



**IH cantabria**

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*euskal trenbide sarea*



**ESTUDIO PARA EVALUAR LA AFECCIÓN A LA DINÁMICA  
LITORAL DEL PROYECTO DE REHABILITACIÓN DEL  
VIADUCTO DE AIA-ORIO EN EL PK 89+293 DE LA LÍNEA  
BILBAO-DONOSTIA**



*euskal trenbide sarea*

**ÍNDICE**



## ÍNDICE

1. ANTECEDENTES. ....	1
2. CONTENIDO DEL INFORME. ....	2
3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE PARTIDA. ....	3
3.1. Introducción. ....	3
3.2. Zona de estudio. ....	3
3.3. Batimetría. ....	4
3.4. Datos meteo-oceánicos. ....	5
3.4.1. 1Mareógrafos. ....	5
3.4.2. Base de datos numérica de salinidad. ....	6
3.5. Aportes fluviales a la zona de estudio. ....	7
3.6. Granulometría de la zona de estudio. ....	8
3.7. Geometría de la actuación de rehabilitación del viaducto de Aia-Oria en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia. ....	8
3.8. Proyecciones del escenario de cambio climático RCP8.5 en el horizonte de 50 años. ....	9
4. MODELOS DE CÁLCULO. ....	10
4.1. Introducción. ....	10
4.2. Modelo numérico Delft3D-FLOW. ....	10
4.3. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D. ....	10
5. ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL REGLAMENTO GENERAL DE COSTAS. ....	12
5.1. Introducción. ....	12
5.2. Metodología. ....	12
5.3. Configuración del modelo numérico Delft3D en la zona de estudio. ....	14
5.4. Respuesta a los diferentes aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas. ....	15
5.4.1. A) Estudio de la capacidad de transporte litoral. ....	15
5.4.2. B) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible. ....	18
5.4.3. C) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares. ....	18
5.4.4. D) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático. ....	18
5.4.5. E) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado. ....	19
5.4.6. F) Naturaleza geológica de los fondos. ....	19
5.4.7. G) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento. ....	19
5.4.8. H) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas. ....	20
5.4.9. I) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas. ....	20
5.4.10. J) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias. ....	20
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES. ....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio. ....	3
Figura 2. Batimetría de la zona de estudio utilizada para alimentar los modelos numéricos. ....	4
Figura 3. Red de Mareógrafos d Puertos del Estado (REDMAR) (Fuente: <a href="http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx">http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx</a> ). ....	5
Figura 4. Función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao. ....	6
Figura 5. Dominio de la zona IBI (Fuente: <a href="http://www.myocean.eu.org">http://www.myocean.eu.org</a> ). ....	7
Figura 6. Geometría de la actuación de rehabilitación del viaducto a) Alzado b) Planta. Fuente: ETS. ....	8
Figura 7. Proyecciones de aumento de nivel del mar (m) respecto respecto los RCP 2.6, 4.5 y 8.5. Fuente: <a href="https://www.eea.europa.eu">https://www.eea.europa.eu</a> . ....	9
Figura 8. Puntos de control donde se ha analizado la variación de nivel, velocidad, salinidad y transporte potencial, situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada para rehabilitación del viaducto. ....	13
Figura 9. Malla numérica utilizada en las simulaciones y detalle de la zona de ubicación donde está proyectado llevar a cabo la rehabilitación del viaducto de Aia-Orio en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia. ....	15
Figura 10. Evolución del nivel del mar en una onda de marea a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación. ....	16
Figura 11. Variación de la velocidad en una onda de marea (positiva en dirección aguas abajo y negativa en dirección aguas arriba) a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación. ....	17
Figura 12. Transporte potencial en una onda de marea en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea media b) Marea viva equinoccial. ....	17
Figura 13. Variación producida por los efectos del cambio climático (escenario RCP8.5) en una onda de marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación de rehabilitación a) Nivel del mar b) Velocidad de la corriente c) Salinidad d) Transporte potencial. ....	19
Figura 14. Variación de salinidad en una onda de marea a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación. ....	20





*euskal trenbide sarea*

**MEMORIA**



## 1. ANTECEDENTES.

En febrero de 2022 se firma con Euskal Trenbide Sarea/Red Ferroviaria Vasca (ETS) el contrato para la realización del "Estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto de rehabilitación del viaducto de Aia-Orio en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia" cuyo objetivo es el de dar respuesta a los requerimientos del Reglamento General de Costas que, en su artículo 91 establece que las obras que se encuentren en la costa o puedan ejercer una influencia sobre la misma, deben contener una evaluación de los posibles efectos del cambio climático, así como un estudio básico de la dinámica litoral.

Los trabajos en los que se divide este estudio han sido realizados por los siguientes miembros de IHCantabria:

- Javier García Alba, Doctor por la Universidad de Cantabria. Tecnólogo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- Andrés García Gómez, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de la Universidad de Cantabria.

En Santander, a 9 de marzo de 2022

Fdo.: Andrés García Gómez  
*Catedrático de la Universidad de Cantabria*

## **2. CONTENIDO DEL INFORME.**

El presente informe "Estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto de rehabilitación del viaducto de Aia-Orio en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia" se encuentra dividido en los capítulos que se listan a continuación:

- a) Capítulo 3: Recopilación y análisis de información de partida.
- b) Capítulo 4: Modelos de cálculo.
- c) Capítulo 5: Estudio de los requerimientos del artículo 91 del Reglamento General de Costas referentes a un análisis básico de la dinámica litoral, así como a los posibles efectos del cambio climático.
- d) Capítulo 6: Resumen y conclusiones.

### 3. RECOPILOCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE PARTIDA.

#### 3.1. Introducción.

En este apartado se recoge la información utilizada para la realización de este estudio, relacionada con los siguientes aspectos:

- Zona de estudio.
- Batimetría.
- Datos meteo-oceánicos.
- Aportes fluviales a la zona de estudio.
- Granulometría de la zona de estudio.
- Geometría de la zona de estudio, así como durante la realización de la actuación propuesta dentro del proyecto constructivo de rehabilitación del viaducto de Aia-Orio.
- Proyecciones de cambio climático para el escenario RCP8.5, el más desfavorable en cuanto al aumento del nivel del mar, en el horizonte de 50 años.

#### 3.2. Zona de estudio.

La zona de estudio se sitúa en el PK 89+293 de la línea Bilbao-Donostia, junto al polígono industrial de Ubegun, Aia, Guipuzkoa (véase la Figura 1).



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

### 3.3. Batimetría.

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio que involucre el análisis de las corrientes marinas. En su viaje hacia la costa, las ondas largas están condicionadas por los forzamientos a los que son sometidas y por las irregularidades del fondo marino y la costa. En profundidades indefinidas son importantes las irregularidades a gran escala, como cañones o grandes cabos. Sin embargo, en profundidades intermedias y reducidas su comportamiento es un reflejo de la batimetría.

En este estudio la batimetría se ha obtenido a partir de la unión de la batimetría de la zona estuarina (ría del Oria) proporcionada por la Agencia Vasca del Agua (URA) obtenida a partir de datos LIDAR con una resolución de 1x1m, junto con la información de las cartas náuticas del litoral español disponibles en la base de datos BACO (IHCantabria) y los planos del cauce en el paso del viaducto proporcionada por ETS. En la Figura 2, se muestra la información batimétrica utilizada en este estudio.

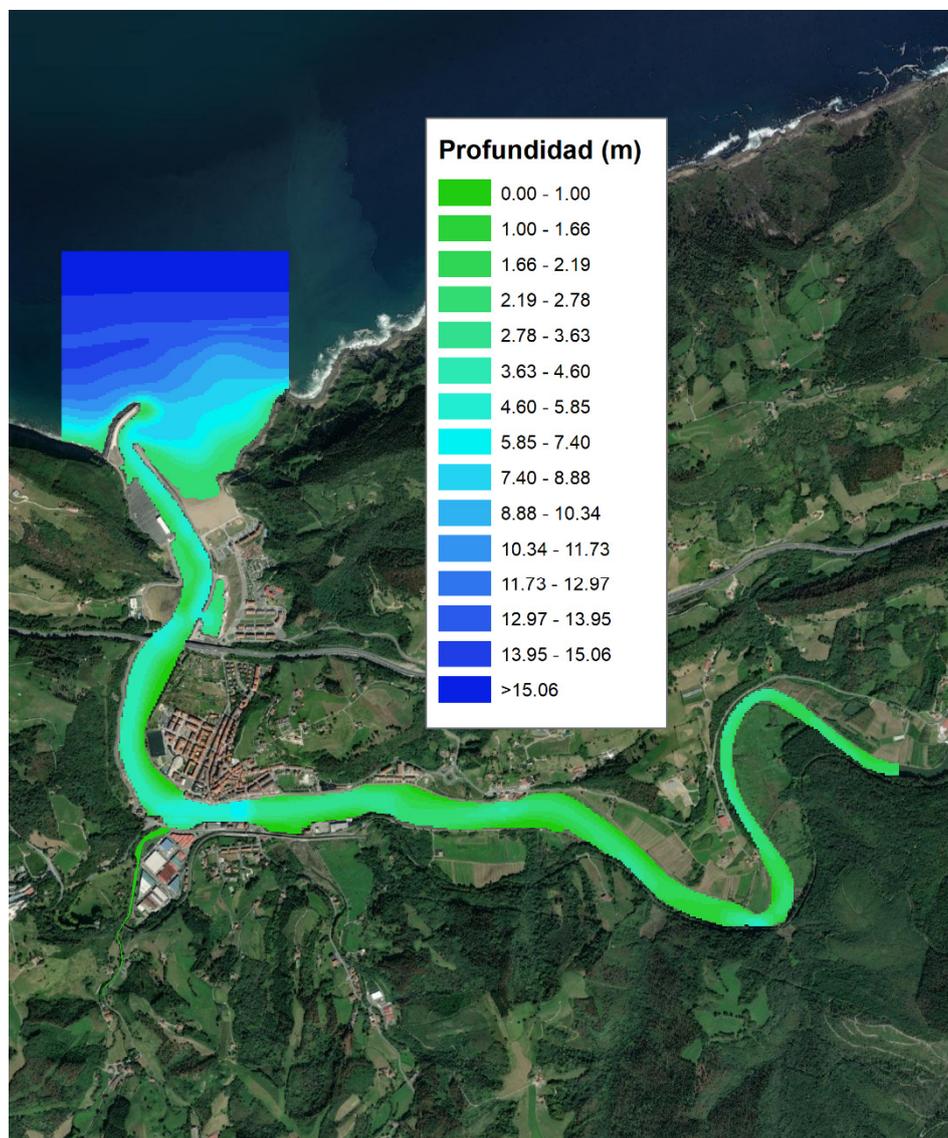


Figura 2. Batimetría de la zona de estudio utilizada para alimentar los modelos numéricos.

### 3.4. Datos meteo-oceánicos.

#### 3.4.1. Mareógrafos.

En España existen varias instituciones que disponen de redes de mareógrafos, como, por ejemplo, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), Puertos del Estado (PdE), el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

De todas ellas, Puertos del Estado ha desarrollado y mantiene tanto sistemas de medida como de previsión del medio marino con el objetivo fundamental de proporcionar al Sistema Portuario Español los datos océano-meteorológicos imprescindibles para su diseño y explotación, lo que permite reducir los costes y aumentar la eficiencia, sostenibilidad y seguridad de las operaciones portuarias.

El sistema consta de redes de medida (boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia), servicios de predicción (oleaje, nivel del mar, corrientes y temperatura del agua) y de conjuntos climáticos, que describen tanto el clima marítimo en la actualidad como sus escenarios de cambio en el siglo XXI.

De la red de mareógrafos de Puertos del Estado, el más próximo a la zona de estudio y, por tanto, el seleccionado para la realización del mismo es el mareógrafo de Bilbao (Figura 3). En la actualidad, la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) consta de más de 30 estaciones operativas a lo largo de toda la costa peninsular e Islas Canarias (véase la Figura 3). Dichos mareógrafos están en general referidos al cero del puerto, es decir, a un nivel de referencia o cero conveniente establecido por cada puerto para la realización de obras, dragados, etc. Normalmente coincide con la mínima bajamar.



Figura 3. Red de Mareógrafos d Puertos del Estado (REDMAR) (Fuente: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>).

En la Figura 4 se muestra la función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao, mareógrafo más cercano a la zona de estudio, junto con los datos de carrera de marea para tres percentiles significativos de la carrera de marea (P90, P50 y P25). Cabe señalar que la máxima amplitud de marea astronómica (marea viva equinoccial) presenta un valor de 2,423 m en la serie registrada en el mareógrafo de Bilbao.

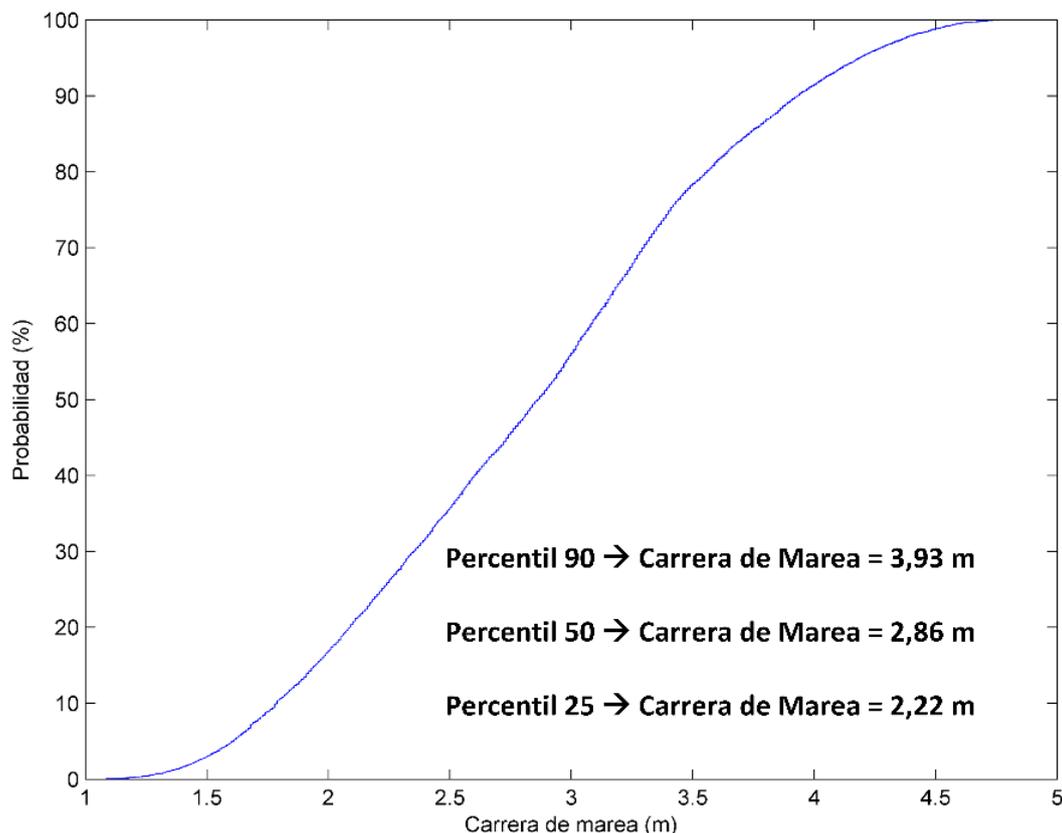


Figura 4. Función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao.

### **3.4.2. Base de datos numérica de salinidad.**

Los datos oceanográficos de salinidad han sido proporcionados por el servicio europeo Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>). De esta forma, el sistema se ha anidado a CMEMS, obteniéndose así las condiciones de contorno. CMEMS es un proyecto de oceanografía operacional desarrollado por 61 instituciones de 29 países europeos con el objetivo de incrementar la capacidad europea de predicción y monitorización marina a través de la creación de un servicio pan-europeo de observación y predicción a escala global y regional. Como parte de su desarrollo se ha establecido un Sistema de Predicción Marina (SPM) que proporciona operacionalmente variables oceanográficas a nivel global y regional. CMEMS cuenta con un modelo global de resolución (1/12º) que se complementa con distintos sistemas regionales tales como el SPM de la zona IBI (Iberian-Biscay-Ireland Regional Seas) (véase la Figura 5).

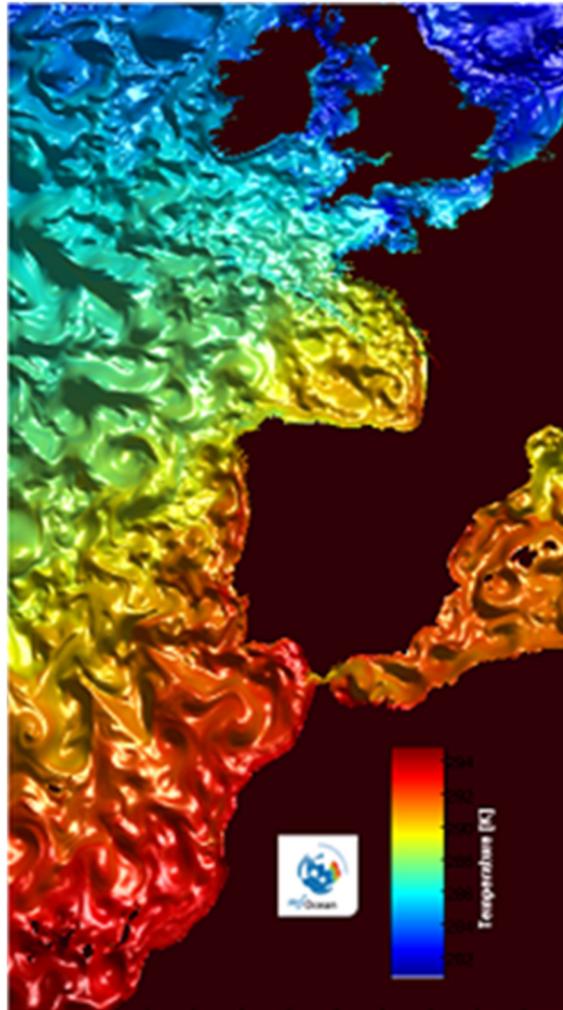


Figura 5. Dominio de la zona IBI (Fuente: <http://www.myocean.eu.org>).

En la zona IBI, Puertos del Estado y el Centro Francés Mercator-Ocean en colaboración con el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) son responsables del desarrollo del SPM. Este sistema de predicción está basado en la aplicación del modelo numérico de predicción oceánica NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). La resolución espacial horizontal de la malla empleada es de  $1/36^\circ$ , es decir, aproximadamente 3.08 km y 50 niveles verticales en coordenada z, cubriendo profundidades desde la superficie hasta los 5000 metros de profundidad. La aplicación provee información de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar.

Para el desarrollo de este trabajo, se ha empleado el valor medio de los datos diarios de salinidad en la zona costera exterior a la ría del Oria, que toma una magnitud de 35 psu, procedente del promedio de la información recogida en dicha ubicación en la base de datos histórica que posee CMEMS en la zona IBI (Iberian-Biscay-Ireland).

### 3.5. Aportes fluviales a la zona de estudio.

La ría de Orio recibe los aportes fluviales del río Oria. Los datos de caudal de este río están disponibles en la página web de la Dirección de Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Guipuzkoa (<https://www.guipuzkoa.eus/es/web/obrahidraulikoak/inicio>). La cuenca del río

Oria presenta una superficie de 861 km<sup>2</sup> y un volumen medio anual que afluye a la ría del Oria de 804 Hm<sup>3</sup>/año.

Por otro lado, de acuerdo con área de la microcuenca vertiente que afluye a la ría a través del arroyo por el que pasa el viaducto, estimada en 9,66 km<sup>2</sup>, y suponiendo una precipitación similar en ambas cuencas (río Oria y la microcuenca), debido a ser aledaña una de la otra y, teniendo en cuenta la relación entre la superficie de ambas, se ha estimado una aportación media anual a través de dicho arroyo a la ría del Oria de 9,46 Hm<sup>3</sup>/año.

### 3.6. Granulometría de la zona de estudio.

La información granulométrica se ha obtenido del "Proyecto de dragado del puerto de Orio, 2017" desarrollado por el Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco. En este documento se recoge información de muestreos de sedimento en las cercanías de la conexión del arroyo con la ría del Oria, presentando valores de D50 de 475 micras.

### 3.7. Geometría de la actuación de rehabilitación del viaducto de Aia-Oria en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia.

La geometría de la actuación de rehabilitación del viaducto de Aia-Oria en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia ha sido proporcionada por ETS. Durante la actuación de rehabilitación del viaducto se dispondrán 3 marcos de 2,5x3 m en el cauce entre la pila 1 y la pila 2, adosados a la pila 1 (Figura 6), manteniéndose la sección hidráulica del arroyo. Una vez acabada la obra de rehabilitación se retirarán los marcos y se volverá al estado inicial del arroyo antes de dichas obras.

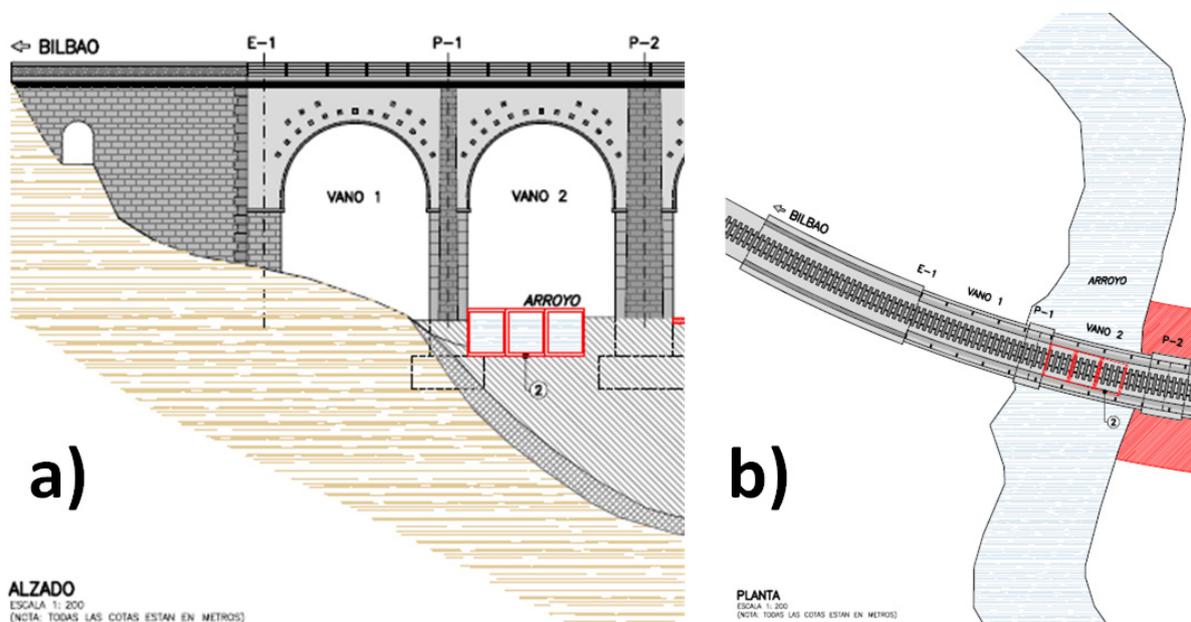


Figura 6. Geometría de la actuación de rehabilitación del viaducto a) Alzado b) Planta. Fuente: ETS.

### 3.8. Proyecciones del escenario de cambio climático RCP8.5 en el horizonte de 50 años.

La información de aumento del nivel de mar en la zona de estudio se ha obtenido del visor web de la European Environment Agency (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/projected-global-mean-sea-level#tab-dashboard-01>). Para el el escenario de cambio climático RCP8.5, el más desfavorable de todos, el incremento del nivel del mar toma un valor medio de 0,453 m para un horizonte de 50 años (véase la Figura 7).

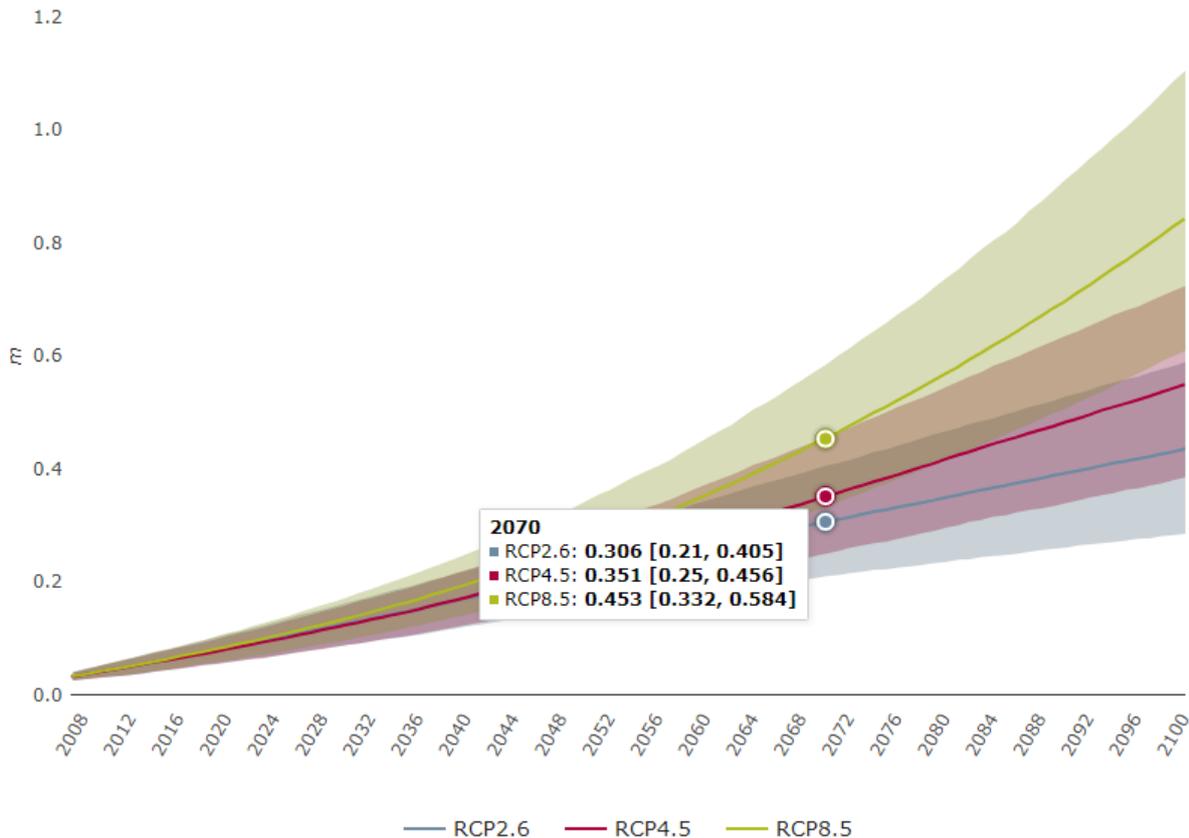


Figura 7. Proyecciones de aumento de nivel del mar (m) respecto respecto los RCP 2.6, 4.5 y 8.5. Fuente: <https://www.eea.europa.eu>.

Por otro lado, la variación en el caudal del río Oria y del arroyo sobre el que pasa el viaducto de Aia-Orio en el PK89+293 y que afluyen a la zona de estudio bajo el escenario climático RCP 8.5 en el horizonte de 50 años se ha obtenido a través de la Plataforma sobre Adaptación al Cambio Climático en España (AdapteCCA) (<https://www.adaptecca.es>). AdapteCCA es una iniciativa conjunta de la Oficina Española de Cambio Climático y la Fundación Biodiversidad, ambas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Los caudales medios de los ríos de la zona de estudio en el escenario de cambio climático RCP8.5 en el horizonte de 50 años, de acuerdo a los resultados de AdapteCCA, se reducirán en un 14%.

## **4. MODELOS DE CÁLCULO.**

### **4.1. Introducción.**

En este apartado se recoge la descripción de los modelos numéricos utilizados en este estudio y que se listan a continuación:

- Modelo numérico Delft3D-FLOW.
- Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.

### **4.2. Modelo numérico Delft3D-FLOW.**

Delft3D-FLOW es un sistema de modelado integrado de flujo y transporte orientado al medioambiente acuático que resuelve las ecuaciones no lineales 2D (promediado en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations). Las formulaciones matemáticas incluidas en el modelo permiten tener en cuenta los siguientes fenómenos físicos:

- Efectos de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).
- Efectos baroclínicos.
- Masas de turbulencia inducida y flujos de momentos (modelos de cierre turbulento).
- Transporte de salinidad, temperatura y otras sustancias conservativas.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Variaciones espacial y temporal de la tensión tangencial del viento en la superficie de la masa de agua.
- Variaciones espaciales de la tensión tangencial en el fondo.
- Variaciones espacial y temporal de la presión atmosférica en la superficie.
- Variación temporal de fuentes y sumideros (i.e. descargas en ríos).
- Inundación y secado de llanuras mareales.
- Flujos de calor.
- Efecto del oleaje.
- Flujo sobre estructuras hidráulicas.

### **4.3. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.**

El modelo Delft3D, incluye un módulo que calcula el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos derivados del mismo. Mediante su aplicación, es posible el cálculo tanto del transporte de sólidos en suspensión, para material cohesivo como no cohesivo, como el transporte de material no cohesivo por fondo. Este módulo permite considerar diversas fracciones de sedimento, según tamaño y densidad, que no interactúan entre sí.

El transporte tridimensional de sólidos en suspensión se calcula mediante la resolución de la ecuación tridimensional de advección – difusión para sólidos en suspensión:

$$\frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(\ell)})c^{(\ell)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.1)$$

donde  $c^{(\ell)}$  es la concentración de masa de la fracción de sedimento ( $\ell$ ) ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u, v, w$  son las componentes de la velocidad de flujo ( $\text{m/s}$ ),  $\varepsilon_{s,x}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,y}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,z}^{(\ell)}$  son los coeficientes de difusión de la fracción de sedimento ( $\ell$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) y  $w_s^{(\ell)}$  es la velocidad de sedimentación de la fracción de sedimento ( $\ell$ ) ( $\text{m/s}$ ).

El uso del módulo morfodinámico, introduce el efecto de las fracciones de sedimento para calcular la densidad del fluido mezcla de sedimento y agua  $\rho_{mix}$ . Este efecto sobre la densidad del agua, obtenida como función de la salinidad y temperatura en ausencia de sedimentos, es calculado con la siguiente relación cuando el medio presenta una cierta concentración de los mismos:

$$\rho_{mix}(S, c^{(\ell)}) = \rho_w(S) + \sum_{\ell=1}^{l_{sed}} c^{(\ell)} \left( 1 - \frac{\rho_{mix}(S)}{\rho_s^{(\ell)}} \right) \quad (4.2)$$

donde  $S$  es la concentración de salinidad (ppt),  $\rho_w(S)$  es la densidad específica del agua con una concentración de salinidad  $S$  ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_s^{(\ell)}$  es la densidad específica de la fracción de sedimento ( $\ell$ ) ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $l_{sed}$  es el número de fracciones de sedimento.

Según las características del material sólido transportado, el modelo Delft3D utiliza diferentes formulaciones para modelizar su transporte, siendo la característica diferencial el hecho de ser sedimento cohesivo o no cohesivo.

## **5. ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL REGLAMENTO GENERAL DE COSTAS.**

### **5.1. Introducción.**

El Reglamento General de Costas recoge en su artículo 91 que las obras que se encuentren en la costa (se entiende que se incluye las zonas estuarinas) o puedan ejercer una influencia sobre la misma, deberán contener una evaluación de los posibles efectos del cambio climático, así como un estudio básico de la dinámica litoral.

A su vez, de acuerdo con el artículo 93 del Reglamento General de Costas, un estudio básico de dinámica litoral deberá comprender los siguientes aspectos:

- a) Estudio de la capacidad de transporte litoral.
- b) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible.
- c) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares.
- d) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático.
- e) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado.
- f) Naturaleza geológica de los fondos.
- g) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento.
- h) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas.
- i) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas.
- j) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias.

A continuación, se recoge la metodología, así como los resultados de la misma para dar respuesta a cada uno de los aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas.

### **5.2. Metodología.**

Con el fin de poder dar respuesta a los aspectos contemplados en el artículo 93 del Reglamento General de Costas recogidos en el subapartado anterior, es preciso obtener las características de las corrientes, nivel del mar, salinidad y transporte potencial de sedimento a la escala requerida por este estudio (local). Para ello, es necesario aplicar una metodología que utilice las mejores bases de datos disponibles, tanto instrumentales como numéricas, y modelos numéricos que sean capaces de reproducir las corrientes generadas por las dinámicas relevantes en la zona de estudio: marea y aportes fluviales.

Para dar respuesta al punto a) del artículo 93 comentado anteriormente, referente al estudio de la capacidad de transporte litoral, se han llevado a cabo los siguientes trabajos:

- En primer lugar, se ha analizado la variación del patrón circulatorio en una situación fruto de la combinación de un caudal medio del río que afluye al arroyo por donde circula el viaducto y de dos mareas diferentes, una marea media y una marea viva equinoccial, en la zona de estudio con modelado numérico bidimensional, analizando la situación del tramo antes de las obras y que es similar a después de las mismas y la situación durante las obras de rehabilitación del viaducto. A través de los resultados de esta modelización se ha evaluado la diferencia de niveles y velocidades aguas arriba y aguas abajo de la zona donde se llevará a cabo la actuación entre las 2 situaciones (sin obra y durante la ejecución de la obra de rehabilitación) en dos puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación (Figura 8).

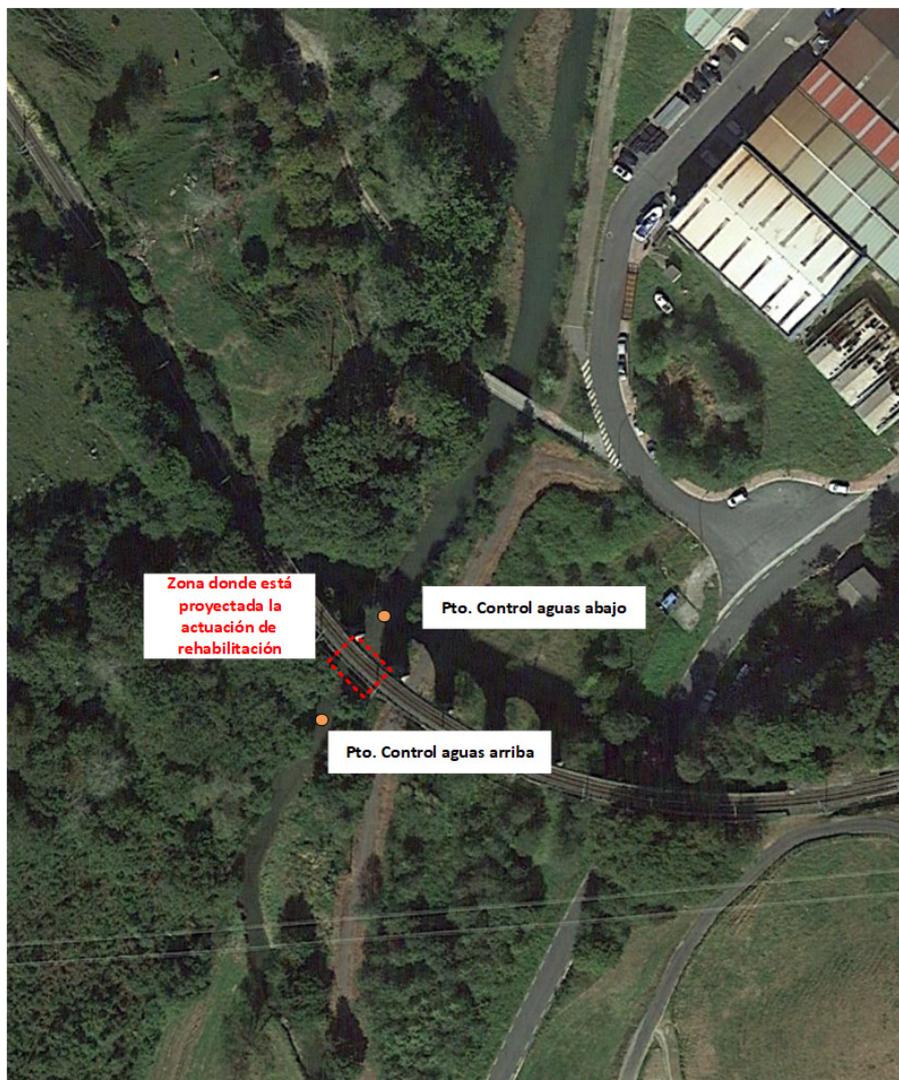


Figura 8. Puntos de control donde se ha analizado la variación de nivel, velocidad, salinidad y transporte potencial, situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada para rehabilitación del viaducto.

- Los resultados hidrodinámicos se han empleado para alimentar un modelo de transporte potencial de sedimento con el que se ha evaluado si la obra proyectada generará alguna modificación sobre el transporte litoral en términos de transporte potencial de sedimento en el punto de control situado aguas abajo de dicha obra, con el fin de dar respuesta al Reglamento General de Costas.

A su vez, para dar respuesta al punto d) de efectos de cambio climático del artículo 93, se han analizado los escenarios hidromorfodinámicos considerados bajo el escenario de cambio climático RCP8.5 en el horizonte de 50 años, tal y como recoge el reglamento citado anteriormente, evaluándose las diferencias respecto de la situación climática actual. Cabe señalar que se ha tenido en cuenta la variación generada en el caudal medio del río y el aumento del nivel del mar de acuerdo al RCP8.5, información que se recoge en el apartado de datos de partida de este documento. Además, debe ser mencionado que el posible efecto del cambio climático se ha analizado en los casos forzados con la marea viva equinoccial.

Por último, con el fin de evaluar posibles efectos sobre la biosfera marina (punto g) del artículo 93 antes citado, se ha evaluado si existen modificaciones en la concentración de salinidad en la zona de estudio en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación, que pudieran alterar el ecosistema durante la ejecución de la obra tanto en la situación actual como en el escenario de cambio climático.

Cada uno de los casos hidrodinámicos se ha calculado con el modelo hidrodinámico Delft3D (Roelvink y van Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics, 2006), que se ha configurado en la zona de estudio en modo bidimensional. El modelado del transporte potencial se ha realizado con la aplicación de la formulación de Van Rijn (1993), incluido en el modelo Delft3D.

Los casos hidrodinámicos se han simulado durante un periodo de 6 días, quedándonos con las 12 últimas horas para garantizar la estabilidad numérica de los resultados del modelo y poder analizar la variación de las magnitudes estudiadas durante una onda de marea.

### **5.3. Configuración del modelo numérico Delft3D en la zona de estudio.**

El modelo numérico en la zona estudio está formado por el anidamiento entre dos mallas de cálculo (véase la Figura 9). La primera de las mallas, con una resolución espacial más grosera de 10m, contempla la ría del Oria y su zona costera adyacente, presentando una extensión de 414x337 celdas en la dirección X e Y. Esta malla se ha anidado a una malla de 1 metro de resolución espacial que cubre el arroyo por el que pasa el viaducto de Aia-Orio con una extensión de 330x840 celdas.

El estudio de la propagación de la onda de marea, dado que la zona de estudio es un área somera, se ha considerado un problema bidimensional, es decir, sólo se ha definido una capa en la coordenada vertical.

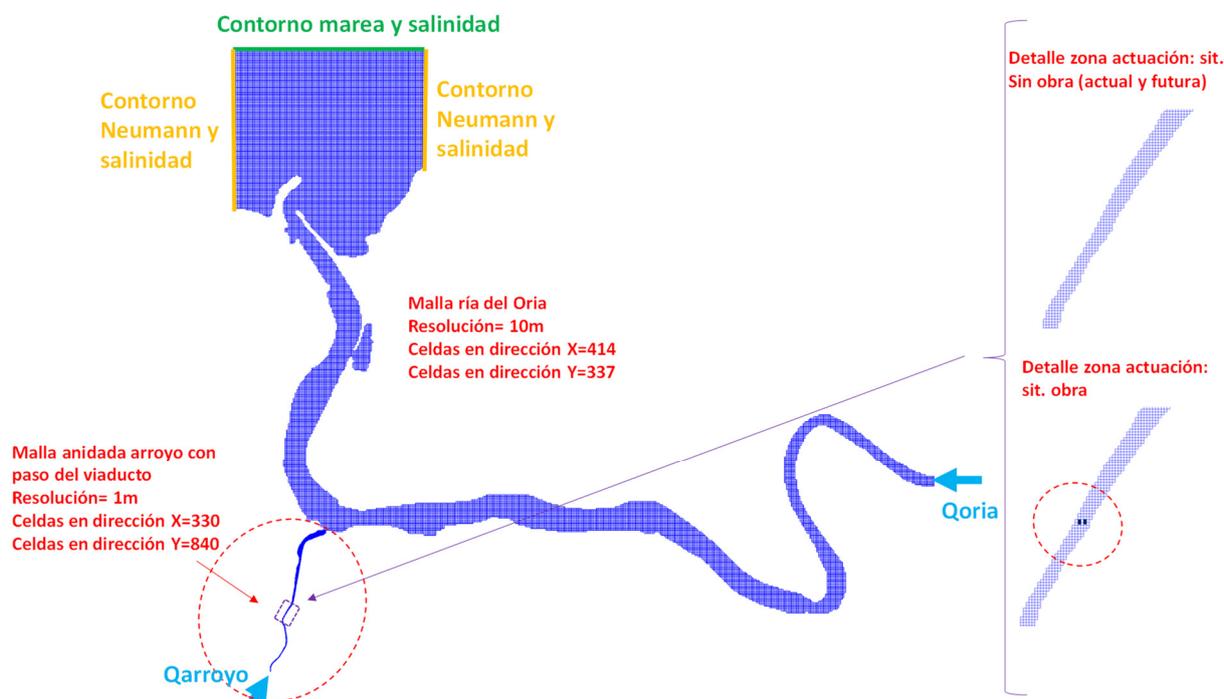


Figura 9. Malla numérica utilizada en las simulaciones y detalle de la zona de ubicación donde está proyectado llevar a cabo la rehabilitación del viaducto de Aia-Orio en el PK89+293 de la línea Bilbao-Donostia.

El contorno que simula la entrada de la marea se ha forzado con una condición de marea media (carrera de marea de 2,46 m) y marea viva equinoccial (carrera de marea de 4,85 m) obtenida del Mareógrafo de Bilbao comentado anteriormente. La salinidad en dichos contornos, además de en los contornos de Neumann adyacentes (necesarios para el funcionamiento del contorno de marea) ha tomado un valor constante de 35 psu. Por otro lado, los contornos fluviales se han modelado con un caudal medio constante para la condición de entrada del río Oria y del arroyo por el que pasa el viaducto de 25,3 y 0,3 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, así como una salinidad constante de 0 psu.

Por último, es importante mencionar que el efecto del fondo se ha modelado mediante el uso de un coeficiente de fricción del fondo de acuerdo a la formulación de Manning (n), estableciéndose un valor de n=0,02.

## 5.4. Respuesta a los diferentes aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas.

### 5.4.1. A) Estudio de la capacidad de transporte litoral.

La posible afección al transporte litoral debido a la actuación proyectada para rehabilitación del viaducto de Aia-Orio en el PK 89+293 de la línea Bilbao-Donostia se ha evaluado mediante el análisis de la variación del nivel del mar, velocidad y transporte potencial de sedimento a lo largo de una onda de marea en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación. Esta variación se recoge de la Figura 10 a la Figura 12.

Como puede apreciarse en estas figuras, tanto la situación sin obra (actual y futura) como la situación durante la obra no presentan diferencias en la variación de nivel del mar,

velocidad y transporte potencial aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada para rehabilitación del viaducto de Aia-Orio durante una onda de marea (ya sea una marea media como una marea viva equinoccial). Como puede constatarse en la Figura 13, la actuación de rehabilitación proyectada no presenta ninguna alteración sobre la capacidad de transporte litoral, siendo el transporte despreciable en esta zona de acuerdo a las características del material tomado como hipótesis de acuerdo con la información disponible en la zona de estudio.

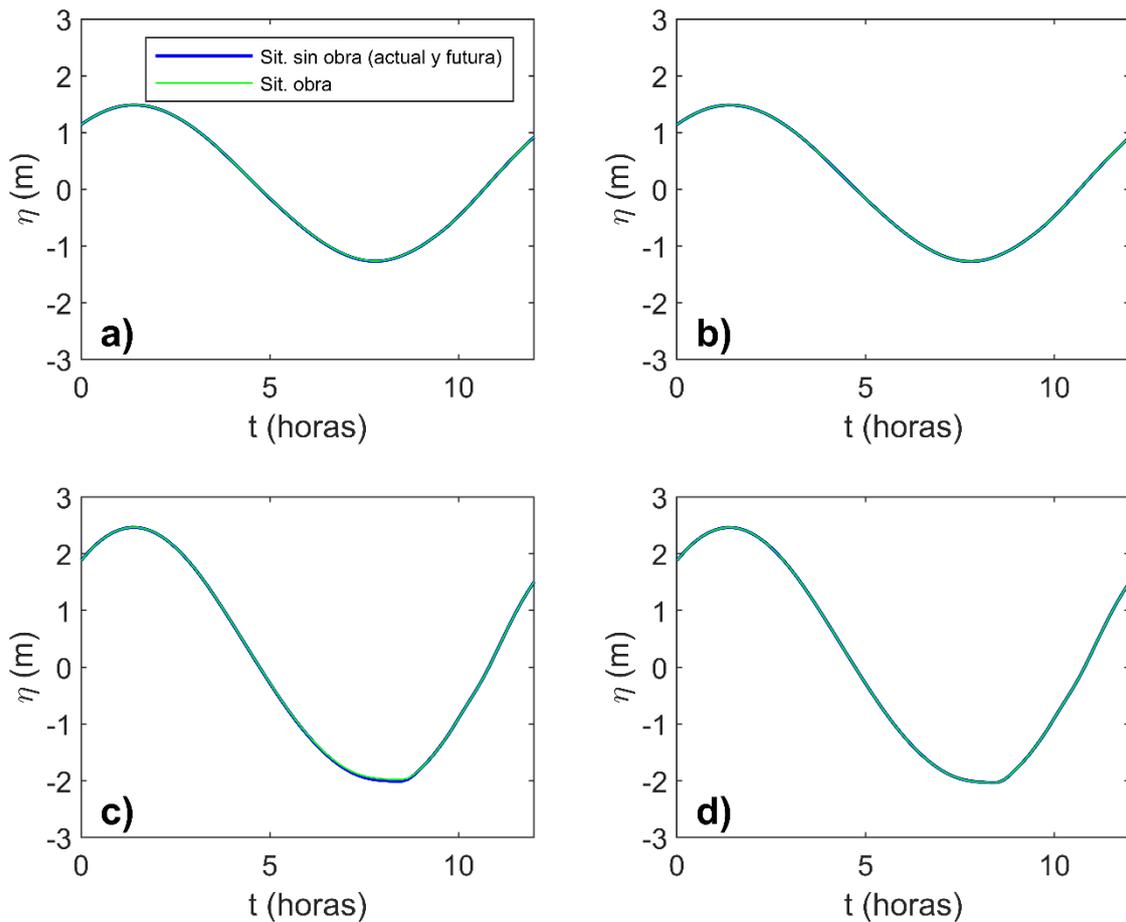


Figura 10. Evolución del nivel del mar en una onda de marea a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

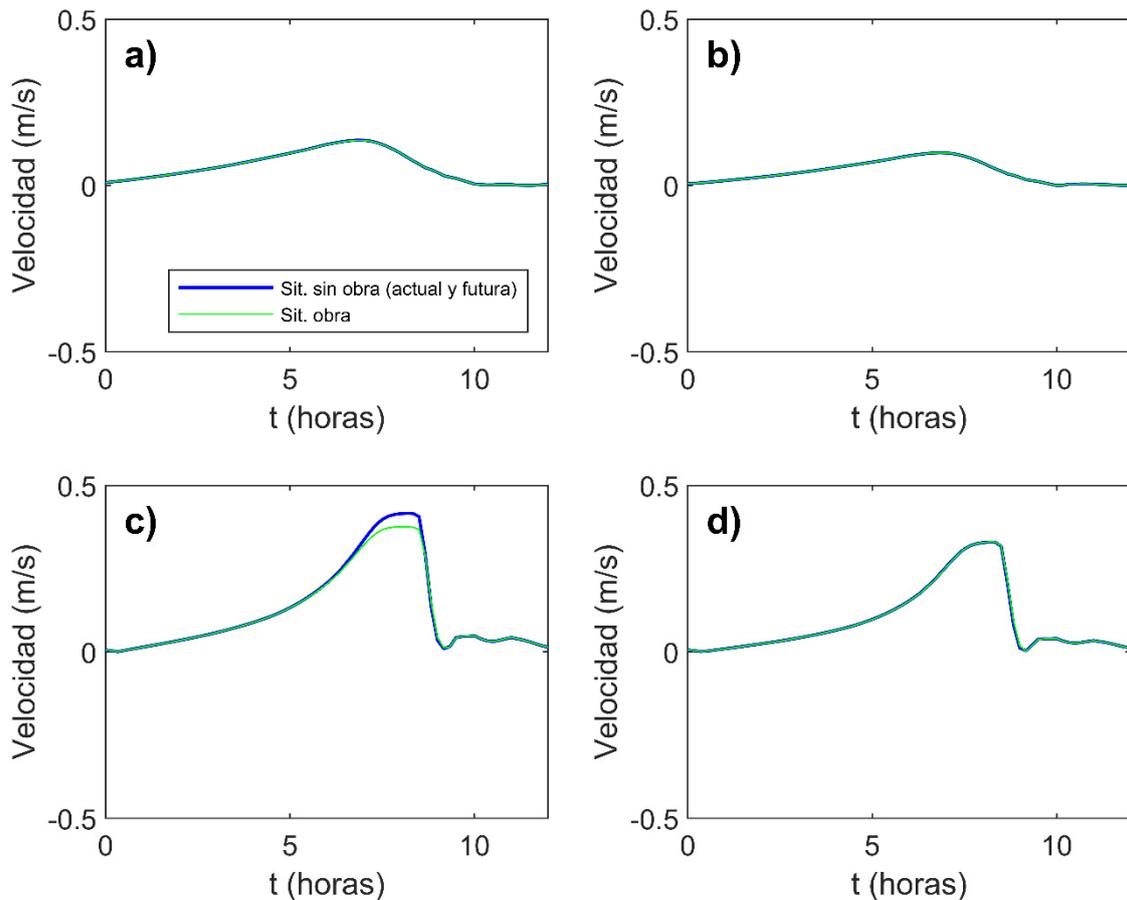


Figura 11. Variación de la velocidad en una onda de marea (positiva en dirección aguas abajo y negativa en dirección aguas arriba) a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

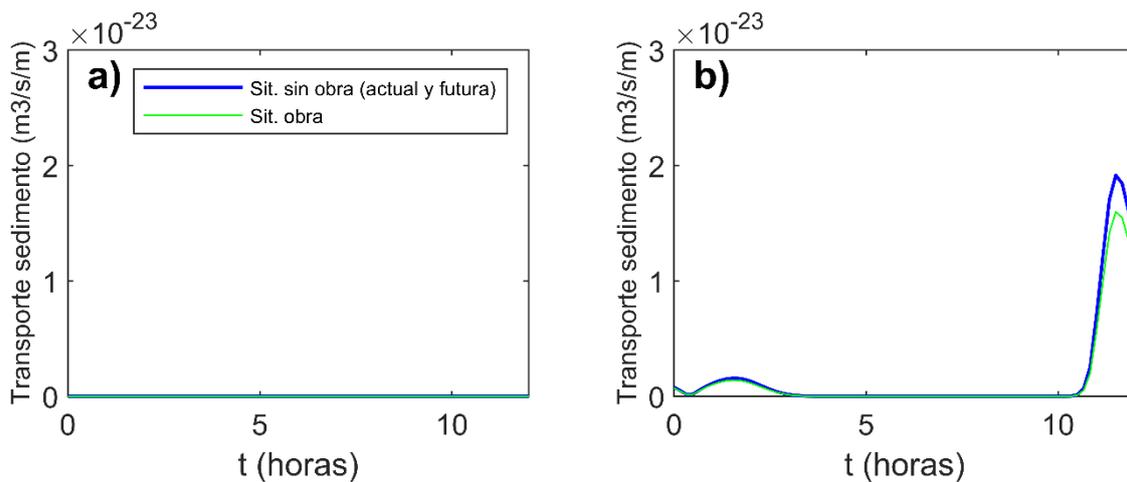


Figura 12. Transporte potencial en una onda de marea en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea media b) Marea viva equinoccial.

#### **5.4.2. B) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible.**

No existe variación en el transporte potencial luego no es necesario evaluar este aspecto.

#### **5.4.3. C) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares.**

Teniendo en cuenta la localización de la zona donde se plantea la actuación, situada en el área interior de la ría del Oria, este aspecto no es de aplicación y por ello no se analiza.

#### **5.4.4. D) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático.**

En la Figura 13 se muestra el efecto del cambio climático, estudiando para este caso el escenario RCP8.5, sobre la situación sin obras. Cabe señalar que en el apartado de capacidad de transporte litoral se ha evidenciado, de acuerdo a los resultados obtenidos del modelado numérico, que la situación durante la obra de rehabilitación no presenta ninguna variación significativa sobre la situación sin obra (situación actual y futura), hecho por el que los resultados son coincidentes en ambos casos.

Como puede apreciarse en esta figura, el cambio climático modificará el nivel del mar aguas arriba de la actuación, de acuerdo con el aumento del nivel medio del mar, incrementándose durante la pleamar. Por otro lado, el efecto del cambio climático se traduce en variaciones en la velocidad en la zona de estudio, reduciéndose estas un 40% y con ello originando que el transporte potencial se reduzca, aunque ya se ve había recogido en la Figura 12 que este era despreciable. A su vez, debe tenerse en cuenta que el cambio climático no genera variación en la salinidad aguas arriba de la actuación. Cabe señalar que aguas arriba de la actuación de rehabilitación no se observa efecto mareal sobre la concentración de salinidad ni en la situación climática actual ni en el escenario de cambio climático RCP8.5 que se ha analizado.

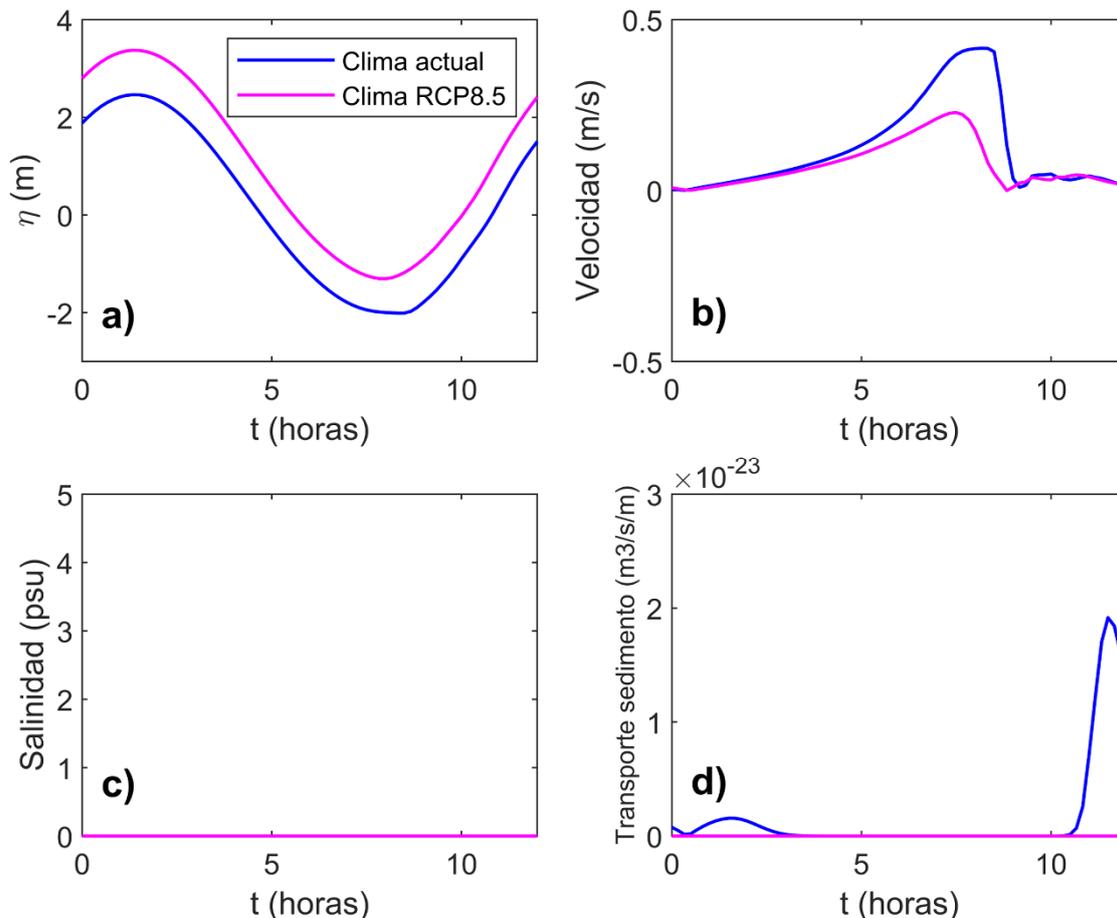


Figura 13. Variación producida por los efectos del cambio climático (escenario RCP8.5) en una onda de marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación de rehabilitación a) Nivel del mar b) Velocidad de la corriente c) Salinidad d) Transporte potencial.

#### **5.4.5. E) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado.**

Por un lado, como ya se ha indicado, la actuación de rehabilitación planteada no produce modificación del transporte de sedimentos y, por otro se ubica en una zona interna de un arroyo afluente a la ría del Oria, por lo que no originará afección sobre la costa.

#### **5.4.6. F) Naturaleza geológica de los fondos.**

Las obras propuestas no implican modificación de la naturaleza de los fondos.

#### **5.4.7. G) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento.**

En la Figura 14 se muestra la variación de la salinidad obtenida en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación en los dos escenarios analizados. Como puede apreciarse en estos gráficos, la actuación de rehabilitación proyectada no modifica la salinidad del arroyo durante la onda de marea, y, por lo tanto, se considera que no afecta a las condiciones inicialmente existentes de la biosfera submarina en dicha área. A su vez, cabe señalar que como puede observarse en estos resultados, aunque la marea

modifica el nivel en el arroyo, no se aprecia variación de salinidad en la zona de ubicación del viaducto.

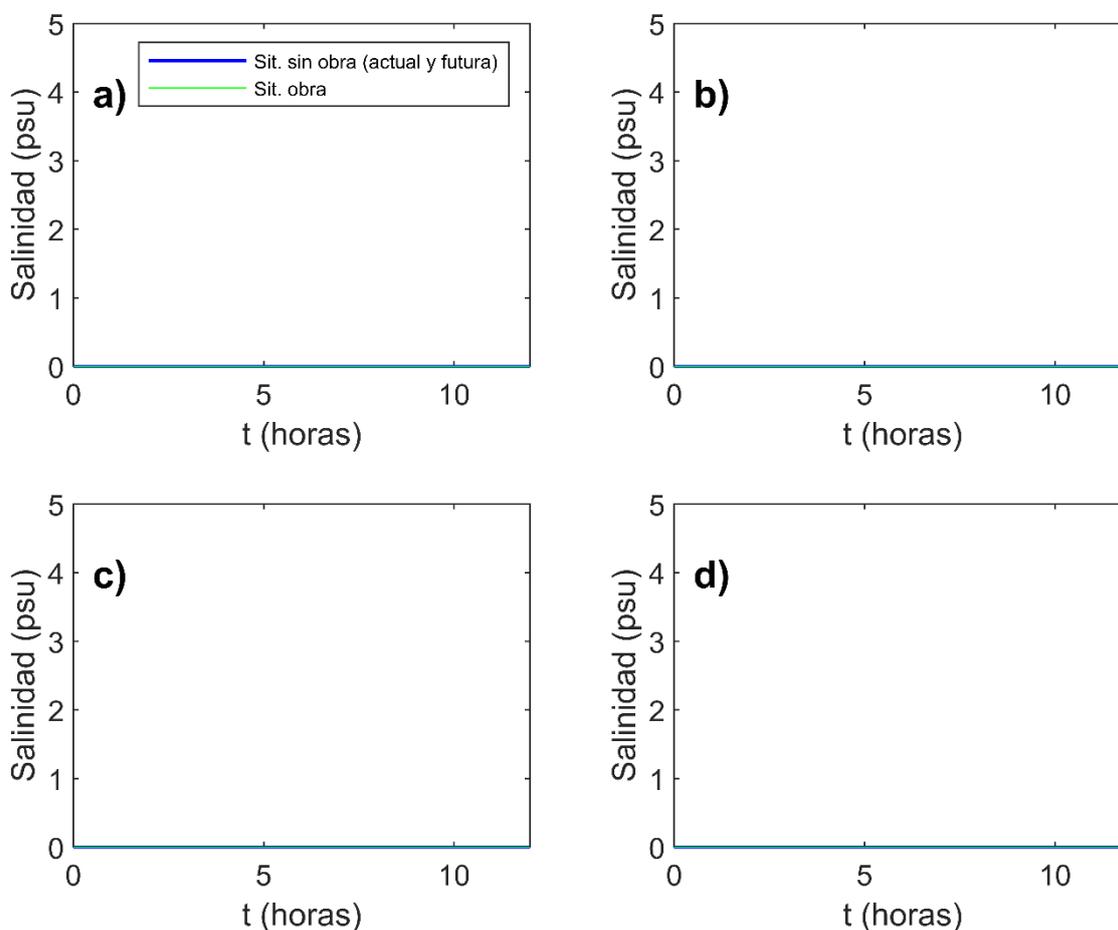


Figura 14. Variación de salinidad en una onda de marea a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación a) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación b) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

#### **5.4.8. H) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas.**

Las obras propuestas no prevén dragados o trasvases de arenas, por lo que este aspecto no es de aplicación.

#### **5.4.9. I) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas.**

Con base en los resultados obtenidos se concluye que no es necesario realizar un plan de seguimiento de las actuaciones en lo que a efectos de la dinámica litoral se refiere, ya que no se produce afección a ésta.

#### **5.4.10. J) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias.**

No son necesarias medidas correctoras ni compensatorias.

## 6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente documento se recogen los resultados obtenidos, empleando técnicas de modelado numérico, del estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto de rehabilitación del viaducto de Aia-Oria en el PK89+292 de la línea Bilbao-Donostia.

De la metodología desarrollada para la realización de este estudio cabe destacar las siguientes tareas llevadas a cabo secuencialmente:

- En primer lugar, se ha llevado a cabo la recopilación y el análisis de la información disponible sobre batimetría, granulometría de la zona de estudio, datos meteorológicos y aportes fluviales.
- Con base en esta información, se ha realizado un estudio de la hidrodinámica en el arroyo sobre el que se dispone la línea Bilbao-Donostia para la situación sin obra (situación actual y futura) y durante las obras de rehabilitación del viaducto.
- El modelado hidrodinámico y de transporte potencial de sedimento se ha llevado a cabo con el modelo numérico Delft3D.
- En cada situación (sin obra y durante ejecución de la obra) se ha analizado los procesos hidrodinámicos asociados a caudales fluviales promedio en conjunción con una marea media o una marea viva equinoccial.
- Los resultados del modelado en todos estos casos se han comparado a través de la variación de nivel del mar, velocidad, salinidad y transporte potencial de sedimento en puntos de control situados aguas arriba y aguas de la zona donde se encuentra proyectada la actuación de rehabilitación del viaducto.
- El efecto del cambio climático se ha analizado mediante la aplicación del escenario RCP8.5, teniendo en cuenta la variación que genera en los aportes fluviales y en el nivel medio del mar.

Del análisis de los aspectos recogidos en el **artículo 93** del **Reglamento General de Costas (RD 876/2014)** se concluye:

- **Estudio de la capacidad de transporte litoral [art. 93 a) RD 876/2014]:** La actuación proyectada no presenta ninguna alteración sobre la capacidad de transporte litoral, ya que no genera modificaciones en el nivel mar, velocidades de la corriente y transporte potencial durante el ciclo de marea.
- **Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible [art. 93 b) RD 876/2014]:** Al no existir variación en el transporte potencial, no es necesario evaluar este aspecto.
- **Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares [art. 93 c) RD 876/2014]:** Teniendo en cuenta la localización de la zona donde se plantea la actuación, situada en el área interior de la ría del Oria, este aspecto no es de aplicación.

- **Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático [art. 93 d) RD 876/2014]:** El nivel del mar aguas arriba de la actuación aumentará de acuerdo con el incremento del nivel medio del mar, pero estando siempre contenido dentro de los taludes del canal. Por otro lado, las velocidades en la zona de estudio se reducirán en un 40%, generando en consecuencia que el transporte potencial se reduzca en la misma cuantía. A su vez, la reducción del caudal fluvial y el aumento del nivel medio del mar no generará variación en la salinidad aguas arriba de la localización de las obras de rehabilitación del viaducto.
- **Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado [art. 93 e) RD 876/2014]:** La actuación planteada, al no modificar el transporte de sedimentos y ubicarse en una zona interna de la ría del Oria, no origina afección sobre la costa.
- **Naturaleza geológica de los fondos [art. 93 f) RD 876/2014]:** Las obras propuestas no implican modificación de la naturaleza de los fondos.
- **Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento [art. 93 g) RD 876/2014]:** La actuación proyectada no modifica la salinidad en la zona de estudio y, por lo tanto, no afecta a las condiciones inicialmente existentes de la biosfera submarina en dicha área.
- **Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas [art. 93 h) RD 876/2014]:** No se prevén.
- **Plan de seguimiento de las actuaciones previstas [art. 93 i) RD 876/2014]:** No es necesario realizar un plan de seguimiento de las actuaciones, en lo que a efectos en la dinámica litoral se refiere.
- **Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias [art. 93 j) RD 876/2014]:** No son necesarias medidas correctoras ni compensatorias.

## REFERENCIAS.

- Roelvink, J.A. and Van Banning, G.K.F.M., 1994. Design and Development of DELFT3D and Application to Coastal Morphodynamics. In: Verwey, A., Minns, A.W., Babovic, V. and Maksimovic, C., Eds., Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, 451-456.
- Van Rijn, L. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. WL/Delft Hydraulics, 2006. Delft3D user manual.