

Análisis comparativo entre medidas de campo de corrientes en la Ría de Ferrol y las obtenidas mediante modelación numérica

MANUEL GARCÍA-MAÑES (*) y M^e. JESÚS MARTÍN-SOLDEVILLA (*)

RESUMEN Mediante medidas de campo se han obtenido valores de la velocidad de las corrientes en la Ría de Ferrol debidas a las mareas astronómicas con una carrera máxima de 4.5 m. Estas medidas se han realizado con correntímetros ubicados a la entrada de la ría y a lo largo de su zona más estrecha, entre Punta San Carlos y Punta del Vispón. En esta última zona las medidas se han realizado en superficie y a distintas profundidades.

Con una modelación numérica, basada en un método de diferencias finitas para resolver de forma aproximada el problema de evolución y de contorno, planteado a través de las ecuaciones, integradas en profundidad, que rigen el fenómeno hidrodinámico, se ha conseguido un modelado de tipo 2D para caracterizar el campo de corrientes a lo largo de la ría durante dos ciclos completos de marea (típicamente semidiurna de periodo 12 h 25 min).

La comparación de los datos numéricos con los reales, centradas en gran parte en los valores del máximo módulo de la velocidad, ha sido, en general, aceptable. La ventaja del modelo numérico es que caracteriza el campo de corrientes en todos los puntos de la ría donde se sitúan los nodos de una malla de cálculo que discretiza toda el área modelada, con un incremento espacial de 20 m en dos alineaciones perpendiculares. Estos resultados son necesarios para llevar a cabo simulaciones realistas de maniobras de buques.

COMPARISON BETWEEN REAL MEASUREMENTS OF CURRENT VELOCITY IN THE ESTUARY OF FERROL AND THOSE OBTAINED WITH A NUMERICAL MODEL

ABSTRACT Density flow ($m^3 / s / m$) or equivalently current velocity, due to astronomical tide have been measured in the estuary of Ferrol. The equipment has been located at the entrance and along the more narrow part of the sheltered area between Punta San Carlos y Punta del Vispón. These measurements have been taken at different depths.

The numerical model used solves the vertically integrated equations of conservation of volume and momentum (Saint Venant equations), with a finite difference method with constant grid spacing in both directions (x,y). Numerical simulation cover two tide cycles each one of about 12h 15min.

Comparison between real and calculated values, in terms of maximum modulus of current velocity can be considered acceptable. The advantage of using a numerical model is that values of the unknowns (surface elevation and the two components of the velocity vector) are determined in all the points of the set grid of the modulated area, with a grid space of 20m. These results are necessary for a realistic simulation of vessels manoeuvring.

Palabras clave: Corrientes, Ría, Ferrol, Modelación, Numérica.

1. INTRODUCCIÓN

La comparación entre los resultados procedentes de la medidas reales efectuadas entre Febrero y Abril de 2006, con los procedentes de la modelación numérica realizada, se ha centrado en tres puntos próximos a la entrada del área modelada: Bajo del Zorrón (zona Z0 de la figura 4) y en otros dos ubicados a lo largo de la sección transversal exterior entre Cabo Prioriño Chico y Punta Coitelada (S2 en la figura 4), en los que se instalaron sendos correntímetros y donde el parámetro significativo ha sido el máximo módulo del vector velocidad de corrientes.

Posteriormente, la comparación entre resultados del campo de corrientes, tanto en estado llenante como en va-

ciente, se ha hecho extensiva a las secciones transversales consideradas a lo largo de la ría (figura 4), en las que se obtuvieron, en profundidad, el campo de velocidades. Dado que el modelo numérico utilizado considera las ecuaciones integradas en profundidad, la comparación entre velocidades reales medidas y calculadas, sólo se puede hacer de forma promediada en profundidad.

A nivel de modelo numérico, los ensayos o simulaciones numéricas realizadas, se han llevado a cabo tanto para la configuración actual de la ría, que contempla el nuevo puerto exterior, como para la situación anterior sin la nueva obra, con el fin de detectar las diferencias en el comportamiento hidrodinámico, entre ambas situaciones, habida cuenta de la disminución de longitud de la embocadura de la ría, debida a la presencia del nuevo dique de abrigo de longitud 900 m.

(*) Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX. 28026 Madrid.

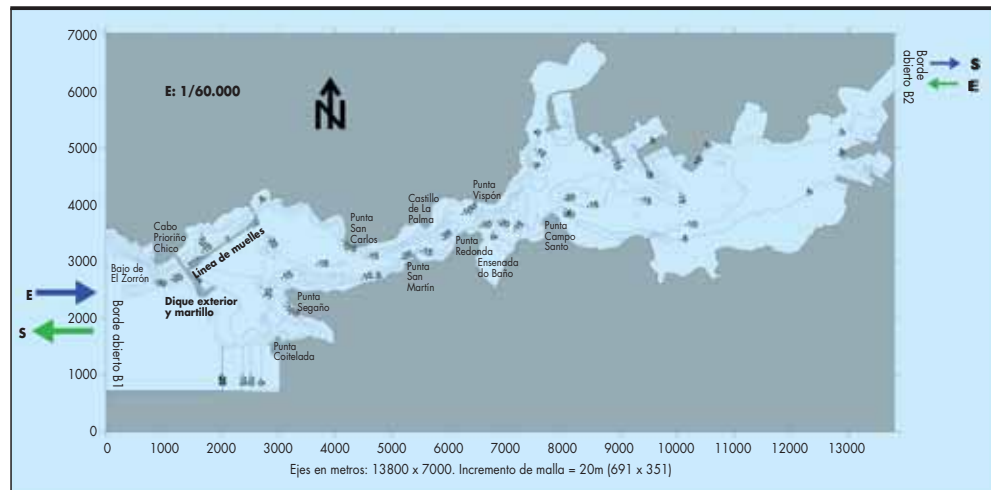


FIGURA 1. Batimetría, en bajamar, y contorno del nuevo Puerto Exterior.

También, a nivel de modelo numérico, se han efectuado simulaciones en cuatro condiciones de viento, constante en el espacio y en el tiempo, de componente Oeste: Sin viento, con viento de 10 m/s (36 km/h), con 14 m/s (50 km/h) y con 30 m/s (108 km/h). Se ha considerado para la fuerza inducida por el viento, la expresión (proporcional al cuadrado de la velocidad): la expresión: $C_v \rho_{aire} / \rho_{agua} v^2$, donde C_v es el coeficiente de fricción por viento, que para el rango de velocidades considerada se ha supuesto de valor 0.0026, el cociente entre densidades del aire y el agua es $\approx 1/800$ y v es la velocidad del viento (m/s), a 10m sobre la superficie del agua, considerada en cada caso.

Los resultados, relativos a estos ensayos, arrojan, en general, variaciones no significativas en el campo de corrientes, notándose más el efecto del viento, en las secciones exteriores (anteriores al canal), que experimentan un ligero aumento en

llenante conforme aumenta la velocidad del viento y, lógicamente, disminuyen, también ligeramente, en vaciante.

La duración de los ensayos abarca prácticamente dos ciclos de marea (típicamente semidiurna de periodo $T=12\text{ h } 25\text{ m}$), con lo que se han reproducido los fenómenos relacionados con corrientes residuales, que aparecen de forma real debido al complejo contorno de la ría y a la variación en profundidad en algunas de las secciones transversales de la misma.

2. DESCRIPCIÓN

La modelación matemática de la zona abarca toda la Ría de Ferrol (exterior, entre Cabo Prioriño Chico y Punta de San Carlos junto a la entrada al Canal o zona de mayor estrechamiento, Canal y finalmente, zona de ensanche del puerto interior actual). En la figura 1 puede observarse el área mo-

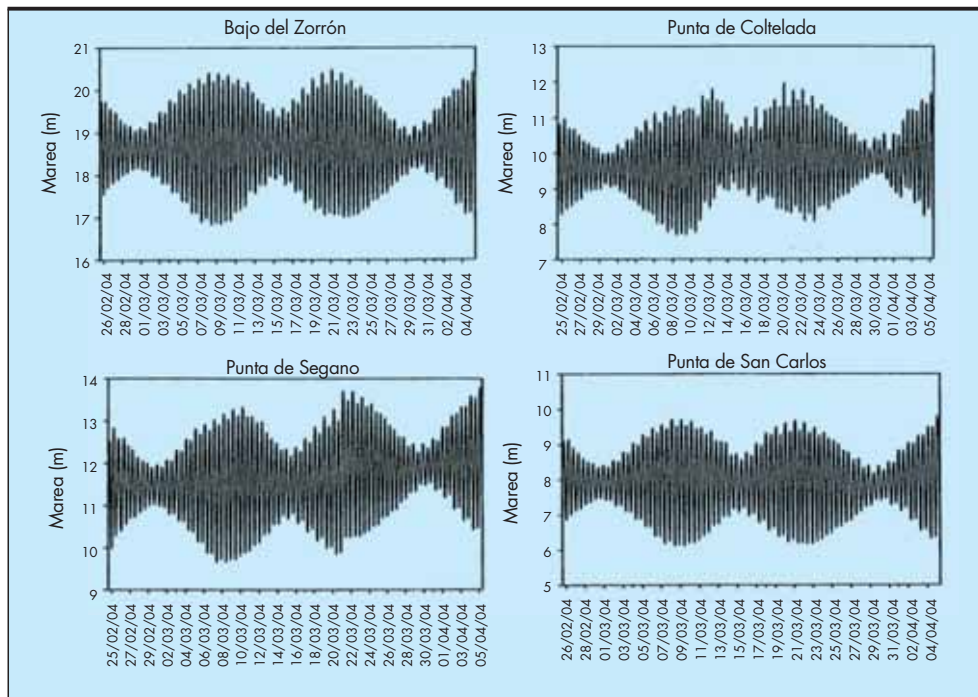


FIGURA 2.

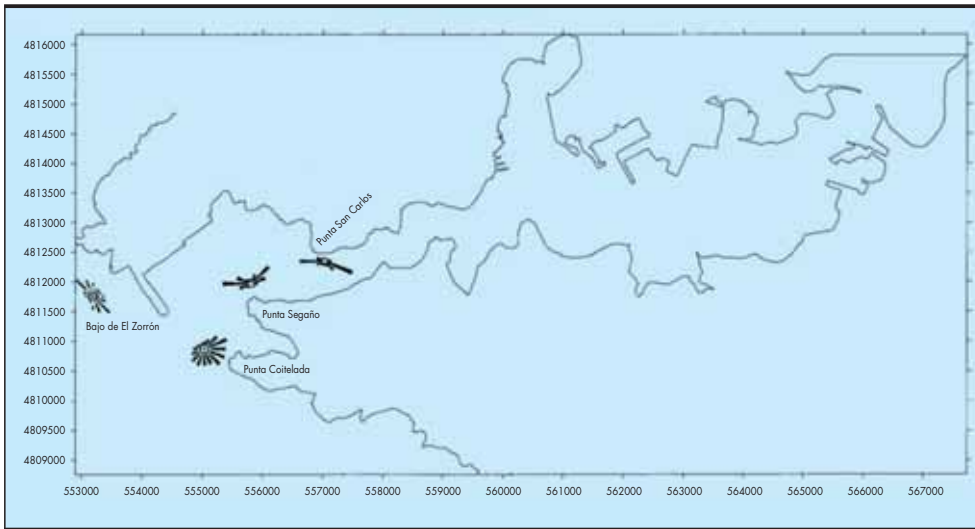


FIGURA 3. Ría de Ferrol. Rosas de corrientes.

delada que incluye el nuevo puerto exterior y la batimetría de la ría en bajamar, y en la que pueden verse los dos bordes abiertos (Oeste o borde B1 y Este o borde B2), sincronizados, ambos en marea entrante o en marea saliente con un desfase, de acuerdo con las medidas realizadas, de unos 10 minutos. En la figura 2 aparece la evolución de las mareas durante la campaña de toma de datos (la máximas mareas vivas tienen lugar en torno del 9 y 22 de Marzo), en 4 puntos diferentes: Bajo del Zorrón, Punta Coitelada, Punta de Segaña y Punta de San Carlos. A partir de dicha evolución se ha considerado, una carrera máxima astronómica de $CM = 4.5m$ que junto al área, A , de la zona de agua ha permitido definir la onda de marea que accede al modelo, de tipo sinusoidal, de periodo $T = 12 h 25 m$ y amplitudes, o caudal pico, q_p , según cada uno de los dos bordes abiertos:

Ley de caudal o forma de la onda en función del tiempo t :

$$q(t) = q_p \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T}(t - \varphi)\right), \quad t > 0$$

donde φ es el desfase (0 en B1 y 600s en B2).

Caudal de pico o amplitud de la onda de marea:

$$q_p = \frac{\pi \cdot CM \cdot A}{T}$$

que arroja los valores de: $q_p = 9.957 m^3/s$, para el borde B1 y de: $q_p = 1.739 m^3/s$, para B2.

En la figura 3 se aprecian los puntos de ubicación de los correntímetros durante la campaña, que coinciden con algunos de los puntos seleccionados para la comparación de datos medidos y calculados, y en la figura 4 se observan dichos

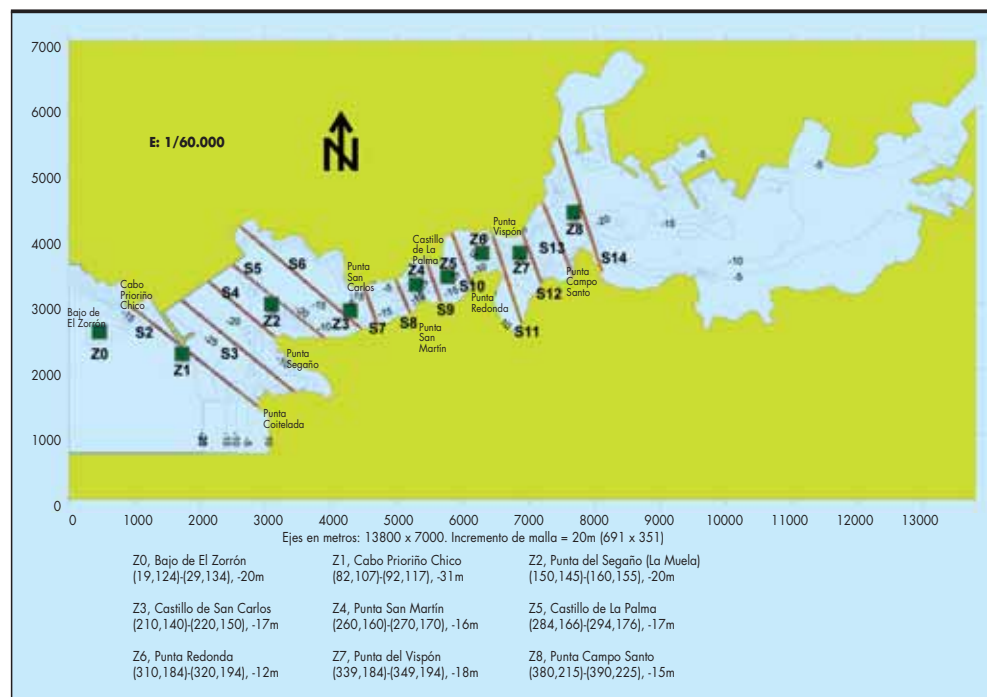


FIGURA 4. Ría de Ferrol. Secciones y zonas de control de la velocidad de corrientes Configuración con el Puerto Exterior, en bajamar.

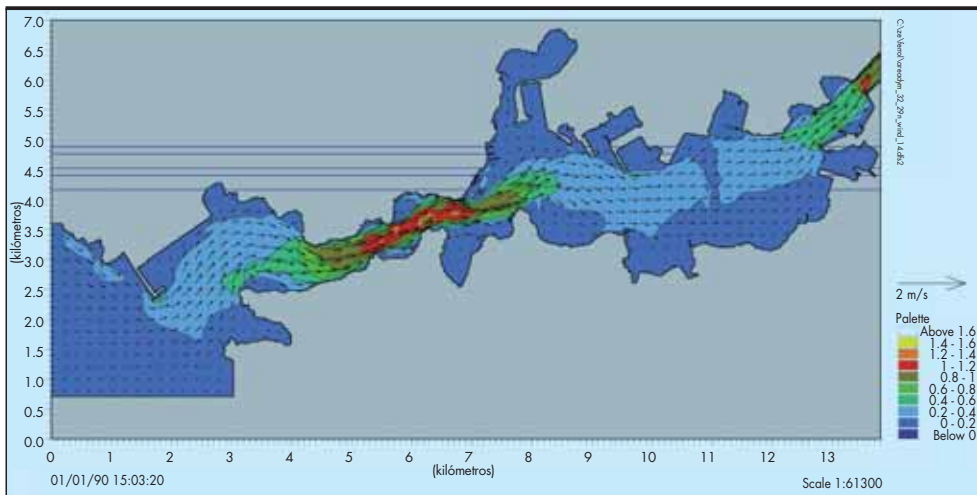


FIGURA 5.

puntos y las secciones transversales a transeptos en los que se obtuvo la distribución en profundidad del campo de corrientes, mediante equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) para plataforma fija y móvil.

El modelo matemático utilizado (módulo hidrodinámico del MIKE-21 del Danish Hydraulic Institute), hace uso de las ecuaciones de la hidrodinámica: Conservación de masa o de continuidad (escalar) y conservación de la cantidad de movimiento (vectorial bidimensional), integradas en profundidad asumiendo un perfil de distribución de velocidades en profundidad, y plantea un problema de evolución en las tres incógnitas: ζ , sobrelevación superficial y componentes del vector horizontal flujo de agua, según dos ejes cartesianos X e Y : p y q ($m^3/m/s$) o de forma equivalente las componentes del vector velocidad de partículas promediadas en profundidad: \bar{u} y \bar{v} .

El método numérico utilizado para la resolución del problema es el de diferencias finitas de tipo explícito en el tiempo, con un incremento de malla en ambas direcciones de: $\Delta x = \Delta y = 20$ m y un incremento de tiempo: $\Delta t = 20$ s, para los que el método resultante es estable y por tanto convergente.

La malla discreta de cálculo, es la que aparece en la figura 4, de 691 x 351 nodos en las direcciones de los ejes X e Y res-

pectivamente, realizada con un método de interpolación tipo Kriging. El número total de pasos temporales con el incremento de t especificado, (método de resolución paso a paso del tiempo), corresponde a un tiempo de simulación numérica que cubre dos periodos de la onda de marea (4470 pasos).

Para la calibración del modelo, con base a los datos obtenidos durante la campaña de campo, se ha actuado de modo principal sobre el valor de resistencia o fricción por fondo, mediante la ley de esfuerzos tangenciales:

$$\tau_{bf} = \frac{g}{C_z^2} (h + \zeta) |\vec{u}| \vec{u}$$

donde \vec{u} es el vector velocidad horizontal, C_z el coeficiente de Chezy, h la profundidad, ζ la sobrelevación superficial y g la constante gravitatoria.

Esta actuación se ha centrado, como ya se ha comentado, sobre tres puntos de la zona exterior (bajo del Zorrón, Z0, y otros 2 sobre la sección transversal S2: punto próximo al morro del nuevo dique de abrigo y punto en las proximidades de Punta Coitelada), donde se instalaron sendos correntímetros.

Los diferentes resultados obtenidos, fruto de las diferentes simulaciones numéricas, se reagrupan en gráficas de distintos tipos, relativas a:

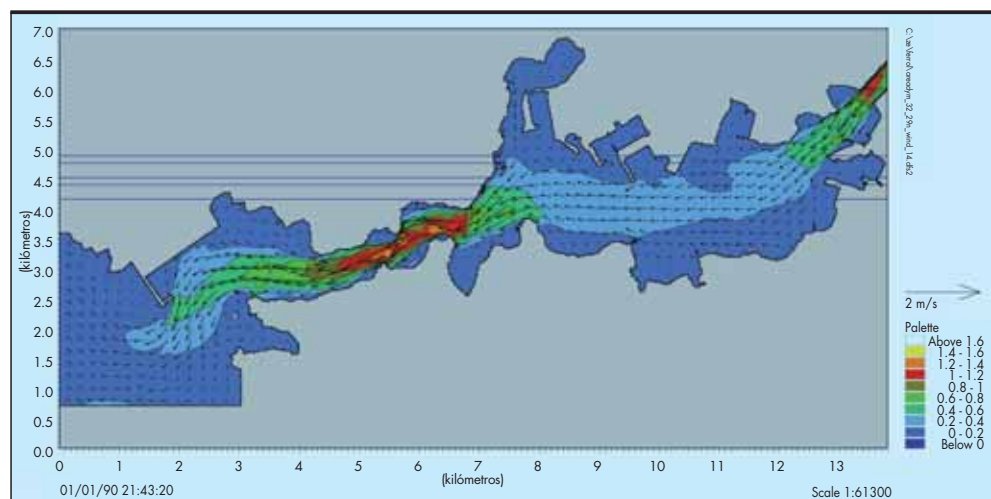


FIGURA 6.

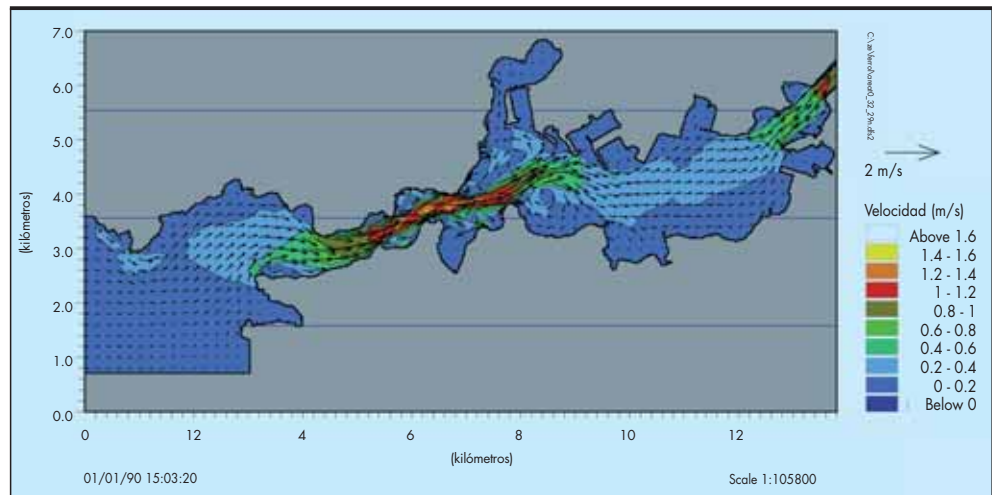


FIGURA 7.

1. Campo de corrientes en toda la zona modelada. En las figuras 5 y 6 pueden verse 2 ejemplos correspondientes a dos instantes de máxima velocidad en llenante y en vaciante en una simulación, sin viento, que contempla el nuevo puerto. Mediante una escala cromática pueden apreciarse los valores máximos del módulo de la velocidad que, lógicamente, se concentran en la parte del Canal o zona del estrechamiento de la ría. También se han

incluido los resultados gráficos correspondientes a una simulación con la configuración anterior a la construcción del puerto exterior y sin viento. El instante corresponde a un máximo en llenante (figura 7).
2. Evolución del módulo de velocidad, en los puntos señalados en la figura 4, durante dos ciclos de marea. Como ejemplo, en la figura 8 puede observarse dicha evolución, correspondiente a la configuración con el nuevo puerto y

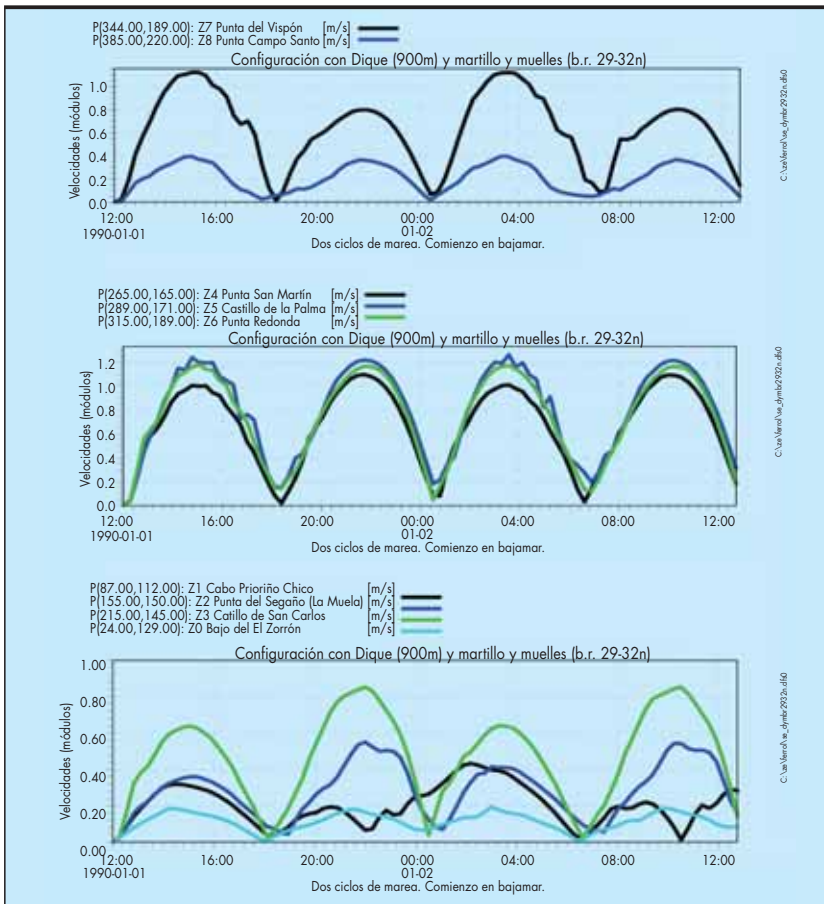


FIGURA 8.

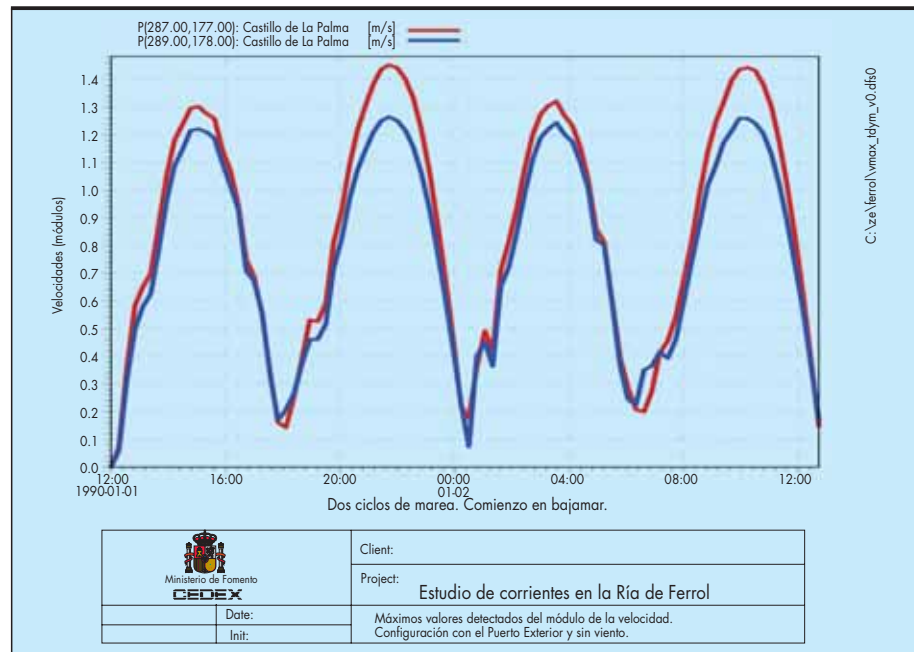


FIGURA 9.

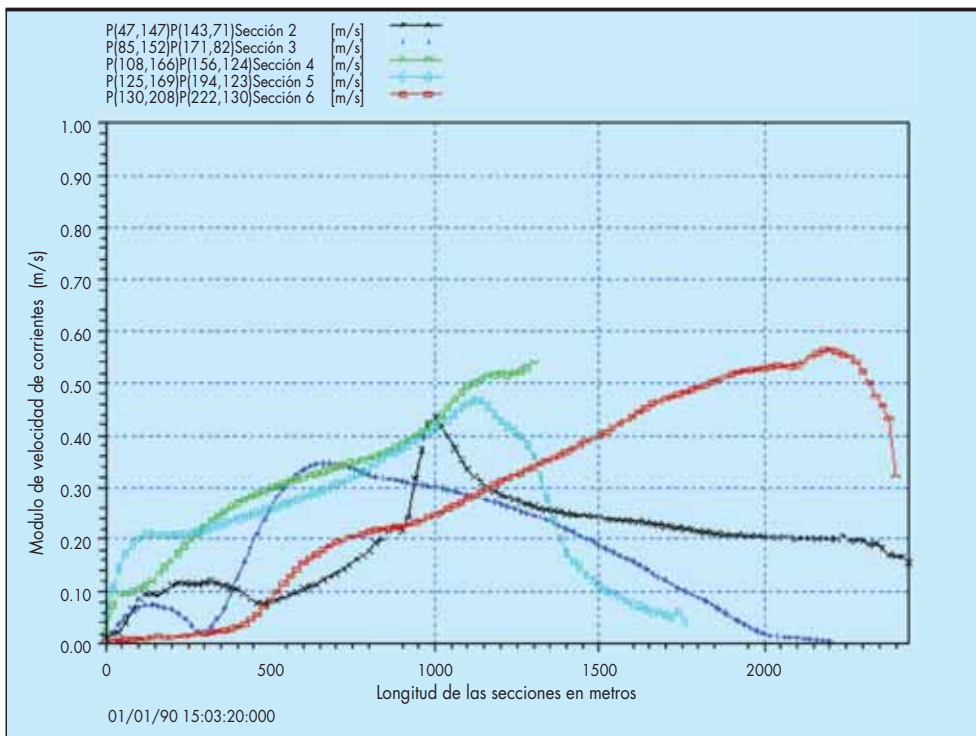


FIGURA 10.

sin considerar viento. Los máximos valores de dicho módulo aparecen destacados en la figura 9 y corresponden a dos puntos próximos al Castillo de La Palma.

3. Distribución del módulo de la velocidad de corriente a lo largo de las diferentes secciones transversales a la ría consideradas. Como ejemplo se incluyen las gráficas correspondientes a las secciones exteriores (S2 a S6, antes del Canal), en un instante en llenante y otro en vaciante, figuras 10 y 11 respectivamente, y a las seccio-

nes interiores (S7 a S12, zona del Canal), igualmente en 2 instantes uno en llenante (figura 12) y otro en vaciante (figura 13).

3. RESULTADOS

La comparación entre los resultados medidos y los calculados con la modelación numérica, se realiza teniendo en cuenta, como ya se ha comentado, que estos últimos corres-

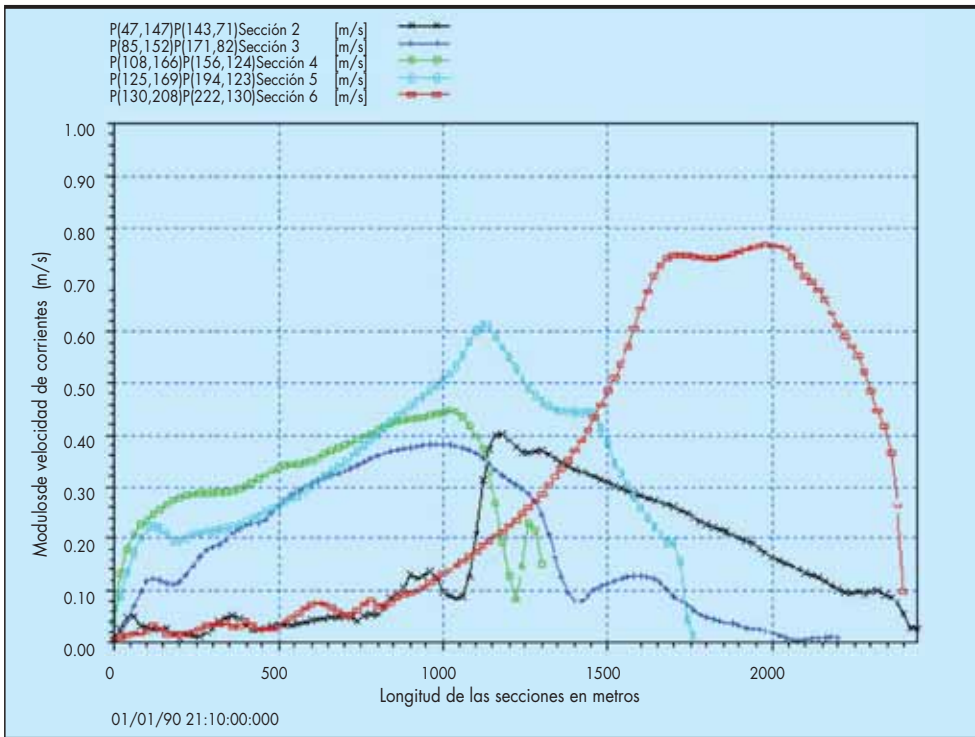


FIGURA 11.

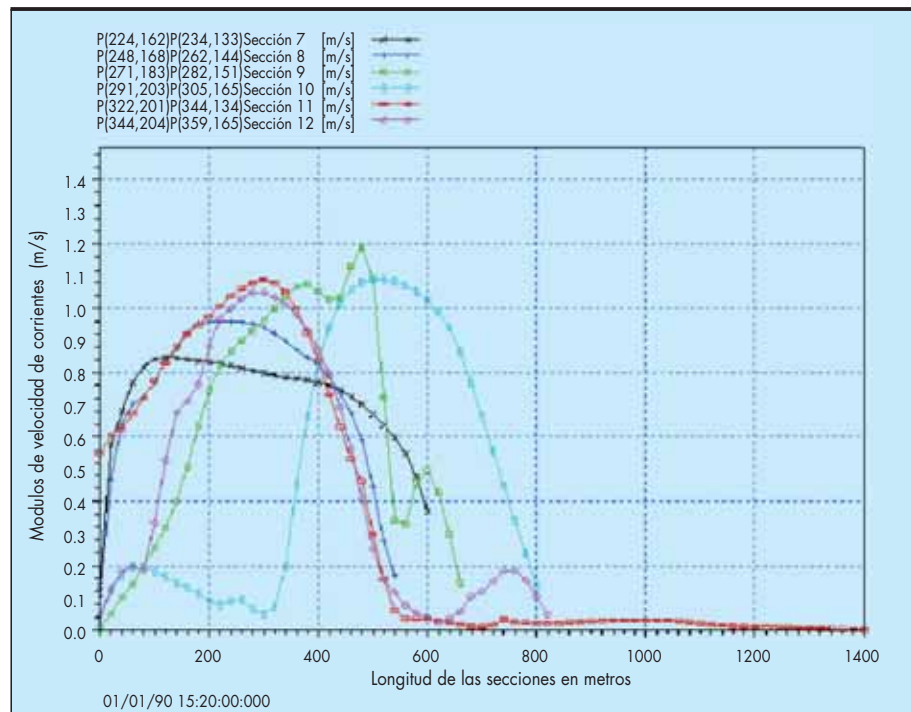


FIGURA 12.

ponden a valores medios resultado de una integración en profundidad, mientras que los primeros, y en referencia a los valores máximos del módulo de la velocidad, corresponden a valores obtenidos a una cierta profundidad. En la zona exterior al Canal, dichos máximos pueden corresponder a capas profundas mientras que en la zona del Canal,

debido al estrechamiento, se produce una homogeneización, sobretodo en la zona central, con lo que los valores referidos son representativos de toda la capa de agua.

La validación de los resultados numéricos calculados, realizada sobre los tres puntos, donde fueron ubicados los equipos autónomos (correntímetros): Z0, en el bajo del Zo-

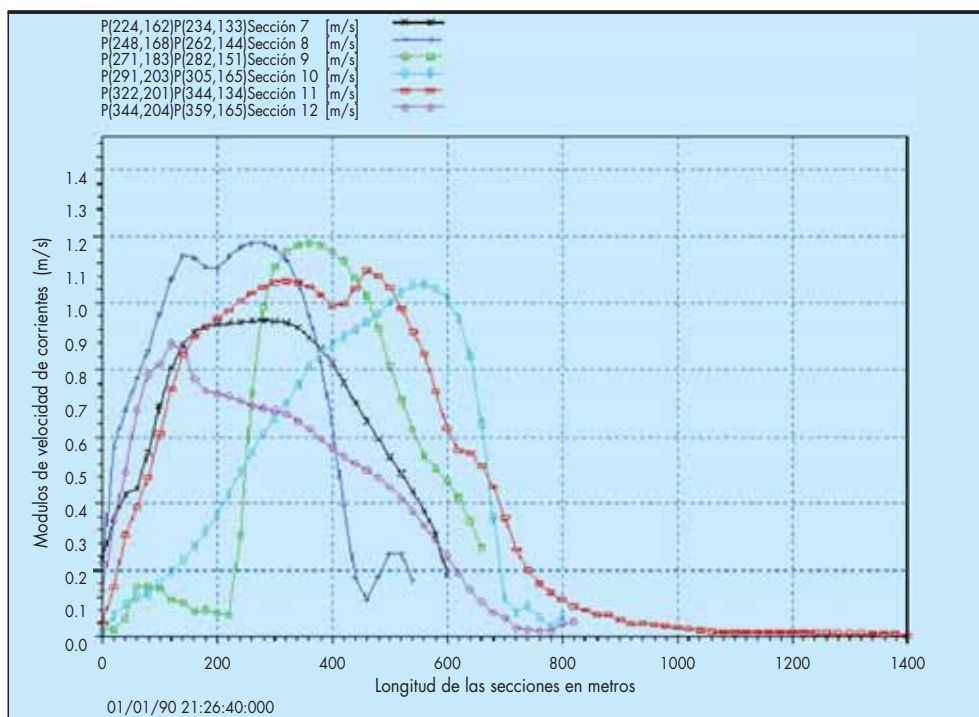


FIGURA 13.

rrón; Z1, junto al morro del dique de abrigo y punto en las proximidades de Punta Coitelada, arrojan un buen acuerdo.

En concreto y respecto al máximo valor del módulo de la velocidad de corrientes, en el punto Z0 se midió un valor, en llenante, de 0.25 m/s frente al calculado de 0.20 m/s . Para el punto Z1 el máximo valor medido fue de 0.45 m/s frente al calculado de 0.44 m/s . Por último, para el punto junto a Punta Coitelada el máximo valor medido por el equipo instalado fue de 0.32 m/s y el calculado de 0.25 m/s .

Otros valores de referencia corresponden a los obtenidos sobre las secciones transversales que pueden resumirse así:

1. Sección 4, Punta de Segaña (correntímetro, con un valor máximo medido de 0.70 m/s y 0.55 m/s calculado).
2. Sección 7, Punta de San Carlos (correntímetro), el valor máximo medido en llenante fue de 0.81 m/s frente al valor calculado de 0.85 m/s .
3. Sección 8, poco antes de Punta San Martín, con un valor máximo medido, en vaciante de 1.27 m/s , frente a 1.20 m/s calculado.
4. Sección 11, Punta Redonda en su zona central, con un máximo en mareas vivas y en llenante de 1.25 m/s , frente al calculado de 1.10 m/s .
5. Sección 12, Punta Vispón, con un máximo medido de valor 1.3 m/s y un valor calculado de 1.10 m/s .

El buen acuerdo alcanzado, en general, entre los valores medidos y los calculados con la modelación numérica, ha permitido extrapolar los resultados y hacerlos extensivos a toda la ría de Ferrol para caracterizar de un modo aceptable el comportamiento hidrodinámico de la misma frente a las corrientes de marea.

Dada las características físicas de la Ría, dicho comportamiento es complejo y así en el estudio realizado a partir de los datos de campo, se comprobó como el carácter bipolar de la dirección de las corrientes (180° de llenante a vaciante), en algunas zonas no resulta tan marcado y aparecen movi-

mientos rotacionales debido, en algunos casos a la proximidad del contorno y en otros a la variación de la profundidad a lo largo de las distintas secciones transversales. Estos fenómenos también quedan reflejados en los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas.

En concreto en la sección 12, desde Punta Vispón hasta pasada la Ensenada Do Baño y en llenante, se comprobó como la margen derecha, en sus últimos 200 m permanece en estado de vaciante. Este hecho también ha quedado reflejado en la modelación numérica. Así, en la figura 14, donde aparecen en un instante de llenante, las componentes según los ejes X e Y de la velocidad de corrientes, se observa como la componente según X cambia de signo en sus últimos 200 m, lo que supone un cambio en la dirección de la corriente que pasa de llenante a vaciante en dicho tramo.

Por otra parte mediante la modelación numérica ha sido posible comparar el comportamiento hidrodinámico de la ría al pasar de la configuración anterior, sin la nueva obra, con la configuración actual que contempla las nuevas instalaciones portuarias exteriores. Puede decirse, en términos generales, que en la zona de máximo estrechamiento o zona del Canal, la velocidad de las corrientes disminuye en torno de un 15%, al considerar la nueva obra, respecto de la situación anterior. Sin embargo en la zona exterior al Canal, las corrientes aumentan ligeramente respecto de dicha situación anterior, debido al encauzamiento que, para las sucesivas ondas de marea, supone el estrechamiento de la Ría entre el morro del nuevo dique y Punta Coitelada. Este efecto tiende a atenuarse cuando al marea se adentra hacia la zona del canal en Punta de San Carlos.

4. CONCLUSIONES

Como resumen del análisis comparativo entre los valores medidos durante la campaña de toma de datos en la Ría de Ferrol y los calculados mediante una modelación matemática de tipo 2D, relativos a las corrientes provocadas por las ondas de marea de la zona, es posible extraer las siguientes conclusiones:

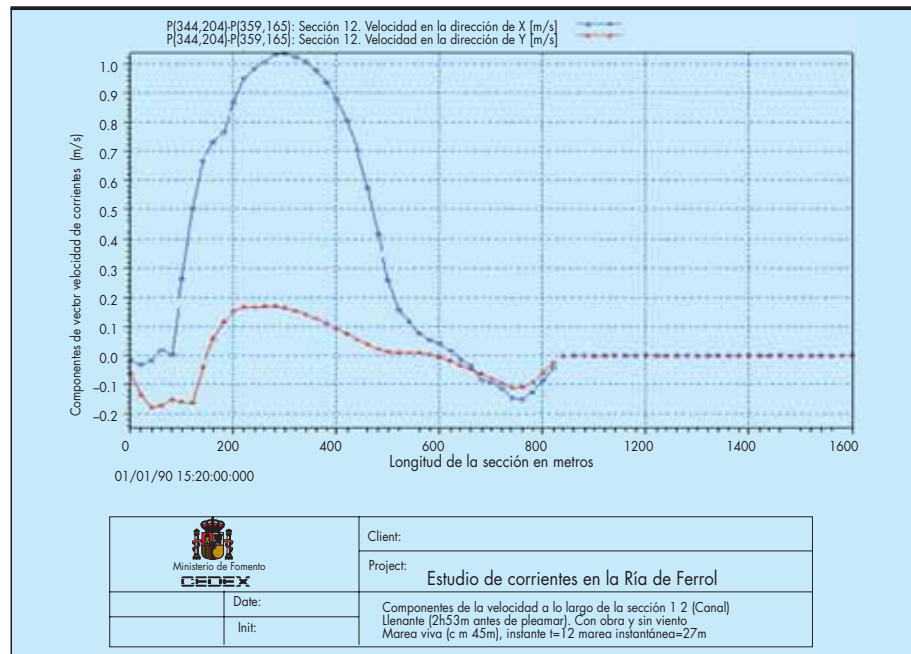


FIGURA 14.

1. La modelación matemática y la resolución numérica mediante un método de diferencias finitas de un problema hidrodinámico, como el aquí presentado, resulta ser una buena herramienta para el conocimiento aproximado de las diferentes variables que intervienen en el problema planteado de evolución en el tiempo. Los resultados alcanzados en este estudio así lo han confirmado.
2. La validación de los resultados numéricos con datos precedentes de equipos instalados en puntos representativos del comportamiento hidrodinámico de la zona, es fundamental en un estudio de este tipo. Aquí, dicha validación se ha realizado sobre tres puntos de agua donde fueron instalados sendos correntímetros y la comparación de los resultados arrojados por el modelo numérico, con los valores reales medidos, se ha centrado en el valor máximo del módulo de la velocidad de de corrientes detectada durante la campaña de toma de datos.
3. Es muy importante actuar sobre la modelación de las condiciones de contorno que, junto con las ecuaciones que rigen el problema de evolución en el tiempo, en el interior del dominio, y las condiciones iniciales, determinan una adecuada aproximación al fenómeno real que trata de reproducirse. En concreto, para este estudio, también se ha hecho hincapié en el término adicional que representa a las fuerzas de resistencia o fricción por fondo, simuladas para, este caso, mediante el coeficiente de Chezy. Se ha ido ajustando su valor, con diferentes simulaciones numéricas, hasta conseguir que los valores máximos calculados, del módulo de velocidad, en los tres puntos de referencia mencionados, se aproximen lo más posible a los homólogos medidos por los equipos instalados.
4. La gran ventaja que suponen los modelos numéricos es que, una vez validados con medidas reales en ciertos puntos de agua, su aplicación puede hacerse extensiva a toda la zona modelada, con una cierta garantía de éxito en las predicciones alcanzadas.
5. En cualquier caso, es necesario seguir profundizando en el conocimiento de los diferentes fenómenos físicos que

tratan de reproducirse y en establecer del modo más preciso posible, las ecuaciones que los reflejan. Es necesario, así mismo, efectuar una adecuada discretización de la geometría del entorno modelado y utilizar un paso o incremento de la variable tiempo suficiente para, por un lado conseguir que el método sea consistente y estable, y por tanto convergente, y por otro, que el error de truncamiento de los operadores en diferencias, que sustituyen a los operadores diferenciales que rigen el problema, sea “pequeño” en función de los incrementos utilizados.

6. Por último, en términos del cálculo efectivo en la modelación numérica, es preciso conseguir que el error acumulado estimado, en el proceso paso a paso en el tiempo, tienda a disminuir, lo que en Matemáticas se define como la estabilidad absoluta del método para los incrementos concretos espaciales y de la variable tiempo utilizados.

5. RECONOCIMIENTOS

Departamento de instrumentación del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX, Madrid.) por los datos aportados, relativos a la campaña de campo y a su posterior tratamiento.

6. REFERENCIAS

- a) De la Rosa, E. Modelo Diferenciales y Numéricos en la Ingeniería, 1999, Bellisco, Madrid.
- b) Fletcher, C.A.J. Computational Techniques for Fluid Dynamics, 2ª ed., (Vol. I y II), 1991, Springer.
- c) García Mañes, M. Modelación numérica de la circulación en la Ría de Ferrol en base a los datos de campo obtenidos en el seguimiento ambiental. Informe CEDEX, Diciembre de 2004.
- d) Santas, J.C. y Martín, P. Control del programa de vigilancia ambiental en las obras de ampliación del puerto de Ferrol. Informe CEDEX, Julio de 2004.