previsiblemente, las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinzenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidromecánica mediante dragado (en Ribarroja y Flix).

Es por ello que se necesita un estudio científico que, con toda la información dispone, a partir de las distintas herramientas de modelización hidrodinámica existente podrán establecerse alternativas de actuación y con ello, comprobar la posible efectividad de cada una de las alternativas, sus costes y los beneficios que se obtienen en cada caso.

Como estrategia general, tal y como se ha presentado con anterioridad, deberá estudiarse igualmente la capacidad de generación y transporte de sedimentos en la cuenca aguas abajo de Flix, como programa piloto de actuación, y, en función de estas conclusiones, deberán analizarse acciones en Ribarroja o Mequinzenza en su caso.

A partir de todas estas experiencias, se procederá a realizar un protocolo de gestión de los sedimentos en los embalses que mejor contribuyan al incremento del transporte de sedimentos en el río Ebro y afluentes. Este protocolo deberá contener, al menos: por ejemplo:

- Una zonificación del embalse en función de los mecanismos de movilización de los sedimentos existentes en él, zonificando la superficie del embalse por las técnicas previsibles de movilización de los mismos, bien a partir de excavaciones en seco allí donde sea posible dentro del embalse, o extracción por bombes o por aperturas de los órganos de desagüe de los mismos, realizados a partir de la adecuada caracterización físico-química y de contaminantes de los sedimentos.
- Los protocolos de entrega de los sedimentos extraídos del embalse al cauce aguas abajo, en función de la técnica de movilización del sedimento, ubicación de los puntos de entrega, época del año, caudal circulante en el río, condiciones de calidad de las aguas exigidas aguas abajo, etc.
- Régimen de caudales de descarga del embalse necesario para permitir la movilización de los sedimentos en los cauces aguas abajo.
- Mecanismos de monitorización y seguimiento efectivo del transporte de sedimentos aguas abajo, a través de marcaje y trazadores en los mismos y publicación de los resultados mismos en internet. En especial debería cuantificarse el volumen real de sedimento movilizado para evaluar la efectividad de los mecanismos de movilización y la persistencia en el tiempo de esta efectividad.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

- Seguimiento de los efectos en la calidad de las aguas (indicadores físico químicos, biológicos y químicos) en el embalse y en el tramo de aguas abajo afectado por la movilización.
- Mecanismos legales y de gobernanza que permitan la puesta en marcha de las distintas actuaciones en coordinación con el titular, usuarios de los embalses y los distintos departamentos de las Comunidades Autónomas afectadas. Además, deberá establecerse de forma expresa, en relación con el titular de la presa, la relación de las actuaciones con las normas de explotación, los protocolos que han de ir asociados a las maniobras a ejecutar con especial indicación de la duración, caudales de descarga, hidroavisos a considerar y todos aquellos temas de seguridad y previsión de eventualidades que puedan surgir.
- Procedimientos de participación y comunicación ciudadana necesarios para aplicar antes, durante y después de la movilización de sedimentos. En especial hay que establecer procedimientos de aviso a todos los usuarios relacionados con el tramo afectado para que tomen las medidas oportunas (abastecimientos, energéticos y regadíos). Constitución, en su caso, o mantenimiento de comités de seguimiento de las operaciones para implicar a la comunidad científica y a la ciudadanía.
- Evaluación y corrección de las posibles afecciones de tipo social, económico o ambiental que pueda generar la movilización de sedimentos. En especial se debe garantizar la calidad del agua de boca en todos los abastecimientos relacionados con el tramo susceptible de ser afectado. Entre las afecciones se destaca la afección al CAT, a la Central Nuclear de Ascó, a los riegos, mariscadores y pescadores. Desde el punto de visto ambiental se destaca la posible afección a la fauna silvestre.
- Procedimientos asociados para disponer de todas las autorizaciones necesarias y protocolos de aviso para la realización de las operaciones y constitución de grupos de coordinación administrativa para hacer un seguimiento de las actuaciones realizadas y buscar la corresponsabilidad de todas las administraciones.
- Hacer un informe de lecciones aprendidas de cada operación de movilización y presentar sus conclusiones de forma pública junto con una propuesta de mejora, de forma que se realice una evaluación de los beneficios de la movilización en el aumento de la resiliencia del Delta del Ebro y propuestas de mejora y un análisis global de costes y de beneficios.



11. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DEL DELTA DEL EBRO: IMPULSO A LA RED RIADE Y CREACIÓN DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO DEL DELTA DEL EBRO.

Con todos estos antecedentes, es esencial disponer de herramientas que permitan hacer un adecuado seguimiento y monitorización de la situación actual y de futuros cambios que se produzcan en el Delta del Ebro, para lo cual, se tiene como antecedente la puesta en marcha de la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE) que se puso en marcha como parte de las medidas incluidas en el Plan Integral para la Protección del Delta del Ebro (PIPDE) se ejecutaron por parte de Acuamed las obras del proyecto “Programa para la implantación de una red de indicadores ambientales en el Delta del Ebro”, en el cual se implantó una red de puntos de control de indicadores ambientales que permite en estos momentos monitorizar los flujos de agua en el Delta para conocer el estado de las aguas y su evolución futura. Se incluyó también la instalación de un centro de control y un laboratorio de análisis químico y ecológico.

	Canales y Desagües	Estuario- río	Bahías	Lagunas	Total
Calidad	8 (1 de ellos móvil)	2	2	3	15
Caudal	33	1	-	-	34
Transporte de sedimentos	-	5	-	-	5
Piezómetros profundos (Delta)	-	-	-	-	6
Piezómetros superficiales (Delta)	-	-	-	-	12
Subsidencia (Delta)	-	-	-	-	52
Hidrodinámica costera (Radar)	-	-	-	-	3
Mareógrafos (Delta)	-	-	-	-	1

Figura 35. Tabla con el número de sensores por tipología incluidos en la versión inicial de la RIADE ejecutada por ACUAMED

Las obras fueron ejecutadas y finalizadas durante el año 2014, y de forma paralela se suscribieron varios convenios entre el entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y la Agencia Catalana del Agua (ACA), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y Puertos del Estado con el objeto de ceder a dichos organismos el uso y explotación de la totalidad de las instalaciones incluidas en la actuación, que se habían estado manteniendo por parte de Acuamed.

En relación con Puertos del Estado, se firmó un Convenio el 7 de julio de 2015 para la cesión del uso, explotación científica y mantenimiento operativo de tres instalaciones radiales instaladas en el faro de Salou, playa de Alfacada y en el puerto deportivo de Vinaroz. Estos radares están actualmente plenamente operativos y la



información generada puede consultarse a través de la web de Puertos del Estado, tal y como se puede observar en la imagen siguiente:

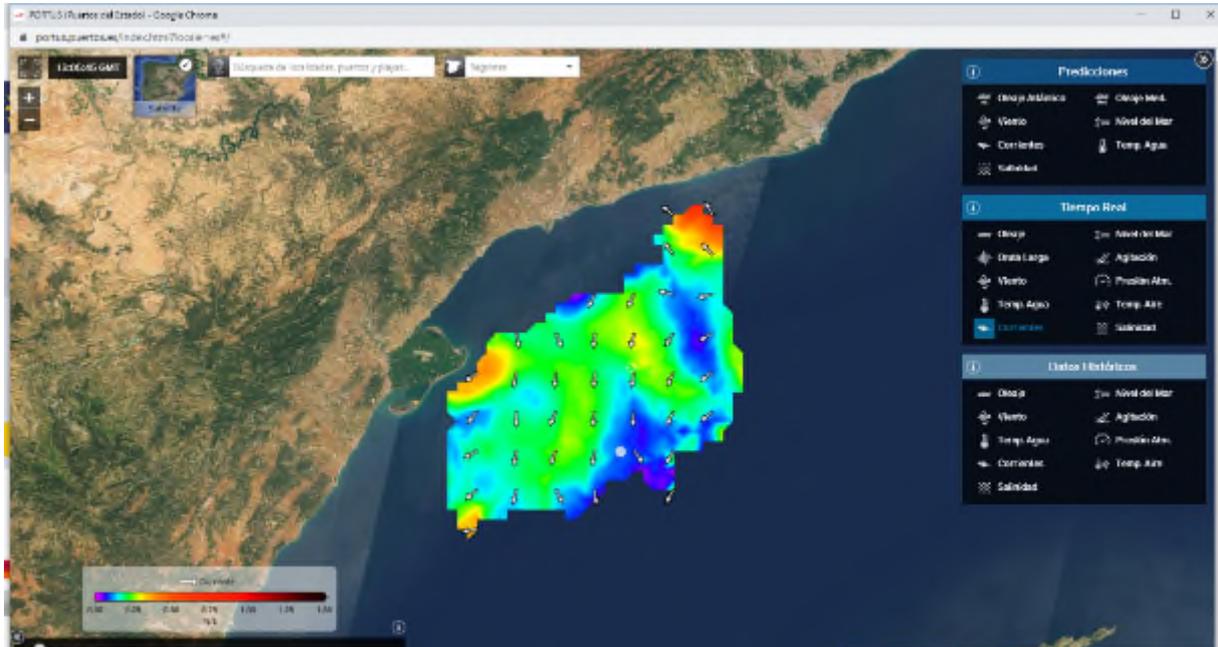


Figura 36. Información de corrientes marinas extraída de los radares de la RIADE gestionados por Puertos del Estado. Información general en la web de puertos del Estado <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> e información de detalle en <https://portus.puertos.es/index.html?locale=es#/>

Del mismo modo, por un Convenio de colaboración firmado el 5 de Octubre de 2015 con la Agencia Catalana del Agua, la Dirección General del Agua cedió el uso de los sensores e instalaciones de la tabla nº2, consistente básicamente en los piezómetros, en los sensores de calidad de las bahías y las zonas húmedas, los sensores de turbidez (transporte de sedimentos) y los indicadores biológicos (laboratorio), así como del Centro de Control del IRTA.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

Proceso a monitorizar	Equipo instalado	Nº de unidades	Medición
Análisis manual de muestras.	Laboratorio totalmente equipado.	1	Muestras químicas, biológicas y sedimentarias.
Subsistencia.	SEI (Surface Elevation Table) y Horizontes marcadores.	52	Índices de subsistencia del terreno y tasas de compactación del suelo.
Subsistencia.	Comer reflectors.	7	Nivelación geométrica.
Calidad del agua superficial.	Sondas de calidad en bahías.	4	Temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, turbidez, potencial redox, nivel, fitoclorofila, fitoclorofila y clorofila, mediante equipos multiparamétricos.
Turbidez.	Sonda de turbidez y tomamuestras tyn	1+1	Medición de sedimentos en suspensión en río.
Calidad del agua de los acuíferos superficial y profundo.	Piezómetros.	18 (12 superficiales y 6 profundos)	Nivel, temperatura y conductividad.
Recopilación, procesamiento e intercambio de datos.	Centro de control ACA.	1	Integración de datos en el SCADA y adaptación de los sistemas de la ACA de los nuevos puntos de control de la RIADF.
Recopilación, procesamiento e intercambio de datos y difusión de los mismos vía web.	Centro de control IRTA.	1	Integración de datos procedentes de los centros de control de CHE, ACA y Puertos del Estado, con almacenamiento y visualización local y consulta vía web.
Calidad del agua superficial.	Medidor de mercurio	1	Niveles de mercurio en el río Ebro.
Dinámica hidrológica continental.	Perfilador OTT-Optimer.	1	Niveles de aguas y flujos.

Figura 37. Equipos cedidos a la Agencia Catalana del Agua por convenio firmado el 5 de octubre de 2015. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-1629

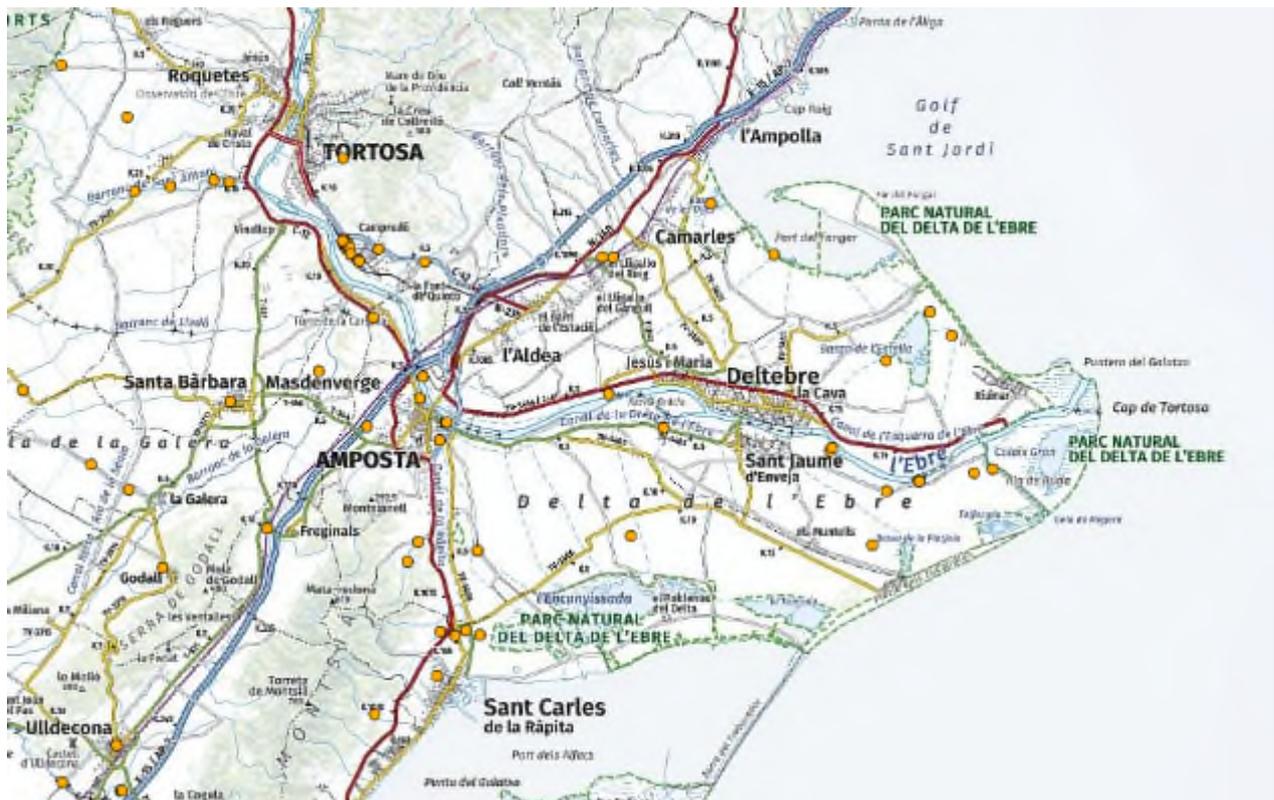


Figura 38. Piezómetros en el entorno del Delta del Ebro. http://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

En relación con el estado actual de la Red gestionada por el ACA, en estos momentos está funcionando, aunque hay varios sensores en reparación. Los sensores de las bahías no están midiendo actualmente, ya que con el tiempo se han deteriorado



mucho (el ámbito físico es muy agresivo para los sensores), siendo en general necesario realizar una evaluación general del estado actual de la red gestionada por el ACA y evaluar los costes de explotación y mantenimiento necesarios.

Finalmente, la Confederación Hidrográfica del Ebro se encargó de gestionar la siguiente instrumentación:

- 34 estaciones en los canales y acequias para la medición de caudales
- 13 estaciones para el control de la calidad del agua
- 3 equipos para el control de la turbidez instalados en estaciones de aforo de la red ROEA e integrados en el SAIH Ebro

La entrega de esta instrumentación a la CHE fue realizada una vez que en mayo de 2015 el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente firmó el Acta de recepción de las instalaciones realizadas dentro del citado “Programa para la implantación de Redes de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro”, haciéndose cargo del mantenimiento, gestión y explotación de esas instalaciones a través de la Confederación Hidrográfica del Ebro el 18 de junio de 2015, momento a partir del cual dejaron de estar mantenidas por ACUAMED y pasaron a gestionarse por la CHE.

Con posterioridad, la Oficina de Planificación Hidrológica realizó un informe, “Propuesta de priorización de los puntos de la Red RIADE en el Bajo Ebro”, con el objeto de establecer unos criterios de priorización de la parte de la red RIADE en función de la dotación económica que podía asumir la Confederación Hidrográfica del Ebro con fondos propios. Para la priorización de las estaciones se utilizaron los siguientes criterios:

- a) Coincidencia entre datos de redes de calidad y de caudal
- b) Tamaño de la cuenca vertiente representativa de cada cuenca

El resultado del informe estableció la idea de implantarlas progresivamente de 10 en 10, con un orden de prioridad sobre las estaciones existentes, habiéndose determinado trabajar sobre los siguientes 10 primeros puntos:

CÓDIGO	PUNTO
C309	RIET
C311	ISLA DE RIU
C318	ESTACIÓN DEL PAL
C324	ULLALS DE BALTASAR
C325	SANT PERE
C326	GOLA VELLA (SANT PERE)
Q961	CAMPREDÓ
Q963	CANAL DEL ALA
Q965	ILLA DE MAR
Q966	CANAL DE LES OLLES



Posteriormente, se licitó el contrato del PROYECTO DE PUESTA EN MARCHA DE LOS PUNTOS DE CONTROL PRIORIZADOS DE LA RED DE INDICADORES AMBIENTALES DEL DELTA DEL EBRO, con un importe de 153.796 euros por un periodo de 27 meses. Se comenzaron los trabajos en enero de 2018 y finalizaron en 2020, y han consistido en la ejecución de los siguientes trabajos en los puntos anteriormente citados:

- Instalación de sensores doppler, teniendo en cuenta las instalaciones auxiliares para un correcto funcionamiento de los mismos (cableado, soportes, acondicionamiento de instalaciones).
- Configuración de los sensores doppler instalados.
- Puesta en servicio de las instalaciones.
- Revisión y ajustes de las instalaciones puestas en marcha.

A continuación se muestran imágenes del estado actual de la web del SAIH del Ebro y de los trabajos en ejecución:

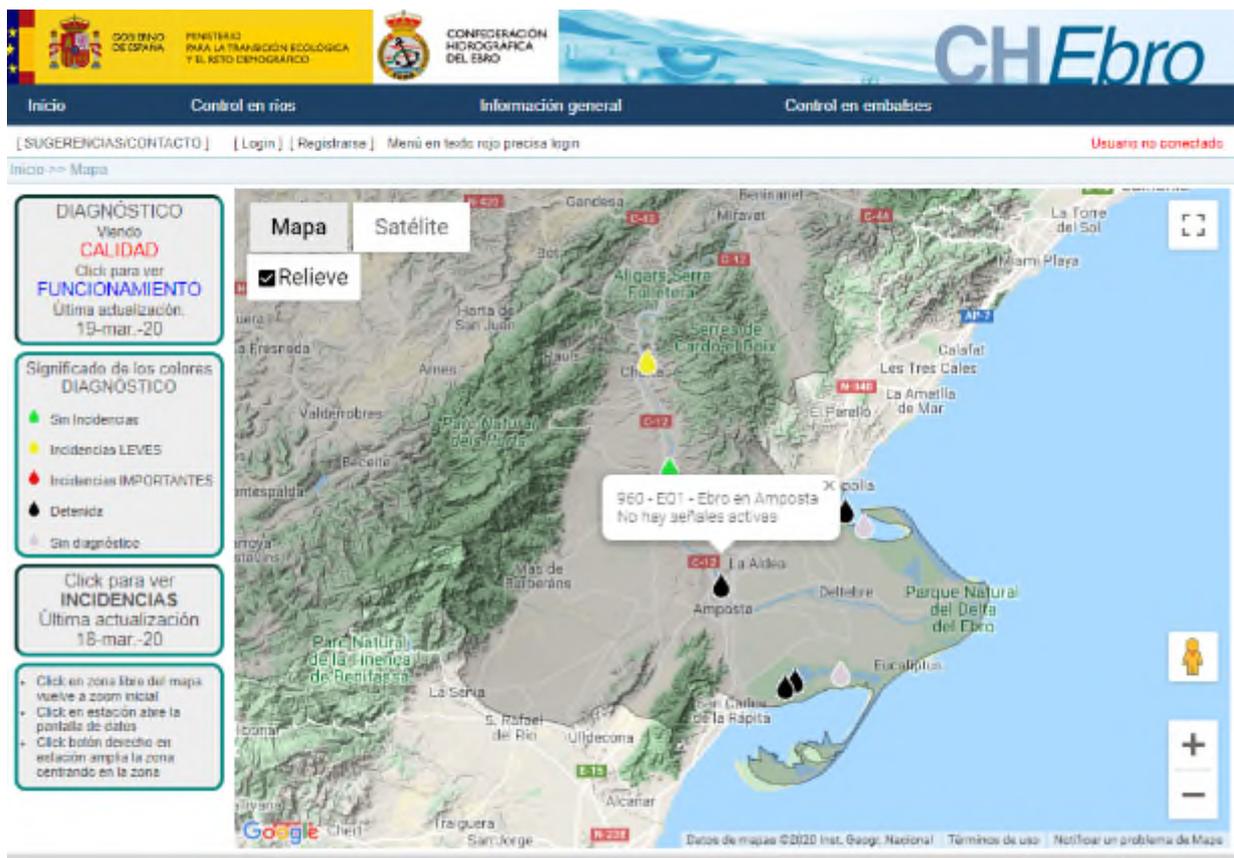


Figura 39. Información de la web actual del SAIH del Ebro en materia de calidad de las aguas en el Delta del Ebro

En las siguientes imágenes se muestra ya la información interna en la CHE dentro del proyecto anteriormente citado.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

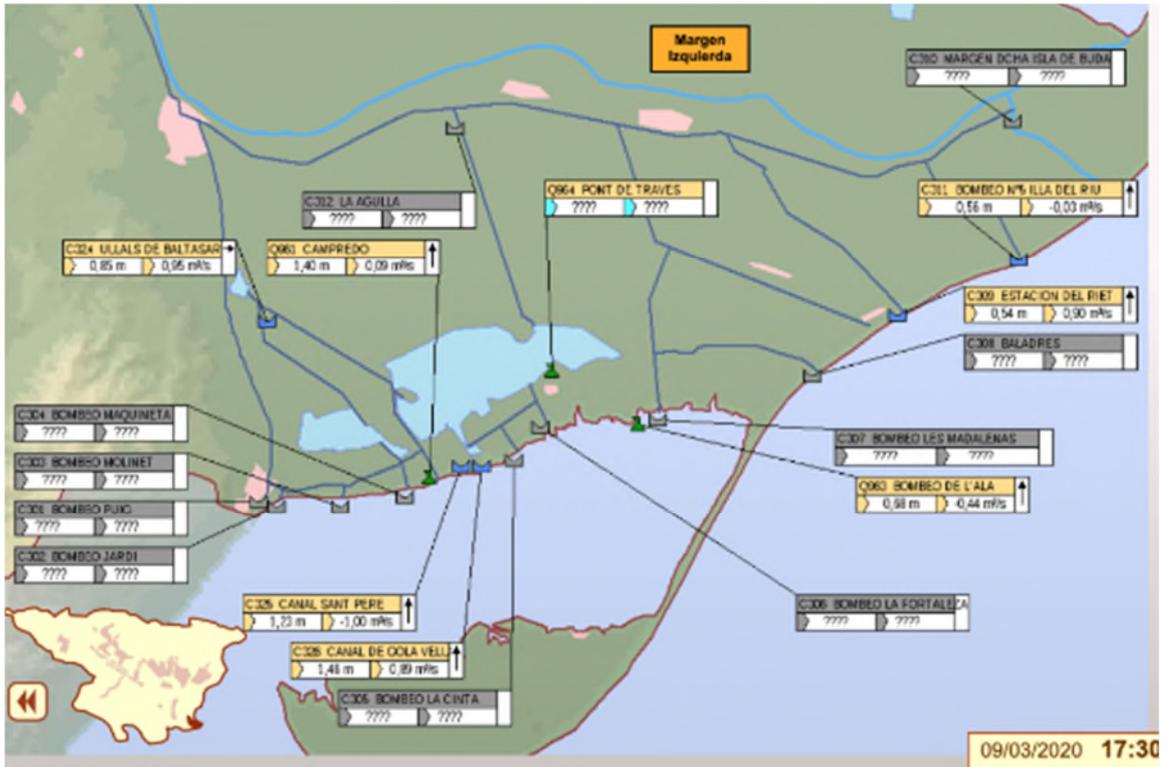


Figura 40. Estaciones de cantidad de la margen derecha del Delta del Ebro

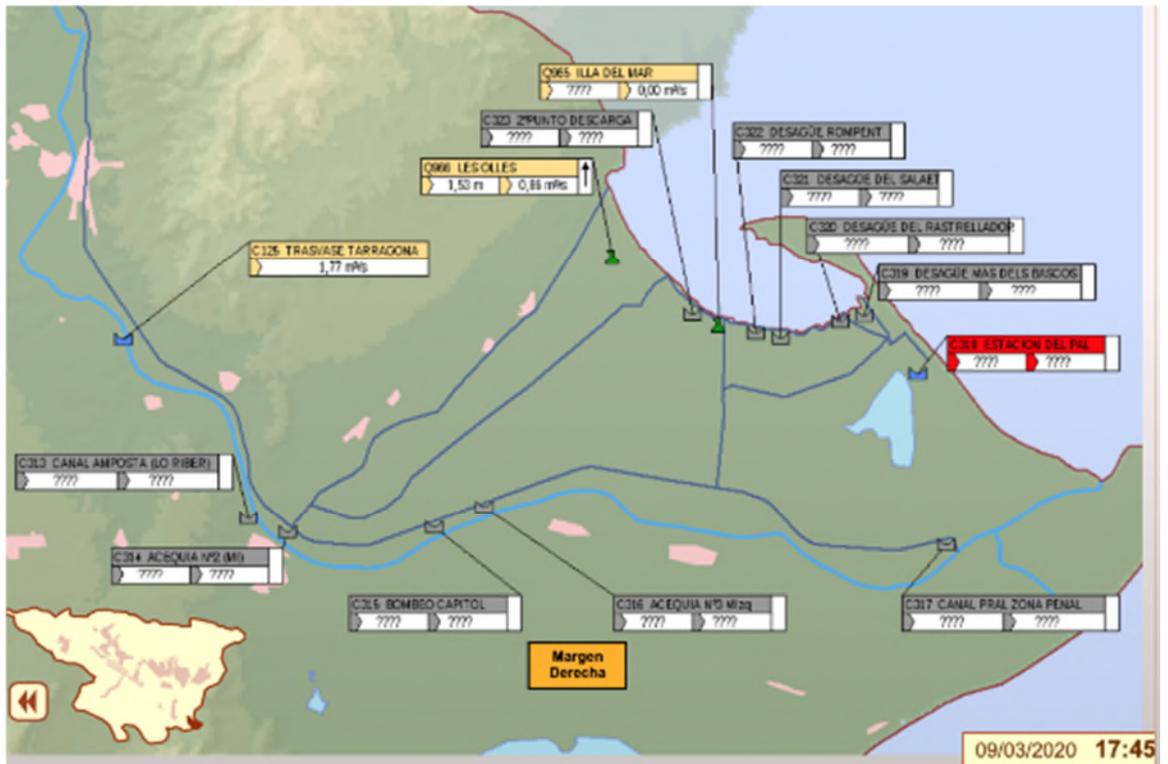


Figura 41. Estaciones de cantidad de la margen izquierda del Delta del Ebro



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

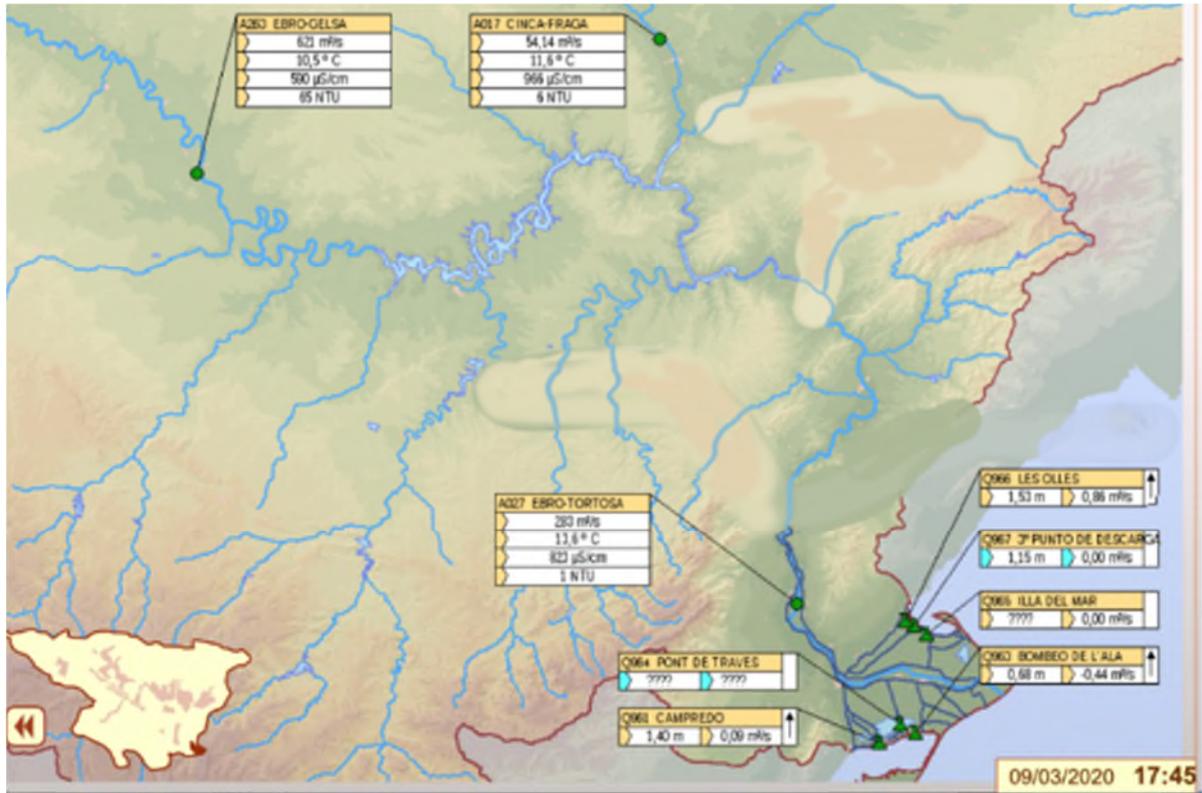


Figura 42. Estaciones de calidad y turbidez

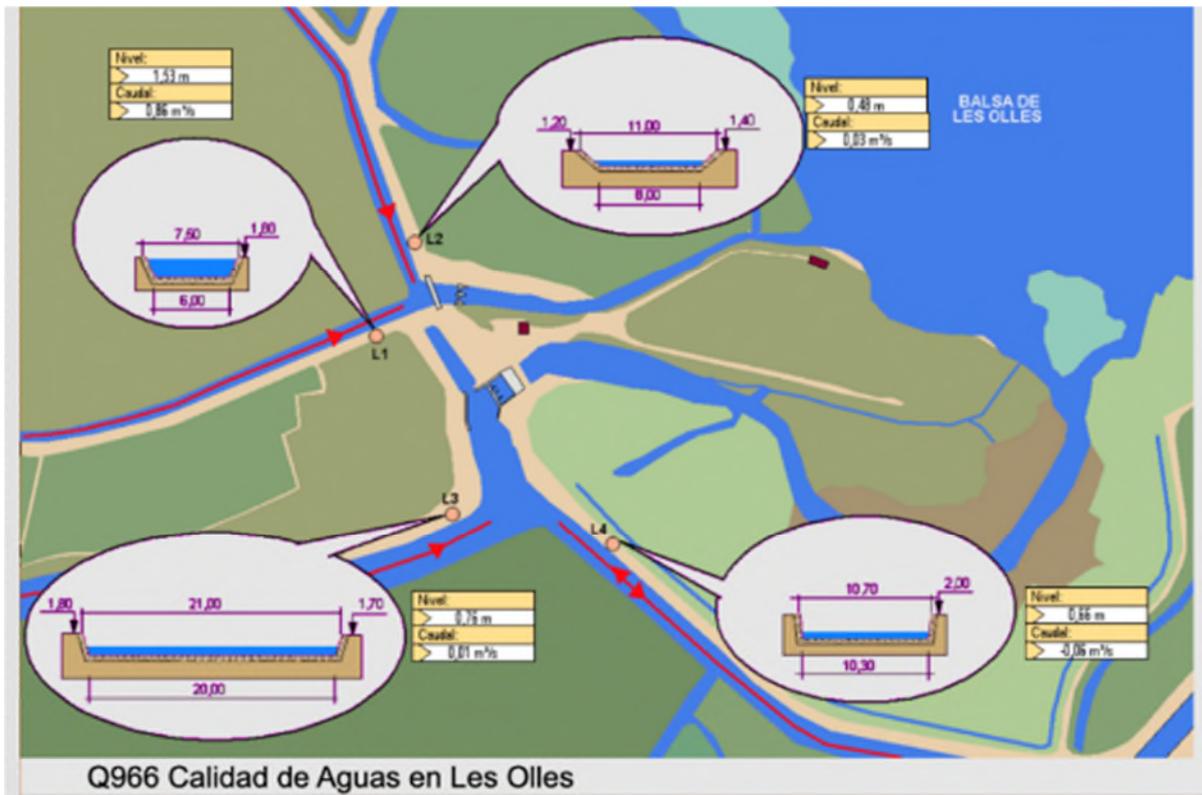


Figura 43. Esquema de la estación de calidad de les Olles



En este sentido, en el marco de este plan de acción, y conforme al ETI y PHC, se considera importante actualizar toda la información asociada en la RIADE, puesto que el resto de actuaciones que se plantearán en el futuro necesitan tener una importante caracterización de la situación actual y su evolución en el futuro. En concreto se propone la creación del “Observatorio hidrológico del delta del Ebro”, centralizado en las plataformas del SAIH del Ebro y de la Agencia Catalana del Agua, que integre toda la información y conocimiento generado durante estos trabajos.

En los últimos años se viene produciendo un debate respecto a la merma en el aporte de sedimentos al delta y la tasa de subsidencia. Resulta fundamental poder disponer de datos precisos de carácter empírico de la subsidencia de toda la superficie deltaica. Tal y como se refleja en este documento, el ETI refleja la necesidad igualmente de avanzar en estos trabajos.

Como antecedente, dentro de los trabajos del Plan Integral para la Protección del Delta del Ebro y concretamente de la implantación de la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE), en 2012 ACUAMED realizó una “nivelación de precisión en el delta del Ebro” a lo largo de varios itinerarios por el interior del delta y dando cota a la instrumentación de la RIADE, sumando 112,6 km. Por otro lado, en ese mismo año 2012, la Sección de Topografía y Cartografía de la CHE, llevó a cabo una “nivelación de precisión en el canal de la margen izquierda del río Ebro (Tortosa-Deltebre)” en un itinerario de 28,3 km, en el que además se rescataban y nivelaban tres referencias conservadas de la nivelación que realizó la Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro en 1927.

Habiendo transcurrido más de 8 años de dichas nivelaciones, se considera altamente conveniente volver a realizar una nivelación de precisión de estos itinerarios, para verificar posibles movimientos altitudinales de las referencias y tener datos empíricos de la subsidencia que pueda haber acaecido en dicho periodo.

Dada la importancia de realizar estas tareas con la máxima precisión y los mayores estándares de calidad, se ha solicitado el asesoramiento y la colaboración del Instituto Geográfico Nacional. Fruto de esta colaboración se plantea que este trabajo de nivelación de alta precisión siga los criterios y estándares de la Red Española de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP) de tal modo que además pueda integrarse en REDNAP una línea en el Delta del Ebro que sirva de referencia en el futuro para nuevas mediciones.

El objeto de este contrato es pues la realización de trabajos de topografía de nivelación de alta precisión en el delta del Ebro en una longitud de 141 km y disponer con ello de datos empíricos de subsidencia.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

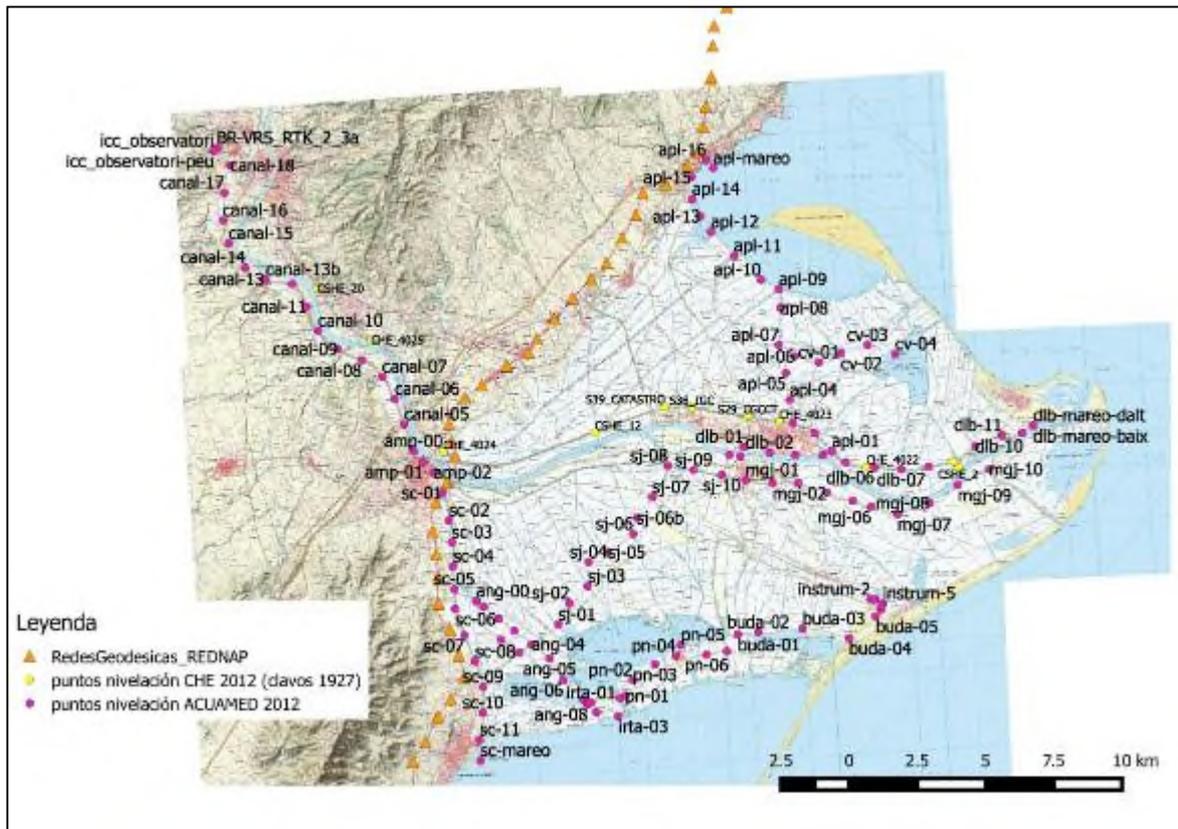


Figura 44. Red de puntos de nivelación en el Delta del Ebro

Con todo este trabajo, se realizará un informe que incluirá un análisis comparativo de las diferencias de nivelación halladas entre las nivelaciones de 2012 y la realizada en la actualidad.



12. REFERENCIAS

ACA (2009). *Balace de sedimentos del tramo final del río Ebro. Documento preliminar*. Agencia Catalana del Agua, enero 2009.

Balada, R., A. Espanya, A. Martinez Vilalta, J. Martí, I. Juan, A. Canicio y X. Ribas, (1997). *El Delta del Ebro*. Ediciones Jaguar. Libro editado en colaboración con Diputación de Tarragona.

Bayerri, E. (1935). *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta moderna del Aguerri. Tortosa.

Béjar M. et al. (2018). *Efectos de las extracciones de áridos sobre el transporte de sedimentos en suspensión en ríos de montaña (alto río Cinca, Pirineo central)*. Cuadernos de investigación geográfica. Universidad de La Rioja.

Catalán, J.G. (1969). *Química del agua*. Editorial Blume.

CEDEX (1971). *Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-Octubre de 1970*. Informe Técnico para la Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos, 1971.

CEDEX (1982). *Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza*. Informe técnico para la Dirección General Obras Hidráulicas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

CEDEX (2002). *El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Inédito.

CHE (1996). *Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica del Ebro*.

CHE (2005). *Proyecto de regulación de la cota del embalse de Ribarroja para el control de la población del mejillón cebra*.

CHE (2010). *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*.

CHE (2016). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro*.

CHE (2018). *Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*

CHE (2020). *Esquema de temas importantes. Tercer ciclo de planificación hidrológica 2021-2027*.

Control de obra Civil (2011). *Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro". Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Control de obra Civil (2012). *Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.



CSN (2011). *Pruebas de resistencia realizadas a las centrales nucleares españolas. Informe final*. Consejo de Seguridad Nuclear. Diciembre 2011.

DGPC (1978). *Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro*. Dirección General de Puertos y Costas. MOPU.

ECOHYDROS (2008). *Aplicación de tecnologías acústicas en la detección y evaluación de poblaciones de peces y mejillón cebra en los embalses de la cuenca del Ebro*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Gorría (1877). *Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques*. Ministerio de Agricultura.

Grupo Flumen (2009). Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Guillén, J. y Palanques, A. (1992). *Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River*. *Sedimentology* 39: 567-579.

Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992). Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino.

Ibáñez, C, Canicio, A., Day, J.W., Curcó, A. (1997). Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain. *Journal of Coastal Conservation* 3: 191-202.

Lechuga, A., López, J.A. (1997). *Evolución reciente del Delta del Ebro. Aportes de sedimentos por el río. El oleaje y el transporte sólido litoral*. Revista de Ingeniería Civil, 164: 99-107.

Magdaleno, F. (2017). Experimental floods: A new era for Spanish and Mediterranean rivers? *Environmental Science & Policy* 75: 10-18.

Palanques, A. (1992). *Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino*.

Palanques (1987). *Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro*. Tesis Doctoral, UPC.

Romeo, R. (2018). *La gestión de los sedimentos de los embalses*. Presentación.

Romeo, R. (2020). *Gestión de los sedimentos en los embalses del bajo Ebro*. Presentación.

Sanz Montero, M.E.; Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R. (2001). Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 14(1-2): 3-17

Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990). *Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta (Tarragona, España)*. Geogaceta, 8: 107-109.



Tena A, Batalla RJ, Vericat D (2012). Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river. *Hydrological Sciences Journal* 57: 1–19.

Tena, A., Batalla, R.J. (2013). The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain). *Journal of Soils and Sediments* 13: 966–980.

TRAGSATEC (2012). *Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

UPM (2018). *Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Fundación Agustín de Betancourt (Profesor responsable D. Luis Garrote de Marcos).

Varela, J.M., A. Gallardo y A. López de Velasco, 1986. Retención por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al delta del Ebro. Sistema integrado del Ebro. M-G. Mariño, ed. Gráf. Hermes, 203-219.