

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA MAREA EN EL SACO INTERNO DE LA BAHÍA DE CÁDIZ

P. Martín, B. Tejedor, J. Vidal, P. Marín, J. J. Muñoz-Pérez

Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz
11510 Puerto Real (Cádiz)

INTRODUCCIÓN

La onda de marea y sus corrientes asociadas presenta características especiales al propagarse en zonas litorales con escasa profundidad y con amplias zonas inundables, donde los procesos de interacción no-lineal originados por la advección, fricción y continuidad, producen asimetrías y distorsiones en la onda.

Una de estas zonas de escasa profundidad es el Saco Interno de la Bahía de Cádiz, zona de marismas recorridas por el caño de Sancti-Petri que comunica la parte interior de la Bahía de Cádiz con el Océano Atlántico. Desde el punto de vista hidrodinámico se trata de un caño con doble entrada de la onda de marea, muy somero, y con problemas de colmatación en ciertas zonas (Tejedor, 2001; Vidal 2002). Las características morfobatimétricas de esta zona condicionan la propagación de la onda de marea, modificando la amplitud y fase de las constituyentes astronómicas. Los mecanismos de interacción no-lineal son responsables de la asimetría y distorsión de la misma.

El objetivo fundamental de este trabajo es el estudio de la propagación de la onda de marea en el Saco Interno de la Bahía de Cádiz, el análisis de las características cuasi-estacionarias que presenta la onda por tratarse de un canal con doble entrada, y los procesos de interacción no-lineal, a partir de datos experimentales obtenidos en seis estaciones de medida.

La utilización de un modelo analítico en el que se asume fricción lineal (Álvarez, 2001) permite describir el comportamiento dinámico de las principales constituyentes astronómicas de la onda de marea en el Saco Interno.

La existencia de una modulación de carácter quincenal en el nivel medio diario de amplitud superior a los 0.05 m, es analizada en la última sección.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

La Bahía de Cádiz es un cuerpo de agua de reducida profundidad donde el movimiento dominante de las masas de agua es inducido por el efecto de la onda de marea que se genera en el océano y se propaga a su interior. Desde un punto de vista morfodinámico, la Bahía de Cádiz está constituida por tres zonas diferenciadas.

- 1.- Bahía Exterior: con una extensión aproximada a las 8000 Hectáreas y profundidad máxima de 15 metros, por su parte meridional termina en el angosto Estrecho de Puntales, cuya importancia se debe no tanto a su configuración geográfica, cuanto a su implicación en la determinación de las características hidrodinámicas de la Bahía.
- 2.- Bahía Interior: con una extensión húmeda entorno a las 3300 Hectáreas y profundidad media no superior a 1.5 metros. El 70% de esta zona es intermareal.

- 3.- Una zona de marismas que está recorrida por el Caño de Sancti-Petri, y que comunica la Bahía Interior con el Océano Atlántico a través de la desembocadura del mismo nombre (Figura 1) que constituye el Saco interno de la Bahía.

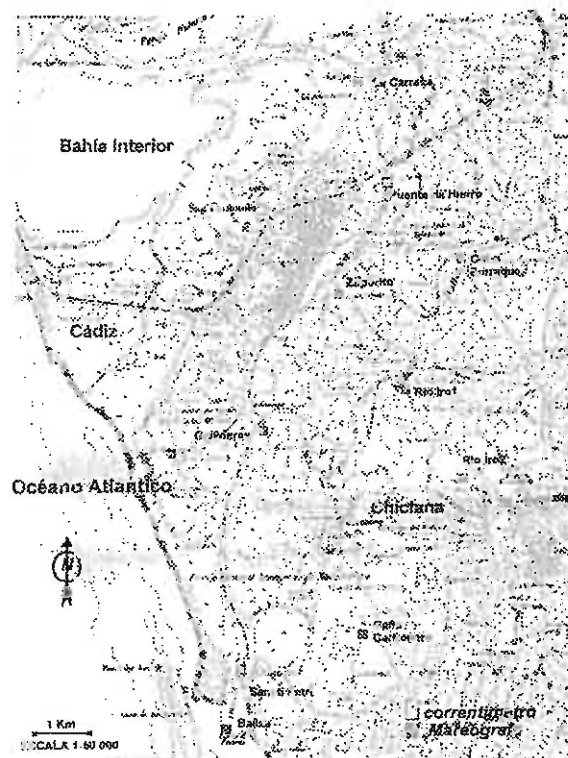


Figura 1. Saco Interno de la Bahía Cádiz y localización de las estaciones de medida.

Desde un punto de vista morfobatimétrico, el caño principal de Sancti Petri se extiende desde la desembocadura de Sancti-Petri, conexión con el Océano, hasta La Carraca (conexión con la Bahía Interior), siendo su longitud de aproximadamente 17 Km y profundidad muy somera, inferior a los 3 metros. El caño principal está muy definido desde el punto de vista morfobatimétrico, no así los múltiples caños secundarios y terciarios, (estos últimos aunque conectan con el principal tienen un caudal despreciable en determinados instantes de tiempo) que han surgido bien por condicionantes dinámicos propios de los caños de marea, bien por condicionantes humanos para permitir el abastecimiento de agua a las numerosas salinas existentes desde la antigüedad. Esta densidad de canales es la causa de la complejidad que presentan los procesos hidrodinámicos y de sedimentación en esta zona.

La metodología que se empleó para la medida de las variaciones del nivel del mar en el Saco Interno de la Bahía viene condicionada por la zona, en función de su profundidad. En el caño principal y en los secundario se instalaron mareógrafos de presión de fondo (Aanderaa WRL7) en seis estaciones. Los mareógrafos se programaron con un intervalo de muestreo de un dato cada diez minutos, estando instalados durante un período superior al mes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características armónicas de la onda de marea

La onda de marea en el Golfo de Cádiz, presenta un comportamiento típicamente semidiurno, siendo la constituyente de origen astronómico M2 ($T = 12.42$ h) la de mayor amplitud (aproximadamente 1 metro), representando dicha constituyente más del 85% de la energía total de la

onda de marea. Le sigue el armónico S2 ($T = 12.0$ h) con una amplitud aproximada de 40 centímetros. Las constituyentes diurnas son de un orden de magnitud inferior. Así, la O1 ($T = 25.82$ h) y la K1 ($T = 23.90$ h) tienen una amplitud del orden de los 5 centímetros. (Tejedor, 1997; Álvarez, 1999)

La amplitud y fase de estas constituyentes en las distintas estaciones de medida del Saco Interno, obtenidas mediante análisis armónico (Foreman & Henry, 1989) se presentan en la tabla I. El comportamiento que presentan las principales constituyentes es muy similar y se puede resumir en: la amplitud disminuye ligeramente desde la conexión del caño con el océano Atlántico hasta la estación del Río Iro, aumentando de forma significativa desde esta estación hasta alcanzar el valor máximo en la estación de La Carraca, conexión del caño con la Bahía Interior. Respecto a la fase, aumenta desde la conexión con el océano Atlántico hasta alcanzar el máximo en la estación de Zaporito, disminuyendo posteriormente.

Para interpretar la propagación de la onda de marea en el Caño (desde la conexión con el Océano Atlántico hasta su conexión con la Bahía Interna), se presentan los resultados obtenidos para el armónico M2 en función de la distancia horizontal, es decir la distribución espacial de la fase y la amplitud, obtenidas a través del análisis armónico en las distintas estaciones (figuras 2 y 3 respectivamente). En función de estos resultados se deduce que existe una diferencia de fase de aproximadamente 18 minutos entre las dos estaciones extremas del Caño (separadas aproximadamente 16 Km), mientras que entre las dos primeras estación separadas aproximadamente 6 Km (Baliza y Gallineras) existe un desfase de casi 22 minutos. Este comportamiento sugiere que la onda de marea debe penetrar por los dos extremos del canal de forma casi simultánea aunque con distinta amplitud.

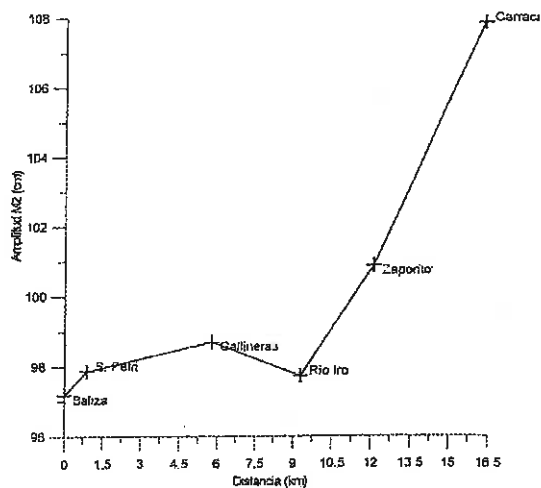


Figura 2. Distribución espacial de la amplitud a lo largo del caño principal

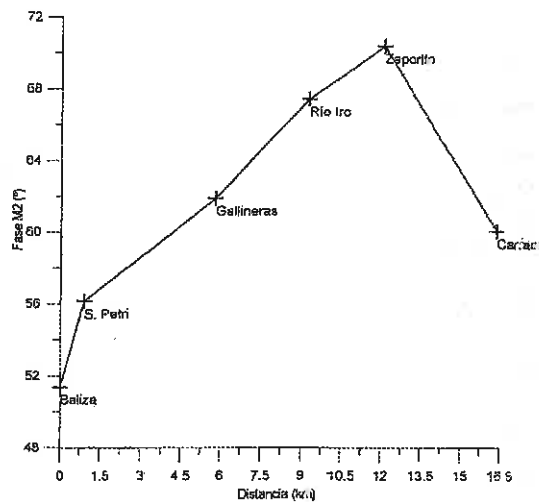


Figura 3. Distribución espacial de la fase a lo largo del caño principal

Componente	Baliza		Sancti Petri		Gallineras		Río Iro		Zaporito		La Carraca	
	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
Mm	0.84	194.29	1.31	184.58	0.94	12.40	4.00	32.27	3.77	68.34	0.19	290.54
Msf	1.67	51.23	1.76	111.04	5.15	42.33	4.37	21.43	5.84	30.41	2.87	50.96
O1	5.38	277.02	5.55	288.26	5.39	292.39	5.44	301.85	6.70	303.13	6.91	300.76
K1	6.11	26.64	6.18	32.15	6.05	42.89	5.33	52.44	5.50	53.46	7.85	50.52
N2	24.80	30.73	19.85	30.61	24.77	44.16	20.62	49.97	22.70	50.96	27.37	40.35
M2	97.18	51.37	97.86	56.14	98.70	61.86	97.73	67.40	100.89	70.36	107.88	60.06
S2	32.38	75.16	32.11	83.55	32.21	89.81	35.10	98.49	33.69	99.05	36.02	85.51
K2	9.57	67.68	9.49	76.07	9.52	82.33	10.37	91.01	9.95	91.57	10.64	78.03
MN4	1.45	93.21	0.85	113.79	1.10	180.63	0.39	230.25	0.39	243.51	1.55	127.76
M4	2.50	142.01	2.78	167.46	3.46	212.16	3.02	233.96	3.02	249.04	3.15	178.14
MS4	1.03	219.74	0.92	253.76	2.57	289.84	2.42	300.77	3.22	306.08	1.77	256.44
M6	0.34	45.79	1.51	112.61	1.69	120.56	2.24	151.23	1.29	176.43	2.10	85.31
2MS6	0.21	140.03	1.15	157.38	1.69	169.72	2.12	184.48	2.13	201.52	1.67	137.05

Tabla I. Constituyentes armónicas significativas en las estaciones de medida.

La dinámica del Saco Interno puede ser interpretada como dos ondas que se propagan con sentido opuesto dentro del canal y con distinta amplitud, por lo que se originará una oscilación cuasi-estacionaria. La zona donde, en principio, se deben encontrar las dos ondas viene caracterizada por un máximo en su fase o, lo que es lo mismo, máximo desfase temporal entre ella y los dos extremos del caño. Esta zona corresponde a la estación de Zaporito.

Debido al carácter estacionario que presenta la onda de marea en la Bahía Interior de Cádiz, (Álvarez, 2000) la amplitud de la marea aumenta desde su conexión con el océano Atlántico hasta llegar al Saco de la Bahía donde la amplitud es máxima, es decir en La Carraca. Ello explica que la amplitud del armónico M2 que se propaga en el caño de Sancti-Petri procedente de la Bahía Interior sea superior en más de 10 centímetros que la onda que se propaga desde mar abierto hacia el interior del caño por el extremo sur, desembocadura de Sancti-Petri.

Los resultados deducidos para el armónico M2 coinciden con los obtenidos para las constituyentes más significativas. Por ello, se puede deducir que la dinámica del caño de Sancti-Petri debe ser interpretada como un canal donde la onda de marea se propaga por los dos extremos del mismo con sentido opuesto, existiendo una pequeña diferencia en amplitud, y en fase entre estas dos ondas.

Respecto a las constituyentes de aguas someras, aunque su importancia energética es relativamente baja, (no superan los 3.5 cm), son imprescindibles para determinar las asimetrías y distorsiones de la onda de marea. El grado de asimetría cambia a lo largo del caño. Una atención particular prestaremos posteriormente a las componentes de largo período, originadas por interacción no lineal y cuya amplitud en ciertas zonas pueden ser relativamente importantes, (del orden de 5 cm).

Interpretación de la dinámica del Saco interno

El comportamiento de la onda de marea, si no se consideran los fenómenos de interacción no-lineal, puede ser descrito mediante las cinco principales constituyentes astronómicas (M2, S2, N2, K1, O1), que representan más del 95% de la onda de marea total.

Admitiendo que el Saco Interno puede ser considerado como un canal rectangular de 16350 metros de longitud, anchura de 200 metros, de profundidad constante (2 metros), y en donde en cada extremo del canal existe una onda que fuerza al sistema, su dinámica puede ser descrita a través de la solución analítica de un modelo unidimensional en el que se admite fricción lineal, densidad constante, aproximación hidrostática, (Vidal, 2002).

Para describir el comportamiento de las principales constituyentes astronómicas, se aplicó este modelo analítico a cada una de ellas, teniendo presente que por tratarse de un canal de doble entrada las condiciones de contorno son la amplitud y fase de cada constituyente en los dos extremos del canal, que corresponden a la estación de Baliza y La Carraca.

El Puerto de Gallineras corresponde a una zona intermedia en el caño, situada a unos 6 Km de la desembocadura, por lo que se ha elegido dicha estación para validar los resultados del modelo. En la Tabla II se representa la amplitud y fase de cada armónico deducido a partir del análisis armónico y obtenidos a través del modelo. En función de los errores obtenidos se puede admitir la validez del modelo analítico propuesto.

	Análisis Armónico		Modelo analítico		Error relativo (%)		Error absoluto	
	A ⁽¹⁾	F ⁽²⁾	A ⁽¹⁾	F ⁽²⁾	A	F	ΔA(cm)	ΔF(min)
M2	98.70	61.86	102.87	62.92	4.22	1.71	4.17	2.19
S2	32.21	89.81	34.30	87.65	6.49	2.41	2.09	4.32
N2	24.77	44.16	26.15	42.45	5.57	3.87	1.38	3.61
K1	6.05	42.98	6.61	40.78	9.26	4.92	0.56	8.42
O1	5.39	292.39	5.81	290.79	7.79	0.55	0.42	6.89

⁽¹⁾ Amplitud (cm); ⁽²⁾ Fase Greenwich (°)

Tabla II. Amplitud y fase deducidas de los datos experimentales y del modelo y errores cometidos

La pregunta que surge es ¿Hasta que punto la contribución de estas cinco constituyentes obtenidas con el modelo, son representativas de la marea en la zona?. Como es lógico a partir de ellas no se podrán explicar fenómenos de interacción no lineal, ni el comportamiento de las oscilaciones de largo periodo, banda larga de la marea.

Mediante un análisis de regresión lineal se compara la serie obtenida como suma de los cinco armónicos deducidos a través del modelo analítico y los datos obtenidos experimentalmente, siendo necesario eliminar de la serie observada las oscilaciones de periodo superior a las 30 horas, para obtener un mejor ajuste (con un coeficiente de regresión de 0.9945).

Variabilidad del nivel medio diario en el Saco Interno de la Bahía

Al estudiar los niveles medio diarios de la serie experimental registrada en el puerto de Gallineras considerando como unidad de tiempo el día lunar, se aprecia que existe una variabilidad del nivel medio diario muy significativo, superior a los 8 cm, figura 4.

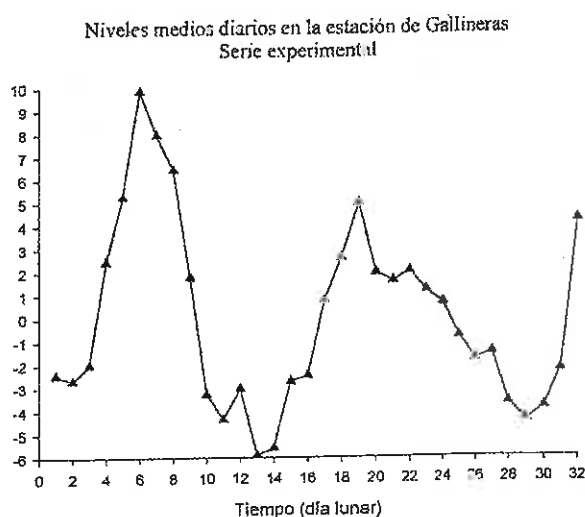


Figura 4. Niveles medios diarios en la estación de Gallineras. Serie experimental

Al no considerar en el modelo analítico propuesto las oscilaciones del nivel del mar con periodo superior a las 24 horas, banda larga de marea, no es posible explicar la variabilidad del nivel medio diario.

Para evaluar analíticamente esta variabilidad, se ha ajustado el nivel medio diario a una función cosenoidal, con un ajuste del 86.7%, determinándose que existe una modulación en el nivel medio diario con periodo de 14.23 días, cercano al de la componente astronómica M_{sf} (con periodo de 14.77 días). Al comparar la fase y amplitud de esta oscilación, con el armónico M_{sf} deducido a través del análisis armónico, parece evidente que están representando la misma oscilación, tabla 7.

	Periodo	Amplitud	Fase
Análisis armónico (M_{sf})	14.77 días	5.15 cm	42.33°
Ajuste	14.23 días	4.99 cm	44.40°

Tabla 7. Constantes armónicas del análisis armónico y las deducidas a partir del ajuste.

El origen de las constituyentes de largo periodo M_{sf} (quincenal), M_m (mensual), S_{sa} (semianual) y S_a (anual), es el potencial generador de la marea. Por lo general, la amplitud de estas constituyentes astronómicas es despreciable. Pero en esta banda cobran también una gran importan-

cia las oscilaciones del nivel del mar originadas por el viento y la presión atmosférica, esto es, la marea meteorológica de carácter probabilista. Por otra parte, en los cuerpos de aguas someras, debido a los procesos de interacción no lineal, se originan constituyentes de aguas someras de baja frecuencia. Este es el caso de la marea compuesta M_{sf} que se origina por interacción no lineal de los armónicos astronómicos $M_2 - S_2$, con un periodo igual al de la constituyente astronómica M_{sf} , lo que hace imposible la separación de ambos armónicos.

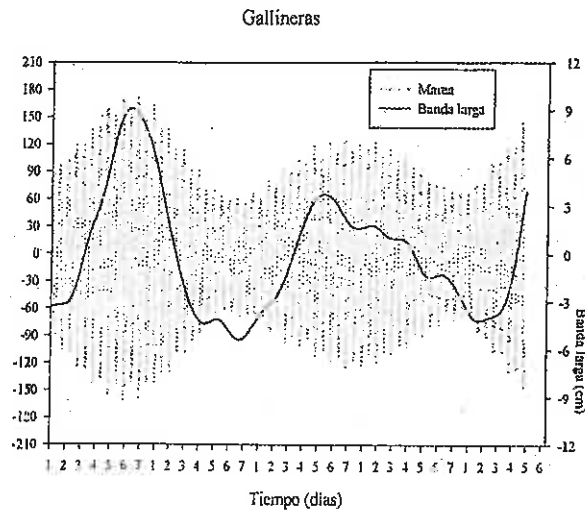


Figura 5. Marea y banda larga

En la generación de las oscilaciones de largo periodo de la marea en aguas someras, concurren tres factores: astronómico, interacción no lineal y meteorológico. La importancia de estas oscilaciones, es que como se ha demostrado anteriormente, son las responsables de la variabilidad del nivel medio diario en el Saco Interno de la Bahía, siendo la amplitud de la oscilación quincenal superior a los 5 centímetros, siendo necesario determinar su origen. Como puede verse en la figura 5, esta oscilación está en fase con el ciclo de mareas vivas – mareas muertas, lo que sugiere que posiblemente el origen de esta oscilación forzada sean los procesos de interacción no-lineal.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos se puede concluir, que la dinámica del Saco Interno de la Bahía, debe ser interpretada como dos ondas que se propagan por los dos extremos del Caño de Sancti-Petri, existiendo una diferencia de fase y de amplitud entre ellas, y con sentido opuesto, por lo que se origina una oscilación cuasi-estacionaria. En la estación de Zaporito se origina la oscilación máxima.

La aplicación de un sencillo modelo analítico unidimensional en el que se admite fricción lineal, permite describir la propagación de las principales constituyentes astronómicas de la onda de marea.

Existe una oscilación forzada de carácter quincenal que modula el nivel medio diario. Experimentalmente se ha deducido que para el Puerto de Gallíneras la amplitud de esta oscilación es de 5 cm, y está en fase con el ciclo mareas vivas-mareas muertas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, O., Simulación numérica de la dinámica de marea en la Bahía de Cádiz: análisis de las constituyentes principales interacción marea-brisa e influencia del sedimento en suspensión. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, 1999.
- Aubrey, D. G. y P. E. Speer., A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine system. Part I. Estuarine, Coastal and Shelf Science 21, 1985. Pp. 185-205.
- Dronkers, J. J., Tidal asymmetry and estuarine morphology. Netherlands Journal of Sea Research 20, 1986. Pp. 117-131.
- Foreman, M. G. G. y R. F. Henry., The harmonic analysis of tidal model time series. Advances in Water Resources 12. 1989. Pp. 109-120.
- Friedrichs, C. , Aubrey, D., Non-linear distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 27, 1988. Pp. 521-545.
- Godin, G. The Propagation of Tides up Rivers with Special Considerations on the upper Saint Lawrence River. Estuarine, Coastal and Shelf Science 48, 1998. Pp. 307-324.
- Pugh, D. T. Tides, surges and mean sea-level. John Wiley and sons, 1987.
- Speer, P. E. y D. G. Aubrey. A Study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part II: Theory. Estuarine, Coastal and Shelf Science. Vol. 21, 1985. Pp. 207-224.
- Tejedor, B. [Investigador Principal], Estudio hidrodinámico de las marismas de la Algaida, Bahía de Cádiz y Barbate. Informe técnico para la Dirección General de Costas. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Cádiz, 2001.
- Vidal, J. M., O. Alvarez, B. Tejedor y L. Tejedor. Estudio de la señal M2 de la marea en el Caño de Sancti Petri. 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Valencia, 2002.
- Vidal, J.M Caracterización dinámica de la marea y del sedimento en el sistema intermareal del Caño de Sancti-Petri. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. 2002.
-

LIBRO DE PONENCIAS TOMO I

© Copyright 2005

EDITORIAL C.P.D., S.L.

C/Sangenjo, 34 - 28034 MADRID

•Deposito Legal: M - 53402 - 2004

I.S.B.N. (obra completa): nº 84 - 9758 - 465 - I

I.S.B.N. (tomo I): nº 84 - 9758 - 463 - 5

•Impreso en España. Printed in Spain.

IMPRICO - IMPRENTA COMERCIAL

Avda. Gumersindo Llorente, 71 - 28022 MADRID

**II CONGRESO INTERNACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA MARINA**

Alicante, 22 a 26 de Abril de 2003

LIBRO DE PONENCIAS

Tomo I

OCÉANOS III MILENIO

FUNDACIÓN FOMENTO DEL MAR (FOMAR)
