

Tiempo de renovación: descriptor físico para la tipificación de masas de agua modificadas en áreas portuarias

A. G. Gómez¹, M. L. Sámano¹, B. Ondiviela¹, A. García¹, J. A. Revilla¹, J. A. Juanes¹

Resumen

En la ROM 5.1. Calidad de aguas litorales en áreas portuarias se establece que la tipificación de las masas de agua modificadas, masas de agua superficial que han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, debe llevarse a cabo mediante la combinación de un descriptor físico, tipo de sustrato dominante (rocoso/sedimentario), y un descriptor hidromorfológico, tiempo de renovación. En la Recomendación se establece que el tiempo de renovación debe calcularse a partir del estudio del transporte de un trazador conservativo haciendo uso de modelos numéricos. Debido al carácter preliminar del procedimiento metodológico establecido, en el presente trabajo se estudia el efecto que los diferentes agentes dispersivos tienen sobre el tiempo de renovación, con el fin de validar y calibrar la metodología de cálculo.

Introducción

Conscientes del efecto que su actividad tiene sobre su entorno próximo, y concretamente, sobre la calidad de los sistemas acuáticos, los puertos llevan años trabajando en el desarrollo e implementación de estrategias que, de una forma sostenible, les permitan compatibilizar el mantenimiento de la calidad de los sistemas acuáticos con su actividad (Ondiviela, 2006). No obstante, en los últimos años, la iniciativa comunitaria más importante en materia de protección y gestión del medio acuático ha sido la Directiva 2000/60/CE (Directiva Marco del Agua, en adelante DMA), por la que se establece un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas. Al amparo de este nuevo marco normativo, Puertos del Estado ha desarrollado la “ROM 5.1-05. Calidad de aguas litorales en áreas portuarias” (en adelante, ROM 5.1), herramienta metodológica para la gestión integral de la calidad de los sistemas acuáticos portuarios.

De acuerdo con lo establecido en la DMA, la gestión de los sistemas acuáticos requiere la tipificación de espacios de características estructurales y funcionales homogéneas, denominados “masas de

agua”, que representan las unidades básicas sobre las que se lleva a cabo la gestión ambiental. Según la herramienta de gestión desarrollada, la tipificación de dichas masas de agua representa el proceso mediante el cual en el medio acuático de la zona de servicio portuario se reconocen diferentes tipos de masas de agua homogéneas. Para ello, se establece un primer procedimiento que permite diferenciar aquellos espacios acuáticos portuarios que, debido a las alteraciones hidromorfológicas a las que se ven sometidos, se clasifican como “masas de agua modificadas”, definidas en la DMA como masas de agua superficial que han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana.

De acuerdo con estas peculiaridades hidromorfológicas, la ROM 5.1 establece que la tipificación de las masas de agua modificadas debe llevarse a cabo mediante la combinación de un descriptor físico, como es el tipo de sustrato dominante (rocoso/sedimentario), y un descriptor hidromorfológico, como es el tiempo de renovación (Gómez *et al.*, 2006). El tiempo de renovación puede definirse como el tiempo medio necesario para que un dominio renueve su volumen de agua. Así, en tanto que dicho intercambio regula la capacidad de acumulación de sustancias en un medio dado, este descriptor está claramente relacionado con la calidad del agua y de los sedimentos de las masas de agua modificadas (Takeoka, 1984, Gómez-Gesteira *et al.*, 2003, Orfila *et al.*, 2005).

El tiempo de renovación se puede calcular a partir del estudio del transporte de un trazador conservativo, haciendo uso de modelos numéricos. En un instante de tiempo concreto, una determinada concentración de trazador conservativo es introducida homogéneamente en toda la masa de agua modificada. Mientras el modelo procesa, la cantidad de trazador conservativo presente en la masa de agua decrece gradualmente debido a la influencia de los diferentes procesos físicos que permiten su dispersión. El estudio de la evolución del trazador conservativo en la masa de agua permite conocer el tiempo de renovación de la propia masa de agua.

En el procedimiento metodológico desarrollado en la ROM 5.1, el tiempo de renovación se estima considerando un régimen medio anual de viento y una onda media de marea, iniciando la simulación cuando el volumen es máximo, es decir, en pleamar. Además, en el caso que existieran aportaciones fluviales debe tenerse en cuenta un caudal medio (Gómez *et al.*, 2006). Estas condiciones hidrodinámicas se establecen con el fin de normalizar y estandarizar la metodología y obtener un valor de tiempo de renovación para unas condiciones medias.

¹ Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria. IH Cantabria. Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria, Av. De los Castros s/n, 39005 Santander. aina.gomez@unican.es.

A partir del cálculo del tiempo de renovación, las masas de agua modificadas pueden clasificarse en dos tipos: aquéllas con un tiempo de renovación inferior a siete días se clasifican como masas de agua con renovación aceptable, en caso contrario, se clasifican como masas de agua modificadas con renovación baja.

Debido al carácter preliminar del procedimiento metodológico establecido, éste debe someterse a un proceso de validación y calibración que permita resolver las posibles incertidumbres y valorar sus elementos de análisis. Con este objeto, en el presente trabajo se estudia el efecto que tiene sobre el tiempo de renovación la consideración de diferentes condiciones hidrodinámicas. En concreto, respecto a la fase inicial de marea, las corrientes generadas por el viento y el tipo de onda de marea.

Zonas de estudio

El estudio se lleva a cabo en tres puertos de interés general, dos de ellos situados en el litoral del Mar Cantábrico: el Puerto de Gijón y el Puerto de Santander, y un tercero situado en el Mar Mediterráneo: el Puerto de Tarragona (Figura 1).



Figura 1. Localización de los puertos donde se lleva a cabo el estudio.

El Puerto de Gijón se encuentra inmerso en la ciudad de Gijón, en el tramo costero de Asturias (Figura 2a). La hidrodinámica en esta zona resulta condicionada fundamentalmente por la acción combinada de una marea astronómica semidiurna y un régimen de viento con una dirección dominante del oeste. Siguiendo el proceso de asignación de masas de agua modificadas establecido en la ROM 5.1 (Puertos del Estado, 2005), dos son las masas de agua modificadas identificadas de forma preliminar en el Puerto de Gijón: el puerto comercial o puerto del Musel y el puerto deportivo. En el presente trabajo, el estudio se centra en la masa de agua modificada correspondiente al puerto de El Musel, con 158 ha de extensión (Gómez *et al.*, 2006).

Por otro lado, el Puerto de Santander se encuentra en el interior de la Bahía de Santander, que constituye uno de los estuarios más importantes del Norte de España, con una extensión total de 2250 ha (Figura 2b). La Bahía de Santander se caracteriza por unas condiciones hidrodinámicas controladas por un régimen de marea semidiurna y 3 metros de rango medio de marea, interactuando con entradas de agua dulce procedentes en mayor medida del río Miera y descargas menores a través de las rías de Boo, Tijero y Solía (Puente *et al.*, 2002). Las aguas superficiales, por tanto, son consideradas aguas de transición. En este caso, el estudio se centra en la Dársena Norte de Raos, dársena con una alta homogeneidad en términos de calado y geometría, con una extensión de 34 ha.

Por último, el Puerto de Tarragona se encuentra localizado en el noreste español, integrado dentro de la ciudad homónima (Figura 2c). En este caso, debido a su localización dentro del Mar Mediterráneo, la marea es mixta, con predominio de un régimen mareal semidiurno de pocos centímetros de rango medio de marea. Los datos climatológicos muestran una clara dominancia de vientos a lo largo del eje NE-SW en verano, y fuertes episodios de viento NW durante el resto de estaciones (Artiñano *et al.*, en prensa). Por otro lado, pese a la existencia de aportaciones fluviales dentro del puerto, debido a su bajo flujo, las aguas superficiales son consideradas aguas costeras. Finalmente, destacar que en el proceso de calibración de la ROM 5.1 se ha designado una única masa de agua modificada en el Puerto de Tarragona, la cual se corresponde con las aguas superficiales confinadas en dársenas, con una extensión aproximada de 492 ha.

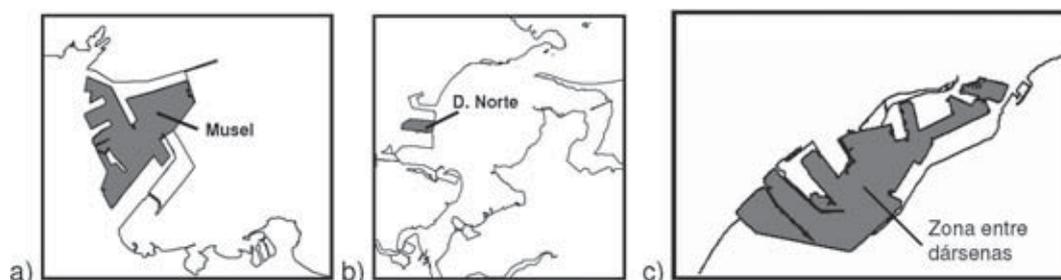


Figura 2. Masas de agua modificadas objeto de estudio en el: a) Puerto de Gijón; b) Puerto de Santander; c) Puerto de Tarragona.

Material y métodos

Procedimientos generales de modelado numérico

El procedimiento metodológico establecido en la ROM 5.1 para el cálculo del tiempo de renovación se basa en el estudio de la evolución de un trazador conservativo en la zona de interés (Puertos del Estado, 2005). Para ello, se hace uso de modelos numéricos desarrollados en el seno de la Universidad de Cantabria y validados en numerosos estudios realizados hasta la fecha. Los cálculos de circulación y transporte emplean el método de diferencias finitas que precisa generar una malla que abarque la zona objeto de estudio y que contenga las profundidades en cada punto. La geometría y batimetría son obtenidas a partir de la información recogida en las cartas náuticas.

En primer lugar, se generan las corrientes marinas en la franja costera próxima a la zona de estudio debidas a la acción de la marea astronómica y el viento. Las corrientes generadas por la marea se obtienen a partir de un modelo hidrodinámico promediado en vertical (H2D). Por otro lado, las velocidades generadas por el viento son variables en profundidad, por ello, se utiliza un modelo cuasi-tridimensional (H2DZ). Se estiman las velocidades generadas en las ocho direcciones de viento significativas (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) para dos intensidades de viento representativas de las zonas de estudio (en este caso, 5 y 10 m/s). El régimen medio anual de viento se obtiene mediante la aplicación del método de Monte Carlo, en función de la probabilidad de presentación de los vientos, considerando situaciones de viento constante de 8 horas de duración (García *et al.*, 2001).

Finalmente, para calcular el tiempo de renovación se utiliza un modelo bidimensional de transporte. Para ello, se considera que la masa de agua objeto de estudio se comporta como un tanque continuamente agitado. Se asume entonces que: a) una cantidad conocida de masa de trazador conservativo es introducida en la masa de agua a $t(\text{tiempo})=0$ resultando en una concentración inicial homogénea en todo el dominio, C_0 ; b) posteriormente no se introduce más trazador conservativo en la masa de agua, y; c) el agua que entra en la masa de agua es capaz de mezclarse completamente con el agua existente en el dominio durante cada ciclo de marea (Cucco y Umgiesser, 2006; Monsen *et al.*, 2002; Thomann y Mueller, 1987; Wang *et al.*, 2004). Por tanto, en la masa de agua objeto de estudio se introduce una concentración homogénea de trazador conservativo. A medida que el modelo simula el transporte de trazador conservativo, éste ve disminuida su masa residual en la masa de agua debido al efecto de las corrientes generadas tanto por el viento como por la marea. La distribución espacial del trazador conservativo en el dominio permite calcular la masa residual del trazador conservativo en la masa de agua en un tiempo concreto (ecuación 1).

$$M_{(t)} = \int c_{(t)} dv \quad (1)$$

Donde t es el tiempo, M es la masa total de trazador conservativo remanente en el dominio, c es la concentración de trazador y v el volumen.

La desaparición de la masa del trazador conservativo en el sistema describirá un proceso lineal tal y como se desprende de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dM_{(t)}}{dt} = -\gamma M_{(t)} \quad (2) \quad M_{(t)} = M_{(0)} e^{-\gamma t} \quad (3)$$

Donde $M(0)$ es la masa inicial de trazador conservativo en la masa de agua y γ es el inverso del tiempo de renovación. De este modo, el tiempo de renovación queda definido como el tiempo necesario para que la masa de trazador conservativo inicialmente introducida se vea reducida a un 37% ($1/e$) respecto a su valor inicial (Monsen *et al.*, 2002).

La evolución de la masa de trazador conservativo se obtiene a partir del cálculo continuado de la masa residual de éste en el dominio. El tiempo de renovación se estima a partir del ajuste de los datos a una función exponencial tal y como describe la ecuación 3.

Efecto de la fase inicial de marea

Con el objeto de valorar el efecto de este factor, el tiempo de renovación es calculado para diferentes fases de marea, analizando el efecto que tiene la fase inicial. Los cálculos se realizan teniendo en cuenta una onda media de marea y un régimen medio de viento anual. En la masa de agua del Musel, en el Puerto de Gijón, se calcula el tiempo de renovación para cada una de las doce fases de marea en las que se ha dividido el ciclo de marea (Figura 3). Para el caso de la Dársena Norte de Raos en el Puerto de Santander y la masa de agua objeto de estudio del Puerto de Tarragona se calcula el tiempo de renovación iniciando la simulación en pleamar y bajamar.

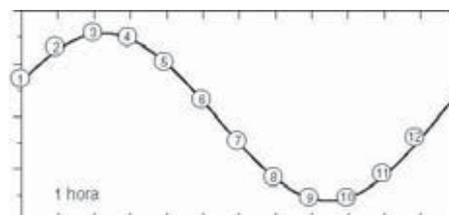


Figura 3. Fases de la onda media de marea en el Puerto de Gijón.

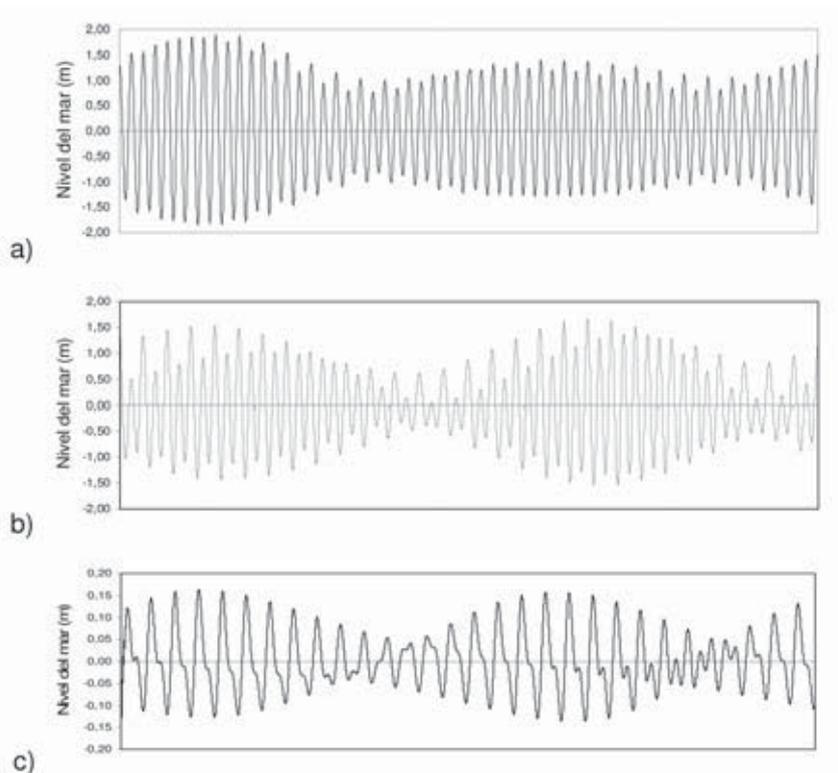


Figura 4. Onda real en el: a) Puerto de Gijón; b) Puerto de Santander; c) Puerto de Tarragona.

Efecto del viento

Para el análisis del efecto de este factor, en las diferentes zonas de estudio se calcula el tiempo de renovación teniendo en cuenta, por un lado, el efecto del viento y, por otro, considerando una situación en calma (sin corrientes generadas por el viento).

Por otra parte, tal y como se ha indicado anteriormente, el régimen medio anual de viento viene representado por una sucesión de episodios generados aleatoriamente que cumplen las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los episodios de viento. Lógicamente, cada sucesión de viento obtenida a partir del método Monte Carlo es diferente. Por ello, se espera una cierta variabilidad de resultados dependiendo de la secuencia de vientos. Por este motivo, como complemento al análisis general de los tres puertos, en la Dársena Norte de Raos del Puerto de Santander se estudia el efecto que tiene sobre el tiempo de renovación la consideración de diferentes regímenes medio anuales de viento.

Los cálculos para el estudio del efecto del viento se llevan a cabo considerando una onda media de marea e iniciando la simulación en pleamar.

Efecto de la onda de marea

En la ROM 5.1 se considera el uso de una onda media de marea. Sin embargo, la onda de marea no es constante, debido a las fuer-

zas gravitacionales que ejercen la luna y el sol se generan mareas vivas y muertas. El uso de una onda media de marea puede ser una fuente de incertidumbre. Por esta razón, se estima el tiempo de renovación teniendo en cuenta una onda real (Figura 4) e iniciando la simulación, por un lado, en marea viva y, por otro, en marea muerta, en ambos casos cuando el volumen es máximo, es decir, en pleamar. El estudio se lleva a cabo en todas las zonas de estudio considerando un régimen medio anual de viento.

Resultados

Efecto de la fase inicial de marea

En la masa de agua del Musel, en el Puerto de Gijón, se ha estimado el tiempo de renovación iniciando la simulación en doce fases diferentes durante un ciclo de onda de marea media. La fase de marea con la que se inicia el modelado varía el volumen en la zona de estudio y, aunque la concentración de trazador conservativo introducida es siempre la misma, la masa inicial de trazador conservativo varía con el volumen. La masa inicial de trazador conservativo es directamente proporcional al nivel del mar en el momento de inicio de la simulación (Tabla 2), mayor es la masa de trazador conservativo, recogiéndose el valor más elevado en pleamar (3) y el menor en bajamar (9). Sin embargo, el tiempo de renovación no se ve afectado por la fase inicial de marea. Los valores obtenidos para el tiempo de renovación en la masa de agua

del Musel son muy similares, no se observa una variación de los valores relacionada con la variación del nivel del mar.

Fase inicial de marea	Masa inicial (kg)	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))
1	23927.2	-1.582·10 ⁻²	63.42 (0.9930)
2	24831.4	-1.581·10 ⁻²	63.45 (0.9933)
3	25235.4	-1.580·10 ⁻²	63.35 (0.9935)
4	25033.4	-1.579·10 ⁻²	63.28 (0.9938)
5	24275.1	-1.577·10 ⁻²	63.32 (0.9940)
6	23129.2	-1.576·10 ⁻²	63.25 (0.9940)
7	21893.7	-1.579·10 ⁻²	63.14 (0.9938)
8	20885.0	-1.580·10 ⁻²	63.11 (0.9934)
9	20341.2	-1.579·10 ⁻²	63.21 (0.9929)
10	20418.9	-1.581·10 ⁻²	63.25 (0.9927)
11	22118.0	-1.584·10 ⁻²	63.28 (0.9927)
12	22241.0	-1.585·10 ⁻²	63.32 (0.9928)

$\nu = 1/TR$; TR=Tiempo de renovación.

Tabla 2. Tiempo de renovación de la masa de agua del Musel iniciando la simulación en doce fases de marea diferentes durante un ciclo de marea media.

Este mismo comportamiento se repite en la Dársena Norte de Raos del Puerto de Santander y en la zona entre dársenas en el Puerto de Tarragona. En estos casos, en los que se calcula el tiempo de renovación para dos de las doce situaciones, en pleamar y en bajamar, tampoco se observa ningún efecto notable, siendo los valores muy similares entre sí (Tabla 3).

	Gijón (Masa de agua Musel)		Santander (Dársena Norte de Raos)		Tarragona (Zona ntre dársenas)	
	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))
Pleamar	-1.580·10 ⁻²	63.35 (0.9935)	-2.604·10 ⁻⁶	4.44 (0.9925)	-1.465·10 ⁻⁷	79.00 (0.9932)
Bajamar	-1.579·10 ⁻²	63.21 (0.9929)	-2.616·10 ⁻⁶	4.42 (0.9952)	1.465·10 ⁻⁷	79.00 (0.9934)

$\nu = 1/TR$; TR=Tiempo de renovación

Tabla 3. Tiempo de renovación en las zonas de estudio iniciando la simulación en pleamar y bajamar de una onda media.

	Gijón (Masa de agua Musel)		Santander (Dársena Norte de Raos)		Tarragona (Zona entre dársenas)	
	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))
Con viento	-1.580·10 ⁻²	63.35 (0.9935)	-2.604·10 ⁻⁶	4.44 (0.9925)	-1.465·10 ⁻⁷	79.00 (0.9932)
Sin viento	-9.376·10 ⁻⁸	123.39 (0.9635)	-2.686·10 ⁻⁶	4.31 (0.9939)	-9.164·10 ⁻⁸	126.30 (0.9962)

$\nu = 1/TR$; TR=Tiempo de renovación

Tabla 4. Tiempo de renovación en las zonas de estudio con y sin efecto del viento.

Efecto del viento

Tanto en la masa de agua del Musel, en el Puerto de Gijón, como en la zona entre dársenas del Puerto de Tarragona, la no consideración de las corrientes generadas por el viento provoca que los resultados de tiempo de renovación aumenten considerablemente con respecto a los resultados obtenidos cuando el efecto del viento se ha tenido en cuenta. Sin embargo, en el caso de la Dársena Norte de Raos, en el Puerto de Santander, no se observa una variación notable (Tabla 4).

De forma adicional, en la Dársena Norte de Raos se estima el tiempo de renovación para tres regímenes de viento medio anual diferentes. En la Tabla 5 se recogen los resultados obtenidos. Tal y como puede observarse, el régimen medio anual de viento considerado no tiene un efecto apreciable sobre los resultados.

	Santander (Dársena Norte de Raos)	
	ν (días ⁻¹)	TR (días _(r²))
Régimen medio A	-2.604·10 ⁻⁶	4.44 (0.9925)
Régimen medio B	-2.613·10 ⁻⁶	4.43 (0.9932)
Régimen medio C	2.584·10 ⁻⁶	4.48 (0.9926)

$\nu = 1/TR$; TR=Tiempo de renovación

Tabla 5. Tiempo de renovación en la Dársena Norte de Raos para tres regímenes diferentes de viento *medio anual*.

	Gijón (Masa de agua Musel)		Santander (Dársena Norte de Raos)		Tarragona (Zona entre dársenas)	
	ν	TR	ν	TR	ν	TR
	(días ⁻¹)	(días _(r 2))	(días ⁻¹)	(días _(r 2))	(días ⁻¹)	(días _(r 2))
Onda media	$-1.580 \cdot 10^{-2}$	63.35 (0.9935)	$-2.604 \cdot 10^{-6}$	4.44 (0.9925)	$-1.465 \cdot 10^{-7}$	79.00 (0.9932)
Onda real (m.v)	$-4.506 \cdot 10^{-7}$	25.69 (0.9944)	$-2.480 \cdot 10^{-6}$	4.67 (0.9700)	$-1.492 \cdot 10^{-7}$	77.57 (0.9935)
Onda real (m.m)	$-4.549 \cdot 10^{-8}$	25.44 (0.9954)	$-3.307 \cdot 10^{-6}$	3.50 (0.9585)	$-1.494 \cdot 10^{-7}$	77.47 (0.9936)

$\nu = 1/TR$; TR=Tiempo de renovación; m.v=mareas vivas; m.m=mareas muertas.

Tabla 6. Tiempo de renovación en las zonas de estudio haciendo uso de una onda real de marea.

Efecto de la onda de marea

Tal y como ocurría con la consideración del efecto del viento, el uso de una onda real de marea disminuye los tiempos de renovación para las masas de agua del Puerto de Gijón y Tarragona. En el caso del Puerto de Gijón, la disminución es relevante, sin embargo, la reducción producida en el puerto de Tarragona es mínima debido al tipo de mareas presentes en el Mediterráneo. Cabe destacar que iniciar la simulación en mareas vivas o muertas no tiene un efecto importante sobre los resultados finales en el caso de la masa de agua de El Musel y en la masa de agua del Puerto de Tarragona, sin embargo, para la Dársena Norte de Raos se obtiene una disminución considerable del tiempo de renovación cuando la simulación se inicia en mareas muertas (Tabla 6).

Discusión y conclusiones

El tiempo de renovación se estima a partir del estudio de la evolución de un trazador conservativo en la masa de agua. Se ha considerado que la masa de agua se comporta como un tanque continuamente agitado; por tanto, la evolución de la masa del trazador conservativo en la misma debe ajustarse a una función exponencial. Sin embargo, se asume que al tratarse de un caso ideal, puede no representar perfectamente los sistemas reales. De todas formas, tal y como puede desprenderse de los resultados obtenidos, para todos los casos estudiados, los datos se ajustan a una ecuación exponencial, por lo tanto, podría concluirse que el comportamiento de las masas de agua modificadas objeto de estudio es similar a un tanque continuamente agitado (véanse los valores de r recopilados en las tablas). Entonces, **este estudio permite justificar el uso del método de tanque continuamente agitado** para el cálculo del tiempo de renovación en masas de agua modificadas.

Debido a que las condiciones hidrodinámicas son las que promueven el movimiento de la masa de agua, unas condiciones hidrodinámicas concretas fueron establecidas con el fin de estandarizar el cálculo y obtener un valor promedio para el tiempo de renovación: una onda media de marea, un régimen medio anual de viento e iniciar la simulación en pleamar. En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio sobre los efectos que tiene considerar estas condiciones hidrodinámicas. Tres han sido los efectos estudiados: efecto de la fase inicial de marea, efecto del viento y efecto de la onda de marea.

Los resultados obtenidos de tiempo de renovación para las masas de agua objeto de estudio permiten obtener conclusiones relevantes a la hora de calibrar la metodología propuesta previamente. En primer lugar, cabría mencionar que, excepto para la masa de agua del Puerto de Santander, los valores del tiempo de renovación varían considerablemente cuando las condiciones hidrodinámicas cambian. Se considera que en el caso del Puerto de Santander no se observa ningún efecto sobre los resultados debido a su bajo tiempo de renovación, lo cual no permite que las condiciones cambiantes puedan ejercer un efecto sobre el resultado final.

Sin embargo, tanto en la masa de agua del Musel, en el Puerto de Gijón, como en la zona entre dársenas, en el Puerto de Tarragona, se observan variaciones en los valores obtenidos para diferentes condiciones hidrodinámicas. De forma generalizada, se obtienen valores máximos para una onda media de marea y situación en calma y valores mínimos cuando se considera una onda real de marea con efecto del viento. La consideración de condiciones hidrodinámicas próximas a las condiciones reales ayuda al movimiento de la masa de agua y permite que el tiempo de renovación sea inferior.

De forma particular, a partir de los resultados obtenidos se concluye que para el cálculo del tiempo de renovación **deben considerarse las corrientes generadas por una onda real de marea**. En el caso del Puerto de Gijón, el considerar una onda de marea real produce un cambio sustancial en los valores de tiempo de renovación, disminuyendo casi un 60% pasando de 63.35 a 25.69 días. Sin embargo, en el Puerto de Tarragona los valores de tiempo de renovación para la masa de agua objeto de estudio se reducen aproximadamente sólo en un 2%, pasando de 79.00 a 77.57 días.

Respecto al efecto de la fase inicial de marea, tal y como varios autores mencionan en sus estudios (Liu *et al.*, 2004; Guo y Lordi, 2000), se ha observado que la fase inicial de marea, tanto en una onda media como en una onda real, no tiene efectos sobre el resultado final del tiempo de renovación. De todas formas, con el fin de estandarizar la metodología y basándonos en el estudio de Wang (2004) se establece que **la simulación debe iniciarse cuando el volumen es máximo, es decir, durante mareas vivas y en pleamar**.

Finalmente, mencionar que a partir de los resultados obtenidos puede concluirse que **las corrientes generadas por el viento tie-**

nen un importante efecto y, por tanto, deben ser consideradas. En la masa de agua del Puerto Gijón, cuando se tiene en cuenta una onda media de marea, el tiempo de renovación decrece aproximadamente un 48% al considerar el efecto del viento, pasando de 123.39 a 63.35 días. Por su lado, la masa de agua de Tarragona la reducción es de un 37% aproximadamente, pasando de 126.30 a 79 días. Por tanto, no cabe duda, tal y como se recoge en la metodología, que el viento es un importante agente dispersivo que permite la renovación del volumen de la masa de agua y, por tanto, debe considerarse. Por otro lado, el estudio sobre el efecto del régimen de viento no ha permitido obtener una conclusión satisfactoria puesto que el tiempo de renovación en la Dársena Norte de Raos no ha presentado ninguna variación frente a los diferentes efectos considerados. Por tanto, dicho estudio debería realizarse en masas de agua que permitan conocer si el régimen de viento produce un efecto sobre los resultados finales.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la implicación de Puertos del Estado y de las Autoridades Portuarias de Gijón, Huelva, Tarragona y Santander en el proyecto de validación y calibración de la ROM 5.1. "Calidad de aguas litorales en áreas portuarias". Parte del presente proyecto ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D+I (2004-2007) del Ministerio de Educación y Ciencia, CTM2005-00659.

Referencias

- Artiñano, B., Gómez-Moreno, F.J., Pujadas, M., Moreno, N., Alastuey, A., Querol, X., Martín, F., Guerra, A., Luaces, J.A., Basora, J. (en prensa). Measurement of particulate concentrations produced during bulk material handling at the Tarragona harbour. *Atmospheric Environment*.
- Cucco, A., Umgiesser, G. (2006). Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological modelling*. 193. 34-51.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- García, A., Revilla, J. A., Juanes, J. A., Álvarez, C., Nikolov, K., and García, R. (2001). Probabilistic optimisation of sewer systems. Proceedings Third Black Sea International Conference, Varna, Bulgaria.
- Gómez, G. A., García, A., Revilla, J. A., Ondiviela, B., Carranza, I., Guinda, X., Álvarez, C., Juanes, J. A. (2006). Aproximación metodológica para el cálculo del tiempo de renovación en áreas portuarias. EROM01.
- Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Prego, R. (2003). Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 58. 567-573.
- Guo, Q., Lordi, G.P. (2000). Method for quantifying freshwater input and flushing time in estuaries. *Journal of Environmental Engineering*. 126. 675-683.
- Liu, Z., Wei, H., Liu, G., Zhang, J. (2004). Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 61. 25-35.
- Monsen, N. E., Cloern, J. E., Lucas, L. V. (2002). A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*. 47(5). 1545-1553.
- Ondiviela, B. (2006). Desarrollo de un modelo integral de gestión de la calidad de los sistemas acuáticos portuarios. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Orfila, A., Jordi, A., Basterretxea, G., Vizoso, G., Marbà, N., Duarte, C. M., Werner, F. E., Tintoré, J. (2005). Residence time and Posidonia oceanica in Cabrera Archipelago National Park, Spain. *Continental Shelf Research*. 25. 1339-1352.
- Puente, A., Juanes, J. A., García-Castillo, G., Álvarez, C., Revilla, J. A., Gil, J. L. (2002). "Baseline study of soft bottom benthic assemblages in the Bay of Santander (Gulf of Biscay)". *Hydrobiologia*, 475/476, 141-149.
- Puertos del Estado (2005). "ROM 5.1-05: Calidad de las aguas litorales en áreas portuarias". Ministerio de Fomento. 136pp.
- Takeoka, H. (1984). Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*. 3(3). 311-326.
- Thomann, R. V., Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*: HarperCollins.
- Wang, C.-F., Hsu, M.-H., Kuo, A. Y. (2004). Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 60(3). 381-393.