

PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS EN SISTEMAS COSTEROS HISPANO-LUSOS

EDITADO POR:

RICARDO PREGO REBOREDO
del Instituto de Investigaciones Marinas, CSIC.

Y
JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ ÁLVAREZ
de la Facultad de Ciencias, Universidad de Vigo

Artículos basados en las comunicaciones orales presentadas al
VIII SEMINARIO IBÉRICO DE QUÍMICA MARINA
celebrado en Vigo del 10 al 12 de abril de 1996

PUBLICADO POR LA EXCMA. DIPUTACIÓN PROVINCIAL DE PONTEVEDRA
EN COLABORACIÓN CON EL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

PONTEVEDRA

1997

© EXCMA. DIPUTACIÓN DE PONTEVEDRA

MAQUETA E IMPRESIÓN:
IMPRENTA DIPUTACIÓN

EDITA:
EXCMA. DIPUTACIÓN DE PONTEVEDRA

DEPÓSITO LEGAL: PO-408/97
I.S.B.N.: 84-89690-27-8

APLICACIÓN DE UN MODELO 2D AL TRANSPORTE DE PARTÍCULAS EN LA BAHÍA DE A CORUÑA Montero, P.; Prego, R.; Gómez-Gesteira, M.; Neves, R.; Taboada, I. J.; & Pérez Villar, V.	131
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y EVOLUCIÓN ANUAL EN AL AGUA SUBMAREAL DE LOS HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS VERTIDOS POR EL "MAR EGEO" González, J. J.; Schultze, F.; Escáñez, J. & Cerqueira, E.M.	137
DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO DISUELTO EN LA RÍA DE VIGO Doval, M. D. & Pérez, F. F.	143
CUANTIFICACIÓN Y VARIACIÓN ANUAL DE CONGÉNERES INDIVIDUALES DE BIFENILOS POLICLORADOS (CBs), EN MEJILLÓN DE ROCA DE LA RÍA DE VIGO González-Quijano, A.; Fumega, I. & García, A.	147

APLICACIÓN DE UN MODELO 2D AL TRANSPORTE DE PARTÍCULAS EN LA BAHÍA DE A CORUÑA

Montero, P.¹; Prego, R.²; Gómez-Gesteira, M.¹; Neves, R.³; Taboada, J. J.¹ & Pérez-Villar, V.¹

Resumen

Se ha aplicado un modelo euleriano 2-D a la bahía de La Coruña (NO de España) para el modelado de su circulación y luego se le ha acoplado otro lagrangiano desarrollado para modelar el arrastre de partículas.

La circulación en la bahía está condicionada por un gran remolino horario central probablemente resultante de la posición del dique de abrigo del puerto, cuyo extremo es un nodo de corrientes. Las velocidades de marea varían de 0,1 a 0,2 m s⁻¹ y las residuales de 0,005 a 0,015 m s⁻¹. Las mayores corrientes residuales (>0,030 m s⁻¹) y de marea (1 m s⁻¹) tienen lugar en la desembocadura del río Mero. Los trazadores pasivos muestran como el agua del puerto es de renovación muy lenta y como los pequeños torbellinos en la zona interna próxima al estuario crean un área de retención de partículas. Cualquier material en suspensión procedente del río puede quedar retenido o bien incorporarse al giro central y seguirlo antes de abandonar la bahía de La Coruña.

Abstract

PARTICLE TRANSPORTS IN LA CORUÑA BAY USING A 2D MODEL

A 2D hydrodynamic model has been coupled with a particle tracking model to study the circulation and dispersion of pollutants in A Coruña Bay (NW, Spain).

The circulation is strongly dependent on the existence of a big central clockwise eddy generated by the dock Barrié de la Maza. Tidal velocities of 0.1- 0.2 ms⁻¹ and residual velocities of 0.005 - 0.015 ms⁻¹ were observed in the central part of the estuary, although bigger values can be attained near the River Mero mouth.

Passive tracers show a slow renovation rate in the harbor area. Besides, particles coming from the river area may either join the central eddy and leave the estuary or be temporarily trapped in the small eddies near the river mouth, delaying their incorporation to the central eddy and further way out of the estuary.

Introducción

Los modelos matemáticos, basados en la resolución numérica de ecuaciones diferenciales a través del uso de medios informáticos (Leendertse, 1967; Abbott et al, 1973; Runday, 1976; Falconer, 1984; Neves, 1985), se han convertido en una poderosa herramienta durante las últimas décadas para abordar estudios físicos de modelización costero. Un ejemplo de ello en la costa Atlántica Ibérica son las aplicaciones hechas para la circulación de la ría de Arosa por Pascual (1986) y recientemente por Montero *et al.* (1995), por Bermudez *et al.* (1991) para la contaminación por emisarios, y por Portela & Neves (1994) para el estuario del río Tajo.

La ría de A Coruña (Fig.1) es un área costera interesante para el modelado debido a la influencia urbana e industrial (Cosme y Prego, 1995). Es la menor del grupo de las tres Rías Altas gallegas situadas en el golfo Artabro. Ocupa una superficie de 24 km² y tiene una longitud de 6 km con un ancho en la boca de 3 km (Fig.1). En su margen izquierda se haya el puerto de A Coruña, protegido por el dique de abrigo "Barrié de la Maza" que divide a la ría en dos partes: una exterior con una profundidad media de 25 m y otra interior con 10 m. Ambas presentarían características hidrográficas diferentes según Cabanas *et al.* (1987): la interna estuárica y la externa oceánica. Sin embargo, su variación anual de salinidad muestra como la zona interna también se halla bajo una gran influencia oceánica (Varela *et al.*, 1994) ya que el aporte fluvial es muy bajo. El río Mero, que desemboca en su cabecera, se haya regulado por la presa de Eiras para suministro de agua potable, por lo cual su caudal medio mensual no suele exceder de 3 m³ s⁻¹. Por ello, desde el punto de vista hidrográfico, la ría de A Coruña en su totalidad se puede considerar como una bahía de dominio oceánico (Varela *et al.*, 1994) y, en consecuencia, no va a existir una gran estratificación vertical. Este hecho permite la utilización de un modelo bidimensional para la simulación de la corriente de marea y del río y, a partir de él, obtener el sistema de circulación en la bahía de A Coruña, que es el objetivo de este artículo.

¹ Grupo de Física No Lineal, Facultade de Físicas, Universidade de Santiago de Compostela, Campus Sur S/N, 15706-Santiago de Compostela, SPAIN. E-mail: usc@mpmv@cesga.es

² Instituto de Investigaciones Marinas, CSIC, Eduardo Cabello, 6, 36208-Vigo, SPAIN. E-mail: prego@iim.csic.es

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1906-Lisboa Codex, PORTUGAL. E-mail: meves@hidro1.ist.utl.pt

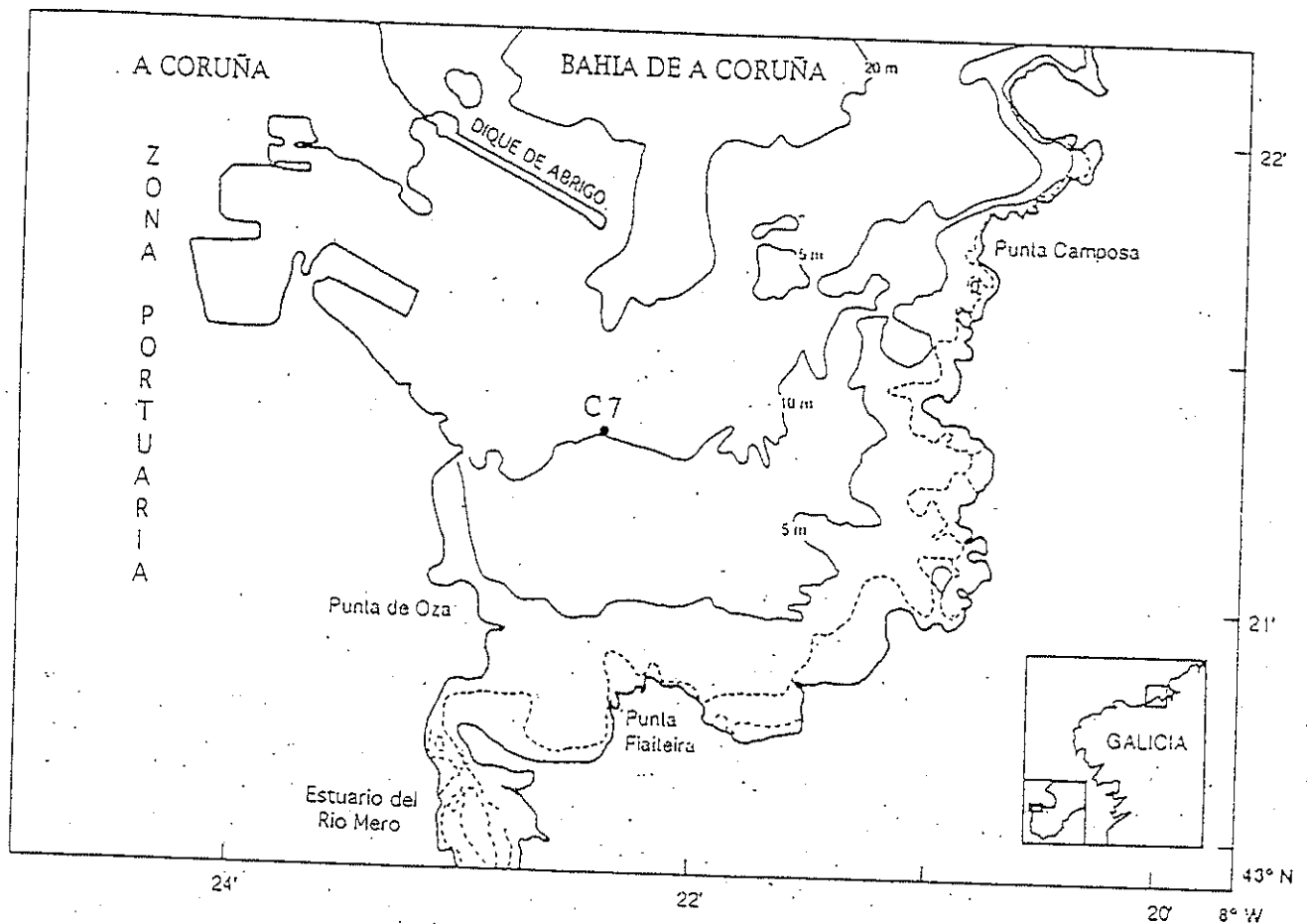


Figura 1. Batimetría de la bahía de La Coruña.

Figure. 1: Bathymetry of Ria of A Coruña

Aplicación Numérica

La resolución del sistema de ecuaciones diferenciales que rigen la circulación fue realizada en base al modelo MOHID el cual simula la circulación de la marea y los aportes fluviales en estuarios y zonas costeras. Es un modelo euleriano basado en una generalización del modelo 2-D desarrollado para el estuario del Sado por Neves (1985). Se utiliza el método de diferencias finitas y un esquema de discretización Alternativy Disection Implicit (ADI) semiimplícito. Las condiciones de contorno se imponen a través de los armónicos de la elevación de la superficie libre en la frontera abierta al océano y en la frontera fluvial se le acopla un modelo 1-D para la simulación de los ríos a los que a su vez se les atribuye un caudal.

La malla de cálculo que se ha utilizado para el estudio de la bahía de A Coruña posee un paso espacial constante de 50 m, orientada al Norte con 113 puntos

en la dirección Sur/Norte y 104 puntos en la dirección Este/Oeste. El paso temporal escogido, o tiempo en cada iteración de cálculo, fue de 25 s. Con el modelo 1-D se ha simulado el área correspondiente al río Mero a través de 14 células de anchura y longitud variable.

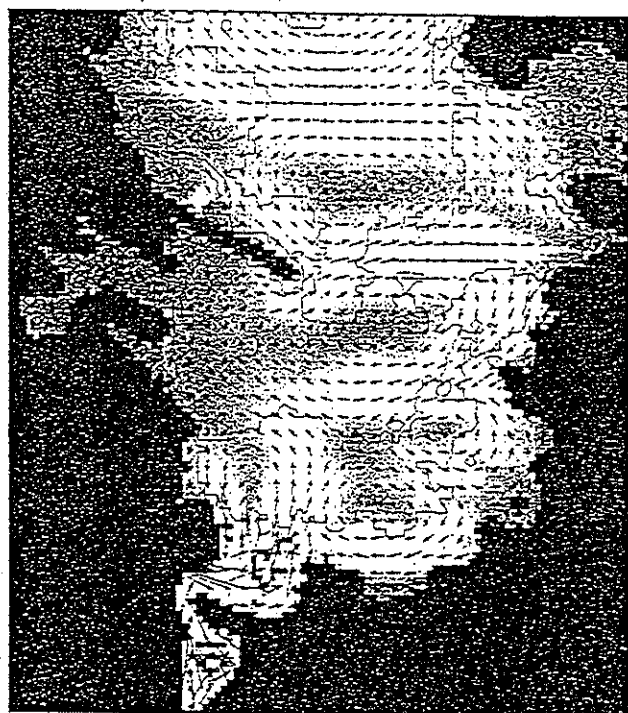
Las condiciones de frontera impuestas al modelo fueron, por una parte, la elevación de la marea en la frontera abierta al océano y, por otra parte, el caudal del río Mero con el modelo 1-D acoplado al 2-D. La elevación de la marea en la frontera abierta fue calculada mediante los armónicos de la marea obtenidos por el Instituto Hidrográfico de la Marina, mientras que el caudal del río Mero se obtuvo de Varela *et al.* (1994).

Resultados y Discusión

A fin de definir la circulación en la bahía de A Coruña se simula con el modelo el efecto de la marea y del río Mero en el caso de mayor circulación posible,

esto es, cuando se manifestarían más fácilmente las pautas de movimiento del agua dentro de la bahía. Corresponde a una situación de marea viva y de mayor caudal del río Mero. Se escogió, dentro de la información de que se dispone, el año 1993, que se puede considerar normal de acuerdo con su pluviometría, y el mes de octubre, pues presentó el máximo caudal medio ($8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en ese año.

Realizada la simulación, el resultado se muestra en la Fig. 2. donde los campos de velocidades se obtuvieron para un ciclo completo de marea. Es



0.005 0.015 0.025
m/s

Figura 2. Campo de corrientes para mareas vivas y mayor caudal fluvial. a) 3 h. antes de la Pleamar; b) Pleamar; c) 3 h. después de la Pleamar; d) Bajamar.

Figure 2: Tidal current corresponding to October 1993 (river Mero caudal, $8 \text{ m}^3/\text{s}$) during spring tide. a) 3 h. before high tide; b) 3 h. after high tide; d) 6 h. after high tide.

importante observar como el extremo del dique de abrigo actúa como un nodo sobre la corriente entrante en marea creciente o saliente en marea decreciente. Como era de esperar, los módulos más altos se alcanzan en el canal de desembocadura del río Mero,

con valores en algunos casos superiores a 1 m s^{-1} . En el resto de la bahía las velocidades mayores ocurren en la parte central, tanto en marea ascendente (Fig. 3a) como descendente (Fig. 3c), y son del orden de $0,1$ a $0,2 \text{ m s}^{-1}$, semejantes a las observadas en estaciones de 9 y 19 m de profundidad en el canal de la Ría de Arosa (Pascual y Calpena, 1985). Por el contrario las menores corrientes, inferiores a $0,03 \text{ m s}^{-1}$, ocurren durante la pleamar y bajamar (Fig. 3b y d) y en las zonas portuarias (Fig. 2). El interior del puerto debe tener, por ello, un agua estancada de lenta renovación.

Circulación residual

Para obtener información del intercambio de agua dentro de la bahía y con el exterior hay que disponer del transporte neto de agua. Ello viene dado por la corriente residual, que se debe al acoplamiento no lineal de los modos de la marea, al río, y a las condiciones de contorno. Se ha calculado a partir de los campos de velocidades durante el mes de octubre de 1993 y el resultado se muestra en la Fig. 3.

El patrón de la circulación residual en la bahía es claro: está condicionado por el gran remolino central en sentido horario (con una corriente de $0,005$ a $0,015 \text{ m s}^{-1}$), originado por el dique de abrigo del puerto. Entre él y la desembocadura del río existen varios vórtices menores asociados con rango de velocidades semejante. La mayor corriente se produce en el canal de desembocadura del estuario, con un valor residual saliente superior a $0,030 \text{ m s}^{-1}$. En la parte externa de la bahía, aguas afuera del dique, la dinámica está fuertemente influenciada por las condiciones de contorno impuestas, por lo que los resultados son poco fiables. Los resultados obtenidos para las velocidades residuales en la bahía de A Coruña son parecidos a los que existen en la ría de Vigo (Prego y Fraga, 1992) y en otras rías (Prego, 1990) cuando los aportes fluviales son bajos, lo que confirma que la bahía se halla bajo una gran influencia oceánica.

Modelo de transporte de partículas

Una idea más completa de la circulación en la bahía, así como una información muy útil sobre el transporte de contaminantes, se obtiene con un modelo de transporte de partículas, el cual se aplica por primera vez en aguas gallegas.

Dicho transporte se describe con el módulo PARTIC, realizado por el IST de Lisboa (Neves y Martins, 1996) que se acopla al modelo MOHID inicial. Se trata de un modelo lagrangiano desarrollado para el arrastre de una sustancia. Estos modelos consisten, a diferencia de los eulerianos, en la

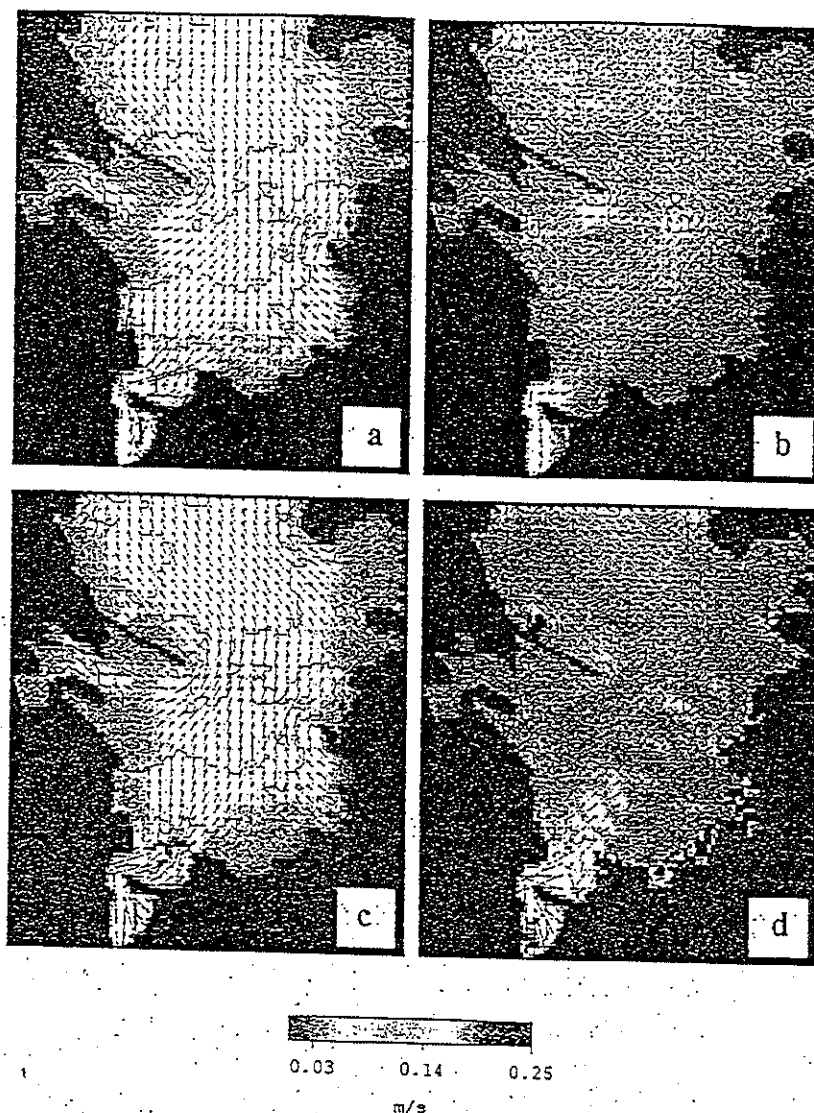


Figura 3: Corriente residual para octubre de 1993 tras 28 días.
 Figure 3: Residual current during a 8 days period. The situation corresponding to high caudal (October 1993)

atribución de ciertas propiedades a un punto material que se mueve con el arrastre de la corriente (Maier-Reimer, 1982). Las partículas lagrangianas son usadas aquí como simples trazadores pasivos, o sea, como partículas virtuales que se mueven en capas intermedias sin hundirse ni emerger a la superficie, lo suficientemente grandes para desprestigiar términos viscosos y lo suficientemente pequeñas para poder considerar que no interaccionan entre sí ni con el medio.

Con el objeto de aplicar el modelo de partículas se dividió la bahía de A Coruña en cinco regiones (Fig.4a), en base a que podían tener una dinámica

diferenciada de acuerdo con los resultados de corrientes obtenidos anteriormente. En ellas se situaron en el momento inicial las partículas a modo de trazadores pasivos (Fig.4a) y se llevó a cabo la simulación durante ocho días en momento de mareas vivas y mayor caudal fluvial. El momento inicial de la emisión de partículas se ha hecho coincidir con la pleamar. A partir de la situación final, se identifican los distintos intercambios entre las regiones de origen (Fig.4b).

Los resultados de la emisión de trazadores desde las cinco regiones de la bahía muestran de manera clara el efecto de las corrientes: a) en el caso del agua

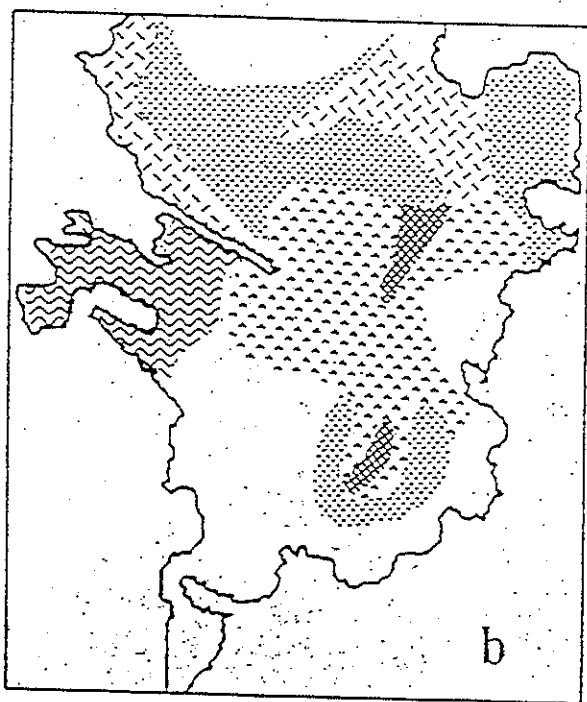
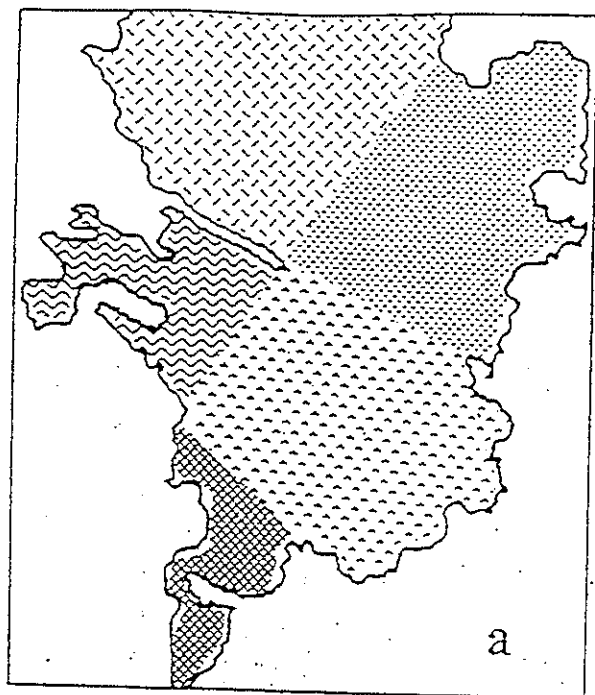


Figura 4:
Transporte de partículas en el caso de mareas vivas y mayor caudal fluvial.

a) Cinco regiones iniciales para la emisión de trazadores.

b) Situación 8 días después.

Figure 4:
Initial boxes for passive tracers rejection (a), and evaluation of passive tracers 8 days after corresponding to high caudal and spring tide (b).

contenida en el puerto, la poca dispersión de las partículas verdes (Fig.4b) indica una renovación muy lenta; b) el dominio del remolino central sobre la dinámica de la bahía por la concentración de partículas azules (Fig.4b) y por la singular posición de las partículas de la región estuárica; c) estos trazadores rojos marcan el movimiento de las partículas provenientes del río, las cuales se incorporan al margen del vórtice central, se mueven hacia el dique de abrigo y salen por la orilla derecha; d) el intercambio de agua entre la parte interna y la externa se efectúa a través de toda la frontera, aunque es mayor por la margen derecha de la bahía; e) finalmente, la situación de las partículas al cabo de 16 ciclos de marea muestra como la circulación residual en la bahía está afectada en mayor medida por la corriente de la marea que por el aporte fluvial confirmando de nuevo que se trata de una bahía oceánica.

Conclusiones

El modelado 2-D de la bahía de La Coruña permite descubrir varias pautas significativas de su hidrografía:

La circulación residual en la bahía está condicionada por el gran vórtice horario central originado por la posición del dique de abrigo del puerto. La corriente residual se mueve por ambos lados del dique en sentido Este con un rango de velocidades comprendido entre $0,005$ a $0,015 \text{ m s}^{-1}$. Las mayor corriente residual (saliente $>0,030 \text{ m s}^{-1}$) ocurre en la desembocadura del río Mero.

La circulación de marea también se halla afectada por el citado dique, en cuyo extremo se sitúa un nodo de corrientes que oscilan de $0,1$ a $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Al igual que antes, el área próxima al río presenta las corrientes más rápidas en la bahía con valores en torno a 1 m s^{-1} .

La dispersión de partículas es alta en la desembocadura del río. El material en suspensión proveniente de esa zona u otras alledañas acaba incorporándose al vórtice central. Por el contrario, la materia en suspensión en el agua del puerto tiene una dispersión muy pequeña, puesto que sólo es intercambiada a través del arrastre tangencial del giro central. De acuerdo con el modelo dinámico de transporte de partículas, éstas, si no sedimentan, abandonan finalmente la bahía por su costa Este de modo preferente.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M.B., A. Damsgaard & G.S. Rodenhuis 1973. System 21, Jupiter. A design system for two-dimensional nearly-horizontal flows. *J. Hyd. Res.*, 1: 1-28.
- Bermúdez, A., A. Martínez & C. Rodríguez 1991. Un problème de controle ponctuel lié à l'emplacement optimal d'émissaires d'évacuation sous-marins. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, 1: 515-518.
- Cabanas J.M., M.T. Nunes, M.L. Iglesias, N. Gonzalez & R. Carballo 1987. Oceanografía de la bahía de La Coruña. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr*, 4; 21-28.
- Cosme A. & R. Prego 1995. Características generales de la ría de La Coruña y su cuenca fluvial. *Series de Química Oceanográfica*, 2: 25-47.
- Falconer, R.A. 1984. A mathematical model study of the flushing characteristic of a shallow tidal bay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, part 2, 77: 311-322.
- Leenderste, J.J. 1967. Aspects of a computational model for a long period wave propagation. Ph.D Thesis, Technische Hogeschool te Deldt, Netherlands, 165 pp.
- Mair-Reimer, E. & J. Sünderman 1982. On tracer methods in computational hydrodynamics. *Engineering Applications of Computational Hydraulics*, 1: 198-217.
- Montero, P., J.J. Taboada, M. Gómez-Gesteira, R. Prego & V. Pérez-Villar 1995. Modelado 3D de las Rías Gallegas. XXV Reunión Bienal de la RSEF: 55-56.
- Neves, R.J.J. 1985. Etude experimentale et modélisation mathématique des circulations transitoire et résiduelle dans l'Estuaire du Sado. Ph.D Thesis, Univ. Liège, Belgique.
- Neves, R.J.J. & F.A. Martins 1996. Modelação lagrangeana dos processos de transporte na Ria Formosa. Instituto Superior Tecnico, Lisboa (in press).
- Pascual J.R. & V. Galpena 1985. La corriente de marea en la Ría de Arosa (Galicia, España). *Revista de Geofísica*, 41: 149-158.
- Pascual, J.R. 1986. Modelos numéricos en la Ría de Arousa. Ph. D. Thesis, Univ. Complutense, Madrid, 156 pp.
- Portela, L. & R.J.J. Neves 1994. Numerical modelling suspended sediment transport in estuaries: A comparison between the Tagus (Portugal) and the Scheldt (The Hetherlands). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 28: 329-335.
- Prego R. 1990. Las sales nutrientes en las rías gallegas. *Informes Técnicos Scientia Mar.* 157; 33 pp.
- Prego R & F. Fraga 1992. A simple model to calculate the residual flows in a Spanish ria. *Hydrographic consequences in the ria of Vigo. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34: 603-615.
- Ronday, F. 1976. Mòdeles Hydrodynamiques. Project Mer, Rapport final, 3.
- Varela, M., R. Prego, M. Canle & J. Lorenzo 1994. The Ría de La Coruña, is hidrologically a ria?. *GAIA*, 8: 3-5.