

ESTRUCTURA MAREOLOGICA EN NORPATAGONIA UTILIZANDO EL MODELO WQMAP

Carlos A. Mazio

*Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina- Montes de Oca 2124, 1271
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. E-mail: mazio@hidro.gov.ar*

RESUMEN

El modelo hidrodinámico bidimensional WQMap, de amplio uso internacional, ha sido aplicado en el área de los tres golfos norpatagónicos (San Matías, San José y Nuevo) y aguas adyacentes de la plataforma continental argentina. Como datos de entrada al modelo indicado, se han utilizado la batimetría más actualizada y, para aplicar como condición de contorno en los bordes abiertos, la marea brindada por los modelos globales más confiables (se optó por el OSU). Después de diseñar una grilla de mucho detalle (con retículo casi cuadrado, de aproximadamente 1700 metros de lado) y de encontrar la estabilidad numérica correspondiente se seleccionaron 402 puntos distribuidos en el recinto, para los que WQMap generó, en cada uno de ellos, las series temporales de un mes de duración de la topografía (marea) y del movimiento (corriente) de las aguas.

Luego, dichas series fueron analizadas con el método armónico obteniéndose los valores de las constantes (amplitud y fase) de las principales ondas tanto de la marea como de las componentes de la corriente. En particular, se analizaron dos ondas diurnas (O_1 y K_1), tres semidiurnas (N_2 , M_2 y S_2) más importantes energéticamente y una cuartodiurna (M_4). Se han realizado comparaciones de los resultados obtenidos con aquéllos que fueron calculados a partir de datos de mediciones realizadas con anterioridad. Con las constantes armónicas de cada componente en los 402 puntos y mediante el Surfer, un programa muy adecuado para obtener óptimas distribuciones espaciales de isolíneas, se generaron, por un lado, las cartas de cotidales e isoamplitudes de las ondas de marea ya señaladas, y por otro, las correspondientes elipses de corriente. Las configuraciones brindadas permiten tener una adecuada imagen de la propagación y de la amplificación de las ondas de marea en esta región del litoral marítimo patagónico.

Palabras clave: oceanografía, dinámica, modelos, marea, Patagonia.

ABSTRACT

The hydrodynamic two-dimensional model, WQMap, of ample international use, has been applied in the area of the three northpatagonian gulfs (San Matias, San Jose and Nuevo) and adjacent waters of the Argentinian continental platform. About the input data to force the model, the bathymetry more updated has been used. Amplitudes and phases derived from Oregon State University (OSU) global model were used to force the model along the open boundaries. After to design a regular grid (each element almost square of approximately 1700 meters of side) and to find the numerical stability corresponding, 402 points were selected in the domain, for which WQMap generated, in each one of them, the temporary series of a month of duration of the topography (tide) and the movement (current) of waters.

Then, these series were analyzed with the harmonic method, obtaining the values of the constants (amplitude and phase) of the main waves. In particular, two diurnal waves (O_1 and K_1), and three semidiurnal waves (N_2 , M_2 and S_2) and one quarter diurnal (M_4) were analyzed to characterize the hydrodynamic state. Comparisons between the obtained computational results with the values calculated from data of measurements made previously. With the harmonics constants of each component in the 402 points and by means of the Surfer, a program to obtain optimal space distributions, were generated, on the one hand, the cotidal and corange charts of the tidal waves, and, on the other hand, the corresponding tidal current ellipses. The offered configurations allow having a suitable pattern of the propagation and the amplification of the tidal waves in the northpatagonian maritime coast.

Keywords: oceanography, dynamics, models, tide, Patagonian.

INTRODUCCION

Los golfos norpatagónicos (San Matías, San José y Nuevo, Figura 1) han sido de interés en la investigación de carácter oceanográfico, en particular en lo referente a su modelación hidrodinámica, pues una ajustada imagen de la topografía y circulación de las aguas, brindaría una herramienta de apoyo a las actividades de desarrollo (pesqueras, tráfico, turismo, portuarias, etc.) y científicas (por ejemplo, interacción mar-atmósfera, biología marina, etc.).

El trabajo presentado aquí es resultado de estudios realizados utilizando el modelo comercial WQMap (Water Quality Mapping, versión 5.0, 2004), de Applied Science Associates, mundialmente reconocido y aceptado (véase, por ejemplo, Spaulding et al., 1999), y que fuera adquirido mediante parte de los fondos suministrados por el proyecto GEF (Global Environmental Facility) Patagonia. Este proyecto tiene por objetivo la

prevención de la contaminación costera y la gestión de la diversidad biológica marina (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Donación FMAM nro. 28385 – AR – PNUD ARG/02/018) y dentro del mismo se encuadra un subproyecto sobre el estudio de la circulación de las aguas del golfo San Matías mediante la aplicación de modelos hidrodinámicos forzados con marea y viento.

WQMap es un sistema de modelado de la hidrodinámica y de la calidad de agua y está compuesto de varias componentes integradas que dan soluciones temporales a las ecuaciones de conservación de masa, momento, energía, sal, sedimentos, etc. También incluye un GIS (Geographic Information System) para almacenar, mostrar y analizar cualquier tipo de datos referenciados geográficamente. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de movimiento y de continuidad en la grilla diseñada para el recinto en estudio para predecir en función del tiempo el campo de elevaciones de la superficie del agua y el de

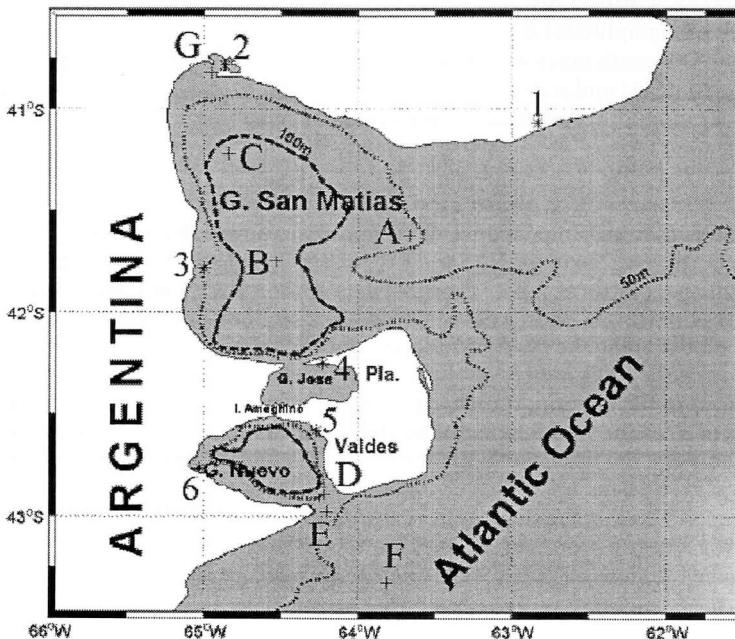


Figura 1. Área de estudio (* estación de marea, + estación de corriente, en Tabla 1 y 2 respectivamente la ubicación).

los vectores velocidad. Los posibles forzantes a implementar son: mareas, vientos, flujos de río y distribuciones de densidad. El modelo básico está configurado para ejecutarse en el modo bidimensional (promediado en la vertical).

Las ecuaciones hidrodinámicas tridimensionales contienen ondas de gravedad externas moviéndose rápidamente y ondas de gravedad internas (más lentas). WQMap desdobra las ecuaciones de movimiento en un modo exterior (ecuaciones promediadas en la vertical que permitirán calcular la topografía de aguas) y un modo interior (ecuaciones de estructura vertical para las corrientes y propiedades termodinámicas) y cuyas soluciones son obtenidas mediante un método semiimplícito (Madala y Piacsek, 1977).

IMPLEMENTACION DEL MODELO

Se seleccionó un recinto rectangular que comprendiese los tres golfos y lo suficientemente extendido hacia la plataforma marítima a fin de que las condiciones en los bordes abiertos dadas por los modelos globales fuesen representativas.

Es así que el mismo quedó delimitado entre los paralelos 40°38'52"S y 43°46'46"S y los meridianos 60°59'52"W y 65°20'36"W para el que se diseñó una grilla regular de 209 celdas según latitud por 249 celdas según longitud (celda de 1665 x 1961 metros).

La batimetría de la zona fue elaborada por Borjas (2004) y Borjas y Dragani (2004) y complementada mediante la digitalización electrónica de las cartas náuticas correspondientes, publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval y de la topografía brindada por Topex. Las amplitudes y fases de la marea en los contornos abiertos fueron extraídas del modelo global OSU (Oregon State University, Egbert *et al.*, 1994) para forzar el modelo WQMap. Esta decisión obedeció a que usando OSU las constantes armónicas de la marea

calculadas de la serie generada en proximidades de Puerto Madryn, la estación más confiable, eran más ajustadas a las deducidas de mediciones que las que utilizaban como forzante las otras alternativas ofrecidas por WQMap (Schwidorski, Global Open Boundary File).

Con un paso temporal de un minuto, se hicieron ejecuciones del modelo para 402 puntos distribuidos en el recinto anterior, generándose series temporales de 33 días (debe tenerse en cuenta que un día al menos es necesario para su estabilización). Estas series temporales fueron analizadas con un conjunto de programas computacionales propio mediante el método armónico de cuadrados mínimos, que incluyen la inferencia y descontaminación de componentes (Mazio y Vara, 1981). En particular, se analizaron las ondas más energéticas en la banda diurna (O_1 y K_1), semidiurna (N_2 , M_2 y S_2) y cuartodiurna (M_4), obteniéndose las constantes armónicas (amplitud y época G referida a Greenwich, Schureman, 1958).

A fin de obtener una adecuada representación de las isolíneas de amplitud y

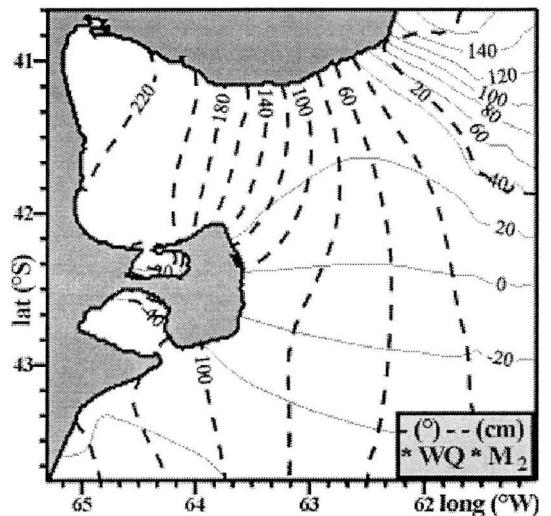


Figura 2. Configuración de época G (—) y corango de M_2 según resultados del modelo WQMap.

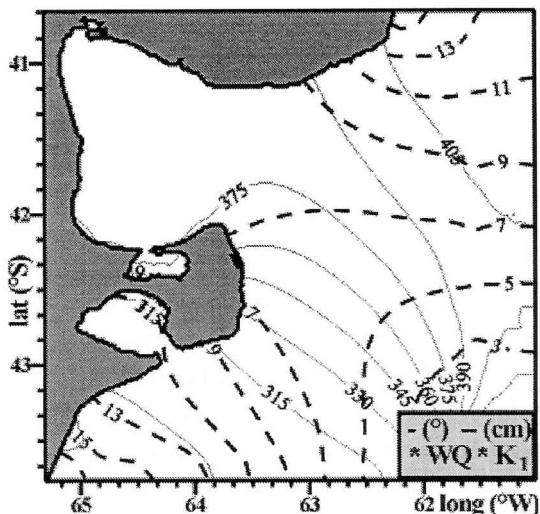


Figura 3: Configuración de época G (—) y corango (---) de K_1 según resultados del modelo WQMap

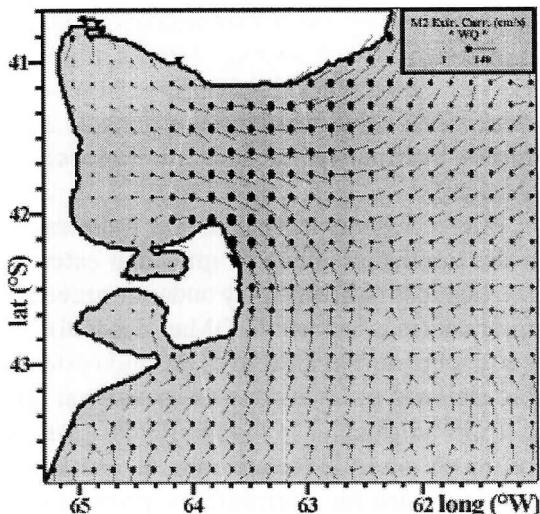


Figura 4: Carta de semiejes de la elipse de corriente de M_2 según resultados del modelo WQMap

fase de cada componente en toda la región de estudio, se utilizó la distribución estadística espacial conocida como kriging (Cressie, 1990) contenida en el programa Surfer (Surface Mapping System, de Golden Software Inc.). Se usó el tipo PointKriging que estima los valores de los puntos en los nodos de la grilla y con variograma lineal, recomendado como más efectivo en la variabilidad espacial del conjunto de datos. Por limitaciones de espacio, se ofrece solamente para la componente M_2 y K_1 (la más importante en la banda respectiva) la configuración de cotidales (igual época G) e isoamplitudes o corango (igual amplitud) en las Figuras 2 y 3. Con respecto a la corriente de marea, pareció más representativo dar (Fig. 4) los semiejes de la elipse descrita por la componente M_2 que caracterizan los extremos (máximo y mínimo) del flujo.

VALIDACION DEL MODELO

Para efectuar una validación adecuada del modelo WQMap con datos de marea y de corrientes disponibles en la zona de estudio, se consideró adecuado establecer com-

paraciones entre las constantes armónicas más representativas obtenidas a partir del modelo y las deducidas de las mediciones en el caso de mareas, y, en el caso de corrientes, la situación de máximo flujo. Asimismo, se incluye los resultados obtenidos con un modelo llamado M14 (Mazio y Dragani, 2000) que se había implementado con anterioridad.

Brevemente, el M14 también de carácter bidimensional, es un modelo que fue desarrollado e implementado entre los 40.5° y 43.5° S y los 62° y 65.5° W con 215×158 nodos (celda de 1815×2000 metros). Aquí las condiciones iniciales en los contornos abiertos se fueron modificando (por ensayo y error) hasta que la marea y corriente deducidas en las varias estaciones distribuidas en los golfos fueran razonablemente coincidentes con las mediciones.

En las Figuras 5 y 6 se ilustran la configuración de isolíneas (cotidales y corango) para las componentes M_2 y K_1 y en la Figura 7 los ejes de la elipse de la corriente principal M_2 todas resultado de los valores generados por el modelo M14.

Entre algunos modelos disponibles, en el barotrópico del Atlántico sur-occidental

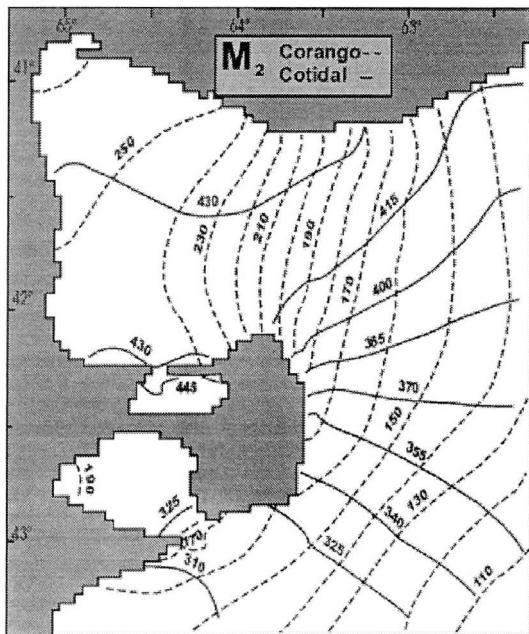


Figura 5. Configuración de época G (— en °) y corango (- - en cm) de M_2 según resultados del modelo M14

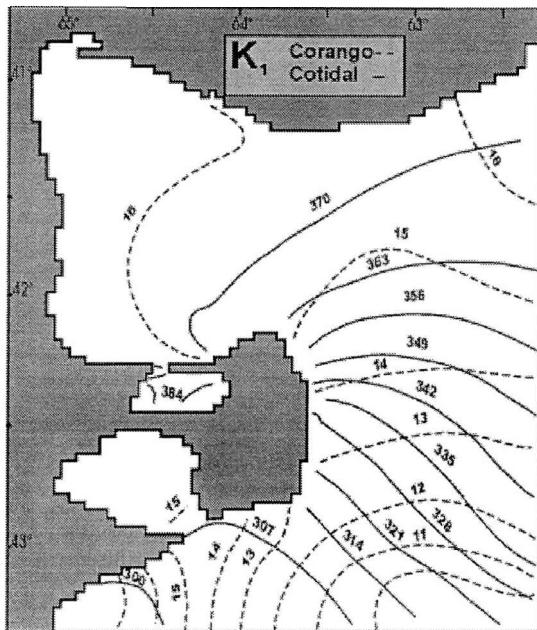


Figura 6: Configuración de época G (— en °) y corango (- - en cm) de K_1 según resultados del modelo M14

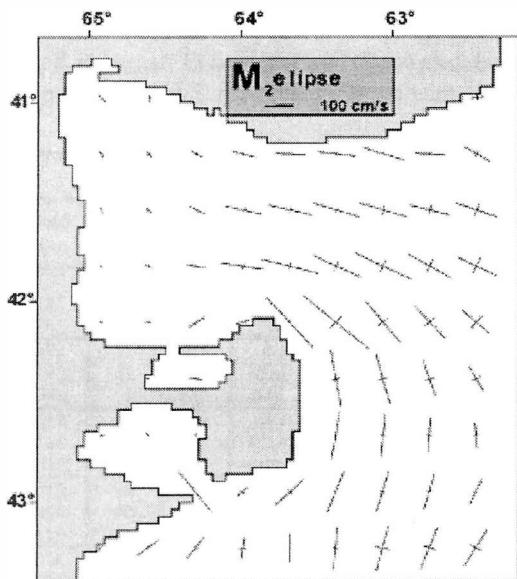


Figura 7. Carta de los ejes de la elipse de corriente de M_2 según resultados del modelo M14

(Glorioso y Flather, 1995), puede apreciarse una mucha menor amplificación de las componentes M_2 y K_1 (no superan 200 y 12 cm, respectivamente, en el saco del golfo San Matías) y un corrimiento en fase mayor (350° para la G de M_2 en Puerto Madryn) que las halladas aquí. Por otra parte se verifica lo afirmado por estos autores respecto a la importancia de las corrientes en la banda diurna: en la boca del San Matías, 12 cm/s para el semieje mayor aunque la dirección es algo distinta (NNE-SSW) tanto para O_1 como para K_1 .

En la Tabla 1 se comparan las constantes armónicas de las componentes de marea más representativas, una semidiurna (M_2) y la otra diurna (K_1) en seis estaciones costeras (* en la Figura 1), calculadas con las mediciones y con los modelos M14 y WQMap. En la Tabla 2 se indican para la máxima corriente de flujo de la componente más importante (M_2): la

ocurrencia (en horas lunares medias desde la culminación del astro ficticio asociado a dicha componente), la intensidad y el rumbo para siete estaciones de medición de corrientes (dándose el año de su realización, y señaladas con + en la Figura 1).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Sin entrar en un examen detallado, puede decirse que, en contraste con las componentes semidiurnas, las diurnas tienen un comportamiento muy regular en todo el golfo San Matías. La amplitud de la K_1 es casi 9 cm y un tiempo de tránsito de alrededor de 80 minutos, muy próximo al de la componente M_2 . Esto muestra claramente la dispar respuesta de estos golfos a las diferentes frecuencias de excitación de la onda de marea: una gran amplificación para la banda semidiurna, una uniformidad para la diurna y una marcada generación de la componente M_4 de aguas someras (no ilustrada por la limitación de espacio). Puede apreciarse también las débiles

corrientes de marea en el interior del golfo Nuevo y las muy intensas en el extremo norte de la península Valdés y en Puerto San Antonio.

De las comparaciones entre los resultados de los modelos con las mediciones directas disponibles más confiables, puede concluirse que ambos modelos dan para la marea distribuciones espaciales de isolíneas bastante parecidas aunque los valores de las constantes armónicas deducidos del M14 son mejores que los del WQMap. Por otra parte, la corriente calculada por el WQMap, y especialmente en regiones costeras (por ejemplo, San Antonio), es más precisa que el M14. Una posible explicación de las anteriores conclusiones sería que el WQMap maneja más apropiadamente la dinámica de aguas someras al haberse usado una batimetría de mayor detalle y calidad que el M14, pero éste da una topografía de marea mejor, quizá porque las condiciones en el borde abierto no son lo suficientemente precisas.

Tabla 1: Comparación para componentes de marea obtenidas de mediciones y por modelos M14 y WQMap (H amplitud, G época referida a Greenwich)

| Estación de marea | La. (°S) Lo.(°W) | Res. | Comp. K_1 | | Comp. M_2 | |
|----------------------|---------------------|------|-------------|-----|-------------|-----|
| | | | H | G | H | G |
| | | | cm | (°) | cm | (°) |
| 1 - Faro Río Negro | 41° 04' 62° 50' | Med. | 14 | 19 | 158 | 85 |
| | | M14 | 16 | 12 | 152 | 58 |
| | | WQ | 10 | 35 | 64 | 31 |
| 2 - Pto. San Antonio | 40° 47' 64° 52' | Med. | 20 | 7 | 314 | 72 |
| | | M14 | 18 | 16 | 262 | 77 |
| | | WQ | 9 | 18 | 234 | 35 |
| 3 - Punta Colorada | 41° 42' 65° 00' | Med. | 16 | 15 | 284 | 62 |
| | | M14 | 17 | 14 | 253 | 65 |
| | | WQ | 9 | 17 | 221 | 31 |
| 4 - Fond. San Román | 42° 15' 64° 14' | Med. | 16 | 19 | 289 | 72 |
| | | M14 | 17 | 19 | 239 | 85 |
| | | WQ | 9 | 18 | 227 | 35 |
| 5 - Puerto Pirámide | 42° 35' 64° 17' | Med. | 18 | 309 | 185 | 321 |
| | | M14 | 16 | 310 | 186 | 335 |
| | | WQ | 11 | 316 | 156 | 324 |
| 6 - Puerto Madryn | 42° 46' 65° 02' | Med. | 18 | 310 | 189 | 320 |
| | | M14 | 16 | 310 | 190 | 335 |
| | | WQ | 11 | 308 | 135 | 313 |

Tabla 2: Comparación de corriente M_2 observada y modelada con M14 y WQMap (T tiempo en horas lunares medias, V intensidad y Rum. rumbo) para máximo flujo

| Est. de corr. (año) | Componente M_2 | | | | |
|------------------------|----------------------|------|---------|--------|----------|
| | La.(°S) Lo.(°W) | Res. | T (hlm) | V cm/s | Rum. (°) |
| A - (1977) | 41° 37'1 63° 40' | Obs. | 10.5 | 105 | 281 |
| | | M14 | 10.1 | 101 | 281 |
| | | WQ | 10.1 | 78 | 282 |
| B - (1977) | 41° 45'1 64° 32' | Obs. | 11.2 | 18 | 294 |
| | | M14 | 10.8 | 18 | 291 |
| | | WQ | 10.2 | 17 | 290 |
| C - (1987) | 41° 12'9 64° 50'6 | Obs. | 11.6 | 11 | 310 |
| | | M14 | 10.9 | 13 | 312 |
| | | WQ | 10.2 | 11 | 316 |
| D - (1972/73) | 42° 54'7 64° 14' | Obs. | 9.1 | 29 | 316 |
| | | M14 | 7.8 | 50 | 320 |
| | | WQ | 10.2 | 50 | 273 |
| E - (1991) | 42° 58'8 64° 12'2 | Obs. | 9.4 | 49 | 320 |
| | | M14 | 8.1 | 50 | 353 |
| | | WQ | 5.6 | 36 | 249 |
| F - (1991) | 43° 19'2 63° 48'8 | Obs. | 11.3 | 38 | 41 |
| | | M14 | 10.0 | 67 | 48 |
| | | WQ | 11.1 | 41 | 43 |
| G - San Antonio (2003) | 40° 48'5 64° 55'8 | Obs. | 11.2 | 69 | 19 |
| | | M14 | 11.0 | 13 | 350 |
| | | WQ | 10.9 | 74 | 45 |

Como ejemplos de las anteriores aseveraciones, pueden mencionarse, por un lado, que la importante energía en aguas someras queda bien caracterizada por los valores generados por WQMap de la componente M_4 dando para las zonas más activas en procesos no lineales: 16.5 cm en Puerto Madryn, 5.7 cm en Puerto San Antonio (19.2 y 5.1 respectivamente, según mediciones). Adicionalmente se han analizado otras componentes tal como la importante MS_4 con amplitud modelada de 9.4 cm frente a 9.6 cm medida en Puerto Madryn.

Por otro lado, y de la Tabla 1, se aprecia que el modelo WQMap subestima la amplitud de la marea, mucho más claramente en la banda semidiurna representada allí por la M_2 que en la diurna (K_1), sugiriendo que las constantes armónicas dadas por OSU para la forzante deberían corregirse (más amplificación y pequeña corrección en fase). El modelo HamSOM aplicado a la plataforma continental argentina (Simionato *et al.*, 2004), con, por ejemplo, 3.23m y 84° para la amplitud y fase para M_2 en San Antonio, señala que el modelado tridimensional favorece un mejor ajuste.

REFERENCIAS

- Borjas, R. D. V., 2004. Elaboración de batimetrías digitales en áreas costeras para la aplicación de un modelo numérico de circulación oceánica. Proyecto GEF Patagonia, Tesis realizada para obtener el título de Licenciado en Cartografía en la Escuela de Ciencias del Mar, Instituto Universitario Naval de la Armada Argentina.
- Borjas, R. D. V. y W. Dragani, 2004. Generación de batimetrías digitales para la modelación matemática de la circulación oceánica costera en Patagonia, comunicación presentada ante la 22a Reunión Científica de Geofísica y Geodesía (AAGG), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, entre el 6 y el 10 de septiembre de 2004.
- Cressie, N. A. C., 1990. The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, v. 22, 239-252.
- Egbert, G. D., Bennett, A. F. and Foreman, M. G. G., 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.*, 99, 24821-24852.
- Glorioso, P. D. y Flather, R. A., 1995. A barotropic modelo f the currents off southeastern South America. *J. Geophys. Res.*, 100, 13427-13440.
- Madala, R. V. y Piacsek, S. A., 1977. A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans. *J. of Comp. Physics*, 23, 167-178.
- Mazio, C. A. y Vara, C. D., 1981 Inferencia y descontaminación de componentes de marea. *Serv. Hidr. Naval, Dpto. Oceanog. Inf. Téc.* 11, pp. 11.
- Mazio, C.A. y Dragani, W. C., 2000, Hidrodinámica de los golfos norpatagónicos, comunicación presentada ante las IV Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Puerto Madryn, 11-15 de septiembre de 2000.
- Schureman, P., 1958. Manual of harmonic analysis and prediction of tides, Special Publ. N° 98, U. S. Government Printing Office, Washington, pp. 317.
- Simionato, C. G., Dragani, W., Nuñez, M. y Engel, M., 2004. A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Rio de la Plata estuary. Part I: M_2 , *J. of Coastal Res.*, 20, 3, 893-912.
- Spaulding, M. L., Mendelsohn, D. L. Y Swanson, J. C., 1999. WQMap: An integrated three-dimensional hydrodynamic and water quality model system for estuarine and coastal applications. *Marine Tech. Soc. J., Advances in ocean and coastal modeling*, vol. 33, n° 3, 38-54.