



**Puerto  
de Sevilla**

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DE LA NAVEGACIÓN EN LA  
EUROVÍA E.60.02 GUADALQUIVIR**



**ANEXO XVII. ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE LA  
PLUMA DE DRAGADO Y DE DISPERSIÓN DEL  
DEPÓSITO EN LA FOSA 2**



**sener**



**TECNOAMBIENTE**

A TRADEBE COMPANY

*“El contenido de esta publicación es  
responsabilidad exclusiva de la U.T.E. MC  
VALNERA, S.L. – SENER INGENIERÍA Y  
SISTEMAS, S.A – TECNOAMBIENTE, S.L.  
y no refleja necesariamente la opinión de la  
Unión Europea”*



**Cofinanciado por  
la Unión Europea**

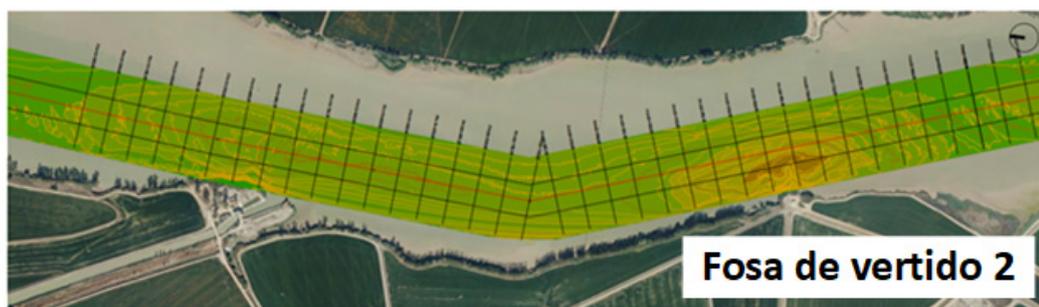


# IH cantabria

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



A TRADEBE COMPANY



**DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO DE EROSIÓN EN  
LAS MÁRGENES DE LA EUROVÍA DEL GUADALQUIVIR**

**ENTREGABLE: CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN EN LA  
COLUMNA DE AGUA DEL MATERIAL DE DRAGADO  
VERTIDO EN FONDO EN LA FOSA 2 A TRAVÉS DE  
MODELIZACIÓN 3D**



## ÍNDICE



## ÍNDICE

ÍNDICE .....	I
ÍNDICE DE FIGURAS .....	II
1. ANTECEDENTES. ....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. CONTENIDO DEL INFORME. ....	3
4. DATOS DE PARTIDA.....	4
4.1. Introducción. ....	4
4.2. Información hidrodinámica de detalle. ....	4
4.3. Ubicación de la fosa objeto de estudio. ....	5
4.4. Volumen y características del material de dragado vertido en la fosa 2. ....	5
5. MODELO DE CÁLCULO. ....	6
5.1. Introducción. ....	6
5.2. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D. ....	6
5.3. Sistema IH-Dredge. ....	6
6. ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y DISPERSIÓN DEL MATERIAL DE DRAGADO.....	8
6.1. Introducción. ....	8
6.2. Metodología. ....	8
6.3. Resultados.....	10
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	12
REFERENCIAS.....	13

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Malla numérica de detalle (en blanco), condiciones de contorno (aguas arriba en azul: velocidades, aguas abajo en amarillo: niveles) y punto de validación (estrella) utilizados en las simulaciones para la Corta de los Jerónimos.....	4
Figura 2. Planta y perfil longitudinal de la fosa de vertido 2. ....	5
Figura 3. Esquema de funcionamiento del modelo IH-Dredge. Fuente: García-alba et al., 2014. ....	7
Figura 4. Esquema de la simulación del vertido del material de dragado en la capa de fondo en la fosa 2 con el acople del sistema IH-Dredge y el modelo morfodinámico de la suite Delft3D a través de modelización 3D.....	9
Figura 5. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada durante el proceso de vertido del material de dragado en la fosa de vertido 2. ....	10
Figura 6. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) en la fosa de vertido 2. ....	11



**MEMORIA**



## 1. ANTECEDENTES.

En diciembre de 2021 se firma con la UTE MCVLANERA, S.L. TECNOAMBIENTE, S.L. – SENER Ingeniería y Sistemas, S.A. el contrato para la realización del “Desarrollo de un sistema experto de erosión en las márgenes de la Eurovía del Guadalquivir”, cuyo objetivo es el desarrollo de una herramienta de gestión para la Autoridad Portuaria de Sevilla que le permita caracterizar los procesos de erosión-sedimentación a lo largo de la Eurovía del Guadalquivir, el aumento del conocimiento existente sobre los procesos de erosión en las márgenes de la Eurovía debidas al paso de barcos, así como la estimación de las tasas de erosión-sedimentación en zonas identificadas de especial interés.

En julio de 2022 se firma con la UTE una adenda para la realización de unos trabajos adicionales que conllevan el estudio de la estabilidad y dispersión del material de dragado depositado en 2 fosas en la ría del Guadalquivir (fosas de vertido 2 y 7 de acuerdo con la nomenclatura utilizada por la Autoridad Portuaria de Sevilla).

En noviembre de 2022 se firma con la UTE otra nueva adenda para la realización de unos trabajos adicionales que conllevan el cálculo de la dispersión en la columna de agua del material de dragado vertido en fondo en la fosa 2 a través de modelización 3D

Los trabajos en los que se divide esta adenda y se recogen en este informe han sido realizados por los siguientes miembros de IHCantabria:

- Tamara Rodríguez Castillo, Doctora por la Universidad de Cantabria, Licenciada en Ciencias Ambientales. Tecnóloga del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- Javier García Alba, Doctor por la Universidad de Cantabria, Licenciado en Ciencias Físicas. Tecnólogo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Santander, diciembre de 2022

Fdo.: Javier García Alba

*Tecnólogo del Instituto de  
Hidráulica Ambiental de la  
Universidad de Cantabria*

## 2. OBJETIVOS.

El objetivo del presente informe es el análisis del efecto ambiental del vertido de material de dragado en la ría del Guadalquivir en las fosas de vertido 2 de acuerdo con la nomenclatura de la Autoridad Portuaria de Sevilla. Para alcanzar el objetivo general se analizará la turbidez (en forma de concentración de sólidos en suspensión) originada por el depósito del material de dragado en fondo a través de modelización 3D

### **3. CONTENIDO DEL INFORME.**

El presente informe "Cálculo de la dispersión en la columna de agua del material de dragado vertido en fondo en la fosa 2 a través de modelización 3D" se encuentra dividido en los capítulos que se listan a continuación:

Capítulo 4: Datos de partida, en el que se detalla la información necesaria para la realización del presente estudio.

Capítulo 5: Modelos de cálculo, en el que se describen los modelos numéricos utilizados en los estudios de dispersión del material de dragado.

Capítulo 6: Estudio de estabilidad y dispersión del material de dragado, en el que se detallan la metodología seguida para la implementación del modelado numérico, así como los principales resultados obtenidos.

Capítulo 7: Resumen y conclusiones del presente documento.

## 4. DATOS DE PARTIDA.

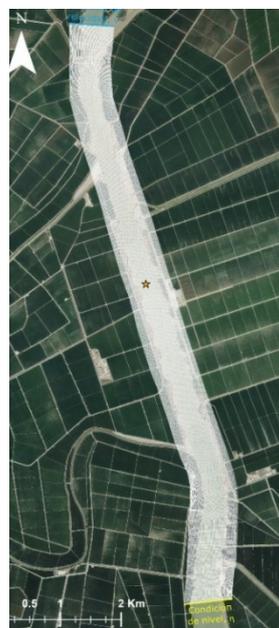
### 4.1. Introducción.

En este apartado se recoge la información utilizada en los estudios de la estabilidad y dispersión del material de dragado depositado en fosas en la ría del Guadalquivir, relacionada con los siguientes aspectos:

- Información hidrodinámica de detalle.
- Información granulométrica y geofísica.
- Espesores sedimentados/erosionados en las áreas de dragado de la Autoridad Portuaria de Sevilla en la ría del Guadalquivir.
- Ubicación de las fosas objeto de estudio.
- Volumen y características del material de dragado vertido en las fosas.

### 4.2. Información hidrodinámica de detalle.

La información hidrodinámica de detalle de la zona de estudio se ha obtenido de los estudios recogidos en el entregable 2.1 del estudio "Desarrollo de un sistema experto de erosión en las márgenes de la Eurovía del Guadalquivir". La hidrodinámica cubre el año 2021 completo, seleccionado como año promedio hidrodinámico de acuerdo con sus forzamientos ambientales (caudal del río y marea), y provee de información de circulación estuarina en la zona navegable de la ría del Guadalquivir. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se muestra la malla numérica de detalle y condiciones de contorno con las que se llevó a cabo la simulación hidrodinámica en la zona de la Corta de los Jerónimos.



**Malla numérica curvilínea:**  
Resolución celdas:  $\Delta x = 5$ ,  $\Delta y = 10$   
Celdas en dirección M = 162  
Celdas en dirección N = 1002

Figura 1. Malla numérica de detalle (en blanco), condiciones de contorno (aguas arriba en azul: velocidades, aguas abajo en amarillo: niveles) y punto de validación (estrella) utilizados en las simulaciones para la Corta de los Jerónimos.

### 4.3. Ubicación de la fosa objeto de estudio.

La fosa objeto de estudio es, de acuerdo con la información y nomenclatura proporcionada por la Autoridad Portuaria de Sevilla, la fosa de vertido 2 (Figura 2), situada en la unión entre la zona de Los Olivillos y la Corta de los Jerónimos entre el PK19+500 y el PK20+800. La fosa de vertido 2 presenta una cota de fondo, cota de relleno máxima y capacidad máxima estimada de -13 m, de -9 m y de 200000 m<sup>3</sup>, respectivamente.

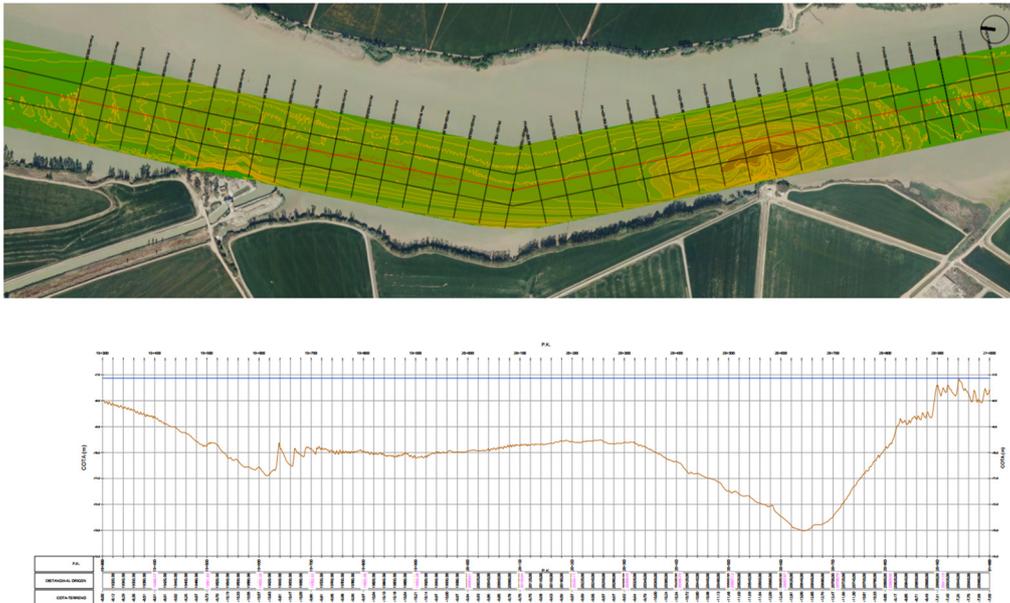


Figura 2. Planta y perfil longitudinal de la fosa de vertido 2.

### 4.4. Volumen y características del material de dragado vertido en la fosa 2.

La información del volumen y características del material de dragado vertido en la fosa 2 ha sido proporcionada por la Autoridad Portuaria de Sevilla. Las fosas de vertido 2 recibe una descarga de material de dragado de 76950 m<sup>3</sup>, respectivamente. Por otra parte, cabe señalar que el material vertido presenta un D50 de 63 micras.

## 5. MODELO DE CÁLCULO.

### 5.1. Introducción.

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

- Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.
- Sistema IH-Dredge.

### 5.2. 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:

$$\frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(\ell)})c^{(\ell)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (5.1)$$

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:

$$\rho_{mix}(S, c^{(\ell)}) = \rho_w(S) + \sum_{\ell=1}^{l_{sed}} c^{(\ell)} \left( 1 - \frac{\rho_{mix}(S)}{\rho_s^{(\ell)}} \right) \quad (5.2)$$

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.

### 5.3. Sistema IH-Dredge.

El sistema IH-Dredge es un modelo matemático desarrollado por IHCantabria (García-Alba et al., 2013; García-Alba et al., 2014; Gómez et al., 2014, IHCantabria, 2013) que posibilita el modelado de procesos de dragado en tiempo real para diferentes tipos de

dragado como son el dragado con cuchara, succión o succión de corte. En la Figura 3 se muestra un esquema del funcionamiento del modelo.

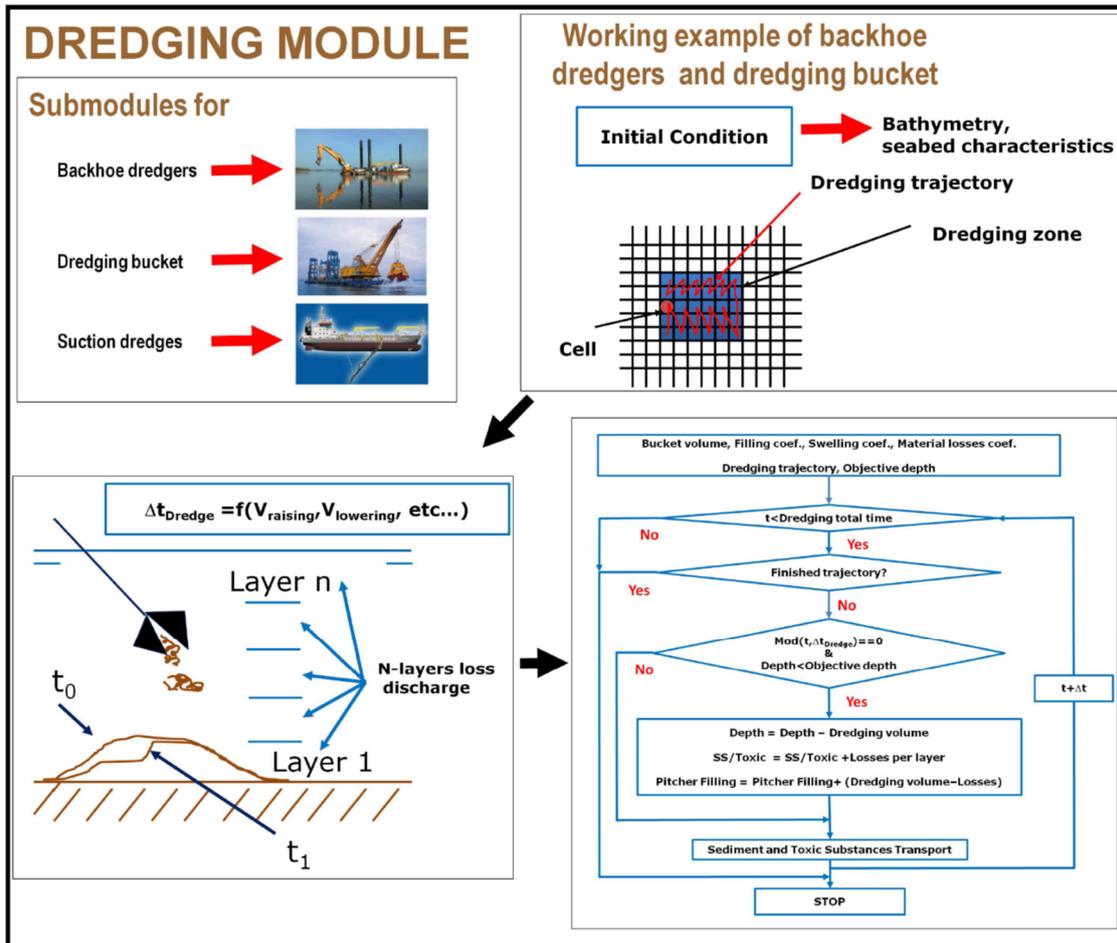


Figura 3. Esquema de funcionamiento del modelo IH-Dredge. Fuente: García-alba et al., 2014.

## **6. ESTUDIO DE ESTABILIDAD Y DISPERSIÓN DEL MATERIAL DE DRAGADO**

### **6.1. Introducción.**

Los efectos de los procesos de dragado han sido ampliamente estudiados a través de experimentos de laboratorio (Vlasbom, 2005). Sin embargo, el desarrollo de modelos matemáticos permite predecir estos efectos en cualquier situación sin la necesidad de tener que recurrir a costosos ensayos físicos.

Actualmente, los modelos de transporte de sedimentos son capaces de reproducir la variación del fondo marino por efecto de las operaciones de dragado, analizando la evolución de sólidos en suspensión en la columna de agua (Song and Haidvogel, 1994; Jacobsen and Rasmussen, 1997; WL/Delft Hydraulics, 2006; Bai et al., 2003). No obstante, debe tenerse en cuenta que el estudio de los patrones sedimentarios y la evolución de obras de dragado constituye un problema complejo, debido a que las variables que intervienen en su definición dependen de las características hidrodinámicas del medio. Entre éstas cabe señalar la concentración y naturaleza de los sólidos, en especial su densidad y tamaño.

El transporte de los sólidos se realiza por fondo (rodando, saltando o deslizándose) o por movimiento en suspensión. El primero tiene un papel predominante en flujos lentos y/o con gran tamaño del sedimento, mientras que el segundo es dominante cuando existen flujos con altas velocidades y/o tamaños de grano suficientemente pequeños.

Por otro lado, metodologías como el sistema IH-Dredge, desarrollado por IHCantabria (García et al 2013; García et al 2014; IHCantabria, 2013), une el uso del módulo morfodinámico del modelo Delft3D (Roelvink and Van Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics 2006), que permite simular la evolución de los sedimentos en la columna de agua, con un conjunto de scripts que permiten simular en tiempo real diferentes técnicas de dragado, tanto mecánicas como hidráulicas, pudiendo con ello computar e introducir las pérdidas de material durante proceso de dragado que son introducidas en la columna de agua.

Cualquier obra realizada sobre el medio acuático, como es el caso de este estudio con el dragado de las áreas de préstamo, tiene una influencia local sobre las condiciones del flujo en el área de estudio. Dicho cambio en los patrones de circulación locales, generan a su vez modificaciones en las tensiones sobre el lecho y, consecuentemente, pueden causar modificaciones sobre la capacidad de transporte de sedimentos y erosión en el lecho fluvial.

A continuación, se describen la metodología y modelo numérico empleados, así como los resultados obtenidos en el análisis de la estabilidad y dispersión del material de dragado vertido en fondo en las fosas 2 de la ría del Guadalquivir a través de modelización 3D.

### **6.2. Metodología.**

En este estudio se ha analizado la turbidez adicional generada en la columna de agua debido al material sólido introducido en el medio por el vertido del material de dragado en las fosas de vertido 2 en la capa de fondo a través de modelización 3D, con el fin de simular el efecto de la descarga a través de tubería en las cercanías del lecho estuarino. La turbidez adicional introducida en la columna de agua debido al vertido del material de dragado en las fosas se ha contabilizado en forma de la concentración de sólidos en suspensión (mg/l).

El efecto de la turbidez introducida en la columna de agua se ha analizado en un escenario hidrodinámico correspondiente a un rango de marea medio obtenido de la información hidrodinámica recogida en el capítulo de datos de partida.

El modelado de la descarga del material de dragado se ha llevado a cabo a través del acople del modelo morfodinámico de la suite Delft3D y el sistema IH-Dredge desde un punto de vista tridimensional con 10 capas sigma (equiespaciadas en función de la profundidad de cada celda) utilizadas para la discretización vertical. Con el fin de representar de la manera más fidedigna posible la descarga del material dragado, éste se ha introducido como un vertido en la capa de fondo, simulando la suelta de material a través de la tubería de la draga de succión en las cercanías del lecho estuarino. Por otra parte, cabe señalar que a través de este acople mencionado anteriormente, se ha simulado el vertido del volumen de material de dragado correspondiente a lo largo de la fosa 2 (Figura 4) con un caudal sólido constante de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor asumible de acuerdo con IHCantabria (2013), hasta alcanzar una cota constante máxima (valor recogido en el capítulo de datos de partida) en todo el área de la fosa. A su vez, debe ser mencionado que el material de vertido presenta un D50 de 63 micras, de acuerdo con la información proporcionada por la Autoridad Portuaria de Sevilla.

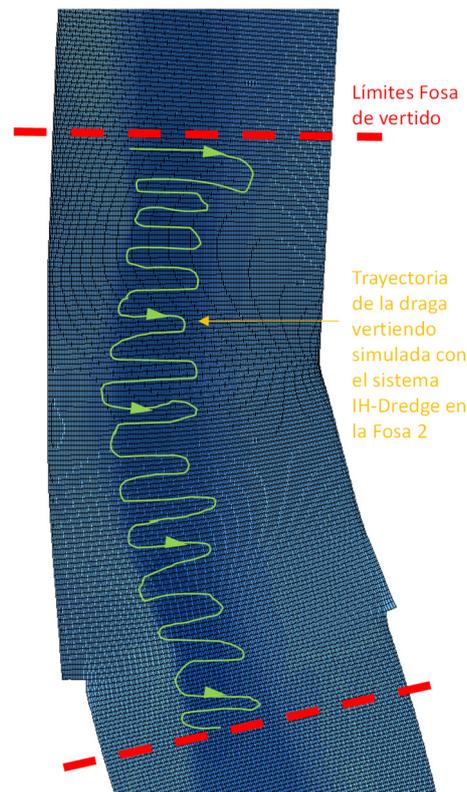


Figura 4. Esquema de la simulación del vertido del material de dragado en la capa de fondo en la fosa 2 con el acople del sistema IH-Dredge y el modelo morfodinámico de la suite Delft3D a través de modelización 3D.

Los resultados del modelado del proceso de vertido han sido procesados con el fin de obtener la distribución espacial de la concentración media de sólidos en suspensión en la columna de agua generada durante la descarga del material de dragado en la fosa 2, así como la evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en 3 puntos: aguas arriba de la fosa, en la fosa y aguas abajo de la fosa.

### 6.3. Resultados.

La concentración promedio introducida en la ría del Guadalquivir por la pluma de sedimentos generada durante el proceso de vertido del material de dragado en la fosa de vertido 2, se muestra en la Figura 5. En dicha figura se observa que la pluma generada durante al vertido afecta a una parte de la extensión de la zona de estudio (3.5 Km), alcanzándose valores relativamente elevados en la ubicación de la propia fosa, ya que el material vertido tiende a sedimentar rápidamente.

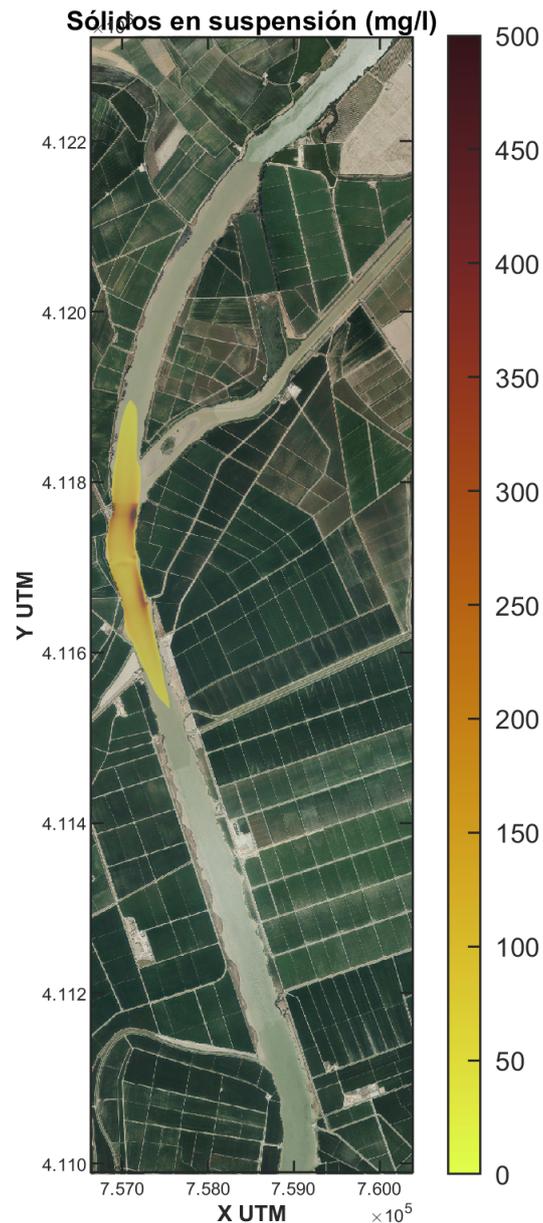


Figura 5. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada durante el proceso de vertido del material de dragado en la fosa de vertido 2.

Por otro lado, la evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en 3 puntos de la zona de estudio se muestra en la Figura 6. Como puede apreciarse en la figura siguiente, el gradiente de concentración introducido por la dispersión del vertido del material de dragado en la fosa se reduce rápidamente, alcanzándose a las 12 horas valores adicionales de concentración sobre el medio menores de 1 mg/l, valor despreciable respecto de típicas concentraciones de sedimentos en suspensión en dicho tramo de la ría del Guadalquivir ( $\approx 200$  mg/l, de acuerdo con los datos recogidos en las figuras 26 y 28 del informe E1 "Diagnóstico inicial de los procesos de erosión/sedimentación y sus agentes causantes").

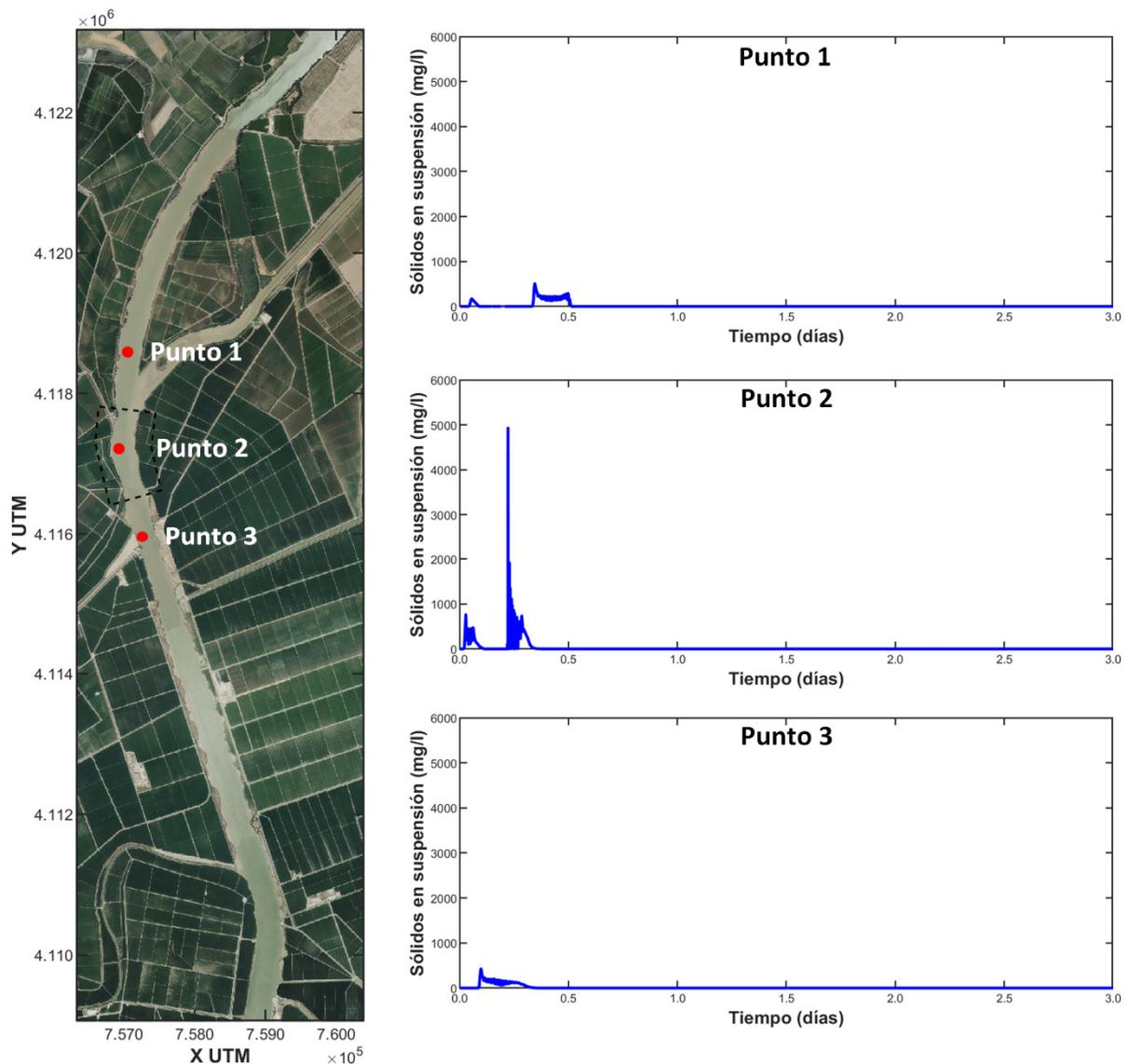


Figura 6. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) en la fosa de vertido 2.

## 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente documento se recogen los resultados obtenidos del cálculo de la dispersión en la columna de agua del material de dragado vertido en fondo en la fosa 2 a través de modelización 3D.

Este estudio contempla, en primer lugar, la recopilación y el análisis de la información disponible sobre hidrodinámica de detalle de la zona de estudio, ubicación de las fosas y volumen y características del material de dragado vertido.

Con base en esta información, se ha analizado la dispersión en la columna de agua del material sólido introducido en el medio por proceso de descarga en fondo del material de dragado en la fosa de vertido 2 de la ría del Guadalquivir. Los cálculos hidromorfológicos fueron realizados con el modelo Delft3D en su variante tridimensional (con una discretización de 10 capas sigma equiespaciadas en la dirección vertical), acoplándose con el sistema IH-Dredge para simular la descarga del material de dragado.

Del modelado numérico de la evolución de la dispersión en la columna de agua del material de dragado vertido en fondo cabe destacar lo siguiente:

- El gradiente de concentración introducido por la dispersión del vertido en fondo del material de dragado afecta a una extensión de 3.5 Km en la zona de la fosa 2, estando las concentraciones más elevadas en los límites de las fosas. No obstante, cabe señalar que este gradiente se reduce rápidamente, alcanzándose a las 12 horas valores adicionales de concentración sobre el medio menores de 1 mg/l, valor despreciable respecto de típicas concentraciones de sedimentos en suspensión en dichos tramos de la ría del Guadalquivir ( $\approx 200$  mg/l, de acuerdo con los datos recogidos en las figuras 26 y 28 del informe E1 "Diagnóstico inicial de los procesos de erosión/sedimentación y sus agentes causantes")

## REFERENCIAS.

- Bai, Y., Wang, Z., and Shen, H., 2003. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 175-186.
- Engelund, F and Hansen, E., 1967. A monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Fischer, H. B. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic Press.
- García Alba, J., Gómez A.G., Sámano, M.L., García A., Juanes, J.A, 2013. Desarrollo del modelo IH-Dredge. Aplicación a la estimación del riesgo ambiental en procesos de dragado. XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.
- García-Alba, J., Gómez, A.G., Tinoco López R.O., Sámano Celorio, M.L., García Gómez A., Juanes, J.A. 2014. A 3-D model to analyze environmental effects of dredging operations - Application to the Port of Marin, Spain. *Advances in Geosciences*, Volume 39, 95-99.
- Gómez, A.G., García-Alba, J., Puente, A., Juanes, J.A. 2014. Environmental risk assessment of dredging processes-application to Marin harbour (NW Spain). *Advances in Geosciences*, Volume 39, 101-106.
- IHCantabria, 2013. Proyecto INNODRAVAL. Fase 2: Desarrollo de Herramientas Predictivas para la Estimación de Efectos Ambientales. INNODRAVAL Project (IPT-310000-2010-17).
- Jacobsen, F. and Rasmussen, E. B., 1997. MIKE 3 MT: A 3-dimensional mud transport model, Technical rep. DG-12 to the commission of the european communities, Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark.
- Nash, J. and Sutcliffe, J.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282-290, 1970.
- 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.
- Song, Y. T. and Haidvogel, D., 1994. A semi-implicit primitive equation ocean circulation model using a generalized topography following coordinate system, *J. Comput. Phys.*, 115, 228-244.
- UNESCO, 1981. Background papers and supporting data on the international equation of state 1980. Tech. Rep. 38, UNESCO.
- Vlasbom, W., 2005. Design of Dredging Equipment, Delft University of Technology.
- WL/Delft Hydraulics, 2006. Delft3D user manual.



# IH cantabria

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



## TECNOAMBIENTE

A TRADEBE COMPANY



### **ESTUDIO AMBIENTAL DE LA DISPERSIÓN DEL MATERIAL PUESTO EN SUSPENSIÓN DURANTE EL PROCESO DE DRAGADO EN EL ÁREA DE DRAGADO UBICADO EN LA ZONA DE LOS OLIVILLOS DE LA RÍA DEL GUADALQUIVIR**



## ÍNDICE



## ÍNDICE

ÍNDICE .....	I
ÍNDICE DE FIGURAS .....	II
ÍNDICE DE TABLAS.....	II
1. ANTECEDENTES. ....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. CONTENIDO DEL INFORME. ....	3
4. DATOS DE PARTIDA.....	4
4.1. Introducción. ....	4
4.2. Información hidrodinámica de detalle. ....	4
4.3. Ubicación del área de dragado objeto de estudio y sus características. ....	5
5. MODELO DE CÁLCULO. ....	6
5.1. Introducción. ....	6
5.2. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D. ....	6
5.3. Sistema IH-Dredge. ....	6
6. ESTUDIO DE DISPERSIÓN DEL MATERIAL PUESTO EN SUSPENSIÓN DURANTE EL PROCESO DE DRAGADO .....	8
6.1. Introducción. ....	8
6.2. Metodología. ....	8
6.3. Resultados.....	9
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	13
REFERENCIAS.....	14

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Malla numérica de detalle (en blanco), condiciones de contorno (aguas arriba en azul: velocidades, aguas abajo en amarillo: niveles) y punto de validación (estrella) utilizados en las simulaciones para la Corta de los Jerónimos.....	4
Figura 2. Localización del polígono de dragado en Los Olivillos y delimitación del tramo modelado.....	5
Figura 3. Esquema de funcionamiento del modelo IH-Dredge. Fuente: García-alba et al., 2014. ....	7
Figura 4. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado hasta llenar la cántara en el área de dragado de la zona Los Olivillos en un periodo de marea viva llenante. ....	10
Figura 5. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado hasta llenar la cántara en el área de dragado de la zona Los Olivillos en un periodo de marea viva vaciante.....	10
Figura 6. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) puestos en suspensión durante el llenado de la cántara en el área de dragado de Los Olivillos en un periodo de marea viva llenante. ....	11
Figura 7. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) puestos en suspensión durante el llenado de la cántara en el área de dragado de Los Olivillos en un periodo de marea viva vaciante.....	12

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría en el área de dragado de Los Olivillos.....	5
--	---



## 1. ANTECEDENTES.

En febrero de 2023 se firma con TECNOAMBIENTE, S.L. el contrato para la realización del "Estudio ambiental de la dispersión del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado en el área de dragado ubicado en la zona de Los Olivillos de la ría del Guadalquivir", cuyo objetivo es el análisis de la posible afección generada por el material puesto en suspensión durante las operaciones de dragado para mantener la navegación. Cabe señalar que este estudio, dado la circulación hidrodinámica en dicha zona y el tipo de sedimento a dragar, permitirá ser indicativo de la posible afección sobre el medio de las pérdidas durante los procesos de dragado en otras áreas de la ría.

Los trabajos en los que se divide esta adenda y se recogen en este informe han sido realizados por los siguientes miembros de IHCantabria:

- Tamara Rodríguez Castillo, Doctora por la Universidad de Cantabria, Licenciada en Ciencias Ambientales. Tecnóloga del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- Javier García Alba, Doctor por la Universidad de Cantabria, Licenciado en Ciencias Físicas. Tecnólogo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Santander, febrero de 2023

Fdo.: Javier García Alba

*Tecnólogo del Instituto de  
Hidráulica Ambiental de la  
Universidad de Cantabria*

## **2. OBJETIVOS.**

El objetivo general de este trabajo es analizar el efecto ambiental generado por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado en el área de dragado situado en la zona de Los Olivillos. Para alcanzar el objetivo general planteado se analizará la turbidez originada por el material puesto en suspensión durante el llenado de una cántara en el proceso de dragado realizado en el área de dragado ubicado en la zona de Los Olivillos en función de la concentración de sólidos en suspensión a través de modelización 3D.

### **3. CONTENIDO DEL INFORME.**

El presente informe "Estudio ambiental de la dispersión del material" se encuentra dividido en los capítulos que se listan a continuación:

Capítulo 4: Datos de partida, en el que se detalla la información necesaria para la realización del presente estudio.

Capítulo 5: Modelos de cálculo, en el que se describen los modelos numéricos utilizados en los estudios de dispersión del material puesto en suspensión durante los procesos de dragado.

Capítulo 6: Estudio de dispersión del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado, en el que se detallan la metodología seguida para la implementación del modelado numérico, así como los principales resultados obtenidos.

Capítulo 7: Resumen y conclusiones del presente documento.

## 4. DATOS DE PARTIDA.

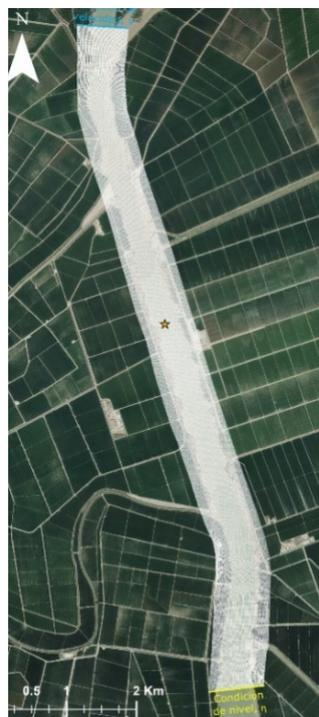
### 4.1. Introducción.

En este apartado se recoge la información utilizada en los estudios de dispersión del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado, relacionada con los siguientes aspectos:

- Información hidrodinámica de detalle.
- Ubicación del área de dragado objeto de estudio y sus características.
- Volumen y características del material de dragado vertido en las fosas.

### 4.2. Información hidrodinámica de detalle.

La información hidrodinámica de detalle de la zona de estudio se ha obtenido de los estudios recogidos en el entregable 2.1 del estudio "Desarrollo de un sistema experto de erosión en las márgenes de la Eurovía del Guadalquivir, IHCantabria 2022". La hidrodinámica cubre el año 2021 completo, seleccionado como año promedio hidrodinámico de acuerdo con sus forzamientos ambientales (caudal del río y marea), y provee de información de circulación estuarina en la zona navegable de la ría del Guadalquivir. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se muestra la malla numérica de detalle y condiciones de contorno con las que se llevó a cabo la simulación hidrodinámica en la zona de la Corta de los Jerónimos.



**Malla numérica curvilínea:**  
Resolución celdas:  $\Delta x = 5$ ,  $\Delta y = 10$   
Celdas en dirección M = 162  
Celdas en dirección N = 1002

Figura 1. Malla numérica de detalle (en blanco), condiciones de contorno (aguas arriba en azul: velocidades, aguas abajo en amarillo: niveles) y punto de validación (estrella) utilizados en las simulaciones para la Corta de los Jerónimos.

### 4.3. Ubicación del área de dragado objeto de estudio y sus características.

La ubicación del área de dragado objeto de estudio se muestra en rojo en la Figura 2. Ésta se sitúa en la zona de Los Olivillos y muy próxima a la Corta de los Jerónimos, entre el PK17+500 y el PK19+000. Por ello, en el estudio se tienen en cuenta ambas zonas en el modelado, tal y como se muestra mediante una línea azul en la Figura 2.



Figura 2. Localización del polígono de dragado en Los Olivillos y delimitación del tramo modelado.

La granulometría en el área de dragado de Los Olivillos, proporcionada por Tecnoambiente, se recoge en la Tabla 1.

TRAMO	FINOS ( $\varnothing < 0,063$ mm)	AMF (0,12 mm > $\varnothing > 0,063$ mm)	AF (0,25 mm > $\varnothing > 0,12$ mm)	AM (0,5 mm > $\varnothing > 0,25$ mm)	AG (1,0 mm > $\varnothing > 0,50$ mm)	AMG (2,0 mm > $\varnothing > 1,0$ mm)	GRAVAS ( $\varnothing > 2,0$ mm)
	%	%	%	%	%	%	%
OLIVILLOS	6,4	1,25	55,85	33,2	2,45	0	0

Tabla 1. Granulometría en el área de dragado de Los Olivillos.

## 5. MODELO DE CÁLCULO.

### 5.1. Introducción.

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

- Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.
- Sistema IH-Dredge.

### 5.2. 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:

$$\frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(\ell)})c^{(\ell)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (5.1)$$

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

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:

$$\rho_{mix}(S, c^{(\ell)}) = \rho_w(S) + \sum_{\ell=1}^{l_{sed}} c^{(\ell)} \left( 1 - \frac{\rho_{mix}(S)}{\rho_s^{(\ell)}} \right) \quad (5.2)$$

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

### 5.3. Sistema IH-Dredge.

El sistema IH-Dredge es un modelo matemático desarrollado por IHCantabria (García-Alba et al., 2013; García-Alba et al., 2014; Gómez et al., 2014, IHCantabria, 2013) que posibilita el modelado de procesos de dragado en tiempo real para diferentes tipos de

dragado como son el dragado con cuchara, succión o succión de corte. En la Figura 3 se muestra un esquema del funcionamiento del modelo.

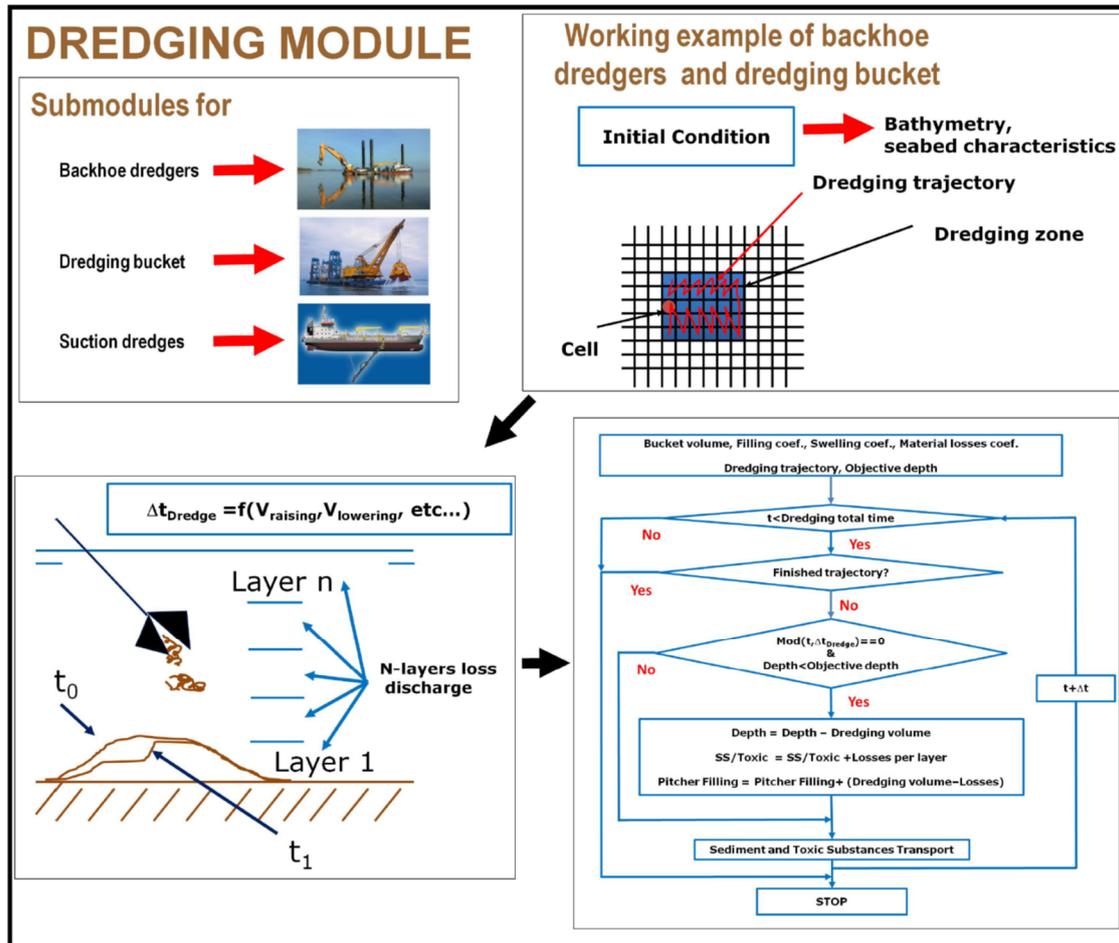


Figura 3. Esquema de funcionamiento del modelo IH-Dredge. Fuente: García-alba et al., 2014.

## **6. ESTUDIO DE DISPERSIÓN DEL MATERIAL PUESTO EN SUSPENSIÓN DURANTE EL PROCESO DE DRAGADO**

### **6.1. Introducción.**

Los efectos de los procesos de dragado han sido ampliamente estudiados a través de experimentos de laboratorio (Vlasbom, 2005). Sin embargo, el desarrollo de modelos matemáticos permite predecir estos efectos en cualquier situación sin la necesidad de tener que recurrir a costosos ensayos físicos.

Actualmente, los modelos de transporte de sedimentos son capaces de reproducir la variación del fondo marino por efecto de las operaciones de dragado, analizando la evolución de sólidos en suspensión en la columna de agua (Song and Haidvogel, 1994; Jacobsen and Rasmussen, 1997; WL/Delft Hydraulics, 2006; Bai et al., 2003). No obstante, debe tenerse en cuenta que el estudio de los patrones sedimentarios y la evolución de obras de dragado constituye un problema complejo, debido a que las variables que intervienen en su definición dependen de las características hidrodinámicas del medio. Entre éstas cabe señalar la concentración y naturaleza de los sólidos, en especial su densidad y tamaño.

El transporte de los sólidos se realiza por fondo (rodando, saltando o deslizándose) o por movimiento en suspensión. El primero tiene un papel predominante en flujos lentos y/o con gran tamaño del sedimento, mientras que el segundo es dominante cuando existen flujos con altas velocidades y/o tamaños de grano suficientemente pequeños.

Por otro lado, metodologías como el sistema IH-Dredge, desarrollado por IHCantabria (García et al 2013; García et al 2014; IHCantabria, 2013), une el uso del módulo morfodinámico del modelo Delft3D (Roelvink and Van Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics 2006), que permite simular la evolución de los sedimentos en la columna de agua, con un conjunto de scripts que permiten simular en tiempo real diferentes técnicas de dragado, tanto mecánicas como hidráulicas, pudiendo con ello computar e introducir las pérdidas de material durante proceso de dragado que son introducidas en la columna de agua.

Cualquier obra realizada sobre el medio acuático, como es el caso de este estudio con el proceso de dragado en la zona de Los Olivillos, tiene una influencia local sobre las condiciones de turbidez (en términos de la concentración de sólidos en suspensión). Como se ha comentado anteriormente, dado la circulación hidrodinámica en dicha zona y el tipo de sedimento que se draga, el análisis de la dispersión del material puesto en suspensión durante el dragado en esta zona permitirá ser indicativo de la posible afección sobre el medio por las pérdidas generadas durante los procesos de dragado en otras áreas de la ría.

A continuación, se describen la metodología y modelo numérico empleados, así como los resultados obtenidos en el análisis de la dispersión del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado en el área de dragado de Los Olivillos a través de modelización 3D.

### **6.2. Metodología.**

En este estudio se ha analizado la turbidez adicional generada en la columna de agua debido al material sólido puesto en suspensión durante el proceso de dragado mediante succión en el área de dragado situada en Los Olivillos a través de modelización 3D.

De acuerdo con la información proporcionada por Tecnoambiente, el proceso de dragado mediante succión en el área situada en Los Olivillos genera unas pérdidas (material puesto en suspensión en las cercanías del lecho marino) de 5kg de material sólido por metro cúbico dragado.

El análisis de la dispersión del material puesto en suspensión se ha analizado en el periodo de llenado de una cántara con un volumen de 1500 m<sup>3</sup>, proceso que se realiza en 75 minutos. La cántara se sitúa en el punto central del área de dragado de la zona Los Olivillos. Debe ser mencionado que, durante el proceso de llenado, no se generan pérdidas adicionales por rebose y que, del lado de la seguridad, todo el material puesto en suspensión está formado por finos de 63 micras de diámetro.

Por otra parte, tal y como se ha comentado anteriormente, el análisis de la turbidez generada por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado, se ha analizado a través de la modelización 3D con el uso combinado del sistema IH-Dredge y el modelo morfodinámico del modelo Delft3D. Asimismo, cabe señalar que la turbidez adicional introducida en la columna de agua debido al proceso de dragado se ha contabilizado en forma de concentración de sólidos en suspensión (mg/l). El modelado del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado se ha llevado a cabo desde un punto de vista tridimensional con 10 capas sigma (equiespaciadas en función de la profundidad de cada celda) utilizadas para la discretización vertical. Con el fin de representar de la manera más fidedigna posible el material puesto en suspensión durante el dragado, éste se ha introducido como un vertido en la capa de fondo, simulando las pérdidas de material en el proceso de succión en las cercanías del lecho estuarino.

El proceso de llenado de la cántara se ha estudiado en dos periodos diferentes coincidentes con marea viva llenante y marea viva vaciante, con el fin de poder tener un resultado que evidenciase, desde el lado de la seguridad, la mayor extensión que pudiera generar las pérdidas durante el dragado.

Los resultados del modelado han sido procesados con el fin de obtener la distribución espacial de la concentración media de sólidos en suspensión en la columna de agua generada por el material puesto en suspensión durante el dragado y llenado de la cántara en Los Olivillos, así como la evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en 12 secciones (6 aguas arriba, desde la suelta de material en el centro del área de dragado en el caso de marea viva llenante, y 6 aguas abajo, desde la suelta de material en el caso de marea viva vaciante).

### **6.3. Resultados.**

La concentración promedio introducida en la ría del Guadalquivir por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado en el área de dragado de la zona Los Olivillos hasta el llenado de una cántara en un periodo coincidente de marea viva llenante y marea viva vaciante se muestran en la Figura 4 y la Figura 5, respectivamente. En dichas figuras se observa que la pluma generada durante el proceso de dragado afecta a una extensión del área de estudio de 1,5 Km en llenante y 1,35 Km en vaciante, alcanzándose los valores más elevados en la localización de la propia cántara ( $\approx 10$  mg/l), ya que el material sedimenta rápidamente.

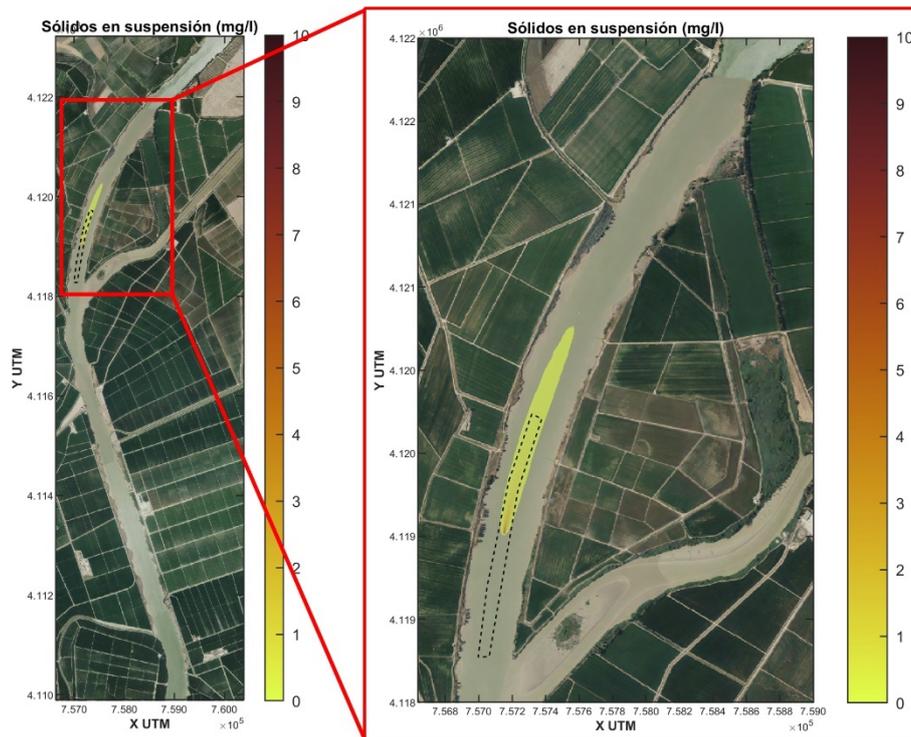


Figura 4. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado hasta llenar la cántara en el área de dragado de la zona Los Olivillos en un periodo de marea viva llenante.

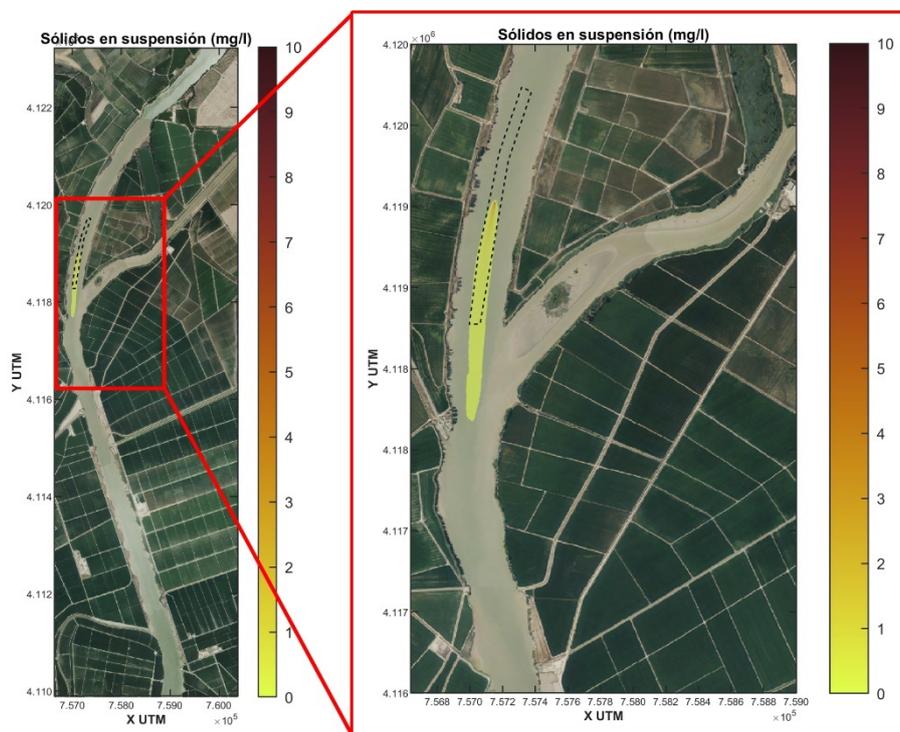


Figura 5. Concentración promedio de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) generada por el material puesto en suspensión durante el proceso de dragado hasta llenar la cántara en el área de dragado de la zona Los Olivillos en un periodo de marea viva vaciante.

Por otro lado, la evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en secciones aguas arriba de la cántara en un periodo de marea viva llenante y aguas abajo en un periodo de marea viva vaciante se muestra en la Figura 6 y la Figura 7, respectivamente. Como puede apreciarse en ambas figuras, la concentración de sólidos en suspensión debida a las pérdidas durante el llenado de la cántara alcanza los valores más elevados, de en torno a 10 mg/l, en las proximidades de la propia cántara, reduciéndose rápidamente hacia aguas abajo. A las 2 horas del inicio de la puesta en suspensión del material debido al proceso de dragado, los valores adicionales de concentración son menores de 1 mg/l. Cabe mencionar que tanto dicho valor como los valores máximos pueden considerarse despreciables respecto de típicas concentraciones de sedimentos en suspensión en dicho tramo de la ría del Guadalquivir ( $\approx 200$  mg/l, de acuerdo con los datos recogidos en las figuras 26 y 28 del informe E1 "Diagnóstico inicial de los procesos de erosión/sedimentación y sus agentes causantes" recogido en el estudio "Desarrollo de un sistema experto de erosión en las márgenes de la Eurovía del Guadalquivir, IHCantabria 2022").

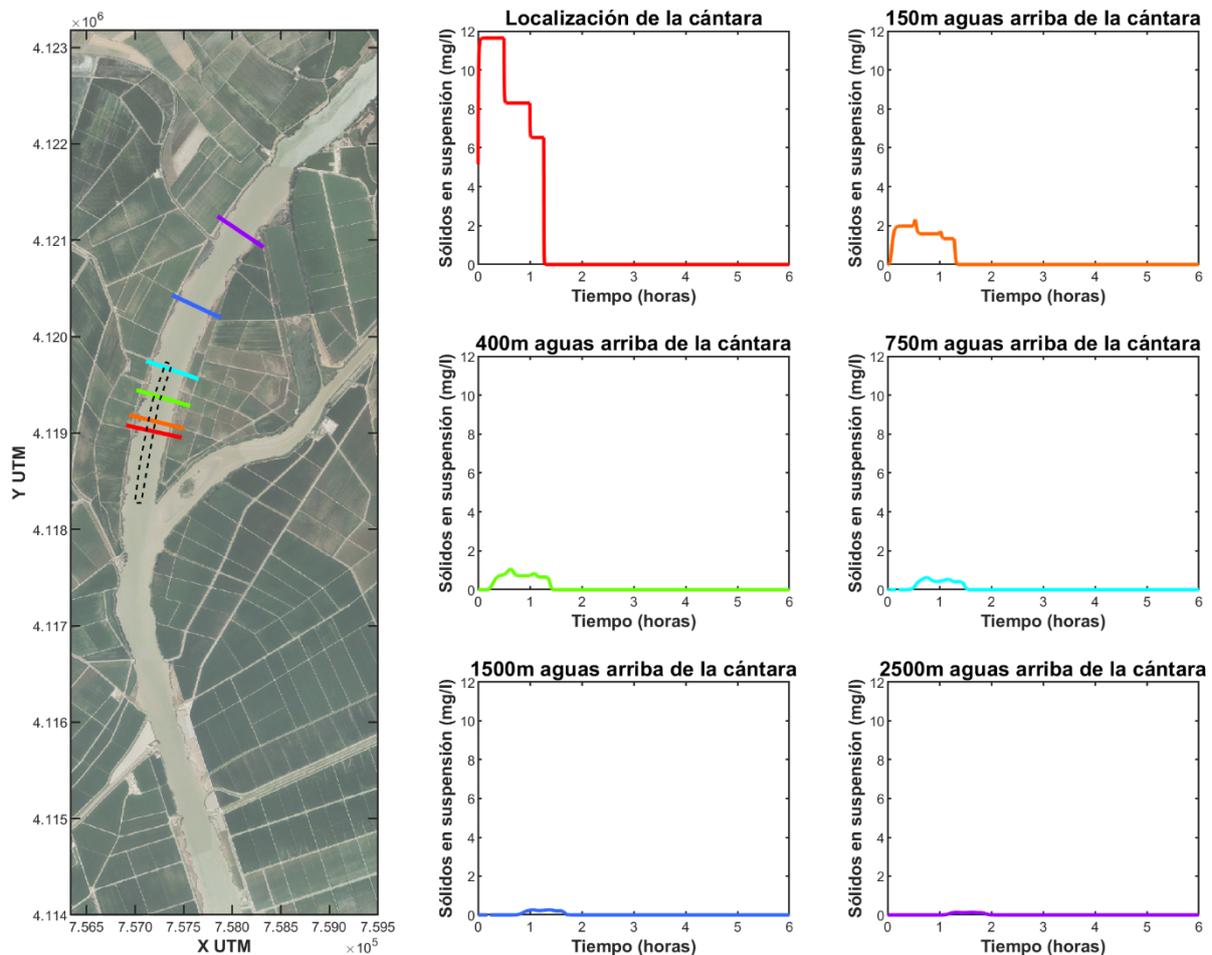


Figura 6. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) puestos en suspensión durante el llenado de la cántara en el área de dragado de Los Olivillos en un periodo de marea viva llenante.

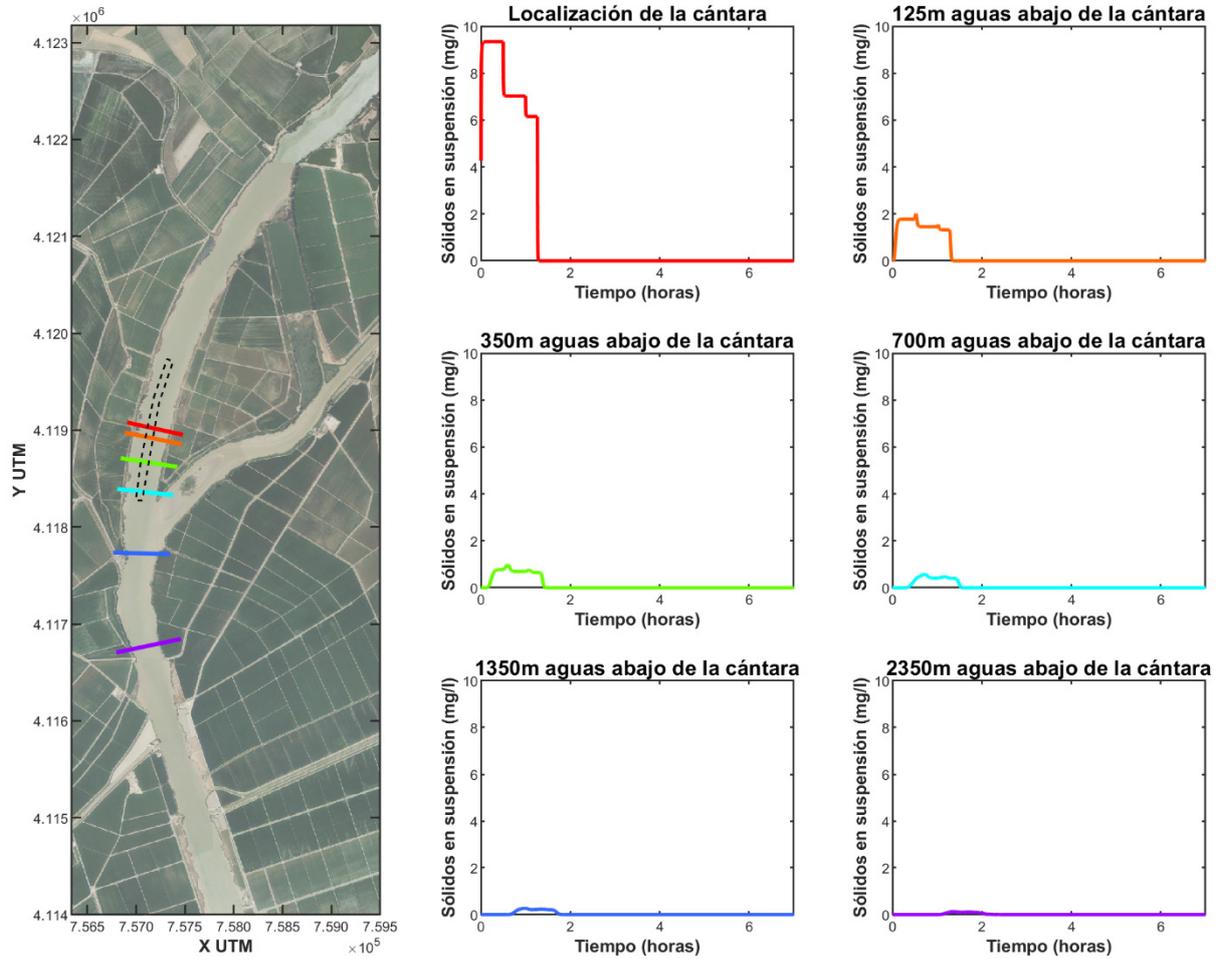


Figura 7. Evolución temporal de la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua (mg/l) puestos en suspensión durante el llenado de la cántara en el área de dragado de Los Olivillos en un periodo de marea viva vaciante.

## 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente documento se recogen los resultados obtenidos del cálculo de la dispersión en la columna de agua del material puesto en suspensión durante el proceso de dragado en el área de dragado situado en la zona de Los Olivillos a través de modelización 3D.

Este estudio contempla, en primer lugar, la recopilación y el análisis de la información disponible sobre hidrodinámica de detalle de la zona de estudio y la localización del área de dragado y sus características.

Con base en esta información, se ha analizado la dispersión en la columna de agua del material sólido puesto en suspensión durante el llenado de una cántara en el proceso de dragado de la ría del Guadalquivir. Los cálculos hidromorfológicos fueron realizados con el modelo Delft3D en su variante tridimensional (con una discretización de 10 capas sigma equiespaciadas en la dirección vertical), acoplándose con el sistema IH-Dredge para simular la descarga del material de dragado.

Del modelado numérico de la evolución de la dispersión en la columna de agua del material liberado por una cántara durante el proceso de dragado cabe destacar lo siguiente:

- El gradiente de concentración de sólidos en suspensión debido a las pérdidas de material durante el proceso de dragado afecta a una extensión de 1,5 Km durante una marea viva llenante y a 1,35 Km durante una marea viva vaciante, estando las concentraciones más elevadas ( $\approx 10$  mg/l) en torno a la cántara. No obstante, cabe señalar que este gradiente se reduce espacial y temporalmente muy rápido, alcanzándose a las 2 horas valores adicionales de concentración sobre el medio menores de 1 mg/l. Dichos valores son despreciables respecto de típicas concentraciones de sedimentos en suspensión en dichos tramos de la ría del Guadalquivir ( $\approx 200$  mg/l, de acuerdo con los datos recogidos en las figuras 26 y 28 del informe E1 "Diagnóstico inicial de los procesos de erosión/sedimentación y sus agentes causantes" recogido en el estudio "Desarrollo de un sistema experto de erosión en las márgenes de la Eurovía del Guadalquivir, IHCantabria 2022").

## REFERENCIAS.

- Bai, Y., Wang, Z., and Shen, H., 2003. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 175-186.
- García-Alba, J., Gómez A.G., Sámano, M.L., García A., Juanes, J.A, 2013. Desarrollo del modelo IH-Dredge. Aplicación a la estimación del riesgo ambiental en procesos de dragado. XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.
- García-Alba, J., Gómez, A.G., Tinoco López R.O., Sámano Celorio, M.L., García Gómez A., Juanes, J.A. 2014. A 3-D model to analyze environmental effects of dredging operations - Application to the Port of Marin, Spain. *Advances in Geosciences*, Volume 39, 95-99.
- Gómez, A.G., García-Alba, J., Puente, A., Juanes, J.A. 2014. Environmental risk assessment of dredging processes-application to Marin harbour (NW Spain). *Advances in Geosciences*, Volume 39, 101-106.
- IHCantabria, 2013. Proyecto INNODRAVAL. Fase 2: Desarrollo de Herramientas Predictivas para la Estimación de Efectos Ambientales. INNODRAVAL Project (IPT-310000-2010-17).
- Jacobsen, F. and Rasmussen, E. B., 1997. MIKE 3 MT: A 3-dimensional mud transport model, Technical rep. DG-12 to the commission of the european communities, Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Denmark.
- 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.
- Song, Y. T. and Haidvogel, D., 1994. A semi-implicit primitive equation ocean circulation model using a generalized topography following coordinate system, *J. Comput. Phys.*, 115, 228-244.
- Vlasbom, W., 2005. Design of Dredging Equipment, Delft University of Technology.
- WL/Delft Hydraulics, 2006. Delft3D user manual.