

La dinámica de marea en el estuario del Guadalquivir: un caso peculiar de «resonancia antrópica»

O. ÁLVAREZ, B. TEJEDOR y J. VIDAL
Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar.
Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz)

RESUMEN

A partir de las series mensuales de datos de nivel registradas experimentalmente en siete estratégicos emplazamientos del estuario del Guadalquivir, se han obtenido las características armónicas de la marea más relevantes. Para realizar la interpretación física del inesperado comportamiento que se desprende del análisis de los resultados, se ha recurrido a un modelo analítico, el cual, debido a la peculiar batimetría y geometría del Guadalquivir, presenta excelentes ajustes respecto a los resultados experimentales. El análisis de los resultados permite interpretar el escaso amortiguamiento que sufre la amplitud de las constituyentes semidiurnas, especialmente la M_2 , a lo largo del estuario, a pesar del importante papel que ejerce la fricción por fondo. La explicación de este comportamiento se halla en las características resonantes que presenta el estuario para la constituyente semidiurna M_2 . Este fenómeno no surge de forma natural, sino como consecuencia de las actuaciones antrópicas realizadas en el canal: la presencia de la esclusa de Sevilla y la profundidad casi constante generada por los periódicos dragados, convierten al estuario en un cuerpo semicerrado cuyas dimensiones, geometría y batimetría modificada artificialmente generan resonancia para la onda de periodo cercano a 12.42 horas.

Palabras clave: resonancia, modelo analítico, marea armónica; estuario del Guadalquivir.

ABSTRACT

The more important harmonic tidal characteristics from monthly level data series recorded at seven strategic locations of Guadalquivir estuary have been obtained. In order to provide a physical interpretation of the unexpected behavior that is come off the analysis of the results, an analytical model has been developed. The results show an excellent agreement with respect to the observational data, due to the peculiar bathymetry and geometry of the Guadalquivir. The analysis of results allow to interpret the weak damping that undergoes the amplitude of the semidiurnal components, specially M_2 , th-

roughout the estuary, in spite of the important role produced by the bottom friction. The explanation of this behaviour is found in the resonant characteristics of the estuary for the semidiurnal M_2 constituent. This phenomenon does not arise from natural way, but as a result of the human actions made in the channel. The presence of the tidal barrier in Sevilla and the dredged nearly constant depth, turn to the estuary into a semienclosed body that generate resonance for the wave of period 12.42 hours.

Key words: resonance, analytical model, tides, Guadalquivir estuary.

1. INTRODUCCIÓN

Según la definición de Cameron y Pritchard (1963) habitualmente utilizada en el entorno científico, un estuario se define como un cuerpo de agua semicerrado conectado con mar abierto, en donde el agua de mar se halla mezclada con agua dulce procedente del drenaje terrestre. Debido a la periodicidad de los movimientos astronómicos, el espectro de mareas en las regiones oceánicas alejadas de costa puede ser representado por un limitado número de armónicos, denominados constituyentes astronómicas de marea (véase, p. ej. Cartwright and Tayler, 1971; Godín, 1972). En dominios de agua semicerrados, la marea es, habitualmente, de tipo cooscilante (Defant, 1961), cuya aportación fundamental es debida a la onda de marea que se genera astronómicamente en el océano y se propaga al interior de éstos a través de su frontera de conexión con mar abierto. Las dimensiones y geometría de estos recintos ejercen una influencia determinante, ya que condicionan sus características dinámicas y provocan cambios en el régimen de la onda de marea en su interior. Cada cuerpo de agua posee un periodo natural de oscilación propia, que depende de la longitud y profundidad del canal. Tal y como ocurre con el oscilador armónico clásico, cuando la oscilación forzada que proviene de mar abierto tiene un periodo igual al periodo natural de oscilación del cuerpo de agua, se produce el conocido fenómeno de resonancia; bajo este efecto, la amplitud de la onda sufre la máxima amplificación en el interior del dominio.

Un ejemplo peculiar de recinto de agua semicerrado lo constituye el estuario del Río Guadalquivir. Situado a SW de España (Fig. 1), el río Guadalquivir representa el mayor curso fluvial de esta región, con una longitud aproximada de 650 Km.

Su caudal de agua dulce medio, $113 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que supone velocidades de la corriente medias no superiores a 5 cm s^{-1} , está determinado por el clima mediterráneo, con veranos secos y cálidos e inviernos suaves (ver p. ej. Sánchez, 1988). Sólo en periodos muy concretos, que ocurren con más frecuencia en invierno, se producen apreciables crecidas, con caudales máximos que rara vez alcanzan $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que en la mayor parte del año el caudal de agua dulce es muy pequeño, sin que excedan de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Su desembocadura se encuentra en el Golfo de Cádiz, por lo que la dinámica de marea en el interior del estuario, de tipo semidiurno, se halla condicionada por el Océano Atlántico, con

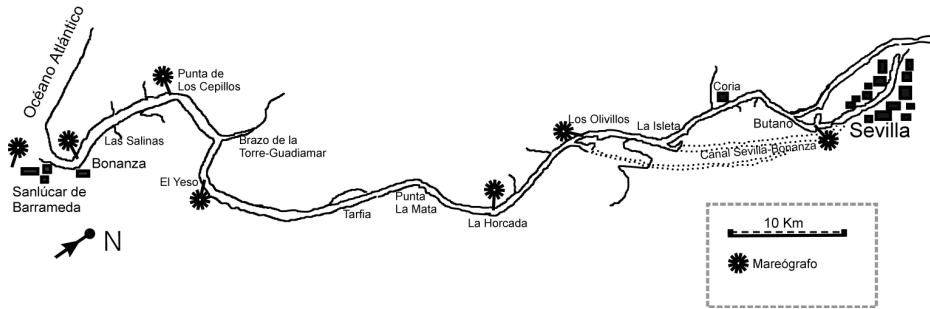


Figura 1. Localización del estuario del Guadalquivir. Superpuestas se hallan las localizaciones correspondientes a cada uno de los emplazamientos en los cuales se situaron mareógrafos.

amplitudes de ~ 1 m para la M_2 ($T = 12.42$ h), ~ 40 cm para la S_2 ($T = 12$ h) y ~ 5 cm para las diurnas principales O_1 ($T = 25.82$ h) y K_1 ($T = 23.93$ h). Las altas velocidades medias asociadas a la onda de marea, entorno a 1 m s^{-1} , respecto al pequeño flujo de agua dulce, encuadran al estuario, según la clasificación de Pritchard (1955), como verticalmente homogéneo o bien mezclado. Esta característica puede verse parcialmente alterada únicamente en los periodos de fuertes crecidas anteriormente comentados, que no representan el comportamiento habitual de la zona de estudio.

A lo largo del curso del Guadalquivir se han realizado diversas actuaciones de origen antrópico que han modificado su configuración natural, lo cual le confiere una especial singularidad. Dos actuaciones fundamentales han determinado las características de la zona estuárica: por una parte, la presencia de la esclusa de Sevilla 89 km aguas arriba, construida para eliminar el efecto de la marea en el Puerto de Sevilla, ha restringido la propagación principal de la onda de marea hasta este lugar; por otra, la necesidad existente de que puedan acceder grandes barcos hasta Sevilla, demanda la necesidad de aumentar la profundidad del río desde su desembocadura en Chipiona hasta la esclusa de Sevilla y zonas portuarias, con una cota actual prácticamente constante de 6,5 m de profundidad respecto al nivel medio.

Debido a estas singularidades morfológicas, para este estudio la zona estuárica del Guadalquivir se considerará delimitada no mediante el área de actuación de la pluma de intrusión salina (como indica la definición de Cameron y Pritchard), sino por la región de propagación de onda de marea, claramente identificada por la condición de impenetrabilidad que impone la esclusa de Sevilla. Esto es así porque la pluma de intrusión salina no se deja sentir más allá de 30 Km aguas arriba, mientras que la onda de marea alcanza de forma diáfana la esclusa y representa un límite específico preciso, estableciendo la cabeza del estuario a 89 Km de la desembocadura con mar abierto.

El conocimiento de las características hidrodinámicas de la zona representa el primer paso al amplio conjunto de estudios previstos sobre el entorno del estuario del Guadalquivir. Para este propósito, durante los años 1999 y 2000, se realizaron diversas campañas de campo consistentes en la instalación de mareógrafos de presión Aanderaa en siete emplazamientos estratégicos a lo largo del estuario (Tabla 1), con el objetivo de registrar variaciones de nivel durante periodos de un mes para obtener un conocimiento preciso de las características dinámicas. Así, en la sección siguiente se presentan los resultados para las características armónicas que presenta la marea en cada uno de los emplazamientos, obtenidas a partir del análisis de los datos registrados. La Sección 3 está dedicada a la interpretación física del inesperado comportamiento que se obtiene para las constituyente semidiurna M_2 , cuya amplitud, a pesar de la pequeña profundidad que presenta el estuario, no muestra un amortiguamiento importante debido a los efectos disipativos. En la Sección 4 se analizan las causas de este comportamiento en términos de las actuaciones de origen antrópico realizadas en el canal. Un sumario final completa este artículo.

2. CARACTERÍSTICAS ARMÓNICAS DE LA MAREA EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR

Como ha sido comentado, durante los años 1999 y 2000 se realizaron diversas campañas de campo en el estuario del Guadalquivir consistentes en la instalación de mareógrafos de presión Aanderaa en siete puntos estratégicos a lo largo del mismo (véase Tabla 1 y Fig. 1). Todos los mareógrafos estuvieron emplazados durante un periodo mínimo de un mes, lo cual permitió obtener las principales constituyentes armónicas de marea. Cada serie de datos, que fue obtenida con un periodo de muestreo de 10 minutos, fue sometida a un proceso de filtrado de media móvil $A_6A_6A_7$ (Godín, 1972), para eliminar fluctuaciones

Tabla 1. Localización de cada uno de los emplazamientos en los cuales se instalaron mareógrafos a lo largo del estuario del Guadalquivir. P.K representa el punto kilométrico respecto a la Esclusa de Sevilla

<i>Estación</i>	<i>P. K.</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
Chipiona	89	36° 44,9' N	6° 25,6' W
Bonanza	85	36° 48,2' N	6° 20,2' W
Cepillos	69	36° 54,2' N	6° 20,1' W
Yeso	55	36° 54,8' N	6° 11,9' W
Horcada	34	37° 03,3' N	6° 05,3' W
Olivillos	17	37° 11,4' N	6° 06,0' W
Butano	2	37° 19,9' N	6° 00,5' W

de periodicidad inferior a 1 hora. Mediante un proceso de análisis armónico (Foreman and Henry, 1989), se obtuvo cada una de las constituyentes armónicas principales en cada uno de los emplazamientos. La Tabla 2 presenta las constantes armónicas asociadas a las 4 principales constituyentes, M_2 , S_2 , O_1 y K_1 , que representan el 95% de la onda de marea total.

Tabla 2. Amplitudes (cm) y fases (grados Greenwich) para las constituyentes principales semidiurnas M_2 y S_2 y diurnas K_1 y O_1 en cada uno de los emplazamientos indicados.

Estación	M_2		S_2		O_1		K_1	
	Ampl. (cm)	Fase (°)	Ampl. (cm)	Fase (°)	Ampl. (cm)	Fase (°)	Ampl. (cm)	Fase (°)
Chipiona	103,7	54,7	37,1	76,8	7,2	307,1	8,4	66,5
Bonanza	94,9	62,8	31,0	88,1	6,5	312,8	7,6	56,5
Cepillos	81,4	79,0	24,7	104,4	6,2	334,7	6,7	76,1
Yeso	82,0	93,6	25,4	115,8	5,4	344,9	6,4	108,5
Horcada	74,7	132,8	18,8	163,7	5,4	10,2	5,3	89,0
Olivillos	79,5	151,9	18,7	189,0	5,4	21,8	5,6	96,3
Butano	88,6	174,2	20,7	214,2	5,3	30,2	4,9	107,0

A la vista de la misma, el comportamiento de la marea se muestra típicamente semidiurno, con una relevante contribución de la constituyente M_2 , la más importante en la zona. Ésta mantiene una elevada amplitud a lo largo de todo el estuario. La razón de este comportamiento tratará de obtenerse seguidamente.

3. INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LA DINÁMICA DE MAREA

Una primera aproximación a la interpretación dinámica de la marea puede obtenerse considerando la solución analítica de las ecuaciones que describen el proceso físico. Para el caso peculiar del Estuario del Guadalquivir, esta aproximación se muestra especialmente interesante, debido a las características geométricas del estuario, con una profundidad y anchura casi constantes. Estas dos características permiten imponer unas condiciones de contorno simples a las ecuaciones, las cuales, lejos de representar una cruda aproximación para obtener una solución analítica que describa una interpretación cualitativa inicial, son fieles reflejos del contorno real del dominio representado.

Para el caso de un recinto de agua semicerrado bien mezclado cuya anchura es muy pequeña respecto a su longitud, como es el caso del Guadalquivir, las ecuaciones que describen su hidrodinámica pueden reducirse, en primera apro-

ximación casi lineal, a las de un canal unidimensional, como (véase, p. ej. Defant, 1961; Dronkers, 1964; Pugh, 1987)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + Fu + g \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad ; \quad b \frac{\partial \xi}{\partial t} + h \frac{\partial ub}{\partial x} = 0.$$

en donde u representa la velocidad verticalmente integrada en la dirección longitudinal del canal; ξ la elevación de la superficie libre sobre el nivel medio; b la anchura del canal; h la profundidad respecto al nivel medio; y F es el coeficiente lineal de fricción por fondo, el cual puede ser representado por

$$F = \frac{8rU}{3\pi h}$$

en donde r representa el coeficiente de fricción por fondo y U la velocidad media en el dominio considerado.

El sistema se completa con la prescripción de las condiciones de contorno:

$$u(x = 0, t) = 0$$

que representa la condición de impenetrabilidad en el extremo cerrado del estuario (cabeza), y

$$\xi(x = L, t) = \zeta_0 \cos(\omega t - \varphi_0),$$

en donde ω denota la frecuencia de la oscilación exterior procedente de mar abierto en el extremo asociado la desembocadura situado a una distancia L de la cabeza del estuario.

El sistema anterior tiene todavía, en general, características no lineales. No obstante para el caso de una profundidad constante en todo el recinto y variación exponencial de la anchura en la forma $b = b_0 e^{\alpha x}$, en donde b_0 representa la anchura en la cabeza del canal (en $x = 0$) y α el parámetro de convergencia, el sistema adopta características lineales, y su solución puede escribirse como

$$\xi(x, t) = H(x) \cos(\omega t - \varphi(x)),$$

en donde

$$H(x) = \zeta_0 e^{\frac{-\alpha}{2}x} \sqrt{Z_1^2(x) + Z_2^2(x)} \quad ; \quad \varphi(x) = \arctan\left(\frac{Z_2(x)}{Z_1(x)}\right) - \varphi_0$$

con

$$\begin{aligned}
 Z_1(x) &= \cos(kx) \left[\cosh(\mu x) + \frac{\alpha\mu}{2(\mu^2 + k^2)} \sinh(\mu x) \right] + \\
 &\quad + \sin(kx) \left[\frac{\alpha k}{2(\mu^2 + k^2)} \cosh(\mu x) \right] \\
 Zg(x) &= -\sin(kx) \left[\sinh(\mu x) + \frac{\alpha\mu}{2(\mu^2 + k^2)} \cosh(\mu x) \right] + \\
 &\quad + \cos(kx) \left[\frac{\alpha k}{2(\mu^2 + k^2)} \sinh(\mu x) \right]
 \end{aligned}$$

y

$$u(x, t) = U(x) \cos(\omega t - \varphi_u(x)),$$

con

$$U(x) = \zeta_0 e^{\frac{-\alpha}{2}x} \sqrt{U_1^2(x) + U_2^2(x)} \quad ; \quad \varphi_u(x) = \arctan\left(\frac{U_2(x)}{U_1(x)}\right) - \varphi_0$$

y

$$U_1(x) = \frac{2\pi}{k^2 + \mu^2} [k \sinh(\mu x) \cos(kx) - \mu \cosh(\mu x) \sin(kx)]$$

$$U_2(x) = -\frac{2\pi}{k^2 + \mu^2} [k \cosh(\mu x) \sin(kx) + \mu \sinh(\mu x) \cos(kx)]$$

El sistema queda determinado mediante las condiciones de ligadura

$$\omega F = 2k\mu gh$$

$$k^2 - \mu^2 = \frac{\omega^2}{gh} - \frac{\alpha^2}{4}$$

En los experimentos realizados, la solución analítica se particularizó para las características del estuario del Guadalquivir. Así se consideró una profundidad constante $h = 6,5$ m, representativa de la observada a lo largo del estuario. La cabeza del canal se tomó a $L = 89$ Km de la desembocadura, en el punto representativo en el que se encuentra la esclusa, que impone la condición de impenetrabilidad. Debido a la despreciable variación de la anchura, se eligió un parámetro de convergencia nulo, $\alpha = 0$, que equivale a considerar una anchura

constante a lo largo del estuario. No obstante, pequeños valores de este parámetro no suponen variaciones significativas en los resultados. El término de fricción se escogió de manera que se obtuviesen los mejores ajustes para los datos observados respecto a los calculados, considerando una velocidad media en un ciclo de la onda constante $U = 0,5 \text{ ms}^{-1}$. Para el caso de la constituyente principal M_2 se obtuvo $r = 0,003$, mientras que para la S_2 y las diurnas K_1 y O_1 este coeficiente fue $r = 0,004$. La diferencia entre los valores del coeficiente de fricción según las diferentes constituyentes no es extraña: el distinto valor del coeficiente de fricción lineal para la constituyente principal M_2 respecto a las otras constituyentes de menor magnitud ya fue descrito por Jeffrey (1970), y se introduce para compensar efectos disipativos no lineales que no se consideran al asumir el término de fricción en forma lineal.

Los resultados obtenidos para las constituyentes semidiurnas principales M_2 y S_2 , así como para las diurnas principales O_1 y K_1 , que se exponen en las Figuras 2 y 3, representan excelentes ajustes cuantitativos, superiores a los presentados en otros trabajos de investigación en diferentes dominios con otras soluciones analíticas similares (véase, p. ej. Garrett, 1974; Prandle and Rahman, 1980; Prandle, 1985). En concreto, los errores medios, obtenidos como

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{\text{obs}} - x_{\text{calc}}|_i,$$

no superan para la amplitud de elevación 5 cm en ninguna de las cuatro constituyentes, mientras que para la fase las diferencias no exceden de 10° , las cuales se producen con la constituyente K_1 . La razón de este inusual comportamiento debe buscarse, como ya ha sido comentado, en las simples condiciones de contorno impuestas en las ecuaciones, las cuales son fieles aproximaciones de las condiciones reales que representan.

Respecto a la amplitud de elevación, la característica más relevante se encuentra en el escaso amortiguamiento que presentan las constituyentes semidiurnas a lo largo del canal, especialmente marcado en la constituyente M_2 (Fig. 2). Para esta constituyente, la amplitud de la onda en el emplazamiento de Butano, a 87 km de la desembocadura, es de 90 cm, mientras que en Chipiona, en el otro extremo del estuario, junto a la desembocadura, la amplitud es de 103 cm. Este comportamiento es inesperado, ya que la pequeña profundidad del canal sugiere, a primera vista, un importante amortiguamiento de la amplitud de la onda por los efectos disipativos de la fricción. Lo mismo no ocurre, sin embargo, con las constituyentes diurnas K_1 y O_1 , que sí reflejan una mayor disminución de su amplitud en términos relativos.

La justificación a este comportamiento puede obtenerse a través de una característica cualitativa relevante que posee el canal: la onda semidiurna M_2 tiene un comportamiento resonante en el estuario, correspondiente al caso de un oscilador clásico cuarto de onda.

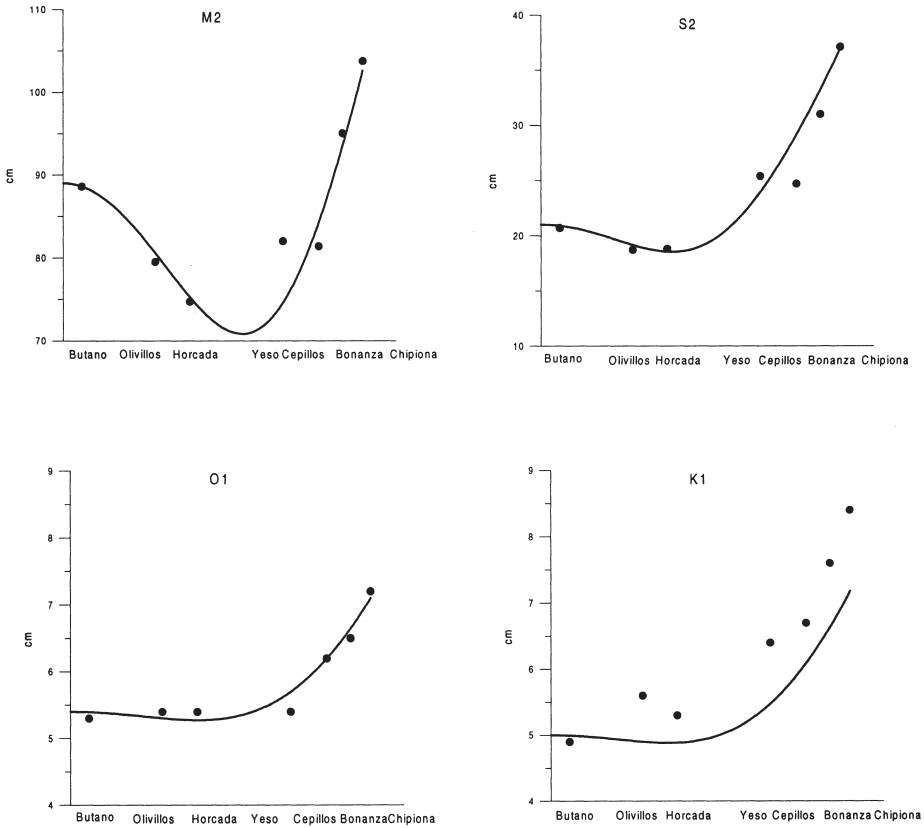


Figura 2. Amplitud calculada analíticamente (línea continua) y observada en cada uno de los emplazamientos, para las constituyentes M₂, S₂, O₁ y K₁.

En efecto, considerando el caso hipotético en el cual fricción fuese nula y la profundidad y anchura constantes, el periodo natural de oscilación del estuario viene dado por la expresión

$$T = \frac{2L}{\left(n + \frac{1}{2}\right)\sqrt{gh}}$$

el cual corresponde al periodo para el cual se obtiene la máxima amplificación de la amplitud $H(x)$ definida anteriormente (véase también un desarrollo análogo en Godín, 1993; Shetye, 1999).

Para la longitud y profundidad del Guadalquivir, el periodo natural de oscilación para $n = 0$ (oscilador cuarto de onda) es $T = 12.42$ horas, que coincide

con el periodo de la constituyente M_2 . En otras palabras, la constituyente M_2 es resonante en el estuario. Esta propiedad permite extraer una importante consecuencia a nivel cualitativo: un máximo efecto amplificador de la amplitud asociada a la constituyente M_2 en ausencia de fricción (y en menor mediada de la constituyente S_2 , cuyo periodo $T = 12$ h, es cercano al periodo resonante). Naturalmente, la escasa profundidad del estuario provoca importantes efectos disipativos asociados a la fricción que impiden que se produzca resonancia pura, convirtiendo al canal en cuasi-resonante. Es por ello que la onda no se ve efectivamente amplificada en el interior del canal: el efecto amplificador asociado a las características resonantes del estuario se ve compensado con el amortiguamiento que sufre la onda debido a la fricción.

El periodo resonante del canal se halla muy alejado, sin embargo, del periodo las constituyentes diurnas, lo cual provoca un menor enmascaramiento y, por ende, una manifestación más clara de los efectos disipativos asociados a la fricción.

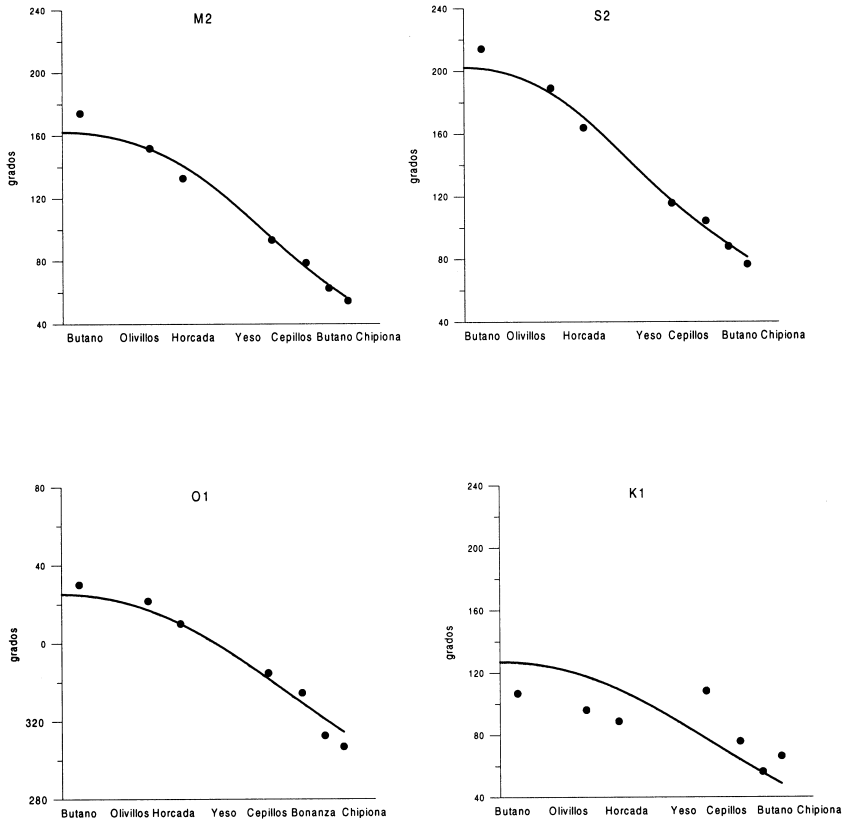


Figura 3. Igual que la Figura 2 pero para las fases.

Otra evidente manifestación de la fricción se encuentra en los retardos de fase que se obtienen para cada onda (Fig. 3). Concretamente, estas diferencias entre los extremos del canal se muestran, para las semidiurnas, entorno a 110° (que suponen un retardo en tiempos cercano a 3 h) mientras que para las constituyentes diurnas esta diferencia se sitúa en 70° (entorno a 4.5 horas).

4. INFLUENCIA ANTRÓPICA SOBRE LA DINÁMICA DE MAREA

Como ha sido comentado, las características resonantes del canal condicionan el comportamiento del armónico M_2 , que dependen de dos factores fundamentales, cuales son la longitud y profundidad del estuario. Precisamen-

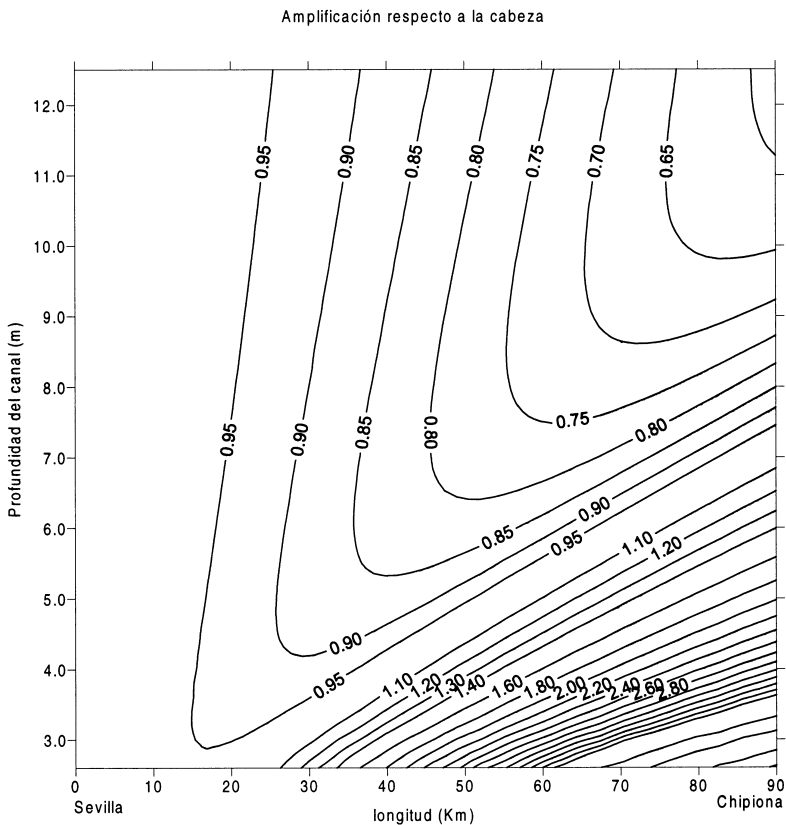


Figura 4. Amplificación de la constituyente principal M_2 , respecto a la amplitud en la cabeza, en cada punto del estuario del Guadalquivir, para un rango de profundidades constantes hipotéticas comprendidas entre 3 y 12 metros.

te, ambas características han sido modificadas artificialmente: la longitud del estuario, determinada por la posición de la esclusa, que dista 89 Km de mar abierto; y la profundidad del canal, 6,5 m, generada por los periódicos dragados que se efectúan para mantener el calado suficiente para permitir el tránsito de grande buques. Es claro, pues, que la influencia antrópica es responsable del fenómeno de resonancia producido en el canal.

La Figura 4 muestra la amplificación que sufre la onda M_2 en todos los puntos del canal respecto a la amplitud en la cabeza del mismo, para distintas profundidades hipotéticas constantes. A la vista de la misma, la amplitud de elevación se ve claramente influida por la profundidad del estuario. Como ejemplo de esto, para una hipotética profundidad constante de 5 m, la amplitud de la onda en la desembocadura se encontraría amplificada 2 veces respecto a la que se obtendría en la cabeza del canal (situada en la esclusa de Sevilla). Expresado de otro modo, para una amplitud de la onda de 103 cm en la desembocadura, ésta sufriría un amortiguamiento hasta alcanzar en la esclusa de Sevilla una amplitud de 51 cm, sustancialmente inferior a la existente actualmente. A esta sensibilidad de la amplitud con la profundidad contribuyen dos factores de forma combinada: por un lado, una disminución de la profundidad lleva asociado un incremento de la fricción, que contribuye a disipar energía con el consiguiente amortiguamiento de la onda; y por otro, la variación de profundidad deshace las características resonantes del canal, provocando una menor amplificación. Este comportamiento cualitativo descrito parece justificar las apreciables diferencias que se han encontrado en estudios previos de la dinámica de marea en el Guadalquivir (véase, por ejemplo, el anuario de mareas de 1995 publicado por el I.H.M), con diferentes condiciones batimétricas, más que a otro tipo de errores asociados a la observación.

5. SUMARIO Y CONCLUSIONES

El estuario del Guadalquivir posee unas peculiares características hidrodinámicas, asociadas, fundamentalmente a las diversas actuaciones antrópicas que se han realizado en los últimos años. Las mínimas diferencias en el rango batimétrico y la escasa variación de anchura permiten obtener soluciones mediante un modelo analítico que describe su comportamiento hidrodinámico con una excepcional aproximación cuantitativa, poco usual en este tipo de soluciones. A pesar de la escasa profundidad del estuario, ha quedado experimentalmente demostrado que la amplitud de las ondas semidiurnas sólo se ve ligeramente atenuada. El motivo de esta característica inesperada desde el punto de vista físico, se encuentra en las propiedades resonantes del canal para las constituyente semidiurna M_2 y la cercanía del periodo resonante para la constituyente S_2 . Las actuaciones antrópicas comentadas influyen determinadamente sobre estas características resonantes del canal, que se traducen en una elevada amplitud de la onda en las cercanías de la cabeza del estuario, situado

en la esclusa de Sevilla. El efecto combinado de la fricción y la resonancia en el canal es el que provoca que la amplitud en la cabeza del estuario apenas sufra amortiguación a lo largo del mismo.

Al mismo tiempo, es plausible la sensibilidad que muestra la amplitud de la elevación M_2 a las hipotéticas variaciones constantes de profundidad, más perceptible cuando menor es ésta. Esto es debido a que una menor profundidad deshace las características resonantes, a la vez que aumenta la fricción.

Todas estas características, no obstante, pueden verse temporalmente modificadas por episodios de fuertes precipitaciones que dieran lugar a significativos aportes de agua dulce en el canal. En este caso, el flujo de agua dulce podría producir fenómenos de interacción no lineal susceptibles de influir en el comportamiento de cada constituyente (Godín, 1998), modificar las constituyentes no lineales (Fiedrichs and Aubrey, 1988), así como un aumento de la estratificación, cuyo impacto requiere estudios posteriores sobre la base desarrollada en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los datos experimentales presentados en este artículo fueron obtenidos a través de campañas de campo financiadas bajo convenio de colaboración suscrito entre la Universidad de Cádiz y la empresa AYESA. Los autores agradecen a D. José Luis Fernández y D. Mariano de Castro, de la Autoridad Portuaria de Sevilla, la cesión de información histórica sobre el Río Guadalquivir.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, O.; IZQUIERDO, A.; TEJEDOR, B.; MAÑANES, R.; TEJEDOR, L., y KAGAN, B. (1999): «The influence of sediment load on tidal dynamics, a case study: Cádiz Bay», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **48**, 439-450.
- CAMERON, W. M., y PRITCHARD, D. W. (1963): *Estuaries*. In *The Sea*, vol 2. John Wiley and Sons.
- CARTWRIGHT, D. E., y TAYLER, R. J. (1971): «New computation of the Tide-generating Potential. *Geophysical Journal of the Royal astronomical Society*, **23**, 45-74.
- DEFANT, A. (1961): *Physical Oceanography*. Vol 2. Pergamon Press, Oxford.
- DRONKERS, J. J. (1964): *Tidal computations in rivers and coastal waters*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam.
- FOREMAN, M. G. G., y HENRY, R. F. (1989): «The harmonic analysis of tidal model time series», *Advances in Water Resources*, **12**, 109-120.
- FRIEDRICH, C., y AUBREY, D. (1988): «Non-linear distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **27**, 521-545.
- GARRET, C. (1974): «Normal modes of the Bay of Fundy and Gulf of Maine», *Can. J. Earth Sci.*, **11**, 549-556.
- GODIN, G. (1972): *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto, Ont., Canada, 264 pp.

- GODÍN, G. (1993): «On Tidal resonance», *Continental Shelf Research*, **13**, 89-107.
- GODIN, G. (1998): «The Propagation of Tides up Rivers with Special Considerations on the upper Saint Lawrence River», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **48**, 307-324.
- JEFFREYS, H. (1970): *The Tides*. 5th edn. Cambridge University Press.
- KAGAN, B. A.; TEJEDOR, L.; ÁLVAREZ, O.; IZQUIERDO, A.; TEJEDOR, B., y MAÑANES, R. (2001): «Weak wave-tide interaction and its application to Cádiz Bay», *Continental Shelf Research*, **21**, 697-725.
- PRANDLE, D. (1985): «Classification of Tidal response in Estuaries from Channel Geometry», *Geophys. J.R. astr. Soc.*, **80**, 209-221.
- PRANDLE, D., y RAHMAN, M. (1980): «Tidal response in Estuaries», *Journal of Physical Oceanography*, **10**, 1552-1573.
- PRITCHARD, D. W. (1955): «Estuarine Circulations Patterns», *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, **81**, No 717.
- PROUDMAN, J. (1955): «The propagation of the tide and surge in an estuary», *Proc. Royal Soc. London*, **213**, 8-24.
- PUGH, D. T. (1987): *Tides, surges and mean sea-level*. John Wiley and Sons.
- SÁNCHEZ, J. (1988): *Estudio climatológico de la Bahía de Cádiz*. Instituto Hidrográfico de la Marina. CA 795/88.
- SHETYE, S. R. (1999): «Tides in the Gulf of Kutch, India», *Continental Shelf Research* **19**, 1771-1782.