

**MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA:
Modelo numérico para evaluación del
impacto ambiental de la apertura de
la zanja producida por el
jetting/ploughing en el ámbito
marino español de la interconexión
eléctrica España-Francia por el golfo
de Bizkaia**

elittoral

**"MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA: Modelo numérico para
evaluación del impacto ambiental de la apertura de la zanja
producida por el *jetting/ploughing* en el ámbito marino español de
la interconexión eléctrica España-Francia por el golfo de Bizkaia"**

AUTORES

José Valdazo Hernández

Noelia Arto Cuesta

ENERO DE 2019

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	5
1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.....	6
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	7
3. FUNDAMENTOS DEL MODELO	8
a. Modelo numérico empleado	8
b. Ecuaciones fundamentales	8
c. Suposiciones básicas.....	10
d. Hidrodinámicas marinas: Forzamientos	12
i. Velocidad de las corrientes de marea en la zona de estudio.	12
ii. Velocidad de corrientes de viento en la zona de estudio.....	13
e. Datos de entrada	14
i. Parámetros de arranque básicos hidrodinámicos: Se describen en la Tabla 1.....	14
ii. Batimetría: generación de la mall a de cálculo	15
iii. Parámetros Hidrodinámicos del Medio Receptor.....	16
iv. Parámetros asociados al <i>jetting/ploughing</i>	17
f. Escenario de simulación	19
4. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO.....	20
5. CONCLUSIONES.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Archivo de marea empleado en el modelo hidrodinámico. Fuente: http://www.puertos.es/	13
Figura 2. Batimetría del modelo.....	15
Figura 3. Localización sobre batimetría del modelo de los tramos donde se ejecutará la descarga que produce el jetting.	18
Figura 4. Estado hidrodinámico transcurridas 13 horas y 5 minutos de simulación.	20
Figura 5. Estado hidrodinámico transcurridas 24 horas de simulación.....	21
Figura 6. Estado hidrodinámico transcurridas 34 horas de simulación.....	22
Figura 7. Localización sobre el registro de nivel del mar de distintos estados hidrodinámicos.....	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros básicos y contornos del modelo hidrodinámico.	14
Tabla 2. Parámetros del modelo hidrodinámico, condiciones del medio receptor. ..	16
Tabla 3. Resultados de las simulaciones realizadas.	24
Tabla 4. Resultados numéricos para la concentración de sedimentos en la capa de fondo.	27
Tabla 5. Resultados numéricos para la concentración de sedimentos en la capa superficial.....	28

1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

El presente estudio de *"MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA: Modelo numérico para evaluación del impacto ambiental de la apertura de la zanja producida por el jetting/ploughing, en el ámbito marino español, de la interconexión eléctrica España-Francia por el golfo de Bizkaia"* se enmarca, a su vez, como uno de los estudios que contemplan el "Estudio de Impacto Ambiental de la Interconexión Occidental España-Francia por el Golfo de Vizcaya-Gascogne".

Con el objeto de abordar los diferentes impactos asociados a las actividades que comprende la interconexión eléctrica, se incluye este Anexo al Estudio de Impacto Ambiental. Este, se centra en el ámbito marino y abarca el posible impacto debido al *jetting/ploughing* en aquellas zonas donde el sedimento está presente con al menos un metro de espesor. A partir del modelaje numérico se pretende caracterizar la posible pluma de turbidez provocada por el sedimento que se pone en suspensión por el empleo del *jetting/ploughing*, así como la posibilidad de que dicha pluma alcance la costa. Dicho servicio es solicitado por **Biosfera XXI. Estudios Ambientales S.L.** quien contrata los servicios a **elittoral S.L.N.E** para la elaboración de la presente asistencia técnica.

A continuación, en el presente Anexo se muestran los fundamentos del modelo numérico, los datos de entrada empleados y los resultados del modelo hidrodinámico y de advección-dispersión, que tiene por objeto evaluar la pluma sedimentaria generada por la apertura de la zanja en los fondos sedimentarios por empleo del *jetting/ploughing*.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el campo de los estudios hidrodinámicos la modelización matemática ha adquirido cada vez más importancia. En la hidrodinámica ambiental las decisiones se toman en base a modelos hidrodinámicos, modelos matemáticos mecanicistas.

Los modelos son utilizados para cuantificar los impactos ambientales producidos por proyectos o para evaluar la pertenencia de una actuación en particular, etc., convirtiéndolos en una herramienta fundamental en la toma de decisiones.

El modelo utilizado en el presente estudio es el MIKE, el cual ha sido desarrollado por la empresa danesa DHI. Este software es modular, empleando para el presente estudio la versión de mares y costas tridimensional del mismo, denominado MIKE 3D. Del MIKE 3D, se ha hecho uso de tres módulos del mismo: el módulo de Pre-Post proceso (PP), el módulo Hidrodinámico (HD) y el módulo de Advección-Dispersión (AD). El programa incluye la posibilidad de simular vertidos mediante chorros sumergidos individuales o múltiples, considerando las condiciones ambientales del medio receptor pudiendo ver el desarrollo, en campo lejano, de la pluma. El software MIKE es reconocido mundialmente como uno de los mejores. Presenta una interfaz gráfica amigable en el pre y post procesamiento de los modelos hidrodinámicos, versatilidad para el procesamiento de la información, facilidad para la visualización de los resultados, y capacidad gráfica para analizar la estructura de los modelos implementados.

El objetivo de la construcción del modelo es el de ayudar a caracterizar y predecir el comportamiento de la posible pluma sedimentaria provocada por el *jetting/ploughing*, es decir, evaluar la calidad de las aguas litorales en el campo lejano, y predecir si la pluma es susceptible de alcanzar la costa.

3. FUNDAMENTOS DEL MODELO

El módulo hidrodinámico del MIKE 3D, se basa en la solución numérica de las ecuaciones promedio de Navier-Stokes, también conocidas como RANS, para flujo incompresible que utiliza las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática para resolver las ecuaciones de continuidad, momentum, temperatura, salinidad y densidad, completadas con un esquema de clausura de turbulencia.

De las 2 versiones con que cuenta el MIKE 3D se ha hecho uso del MIKE 3 Flow Model, el cual utiliza una malla de coordenadas cartesianas para la discretización horizontal del dominio, y una malla uniforme para la discretización vertical. Esta versión presenta una ventaja, y es que permite utilizar el módulo no-hidrostático. El método numérico son las diferencias finitas y existen diversos esquemas de solución para resolver las ecuaciones gobernantes

a. Modelo numérico empleado

El software que soporta al modelo numérico MIKE cuenta con diversos módulos, el modelo numérico HD de elementos finitos, entrega soluciones promediadas en z. A través del modelo se pueden computar la elevación superficial y los componentes horizontales de la velocidad en campos de flujo bi-dimensionales. La solución computa las ecuaciones de Navier-Stokes en la formulación de Reynolds para flujos turbulentos.

El modelo se ha usado en estudios por todo el mundo para evaluar las condiciones hidrográficas para diseño, construcción y operación de estructuras en masas de agua, estudios de circulación oceánica costera y de dinámica de sedimentos, y proyectos de restauración marina y costera. Su elección no es al azar, se escogió sobre la base de su versatilidad para el estudio de flujos en zonas costeras y la capacidad de acoplamiento a modelos de difusión, así como por la generación de resultados promediados en z del área estudiada.

b. Ecuaciones fundamentales

El tratamiento de las ecuaciones fundamentales se presenta siguiendo la exposición realizada por Tsanis *et al.*, 2006. El sistema de ecuaciones fundamentales que son incorporadas en el modelo de simulación hidrodinámica es básicamente el

siguiente: i) las ecuaciones de conservación de masa y de momentum, ii) la ecuación de conservación para la variable escalar y iii) la ecuación de estado. Las ecuaciones gobernantes escritas para las variables medias del flujo turbulento se presentan a continuación:

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

Ecuaciones de momentum en dirección x-, y- & z-:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \left[\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \left[\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

Ecuación de transporte de temperatura:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial Tu}{\partial x} + \frac{\partial Tv}{\partial y} + \frac{\partial Tw}{\partial z} = - \left[\frac{\partial \overline{u'T'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'T'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'T'}}{\partial z} \right]$$

Ecuación de conservación para una variable escalar Cj:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + \frac{\partial C_j u}{\partial x} + \frac{\partial C_j v}{\partial y} + \frac{\partial C_j w}{\partial z} = - \left[\frac{\partial \overline{u'C'_j}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'C'_j}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'C'_j}}{\partial z} \right], \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

Ecuación de estado:

$$\rho = \rho(s, T)$$

donde

t: Tiempo

x, y, z : Coordenadas cartesianas.

u, v, w : Componentes de velocidad en las direcciones x ; y ; z respectivamente.

ρ : Densidad del agua.

g : Aceleración de la gravedad.

p : Presión.

s : Salinidad.

T : Temperatura.

C_j : Variable escalar conservativa, tal como s o T .

u', v', w', C_j' : Fluctuaciones turbulentas de u, v, w, C_j .

$f = 2\omega \sin(\phi)$: coeficiente de Coriolis.

ϕ : Latitud geográfica del dominio.

ω : Frecuencia de rotación de la Tierra.

$u'u', v'v', w'w'$: Esfuerzos normales turbulentos de Reynolds.

$u'v', u'w', v'w'$: Esfuerzos de corte turbulentos de Reynolds.

c. Suposiciones básicas

Incompresibilidad

Un fluido es incompresible si su densidad no cambia con la presión (Kundu *et al.*, 2012). En general, para los cuerpos de agua se asume que el agua es un fluido incompresible (Tsanis *et al.*, 2006), por lo cual, el término $\rho^{-1} D\rho / Dt$ es muy pequeño comparado con los gradientes de velocidad, y, en consecuencia, la ecuación de conservación de masa toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Aproximación hidrostática

El flujo en el cuerpo de agua de una dársena se caracteriza por ser dominado por las aceleraciones horizontales, permitiendo reducir la ecuación de transporte de momentum en la dirección vertical a la condición de presiones hidrostáticas:

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g$$

Aproximación de Boussinesq

En los flujos esperados, las variaciones de densidad son del orden de 10^{-3}Kg/m^3 , lo que tiene un efecto despreciable sobre los términos barotrópicos, por lo que ρ_s puede ser sustituida por una densidad de referencia constante ρ_0 . Sin embargo, los efectos de flotación provocados por las diferencias de densidad del fluido en la superficie horizontal no pueden ser despreciados. En consecuencia, la variación de la densidad solo tiene efectos sobre los términos baroclínicos, lo que se conoce como la Aproximación de Boussinesq. Al reescribir las ecuaciones, utilizando la aproximación hidrostática y la de Boussinesq se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

Momentum en x-:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \left[\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial z} \right]$$

Momentum en y-:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \left[\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial z} \right]$$

Momentum en z-:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = - \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right]$$

d. Hidrodinámicas marinas: Forzamientos

Las características temporales de los parámetros que conforman los forzamientos marinos son, desde el punto de vista estadístico, una gran fuente de información para la concreta realización de las fases previas a la ejecución de una obra o actuación sobre la misma.

El primer paso sería obtener una serie temporal de diferentes parámetros del estado de mar para, posteriormente, llevar a cabo el análisis estadístico que dará como resultado el régimen medio en el entorno del punto objetivo, dicho estudio está presente en el *Estudio de Impacto Ambiental de la Interconexión Occidental España-Francia por el Golfo de Vizcaya-Gascogne, el Anexo. Estudio de Clima Marítimo y Dinámica Litoral*.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto, los forzamientos o dinámicas marinas a tener en cuenta van a ser dos, la marea y el viento. Ambos parámetros darán lugar a una velocidad de corriente, dato que se utiliza para verificar o calibrar, la selección de estos es debido a que la dispersión de las plumas de las aguas se determina en función de las corrientes que son capaces de generar las mareas, y de la intensidad y dirección de los vientos reinantes, en caso de que la pluma sea capaz de alcanzar las capas más superficiales de la columna de agua.

A continuación, se detallan los datos de partida tomados, así como la selección de sus rangos.

- i. Velocidad de las **corrientes de marea** en la zona de estudio.

A partir de los datos del Mareógrafo Bilbao 3, el más cercano al área de estudio, se extrajo un periodo de 4 días del registro de 2018, tiempo máximo que se estimó que podrían permanecer las plumas de turbidez simuladas antes de decantarse todo el sedimento en suspensión. El registro se corresponde con rangos de carrera media, atendiendo así a un escenario en régimen medio por considerarse operativo en cuanto a las embarcaciones y maquinaria que pudieran estar operando. A partir del registro, se crea el archivo que contiene la onda de marea que será empleado como el forzamiento principal del modelo.

La Figura 1 muestra la onda de marea empleada.

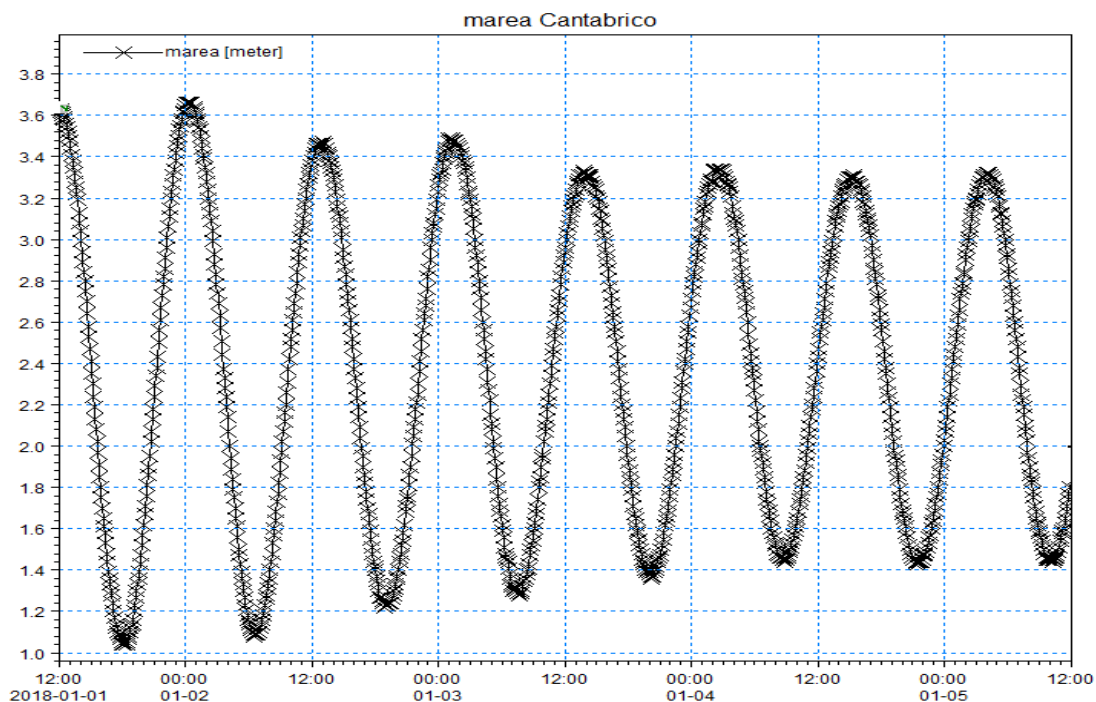


Figura 1. Archivo de marea empleado en el modelo hidrodinámico. Fuente:

<http://www.puertos.es/>.

Las corrientes vectoriales y los niveles de marea en el área del modelo numérico se obtienen forzando los bordes libres del contorno del modelo. Esto se hace con la elevación de una onda de marea en el emplazamiento de tipo medio y durante un tiempo suficiente para obtener un ciclo completo de marea libre del transitorio de carga del modelo.

Los puntos donde se simulan las plumas debidas al *jetting/ploughing* comparten dos características; se trata de zonas de sustrato blando donde el espesor de estos alcanza un metro de espesor, y la hidrodinámica dominante son las carreras de marea, ya que se encuentran fuera de la profundidad de cierre.

ii. Velocidad de **corrientes de viento** en la zona de estudio

Atendiendo a la intensidad de viento representativa de la zona de estudio, se encontraron vientos moderados de $2-8 \text{ m/s}^{-1}$, siendo los más frecuentes de 4 m/s^{-1} . Como dirección predominante, se puede observar el oeste-noroeste (WNW). Estos datos son en base a los registros recogidos en el Anexo Clima Marítimo y Dinámica

Litoral basados en las estadísticas de tres nodos SIMAR del ente público Puertos del Estado, cuyos nodos se encuentran localizados en el ámbito de estudio.

Como forzamiento secundario, y que sólo es susceptible de afectar a las capas más superficiales de la columna de agua, se introduce en el modelo un viento constante en el espacio y en el tiempo, que atiende a los vientos más frecuentes, régimen reinante, siendo estos de intensidad 4ms^{-1} y de dirección 290° , un oeste-noroeste.

e. Datos de entrada

Para ejecutar el modelo de un vertido producido por un *jetting/ploughing*, debe construirse previamente el modelo hidrodinámico. El modelo hidrodinámico debe tener en cuenta dos *forzamientos*, llamados también *agentes dispersivos*, estos son los ya descritos, viento y marea. Pero, además, se debe tener en cuenta de igual forma, la morfología (en este caso batimetría) de la zona de estudio.

Las condiciones del modelo numérico son los siguientes:

- i. Parámetros de arranque básicos hidrodinámicos: Se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros básicos y contornos del modelo hidrodinámico.

ENTORNO PARÁMETRO	JETTING de la interconexión eléctrica España-Francia por el golfo de Bizkaia
MODULE SELECTION	
Hydrodynamic engine	Non-hydrostatic
Environmental modules	HD, AD
Transport scheme	Quickest-Sharp
BATHYMETRY	
Select bathymetry	Cold start Apply Coriolis forcing
Vertical resolution: number of vertical layers	14
Vertical resolution: Vertical grid spacing	10
Map projection	ETRS_1989-UTM_Zone-30N

SIMULATION PERIOD	
Time step range	0→30600
Time step interval	10 sg
Max Courant number	8.3
FLOOD AND DRY	
Drying depth	0.2 m
Flooding depth	-
TURBULENCE MODEL	
Model	Mixed k-e/ Smagorinsky formulation

ii. Batimetría: generación de la **mall**a de cálculo

En el presente estudio se hace uso de la batimetría digital, en formato XYZ, realizada en el marco del presente Estudio de Impacto Ambiental, si bien esta batimetría para ser integrada en el modelo primero ha tenido que ser regenerada. Esta regeneración se basa en la necesidad de cubrir el 100% del dominio sobre el cual se ejecuta la simulación.

La mall

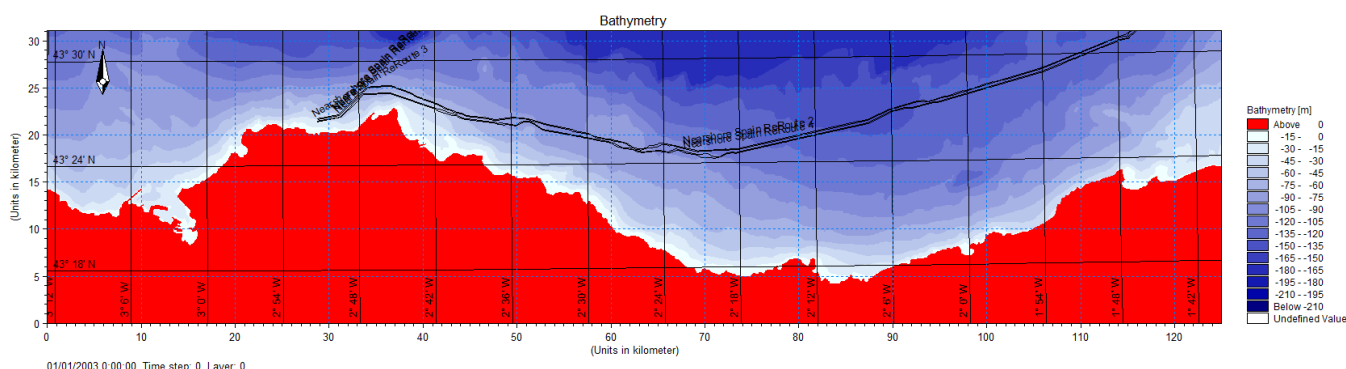
a de cálculo presenta un tamaño de celda de 50x50 metros en una distribución rectangular, resultando una malla de amplia cobertura y óptima resolución, lo que lleva asociado un alto coste computacional. La batimetría regenerada y en formato (dfs2) asimilable por el modelo, es el que aparece en la Figura 2.


Figura 2. Batimetría del modelo.

El contorno que supone la batimetría y que conforma el modelo se extiende 125 kilómetros, abarcando toda la costa vasca que soportará el enterramiento del cable de interconexión, y con una anchura de 31 kilómetros de costa a profundidades

indefinidas, donde el tramo más ancho de contenido es de 27 kilómetros. A su vez, este espacio, queda comprendido en la malla de cálculo de 2500 x 622 celdas, que se repiten en 14 capas cada 10 metros de profundidad. En dichas capas variará que algunas celdas en capas superiores se tratan de celdas de agua, y en capas inferiores pasarán a ser parte del fondo sólido. *A priori*, se puede interpretar que se trata de una batimetría con isobatas irregulares en muchos tramos, lo que denota un sustrato duro, pero también se presentan más suavizadas y paralelas a la costa en aquellas áreas presumiblemente sedimentarias.

iii. Parámetros Hidrodinámicos del Medio Receptor

La Tabla 2 contiene la descripción de los parámetros del modelo hidrodinámico según las condiciones del medio receptor.

Tabla 2. Parámetros del modelo hidrodinámico, condiciones del medio receptor.

ENTORNO PARÁMETRO	JETTING de la interconexión eléctrica España-Francia por el golfo de Bizkaia
SURFACE ELEVATION	
Value:	3.60 m
BOUNDARY: SURFACE ELEVATION	
Tilting	No
VAB Type	1-2
TKE: Constant value	1.00e-7
TKD: Constant value	5.00e-10
RESISTANCE	
Include bed friction	✓
Constant value	0.05
TURBULENCE	
Empirical constants: C my	0.09
Empirical constants: C1	1.44
Empirical constants: C2	1.92
Empirical constants: C3	0
Diffusion parameters: Sigma k	1
Diffusion parameters: Sigma e	1.3
Lower limits: k	1e-7

ENTORNO PARÁMETRO	JETTING de la interconexión eléctrica España-Francia por el golfo de Bizkaia
Lower limits: e	5e-10
Smagorinsky coefficient	0.4
SALINITY	
Background salinity value	37 psu
TEMPERATURE	
Background temperature value	20 °C
WIND CONDITIONS	
Wind type	Constant in time and space
Speed	4 m/s
Dirección	290°
Friction type	constant
Constant	0.0026

iv. Parámetros asociados al *jetting/ploughing*

Además de los parámetros recogidos en la tabla anterior, los cuales continúan siendo parámetros de diseño hidrodinámico, se han introducido archivos relativos al *jetting/ploughing* y al sedimento. Estos parámetros son parte hidrodinámicos, pero sobre todo condicionan la advección y dispersión de la pluma turbidítica.

El *jetting/ploughing* como método de soterramiento se realiza posteriormente al tendido. Los cables serán enterrados a una profundidad mínima de 1 metro a lo largo de todo su recorrido en sustratos blandos. En la realización de esta tarea se emplea una embarcación desde la que se maneja un vehículo submarino que desciende hasta colocarse sobre el cable, el vehículo va provisto de un mecanismo de chorros de agua a alta presión que licúa el terreno alrededor del cable y bajo el mismo. Esta acción permite que el cable se hunda a través de los sedimentos en suspensión hacia el fondo de la zanja a medida que el mecanismo avanza. Gran parte de los sedimentos en suspensión se asentarán en el fondo, compactándose de nuevo y rellenando por sí mismos la zanja en un breve espacio de tiempo, pero otra

parte del sedimento suspendido en la columna de agua dará lugar a un incremento de turbidez generando una pluma.

En este sentido, se han seleccionada 6 tramos de 1km de longitud (20 celdas del modelo en cada tramo), a lo largo de la proyección del tendido del cable, en cuyas localizaciones se sabe que el fondo es de tipo blando con al menos 1 metro de espesor sedimentario. Es decir, los tramos se han seleccionado en localizaciones donde se prevé se lleven a cabo operaciones con *jetting/ploughing*. En la Figura 3 aparecen rodeados los tramos de 1km, en rojo, sobre el tendido del cable donde se van a simular las remociones de sedimento debido al *jetting/ploughing*.

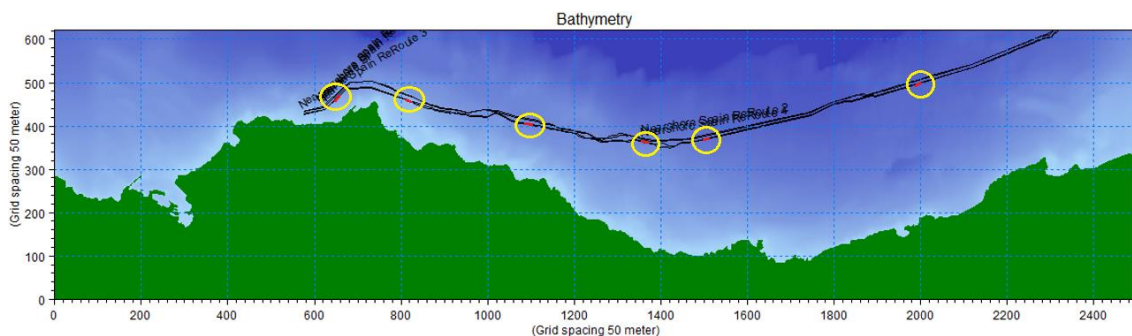


Figura 3. Localización sobre batimetría del modelo de los tramos donde se ejecutará la descarga que produce el *jetting*.

La duración de la descarga en cada tramo de un kilómetro es de 5 horas, se ha supuesto aproximadamente una duración de 15 minutos en cada celda, asumiendo como velocidad de avance 200 m/h. Se programa cada 15 minutos la descarga en cada celda, iniciando en la 1 terminando en la 20 de cada tramo.

La descarga es homogénea en cuanto a magnitud, velocidad y dirección vertical, siendo descargado un volumen de $0.0056\text{m}^3/\text{s}$ a una velocidad de 0.084 m/s y 170° respecto al 0 del modelo, el cual es estable respecto al fondo. Dichas magnitudes se basan en las medidas de la apertura de la zanja, siendo en el caso más desfavorable de $120\text{m}^3/\text{h}$. La dirección horizontal de la descarga se ha establecido asumiendo la dirección de avance del tendido de oeste a este, respecto al norte geográfico, variando las direcciones entre 220° - 280° .

De igual forma, el sedimento que será puesto en suspensión se ha supuesto homogéneo, sin embargo, para estar del lado de la seguridad se ha seleccionado este como arena fina, por ser uno de los más presentes (según el documento

MARINE SURVEY REPORT 102354-INE-MMT-SUR-REP-SURVEYRE), y por ser el más susceptible de ser transportado durante más tiempo, es decir, provocar una pluma turbidítica mayor y más persistente.

El sedimento, arenas finas, se introduce en el modelo como sustancia conservativa. Para ello, se toma como valor de densidad del mismo 1600kg/m^3 . En base a la densidad establecida, la velocidad de avance, el tamaño de la celda y paso de tiempo interno del modelo, se calcula que se ponen $2845\text{ mg/l/time step}$.

f. Escenario de simulación

La simulación a ejecutar responde hidrodinámicamente a unas condiciones medias, supuestas operativamente óptimas, y en cuanto a descargas y dispersión, responde a condiciones conservadoras, tomando las máximas descargas volumétricas en cuanto a tamaño de zanja y la máxima cantidad de sedimento y más dispersivo capaz de ponerse en suspensión debido al *jetting/ploughing*.

La simulación tiene una duración de 4 días, comienza desde un estado de calma en la que son forzados los contornos, y hasta pasadas las primeras 13 horas no se ejecutan las descargas asociadas al *jetting/ploughing*, momento en el cual ya han transcurrido dos carreras de marea y el mar está completamente desarrollado. Se produce la descarga, a lo largo de 1 km en los 6 tramos, durante una duración de 5 horas, y se ve el desarrollo de las plumas durante el tiempo restante de la simulación.

4. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO

Siguiendo lo indicado en los apartados anteriores, se realizó inicialmente la simulación hidrodinámica. A continuación, se presentan tres gráficos de dicha simulación: a las 13.5 horas (Figura 4), a las 24 horas (Figura 5), y a las 36 horas de simulación (Figura 6).

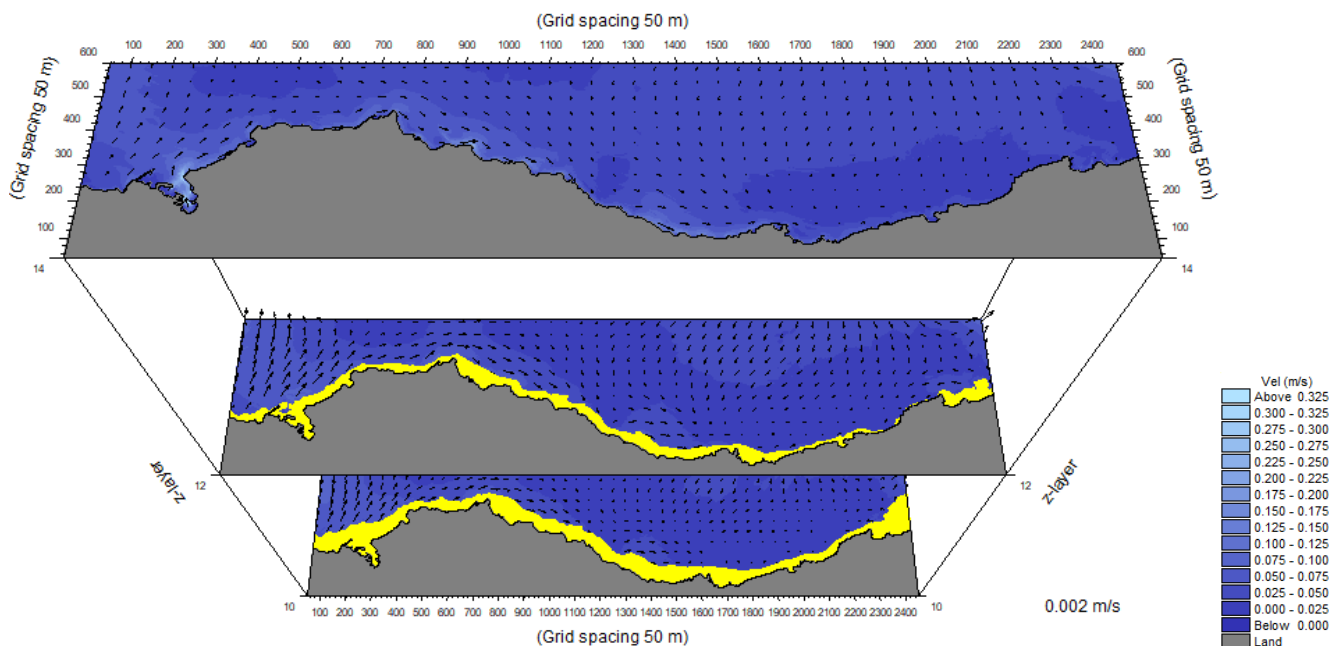


Figura 4. Estado hidrodinámico transcurridas 13 horas y 5 minutos de simulación.

La Figura 4 muestra un patrón de circulación de tres capas (superior (superficial), medio (20 metros por debajo de la superficial), inferior (a 40 metros bajo la capa superficial)). El vector representa intensidad y dirección de las corrientes, y en amarillo, se observa el corte de la línea de agua con tierra a medida que aumenta la profundidad.

En la misma figura se puede observar una circulación longitudinal de oeste a este, más marcada en el sector occidental, tanto en intensidad como en dirección. De manera general, también se observan velocidades más intensas en puntos donde se localizan elevaciones batimétricas y salientes, donde pueden alcanzar los 0.4 m/s en aquellas zonas donde las batimétricas se encuentran más próximas, pero en términos generales la velocidad se encuentra entre los 8 y 20 cm/s. El patrón es similar a lo largo de la columna de agua, sin embargo, se observa aceleraciones

próximas al fondo en la zona más occidental, con deceleración en el fondo y corrientes de salida, mientras en la capa superior las velocidades en el contorno exterior son más suaves y aún se observan corrientes de entrada por efecto del viento. Este punto coincide con la superación de una pleamar.

En la Figura 5 se puede observar un patrón de circulación de tres capas (superior (superficial), medio (20 metros por debajo de la superficial), inferior (a 40 metros bajo la capa superficial)). El vector representa intensidad y dirección de las corrientes y en amarillo se observa el corte de la línea de agua con tierra a medida que aumenta la profundidad.

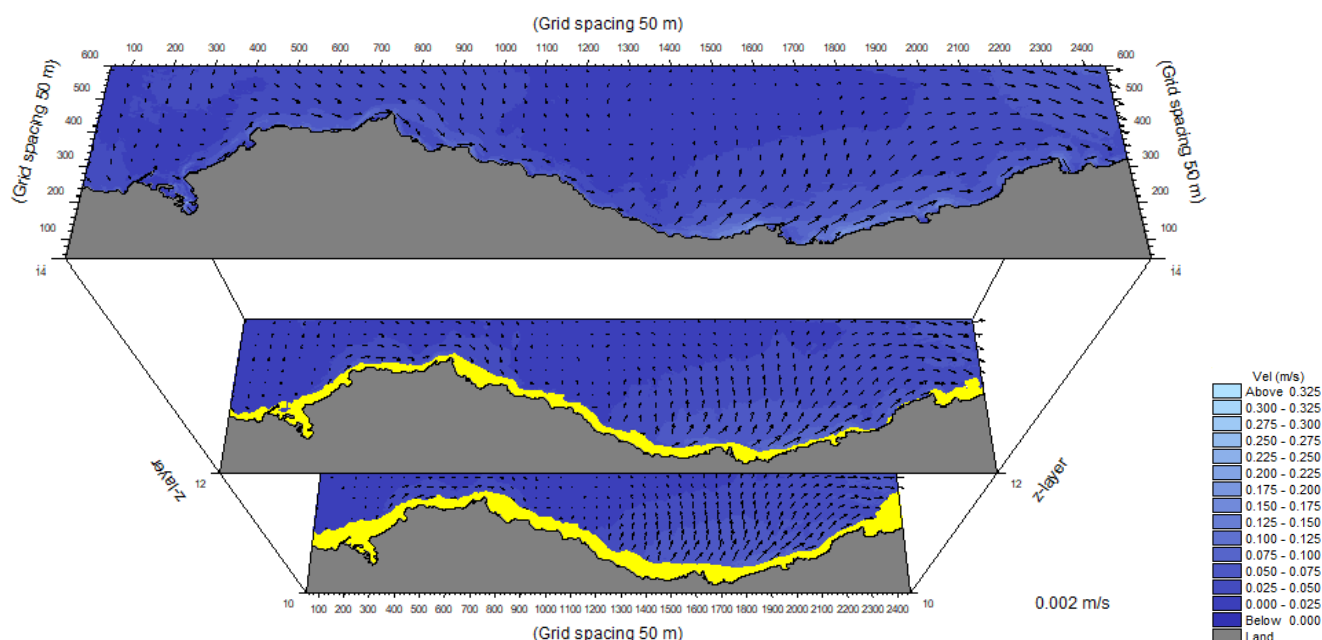


Figura 5. Estado hidrodinámico transcurridas 24 horas de simulación.

Esta Figura 5 coincide con una subida de marea casi alcanzando la pleamar, se observa la entrada de la masa de agua desde el contorno exterior (norte), y nuevamente la circulación longitudinal de oeste a este, que es la predominante en el golfo de Bizkaia, en este caso más marcada en el sector oriental, tanto en intensidad como en dirección. De manera general, también se observan velocidades más intensas en puntos con elevaciones o salientes en aquellas zonas donde las batimétricas se encuentran más próximas. El patrón es similar a lo largo de la columna de agua, con un sutil giro direccional de superficie a fondo, de este a norte en la zona central del área modelizada.

Finalmente, en la Figura 6 se puede observar, tal y como ocurre en las figuras anteriores, un patrón de circulación de tres capas (superior (superficial), medio (20 metros por debajo de la superficial), inferior (a 40 metros bajo la capa superficial)). El vector representa intensidad y dirección de las corrientes y en amarillo se observa el corte de la línea de agua con tierra a medida que aumenta la profundidad.

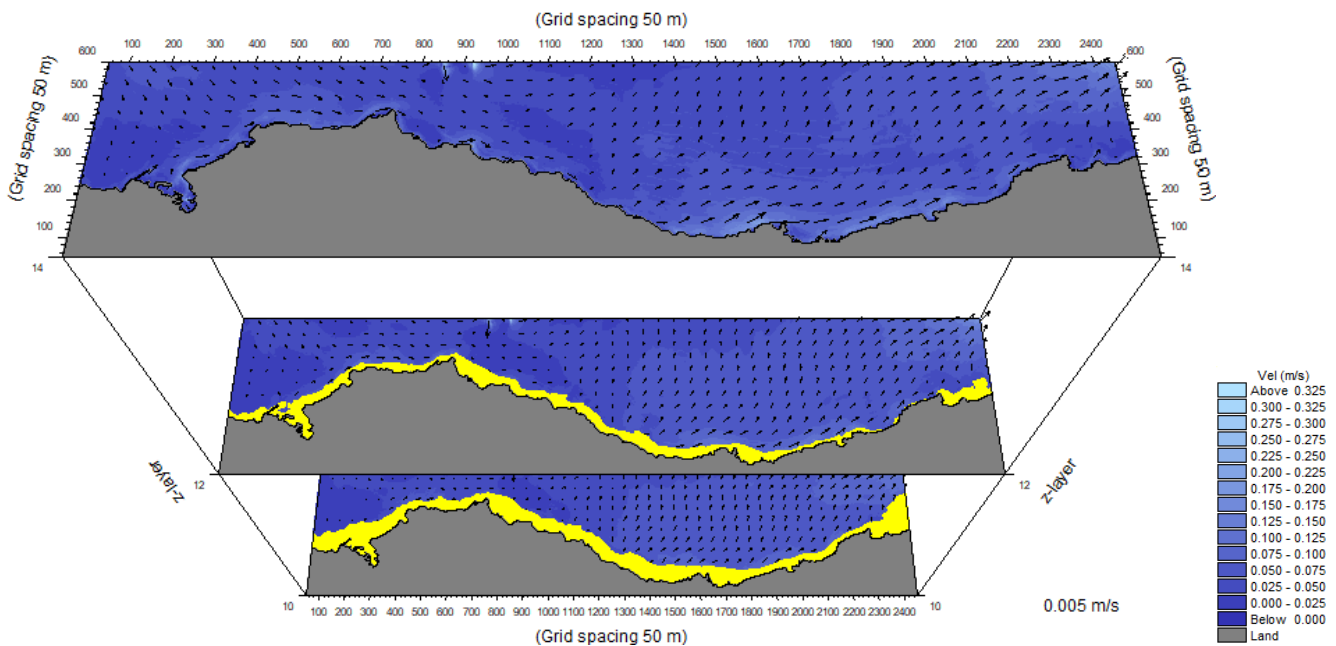


Figura 6. Estado hidrodinámico transcurridas 34 horas de simulación.

En esta Figura 6 se observa una media marea tras una bajamar. El patrón es muy similar al que se alcanza con una pleamar, pero al estar aún en desarrollo las corrientes de fondo no están tan intensificadas. La masa de agua se mueve de una forma más homogénea, en intensidad y dirección.

En la Figura 7 se puede observar en color rojo el registro de nivel de marea de los tres instantes de la simulación hidrodinámica que han sido graficados previamente (Figuras 4, 5 y 6). Concretamente, en la Figura 7 se puede observar, la primera línea roja que corresponde con el estado hidrodinámico transcurridas 13 horas y 5 minutos de simulación. La segunda línea roja de la figura corresponde con el estado hidrodinámico transcurridas 24 horas de simulación, y finalmente, la tercera línea roja situada a la derecha se corresponde con el estado hidrodinámico transcurridas 34 horas de simulación.

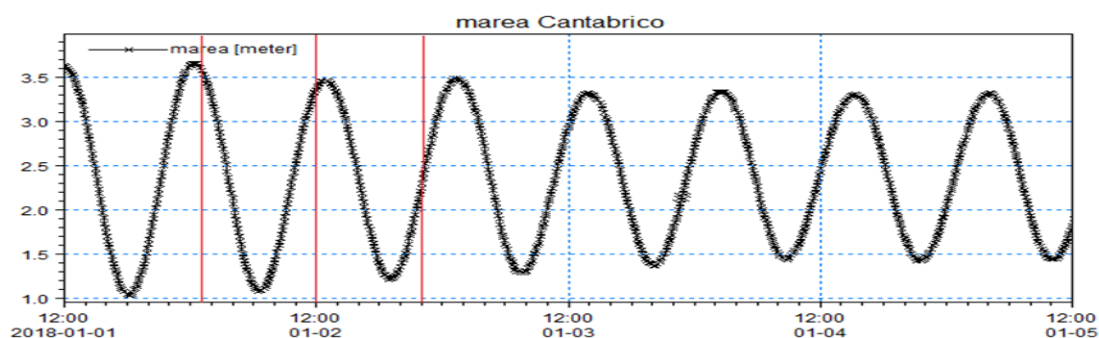


Figura 7. Localización sobre el registro de nivel del mar de distintos estados hidrodinámicos.

El siguiente resultado obtenido muestra la simulación incluyendo la pluma sedimentaria que se produce por el efecto del *jetting/ploughing*. Estos resultados se muestran en la Tabla 3, donde se pueden observar tres instantes de tiempo (cada instante indicado correspondientemente junto a gráfica).

Cabe destacar que, cada uno de los gráficos recoge numéricamente los resultados de las concentraciones de sedimento a 50m, 200m, 500m y 1 km, perpendicular a la pluma en dirección a la costa. Estos valores se indican a tres profundidades: en superficie, a 20 metros de la superficie, y en la capa inmediatamente superior a donde se está produciendo el *jetting/ploughing*, los cuales quedan mostrados en su gráfica correspondiente para cada uno de los tres instantes de la simulación (izquierda de las figuras).

Las imágenes muestran, además, dos zooms correspondientes a los dos tramos de simulación de *jetting/ploughing* más occidentales (en la parte superior), y con los otros cuatro tramos en la parte inferior. Ambas imágenes presentan 2 capas, superficial y a 40 m, y superficial y a 70 m de profundidad, respectivamente.

Tabla 3. Resultados de las simulaciones realizadas.

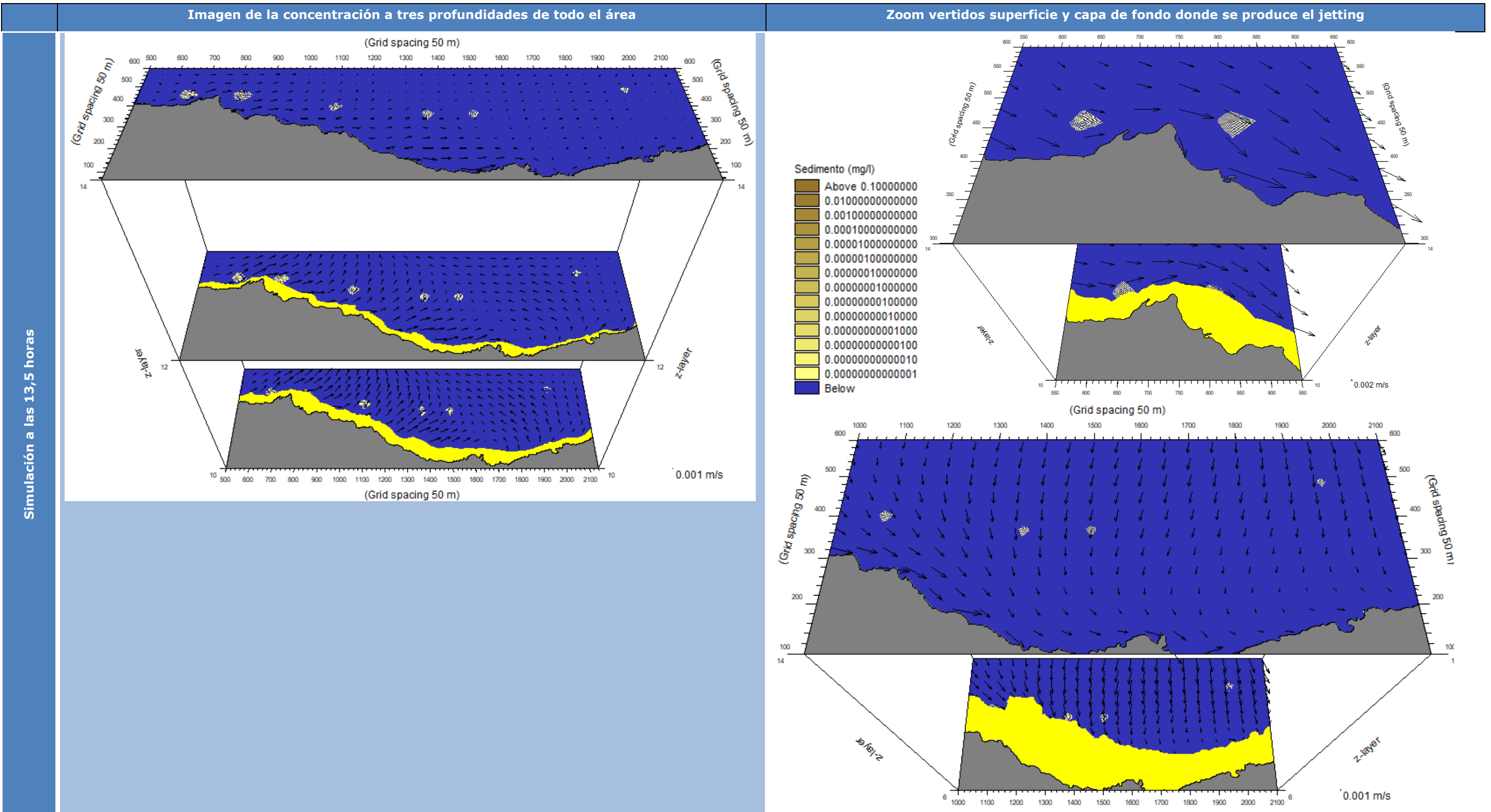
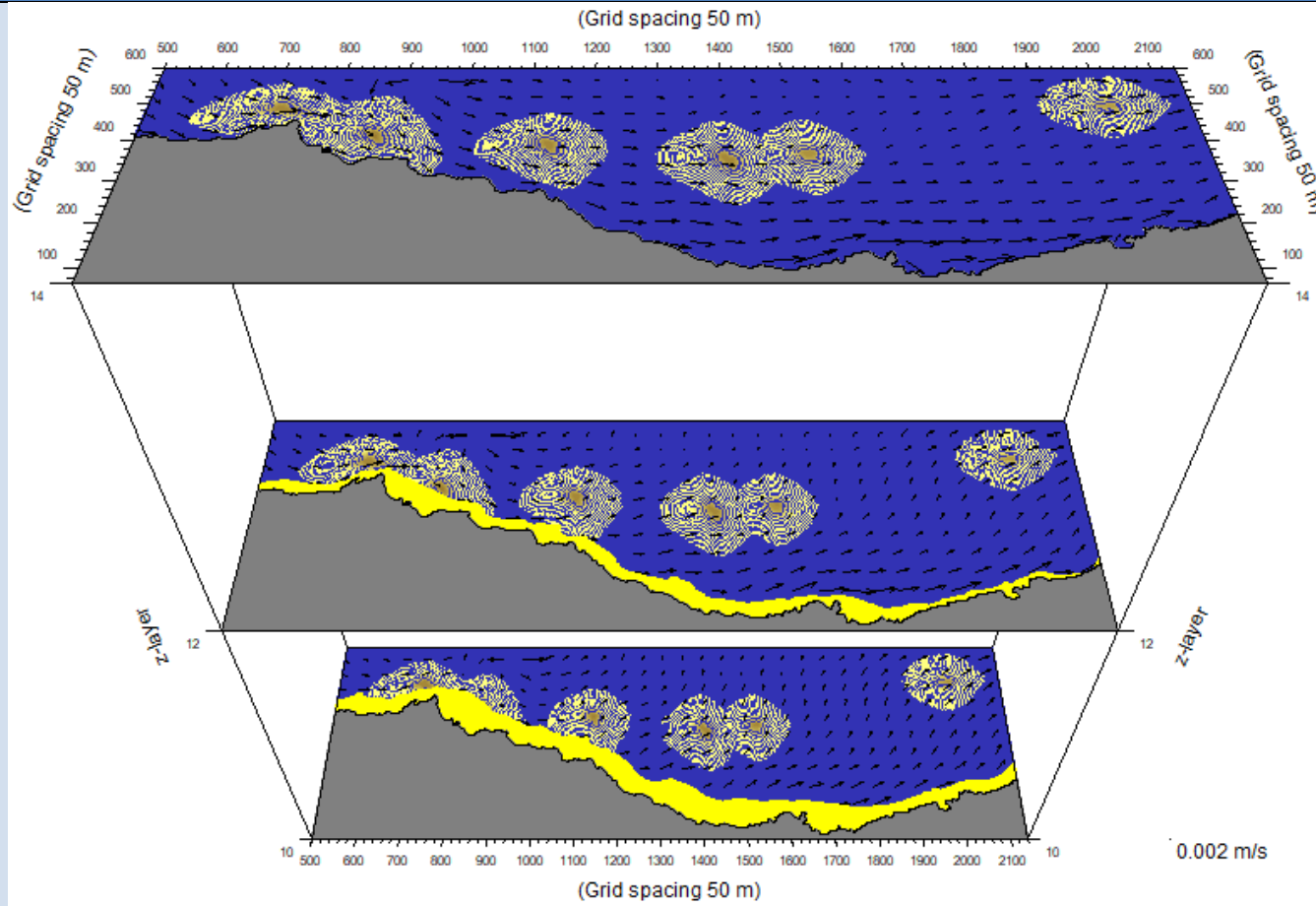


Imagen de la concentración a tres profundidades de todo el área



Zoom vertidos superficie y capa de fondo donde se produce el jetting

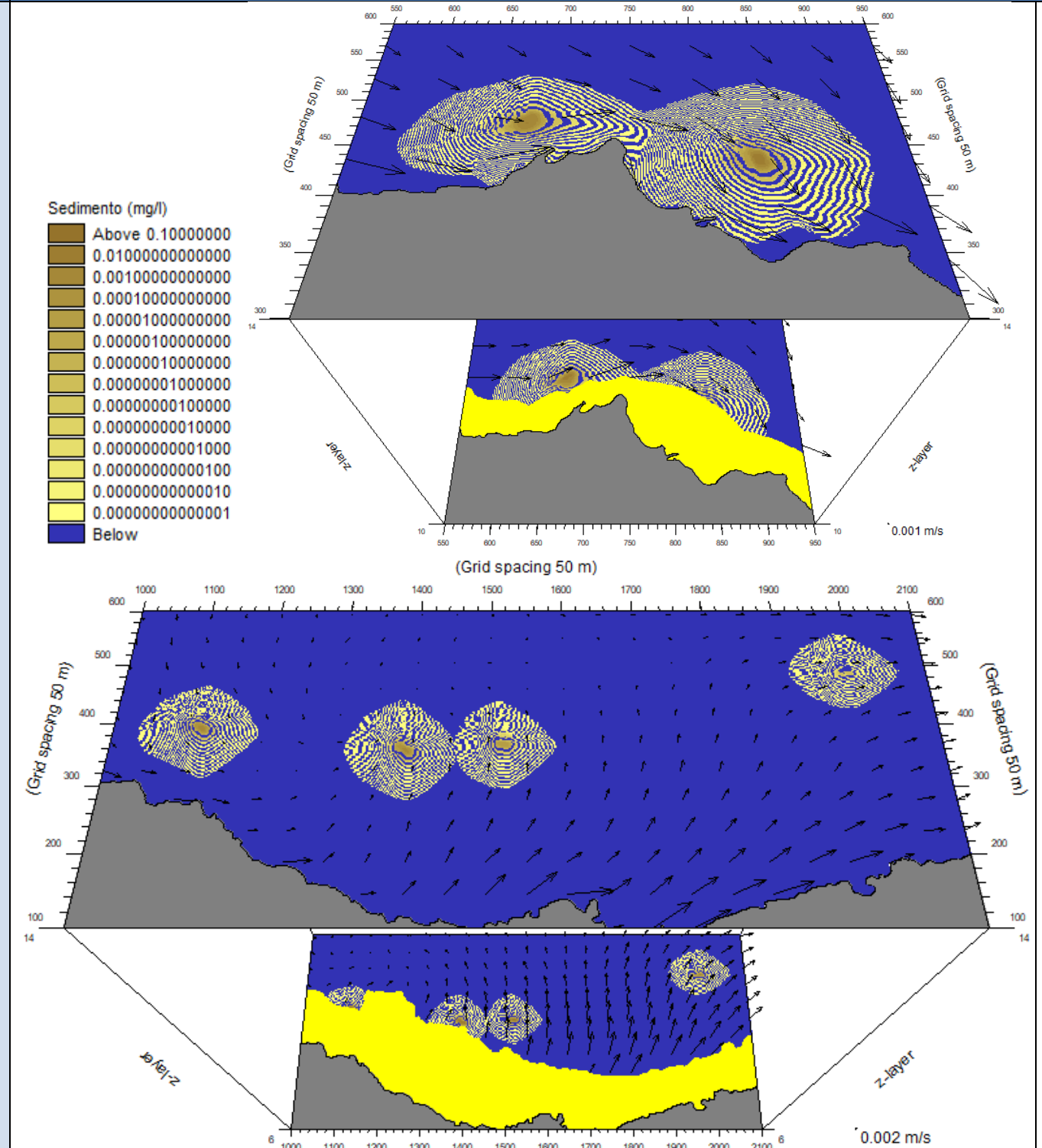
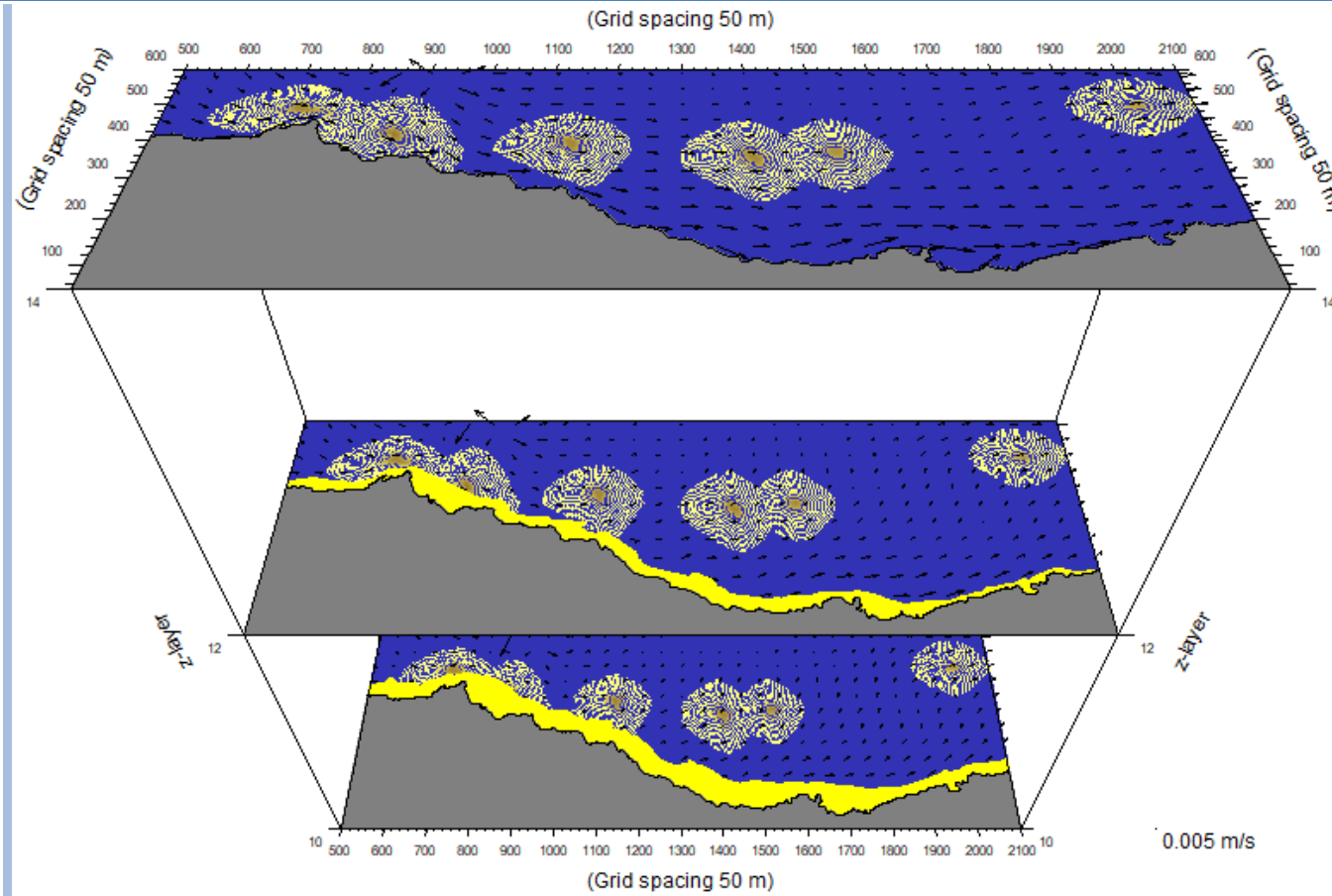
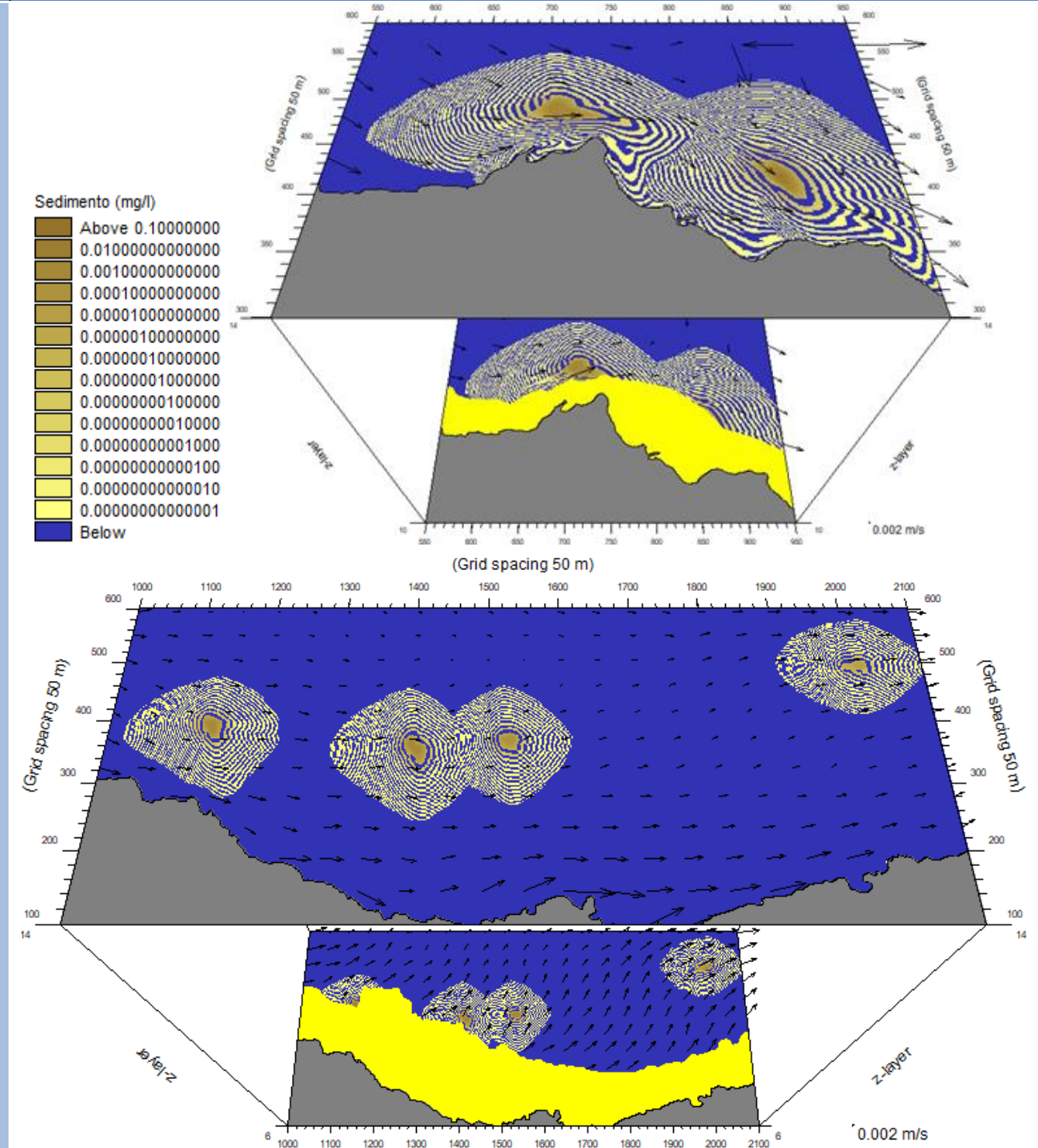


Imagen de la concentración a tres profundidades de todo el área



Zoom vertidos superficie y capa de fondo donde se produce el jetting



Paralelamente a la representación gráfica de los resultados obtenidos, se incluye la representación numérica y cuantificable de los resultados numéricos obtenidos para cada uno de los instantes de tiempo analizados, a diferentes distancias (indicadas en su Tabla correspondiente) y dos profundidades (zona de *jetting/ploughing* y superficie).

La Tabla 4 muestra los resultados numéricos correspondientes a la concentración de sedimentos (mg/l) en tres instantes, para cada tramo de *jetting/ploughing*, y a cuatro distancias del punto de generación de pluma turbídica, en la capa de fondo.

Tabla 4. Resultados numéricos para la concentración de sedimentos en la capa de fondo.

Concentración de sedimentos. CAPA DE FONDO						
Distancia	Resultados obtenidos a las 13 h y 5 min de simulación					
	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6
50 m	0.14	0.17	0.32	0.32	0.18	0.39
100	1.74e-6	0.012	0.024	0.0028	0.011	-
200	1.15e-9	3.83e-7	-	-	2.29e-7	-
400	-	-	-	-	2.39e-11	-
Distancia	Resultados obtenidos a las 24 h de simulación					
50 m	0.026	0.020	0.062	0.042	0.10	0.16
100	0.024	0.019	0.060	0.038	0.079	0.076
200	0.012	0.012	0.039	0.010	0.013	0.016
400	0.0013	0.0033	-	1.25e-5	7.87e-6	-
Distancia	Resultados obtenidos a las 34 h de simulación					
50 m	0.0105	0.0075	0.0230	0.0112	0.0335	0.0399
100	0.0103	0.0074	0.0224	0.0110	0.0324	0.0394
200	0.0077	0.0064	0.0142	0.0077	0.0231	0.0219
400	0.0041	0.0036	0.0012	0.0007	-	0.0022
Distancia	Resultados obtenidos a las 48 h de simulación					
100 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
500	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0087	<0.001
1000	<0.001	<0.001	0.0056	0.0036	0.005	<0.001
2500	0.002	0.013	<0.001	<0.001	<0.001	0.014
Distancia	Resultados obtenidos a las 72 h de simulación					
1000 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0018	<0.001
2500	<0.001	<0.001	0.0027	0.0017	0.001	<0.001
5000	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
7500	0.0015	0.0048	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Distancia	Resultados obtenidos a las 85 h de simulación (fin)					
2500 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0014	<0.001
5000	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001
7500	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
10000	0.0013	0.0036	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

Cabe destacar que la tabla anterior (Tabla 4), correspondiente a datos de fondo, presenta celdas sin valor debido a que tocaba fondo, es decir, dicha celda se corresponde con tierra y no con agua. Paralelamente, es importante tener en cuenta que los valores representados en negrita corresponden con concentraciones superiores a 0.1 mg/L. Por debajo de este umbral la concentración del sedimento en el agua es despreciable.

Paralelamente, es importante tener en cuenta que, si bien no existe una conversión directa, sí que se asume una relación entre NTU y sólidos en suspensión, concretamente 1mg/l equivale a 3NTU (<https://www.tecnoconverting.es/articulos-tecnicos/que-es-la-ntu/>). Por lo que el valor de turbidez obtenido en el modelo está por debajo de las condiciones de referencia para definir el Muy Buen Estado Ecológico de las masas de agua costeras en la Comunidad Autónoma Vasca (5 NTU) Borja *et al.*, (2018).

La Tabla 5 muestra los resultados numéricos correspondientes a la concentración de sedimentos (mg/l) en tres instantes, para cada tramo de *jetting/ploughing*, y a cuatro distancias del punto de generación de pluma turbida, en la capa superficial.

Tabla 5. Resultados numéricos para la concentración de sedimentos en la capa superficial.

Concentración de sedimentos. CAPA SUPERFICIAL						
Distancia	Resultados obtenidos a las 13 h y 5 min de simulación					
	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO 4	TRAMO 5	TRAMO 6
50 m	1.9e-10	1.1e-6	7.2e-17	3.7e-22	3.7e-22	8.6e-13
100	2.5e-10	2.1e-7	2.0e-18	5.8e-23	5.8e-23	9.9e-14
200	8.5e-13	2.5e-9	2.4e-20	1.1e-24	1.1e-24	1.02e-15
400	2.4e-21	2.2e-12	4.5e-25	3.6e-29	3.6e-29	6.1e-18
Distancia	Resultados obtenidos a las 24 h de simulación					
50 m	0.0101	0.039	0.0037	0.0014	9.3e-5	1.9e-5
100	0.0091	0.037	0.0037	0.0013	8.4e-5	1.9e-5
200	0.0050	0.025	0.0025	0.0006	3.4e-5	5.1e-6
400	0.0005	0.0020	0.0001	8.3e-6	1.2e-7	6.2e-8
Distancia	Resultados obtenidos a las 34 h de simulación					
50 m	0.0057	0.0214	0.0050	0.0022	0.0007	0.0002
100	0.0057	0.0213	0.0049	0.0022	0.0007	0.0002
200	0.0046	0.0184	0.0044	0.0019	0.0006	7.7e-5
400	1.36e-5	0.0026	0.0029	0.0013	0.0002	2.6e-6
Distancia	Resultados obtenidos a las 48 h de simulación					
100 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
500	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0015	<0.001
1000	<0.001	<0.001	0.0017	<0.001	<0.001	<0.001

2500	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Distancia	Resultados obtenidos a las 72 h de simulación					
1000 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0012	<0.001
2500	<0.001	<0.001	0.0024	0.0015	<0.001	<0.001
5000	<0.001	<0.001	<0.001	0.0013	<0.001	<0.001
7500	0.0015	0.004	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Distancia	Resultados obtenidos a las 85 h de simulación (fin)					
2500 m	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
5000	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
7500	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
10000	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

Según la tabla correspondiente a las capas de fondo, donde se produce el *jetting/ploughing*, presenta valores más elevados que la capa superficial en todos los puntos estudiados a las 13 horas y 5 minutos, es decir, tras dar comienzo a las operaciones de *jetting/ploughing*, mientras que los valores presentes en superficie son despreciables. Los resultados obtenidos a las 24 horas muestran cómo aquellos tramos más profundos presentan valores inferiores en superficie respecto al fondo, hasta los 200 metros de distancia. A 400 metros todos los resultados obtenidos son mayores en la capa de fondo.

En cuanto a los resultados obtenidos a las 34 horas, en el fondo los sedimentos continúan disminuyendo respecto a instantes anteriores. Mientras, en superficie hay tramos con valores superiores a los valorados a las 24 horas, los cuales, en general se corresponden con los puntos más profundos donde se ejecuta el *jetting/ploughing*. No obstante, comparando con los valores obtenidos en la capa de fondo, todos los tramos a excepción del segundo presentan concentraciones mayores en el fondo que en superficie.

A partir de 48h y hasta el fin de la simulación (85h) las concentraciones en el fondo no superan 0.015 mg/L y son menores aún en superficie, por lo que es razonable pensar que ya no generan ningún impacto en el medio.

Cabe señalar que, a pesar de que no es uno de los momentos evaluados, se pudo observar que, a las 18 horas de simulación es cuando se aprecian los mayores valores de concentración de sedimento. Este momento se corresponde con la carga de 5 horas de simulación de *jetting/ploughing*, alcanzando en los 50 metros valores de 1.3 mg/l.

5. CONCLUSIONES

El resultado del modelaje realizado, acorde a los criterios técnicos establecidos, muestra que las aguas costeras no se verán afectadas por la pluma turbidítica generada por el *jetting/ploughing* en las condiciones descritas y para la alternativa proyectada.

La evolución dispersiva que sufre la masa del vertido es muy alta, no presentando valores superiores a 1.3 mg/l, siendo este valor alcanzado puntual y localmente.

El volumen de sedimento y las características de éste responden a una simulación conservadora, es probable que los tiempos de viaje y deposición sean inferiores. Si bien, esta simulación únicamente cubre 6 tramos de un kilómetro, abarcando un total de 6 kilómetros, el 7.15% del tendido del cable sobre el que se ejecutará el *jetting/ploughing*. En cualquier caso, se espera que la remoción de sedimento sea puntual con un avance de pluma que ira dispersándose y alcanzo valores despreciables (de 0.1 mg/l) con un máximo de 12 horas.

En resumen, el impacto previsto por el trazado submarino que discurrirá enterrado en una zanja de un metro bajo el lecho marino no debería alterar la calidad del agua en cuanto a turbidez, de la masa de agua costera. Durante la ejecución de los trabajos correspondientes al *jetting/ploughing*, no se realiza vertido con carga contaminante añadida, sino que se fluidiza el sustrato sedimentario por impulsión de agua a presión. Este impulso se realiza de forma dirigida mediante chorros con diferentes ángulos que remueven el sedimento sin efecto de choque de fondo a superficie. Presumiblemente gran parte del sedimento removido se deposita de nuevo dentro de la propia zanja, aunque si es de esperar una pequeña modificación local y temporal localizada en cuanto a turbidez respecta.

6. REFERENCIAS

Borja, A., Bald, J., Franco, J., Larreta, J., Menchaca, I., Muxika, I., Revilla, M., Germán Rodríguez, J., Solaun, O., Uriarte, A., Valencia, V., Zorita, I., Adarraga, I., Aguirrezabalaga, F., Sola, J.C., Ruiz, J.M., Cano, M. Laza-Martínez, A., Manzanos, A., 2018. Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Informe de resultados. Campaña 2017. Informe realizado por AZTI-Tecnalia para el Gobierno Vasco, 309 pp.

Gooding, S., Black, K., Boyde, P., Boyes, S., 2012. Environmental Impact of Susea Trenching Operations. Society of Underwater Technology. Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies - Present and Future, 12-14 September, London, UK. Conference paper, 213-221 pp.