

NOTA TECNICA

INFLUENCIA DE LA MAREA ASTRONÓMICA SOBRE LAS VARIACIONES DEL NIVEL DEL RÍO NEGRO EN LA ZONA DE CARMEN DE PATAGONES

Enrique D'Onofrio^{1,2}, Mónica Fiore^{1,3}, Flavia Di Biase¹, Walter Grismeyer¹ y Alejandro Saladino¹

(1) Servicio de Hidrografía Naval – ESCM – INUN

(2) Instituto de Geodesia y Geofísicas Aplicadas - FIUBA

(3) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN –UBA

donofrio@hidro.gov.ar

RESUMEN

El Río Negro, límite natural entre las provincias de Buenos Aires y Río Negro, es uno de los ríos más importantes de la Patagonia que desemboca en el Océano Atlántico. Es navegable desde su desembocadura hasta Carmen de Patagones por embarcaciones de hasta 2,04 m de calado, dificultándose por irregularidades en la profundidad aguas arriba. La onda de marea proveniente del océano Atlántico ingresa al río haciendo que este adopte un régimen semidiurno hasta Carmen de Patagones. El conocimiento de la onda de marea en este tramo del río es de fundamental importancia para la calibración de modelos numéricos, el perfeccionamiento de los sistemas de alerta de inundaciones y la toma de decisiones relacionadas con el manejo costero. En este trabajo se analizan cuatro series de mediciones de marea, dos obtenidas en el hidrómetro de Carmen de Patagones con una duración de 608 y 731 días, una de 77 días proveniente de un mareómetro instalado en el kilómetro 18 del río y una de 79 días obtenida con un sensor de presión fondeado en proximidades de Punta Redonda (desembocadura del Río Negro). Se calculan y comparan los espectros de potencia de las alturas observadas en los tres sitios para detectar los cambios energéticos producidos en la banda de frecuencias correspondientes a la marea astronómica. De su comparación surge que la energía de las componentes semidiurnas y diurnas disminuye un 22% y un 45% respectivamente desde la desembocadura del Río Negro hasta Carmen de Patagones. En contraposición se observa un ligero aumento de la energía correspondiente a las frecuencias de las componentes cuarto diurnas. Esto se debe fundamentalmente a procesos no lineales inducidos por aguas someras y a irregularidades en la morfología del fondo del río. Para obtener las amplitudes y épocas de la marea se realizan análisis armónicos por el método de cuadrados mínimos. Las amplitudes de las componentes diurnas en Carmen de Patagones son en promedio un 49% de las obtenidas en Punta Redonda, mientras que para las amplitudes de las componentes semidiurnas le corresponde un 42%. Para estudiar las variaciones del nivel medio debidas a los distintos caudales del río y a las ondas de tormenta en Carmen de Patagones, se realiza la convolución de las alturas observadas con filtros pasabajos diseñados a partir de la ventana de Hamming. Para el período considerado se observa una diferencia máxima de 156 cm en los niveles medios y se detecta la presencia de ondas de tormenta. Finalmente para estudiar la influencia de los distintos caudales en la marea astronómica en Carmen de Patagones, se realizan análisis armónicos para diferentes niveles medios. Se encuentra que a una disminución de nivel medio de 156 cm, le corresponde un aumento de 60 cm en la amplitud de la componente M2.

Palabras clave: marea, dinámica fluvial, análisis armónico

ABSTRACT

The Río Negro, natural limit between Buenos Aires and Río Negro provinces, is one of the most important rivers of the Patagonia that ends in the Atlantic Ocean. It is navigable in the stretch between the mouth and Carmen de Patagones by vessels up to 2.04 m draft, being more difficult upstream because of irregularities in depth. The Atlantic Ocean tidal wave enters into the river producing a semidiurnal regime up to Carmen de Patagones. Knowledge of the tidal wave on this part of the Río

Negro is fundamental to the calibration of numerical models, the improvement of flood warning systems and decision related to coastal management. In this paper four sets of tide measurements are analyzed, two obtained in the Carmen de Patagones hydrometer for a period of 608 and 731 days, other of 77 days coming from a staff installed in the kilometer 18 of the river and the last one of 79 days obtained with a pressure sensor anchored close to Punta Redonda (mouth of the Río Negro). Power spectrum of observed levels for the three localities are calculated and compared to detect energy changes produced in the frequency band corresponding to the astronomical tide. The comparison shows that the energy of the semidiurnal and diurnal components decreases 22% and 45% respectively from the mouth of the Río Negro to Carmen de Patagones. In contrast there is a slight increase in energy corresponding to the frequency components of the fourth diurnal. This can be explained by non-linear processes induced by shallow water and irregularities in the morphology of the bottom of the river. To obtain tidal amplitudes and tidal phases, harmonic analyses by the method of least squares are made. Diurnal amplitudes in Carmen de Patagones are in average 49% of those obtained in Punta Redonda, while for the semidiurnal it is a 42%. To study variations in the mean levels due to the different flows of the river and storm waves in Carmen de Patagones, the convolution of observed levels with a low-pass filter designed from the Hamming window is carried out. For the period considered, there is a maximum difference of 156 cm in mean levels and storm waves are detected. Finally, to study the influence of different river's caudal in the astronomical tide, harmonic analysis are made for different mean levels achieved by the river in Carmen de Patagones. It is found that a decrease in the mean level of 156 cm, has a 60 cm increase in the amplitude of the M2 component.

Keywords: tide, fluvial dynamic, harmonic analysis

INTRODUCCION

El Río Negro, originado por la confluencia de los ríos Limay y Neuquén en proximidades de la ciudad de Neuquén, desemboca en el Mar Argentino entre Punta Redonda al Este y Médanos al Oeste. En su tramo inferior se encuentran las ciudades de Viedma y Carmen de Patagones, cuyo origen se remonta al año 1779. En conjunto ambas ciudades reúnen 64832 habitantes (INDEC, 2001) y poseen una economía básicamente agrícola.

Próximo a su desembocadura aproximadamente a 30 km de la ciudad de Viedma se encuentra, el balneario El Cóndor, importante centro turístico de la zona, punto inicial de la denominada Ruta de los Acantilados. En esta zona la marea, proveniente del Océano Atlántico alcanza amplitudes del orden de 4m (SHN, 2009), sintiéndose sus efectos en Carmen de Patagones y Viedma. Merg et al. (1998) encontraron que la onda de marea que se produce en la desembocadura del Río Negro, se traslada aguas arriba y a medida que nos alejamos de la desembocadura ésta se va amortiguando hasta hacerse nula en Primera Angostura (aproximadamente a 70 Km desde la desembocadura).

Paradójicamente a la antigüedad que poseen las poblaciones de estas dos ciudades y a que hace veinte años se formuló un proyecto de traslado de la Capital Federal de la República Argentina a esa zona, no se conocen estudios publicados sobre las variaciones que sufre la marea astronómica al propagarse por el Río Negro. Debe destacarse que se han realizado trabajos sobre las sudestadas que conjuntamente con las mareas provocan anegamientos de calles por ingreso de agua desde desagües pluviales y situaciones más críticas como las sufridas en marzo de 1992 (Merg et al., 1998), cuando se produjo la rotura de zonas debilitadas de la defensa de Viedma, generando la inundación más grave desde que el Río Negro se encuentra regulado (Petri, 1992).

Los objetivos de este trabajo son estudiar la propagación de la marea astronómica en el tramo inferior del Río Negro hasta Carmen De Patagones y analizar sus variaciones para distintos niveles alcanzados por el río. Para ello se analizan cuatro series de mediciones de marea, dos obtenidas en el hidrómetro de Carmen de Patagones, una proveniente de un mareómetro instalado en el kilómetro 18 del río y otra obtenida con un sensor de presión fondeado en proximidades de Punta Redonda (desembocadura del Río Negro). Se realizan estudios espectrales, análisis armónicos de marea y se detecta la presencia de ondas de tormenta. Los resultados obtenidos contribuirán al conocimiento de la dinámica de marea y a la implementación de métodos empíricos y modelos numéricos utilizados para la prevención de inundaciones. También constituyen una herramienta importante para la toma de decisiones relacionadas con el manejo costero.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende el sector del Río Negro desde su desembocadura hasta las Ciudades de Carmen de Patagones y Viedma. El Río Negro es el mayor curso alóctono de la Patagonia que desemboca en el océano Atlántico después de recorrer 635 km (Fig. 1). Tiene su origen en la confluencia de los ríos Neuquén y Limay aproximadamente a 39° de latitud Sur y 68° de longitud Oeste (SNIH, 2004). El caudal promedio anual es de 1006 m³/s mientras que el escurrimiento medio anual es de 357 mm (UNESCO, 1991). Su desembocadura se caracteriza por estar frecuentemente obstruida por grandes bancos de arena fina y conchilla que forman barras que dificultan el paso de las embarcaciones. Debido a esto, los barcos se ven obligados a esperar la marea para cruzarlos (SHN, 2000).



Figura 1. Mapa del Río Negro (Imagen modificada del sitio <http://visibleearth.nasa.gov>)

El Río Negro se caracteriza por su reducida pendiente y la existencia de numerosos brazos secundarios que se activan con aguas altas. Es navegable desde su desembocadura hasta el kilómetro 39 por embarcaciones de hasta 2,04 m de calado. Aguas arriba las profundidades disminuyen y se tornan irregulares, dificultándose la navegación, siendo ésta sólo apta para embarcaciones de muy reducido calado.

A los 39 km de su desembocadura sobre su margen Norte se localiza la ciudad de Carmen de Patagones (Provincia de Buenos Aires) mientras que sobre su margen Sur se ubica la ciudad de Viedma (Provincia de Río Negro). El puerto de Carmen de Patagones que se sitúa en las dos márgenes del Río Negro se utiliza esencialmente para el traslado de pasajeros, su operación se interrumpe cuando los vientos superan los 55 km/h o se registran bajas mareas (PNA, 2008). El principal obstáculo o riesgo para la navegación, lo constituye un banco de arena de aproximadamente 800 m, paralelo a la costa, ubicado a 10 m del muelle de la ciudad de Viedma (km 38 margen derecha del Río Negro). Durante las bajamares extraordinarias este banco no permite la entrada de embarcaciones a puerto. Otra característica importante de la zona son las crecidas, ya sea ocasionada cuando se superponen al régimen de marea altos caudales o, en los casos más frecuentes, cuando ocurren eventos de sudestadas con más de 6 h de persistencia, siendo la ciudad de Viedma la más afectada por su situación topográfica (Merg et al, 1998).

DATOS

Se utilizan alturas horarias registradas en Carmen de Patagones (Km 39), en el Kilómetro 18 y en la desembocadura del Río Negro (Fig. 2). La Tabla 1 muestra el período de medición y la longitud de cada registro. Las alturas correspondientes a Carmen de Patagones fueron registradas con una regla de marea ubicada en el muelle situado frente al destacamento de la Prefectura Naval de dicha ciudad. Los niveles del río en el Kilómetro 18 fueron observados con un maréometro ubicado en la margen Norte. Finalmente, las alturas horarias correspondientes a la desembocadura del Río Negro fueron obtenidas con un registrador de marea auto contenido fondeable Aanderaa WLR7.

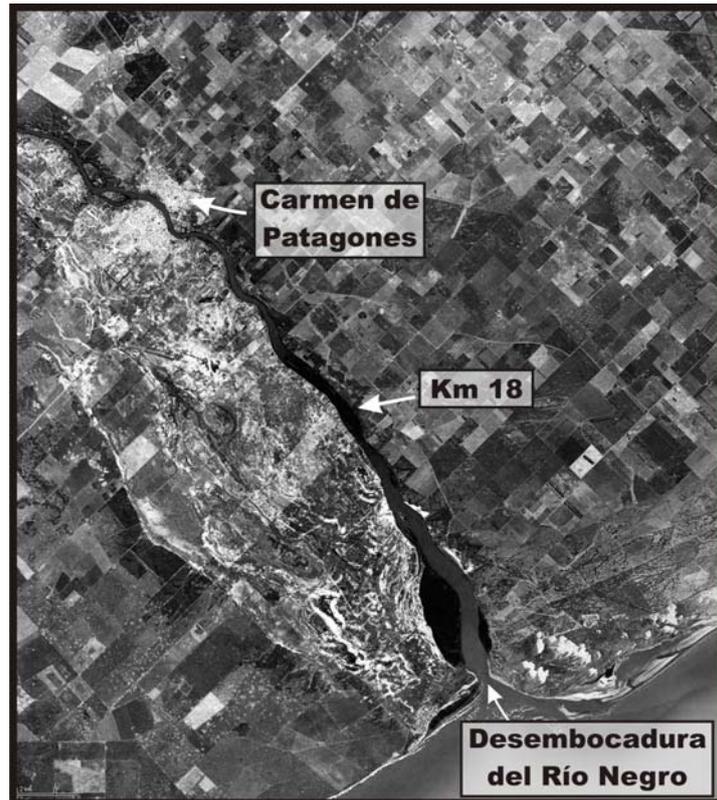


Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición (Imagen modificada del sitio <http://maps.google.com>).

Tabla 1. Mediciones realizadas

Estación	Período de medición	Longitud del registro
Carmen de Patagones 40° 48' S 62° 59' W	01/01/1981 al 31/08/1982 01/01/1983 al 31/12/1984	608 días 731 días
Kilómetro 18 40° 54' S 62° 52' W	15/06/1935 al 01/09/1935	78 días
Desembocadura del Río Negro 41° 02' S 62° 46' W	05/04/1989 al 22/06/1989	79 días

A todas las observaciones disponibles se les realizó un control de calidad utilizando el paquete de programas desarrollado por D'Onofrio (1984). La figura 3 muestra 15 días de registros horarios de alturas del Río Negro correspondientes a Carmen de Patagones (a), Kilómetro 18 (b) y desembocadura del Río Negro (c).

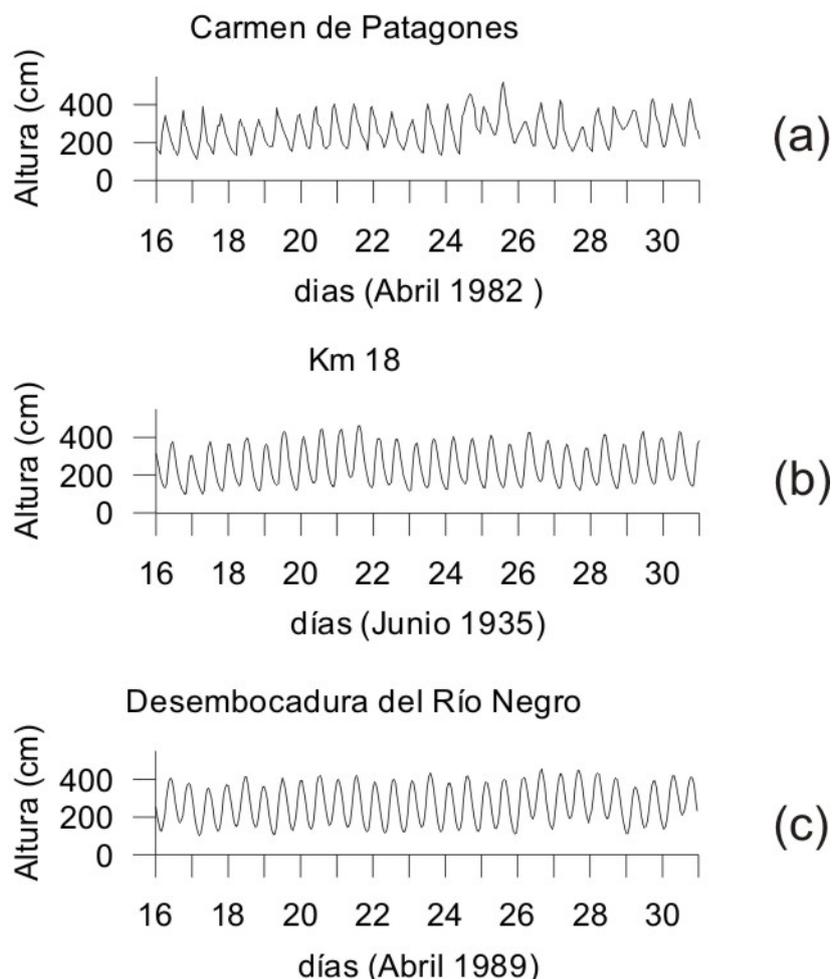


Figura 3. Alturas registradas en Carmen de Patagones, Kilómetro 18 y Desembocadura del Río Negro.

Si bien los registros corresponden a distintos períodos de medición, al compararlos se observa que la onda de marea también se registra en Carmen de Patagones, con una disminución de la amplitud. En la zona de la desembocadura la amplitud es de aproximadamente 3 m, mientras que en el km 39 (puerto de la ciudad de Carmen de Patagones) la amplitud sigue siendo considerable, pero no supera generalmente los 2 m. Esto se debe a que la onda de marea es afectada por la geometría del lecho del río, por su profundidad y por el caudal aportado.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Con el objeto de comparar e identificar las ondas que corresponden a la banda espectral de la marea astronómica en la zona de estudio y observar sus cambios energéticos, en este trabajo se realizan espectros de densidad de potencia utilizando el método de Welch, (Welch, 1967, Stoica and Moses, 1997), en Carmen de Patagones, Kilómetro 18 y en la desembocadura del Río Negro.

Para suavizar los espectros se los convolucionan con una ventana de Hamming de 101 elementos (Oppenheim and Shafer, 1989). Finalmente se calculan los intervalos de confianza al 95% (Oppenheim and Shafer, 1975). La figura 4 muestra los espectros para Carmen de Patagones (a), Kilómetro 18 (b) y desembocadura del Río Negro (c). En todos los casos se observa que la mayor parte de la energía de la marea está concentrada en la banda de las componentes semidiurnas, la que

sufre una atenuación a medida que la onda de marea penetra en el río. En la desembocadura del Río Negro, le siguen en importancia las componentes diurnas cuya energía es aproximadamente 57 veces menor que las de las semidiurnas. También se observan picos de energía en las bandas cuarto, sexto, octavo y décimo diurnas. De estos últimos el más importante es el correspondiente a las componentes cuarto diurnas.

De la comparación de los espectros surge que la energía de las componentes semidiurnas y diurnas disminuye un 56% y un 51% respectivamente desde la desembocadura del Río Negro hasta Carmen de Patagones. Con respecto a la energía de las componentes cuarto diurnas, por el contrario, se verifica un ligero aumento desde la desembocadura del Río Negro hasta Carmen de Patagones. A partir de esta banda no se registran picos significativos para frecuencias mayores en Carmen de Patagones. La disminución de la energía mostrada en los espectros es una consecuencia de la fricción del fondo dado que la profundidad media es de 6 m. Por otra parte la forma sinuosa de la línea de costa, islotes, bancos de arena e irregularidades en la morfología del fondo favorecen los procesos de generación de ondas de aguas someras.

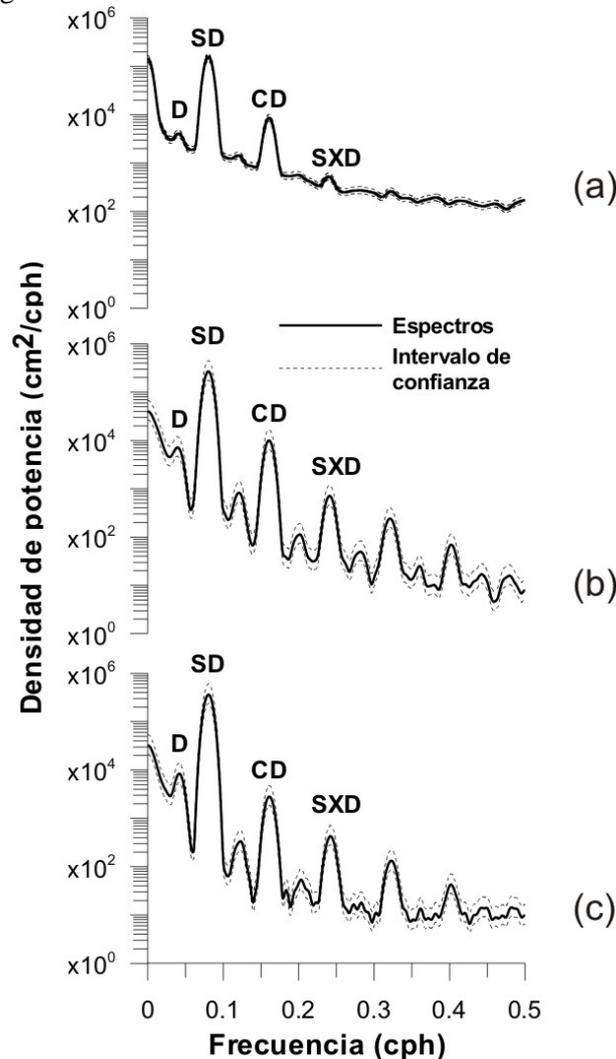


Figura 4. Densidades espectrales correspondientes a Carmen de Patagones (a), Kilómetro 18 (b) y desembocadura del Río Negro (c). Se identifican los picos espectrales correspondientes a las componentes diurnas (D), semidiurnas (SD), cuarto diurnas (CD) y sexto diurnas (SXD).

ANÁLISIS ARMÓNICO

Se aplica el método de cuadrados mínimos (Foreman, 1977) a las cuatro series de alturas horarias para calcular las amplitudes y fases de las ondas componentes de marea. En aguas poco profundas la dinámica es no lineal dando origen a componentes de aguas someras. Generalmente estas últimas tienen pequeña amplitud, aún en regiones poco profundas (Andersen, 1999), sin embargo llegan a

tener en algunos lugares amplitudes significativas por lo que hay que tenerlas en cuenta al momento de realizar el análisis armónico.

En los casos donde la serie de marea es inferior al año se utiliza el criterio de Rayleigh (Pugh, 1987; Schureman, 1988) para elegir las componentes de marea a incluir en el análisis armónico. Posteriormente, se descontaminan las componentes que lo requieran e infieren las contaminantes siguiendo la metodología propuesta por Godin (1972). Teniendo en cuenta esto último para descontaminar a las series de Río Negro (desembocadura) y Kilómetro 18 se utilizan los resultados de un análisis armónico de un año de duración perteneciente a la localidad de Punta Colorada (41° 42'S, 65°00'W), ubicada en el Golfo de San Matías. La Tabla 2 muestra las amplitudes y fases (referidas a Greenwich) de las principales componentes armónicas obtenidas para los tres lugares analizados. Los errores asociados fueron calculados siguiendo la metodología propuesta por Pawlowicz et al. (2002).

Tabla 2. Velocidad, amplitud y fase de las constantes armónicas obtenidas por el método de cuadrados mínimos.

Localidad		Río Negro (desembocadura)		Kilómetro 18		Carmen de Patagones	
Onda	Velocidad (°/h)	Amplitud (cm)	Fase(°)	Amplitud (cm)	Fase (°)	Amplitud (cm)	Fase (°)
O1	13.94304	6.1 ± 0.9	342.0 ± 1.8	7.2 ± 1.0	358.6 ± 3.6	4.0 ± 0.5	26.9 ± 3.5
K1	15.04107	17.3 ± 0.8	26.5 ± 2.8	14.6 ± 0.8	44.5 ± 4.0	9.0 ± 0.5	46.9 ± 3.0
P1	14.95893	4.9 ± 0.9	24.1 ± 2.3	4.2 ± 0.9	42.0 ± 3.0	2.5 ± 0.6	58.8 ± 2.9
N2	28.43973	29.6 ± 0.8	49.4 ± 1.7	29.0 ± 1.1	58.2 ± 2.2	15.7 ± 0.5	81.9 ± 2.1
M2	28.9841	138.1 ± 0.7	97.2 ± 1.4	115.2 ± 0.7	106.5 ± 2.5	79.6 ± 0.4	123.6 ± 1.8
L2	29.52848	22.3 ± 0.8	139.0 ± 3.7	17.7 ± 0.8	150.1 ± 4.8	9.2 ± 0.5	160.8 ± 3.0
S2	30.00000	20.7 ± 0.8	169.4 ± 2.8	20.2 ± 0.9	177.0 ± 3.0	12.3 ± 0.5	203.7 ± 1.8
MN4	57.42383	5.0 ± 0.9	82.3 ± 2.9	9.7 ± 1.0	121.9 ± 6.3	5.5 ± 0.6	128.9 ± 1.8
M4	57.96821	10.6 ± 0.8	132.6 ± 2.6	19.8 ± 1.0	154.2 ± 3.1	12.8 ± 0.4	174.7 ± 1.4
SN4	58.43973	2.0 ± 0.9	208.8 ± 3.5	1.5 ± 1.5	100.0 ± 5.5	0.8 ± 0.5	300.9 ± 2.5
MS4	58.9841	4.3 ± 0.9	193.7 ± 2.4	7.5 ± 1.0	246.2 ± 6.0	4.4 ± 0.5	152.9 ± 1.3
2MN6	86.40794	2.1 ± 0.9	76.8 ± 3.0	2.9 ± 1.0	119.4 ± 2.9	1.6 ± 0.6	171.3 ± 1.8
M6	86.95231	3.6 ± 0.97	121.7 ± 2.9	4.5 ± 1.04	141.0 ± 1.7	1.9 ± 0.6	185.5 ± 1.6
2MS6	87.96821	2.3 ± 0.9	177.2 ± 2.1	2.6 ± 1.03	235.1 ± 2.8	0.5 ± 0.4	280.8 ± 1.1

Dado que en Carmen de Patagones se cuenta con dos series de datos de longitudes próximas, las constantes armónicas calculadas provienen de un promedio pesado que tiene en cuenta la longitud de cada serie. La figura 5 muestra la evolución de las amplitudes y épocas de las principales componentes de la onda de marea a medida que esta ingresa en el río. Las amplitudes correspondientes a las componentes diurnas, en el tramo Río Negro (desembocadura) – Kilómetro 18, presentan una disminución comprendida entre el 11 y el 15% mientras que en el segundo tramo (Kilómetro 18 – Carmen de Patagones) esta reducción se acentúa variando entre 34 y 45% (Fig.5a).

Las componentes semidiurnas presentan una disminución comprendida entre el 2 y el 21% en el primer tramo y entre 41 y 59% en el segundo (Fig. 5b). Al observar las amplitudes de las componentes cuarto diurnas se detecta un aumento importante en el primer tramo de desplazamiento que varía entre el 43 al 48%. Luego se observa una disminución de la amplitud con respecto a la desembocadura del orden del 2 al 17% (Fig. 5c). En cuanto a las componentes sexto diurnas, con respecto a las amplitudes de la desembocadura, se observa un aumento en el primer tramo y una marcada disminución en el segundo con valores 13 a 29% y de 74 a 85% respectivamente (Fig. 5d).

Estos resultados que son coincidentes con los del análisis espectral (Fig. 4) se deben principalmente a procesos no lineales inducidos por aguas someras e irregularidades en la morfología del fondo del río. La dirección de propagación de la marea indicada por la fase de las ondas componentes es río arriba. Se observa que las ondas diurnas recorren en promedio el primer tramo en

aproximadamente 1h 12min y el segundo tramo en 1h 6min, mientras que las semidiurnas lo hacen en 19min y 40min respectivamente.

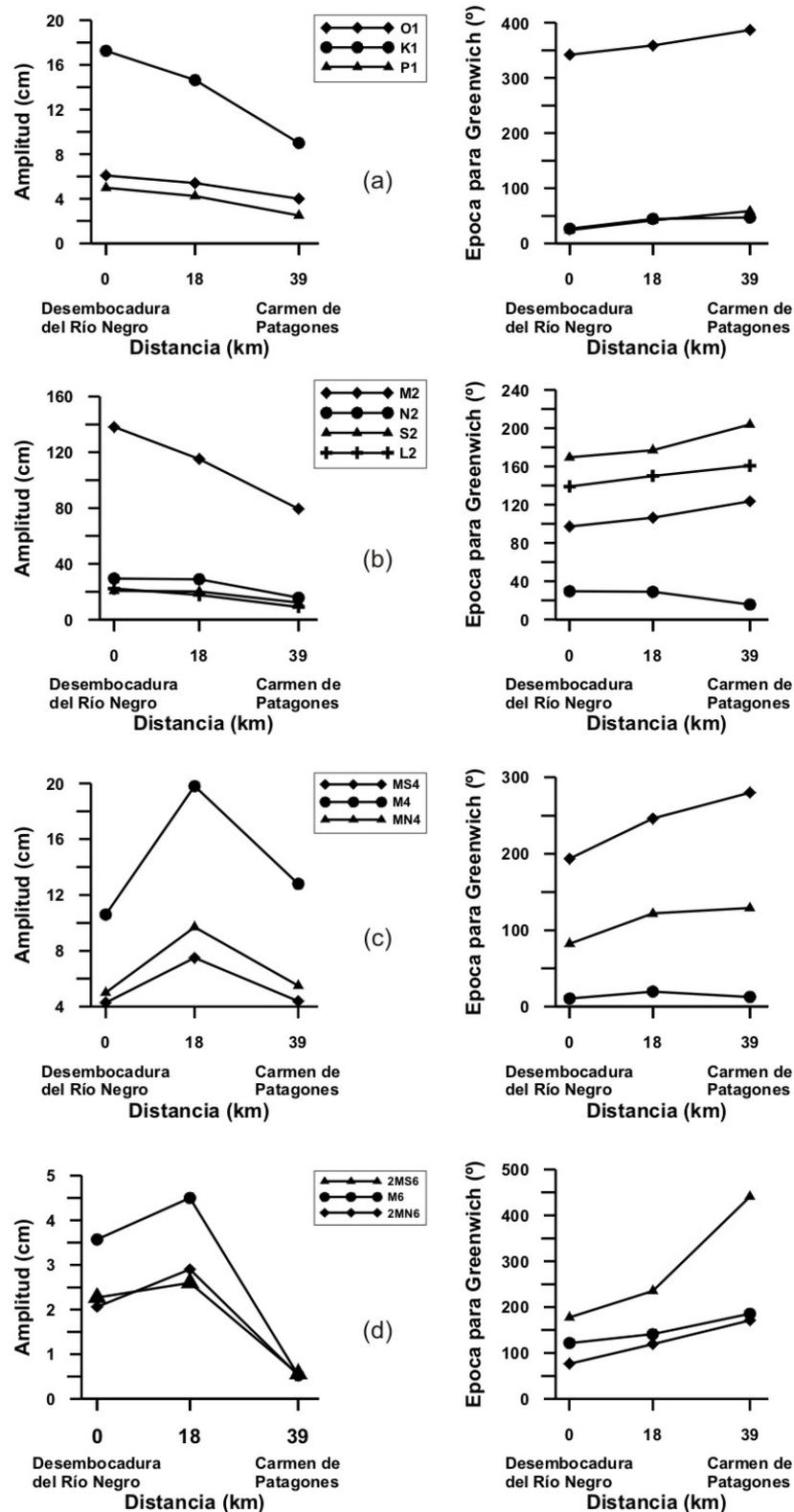


Figura 5. Evolución de las componentes diurnas (a), semidiurnas (b), cuarto diurnas (c) y sexto diurnas desde la boca del Río Negro hasta Carmen de Patagones.

VARIACION DE LOS NIVELES

Las fluctuaciones de la altura del río en Carmen de Patagones se deben fundamentalmente a la acción de la marea astronómica que avanza conjuntamente con la onda de tormenta desde el océano Atlántico y a las variaciones de caudal debidas al régimen del río regulado por las represas existentes.

Para obtener las variaciones del nivel del río debidas a cambios en el caudal y a las ondas de tormenta cuya duración sea superior a 2 días, para la serie de datos de Carmen de Patagones, se implementó un filtro pasabajos diseñado a partir de la ventana de Hamming (Hamming, 1977), que convolucionado con la serie de niveles elimina las contribuciones mencionadas. Con las series filtradas se calculan los niveles medios mensuales (Fig. 6).

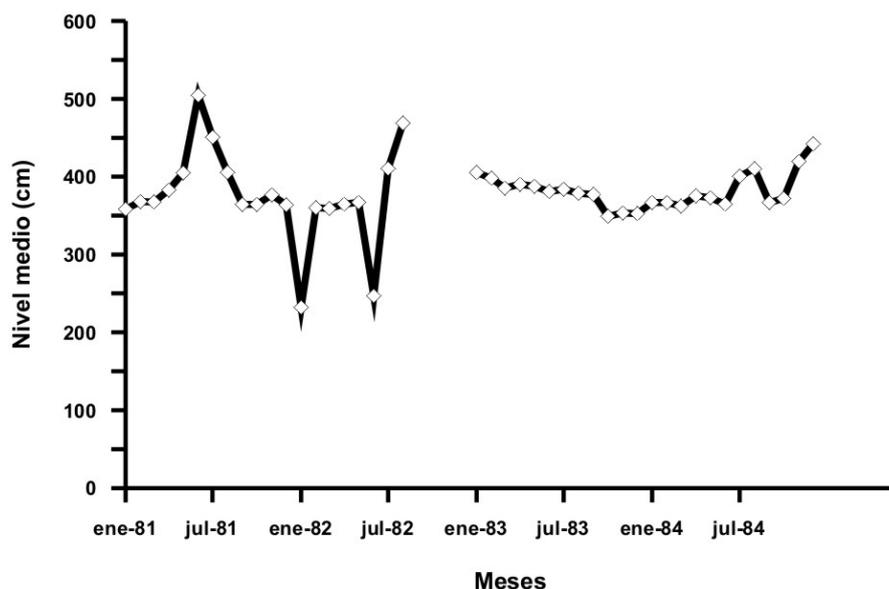


Figura 6. Niveles medios mensuales filtrados para Carmen de Patagones para el período Enero 1981/ Diciembre 1984 con algunas interrupciones.

Puede observarse que para el período considerado el mayor nivel medio fue 504 cm correspondiente al mes de Junio de 1981, registrándose en esa oportunidad un caudal medio mensual de $2207 \text{ m}^3/\text{s}$ en Primera Angostura (aproximadamente a 100 km de la desembocadura) $28.75''\text{W}$). Según la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (www.aic.gov.ar), el Río Negro tiene un módulo de $930 \text{ m}^3/\text{s}$. El menor nivel medio fue 348 cm correspondiendo al mes de Enero de 1982, registrándose en Primera Angostura un caudal de $425 \text{ m}^3/\text{s}$. La diferencia entre los niveles medios mencionados es de 156 cm, debiéndose fundamentalmente a las variaciones de caudal y en menor medida a los eventos de ondas de tormentas.

Para estudiar como afectan las variaciones de niveles medios a la marea, que se registra en Carmen de Patagones, se realizan análisis armónicos para meses que posean distintos niveles medios. Los resultados obtenidos para la amplitud de la componente semidiurna lunar principal M2, que representa aproximadamente el 50% de la marea se presentan en la figura 7. Las amplitudes ajustan a una recta (coeficiente de correlación 0.95), presentando una variación de 60.4 cm para niveles que oscilen entre 506.0 y 349.7 cm. Este resultado deberá tenerse en cuenta al momento de efectuar predicciones en el tramo del río que es afectado por la onda de marea ya que los valores de las constantes armónicas dependerán del nivel medio alcanzado.

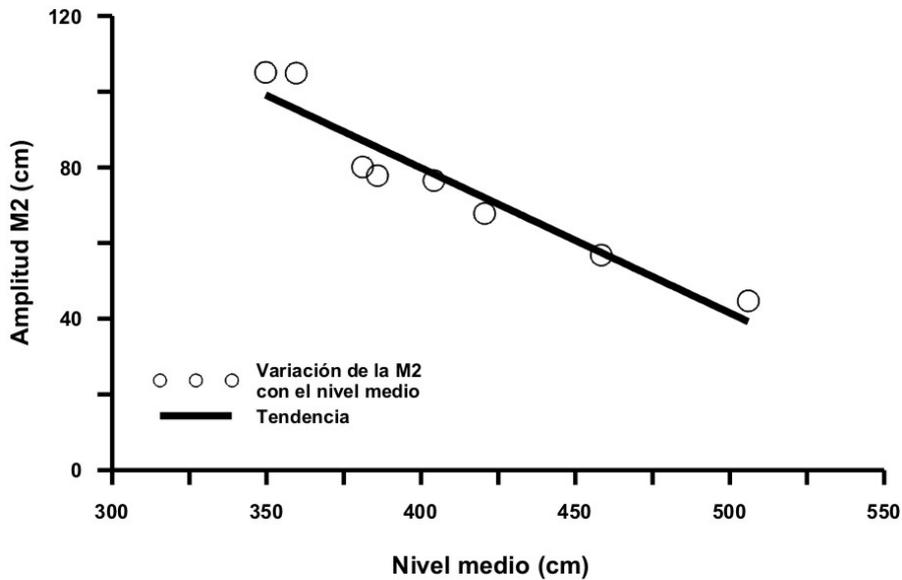
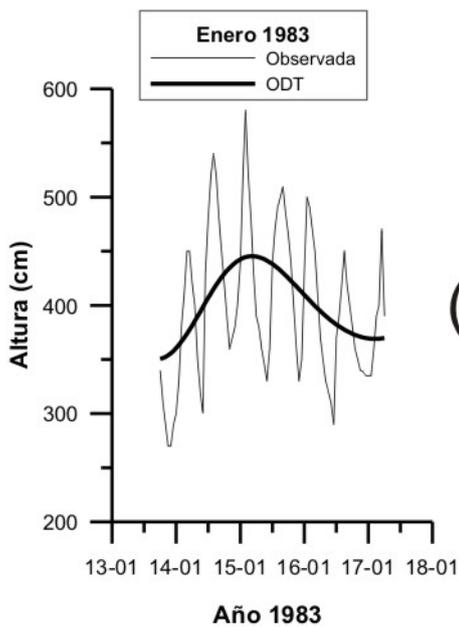


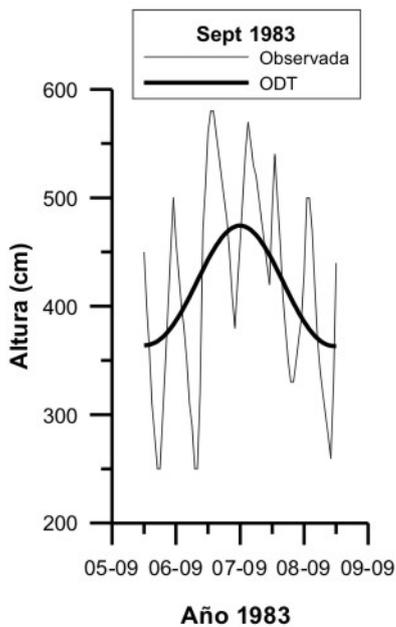
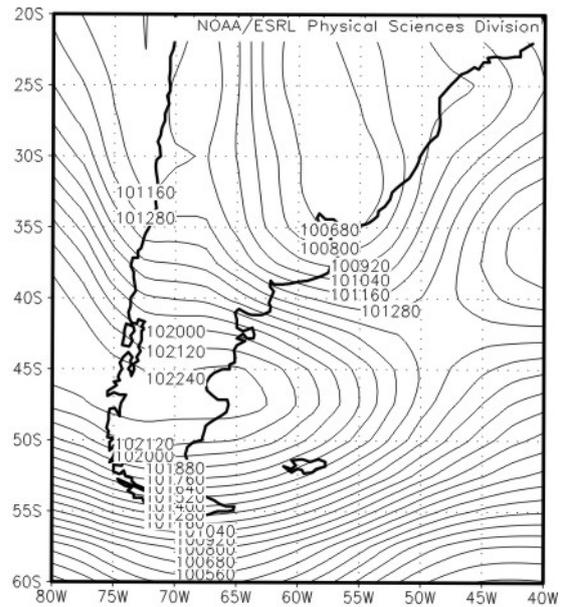
Figura 7. Variación de la amplitud de la componente M2 con el nivel medio mensual en Carmen de Patagones.

Otro fenómeno que contribuye a la variación de la altura del río son las ondas de tormenta, que originadas por fenómenos meteorológicos, alteran a la marea astronómica. Para la zona en estudio, Merg y Petri (1998) muestran que la onda de tormenta provocada por sudestadas con persistencias mayores a 6 h provoca una mayor permanencia de los caudales que escurren por el río con el consecuente aumento de niveles. Dado que no se dispone de una serie suficientemente extensa para realizar un estudio completo de las ondas de tormenta, se efectúa un análisis cualitativo utilizando la serie correspondiente al período 1983 – 1984 de Carmen de Patagones. Para calcular las ondas de tormenta se puede restar a los niveles observados una predicción de marea astronómica o utilizar un filtro numérico.

En este caso se decide utilizar la última opción debido a las variaciones que sufren las amplitudes de las ondas componentes de marea con los cambios de nivel medio. Luego se convoluciona la serie mencionada con un filtro pasabanda, diseñado a partir de la ventana de Hamming (Hamming, 1977), con períodos de corte comprendidos entre de 48 h y 5 días. La figura 8 muestra 2 episodios de ondas de tormenta de aproximadamente 1 m de altura, generadas por diferentes situaciones meteorológicas. Para cada una de ellas se presenta la carta sinóptica obtenida de los reanálisis del National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR, www.cdc.noaa.gov). El primer caso (Fig. 8a) corresponde a un evento registrado entre el 14 y el 16 de Enero de 1983, donde el viento del Este favorece la entrada de la onda de tormenta en el río. El segundo caso (Fig. 8b) corresponde a los días 6 y 7 de Septiembre de 1983, donde la marea que recorre la costa Atlántica desde el Sur hacia el Norte se ve afectada por el viento paralelo a la costa, sufriendo una sobre elevación antes de ingresar al Río Negro.



(a)



(b)

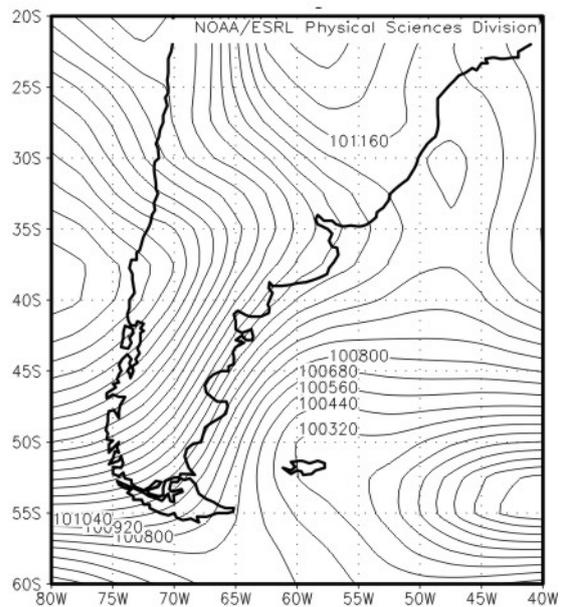


Figura 8. Eventos de onda de tormenta correspondientes a Enero de 1983 (a) y Septiembre 1983 (b) y sus correspondientes cartas sinópticas en Carmen de Patagones.

CONCLUSIONES

La onda de marea proveniente del océano Atlántico ingresa al Río Negro haciendo que este adopte un régimen semidiurno hasta Carmen de Patagones. Tanto el análisis espectral como los análisis armónicos realizados muestran que los procesos no lineales inducidos por aguas someras y las irregularidades del fondo del río no afectan de igual forma a todas las componentes de marea. En el caso de las componentes diurnas y semidiurnas, la amplitud decrece a medida que la onda se aproxima a Carmen de Patagones, las ondas diurnas en un 51% y las semidiurnas en un 58%. En el caso de las componentes cuarto diurnas se observa un aumento de las amplitudes hasta el kilómetro 18 y luego un decrecimiento alcanzando un valor final levemente mayor al de la desembocadura. El comportamiento de las sexto diurnas es similar al de las cuarto diurnas con la diferencia que en Carmen de Patagones la amplitud es menor que en la desembocadura.

Por otra parte se observa que las constantes armónicas de marea, en Carmen de Patagones, también son afectadas por los cambios de nivel medio observados en el río. Estos cambios son ocasionados fundamentalmente por variaciones en el caudal y en una menor medida por ondas de tormenta que modifiquen el nivel del río. Al realizar análisis armónicos mensuales para diferentes niveles medios se encuentra que a una disminución de nivel medio de 156 cm, le corresponde un aumento de 60 cm en la amplitud de la componente semidiurna lunar principal M2. Este último resultado hace que las predicciones de marea dependan del nivel del río pues este modifica considerablemente el ingreso de la onda de marea y por lo tanto las amplitudes de las ondas componentes. Con respecto a las ondas de tormenta se muestran dos situaciones sinópticas que contribuyen a su generación. Una corresponde a vientos paralelos a la costa que producen una sobre elevación de la marea que avanza desde Tierra del Fuego, antes de ingresar al Río Negro. En la otra vientos del sector Este provocan la sobre elevación de la marea a medida que ingresa en el Río Negro. Los resultados aquí obtenidos describen la dinámica de marea en el tramo estudiado y proveen conjuntos de constantes armónica que servirán para efectuar predicciones de marea en la desembocadura del río, en el Kilómetro 18 y en Carmen de Patagones – Viedma. También contribuirán a optimizar los mecanismos de prevención de situaciones de emergencia debidas a inundaciones, utilizados por los Municipios de Viedma y Carmen de Patagones, así como a la toma de decisiones relacionadas con la temática de manejo costero.

Agradecimientos:

Los autores desean agradecer al Ing. Daniel Petri por sus sugerencias y la información proporcionada. Este trabajo contribuye a los proyectos PIP 112-200801-02599, "Evaluación de la erosión costera en la provincia de Buenos Aires a través de factores geológicos, oceanográficos y atmosféricos" y "Estudio de las Mareas Oceánicas en las Costas Argentinas", (PHID 206).

REFERENCIAS

- Andersen O.A., 1999. Shallow water tides in the northwest European shelf region from TOPEX/POSEIDON altimetry, *J. Geophys. Res.*, 104(C4), 7729–7741.
- D’Onofrio, E. E., 1984. Desarrollo de un nuevo sistema de procesamiento de información de marea. Informe Técnico N°25/84, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 167 pág.
- Foreman, M. G. M., 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. *Pac. Mar. Sci., Inst. of Ocean Sci., Patricia Bay, Sidney, B. C. Canadá.* Rep. 77-10,97pp.
- Godin, G., 1972. *The Analysis of Tides*, University of Toronto Press, Toronto, 264 p.
- INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 1991 y Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2001. www.indec.mecon.ar/nuevaweb/cuadros/74/habitat2.xls
- Hamming R.A., 1977. *Digital filters*. Prentice – Hall, 223pp.
- Merg C. y Petri D., 1998. Red Alerta Sudestadas en el Valle Inferior del Río Negro Departamento Provincial de Aguas Provincia de Río Negro, Viedma, 21p.
- Oppenheim and Shafer, 1975. *Digital Signal Processing*, Prentice-hall, p 556).
- Oppenheim, A.V., and R.W. Schafer, 1989. *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, pp. 447-448
- Pawlowicz, R., Beardsley B., and Lentz S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comp. Geosci.*, 28, 929-937.
- Petri D., 1992. Informe Crecida 1992 en el Curso. Inferior del Río Negro. Departamento Provincial de Aguas. 10p.
- Prefectura Naval Argentina, 2008. Sitio Web <http://www.prefecturanaval.gov.ar/>
- Pugh, D. T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd. 472 pp.
- Servicio de Hidrografía Naval, 2000. *Derrotero Argentino. Parte II, Costa del Atlántico*. Armada Argentina. 534 p.
- Servicio de Hidrografía Naval, 2009. *Tablas de Marea. H-610*. 643 pág.
- Schureman P., 1988. *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, Coast and Geodetic Survey, Special Publication No. 98*, 317 p.
- SNIH, 2004. *Cartografía hídrica superficial de la provincia de Río Negro*. Sistema Nacional de Información Hídrica. 3 p.

Stoica, P., and R.L. Moses, 1997. Introduction to Spectral Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 52-54

UNESCO, 1991. Balance Hídrico de la República Argentina. Memoria Descriptiva, 32p.

Welch, P.D, 1967. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. IEEE Trans. Audio Electroacoustics, Vol. AU-15, pp. 70-73.

Recibido: 28 de junio de 2009

Aceptado: 9 de agosto de 2010