



La modelización numérica de la dispersión de productos de desecho vertidos desde explotaciones de acuicultura: Una herramienta para la adecuada gestión medioambiental del sector

González, M.; Gyssels, P. Mader, J.; Borja, A.; Galparsoro, I. y Uriarte, A.
Fundación AZTI, Herrera Kaia, Portualdea s/n, 20.110 Pasaia, Gipuzkoa (España)

Resumen

En esta comunicación se presentan algunos de los resultados obtenidos por AZTI en la aplicación de códigos en Elementos Finitos para el estudio numérico de las plumas de afección producidas por los vertidos de desechos de jaulas de acuicultura.

El empleo de los modelos numéricos de simulación de la realidad física permite una aproximación novedosa al estudio de los impactos causados por las explotaciones de piscicultura, facilitando el análisis de las alternativas de ubicación y optimizando los recursos necesarios para los planes de vigilancia de las explotaciones. Sin embargo, el modelo numérico no es más que un complemento de las medidas de campo que permiten su calibración y de las que depende su fiabilidad. Todo ello debe ser puesto en manos expertas que permitan la adecuada gestión del sector acuicultor.

Palabras clave: dispersión, desechos, modelización, elementos finitos, calibración

Abstract

This communication deals with some of the results obtained by AZTI from the application of Finite Elements codes for the numerical study of plumes produced by waste spills of aquaculture stations. The use of numerical models to simulate the physical reality facilitates a new approach to the study of the impacts caused by fish culture exploitation, making easier the analysis of site selection and optimising the necessary resources for operative monitoring plans. Nevertheless, the numerical model is only a complement to *in situ* measurements, which allow for the calibration and reliability of the models. All these data must be put on expert hands to allow sustainable management of the aquaculture sector.

Keywords: dispersion, waste, numerical models, finite elements, calibration

Introducción

El desarrollo actual de las plataformas computacionales y el incremento de la potencia de cálculo de las mismas, ha permitido afrontar desde una perspectiva nueva la resolución de complicados problemas hidrodinámicos y de dispersión en el medio marino.

La extensión de cualquier vertido al mar depende de las características de la sustancia vertida y de las corrientes marinas existentes. Por ello, la realización de una simulación numérica de la dispersión de partículas procedentes de las jaulas de piscicultura precisa de la modelización de las corrientes marinas en la zona de estudio.

El objetivo final de los modelos numéricos es reproducir y prever el comportamiento de la naturaleza, para ello se hace necesario conocer por un lado las ecuaciones que rigen los procesos y, por otro, disponer de las herramientas numéricas y computacionales necesarias para resolver estas ecuaciones de comportamiento con suficiente aproximación a los efectos que nos interesa.

Por último, y como punto más importante, no es suficiente disponer de un modelo numérico de resolución de un complejo sistema de ecuaciones sin validarlo mediante la comparación con las soluciones analíticas y exactas de problemas simplificados y sin calibrar los coeficientes libres que aparecen en las formulaciones empleadas con medidas de campo específicas y reales.

Las ecuaciones más generales que se pueden utilizar para la resolución de problemas hidrodinámicos y de dispersión en el medio marino son las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación general de convección-difusión. Los algoritmos utilizados para la resolución de estos sistemas de ecuaciones diferenciales utilizan la técnica de los Elementos Finitos mediante una aproximación quasi-3D para la variabilidad vertical, tanto de velocidades, concentraciones como campos de densidad.

Material y métodos

AZTI, en colaboración con el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC desarrolló el paquete de programas TRIMODENAÒ que permite el estudio de la hidrodinámica marina y de la dispersión de sustancias en el mar.

TRIMODENAÒ permite afrontar por un lado la resolución de las ecuaciones de aguas someras tridimensionales mediante una aproximación en Elementos Finitos. Para ello tiene en cuenta la mayor parte de los términos generadores de corriente en el mar: el viento, el equilibrio geostrófico entre la rotación terrestre y los gradientes de salinidad y temperatura, la rotura del oleaje (Espino, 1994) y la marea astronómica (González, 1994).

Las ecuaciones que resuelven estos modelos son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\partial_t \eta + \partial_x [(\eta+h)U] + \partial_y [(\eta+h)V] = 0. \quad (1)$$

Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} \partial_t u + u \partial_x u + v \partial_y u - fv = -g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_x \eta - g \frac{l}{\rho} \partial_x \alpha \\ + \partial_x [2 K_H (\partial_x u)] + \partial_y [K_H (\partial_x v + \partial_y u)] + \partial_z [K_z (\partial_x u)], \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial_t v + u \partial_x v + v \partial_y v + fu = -g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_y \eta - g \frac{l}{\rho} \partial_y \alpha \\ + \partial_x [K_H (\partial_x v + \partial_y u)] + \partial_y [2 K_H (\partial_y v)] + \partial_z [K_z (\partial_x v)], \quad (3) \end{aligned}$$

donde h es la altura de la superficie libre sobre el fondo, (u,v) son las componentes horizontales del vector velocidad, (U,V) son las componentes horizontales del vector velocidad de la corriente verticalmente integrado, h

es la profundidad, f es el parámetro de Coriolis, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad, K_H y K_z son los coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical, respectivamente y a es la integral de r entre 0 y z .

Aceptando que las frecuencias de oscilación de la marea son conocidas a priori a partir de la expresión del potencial de marea (Godin, 1991) es posible calcular mediante una descomposición armónica la altura de la superficie libre y la velocidad de la corriente mediante:

$$\eta(x, y, t) = \eta_o(x, y) + \frac{1}{2} \sum_{n=-N}^N \eta_n(x, y) \exp(i \omega_n t) \quad (4)$$

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \vec{u}_o + \frac{1}{2} \sum_{n=-N}^N \vec{u}_n(x, y, z) \exp(i \omega_n t), \quad (5)$$

siendo i la unidad imaginaria, ω_n es la frecuencia, (u_o, v_o) las componentes estacionarias de la velocidad y h_o la componente estacionaria de la altura de la superficie libre.

Sustituyendo las expresiones (4) y (5) en las ecuaciones (1), (2) y (3) y aprovechando la siguiente propiedad:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \exp(i \omega_i t) \exp(i \omega_j t) dt = \delta_{ij}, \quad (6)$$

donde las funciones "exp" son ortogonales entre sí. Multiplicando las ecuaciones (1), (2) y (3) por la función $\exp(i \omega_k t)$ para un k particular entre $-N$ y N (incluyendo $k=0$) e integrando las ecuaciones entre $-T$ y T .

Tras sustituir las expresiones (4) y (5) en las ecuaciones previas, si se hace el límite cuando T tiende a infinito, obtenemos para la componente estacionaria las siguientes expresiones:

$$\partial_x [(\eta_o + h) U_o] + \partial_y [(\eta_o + h) V_o] = 0 \quad (7)$$

$$u_o \partial_x u_o + v_o \partial_y u_o - f v_o = -g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_x \eta_o - g \frac{1}{\rho} \partial_x \alpha + \partial_x [2 K_H (\partial_x u_o)] + \partial_y [K_H (\partial_x v_o + \partial_y u_o)] + \partial_z [K_z (\partial_x u_o)], \quad (8)$$

$$u_o \partial_x v_o + v_o \partial_y v_o + f u_o = -g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_y \eta_o - g \frac{1}{\rho} \partial_y \alpha + \partial_x [K_H (\partial_x v_o + \partial_y u_o)] + \partial_y [2 K_H (\partial_y v_o)] + \partial_z [K_z (\partial_x v_o)], \quad (9)$$

y, para las transitorias:

$$i \omega_k \eta_k + \nabla_H \cdot [(\eta_o + h) \vec{U}_k + \eta_k \vec{U}_o] = -\frac{1}{2} \sum_{n, m = -N}^N \nabla_H \cdot (\eta_n \vec{U}_m), \quad \omega_n + \omega_m = \omega_k \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
& i \omega_k u_k + \bar{u}_o \cdot \nabla_H u_k + \bar{u}_k \cdot \nabla_H u_o - f v_k + g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_x \eta_k - \partial_x [2 K_H (\partial_x u_k)] \\
& - \partial_y [K_H (\partial_x v_k + \partial_y u_k)] - \partial_x [K_z (\partial_x u_k)] = -\frac{1}{2} \sum_{n,m=-N}^N \bar{u}_n \cdot \nabla_H u_m, \\
& \omega_n + \omega_m = \omega_k
\end{aligned}
\tag{11}$$

$$\begin{aligned}
& i \omega_k v_k + \bar{u}_o \cdot \nabla_H v_k + \bar{u}_k \cdot \nabla_H v_o + f u_k + g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_x \eta_k - \partial_y [2 K_H (\partial_y v_k)] \\
& - \partial_x [K_H (\partial_x v_k + \partial_y u_k)] - \partial_x [K_z (\partial_x v_k)] = -\frac{1}{2} \sum_{n,m=-N}^N \bar{u}_n \cdot \nabla_H v_m, \\
& \omega_n + \omega_m = \omega_k \\
& k = -N, \dots, -1, 1, \dots, N.
\end{aligned}
\tag{12}$$

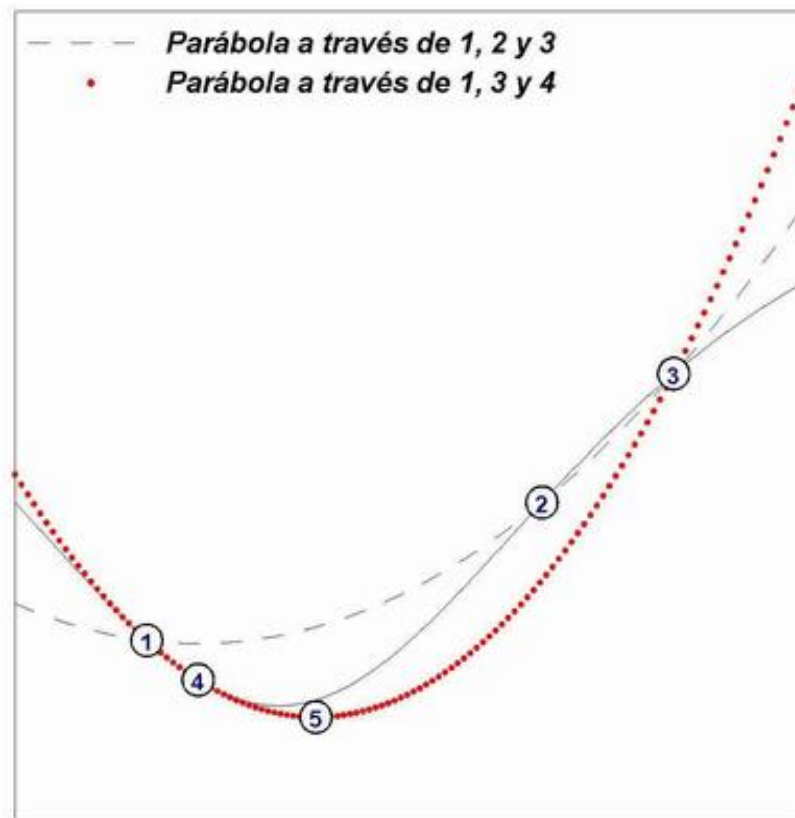
AZTI, ha elaborado un código específico que permite el ajuste automático de los coeficientes libres que aparecen en la formulación utilizada a fin de ajustar los resultados del modelo a las medidas de campo (González, 1999).

El resultado de las simulaciones es un conjunto de valores obtenidos en el dominio estudiado correspondientes a las velocidades y alturas de la superficie libre asociadas a la componente "estacionaria" y a cada una de las constituyentes de la marea consideradas. Los campos de velocidades son tridimensionales (dependen de la posición en planta del punto y de la profundidad a la que se halle) mientras que, los campos de alturas de superficie libre sólo dependen de las coordenadas en planta del punto.

La función de error se define como la diferencia entre los datos medidos y los resultados obtenidos por el modelo numérico. Esta función de error, que denotaremos como Y depende, al menos, de los coeficientes libres de las formulaciones empleadas en el cierre turbulento (K_H y K_z) y del coeficiente de fricción con el fondo (k). Además depende de los datos de partida de la modelación numérica: exactitud de la discretización numérica de las ecuaciones de partida, tamaño del elemento insuficiente para reproducir fenómenos locales, adecuación de las condiciones de contorno, errores en la batimetría y en el contorno costero, etc. Y por supuesto, intervienen las limitaciones propias de las hipótesis subyacentes en las ecuaciones de partida: hipótesis de distribución hidrostática de presiones, despreciar el efecto de la componente vertical de la velocidad en las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, hipótesis de Boussinesq, etc.

En este caso, solamente se considera que la función error $Y = Y(K_H, K_z, k)$. De manera que la mejor aproximación posible será aquella que se efectúe con un trío de valores de K_H , K_z y k que den lugar a un mínimo de Y .

El algoritmo de minimización funcional utilizado consiste en aplicar sucesivamente el método de Brent (Brent, 1973) en una dimensión para cada una de las tres variables implicadas en Y .



El método de Brent (o de minimización mediante interpolación inversa parabólica) aparece esquematizado en el gráfico de la Figura 1. La curva de trazo continuo representa la curva de error, los puntos señalados con las circunferencias con los números 1, 2 y 3 son tres puntos que nos servirán como semilla inicial del algoritmo. La coordenada "x" del punto 4 rodeado por la circunferencia es la del mínimo de la parábola que pasa por los puntos 1, 2 y 3, la coordenada "y" se calcula evaluando la función de error con la coordenada "x" del punto 4 (esta coordenada "x" puede ser cualquiera de los tres parámetros libres del modelo de propagación de la marea astronómica o del de corriente producida por el viento). El siguiente paso consiste en sustituir el punto 2 por el punto 4 y trazar la parábola que pase por 1, 3 y 4 y que se ha representado por una línea discontinua de puntos rojos, se calcula la coordenada "x" del mínimo de esta parábola y se repite el proceso anterior realizado en el punto 4.

Una vez que el modelo hidrodinámico ha sido utilizado con los datos de viento, alturas de marea, campos de densidades, etc., adecuados y, posteriormente, calibrados los resultados con registros de corrientes de suficiente duración para considerarse representativos, es posible utilizar estos resultados para tratar el estudio de la dispersión de las partículas procedentes de las jaulas de piscicultura. Para ello se ha elaborado un código en Elementos Finitos que resuelve la ecuación general de convección-difusión mediante el método de Taylor-Galerkin (Hermosilla, 1996):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_s C) + \frac{\partial}{\partial y}(v_s C) - \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + SC = 0 \quad (13)$$

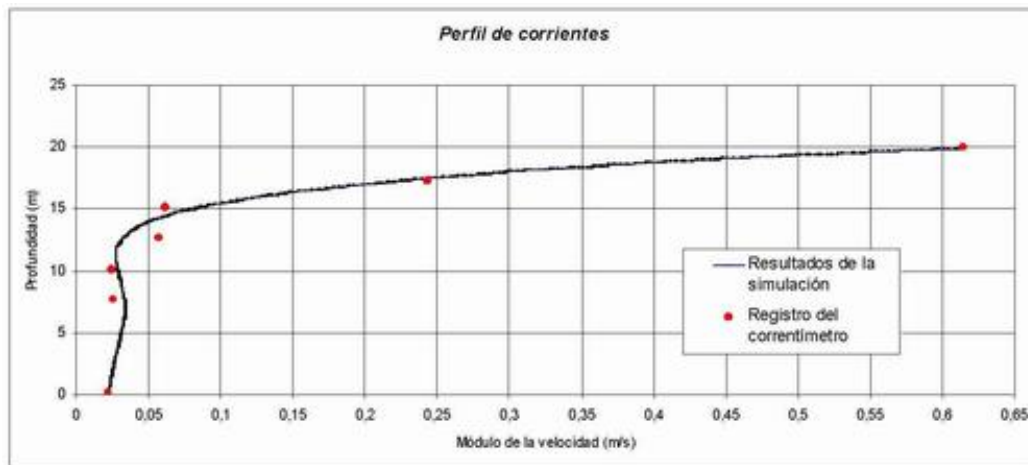
Donde C es la concentración de partículas, u_s y v_s son las componentes del vector velocidad de la corriente, E_x y E_y son los coeficientes de dispersión horizontal y S representa los términos fuente (aportación de materia al sistema) y/o decaimiento (retirada de materia del sistema, por ejemplo por

sedimentación).

Resultados y discusión

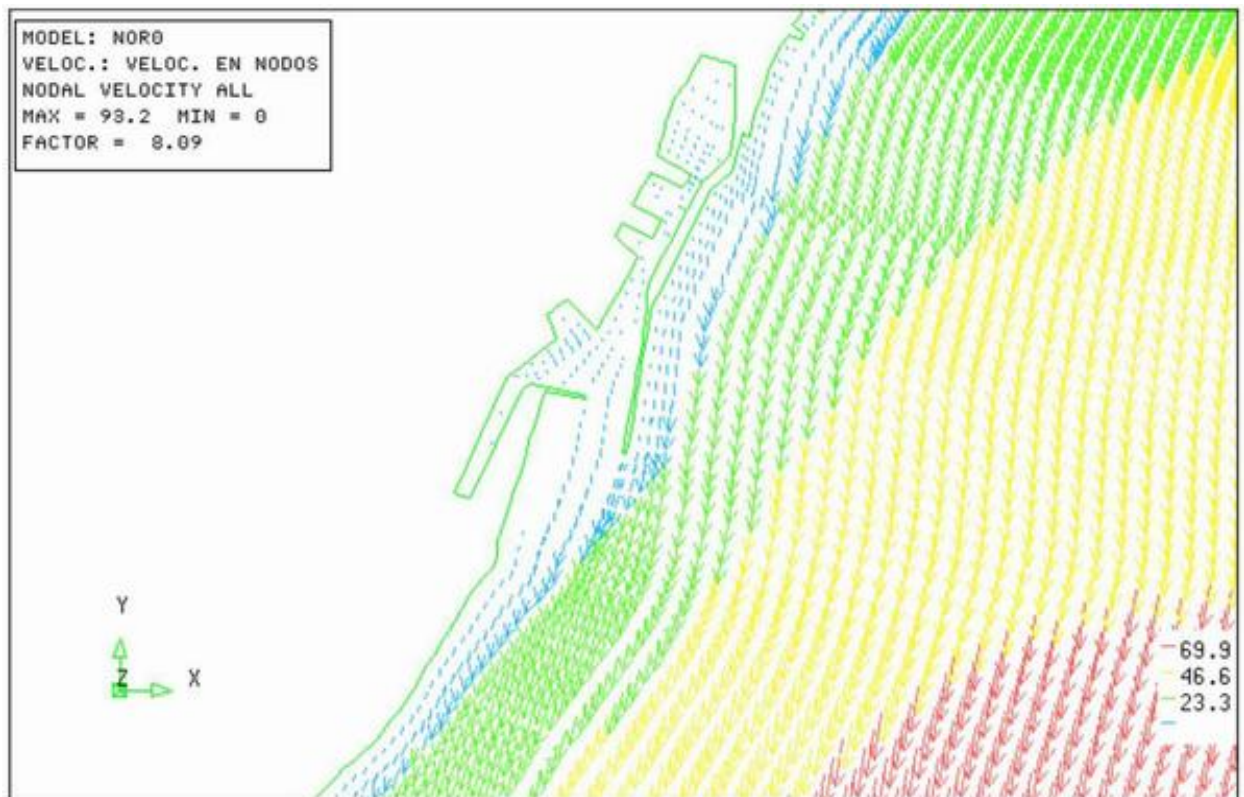
El ajuste entre los modelos numéricos de simulación de la hidrodinámica marina en las aplicaciones realizadas hasta la fecha ha sido bueno. En la Figura 2 se muestra un gráfico de comparación entre resultados numéricos obtenidos y medidas de corrientes en la costa de Murcia.

Figura 2



En la Figura 3 se presentan los resultados de corriente superficial obtenidos por el modelo numérico de simulación en el caso de un viento incidente del noroeste de $20 \text{ km}\times\text{h}^{-1}$ en la zona del Puerto de Barcelona.

Figura 3



El empleo del modelo de dispersión implementado en TRIMODENAÒ, permite el estudio de la afección producida por los diferentes tipos de sustancias y tamaños de partículas, a la costa, a los fondos y a la calidad de la columna de agua.

Asimismo, la posibilidad de utilizar los resultados hidrodinámicos para evaluar la afección al medio en diferentes ubicaciones alternativas con un esfuerzo computacional y económico asumible hace posible su uso como herramienta de gestión y decisión.

Empleando como datos de velocidad de la corriente los resultados de los modelos numéricos (una vez calibrados sus resultados con las medidas de campo) es posible simular la dispersión de los vertidos realizados desde instalaciones de piscicultura. Para ello se utiliza el modelo de resolución de la ecuación general de convección difusión mencionado (Hermosilla, 1996).

Uno de los factores más importantes en la dispersión de los desechos de la explotación de piscicultura, es el tamaño de las partículas, pues determina la velocidad de sedimentación. El origen de las partículas producidas en la granja de piscicultura son los *pellets* fecales y los *pellets* de los alimentos. Las estimas de las velocidades de sedimentación para uno y otro, son del orden de $0,06 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ y $0,15 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$, respectivamente. Tales velocidades de sedimentación limitan en la práctica la afección al área de sombra de las propias jaulas. Sin embargo, el efecto del vertido sobre el medio marino, origina una degradación en las partículas por efecto de la disgregación.

Para el caso de las partículas originadas por la disgregación de los *pellets*: las partículas de 31 y 63 mm, son las representativas de la degradación de los productos de deshecho procedentes de las deyecciones y de los restos de comida. En este caso las velocidades de sedimentación son $6,0\times 10^{-4}$ y $2,40\times 10^{-3} \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ respectivamente. (Gowen y Bradbury, 1987).

Simulando la dispersión de los vertidos en diferentes condiciones de viento y marea es posible obtener una previsión de cual va a ser la posible afección a la costa, a la calidad de las aguas y de los fondos. En las Figura 4 y 5 se presentan resultados del grado de afección que el modelo prevé que se producirá debido a varias instalaciones de piscicultura en la costa levantina española.

Figura 4

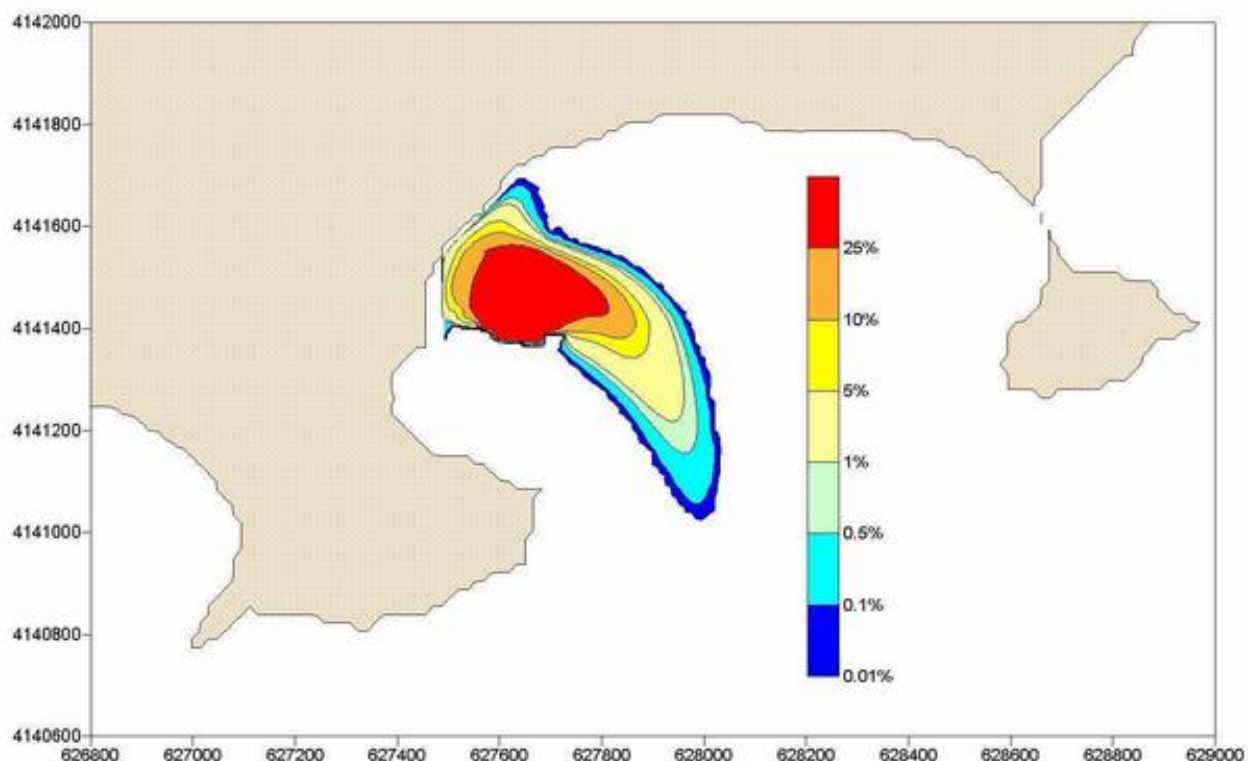
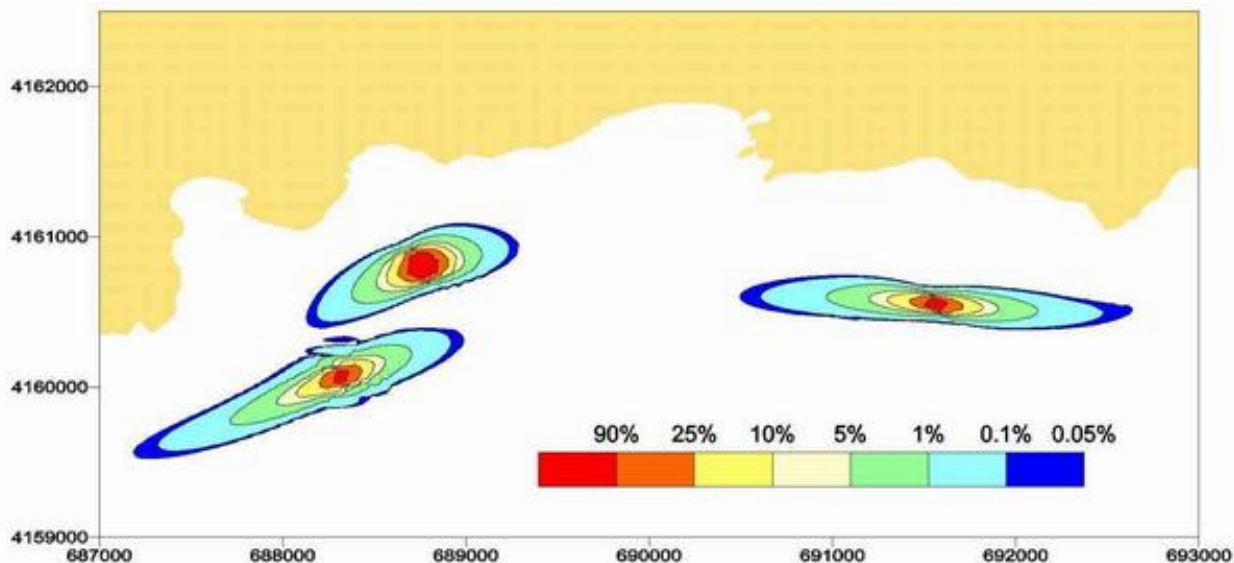


Figura 5



Conclusiones

El modelo numérico desarrollado permite reproducir numéricamente la mayor parte de los procesos físicos causantes de la corriente marina. Se ha implementado un algoritmo de calibración automática de los coeficientes libres que aparecen en las formulaciones empleadas de modo que, el ajuste entre los resultados del modelo numérico y las medidas de campo disponibles sea óptimo.

Utilizando como entrada a un modelo en Elementos Finitos para la resolución de la ecuación de convección-difusión, los resultados validados con las medidas de campo de los modelos hidrodinámicos, es posible analizar diferentes situaciones y emplazamientos de instalaciones de piscicultura en mar abierto. De este modo es posible analizar diferentes alternativas para su ubicación a fin de reducir la posible afección a la calidad de las aguas o de los fondos o la afección a la costa así como limitar la interferencia con otros usos u otras instalaciones de piscicultura.

Bibliografía

- **Brent, R.**, 1973. *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, p. 78.
- **Espino, M.**, 1994. *Estabilización de la superficie libre en la solución de ecuaciones de Shallow-Water por Elementos Finitos. Aplicaciones oceanográficas*. Tesis doctoral UPC, Barcelona.
- **Godin, G.**, 1991. *Tides*. Editorial CICESE, México.
- **González, M.**, 1994. *Un modelo numérico en Elementos Finitos para la corriente inducida por la marea. Aplicaciones al Estrecho de Gibraltar*. Tesina de especialidad UPC, Barcelona.
- **González, M.; Gyssels, P.; Espino, M.; García, M.A. y Uriarte, A.**, 1999. *Simulación numérica de la circulación oceánica en el Estrecho de Gibraltar. Aplicaciones a un modelo de dispersión de contaminantes*. V Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas.
- **Gowen, J.R., y Bradbury, N.B.**, 1987. *The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review*. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 25, 563-575.
- **Hermosilla, F.**, 1996. *Estudio de la dispersión de contaminantes en el mar mediante el M.E.F.* Tesina de especialidad UPC. Barcelona.



Artículo publicado en la Revista AquaTIC n° 13 (especial VIII Congreso Nacional de Acuicultura),
mayo 2001