

Estudio de la renovación de aguas en dársenas portuarias mediante modelo matemático

MARIA MONTERO ROMAN (*)

RESUMEN. La aplicación de un modelo matemático al estudio de la renovación en dársenas portuarias permite estimar de manera sencilla y, en cierto modo, empírica, un índice de renovación. La validez y la utilidad de este índice para distintos problemas se discute en el presente artículo. Como ejemplo de cálculo y aplicación, se exponen de forma resumida dos trabajos de diferente complejidad realizados en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

STUDY ON WATER REPLACEMENT IN HARBOUR BASINS USING A MATHEMATICAL MODEL

ABSTRACT. *Application of a numerical model to harbour basins renovation studies allows for simple and —in a sense— empirical estimation of a renovation rate. Its validity and usefulness for different problems is discussed in this article. As examples of calculation and application, two studies of different complexity carried out at CEDEX's Centro de Estudios de Puertos y Costas are summarized.*

0. INTRODUCCION

La acumulación de contaminantes de todo tipo en dársenas portuarias es un fenómeno muy frecuente, tanto más cuanto más cerradas (y, por tanto, más protegidas) sean éstas. Las consecuencias más habituales son los fuertes olores derivados de la degradación de materia orgánica en el medio y el asumido aspecto de suciedad y descuido de estas instalaciones.

La principal causa de la acumulación de sustancias es que el aporte de aguas residuales de distintas procedencias (domésticas, de sentinas, etc.) está casi siempre por encima de la capacidad de renovación del propio puerto, de algún modo consecuencia de la función de abrigo intrínseca al puerto, entre las aguas del interior y el exterior, casi siempre inferior al aporte de aguas residuales.

La determinación del *índice de renovación* de una dársena permitirá predecir la incidencia de futuros vertidos, la evolución de la situación actual ante un cambio en el ritmo de los aportes o la evaluación de posibles soluciones constructivas al problema de la escasa renovación.

En los últimos meses se han llevado a cabo en el Centro de Estudio de Puertos y Costas del CEDEX dos estudios de renovación mediante el modelo MIKE21. El

primero de ellos (1), en el puerto de Vigo («Limpieza de las dársenas de Bouzas», diciembre 1991), fue motivado por la voluntad de las autoridades del puerto de combatir el mal estado de las aguas de Bouzas mediante alguna obra que aumentase la tasa de intercambio. El segundo (2) formaba parte de otro, más amplio, sobre el futuro puerto de Zierbana, en la ría de Bilbao («Estudio de Corrientes en el Puerto de Zierbana», febrero 1992), y tuvo como origen la posibilidad de que fuera una zona de interés turístico, con las implicaciones que esto tiene.

Para el cálculo de los índices de renovación mediante modelo matemático, es necesario un planteamiento correcto del sistema hidrodinámico que posibilite alcanzar rápidamente la solución de equilibrio. En los dos casos estudiados, nos encontramos en el interior de una ría. Se aplicaron, por tanto, las condiciones para simular un comportamiento de onda estacionaria (3).

En el caso de Zierbana, la falta de datos impedía la simulación en una zona amplia y se tomó un área muy reducida que abarcaba únicamente la dársena y un pequeño tramo de prolongación del canal de entrada. En Bouzas, sin embargo, la disponibilidad de algunos datos de velocidad hizo posible una simulación más amplia y con más garantías. Podría hablarse de estos dos trabajos como de sucesivas aproximaciones, tanto por los diferentes grados de exactitud en la reproducción del régimen de corrientes como por las implicaciones en los fenómenos de transporte (esencialmente, pérdida de contaminante por los contornos).

(*) Licenciada en Ciencias Químicas. División de Contaminación Marítima y Costera Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (MOPT).

	ZONA MODELIZADA	CONDICIONES INICIALES	CONDICIONES DE CONTORNO
ZIERBANA	MALLA DE 2 KM ² QUE ABARCA LA DARSENA Y UNA PROLONGACION DEL CANAL DE ACCESO	MISMA ELEVACION INICIAL EN TODA LA SUPERFICIE	VARIACION TEMPORAL DEL NIVEL DEL AGUA EN EL UNICO CONTORNO ABIERTO
BOUZAS	MALLA DE CERCA DE 4 KM ² QUE CUBRE UNOS 2.000 M DE RIA	VARIACION SENOIDAL CON LA COORDENADA X DE LA ELEVACION INICIAL EN EL EXTERIOR DE LA DARSENA, Y LINEAL EN EL INTERIOR	VARIACION TEMPORAL DEL NIVEL DEL AGUA EN LOS DOS CONTORNOS ABIERTOS

TABLA 1. Resumen de condiciones aplicadas.

Una vez comprobado que las condiciones impuestas para la simulación hidrodinámica llevaban a la situación de equilibrio esperada, se realizaron las simulaciones de advección-dispersión y la estimación de los índices de renovación.

1. EL SISTEMA HIDRODINAMICO DE BOUZAS

El puerto de Vigo está situado en un tramo intermedio de la margen izquierda de la ría. La onda de marea se comporta como estacionaria, con lo que los máximos de velocidad se producen en las medias mareas, y la carrera de marea es mayor en el fondo de la ría que en su entrada. Si suponemos flujo unidimensional y profundidad h constante, la elevación sobre el nivel estático y la velocidad en cualquier punto y cualquier instante vendrán dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\eta(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

$$v(x, t) = A \left(\frac{C}{h}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

donde A es la amplitud en el fondo de la ría, x la distancia a este punto, c la celeridad, L la longitud de onda y T el período de marea. El orden de magnitud de la longitud de onda (10^5 m) es suficiente para garantizar que no habrá un nodo de la onda en el interior de la ría y, por tanto, que todos los puntos estarán en fase.

Existían datos de velocidad de un trabajo anterior (4) en varias secciones de la ría, y datos de elevaciones (Anuario de Mareas, 1991). Eligiendo como borde oeste de la malla una de las secciones del trabajo mencionado, y distintos valores estadísticos de elevación del nivel, se calcularon las variaciones senoidales de caudal correspondientes a los dos contornos abiertos (Oeste y Este), que encerraban un tramo de 2.000 m de ría (figura 1). Para el contorno Oeste, donde la velocidad máxima era conocida, se calculó el caudal máximo como producto de ésta y la sección transversal en media marea.

Para el contorno opuesto (Este), donde la velocidad era desconocida, el caudal pico se estimó a partir del volumen que debía desalojarse a través de él desde la

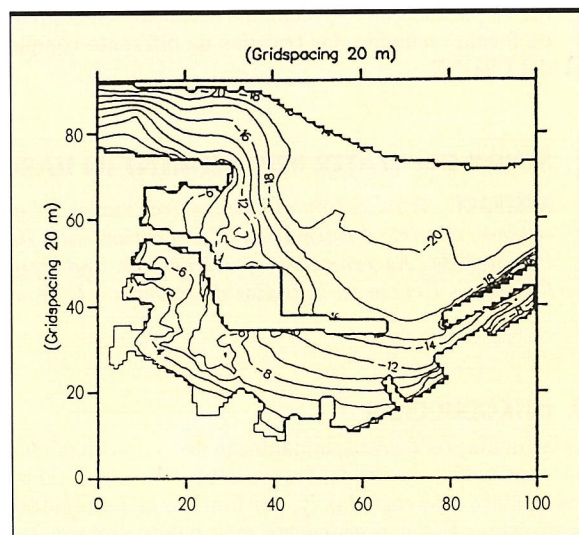


FIGURA 1. Batimetría digitalizada de la zona de Bouzas.

bajamar hasta la pleamar para que en la malla se alcanzase el nivel máximo de agua previsto:

$$V = \int_0^{T/2} [Q^W(t) - Q^E(t)] dt = (Q_{\max}^E - Q_{\max}^W) \frac{T}{\pi}$$

donde la variación del caudal en función del tiempo debía responder a una expresión del tipo:

$$Q(t) = Q_0 + Q_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Respecto de las condiciones iniciales, fue necesario considerar la forma senoidal de la superficie del agua en bajamar o pleamar, puesto que el modelo considera nula la velocidad al principio de la simulación.

Este conjunto de condiciones se aplicaron para distintas carreras de marea y distintas geometrías (figuras 2a y 2b, respectivamente) relacionadas con las diferentes soluciones propuestas al problema de la reno-

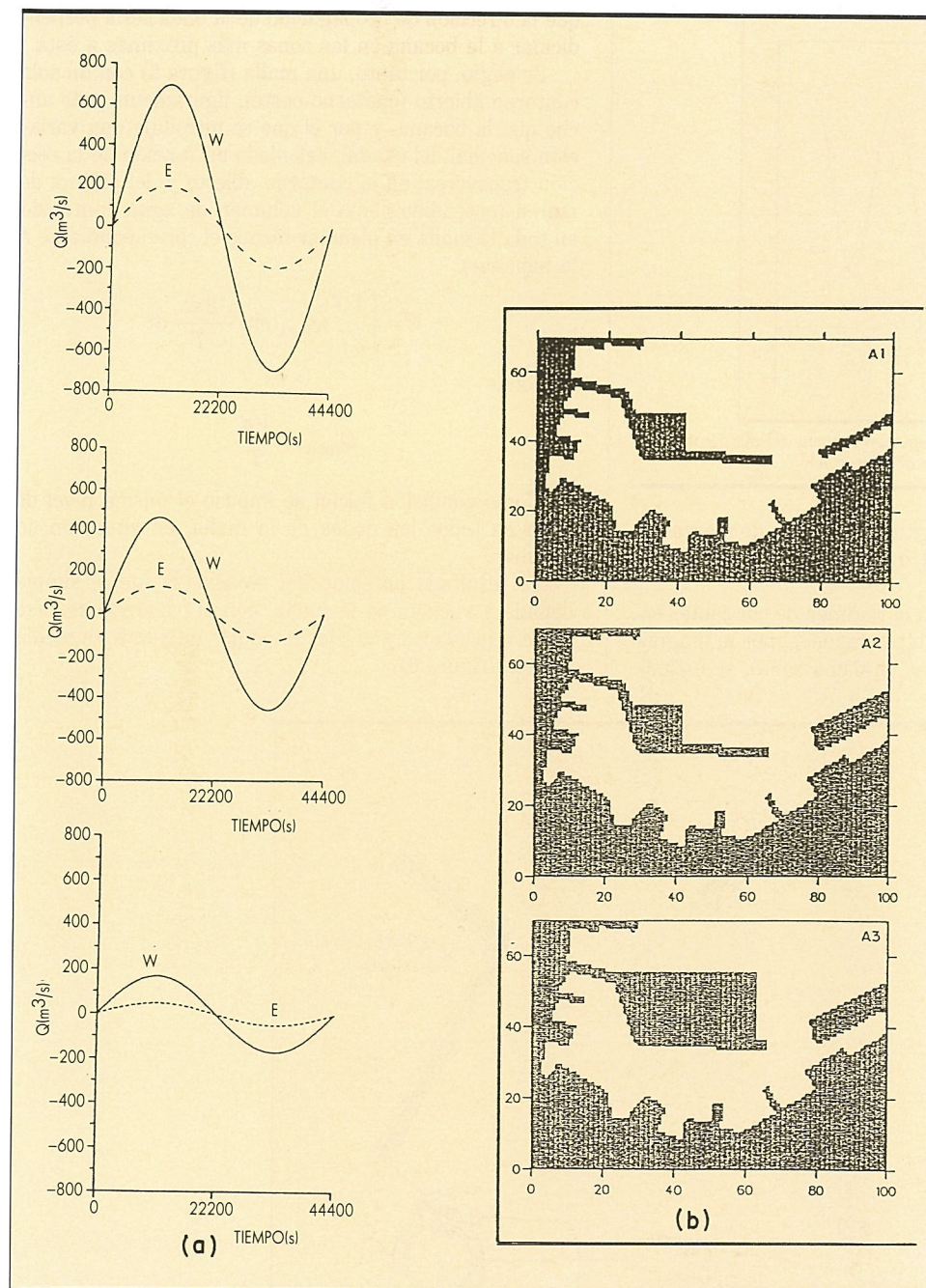


FIGURA 2. (a) Funciones de caudal impuestas en los contornos para tres carreras de marea distintas (3,39, 2,25 y 0,83 m), y (b) algunas de las geometrías empleadas en las simulaciones.

vacación, de forma que pudieran establecerse comparaciones.

El resultado (figura 3) de estas entradas al modelo (1) fue el sistema de corrientes esperado en cada caso: aumento de la velocidad a medida que la malla se llenaba por el oeste hasta un máximo, coincidente con la media marea; disminución de la velocidad hasta anularse (pleamar) para cambiar de signo al empezar la marea vaciante.

2. EL SISTEMA HIDRODINAMICO DE ZIERBANA

En este caso, la total ausencia de datos llevó a una modelización mucho más sencilla, aunque el planteamiento inicial fue muy similar al de Bouzas.

En primer lugar, se atribuyó a las mareas en la ría de Bilbao el mismo comportamiento estacionario: llenado y vaciado simultáneo en todos los puntos. Pero en el caso de que no fuera así, el tamaño de la dársena de Zier-

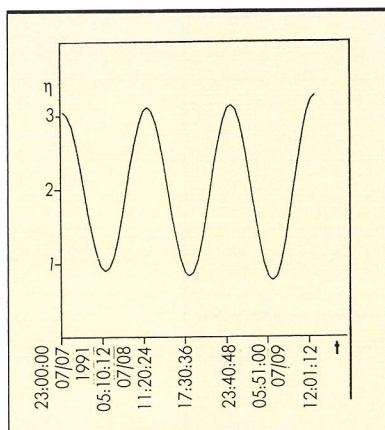


FIGURA 3. Evolución del nivel del agua en el punto (60,60) durante los tres ciclos de marea simulados en la alternativa A1.

bana en relación con la longitud de la onda de marea no permitiría establecer en el interior una diferencia de fase (figura 4).

Puesto que se desconocía el régimen de corrientes en la zona de Zierbana (entre otras razones, por la magnitud de las obras proyectadas en dicha zona), se estimó

que la dirección de propagación de la onda sería perpendicular a la bocana en las zonas más próximas a ésta.

Se eligió, por tanto, una malla (figura 5) con un solo contorno abierto (contorno oeste), ligeramente más ancho que la bocana, y por el que se introdujo una variación senoidal del caudal, calculado en función de la sección transversal en el contorno abierto y del prisma de marea (entendido como el volumen de agua contenido en toda la malla en pleamar menos el correspondiente a la bajamar):

$$V = \int_0^{T/2} Q_{\max} \sin \frac{2\pi t}{T} dt$$

de donde

$$Q_{\max} = \frac{V\pi}{T}$$

Como condición inicial se impuso el mismo nivel de agua en todos los nodos de la malla, en situación de pleamar.

El resultado obtenido del modelo (2) fue el simple llenado y vaciado de la malla, con el esperado desfase entre velocidades y niveles (módulos máximos en media marea) (figura 6).

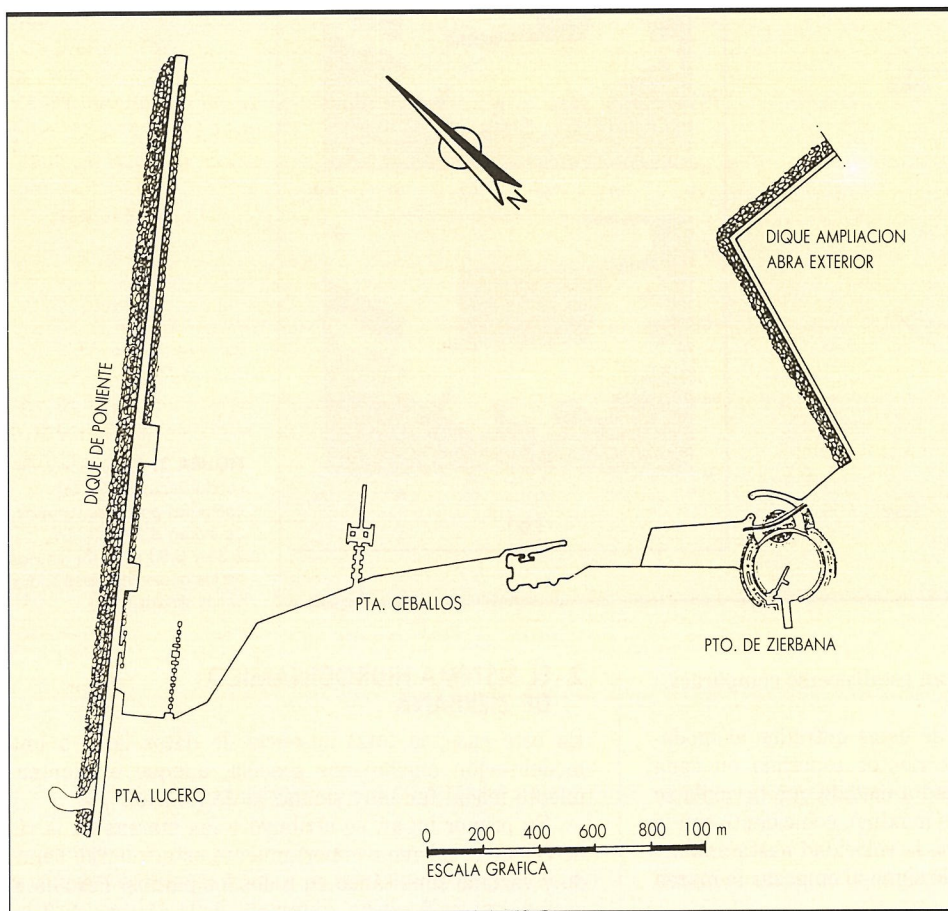


FIGURA 4. Posición del futuro puerto de Zierbana en la ría de Bilbao.

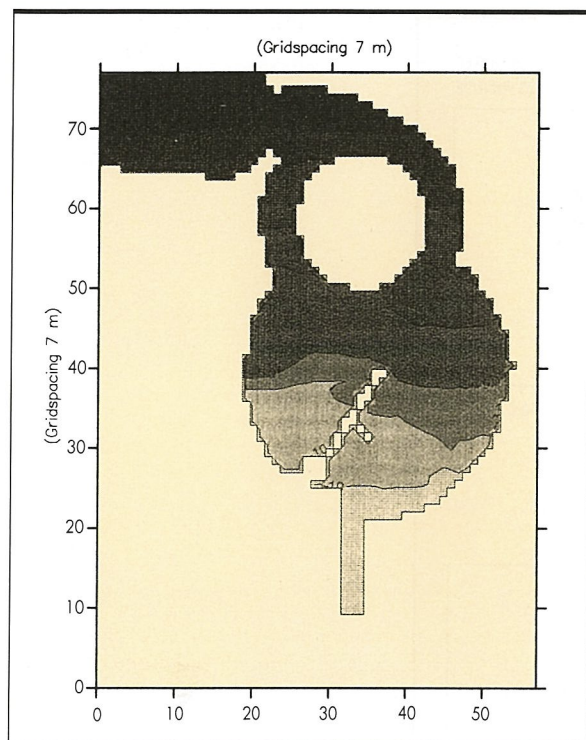


FIGURA 5. Batimetría digitalizada de Zierbana.

3. SIMULACIONES DE TRANSPORTE Y DISPERSION

En ambos casos, el procedimiento seguido fue el mismo: emplear el contaminante como trazador, esto es, marcar el agua que inicialmente estaba en la dársena imponiendo la misma concentración no nula C_0 en cada nodo del interior de ésta, y nula en el exterior.

La simulación de dispersión durante un ciclo de marea completo lleva a la nueva distribución de contaminante en la malla, en una situación que es hidrodinámicamente casi idéntica a la inicial.

En estas simulaciones, también Bouzas es una mejor aproximación a la realidad, puesto que se simula una zona suficientemente amplia como para que la mancha de contaminante no llegue a los bordes de la malla durante la simulación.

En Zierbana, sin embargo, la mancha alcanza el único contorno abierto, debido a las reducidas dimensiones de la malla; se produce una pérdida de contaminante por este contorno (5), que tiene como consecuencia una sobreestimación del índice de renovación. En este caso particular, la pérdida parece muy reducida. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que uno de los factores importantes que intervienen en la renovación es el ángulo que forma la corriente vaciante con la corriente llenante en las zonas próximas a la bocana. Las condiciones impuestas en Zierbana, especialmente la malla, obligan a las corrientes vaciante y llenante a seguir una

misma dirección, con lo que se compensa en cierto modo la sobreestimación antes mencionada.

En las figuras 7 y 8 pueden verse los resultados de algunos de los casos simulados en los estudios de Bouzas y Zierbana, respectivamente.

4. ESTIMACION DEL INDICE DE RENOVACION

En primera aproximación, el volumen de agua de una dársena que se renueva en cada ciclo de marea es el prisma de marea V_p . El índice de renovación podría definirse como el cociente entre V_p y el volumen total de la dársena en pleamar:

$$r = \frac{V_p}{V_{TOTAL}}$$

El fenómeno es claramente más complejo puesto que intervienen numerosos factores además del volumen del prisma de marea: mezcla, difusión y distribución del contaminante en las tres direcciones del espacio, dirección de las corrientes, etc. Una aproximación más realista sería considerar que una buena parte del prisma de marea que se evacúa en el semiciclo de vaciante vuelve a entrar durante la llenante y, por tanto, no se renueva.

Partiendo, por ejemplo, de una situación de pleamar, con una distribución homogénea de contaminante en el interior de la dársena, la mancha de contaminante que sale por la bocana a medida que baja la marea se desplaza siguiendo las líneas de corriente, tanto más cuanto mayores sean las velocidades. Al iniciarse la subida de la marea, la mancha tenderá a entrar de nuevo en la dársena. El índice de renovación vendrá dado por

$$r = \frac{V_P - V'_P}{V_{TOTAL}}$$

siendo V'_P la parte de V_P que vuelve a entrar, y $(V_P - V'_P)$ el volumen de agua renovado (V_{REN}).

Para una estimación de V'_P se pueden hacer muchas hipótesis acerca de su dependencia con la carrera de marea, la geometría exterior de la dársena o las direcciones y módulos de las velocidades en las zonas más próximas a la bocana. Sin embargo, la modelización matemática posibilita la tarea de calcular un índice de renovación para cada caso particular una vez establecido el sistema hidrodinámico.

Transcurrido un ciclo de marea después de marcar el agua de la dársena, puede calcularse, a partir de las concentraciones finales en cada nodo del interior de la dársena (c_i), la concentración media C :

$$C = \frac{M}{V} = \frac{\sum m_i}{\sum v_i} = \frac{\sum c_i h_i s_i}{\sum h_i s_i}$$

donde la suma se hace sobre el número de nodos, m_i es la masa de contaminante en la celda cuyo centro es el nodo i , h_i la profundidad en dicho nodo y s_i su su-

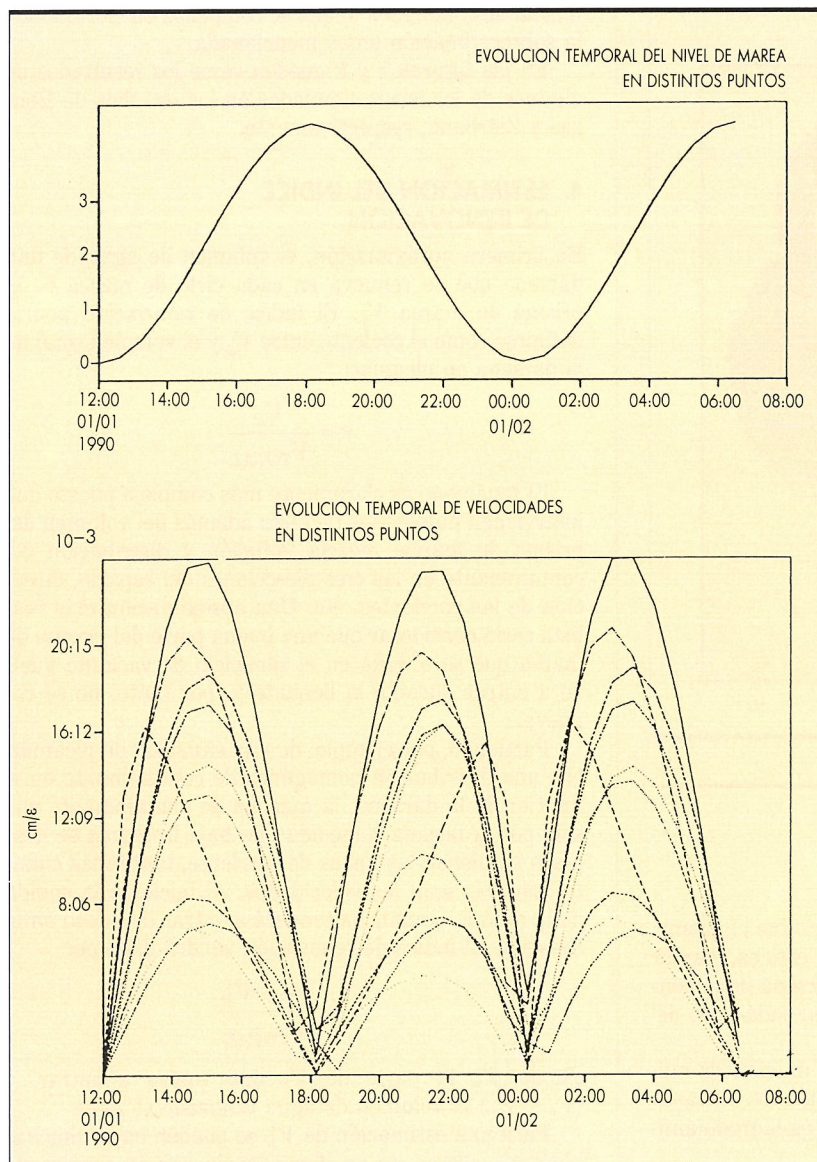


FIGURA 6. Desfase entre niveles y velocidades.

perficie. Puesto que se trata de una malla regular, $s_1 = s_2 = \dots = s_n$, y por tanto

$$C = \frac{\sum c_i h_i}{\sum h_i}$$

Una vez calculada la concentración media en la dársena, puede calcularse el índice de renovación:

$$C \cdot V_{TOTAL} = C_0 \cdot (V_{TOTAL} - V_{RENOV})$$

$$C \cdot V_{TOTAL} = C_0 \cdot (V_{TOTAL} - V_P + V'_P)$$

de donde

$$\frac{V_P - V'_P}{V_{TOTAL}} = \frac{C_0 - C}{C_0}$$

Por tanto, la expresión del índice de renovación en función de las concentraciones calculadas será:

$$r = \frac{C_0 - C}{C_0}$$

En la tabla 2 se muestran los índices de renovación calculados para algunas de las alternativas del trabajo sobre Bouzas (A1, A2, A3 y B, cuyas geometrías pueden verse en las figuras 2 y 7, respectivamente) para la carrera de marea media anual.

5. APLICACIONES Y LIMITACIONES

Como ya se ha dicho en la introducción, las aplicaciones del índice de renovación son varias.

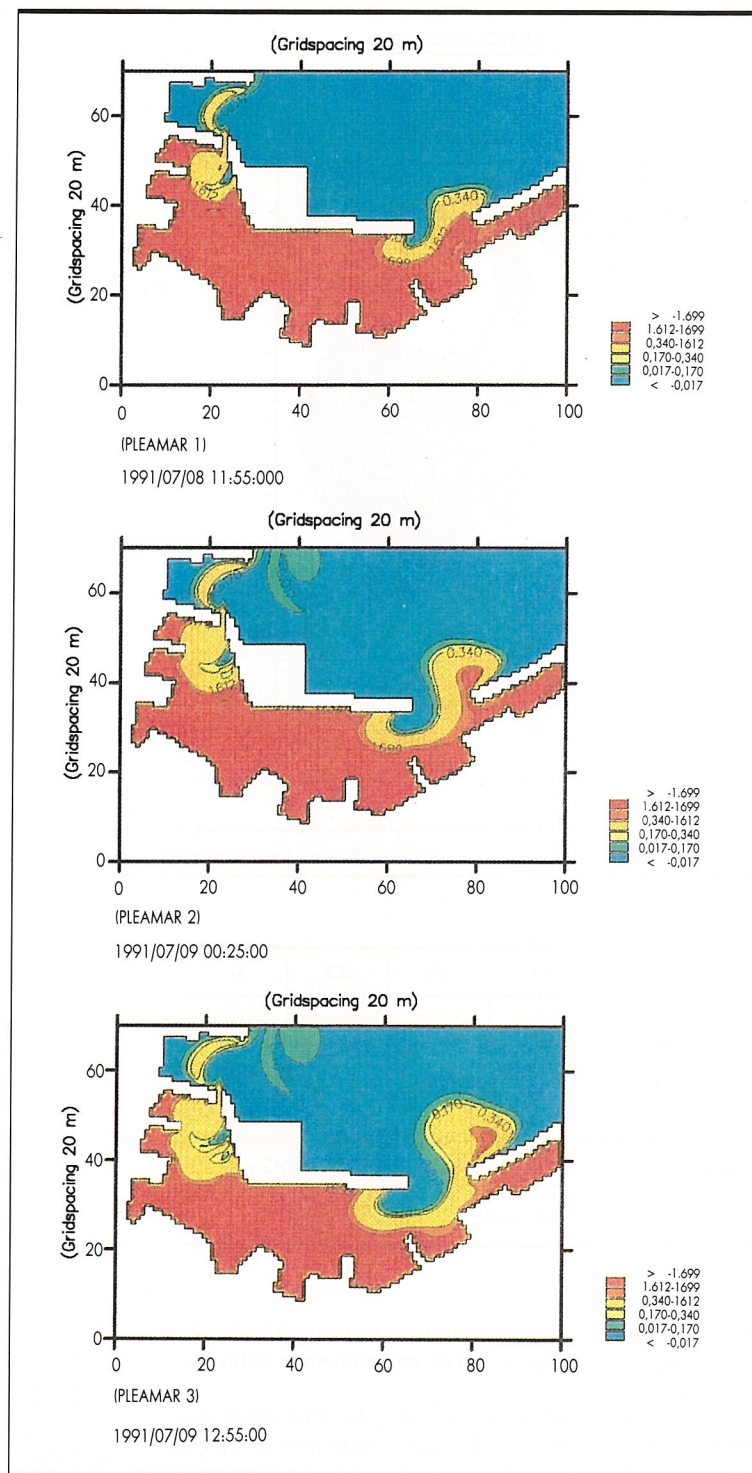


FIGURA 7. Bouzas. Distribución del contaminante en tres pleamares sucesivas. Alternativa B. Carrera de marea creciente.

En las dársenas de Bouzas, se estimó para distintas alternativas de obra, como la apertura de un túnel de 20 m de diámetro en un dique de protección o la inyección de un caudal constante de agua limpia, tanto en la

geometría actual del puerto como con la incorporación de nuevas obras, entonces en proyecto.

Los distintos índices de renovación estimados sirvieron para valorar qué alternativa podría realmente au-

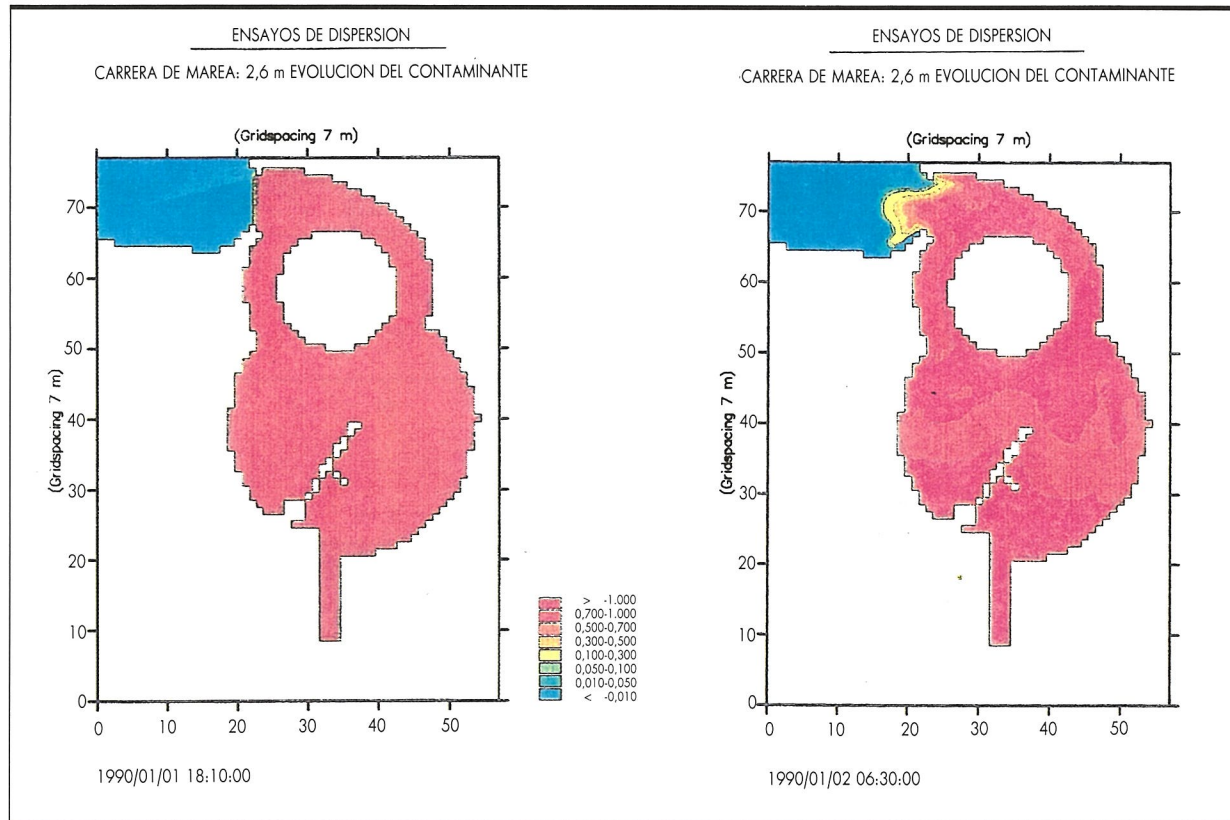


FIGURA 8. Zierbana. Distribución del contaminante en las pleamars inicial y final.

GEOMETRIA	A1	A2	A3	B
INDICE 1	0,068	0,068	0,044	0,062
INDICE 2	—	—	—	0,078
INDICE 3	—	—	—	0,073

TABLA 2. Indices de renovación para las geometrías A1, A2 y A3 con carrera de marea media (2,25 m) y la solución B, caso real (tres ciclos de marea, con carrera creciente, media de 2,20 m).

mentar la renovación de la dársena, y si seguiría siendo suficientemente eficaz una vez se llevasen a cabo las obras proyectadas.

En Zierbana, especialmente tras la estimación del índice de renovación, se sabe que lo más indicado para que sus aguas tengan un grado de limpieza razonable sería tomar medidas preventivas: limitar los vertidos de todo tipo que puedan realizarse.

En cualquier caso semejante a los estudiados, esto es, una concentración inicial homogénea C_0 , el parámetro r permite estimar el número de ciclos de marea necesario para llegar a la concentración deseada:

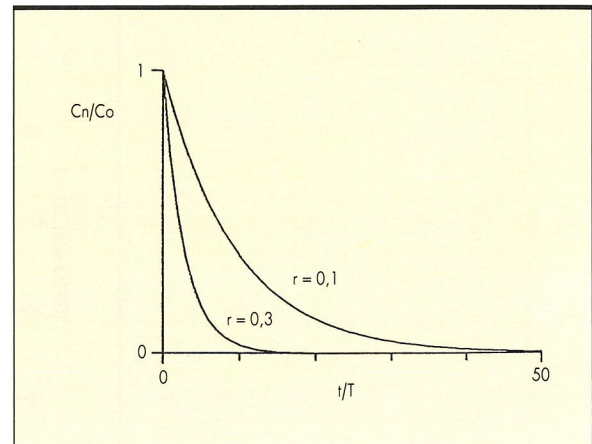


FIGURA 9. Evolución de la concentración para un vertido accidental y homogéneo en el volumen V_0 .

$$\frac{C_n}{C_0} = (1 - r)^n$$

donde C_n es la concentración media en la dársena después de n ciclos de marea (figura 9).

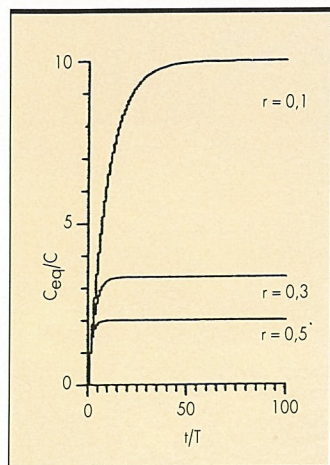


FIGURA 10. Evolución de la concentración para una descarga continua.

También es posible calcular un valor de equilibrio C_{eq} para la concentración media interior en el caso más común de una descarga continua de contaminante. Si esta descarga tiene un caudal constante Q_v de concentración C (figura 10):

$$C_{eq} = \frac{CQ_v T}{V_0 r}$$

donde V_0 es el volumen inicial de agua en la dársena.

El parámetro r calculado de esta manera tiene limitaciones, puesto que se han hecho numerosas simplificaciones respecto de una posible situación real.

La primera de ellas es suponer que la concentración inicial es homogénea en la dirección del eje Z , puesto que en el modelo las ecuaciones están integradas en la vertical (5). Esto implica que el índice calculado no es válido para contaminantes con un gradiente de concentración en esta dirección, especialmente sólidos flotantes o aceites y grasas, que tienden a acumularse en la superficie.

Por otro lado, en el plano XY no se ha considerado una distribución de equilibrio para el contaminante

como condición inicial, sino que se parte del problema en dos subsistemas, la dársena y la ría, cuyas soluciones de equilibrio son, respectivamente, una mezcla homogénea y una concentración nula. Hay que decir que una de las pruebas realizadas en el estudio sobre renovación de las dársenas de Bouzas fue la simulación de tres ciclos de marea consecutivos. Los valores calculados para el índice de renovación de toda la dársena en cada uno de los ciclos se alejan del valor medio por ciclo de marea en torno al 20 %.

6. CONCLUSIONES

Si bien los valores obtenidos para el coeficiente r no pueden ser exactos, dado el número de simplificaciones que se han realizado para su cálculo, sí pueden dar una idea del orden de magnitud de la renovación real, de la incidencia de las nuevas obras en ésta y, en su caso, de la efectividad de unas soluciones frente a otras desde el punto de vista de la renovación.

En la medida en que estudios de este tipo vayan cobrando interés, las aproximaciones se irán reduciendo y los índices ganarán en fiabilidad.

Sería interesante que, a la hora de proyectar ampliaciones o nuevos puertos, además de los estudios de agitación, maniobrabilidad, etc., necesarios, se realizaran estudios de renovación, especialmente en aquellos casos en los que, por la geometría del puerto y las características de la zona, la renovación pudiera ser insuficiente.

BIBLIOGRAFIA

1. LLORET CAPOTE, A. (1991). Informe: «Limpieza de las dársenas de Bouzas». CEPyC (CEDEX), Madrid.
2. MARTIN SOLDEVILLA, M. J. (1992). Informe: «Estudio de Corrientes en el Puerto de Zierbana». CEPyC (CEDEX), Madrid.
3. BOWDEN, K. F. (1983). *Physical Oceanography of Coastal Waters*, Ellis Horwood Ltd., Inglaterra.
4. RUIZ MATEO, A. (1987). Informe: «Predimensionamiento de treinta y siete emisarios submarinos situados en las rías gallegas». CEPyC (CEDEX), Madrid.
5. DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (1991). User's Guide for MIKE21.