

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Consecuencias de un forzamiento mareal tipo mixto
semidiurno en una laguna costera somera**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Braulio Juárez Araiza

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Braulio Juárez Araiza

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. José Gómez Valdés
Director del Comité

Dra. Vanesa Magar Brunner

Dr. David Alberto Rivas Camargo



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Coordinador del Posgrado en
Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Director de Estudios de Posgrado

Braulio Juárez Araiza © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor.

Resumen de la tesis que presenta **Braulio Juárez Araiza** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Consecuencias de un forzamiento mareal tipo mixto semidiurno en una laguna costera somera

Resumen aprobado por:

Dr. José Gómez Valdés
Director de tesis

La marea es uno de los principales forzantes de la dinámica de los cuerpos de agua costeros. La marea cambia en el espacio y en el tiempo, por lo tanto las amplitudes de la marea varían. En esta tesis se examina la influencia de las mareas del tipo mixto semidiurno con un rango mesomareal en la dinámica de las lagunas costeras someras. El Estero de Punta Banda (EPB) es una laguna costera somera, ubicada en la costa oeste de Baja California, en el extremo sur de la Bahía de Todos Santos. El rango de marea promedio es 2.2 m correspondiente a un sistema mesomareal; las mareas son mixtas con predominancia semidiurna con un número de forma igual a 0.64. Utilizando análisis armónico obtuvimos las amplitudes de los constituyentes de marea de dos series de tiempo observadas en la cabeza y en la boca y en series calculadas con el modelo numérico Delft3D en diferentes puntos del canal del estero. Las bandas de frecuencias con la mayor energía espectral fueron las semidiurnas seguidas por las diurnas. Experimentos numéricos de largo periodo y forzados con un tipo de marea mixta semidiurna indicaron que dentro de la laguna existe la generación de las mareas de agua somera: MS_f , M_m , MO_3 , Mk_3 , M_4 , MS_4 , MN_4 y $2MS_6$. Las amplitudes de los constituyentes principales (M_2 , K_1 , S_2 y O_1) se atenúan de la boca a la cabeza de la laguna. Por ejemplo, el constituyente semidiurno lunar M_2 se atenúa de 68 cm a 48 cm. Resultados de un modelo analítico lineal implicaron que la atenuación se explica con un balance longitudinal entre el gradiente de presión y la fuerza de fricción, dándole al sistema una característica de un sistema altamente friccional. Este balance se corroboró con el modelo numérico. Además, utilizando el modelo numérico Delft3D, se encontró que existe una zona dentro de la laguna de máxima amplificación (atenuación) en las amplitudes de las mareas de agua somera (constituyentes principales). Estos cambios de amplitud se deben a que dentro del EPB existe un escalón que afecta la dinámica, donde el balance entre el gradiente de presión y la fricción con el fondo fue corroborado. También se encontró que la presencia de curvatura en el canal incrementa la amplitud de las mareas de agua somera.

Palabras clave: laguna costera somera, forzamiento mareal, atenuación y amplificación mareal, mareas de agua somera, Estero de Punta Banda.

Abstract of the thesis presented by **Braulio Juárez Araiza** as a partial requirement to obtain the Master in Science Degree with orientation in Physical Oceanography.

The dynamic consequences of a tidal forcing type mixed semidiurnal in a shallow coastal lagoon

Abstract approved by:

Dr. José Gómez Valdés
Director thesis

The tide is the principal forcing in the dynamic of the coastal lagoons. The Estero de Punta Banda is a shallow coastal lagoon, with a mean depth of 4 m, approximately, located at the south part of the Bahía de Todos Santos from the west coast of Baja California. The tidal range is 2.2 m corresponding to a mesotidal regime; the tides are mixed mainly semidiurnal with a form number of 0.64. Using harmonic analysis, we calculated the amplitudes and phases of each constituent in the mouth and in the head, from observations, and in several points of main channel, from the output of the numerical model. The frequency bands with the higher spectral energy were primarily the semidiurnal and subsequently the diurnal. The amplitudes of the principal astronomical constituents (M_2 , K_1 , S_2 , and O_1) were attenuated from the mouth to the head. For example, the semidiurnal constituent M_2 was attenuated from 68 cm to 48 cm. The propagation along the lagoon of the main constituents was examined using an analytic linear model. Numerical experiments of a year-long using as tidal forcing a mixed semidiurnal tide, indicated that inside the lagoon shallow water tides were generated, principally: MS_f , M_m , MO_3 , Mk_3 , M_4 , MS_4 , Mn_4 , and $2MS_6$. Results from the analytical model and from the numerical model revealed that not only the attenuation of the main constituents but also the generation of shallow water tides were explained by a balance between the pressure gradient and the frictional force, characterizing the system as high frictional. Furthermore, with the numerical model, we found that inside the lagoon there is a step where the maximum amplification (attenuation) occurred for the amplitudes of the shallow water tides (astronomic constituents). We also found that the curvature of the main channel affected the amplitude of the shallow water tides.

Keywords: shallow coastal lagoon, tidal forcing, tidal attenuation and amplification, shallow water tides, Estero of Punta Banda.

Dedicatoria

A los que ya no están:

Mi tío, Manuel Araiza Téllez, gracias por enseñarme el don de reír aun en momentos difíciles, esta va por ti.

Mis abus, Isabel Hinojosa y Adela Téllez.

A los que están:

Mi nueva primocha, Adalie Araiza Olvera

Mis padres, Silvia Araiza Téllez y Gabriel Juárez Hinojosa, gracias por todo su apoyo y amor. He aquí el fruto de ello, espero les guste.

Mis hermanos, Gabriel Juárez Araiza y Bruno Juárez Araiza, sigamos siendo motivo de orgullo para nuestros padres

Mi reina. Mi esposa. Mi amor, Natalia Illescas Mena, gracias amor por estar siempre apoyándome y por todo este tiempo a mi lado.

Mi familia y amigos

Agradecimientos

A mis padres, mis hermanos, mi novia que al mismo tiempo es la más chida amiga de todas y a toda mi familia por su apoyo incondicional.

A todos los amigos con los que tuve la fortuna de encontrarme en esta etapa de mi vida: Camilo, Esveidy, Isaac, Jean Paul, Rene Penol, Jona, Nemo, Lenna, Raul, Javi y un largo etcétera.

A mi director de tesis el Dr. José Gómez Valdés, por tener siempre una atenta disposición y estar al tanto de mi desarrollo profesional y personal. También a los miembros del comité: Dra. Vanesa Magar Brunner y el Dr. David Alberto Rivas Camargo, por el tiempo y los comentarios que ayudaron a enriquecer este trabajo.

Al grupo de trabajo del Dr. José Gómez Valdés: Leonardo Tenorio Fernández, Héctor Salvador Torres Gutiérrez y Eugenio Ruiz Castillo por los comentarios y sugerencias, cada “*viernes de academia*”, que también ayudaron a enriquecer este trabajo.

A todo el personal docente del Departamento de Oceanografía Física por otorgarme las herramientas necesarias para alcanzar esta meta. También al equipo técnico, en particular a Arturo Ocampo Torres, y al departamento de embarcaciones de CICESE. Finalmente al Dr. Francisco Javier Ocampo Torres por facilitar datos de corrientes y de nivel del agua en el Estero de Punta Banda y en la Bahía de Todos Santos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Departamento de Oceanografía Física por el apoyo económico brindado durante la maestría.

Tabla de contenido

| | Página |
|------------------------------------|--------|
| Resumen español | ii |
| Resumen inglés | iii |
| Dedicatorias | iv |
| Agradecimientos | v |
| Lista de figuras | viii |
| Lista de tablas | xii |
| | |
| 1. Introducción | |
| 1.1 Área de estudio..... | 5 |
| | |
| 2. Métodos y materiales | |
| | |
| 2.1 Obtención de datos..... | 8 |
| 2.2 Análisis de datos..... | 8 |
| 2.3 Análisis armónico..... | 9 |
| 2.4 Modelo analítico..... | 10 |
| 2.5 Modelo numérico..... | 15 |
| 2.5.1 Malla y batimetría..... | 16 |
| 2.5.2 Calibración del modelo..... | 18 |
| | |
| 3. Resultados | |
| | |
| 3.1 Observaciones..... | 20 |
| 3.2 Marea diurna y semidiurna..... | 24 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3 | Mareas de agua somera..... | 29 |
| 3.3.1 | Altas frecuencias..... | 30 |
| 3.3.2 | Bajas frecuencias..... | 37 |
| 3.4 | Experimento con fondo plano..... | 39 |
| 3.5 | Experimento en un canal sin curvatura (rectangular)..... | 44 |
| | | |
| 4. | Discusión | |
| | | |
| 4.1 | Resultados numéricos de los principales constituyentes..... | 51 |
| 4.2 | Constituyentes N_2 , MN_4 , M_m | 52 |
| 4.3 | Limitaciones de los modelos..... | 54 |
| 4.4 | Balance longitudinal..... | 55 |
| 4.4.1 | Comprobación del balance longitudinal con el modelo numérico..... | 56 |
| | | |
| 5. | Conclusión y trabajo a futuro | |
| | | |
| 5 | Conclusión y trabajo a futuro..... | 60 |
| | | |
| | Lista de referencias bibliográficas..... | 61 |

Lista de figuras

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Distribución global de los tres tipos de forzamientos mareales, según Sumich <i>et al.</i> (2004)..... | 2 |
| 2 | Estero de Punta Banda, en escala de grises se representa la batimetría en metros. Los símbolos indican la ubicación de los sensores de presión (asterisco) y de un perfilador de corrientes anclado en la boca (triangulo) | 6 |
| 3 | Espacio paramétrico del error cuadrático medio (ECM) calculado para la frecuencia del constituyente semidiurno M_2 | 13 |
| 4 | Forma del fondo que se utilizó para el modelo analítico. La profundidad y el ancho están normalizados; la profundidad máxima del canal que fue igual a 4 m y el ancho total fue de 200 m..... | 14 |
| 5 | Área (m^2) de cada celda de la malla utilizada. Un área mayor indica una menor resolución de malla..... | 17 |
| 6 | Ubicación de los puntos de observación del modelo numérico. En escala de grises se presenta la configuración de la batimetría (m)..... | 18 |
| 7 | a) Comparación entre las amplitudes observadas y las amplitudes calculadas de cada constituyente. b) Diferencia (observación - numérico) entre las amplitudes calculadas y observadas..... | 19 |
| 8 | Series de tiempo de 57 días de nivel del agua en la boca (superior) y en la cabeza (inferior) del Estero de Punta Banda | 21 |
| 9 | Comparación entre la señal de marea observada en la boca (negro) y la cabeza (rojo) del EPB durante un periodo de marea viva..... | 22 |
| 10 | Lo mismo que en Figura 9, pero para un periodo de marea muerta..... | 22 |
| 11 | Espectro de densidad de potencia (EDP) de las series de tiempo correspondientes a la boca y cabeza del estero. La barra vertical indica el intervalo de confianza (I.C)..... | 23 |

| | | |
|----|---|----|
| 12 | <i>Superior</i> : Velocidad promediada en la vertical (azul) y nivel del agua (verde) medido con el ADCP anclado en la boca. <i>Inferior</i> : Diagrama Hovmoeller de las variaciones de la componente horizontal de la velocidad en la vertical en m/s, colores rojos indican flujo hacia la laguna y colores en azul indican flujo hacia el océano..... | 24 |
| 13 | Elipses de variabilidad para los principales constituyentes de la velocidad vertical promedio calculada en el centro del canal de entrada del Estero de Punta Banda. M es el eje mayor mientras que θ es la fase..... | 25 |
| 14 | Amplitudes normalizadas para cada constituyente a lo largo del canal, en $x=0$ está la boca y en $x=1$ está la cabeza..... | 28 |
| 15 | Desfases de cada constituyente a lo largo del canal, en $x=0$ está la boca y en $x=1$ está la cabeza..... | 28 |
| 16 | Transporte longitudinal [U], las líneas blancas son contornos de fase con incrementos de 5 grados | 29 |
| 17 | Espectro de densidad de potencia (EDP) de las series de tiempo (sin filtrar) calculadas en la boca (a) y en la cabeza (b) del EPB..... | 30 |
| 18 | Elipses de variabilidad de la velocidad vertical promedio calculada para los principales constituyentes de mareas de agua somera, en el centro del canal de entrada del Estero de Punta Banda. M es el eje mayor mientras que θ es la fase..... | 31 |
| 19 | Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de mareas de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico..... | 35 |
| 20 | Variación espacial del eje mayor de cada constituyente de mareas de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico..... | 37 |
| 21 | Variación espacial de la amplitud de cada oscilación catorcenal a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico..... | 38 |
| 22 | Variación espacial del eje mayor de cada oscilación catorcenal a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico..... | 39 |
| 23 | Amplitud de los constituyentes principales observada a lo largo del EPB con el modelo numérico con una profundidad constante de 3.5 m..... | 40 |

| | | |
|----|---|----|
| 24 | Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para los principales constituyentes. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m..... | 41 |
| 25 | Variación de la amplitud a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de alta frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m..... | 42 |
| 26 | Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de alta frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m..... | 43 |
| 27 | Variación de la amplitud a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de baja frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 metros. Notar que a diferencia de las figuras pasadas el rango del eje vertical va de 0 a 2 cm de amplitud..... | 43 |
| 28 | Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de baja frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m..... | 44 |
| 29 | Batimetría que se generó artificialmente para el experimento en un canal sin curvatura, la línea continua corresponde a la línea de costa real y la línea punteada corresponde a la línea de costa para la sección artificial que se utilizó en este experimento. En escala de grises se representa la profundidad en metros y los puntos rojos son las localizaciones de los nuevos puntos de observación..... | 45 |
| 30 | Dimensiones de la nueva malla que se utilizó, en contornos de colores se muestra el valor del área de cada celda de malla en m ² | 46 |
| 31 | Variación a lo largo del canal de la amplitud de los principales constituyentes, para un canal rectangular..... | 47 |
| 32 | Variación a lo largo del canal de la magnitud del eje mayor de las elipses de variabilidad de los principales constituyentes. Para un canal rectangular..... | 47 |
| 33 | Lo mismo que en Figura 31, pero para las mareas de agua somera de alta frecuencia..... | 48 |
| 34 | Lo mismo que en Figura 32, pero para mareas de agua somera de alta frecuencia..... | 49 |

| | | |
|----|--|----|
| 35 | Lo mismo que en Figura 31, pero para mareas de agua somera de baja frecuencia..... | 50 |
| 36 | Lo mismo que en Figura 32, pero para mareas de agua somera de baja frecuencia. Notar que la escala del eje vertical cambió..... | 50 |
| 37 | Variación espacial de la amplitud de los constituyentes principales..... | 51 |
| 38 | Variación espacial de la fase de los constituyentes principales..... | 52 |
| 39 | Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos numéricos con un forzamiento que adicionalmente incluye N_2 | 53 |
| 40 | Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de agua somera de baja frecuencia, a lo largo del EPB a partir de los datos numéricos con un forzamiento que adicionalmente incluye N_2 | 54 |
| 41 | Geometría de una laguna conectada a mar abierto por un canal somero friccional. (Hill, 1993)..... | 57 |
| 42 | Diagrama de dispersión entre el término del gradiente de presión (ordenada) y el término de fricción (abscisas) en la parte superior de la gráfica se presenta la ecuación de la recta correspondiente al ajuste lineal, también se presenta el valor del coeficiente de correlación (R) y el valor del error cuadrático medio RMSE(por sus siglas en inglés)..... | 59 |

Lista de tablas

| Tabla | | Página |
|-------|--|--------|
| 1 | Elevación del nivel del agua medido a partir del ADCP anclado en el centro del canal de entrada de la boca del EPB..... | 25 |
| 2 | Amplitudes y fases de los principales constituyentes (O_1 , K_1 , M_2 y S_2) con sus errores asociados (δ) para la serie de tiempo en la boca del EPB..... | 26 |
| 3 | Lo mismo que en Tabla 2, pero para la serie en la cabeza del EPB.. | 27 |
| 4 | Amplitudes y fases de cada constituyente de agua somera (alta frecuencia) con sus errores asociados para la serie de tiempo de nivel del agua en la boca del EPB..... | 32 |
| 5 | Lo mismo que en Tabla 4, para la serie en la cabeza del EPB..... | 32 |
| 6 | Amplitudes y fases de cada constituyente calculadas a partir de las series numéricas en la boca del EPB..... | 33 |
| 7 | Amplitudes y fases de cada constituyente calculadas a partir de las series numéricas en la cabeza del EPB..... | 34 |
| 8 | Parámetros de las elipses correspondientes a la serie de tiempo del modelo numérico de velocidades promediadas verticalmente en el punto de observación correspondiente a la boca del EPB..... | 36 |
| 9 | Lo mismo que en Tabla 8 para el punto de observación correspondiente a la cabeza del EPB..... | 36 |

1. Introducción

La fuerza marea de los astros es una de las forzantes más importantes en el océano global, induciendo cambios en el nivel de la superficie del mar en periodos de tiempo que van desde horas hasta centenas de años, con las variaciones seculares; a este cambio en el nivel de la superficie del mar debido a las fuerzas de atracción gravitacional y centrífuga se le conoce comúnmente como marea. La fuerza de marea es una fuerza de cuerpo que actúa sobre grandes masas (Godin, 1988), es un movimiento periódico relacionado directamente al movimiento de los astros. Los movimientos regulares entre los sistemas Luna-Tierra y Tierra-Sol predominan en los movimientos mareales del océano (Pugh, 1996).

Debido a que la marea cambia en el espacio y en tiempo, las amplitudes de la marea varían. Por esto existen zonas donde el rango de marea (la diferencia entre el nivel de pleamar y bajamar) es mayor. Existen tres tipos de regímenes mareales basados en el rango de marea: cuando el rango de marea es menor a 2 m el régimen de marea es llamado micromareal, cuando el rango es mayor a 4 m se le llama macromareal y los sistemas que muestran un rango de marea entre 2 y 4 m se consideran mesomareales (Davies *et al.*, 1964).

Dependiendo de la magnitud de las amplitudes de los principales constituyentes, el forzamiento por marea puede ser clasificado utilizando el número de forma, que es un número adimensional propuesto por Defant (1958), definido como la razón entre la suma de las amplitudes de los principales constituyentes diurnos y la suma de las amplitudes de los principales constituyentes semidiurnos $(O_1+K_1)/(S_2+M_2)$. Si el número de forma es menor a 0.25 el forzamiento es del tipo diurno; si es mayor que 0.25 y menor que 1.5 el forzamiento es mixto con predominancia semidiurna; si está entre 1.5 y 3 el forzamiento es mixto con predominancia diurna; y finalmente si es mayor a 3 el forzamiento es diurno. En la Figura 1 se esquematiza la distribución global de estos tres tipos de forzamientos. Se observa que las mareas de tipo mixto semidiurno son predominantes junto con las mareas de tipo semidiurno.

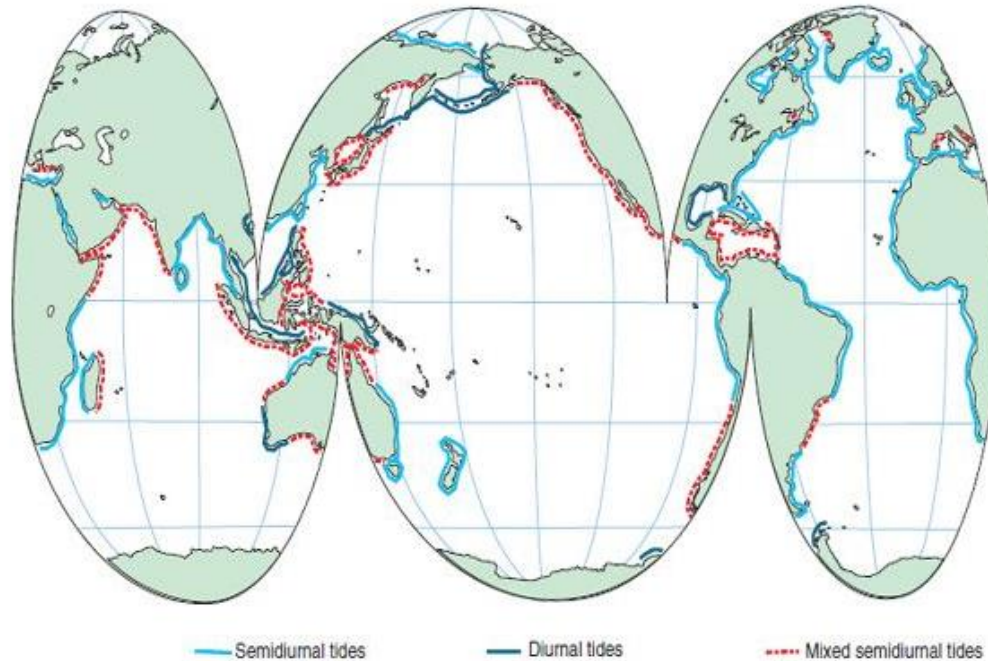


Figura 1. Distribución global de los tres tipos de forzamientos mareales, según Sumich *et al.* (2004).

A lo largo de los márgenes continentales se pueden encontrar distribuidos distintos cuerpos costeros. Basándose en la combinación de geomorfología y los procesos físicos, Kjerfve *et al.* (1989) clasificaron los distintos tipos de cuerpos costeros en seis tipos: los estuarios, las lagunas costeras, los fiordos, las bahías, los ríos con marea y los estrechos.

Las lagunas costeras se distinguen del resto por que están comúnmente orientadas paralelas a la costa, separadas del océano por una barra de arena que se formó por procesos litorales y conectadas al océano por una o más entradas (o bocas). El área de estudio de este trabajo, el Estero de Punta Banda (EPB), es un ejemplo de este tipo de cuerpo de agua.

Con base en el intercambio con el océano, Kjerfve (1986) divide a las lagunas costeras en tres tipos. Las lagunas estranguladas, presentan una alta energía de oleaje y un transporte litoral considerable, también están caracterizadas por periodos de residencia

largos y por esfuerzos del viento dominantes. Las lagunas restringidas, las cuales tienen una circulación mareal bien definida, están fuertemente influenciadas por vientos y usualmente están mezclados en la vertical. Por último las lagunas de isla de barrera, las cuales se encuentran orientadas paralelas a la costa y tiene comunicación directa con el océano, a través de varias bocas o canales de entrada.

La dinámica de la lagunas costeras es forzada por mareas, flujos de río, viento, y flujos de calor en la superficie; la respuesta a estas forzantes depende de las características del canal de entrada y de su geomorfología, los cuales regulan el intercambio con el océano (Kjerfve *et al.*, 1989). Las variaciones temporales del nivel del agua en lagunas costeras es causada por un conjunto de fenómenos internos o externos; existen cuatro fenómenos causales en este tipo de cuerpos de agua, los fenómenos astronómicos, meteorológicos, por gradientes de densidad y por otras causas como la morfología, la fricción, la rotación de la Tierra y los afluentes (Farreras, 2004). Las mareas en las lagunas costeras son inducidas por la marea en el océano adyacente y da lugar a dinámica de flujos no lineales dentro del canal de entrada (Pugh, 1996).

La propagación de la onda de marea a lo largo de una laguna costera puede ser diferente entre un sistema y otro. Ésta depende de la morfología e hidrodinámica del sistema donde se propaga. Por ejemplo en la laguna de Patos en Brasil, una laguna restringida, las amplitudes de las ondas mareales y submareales son atenuadas conforme la onda se propaga hacia la cabeza (Fernández *et al.*, 2004). En lagunas costeras en las que las forzantes friccionales también son importantes puede existir una atenuación en la amplitud de los constituyentes. Por ejemplo Tenorio-Fernández (2015), mediante observaciones de nivel del agua, encontró que existen atenuaciones en los constituyentes diurnas y semidiurnas en la laguna de Chelem, en Yucatán.

En una laguna costera somera (Bahía de Yavaros), Dworak y Gómez-Valdés (2002) encontraron que la dinámica de los principales constituyentes es lineal y sin distorsión asociada a la rotación terrestre. Ellos reportaron que en esa laguna existe una generación de mareas compuestas (MK_3 , MS_4 y M_4) debido a la advección de momentum y a otros efectos no lineales.

Varios autores han presentado trabajos en los cuales mencionan como una de las consecuencias de sistemas friccionales la existencia de oscilaciones catorcenales. Utilizando un modelo numérico que parte de un balance entre el gradiente de presión y la fricción de fondo, Hill (1994) explicó la generación de una oscilación catorcenal dentro de una laguna debido a un “*set-up*” friccional generado por un cambio en la profundidad del canal de entrada del sistema.

Mediante observaciones y simulaciones numéricas en el estuario del Amazonas, el cual es un sistema macromareal y con un tipo de marea semidiurna, Gallo *et al.* (2005) reportaron una generación de mareas compuestas y sobrepuestas, en particular M_4 y MS_f . Haciendo un análisis de términos no-lineales, que generan este tipo de mareas, concluyeron que el término que predominó dentro del estuario fue el término friccional.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la propagación de la marea en cuerpos de agua costeros, en particular aquéllos que presentan un rango de marea mesomareal y son forzados por una marea tipo mixta semidiurna. En particular, analizaremos la propagación de los constituyentes principales de la marea e identificaremos qué mareas de agua somera se generan, dónde se generan y explicaremos cuál es el mecanismo que las genera. Nuestras hipótesis son que la propagación de los constituyentes principales se puede explicar principalmente utilizando un modelo analítico lineal y que debido a que el forzamiento en la boca del EPB es de tipo mixto semidiurno, esperamos encontrar mareas de agua somera, las cuales pueden ser combinaciones de M_2 con los demás constituyentes principales (O_1 , K_1 y S_2) y en particular esperamos encontrar una oscilación catorcenal con un periodo de aproximadamente 14 días.

Determinar las consecuencias de tener un forzamiento de tipo mixto, con predominancia semidiurna en una laguna costera mesomareal, contribuye a reforzar estudios previos que se tienen sobre propagación de marea dentro de lagunas costeras. Al igual que dado un forzamiento mixto-semidiurno, conocer qué constituyentes de mareas de agua somera se generan, de alta y baja frecuencia, en una laguna costera. Este trabajo contribuye a un conocimiento más amplio sobre la dinámica de mareas en el EPB, intentando caracterizarlo y sirve como la base para trabajos posteriores en esta laguna costera y en sistemas con características y forzamientos similares.

En el presente trabajo encontramos que debido a que el sistema es altamente friccional, los constituyentes principales de la marea se atenúan dentro del EPB, también encontramos que existe una zona dentro del estero donde se da la generación de mareas de agua somera y comprobamos, utilizando un modelo numérico, que el balance longitudinal dentro del estero se da entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de fricción, este balance suele ser típico en sistemas costeros someros (LeBlond 1978; Hill, 1984; Tenorio-Fernández *et al.*, 2015). Sin embargo, la importancia de este trabajo recae en la forma en que se llegó a este balance (utilizando un modelo analítico) y sobre todo en que se encontró la zona exacta donde se da la generación de mareas de agua somera, la cual es una zona en la que la profundidad del canal principal del EPB cambia abruptamente.

1.1 Área de estudio

El EPB es una laguna costera somera, restringida, ubicada en la costa oeste de Baja California, México, en el extremo sur de la Bahía de Todos Santos, a 13 km de distancia de Ensenada. La boca del estero está ubicada a $31^{\circ} 46'$ de latitud norte y $116^{\circ} 36'$ de longitud oeste, mientras que la cabeza está ubicada a $31^{\circ} 46'$ latitud norte y $116^{\circ} 38'$ de longitud oeste. El EPB tiene forma de "L" con un extremo corto, de aproximadamente 3 km, orientado en dirección SE, y un extremo largo de 7.5 km orientado en dirección NNE (Figura 2). A lo largo del canal del extremo principal las profundidades van decreciendo desde 8 metros hasta 1 metro en forma no uniforme. El área superficial total del estero es $3.61 \times 10^6 \text{ m}^2$ en bajamar media inferior (BMI) y $11.63 \times 10^6 \text{ m}^2$ en pleamar media superior (PMS). El ancho promedio del estero es del orden de 345 m en BMI, aumentando a unos 1100 m en PMS. El volumen total del estero es de $5.28 \times 10^6 \text{ m}^3$ en BMI y $17.18 \times 10^6 \text{ m}^3$ en PMS (Pritchard *et al.*, 1978). La batimetría del estero se caracteriza por un canal principal bien definido a lo largo del cuerpo del estero, a cuyos lados se extienden zonas de marisma (Ortiz *et al.*, 2003).

En la cabeza del estero se encuentran desarrolladas zonas de marismas con canales sinuosos y planicies que presentan porciones con sustrato arenoso, arcilloso limoso, en

marea baja se pueden observar algunas rocas angulosas dispersas. Mientras que en la boca solamente se observa un sustrato de arenas y limos, además de algunas zonas de marisma (Aguilar, 1982).

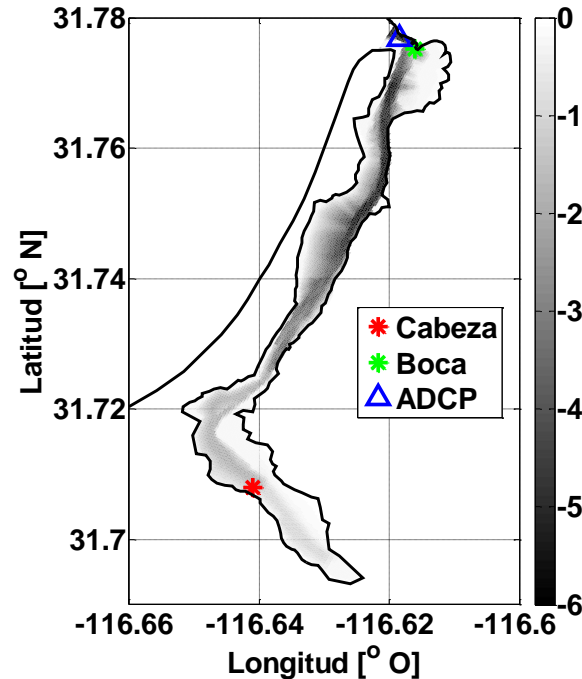


Figura 2. Estero de Punta Banda, en escala de grises se representa la batimetría en metros. Los símbolos indican la ubicación de los sensores de presión (asterisco) y de un perfilador de corrientes anclado en la boca (triángulo).

El EPB está comunicado directamente con la Bahía de Todos Santos por una boca de cientos de metros de ancho, la marea en la bahía actúa como forzante del estero y a su vez la bahía esta forzada por la marea del océano Pacífico adyacente. La Bahía de Todos Santos tiene un rango de marea aproximado de 2.3 m (mesomareal) y presenta mareas mixtas con predominancia semidiurna (Filonov *et al.*, 2014)

El rango de marea del EPB es de aproximadamente 2.2 m (calculado a partir de los datos utilizados en este trabajo), correspondiente a un sistema mesomareal. La marea es mixta con dominancia semidiurna y un factor de forma igual a 0.64. Según Pritchard *et al.* (1978), los flujos inducidos por marea del tipo astronómica son de mayor magnitud

que los flujos inducidos por marea no astronómica. Utilizando simulaciones numéricas Ortiz *et al.* (2003) detectaron asimetrías entre el flujo y reflujos de la marea dentro del EPB, siendo el reflujos de mayor intensidad en comparación al flujo, esto induce una circulación residual de sedimento hacia el océano dándole al EPB una función de auto-dragado, evitando la acumulación de sedimento sobre todo en la boca.

2. Métodos y materiales

2.1 Obtención de datos

Se obtuvieron datos de presión del agua con dos sensores, uno ubicado en la boca y el otro en la cabeza del estero (Figura 2), un Sea-Bird SBE 26 y un RBR Virtuoso, respectivamente. El periodo de mediciones fue de 57 días (julio a septiembre del 2014) con un intervalo de muestreo de 5 min. Adicionalmente se tienen datos de corrientes en la boca obtenidos con un perfilador de corrientes (ADCP, Sontek) ubicado a 31° 46.597' N y 116° 37.052' O, de un periodo de 15 días (marzo del 2014) y un intervalo de muestreo de 30 minutos, con 10 celdas verticales de profundidad y con cambios de 1 m, desde 1.5 m hasta 10.5 m sobre el fondo; a partir de las corrientes medidas calculamos la velocidad promediada en la vertical.

2.2 Análisis de datos

La herramienta principal que utilizamos para este estudio fue el análisis armónico, el cual aplicamos a las series de tiempo de nivel del agua y a las series de corrientes (de los datos de campo y de los datos del modelo numérico), para obtener las amplitudes y fases del nivel del agua y los parámetros de las elipses de la corriente. Adicionalmente se calcularon los espectros de potencia para las series de nivel del agua, utilizando el software desarrollado por Lilly (2004).

Calculamos las atenuaciones de las amplitudes calculadas mediante análisis armónico. Calculamos la atenuación (A_t) para cada constituyente dividiendo la amplitud observada en la cabeza (C_c) entre la observada en la boca (C_b):

$$A_t = \frac{C_c}{C_b}. \quad (1)$$

También calculamos para cada constituyente la diferencia de fase (desfase, Δf) entre la boca y la cabeza.

2.3 Análisis armónico

A las series de tiempo de 57 días de nivel del agua, observadas en la boca y en la cabeza así como a la serie de corrientes, con un periodo de 15 días, se les realizó un análisis armónico utilizando la rutina de Matlab, *t_tide*, desarrollada por Pawlowicz *et al.* (2002), la cual utiliza la serie trigonométrica

$$x(t) = \sum_{k=1..N} a_k e^{i\sigma_k t} + a_{-k} e^{-i\sigma_k t}, \quad (2)$$

donde N representa a los constituyentes usados con su frecuencia σ_k y su amplitud compleja a_k en un tiempo t ; si la serie de tiempo es de valores reales, a_k y a_{-k} son complejos conjugados.

Realizamos los análisis armónicos utilizando correcciones nodales y un criterio de Rayleigh igual a 1. Reportamos únicamente los parámetros (amplitud, fase o parámetros de elipse en el caso de análisis a corrientes) de los constituyentes principales; para las mareas de agua somera, reportamos los parámetros de los constituyentes que tuvieran un valor de razón ruido/señal (SNR por sus siglas en inglés) mayor a 10. La razón ruido señal es el cuadrado de la razón de la amplitud con el error de la amplitud y está ligado a la longitud de la serie de tiempo, ya que dependiendo de ésta pueden variar las amplitudes calculadas.

2.4 Modelo analítico

Siguiendo la metodología de Tenorio-Fernández *et al.* (2015), utilizamos un modelo analítico lineal, desarrollado por Winant (2007), para describir la propagación de la parte astronómica de la marea dentro del EPB. El modelo parte de la suposición del modelo de agua somera para un fluido homogéneo. Se supone una configuración geométrica rectangular donde la longitud del sistema es mucho más grande que el ancho, y la profundidad máxima es mucho más pequeña que el ancho. La profundidad varia únicamente de forma transversal al canal siendo constante a lo largo de éste. El modelo lineal, de orden más bajo y sin dimensiones, es de la siguiente forma:

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} - f\alpha v_0 = -\frac{1}{\kappa^2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial t} + \frac{f}{\alpha} u_0 = -\frac{1}{\alpha^2 \kappa^2} \frac{\partial \eta_0}{\partial y} + \frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Donde u_0 , v_0 y w_0 son las componentes del vector de velocidad a lo largo del sistema (x), a lo ancho (y) y en la vertical (z) respectivamente y η_0 es la elevación del nivel del agua. A partir de la adimensionalización surgen cuatro parámetros:

$$f = \frac{f^*}{\omega^*}, \quad (6.1)$$

$$\alpha = \frac{B^*}{L^*}, \quad (6.2)$$

$$\kappa = \frac{\omega^* L^*}{\sqrt{g^* H^*}}, \quad (6.3)$$

$$\delta = \left(\frac{2K^*}{\omega^* H^{*2}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6.4)$$

Donde f^* es el parámetro de Coriolis, ω^* es la frecuencia de la onda de marea que fuerza el sistema, B^* es el ancho del sistema ($B^* \sim 200$ m), L^* es el largo del sistema ($L^* \sim 8300$ m), H^* la profundidad máxima ($H^* \sim 4$ m) y K^* es la difusividad vertical turbulenta (el asterisco indica variables con dimensiones); α y κ dependen de la geometría del sistema y de la geometría de la onda de marea, estos parámetros se conocen, sin embargo el parámetro δ depende del coeficiente de difusividad vertical turbulenta (K^*) el cual es desconocido. En la entrada del sistema ($x=0, y=0$) el único forzante es la amplitud de la marea (C^*). Se utiliza la condición de frontera cinemática ($w = \frac{\partial \eta_0}{\partial t}$) y condiciones de frontera dinámica ($\frac{\partial u_0}{\partial z} = \frac{\partial v_0}{\partial z} = 0$) en la superficie mientras que en el fondo se utiliza la condición de no deslizamiento.

Utilizando soluciones periódicas [conjunto de ecuaciones (7)] se sustituye en las ecuaciones de momentum [ecuaciones (3) y (4)], para encontrar las componentes horizontales de la velocidad; posteriormente se integra verticalmente la ecuación de continuidad [ecuación (5)] y utilizando las velocidades encontradas se sustituye para encontrar una ecuación sin términos de velocidad. Por último se utiliza una expansión en órdenes de magnitud α , para las amplitudes de la elevación (N).

$$u_0 = \text{Re}[U(z)e^{-it}], v_0 = \text{Re}[V(z)e^{-it}], w_0 = \text{Re}[W(z)e^{-it}] \text{ y } \eta_0 = \text{Re}[Ne^{-it}]. \quad (7)$$

Utilizamos la solución de orden más bajo de las amplitudes en la elevación de la superficie del agua ($N^{(0)}$) a lo largo del canal y está dada por la siguiente ecuación:

$$N^{(0)} = \frac{\cos \kappa \mu (1 - x)}{\cos \kappa \mu}. \quad (8)$$

donde $\mu = \langle M_0 \rangle^{-1/2}$ y $\langle M_0 \rangle = \int_0^1 M_0 dy$; donde $M_0 = \frac{f^2 Q_0^2}{P_0} - P_0$; P_0 y Q_0 son funciones complejas que están en función de la variación en la profundidad transversal del canal (h), el parámetro friccional (δ) y de los efectos de rotación (f), detalles de las funciones complejas se pueden encontrar en Winant (2007). El transporte, de orden más bajo, a lo largo del canal está dado por la siguiente ecuación:

$$[U] = -\frac{i \frac{\partial N^{(0)}}{\partial x} M_0}{\kappa^2}. \quad (9)$$

Tenorio-Fernández *et al.* (2015) utiliza la metodología descrita por Henrie y Valle-Levinson (2014), para obtener el parámetro friccional (δ) óptimo, con el que las amplitudes calculadas sean aproximadamente iguales a las amplitudes observadas, la metodología consiste en variar valores de κ y K^* para poder calcular las amplitudes de $N^{(0)}$ correspondientes a cada par de valores. Comparamos las amplitudes de nivel del agua observadas con las amplitudes calculadas del modelo analítico y se grafica la raíz el error cuadrático medio (ECM, RMSE por sus siglas en inglés), que se calculó de la siguiente forma:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum (N^{(0)}_{obs} - N^{(0)}_{calc})^2}{n}}, \quad (10)$$

donde $N^{(0)}_{obs}$ es la amplitud observada, normalizada con la amplitud de la boca, $N^{(0)}_{calc}$ es la amplitud normalizada calculada con el modelo, n es el número de puntos de observación que se comparan entre sí. Para este estudio se compararon dos puntos de observación (en la boca y la cabeza) por lo tanto $n = 2$. Por lo tanto el valor del parámetro friccional óptimo es el que combinado con el valor de κ real del sistema resulta en un valor $N^{(0)}_{calc}$ aproximadamente igual a $N^{(0)}_{obs}$, dando un ECM mínimo.

Variamos el coeficiente de viscosidad (K^*) de 0 a $0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y el parámetro κ de 0 a 0.1; ya con el espacio paramétrico generado con estos valores, calculamos el valor de κ del sistema con longitud $L^*=8300 \text{ m}$, para cada constituyente (O_1 , K_1 , M_2 y S_2). Por ejemplo, para el constituyente M_2 (ver la Figura 3) en la banda de valores κ correspondientes a la longitud del sistema ($\kappa=0.178$) y con el mínimo error (ECM=0.02) el valor de δ es de 3.86.

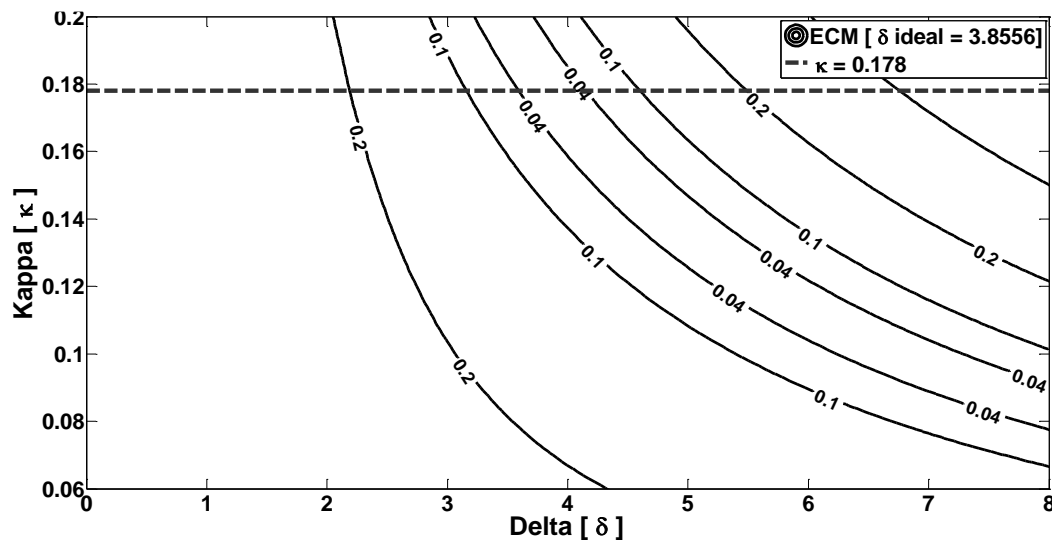


Figura 3. Espacio paramétrico del error cuadrático medio (ECM) calculado para la frecuencia del constituyente semidiurno M_2 .

Para las demás constituyentes, O_1 , K_1 y S_2 , los valores de κ son 0.085, 0.092 y 0.184, respectivamente, y sus correspondientes valores de δ son 8.06, 7.94 y 3.79. Estos valores del parámetro friccional indican que el sistema es altamente friccional (Winant,

2007). Para estos valores de δ la solución descrita en la ecuación (8) cambia a una solución exponencial:

$$N^{(0)} = \exp[-(1 + i)\kappa\delta\gamma x], \quad (11)$$

cuando $x \rightarrow \infty$, y donde γ es un parámetro de orden 1 que depende de la geometría de la cuenca (Winant, 2007). Para este estudio lo variamos de 0 a 1 (cada 0.01) para encontrar el valor óptimo que reproduzca las atenuaciones observadas y los valores de γ fueron 0.62, 0.7, 0.59 y 0.6, para O_1 , K_1 , M_2 y S_2 , respectivamente. La forma del fondo que se utilizó para este estudio corresponde a un transecto transversal del canal del EPB (Figura 4)

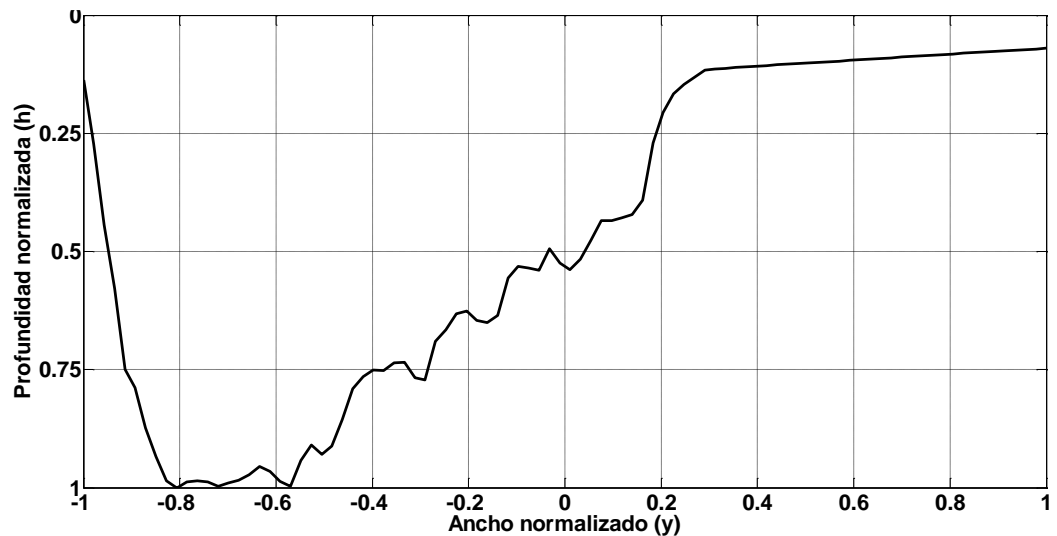


Figura 4. Forma del fondo que se utilizó para el modelo analítico. La profundidad y el ancho están normalizados; la profundidad máxima del canal que fue igual a 4 m y el ancho total fue de 200 m.

2.5 Modelo numérico

Para poder estudiar los procesos no lineales que inducen la generación de mareas de agua somera utilizamos el modelo numérico Delft3D, desarrollado por WL/Delft Hydraulics y la Universidad de Tecnología de Delft. Este modelo simula varios procesos físicos, tales como flujos mareales (módulo Flow) y propagación/generación de oleaje (módulo Wave). El modelo utiliza las aproximaciones de agua somera y la aproximación de Boussinesq (Zarzuelo *et al.*, 2015). El modelo baroclínico resuelve las ecuaciones de agua somera en su forma no lineal:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - fu = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right), \quad (13)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)V]}{\partial y} = S. \quad (14)$$

Las ecuaciones (12) y (13) son las ecuaciones horizontales de momentum, donde u y v son las componentes horizontales del vector de velocidad, f es el parámetro de Coriolis, U y V representan las velocidades promediadas verticalmente, d es la profundidad, ζ es el nivel del agua y ν_v es la viscosidad vertical turbulenta. El modelo utiliza coordenadas sigma (x, y, σ) , las cuales siguen el contorno del fondo. Los términos F_x y F_y comprenden los esfuerzos horizontales de Reynolds. Los forzamientos externos están

representados por los términos M_x y M_y . Se incluye el gradiente de presión, con una parte barotrópica y una baroclínica, expresado de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_0} P_x = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma', \quad (15)$$

$$\frac{1}{\rho_0} P_y = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{d + \zeta}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma'. \quad (16)$$

La ecuación de continuidad para aguas someras [ecuación (14)] permite fuentes o sumideros, representados por la variable S . Para mayor detalle sobre parametrizaciones y términos en las ecuaciones, consulte el manual del programa Delft3D disponible en línea (<http://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>).

2.5.1 Malla y batimetría

Utilizamos el módulo Flow con una malla irregular (Figura 5) y simulamos para un caso barotrópico (una capa). Definimos una frontera abierta ubicada en la boca del EPB con un forzamiento de tipo astronómico mixto semidiurno. Este forzamiento consistió en introducir las amplitudes y fases de los principales constituyentes (O_1 , K_1 , M_2 y S_2) obtenidas a partir del ajuste armónico realizado a la serie de tiempo de nivel del agua en la boca del EPB. Utilizamos la condición de no deslizamiento en el fondo.

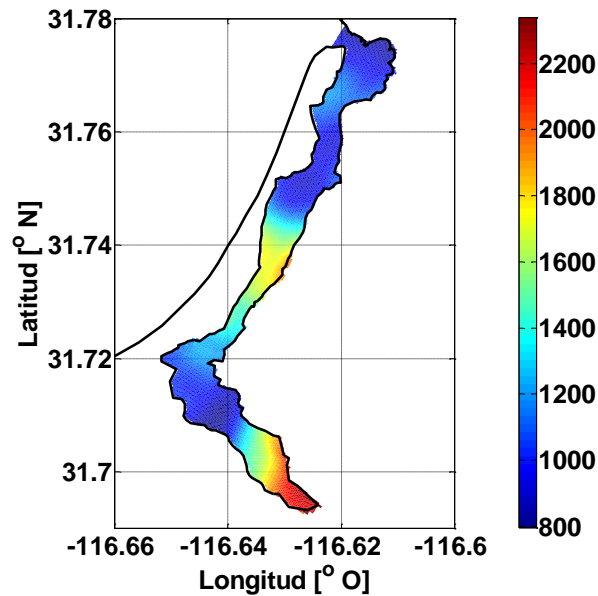


Figura 5. Área (m^2) de cada celda de la malla utilizada. Un área mayor indica una menor resolución de malla.

Interpolamos datos de profundidad obtenidos a partir de una batimetría realizada dentro del estero, para obtener la malla de profundidades que se utilizó en el modelo (Figura 6). El paso de tiempo utilizado para el modelo fue de 6 segundos, el cual fue el óptimo, ya que los valores máximos del número de Courant fueron observados en la boca con valores menores a 10; según indicaciones en el manual del modelo, los números de Courant no tienen que exceder magnitudes de 10.

Colocamos un total de 22 puntos de observación en la malla del modelo (Figura 6) para obtener valores de nivel del agua y velocidad promediada verticalmente. La distribución de estos puntos se eligió después de identificar puntos de interés dentro de la geometría del EPB, tratando que fueran sobre el canal principal.

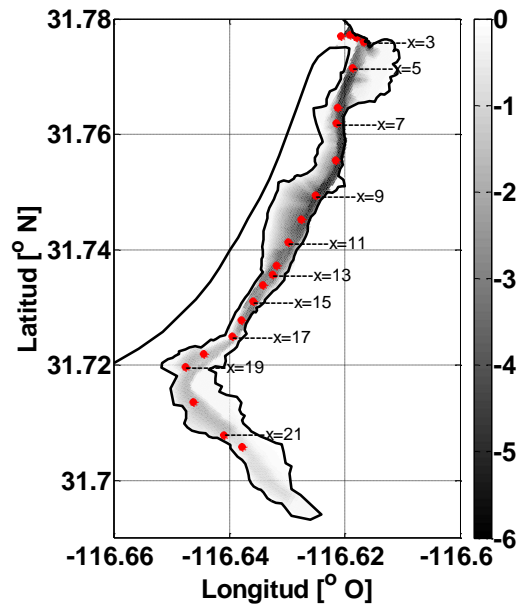


Figura 6. Ubicación de los puntos de observación del modelo numérico. En escala de grises se presenta la configuración de la batimetría (m).

2.5.2 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo con las observaciones realizamos cinco diferentes experimentos variando el parámetro de rugosidad de Manning (m). Utilizamos valores de Manning de 0.01, 0.015, 0.02, 0.025 y 0.03; elegimos estos valores porque son valores típicos para canales naturales con sedimentos de tipo arena (Fishman *et al.*, 1967). Los experimentos consistieron en simular la misma longitud de tiempo de las observaciones y variar el parámetro m . Comparamos las amplitudes observadas en la cabeza con las amplitudes calculadas en el mismo punto correspondiente a la malla del modelo (Figura 7).

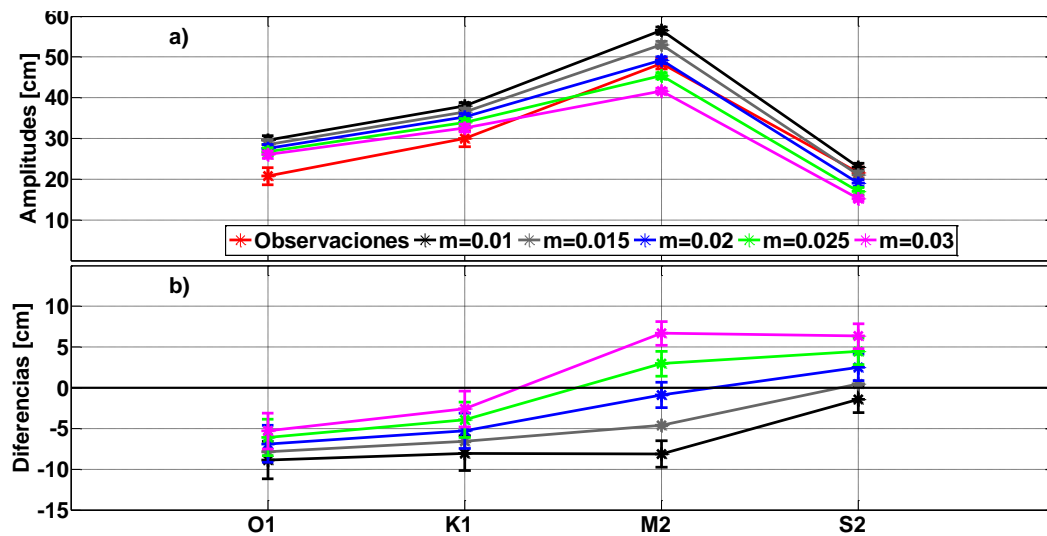


Figura 7. a) Comparación entre las amplitudes observadas y las amplitudes calculadas de cada constituyente. b) Diferencia (observación - numérico) entre las amplitudes calculadas y observadas.

El parámetro de Manning que presentó un promedio de diferencias menores fue el de 0.025, con una diferencia promedio de -0.38 cm. Con este valor del parámetro de rugosidad realizamos una simulación de un año (2014) para poder separar la constituyente catorcenal MS_r , con periodo de 14.78 días, de la constituyente con periodo de 13.66 días (M_r).

Posteriormente, realizamos un análisis armónico en cada punto de observación en la malla de la serie numérica para obtener las amplitudes y fases de los constituyentes principales y de las mareas de agua somera (de baja y alta frecuencia) a lo largo del EPB.

3. Resultados

Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente orden:

1. Primero presentamos resultados de las observaciones que se obtuvieron de las series de tiempo de nivel del agua y de las series de tiempo de las corrientes.
2. Posteriormente presentamos los resultados correspondientes a la parte astronómica de la marea (diurna y semidiurna). Esta sección incluye los análisis armónicos realizados a los datos observados (corrientes y nivel del agua) y los resultados del modelo analítico.
3. También reportamos los resultados correspondientes a las mareas de agua somera, la cual dividimos en dos grupos, constituyentes de baja frecuencia y de alta frecuencia. En esta sección incluimos las amplitudes obtenidas de cada constituyente de agua somera (corrientes y nivel del agua) y también incluimos gráficas con la distribución de la magnitud de las amplitudes para cada constituyente.
4. En las últimas dos secciones reportamos resultados obtenidos a partir de realizar dos experimentos adicionales, uno con un estero con fondo plano y otro con un estero sin curvatura y con fondo variable.

3.1 Observaciones

Las series de nivel del agua en la boca y en la cabeza mostraron 4 periodos de mareas vivas y muertas (Figura 8). El rango de marea en la boca del estero fue de 2.2 m, correspondiente a un sistema mesomareal. El factor de forma fue igual a 0.64, correspondiente, según Defant (1958), a una marea mixta con predominancia semidiurna. Ambas series mostraron periodos catorcenales y mensuales marcados, esto es poco usual en este tipo de cuerpos costeros donde lo común es observar una señal débil catorcenal en el interior del sistema.

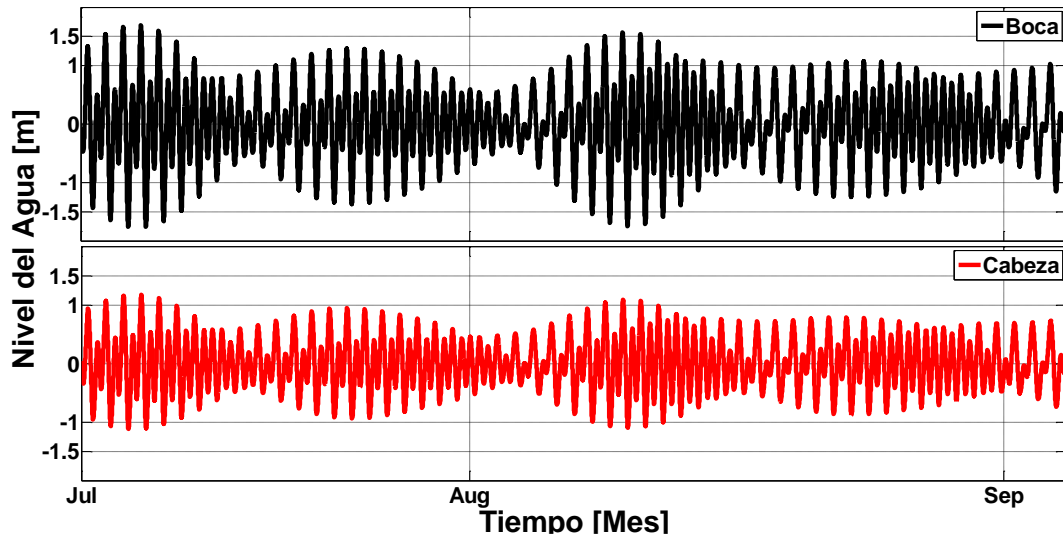


Figura 8. Series de tiempo de 57 días de nivel del agua en la boca (superior) y en la cabeza (inferior) del Estero de Punta Banda.

Comparando entre un periodo de mareas vivas y muertas (Figuras 9 y 10, respectivamente), se notó una marcada diferencia, aproximadamente 0.5 m, entre la amplitud de la onda de marea observada en la cabeza y la amplitud observada en la boca, siendo menor en esta última. En marea muerta se observó que la diferencia fue mínima. Esta diferencia durante marea viva generó un gradiente de presión de la boca hacia la cabeza, lo cual pudo haber generado una oscilación catorcenal friccional, ya que esta diferencia tiene periodicidad de aproximadamente 14 días.

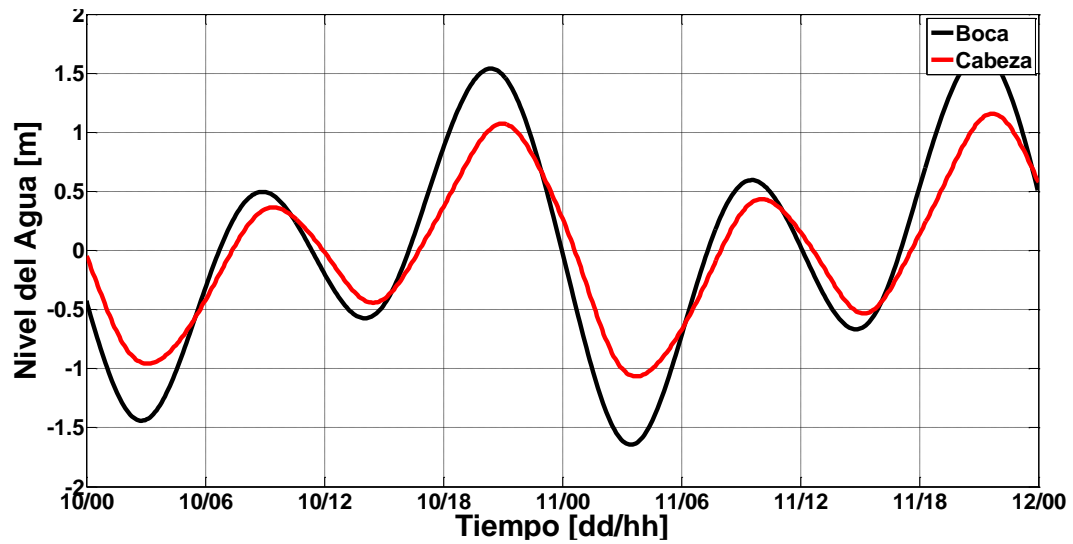


Figura 9. Comparación entre la señal de marea observada en la boca (negro) y la cabeza (rojo) del EPB durante un periodo de marea viva.

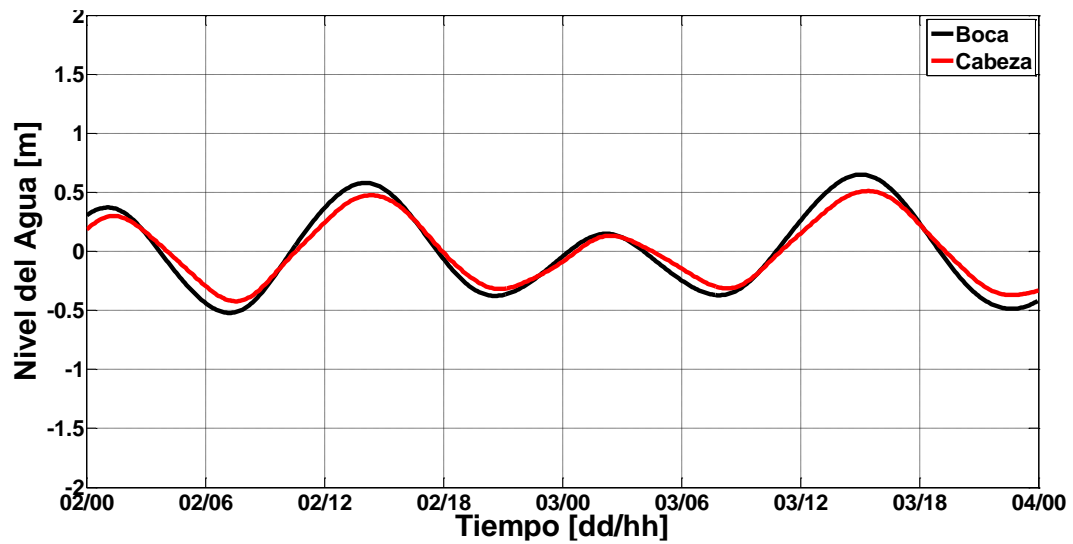


Figura 10. Lo mismo que en Figura 9, pero para un periodo de marea muerta.

El análisis espectral mostró que las bandas de frecuencias con la mayor energía potencial fueron las frecuencias semidiurnas seguidas por las diurnas. Los picos del espectro correspondiente a la serie en la cabeza son menores en comparación a los picos del espectro de la boca del EPB (Figura 11). En contraste, los picos espectrales correspondientes a la cabeza son mayores en las altas y bajas frecuencias en comparación a las varianzas en la boca.

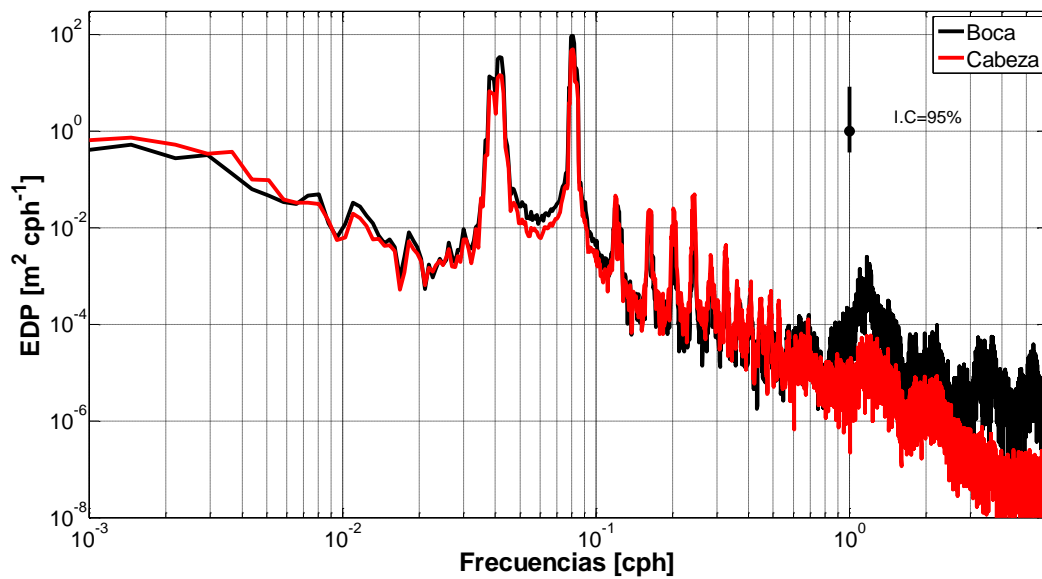


Figura 11. Espectro de densidad de potencia (EDP) de las series de tiempo correspondientes a la boca y cabeza del estero. La barra vertical indica el intervalo de confianza (I.C).

En las series de tiempo de velocidad promediada en la vertical en la boca del EPB (Figura 12) se observó que existe un desfase entre la velocidad y la variación del nivel del agua; según un análisis de correlación cruzada entre ambas series, este desfase es de aproximadamente 3 horas. Las corrientes son relativamente constantes en la vertical alcanzando máximos de hasta 1 m/s tanto en el flujo como en el reflujos de marea, sin embargo existe una perturbación aproximadamente a 6 m de profundidad. Esta perturbación puede ser debido a oscilaciones inerciales, no obstante este rasgo que se

observa no está dentro del enfoque de este trabajo, por lo tanto no podemos concluir al respecto de éste.

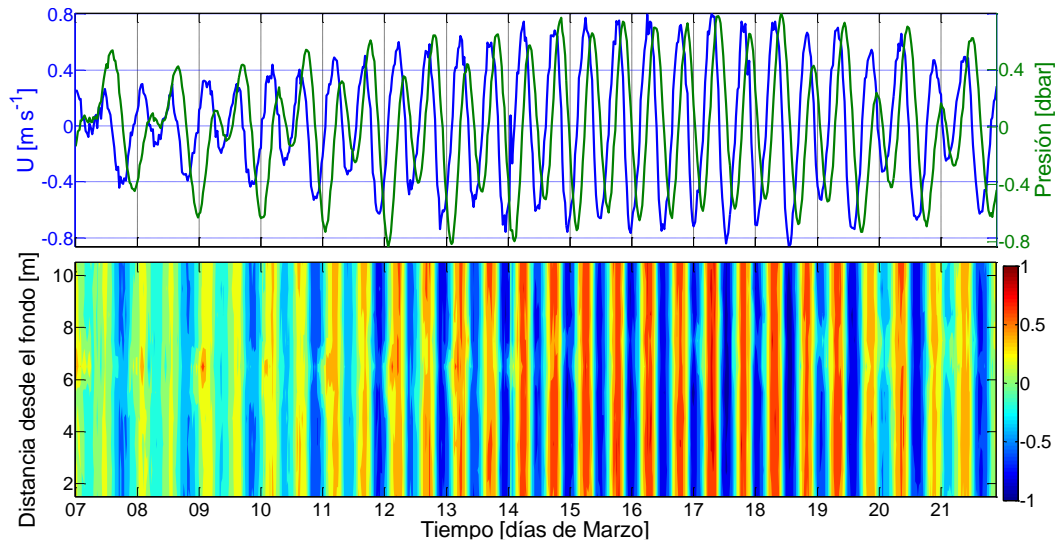


Figura 12. Superior: Velocidad promediada en la vertical (azul) y nivel del agua (verde) medido con el ADCP anclado en la boca. **Inferior:** Diagrama Hovmoeller de las variaciones de la componente horizontal de la velocidad en la vertical en m/s; colores rojos indican flujo hacia la laguna y colores en azul indican flujo hacia el océano.

3.2 Constituyentes diurnas y semidiurnas

En la Figura 13 se presentan las elipses de variabilidad para los principales constituyentes astronómicos, mientras que en la Tabla 1 se reportan las amplitudes y fases del nivel del agua medida por el ADCP anclado en la boca. El eje mayor de las elipses de velocidad promediada muestra que los constituyentes semidiurnos presentaron las mayores amplitudes, siendo el semidiurno lunar el que presentó el máximo valor con un eje mayor de 45 cm/s. Se observó un desfase entre las elipses de velocidad y la elevación del agua de aproximadamente 84° en el constituyente semidiurno M_2 , lo que indica que la onda de marea en la boca del estero cumple con la relación elevación-velocidad de una onda estacionaria.

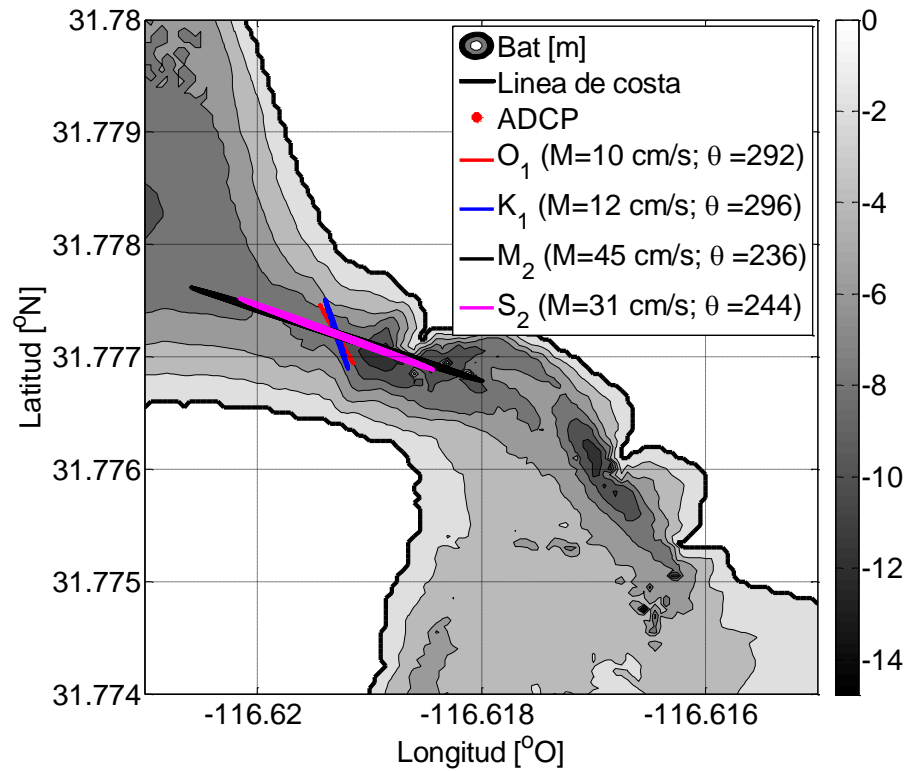


Figura 13. Elipses de variabilidad para los principales constituyentes de la velocidad vertical promedio calculada en el centro del canal de entrada del EPB. M es el eje mayor mientras que θ es la fase.

Tabla 1. Elevación del nivel del agua medido a partir del ADCP anclado en el centro del canal de entrada de la boca del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|---------------|---------------------|------------------|----------------------|-------------|----------------------|-----|
| O_1 | 0.0387307 | 19.9 | 2 | 194 | 5 | 100 |
| K_1 | 0.0417807 | 18.9 | 1.9 | 216 | 6 | 98 |
| M_2 | 0.0805114 | 40.9 | 4.6 | 140 | 7 | 81 |
| S_2 | 0.0833333 | 28.2 | 4.6 | 142 | 10 | 38 |

Las Tablas 2 y 3 muestran las amplitudes y fases de los principales constituyentes diurnos y semidiurnos (O_1 , K_1 , M_2 y S_2) en la boca y en la cabeza del estero, respectivamente. Observamos una amplitud mayor en la boca del estero y una disminución hacia la cabeza, por ejemplo para el semidiurno lunar (M_2) la amplitud disminuyó de 67.9 cm en la boca a 48.3 cm en la cabeza, una disminución de aproximadamente 19.6 cm y la atenuación (A_t) fue de 0.71. El constituyente que presentó la menor atenuación fue el diurno lunisolar (K_1), con una atenuación de 0.65. Existe un desfase entre ambos conjuntos de valores, por ejemplo para el constituyente M_2 el desfase fue de aproximadamente 13° (~30 min).

Tabla 2. Amplitudes y fases de los principales constituyentes (O_1 , K_1 , M_2 y S_2) con sus errores asociados (δ) para la serie de tiempo en la boca del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [$^\circ$] | δ Fase [$^\circ$] | SNR |
|---------------|---------------------|------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|------|
| O_1 | 0.0387307 | 29.6 | 2.7 | 98 | 5 | 120 |
| K_1 | 0.0417807 | 46.0 | 2.5 | 122 | 3 | 340 |
| M_2 | 0.0805114 | 67.9 | 1.3 | 301 | 1 | 2600 |
| S_2 | 0.0833333 | 30.6 | 1.6 | 302 | 3 | 370 |

Tabla 3. Lo mismo que en Tabla 2, pero para la serie en la cabeza del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [°] | δFase [°] | SNR |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------|--|------------|
| O₁ | 0.0387307 | 20.7 | 1.8 | 112 | 5 | 140 |
| K₁ | 0.0417807 | 30 | 1.9 | 132 | 3 | 240 |
| M₂ | 0.0805114 | 48.3 | 1.3 | 314 | 1 | 1400 |
| S₂ | 0.0833333 | 21.6 | 1.1 | 319 | 3 | 370 |

Comparando los resultados del análisis armónico realizado a las elevaciones medidas con el ADCP con los resultados del análisis armónico realizado a las elevaciones observadas con el sensor de presión en la boca, se concluyó que las amplitudes semidiurnas de la serie medida con el ADCP (Tabla 1) son mayores a las diurnas, mientras que en la serie medida con el sensor de presión (Tabla 2) se observó que la constituyente semidiurna lunar es la de mayor amplitud seguida por la diurna K₁. Sin embargo, es importante mencionar que ambas series no son instantaneas y lo más importante es que no tienen la misma longitud de tiempo, como ya se mencionó en la sección de materiales y métodos, el periodo de observación de las series influye en la razón ruido/señal del análisis armónico.

Observamos que las amplitudes obtenidas a partir del modelo analítico (con γ igual a 0.62, 0.7, 0.59 y 0.6 para O₁, K₁, M₂ y S₂, respectivamente) reprodujeron la atenuación observada (Figura 14). Ésta fue en promedio del 30%, siendo el constituyente lunisolar (K₁) el que presentó una amplitud normalizada menor (~0.65).

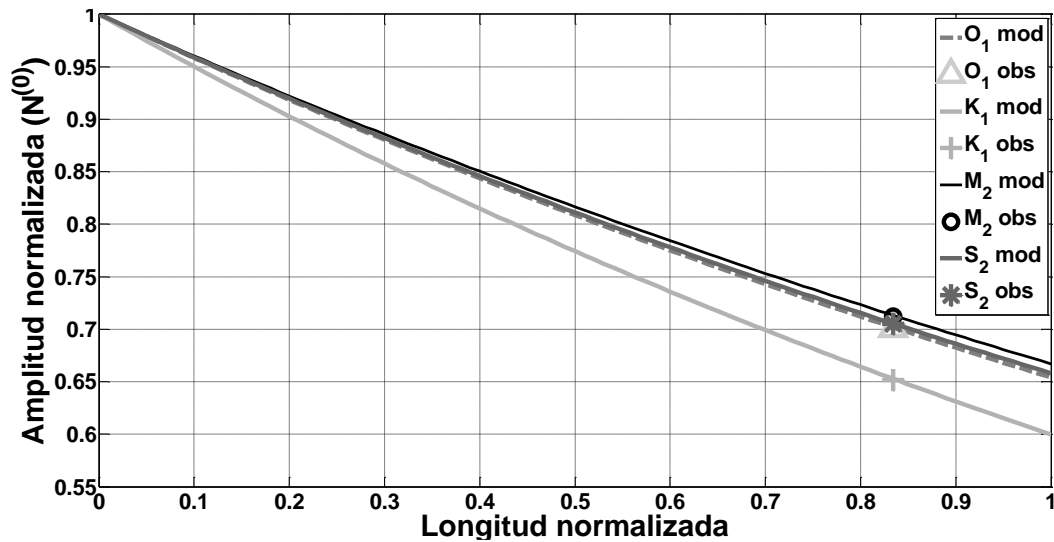


Figura 14. Amplitudes normalizadas para cada constituyente a lo largo del canal, en $x=0$ está la boca y en $x=1$ está la cabeza.

Sin embargo, los desfases calculados (Figura 15) sobreestiman los desfases observados, siendo mayor la diferencia entre el desfase observado y calculado del constituyente diurno lunisolar (K_1), una diferencia de aproximadamente 15° .

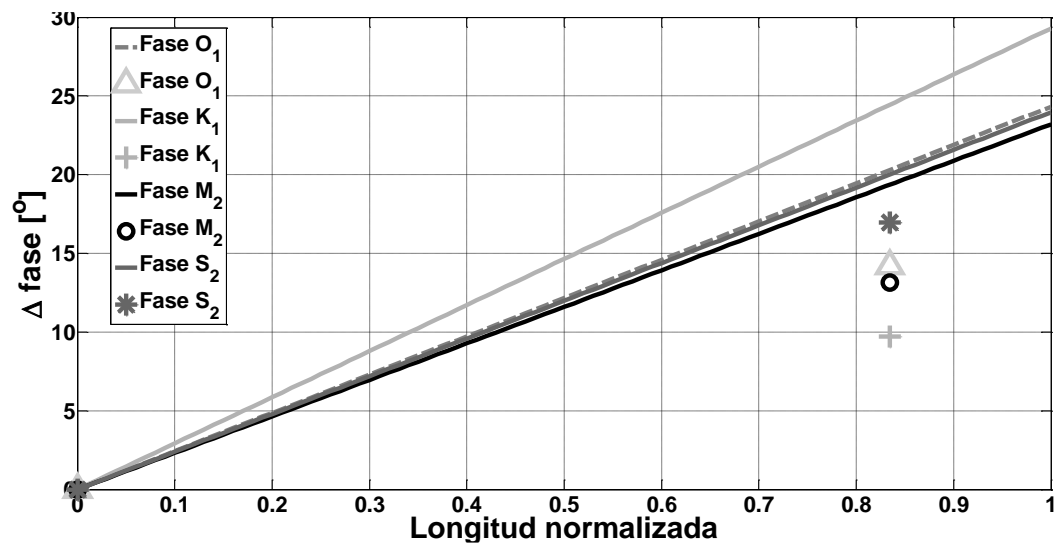


Figura 15. Desfases de cada constituyente a lo largo del canal, en $x=0$ está la boca y en $x=1$ está la cabeza.

Con la ecuación (8) fue posible calcular la amplitud del transporte de orden más bajo en la dirección longitudinal del sistema (Figura 16). Observamos que las amplitudes máximas se dan en las mayores profundidades del canal, las cuales están en la dirección oeste del canal, como se observa en la Figura 4. Se observaron cambios en los contornos de fase correspondientes a los constituyentes semidiurnos, en comparación a los contornos de los constituyentes diurnos.

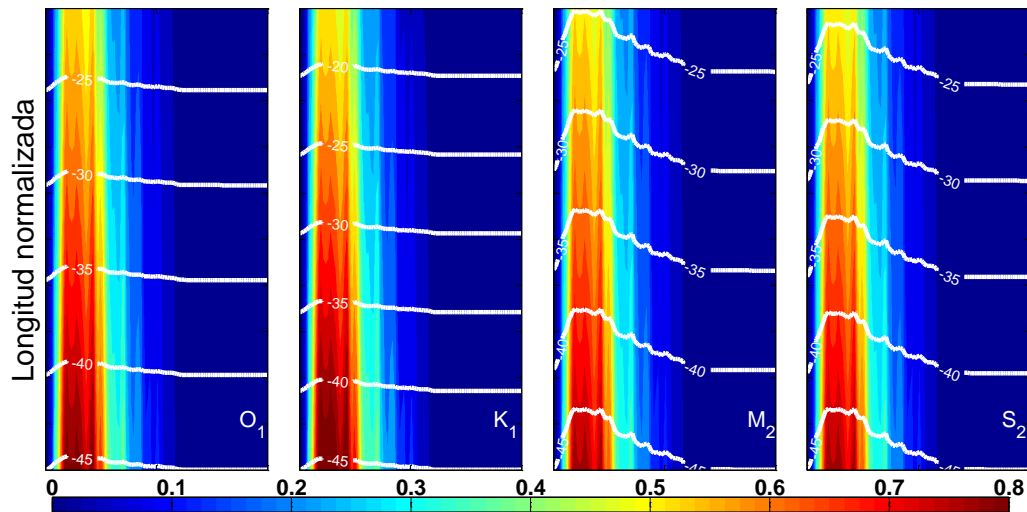


Figura 16. Transporte longitudinal [U], las líneas blancas son contornos de fase con incrementos de 5 grados.

3.3 Mareas de agua somera

En la Figura 17 se muestra el espectro de potencia para 3 puntos de observación, de la serie numérica de 1 año calculada a partir del modelo Delft3D: Frontera abierta (a), boca (b) y cabeza (c). Observamos que los picos de energía potencial en las frecuencias catorcenales y en frecuencias mayores a las semidiurnas son mayores en la cabeza (Figura 3c). Esto es un indicio de que existe generación de ondas en estas bandas de frecuencias.

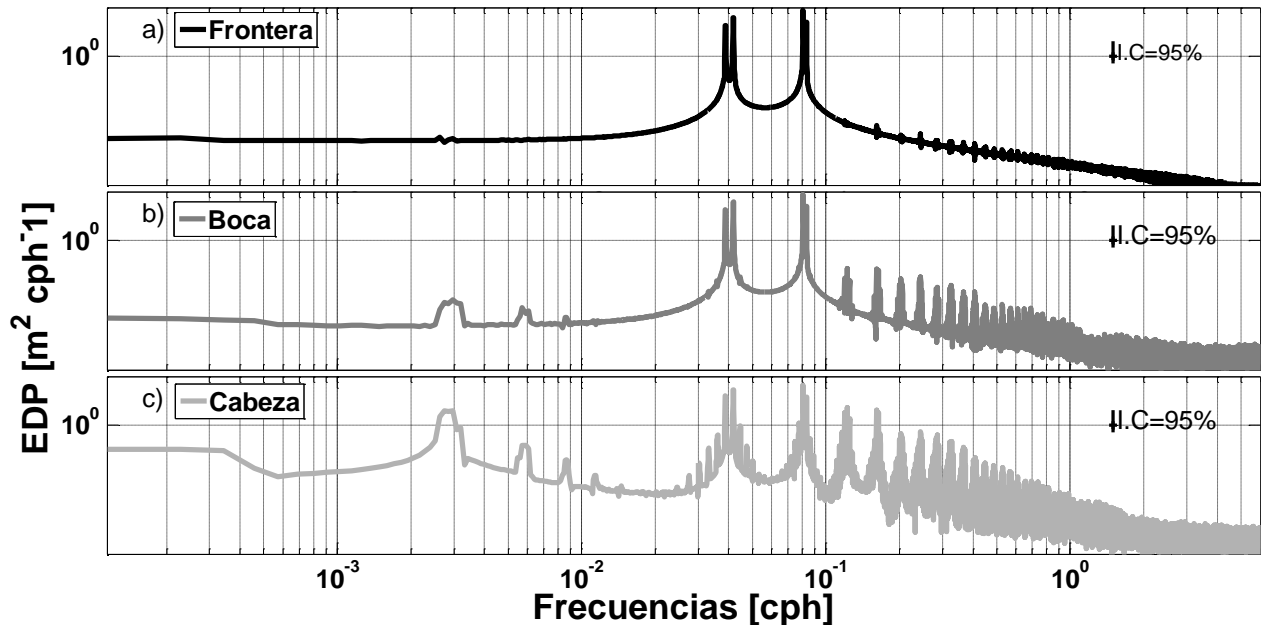


Figura 17. Espectro de densidad de potencia (EDP) de las series de tiempo (sin filtrar) calculadas en la boca (a) y en la cabeza (b) del EPB.

3.3.1 Alta frecuencia

Únicamente tres constituyentes de agua somera presentaron una razón ruido/señal mayor a 10, resultando significantes en el análisis armónico (Figura 18) realizado a la serie de tiempo de la velocidad promediada verticalmente, calculada a partir de las corrientes medidas con el ADCP en el centro del canal de entrada en la boca del EPB, los constituyentes M_4 , MS_4 y $2MS_6$. El que presentó la máxima magnitud de eje mayor fue el constituyente MS_4 con un eje mayor de 4 cm/s . Es importante mencionar que debido a que la serie de tiempo de velocidad con la que se trabajó fue de 15 días, algunas constituyentes de agua somera no se pudieron separar de otras constituyentes con frecuencias cercanas una de otra. Por ejemplo para poder separar las tercediurnas MO_3 y MK_3 es necesario una longitud de tiempo mayor a 13 días, por lo tanto el periodo de observaciones (15 días) está en el límite superior necesario para separar estos dos constituyentes. Otro ejemplo donde es necesaria una mayor longitud de la serie de tiempo es para el caso de los cuartidiurnos MN_4 y M_4 , los cuales necesitan de series de

tiempo con una longitud mayor a 27 días, mientras más cercana esté la frecuencia de cada constituyente, va a ser necesaria una mayor longitud de tiempo.

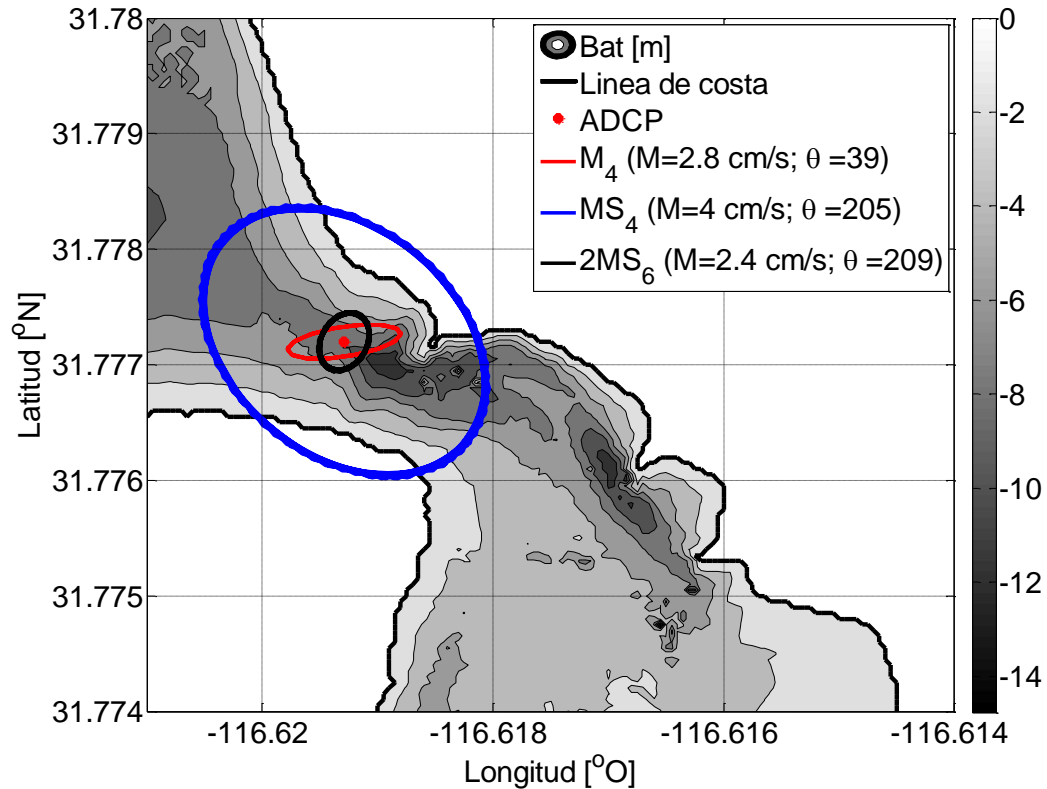


Figura 18. Elipses de variabilidad de la velocidad vertical promedio calculada para los principales constituyentes de mareas de agua somera, en el centro del canal de entrada del EPB. M es el eje mayor mientras que θ es la fase.

En las Tablas 4 y 5 se presentan las amplitudes de los principales constituyentes de agua somera, terciarios (MO_3 , MK_3), cuartidarios (M_4 , MS_4) y sextidarios ($2MS_6$), observados en las dos estaciones de medición dentro del EPB. Existe una amplificación en los constituyentes MO_3 y $2MS_6$, siendo esta última la que más se amplifica, de 0.5 cm en la boca a 1.3 cm en la cabeza.

Tabla 4. Amplitudes y fases de cada constituyente de agua somera (alta frecuencia) con sus errores asociados para la serie de tiempo de nivel del agua en la boca del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|------------------------|---------------------|------------------|----------------------|-------------|----------------------|-----|
| MO₃ | 0.1192421 | 1.4 | 0.3 | 214 | 14 | 17 |
| MK₃ | 0.1222921 | 1.1 | 0.3 | 270 | 18 | 12 |
| M₄ | 0.1610228 | 0.7 | 0.1 | 78 | 10 | 36 |
| MS₄ | 0.1638447 | 0.9 | 0.1 | 78 | 8 | 41 |
| 2MS₆ | 0.2443561 | 0.5 | 0.1 | 191 | 14 | 13 |

Tabla 5. Lo mismo que en Tabla 4, pero para la serie en la cabeza del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|------------------------|---------------------|------------------|----------------------|-------------|----------------------|-----|
| MO₃ | 0.1192421 | 1.8 | 0.4 | 258 | 14 | 18 |
| MK₃ | 0.122292 | 0.7 | 0.5 | 330 | 34 | 2.3 |
| M₄ | 0.1610228 | 0.9 | 0.2 | 5 | 12 | 30 |
| MS₄ | 0.1638447 | 0.9 | 0.2 | 19 | 13 | 20 |
| 2MS₆ | 0.2443561 | 1.3 | 0.3 | 172 | 13 | 20 |

En las Tablas 6 y 7 se muestran las amplitudes de los principales constituyentes de agua somera (MO_3 , MK_3 , M_4 , MS_4 y $2MS_6$) obtenidos a partir del análisis armónico realizado a las series obtenidas a partir del modelo numérico, el cual fue forzado por las amplitudes de los constituyentes principales (M_2 , K_1 , O_1 y S_2). Observamos un aumento en la amplitud de todos los constituyentes. Por ejemplo, el constituyente terciario MK_3 presentó una amplitud de 0.5 cm en la boca, mientras que en la cabeza su amplitud fue de 8.6 cm, lo que nos indica que existe una posible generación de mareas de agua somera de alta frecuencia dentro del EPB.

Tabla 6. Amplitudes y fases de cada constituyente calculadas a partir de las series numéricas en la boca del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|---------------------|---|------------|
| MO_3 | 0.1192421 | 0.3 | 0 | 255 | 5 | 150 |
| MK_3 | 0.1222921 | 0.5 | 0 | 303.2 | 3.5 | 280 |
| M_4 | 0.1610228 | 0.7 | 0 | 129.9 | 1.7 | 1300 |
| MS_4 | 0.1638447 | 0.6 | 0 | 113.9 | 2.3 | 620 |
| $2MS_6$ | 0.2443561 | 0.3 | 0 | 186.5 | 5.8 | 140 |

Tabla 7. Amplitudes y fases de cada constituyente calculadas a partir de las series numéricas en la cabeza del EPB.

| Constituyente | Frecuencia [cph] | Amplitud [cm] | δ Amp [cm] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|---------------------|---|------------|
| MO₃ | 0.1192421 | 5.9 | 0.5 | 43.8 | 4.6 | 140 |
| MK₃ | 0.1222921 | 8.6 | 0.5 | 107.2 | 3.3 | 290 |
| M₄ | 0.1610228 | 7.7 | 0.3 | 292.8 | 2 | 760 |
| MS₄ | 0.1638447 | 6.2 | 0.2 | 285.1 | 2.6 | 700 |
| 2MS₆ | 0.2443561 | 1.2 | 0.2 | 262.5 | 10.3 | 26 |

Graficamos la variación espacial a lo largo del EPB de la amplitud para cada una de las mareas de agua somera (Figura 19). Se observó que el constituyente M₄ presentó la mayor amplitud hasta el punto 17, donde ocurre el cambio abrupto de profundidad produciendo un incremento significativo en la amplitud de la mayoría de los constituyentes. Después del punto 17 el constituyente que presentó la mayor amplitud fue el tercediurno MK₃, con amplitudes superiores a 8 cm. Al igual que en las bajas frecuencias, existe el incremento en el punto 17 que se da por un cambio abrupto de profundidad.

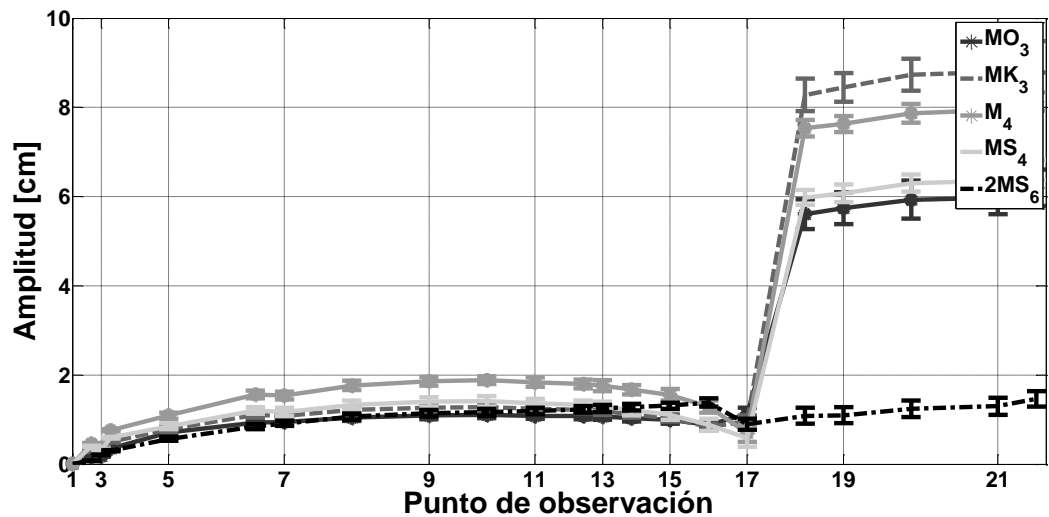


Figura 19. Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de mareas de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico.

A continuación se presentan, en las Tablas 7 y 9, los parámetros de las elipses de cada constituyente calculadas a partir del análisis armónico realizado en los mismos puntos de observación que las dos tablas anteriores (serie de datos del modelo numérico en la boca y la cabeza del EPB). Se observó un incremento del eje mayor en la mayoría de los constituyentes, con excepción del sextidiurno $2MS_6$ que disminuye de 1.4 a 0.8 cm/s. El constituyente que presentó el mayor incremento de eje mayor fue el tercediurno MO_3 con un incremento de 3.2 cm/s a 6.4 cm/s, un incremento de aproximadamente 3.2 cm/s.

Tabla 8. Parámetros de las elipses correspondientes a la serie de tiempo del modelo numérico de velocidades promediadas verticalmente en el punto de observación correspondiente a la boca del EPB.

| Constituyente | M [cm/s] | δM [cm/s] | m [cm/s] | δm [cm/s] | Φ [°] | $\delta \Phi$ [°] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|------------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|---------------|----------------------|-------------|----------------------|-----|
| MO₃ | 3.2 | 0.2 | 0.6 | 0 | 143.4 | 5.2 | 113 | 4.8 | 160 |
| MK₃ | 4.3 | 0.2 | -0.1 | 0 | 148.1 | 3.5 | 156.9 | 3.2 | 330 |
| M₄ | 3.4 | 0.2 | -0.7 | 0 | 158 | 3.3 | 344 | 2.9 | 390 |
| MS₄ | 3.1 | 0.2 | -0.7 | 0 | 155.1 | 4.5 | 354 | 3.8 | 210 |
| 2MS₆ | 1.4 | 0.1 | 0 | 0 | 127.1 | 4.6 | 314.5 | 4.6 | 130 |

Tabla 9. Lo mismo que en Tabla 8, pero para el punto de observación correspondiente a la cabeza del EPB.

| Constituyente | M [cm/s] | δM [cm/s] | m [cm/s] | δm [cm/s] | Φ [°] | $\delta \Phi$ [°] | Fase [o] | δ Fase [o] | SNR |
|------------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|---------------|----------------------|-------------|----------------------|-----|
| MO₃ | 6.4 | 0.5 | 0.2 | 0 | 124 | 3.8 | 101.6 | 4.5 | 140 |
| MK₃ | 7 | 0.5 | 0.3 | 0 | 123.8 | 3 | 133.1 | 3.8 | 180 |
| M₄ | 4.6 | 0.2 | 0.2 | 0 | 124.3 | 3 | 343.1 | 2.8 | 370 |
| MS₄ | 4.2 | 0.2 | 0.2 | 0 | 124.9 | 3 | 348.5 | 3.7 | 320 |
| 2MS₆ | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0 | 128.6 | 9.2 | 271.2 | 11.5 | 24 |

Graficamos la variación espacial de las amplitudes del eje mayor a lo largo del EPB (Figura 20). Al igual que en los constituyentes de baja frecuencia, se observó un punto donde el eje mayor alcanza sus valores máximos. Por ejemplo, para el tercediurno MK_3 , que es el que presentó el valor máximo, de aproximadamente 2 cm/s en el punto 11 se incrementó a más de 16 cm/s en el punto 17. Esto indica que éste es un punto de generación de mareas de agua somera, tanto de baja frecuencia como de alta frecuencia.

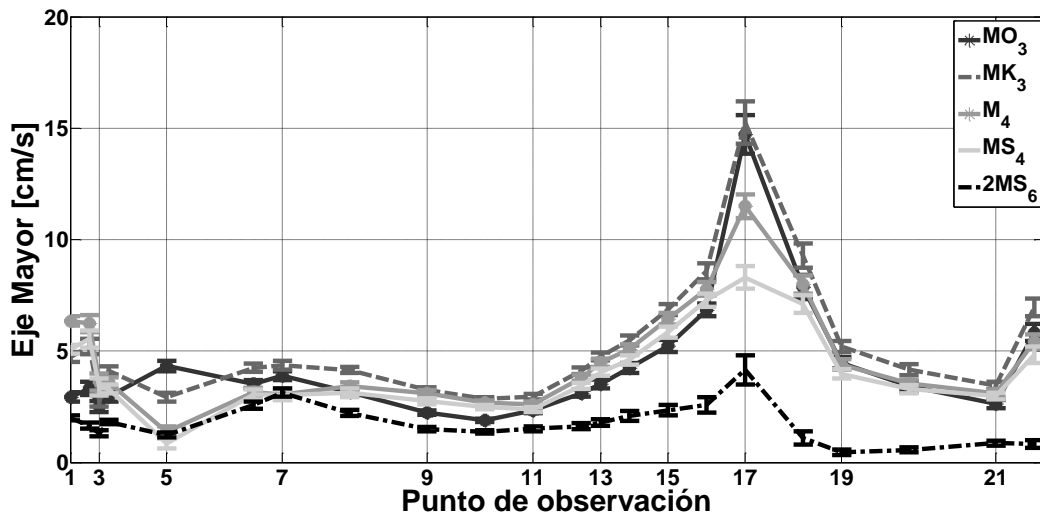


Figura 20. Variación espacial del eje mayor de cada constituyente de mareas de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico.

3.3.2 Baja frecuencia

Oscilaciones catorcenales sinódicas (MS_f) presentaron mayor amplitud en comparación con las oscilaciones catorcenales declinacionales (M_f). En cuanto a la variación espacial (Figura 21), se observó que la amplitud en ambas oscilaciones catorcenales tiene una amplificación muy marcada del punto de observación 17 al 18, similar a las altas frecuencias. La oscilación MS_f presentó un aumento de la amplitud en este punto de 1.7 a 7 cm y se mantiene en estos niveles en las estaciones posteriores.

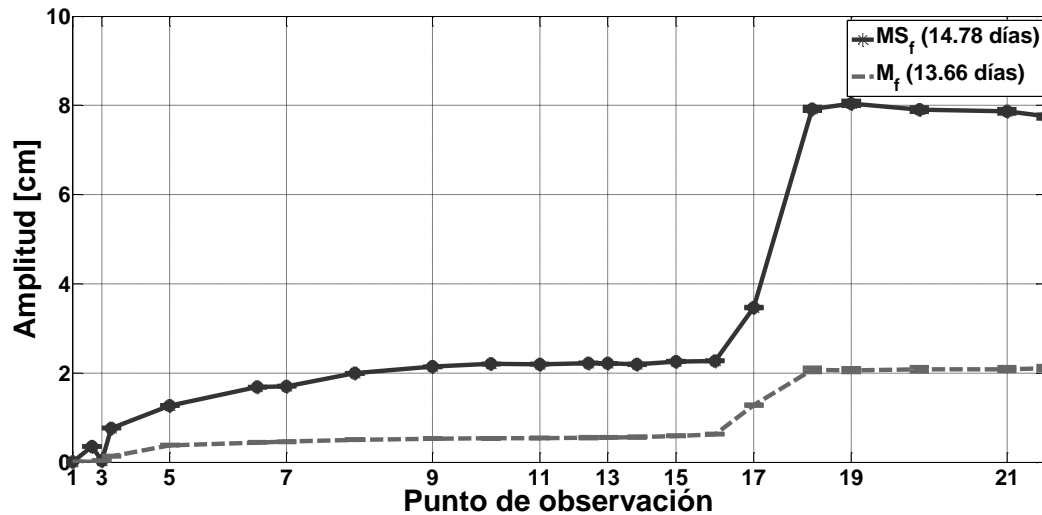


Figura 21. Variación espacial de la amplitud de cada oscilación catorcenal a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico.

Obtuvimos los parámetros de las elipses en cada punto de observación (Figura 22) y reportamos a continuación los valores del eje mayor en cada punto. Se observó que las magnitudes del eje mayor de la oscilación catorcenal (MS_f) fueron mayores en comparación con la oscilación declinacional (M_f). Existe un punto donde las magnitudes incrementan considerablemente, de aproximadamente 5 cm/s en el punto 16 a ~14 cm/s en el punto 17. En el siguiente punto (18) la magnitud del eje mayor disminuye hasta ser cercana a cero.

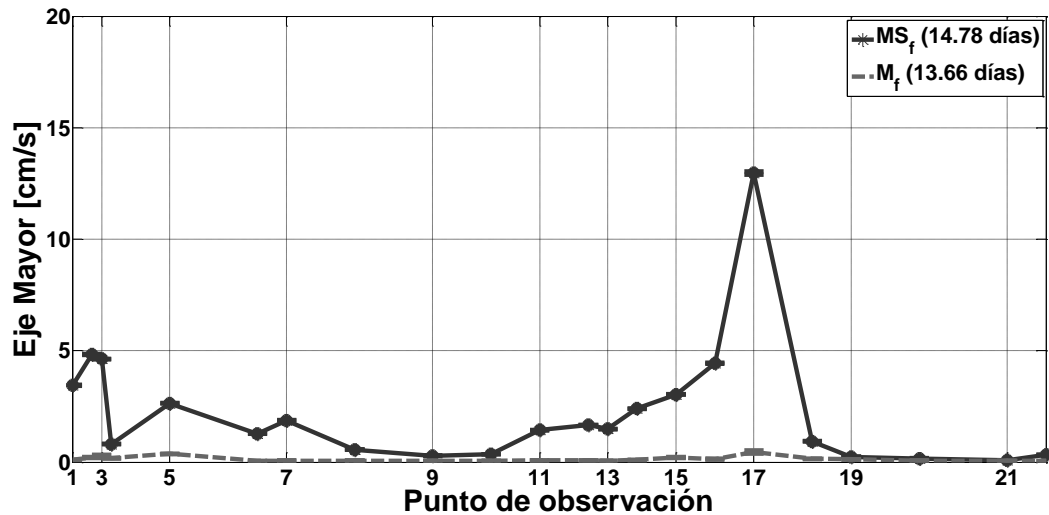


Figura 22. Variación espacial del eje mayor de cada oscilación catorcena a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico.

Al igual que en las altas frecuencias, en el punto 17 es donde se generan las oscilaciones catorcenas, por la disminución de la profundidad de 1.5 m. En el punto 17 es donde existe un incremento en la energía cinética, la cual pasa a ser energía potencial a partir del punto 18, generando como consecuencia el incremento en la amplitud en estos puntos.

3.4 Experimento con fondo plano

Debido a que la generación de mareas de agua somera puede atribuirse también a la curvatura del sistema (Pugh, 1996), es válido pensar que la generación que observamos sea debida a la curvatura que existe en el EPB en el punto 19. Para poder descartar la posibilidad de que la curvatura genera las mareas de agua somera que observamos, realizamos un experimento numérico en el que el fondo del estero fuera constante, en el caso de que aun con fondo constante se observara la misma amplificación de la amplitud, sería probable que la curvatura sea la causante de la generación. Sin embargo, si la variación longitudinal no presentase algún cambio notable significaría que la variación del fondo es la generadora de mareas de agua

somera. Se utilizó un valor constante de 3.5 cm ya que este valor corresponde a la profundidad del canal antes del cambio de profundidad.

Encontramos que la distribución longitudinal de la magnitud de las amplitudes para cada uno de los constituyentes principales (Figura 23) no mostró atenuación ni amplificación a lo largo del EPB. Observamos que el constituyente semidiurno M_2 presentó una mayor amplitud (70 cm) en comparación a los otros constituyentes.

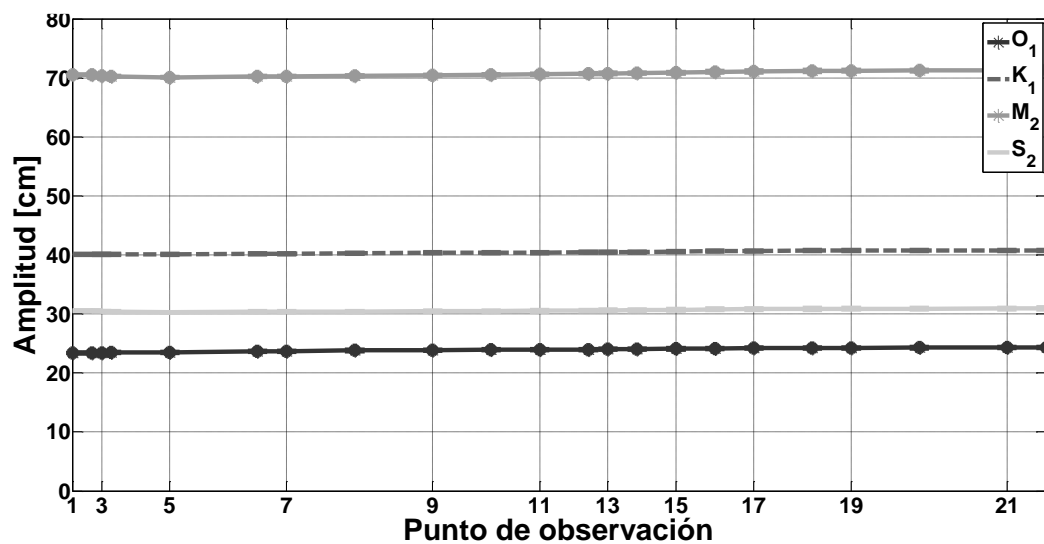


Figura 23. Amplitud de los principales constituyentes observada a lo largo del EPB con el modelo numérico con una profundidad constante de 3.5 m.

Sin embargo, la magnitud del eje mayor de cada uno de estos constituyentes presenta variaciones (Figura 24), las cuales son debidas a la forma de las paredes laterales del canal. Esto se observó del punto 6 al punto 7 por ejemplo, en esta zona el canal se estrecha y después del punto 7 vuelve a incrementar el ancho.

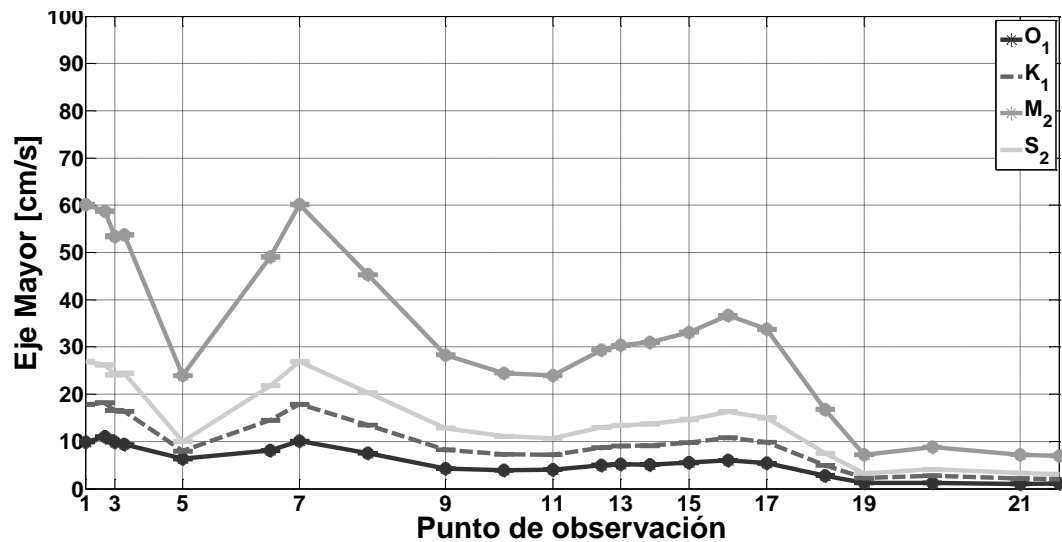


Figura 24. Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para los principales constituyentes. . Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m.

Para las mareas de agua somera de alta frecuencia observamos un ligero incremento en la amplitud (Figura 25) que llega a ser de hasta 3 cm aproximadamente, este incremento en la amplitud es de esperarse, ya que a pesar de que el fondo fue constante, el sistema seguía siendo de agua somera. Sin embargo, a diferencia del experimento con un fondo real (que varía), no se observó la zona de máxima amplificación ni en el estrechamiento del canal ni con la presencia de curvatura.

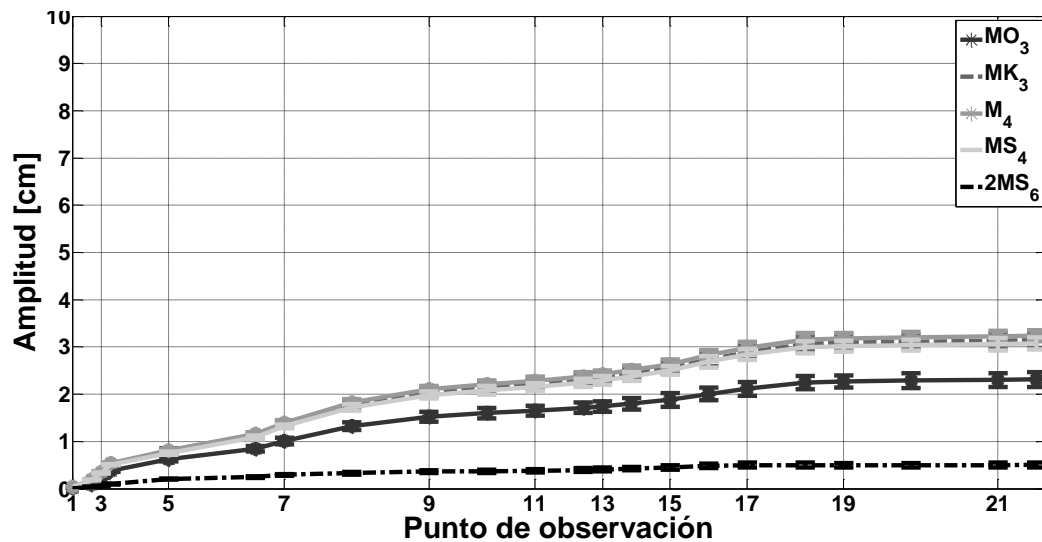


Figura 25. Variación de la amplitud a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de alta frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m.

En cuanto a las variaciones de las magnitudes del eje mayor (Figura 26), se observó que los valores se desvanecen de la boca hacia la cabeza del EPB, sin embargo no se observó el máximo de amplificación en el punto 17 ni en puntos posteriores. Al igual que en las frecuencias mareales (Figura 24), existió un ligero incremento del punto 6 al 7, el cual fue debido posiblemente al estrechamiento del canal y es un indicio de que en el término en la derecha de la ecuación (19), $ku|u|$ es el generador.

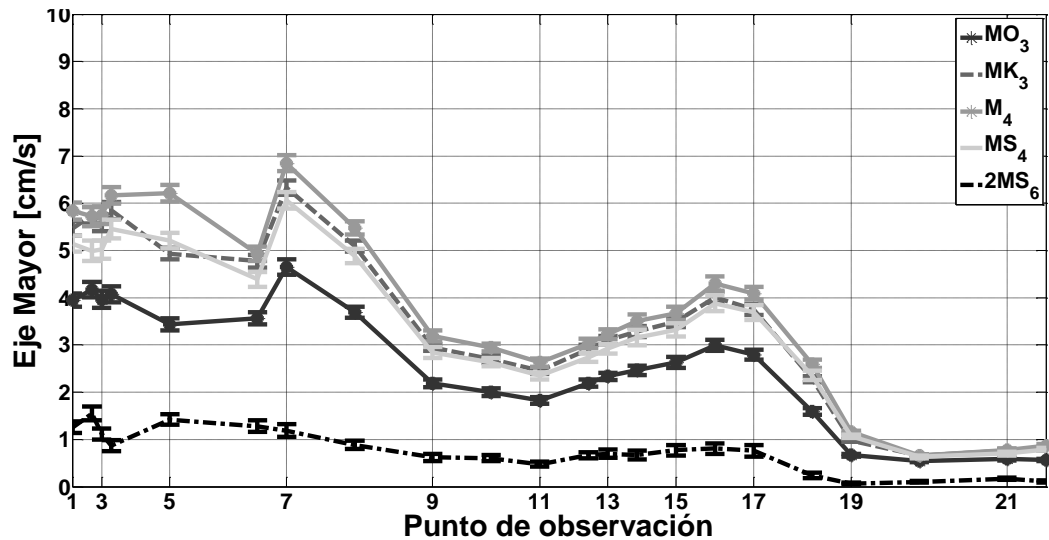


Figura 26. Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de alta frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 metros.

Finalmente, para las oscilaciones catorcenales, M_f y MS_f (Figura 27), observamos que prácticamente no existió una generación de estas, ya que las amplitudes que se observaron fueron de magnitudes considerablemente pequeñas (menos de 0.4 cm).

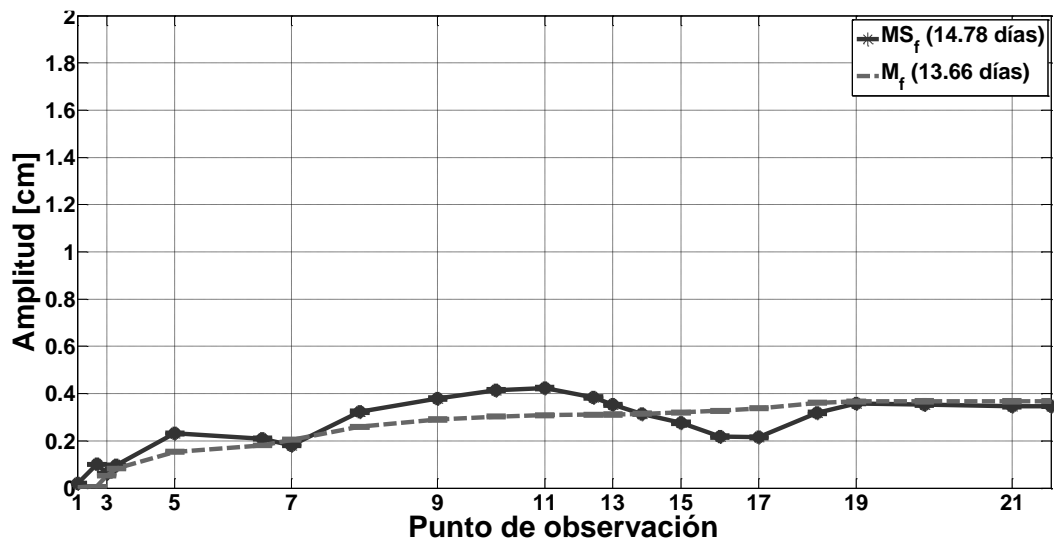


Figura 27. Variación de la amplitud a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de baja frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 m. Notar que a diferencia de las figuras pasadas el rango del eje vertical va de 0 a 2 centímetros de amplitud.

En cuanto a las variaciones del eje mayor de las elipses (Figura 28), observamos un incremento en la magnitud del punto 4 al punto 5, esto fue posiblemente debido al efecto de curvatura ya que entre estos dos puntos el canal presenta una curvatura, cambiando de orientación sureste hacia orientación suroeste. En cuanto a la amplificación observada en el punto 17 para el caso de profundidad real, en este experimento con profundidad constante no se observó ninguna amplificación en dicho punto, corroborando la conclusión de que en este punto se dio una generación de mareas de agua somera de baja frecuencia.

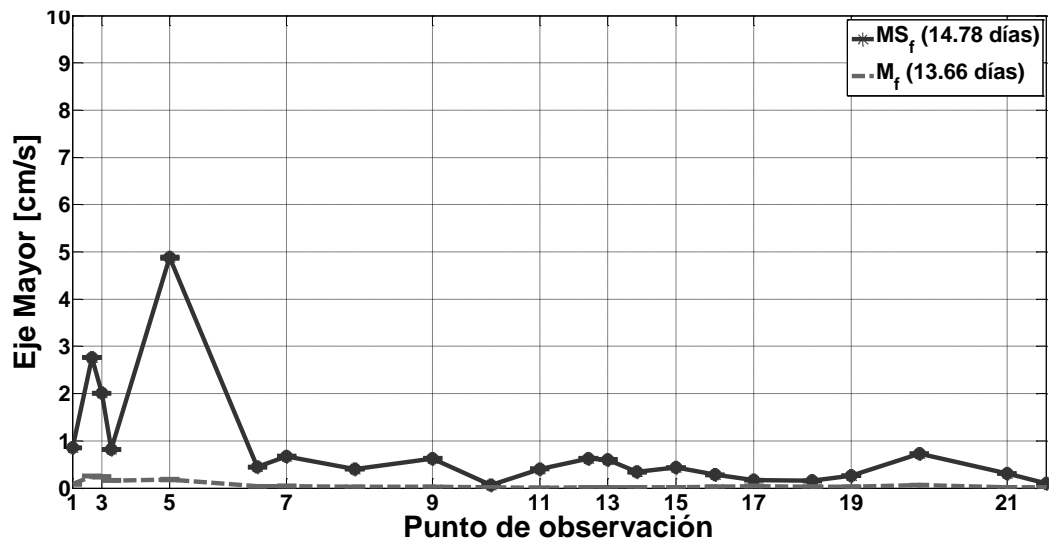


Figura 28. Variación del eje mayor a lo largo de los distintos puntos de observación para las mareas de agua somera de baja frecuencia. Experimento numérico realizado con fondo constante de 3.5 metros.

3.5 Experimento en un canal sin curvatura (rectangular)

Siguiendo la idea de la sección anterior, se realizó un experimento con un EPB rectangular, o sin curvatura. Para esto se modificó la frontera del modelo en la sección que estaba orientada hacia el sureste por una sección que siguiera orientada hacia el suroeste y con la misma longitud de ~3 km (Figura 29).

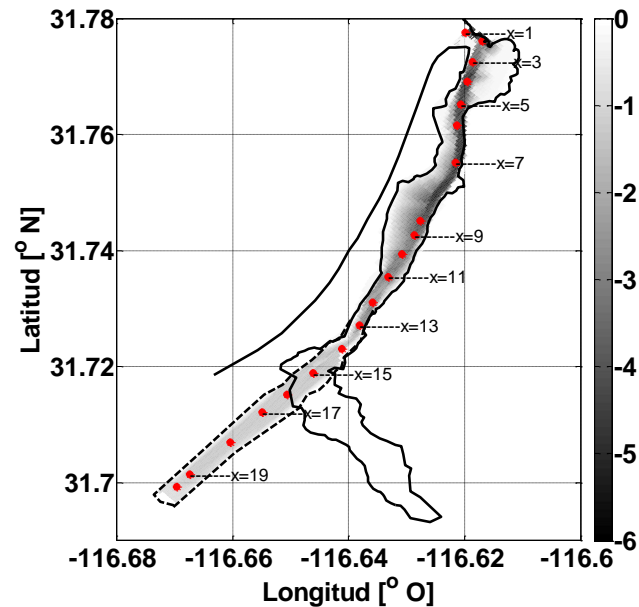


Figura 29. Batimetría que se generó artificialmente para el experimento en un canal sin curvatura, la línea continua corresponde a la línea de costa real y la línea punteada corresponde a la línea de costa para la sección artificial que se utilizó en este experimento. En escala de grises se representa la profundidad en metros y los puntos rojos son las localizaciones de los nuevos puntos de observación.

Ya que se cambió morfología del canal, tuvimos la necesidad de cambiar la malla numérica del modelo y los puntos de observación, ya que éstos están referenciados a las coordenadas de los puntos de malla. En la Figura 30 se muestra las dimensiones de la nueva malla utilizada.

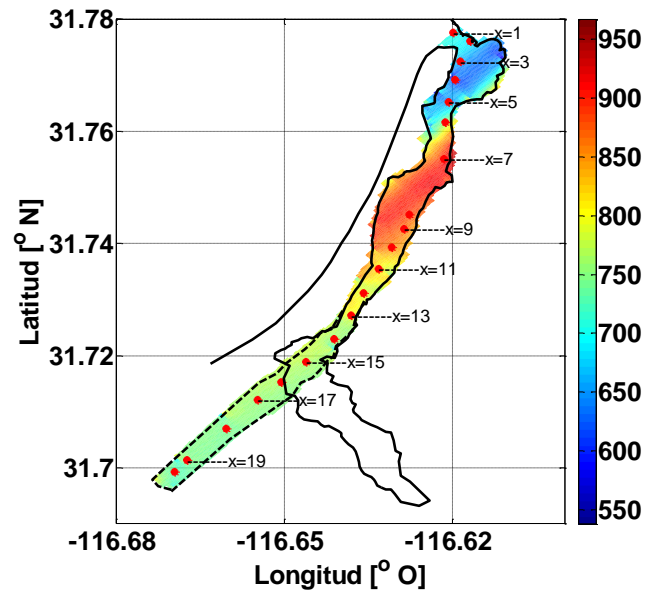


Figura 30. Dimensiones de la nueva malla que se utilizó, en contornos de colores se muestra el valor del área de cada celda de malla en m².

A continuación mostraremos el mismo tipo de gráficas que la sección anterior, recordando que las etiquetas de los puntos de observación han cambiado. Para este experimento el cambio abrupto de profundidad se encuentra aproximadamente entre los puntos 13 y 14 (Figura 30). Para la propagación de los constituyentes diurnos y semidiurnos (Figura 31) se observó la misma atenuación de la boca a la cabeza. Sin embargo, la magnitud de esta atenuación resultó ser ligeramente menor, ya que para el experimento con la geometría real del estero el constituyente M₂ se atenuó de 70 cm a menos de 50 centímetros aproximadamente, mientras que en el experimento sin curvatura la atenuación se da hasta los 50 cm de amplitud. A pesar de esto se volvió a observar un punto máximo de atenuación en el cambio abrupto de profundidad.

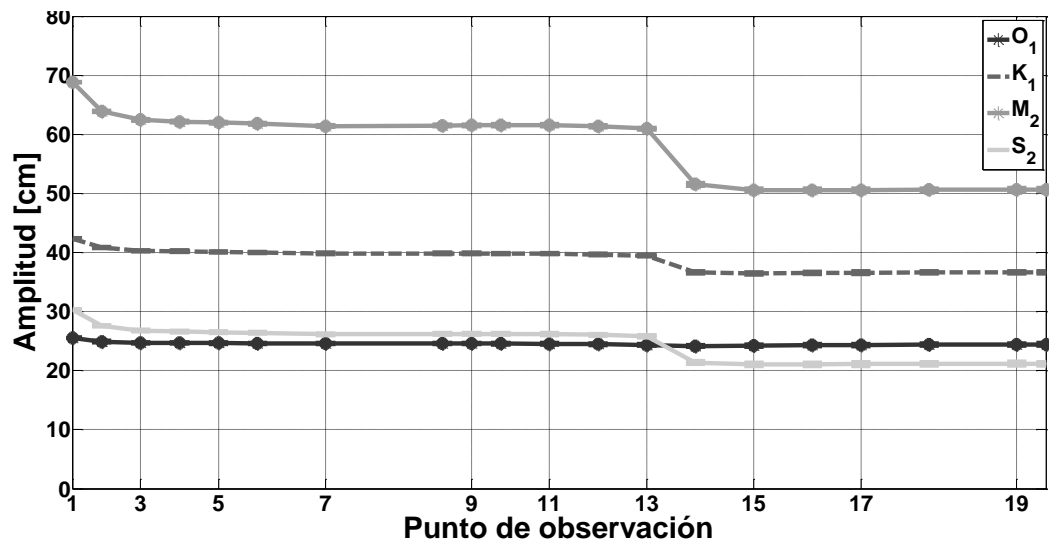


Figura 31. Variación a lo largo del canal de la amplitud de los principales constituyentes. Para un canal rectangular.

Para la distribución de las magnitudes del eje mayor (Figura 32), observamos que existen tres puntos donde la magnitud es máxima, los primeros dos puntos son por el estrechamiento del canal, mientras que el tercero se dio por el cambio de profundidad, debido a que este tercer punto de mayor magnitud no se observa en el experimento con fondo constante.

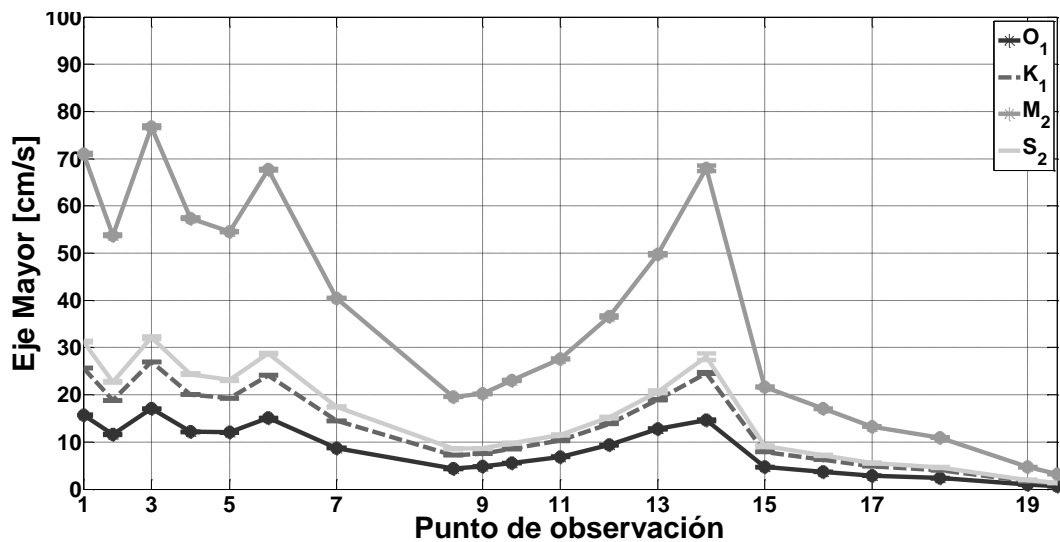


Figura 32. Variación a lo largo del canal de la magnitud del eje mayor de las elipses de variabilidad de los principales constituyentes. Para un canal rectangular.

En las altas frecuencias se observó el mismo comportamiento que en el caso de un canal con geometría real con la excepción que en el extremo artificial la amplitud fue ligeramente mayor (~ 2 cm mayor). Esto nos indica que aún sin curvatura existe este máximo de amplificación que no se observa en el experimento con fondo constante.

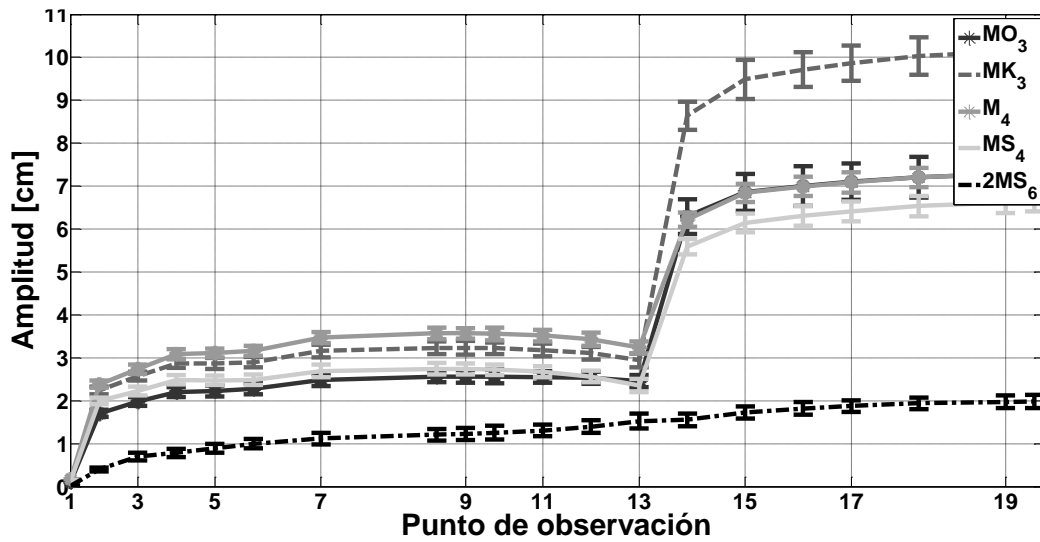


Figura 33. Lo mismo que en Figura 31, pero para las mareas de agua somera de alta frecuencia.

La variación del eje mayor (Figura 34) fue similar al caso de un canal con curvatura y fondo variable (caso real), la única diferencia se observó de nuevo en la magnitud de los valores observados en el punto de máxima amplificación. En este experimento se observaron valores del eje mayor de aproximadamente 19 cm/s, mientras que en el caso real se observaron valores aproximadamente de 14 cm/s.

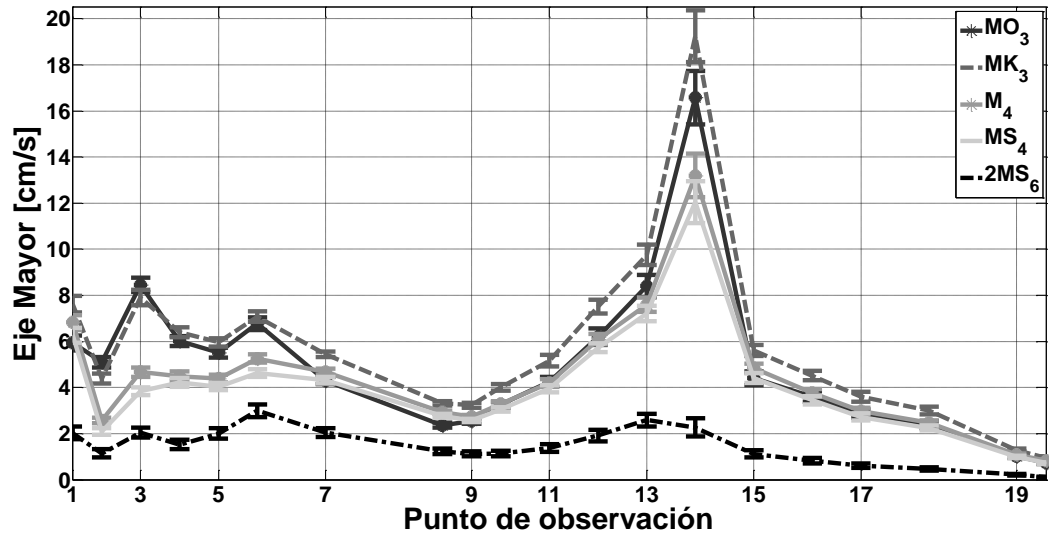


Figura 34. Lo mismo que en Figura 32, pero para mareas de agua somera de alta frecuencia.

En las bajas frecuencias es donde posiblemente existe la mayor diferencia al caso real. Primero, del punto de observación 1 al 2 (Figura 35) existe un máximo de amplificación el cual puede ser debido a que el nuevo punto de observación 2 se localiza en otro cambio de profundidad ya que está muy cercano a la línea de costa. Segundo, aunque el punto de máxima amplificación se sigue dando en el cambio de profundidad (punto 13 al 14) esta amplificación es aproximadamente 3 cm menor que en el caso real. Esto nos indica que la curvatura no afecta el punto de generación de mareas de agua somera, sin embargo la curvatura sí modifica la magnitud de la amplificación, porque sin curvatura la amplificación es menor; podemos inferir que la contribución de la curvatura es incrementar las magnitudes de las amplitudes.

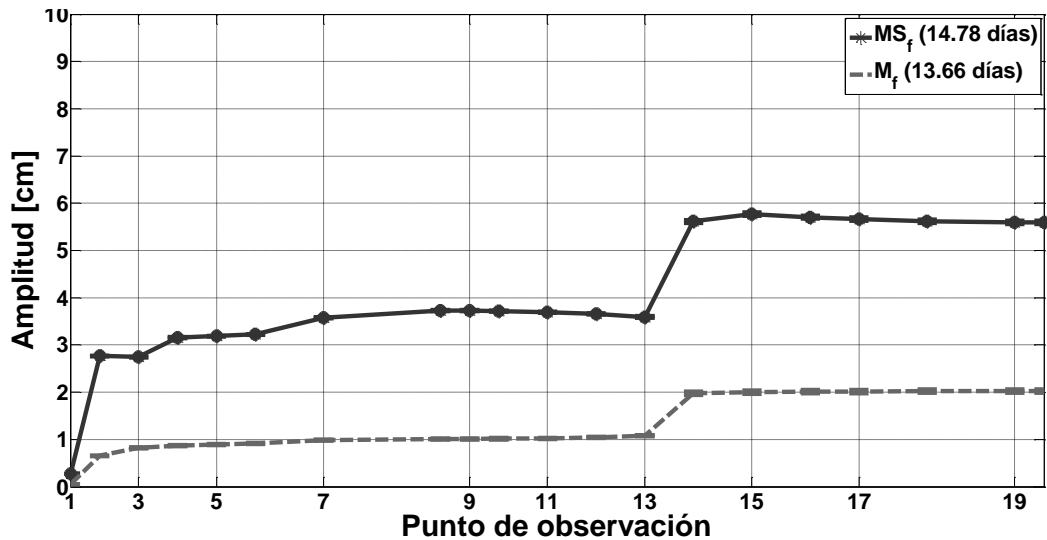


Figura 35. Lo mismo que en Figura 31, pero para mareas de agua somera de baja frecuencia.

Los valores del eje mayor (Figura 36) confirman lo que se menciona en el párrafo anterior, ya que estas variaciones fueron iguales que en el caso real, sin embargo las magnitudes de dichas variaciones fueron significativamente diferentes, siendo menores en este experimento (aproximadamente 4 veces menores). Por lo tanto, se confirma la misma idea de que la curvatura no es la generadora del punto de máxima amplificación, sin embargo sí influye en las magnitudes.

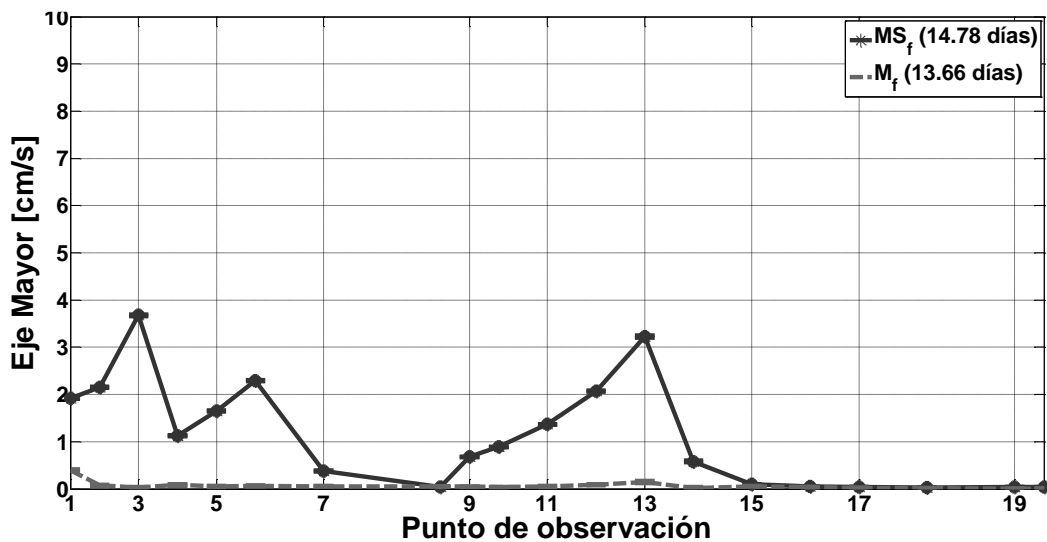


Figura 36. Lo mismo que en Figura 32, pero para mareas de agua somera de baja frecuencia. Notar que la escala del eje vertical cambió.

4. Discusión

4.1 Resultados del modelo numérico de los principales constituyentes

Al igual que para las mareas de agua somera, obtuvimos las variaciones a lo largo del EPB de la amplitud de cada uno de los constituyentes principales (Figura 37). También observamos que después del punto de observación 17 existe una máxima atenuación, sin embargo esta atenuación fue menor para el constituyente O_1 . Esto puede ser debido a que el coeficiente de rugosidad de Manning (0.025) utilizado para el experimento no es el ideal para este constituyente, basándonos en la Figura 7.

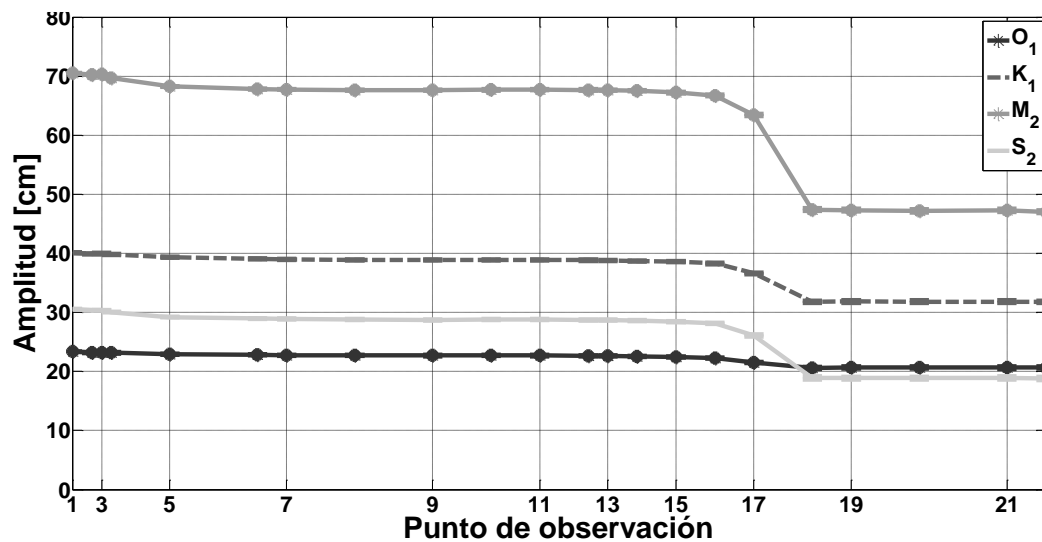


Figura 37. Variación espacial de la amplitud de los constituyentes principales.

A pesar de que se observaron los mismos desfases que en las observaciones y en el modelo analítico, el desfase obtenido a partir de los resultados del modelo numérico (Figura 38) fue sobreestimado en comparación al desfase calculado a partir de las observaciones de nivel del agua.

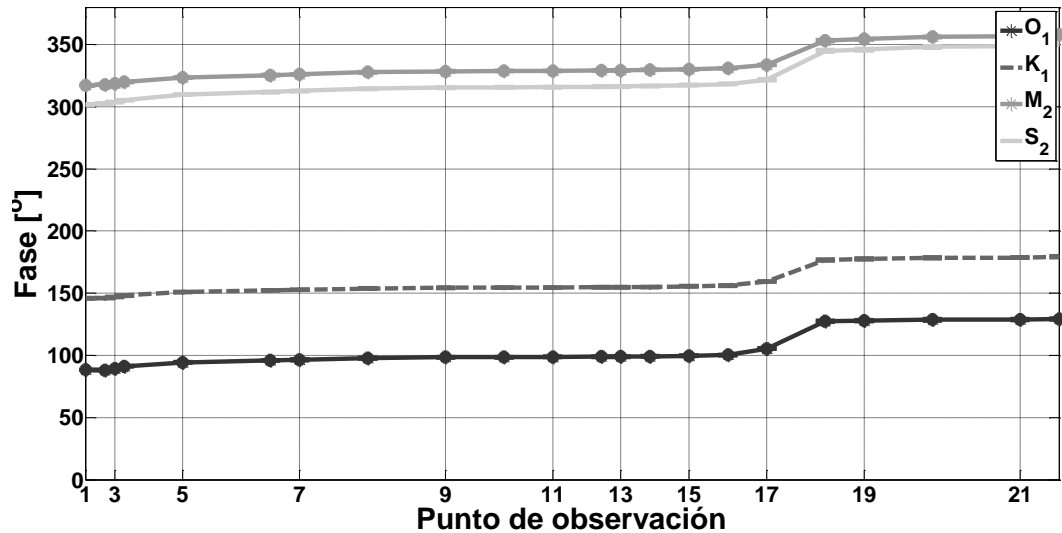


Figura 38. Variación espacial de la fase de los constituyentes principales.

4.2 Constituyentes N_2 , MN_4 , M_m

Debido a que el objetivo principal de este trabajo está enfocado en lagunas costeras con un forzamiento tipo mixto con predominancia semidiurna, los resultados principales que se presentaron en la sección de resultados del modelo numérico fueron obtenidos a partir de forzar el modelo numérico únicamente con los cuatro principales constituyentes astronómicos (M_2 , S_2 , O_1 y K_1). Por esto es de esperarse, como se planteó en la hipótesis, que los constituyentes de mareas de agua somera que se generarán son los que resultan de la interacción de M_2 con los otros tres constituyentes; por ejemplo, de la interacción de los semidiurnos lunares y solares resultan los constituyentes MS_4 y MS_f (Pugh, 1996). Entonces, si incluimos otro constituyente, como el semidiurno N_2 , esperamos que se van a generar constituyentes de alta y baja frecuencia resultado de la interacción entre M_2 y N_2 ; por ejemplo el cuartidiurno MN_4 y una oscilación mensual M_m . Para corroborarlo realizamos un experimento similar al mostrado en la sección de resultados con la diferencia de que incluimos el constituyente semidiurno N_2 en el forzamiento del modelo Delft3D.

Se observó en la Figura 39 que la variación a lo largo del sistema de la amplitud del constituyente cuartidurno, resultado de la interacción entre M_2 y N_2 (MN_4), tiene el mismo comportamiento que las otras constituyentes de agua somera de alta frecuencia. Debido a que la amplitud de N_2 (~19 cm) es de menor magnitud incluso que los constituyentes astronómicos diurnos, el constituyente de agua somera MN_4 es menor que el resto a excepción del sextidurno $2MS_6$. Ya que este experimento tiene otro forzamiento, los resultados obtenidos validan el resto de los experimentos numéricos.

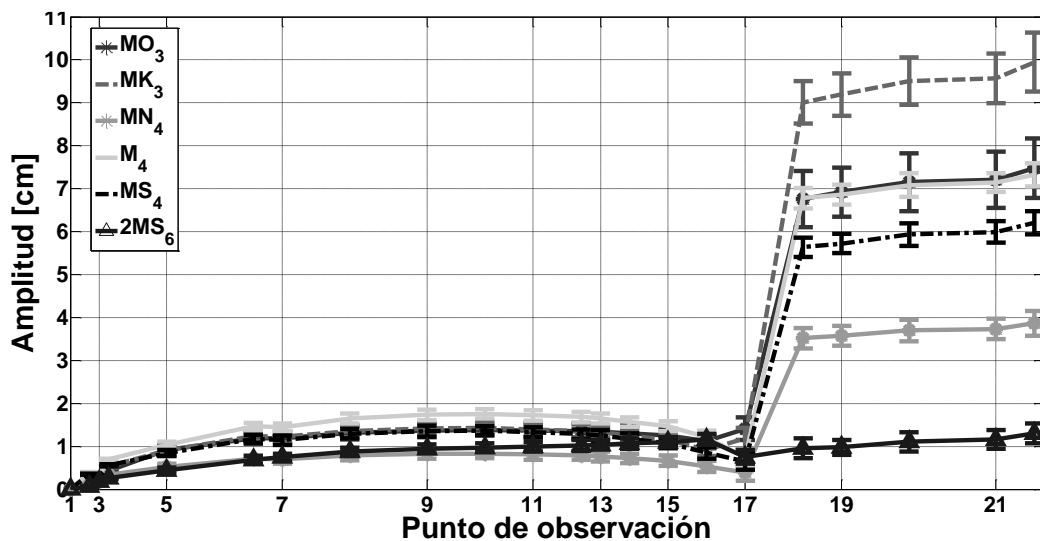


Figura 39. Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de agua somera de alta frecuencia a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico con un forzamiento que adicionalmente incluye N_2 .

En las bajas frecuencias se observó la presencia de la oscilación mensual con frecuencia M_m y ésta se propagó de la misma forma que la oscilación catorcenal MS_i . Se puede observar que la amplitud de esta oscilación es mayor que la oscilación catorcenal declinacional a lo largo de todo el sistema. Al igual que las oscilaciones catorcenales, la mensual responde al cambio de la profundidad con una máxima amplificación en el punto de observación 17.

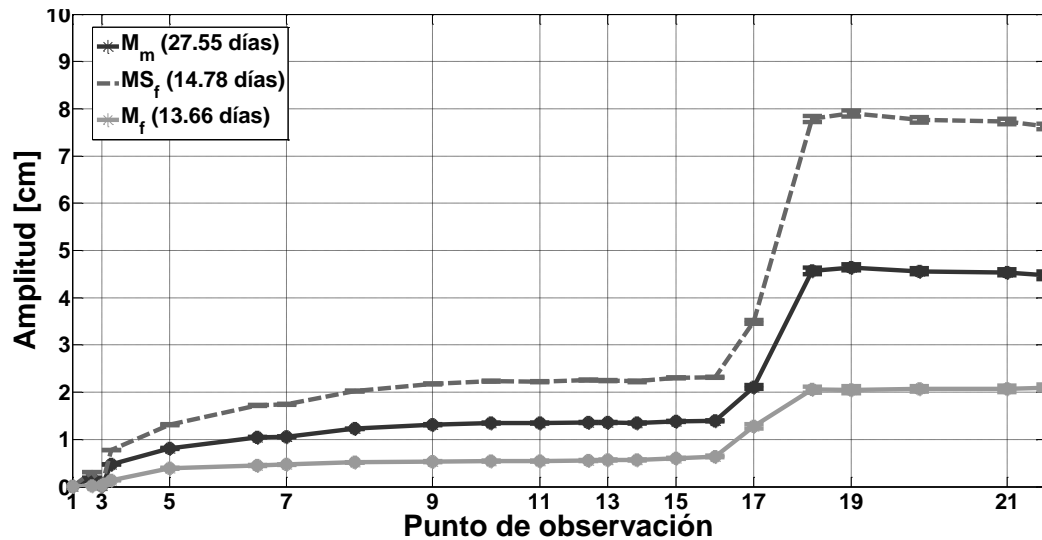


Figura 40. Variación espacial de la amplitud de cada constituyente de agua somera de baja frecuencia, a lo largo del EPB a partir de los datos del modelo numérico con un forzamiento que adicionalmente incluye N_2 .

4.3 Limitaciones de los modelos

Ambos modelos, analítico y numérico, reproducen las atenuaciones observadas, sin embargo existe una sobreestimación en los desfases para cada constituyente. Por ejemplo, en el modelo analítico la mayor diferencia se observa con el constituyente diurno K_1 el cual según las observaciones presenta un desfase de aproximadamente 10 ± 4 grados y el modelo analítico nos indica un desfase de aproximadamente 25 grados. En contraste, el modelo numérico presenta un desfase de aproximadamente 30 grados, ambos modelos indicaron la existencia del desfase. Estas diferencias pueden ser debidas a una limitación que existe en ambos modelos por considerar un sistema de densidad homogénea. Ésta es una limitación ya que, si bien no existe una estratificación vertical dentro de la laguna, existe la presencia de estratificación lateral que ya ha sido reportada en trabajos anteriores dentro del EPB (Pritchard *et al.*, 1978, Álvarez-Borrego *et al.*, 1984).

También es importante recordar que para las simulaciones numéricas se utilizó únicamente un valor del parámetro de rugosidad de Manning (0.025) el cual fue elegido

ya que presentaba mínimas diferencias al momento de calibrar, sin embargo hay que notar que con este valor las frecuencias diurnas en particular mostraron la mayor diferencia. Posiblemente una forma de minimizar estas diferencias y con esto mejorar la calibración del modelo, sea utilizar un valor de Manning que varíe para cada constituyente armónica, así como variar el valor de Manning en el espacio. Sin embargo, las diferencias que se notaron para este experimento fueron mínimas (diferencia promedio de -0.38 cm) y creemos que no son una limitante que altere drásticamente los resultados finales.

4.4 Balance longitudinal

Realizando una comparación de órdenes de magnitud en la ecuación horizontal de momentum para la componente a lo largo del canal del modelo analítico lineal, obtenemos que la magnitud de los parámetros adimensionales en el modelo analítico (f , α , κ y δ) nos indican que el gradiente de presión y el término friccional son los dominantes en la ecuación horizontal, longitudinal de momentum:

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} - f\alpha v_0 = -\frac{1}{\kappa^2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Por ejemplo, en el caso del constituyente semidiurno lunar (M_2), las componentes de la velocidad (u y v) se consideran de orden de magnitud 1, el valor del parámetro de Coriolis (f) fue de 0.54, el valor de α fue igual a 0.072 (utilizando un ancho $B^*=600$ m y una longitud $L^*=8300$ m, valores típicos del EPB), el valor de κ fue igual a 0.178 y el valor de δ fue de 3.86. Considerando la aceleración local con orden de magnitud igual a uno, el orden de magnitud del término asociado a la rotación de la Tierra fue de 10^{-2} ,

mientras que los parámetros asociados a los términos del gradiente de presión y a la fricción presentaron un orden de magnitud 10^1 :

$$\frac{1}{\kappa^2} \frac{\partial \eta_0}{\partial x} = \frac{\delta^2}{2} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}, \quad (17)$$

Por lo tanto, con base en los órdenes de magnitud, el balance longitudinal en las ecuaciones de momentum es entre el gradiente de presión y el término friccional [ecuación (17)].

4.4.1 Comprobación del balance longitudinal con el modelo numérico

Como ya se mencionó, el modelo analítico lineal sugirió un balance longitudinal entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de fricción (ecuación 17). Hill (1994) utiliza este balance, expresado de otra forma [ecuación (18)], para explicar la generación de una oscilación friccional catorcena, menciona que en un canal con forma de escalón (Figura 41) se genera un “*set-up*” friccional debido a un gradiente de presión que va de la boca a la cabeza de la laguna.

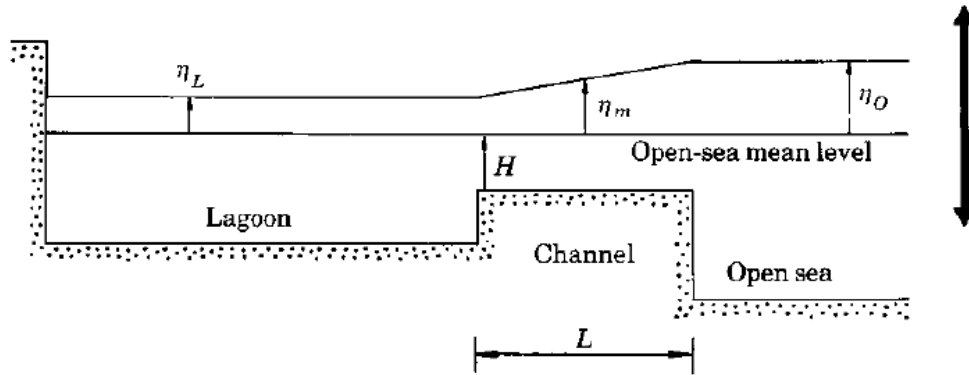


Figura 41. Geometría de una laguna conectada a mar abierto por un canal somero friccional (Hill, 1993).

En la imagen donde comparamos el nivel del agua observado en la boca con el de la cabeza (Figura 9), se observó que existe una marcada diferencia en la amplitud de la marea, siendo mayor en la boca. Esta diferencia fue mayor en los periodos de marea viva y por lo tanto aproximadamente cada catorce días existe un gradiente de presión el cual genera el “*set-up*” friccional induciendo una oscilación catorcenal. Hill (1993) expresa el balance longitudinal de la siguiente forma:

$$g \frac{\eta_0 - \eta_L}{L} = \frac{ku|u|}{(H + \eta_m)}, \quad (18)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, η_0 es la elevación del nivel del agua antes de entrar al canal, η_L es la elevación dentro de la laguna, L es la longitud del escalón del canal, k es un coeficiente de difusión sin dimensiones, u es la velocidad promediada en la vertical, H es la profundidad del canal y η_m se define de la forma:

$$\eta_m = \frac{(\eta_0 + \eta_L)}{2}. \quad (19)$$

Por el modelo numérico podemos conocer cada una de las variables expresadas en la ecuación (19) y por lo tanto podemos calcular el término asociado al gradiente de presión y el término asociado a la fricción, para poder comparar ambos términos y comprobar si existe el balance. El valor de L lo elegimos considerando que en nuestro caso de estudio el cambio de profundidad se da desde el punto 17 hasta el punto 21 (ver la Figura 4), una distancia aproximada de 2 km, utilizamos como η_0 la elevación observada en el punto 16 y η_L la elevación observada en el punto 21. Se utilizó la velocidad del punto de observación 17 ya que es aquí donde inicia el cambio de profundidad. Por último para el coeficiente k se utilizó un valor de 0.01.

En la Figura 42 se muestra una gráfica de dispersión, el eje horizontal corresponde al término friccional, mientras que el eje vertical corresponde al término del gradiente de presión. La correlación (R) de ambas series es igual a 0.99, mientras que el error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) es igual a 2.5×10^{-4} . Estos valores de correlación y de error nos indican que entre los dos términos existe una alta correlación, por lo tanto ambos términos son iguales y el balance entre los dos se cumple.

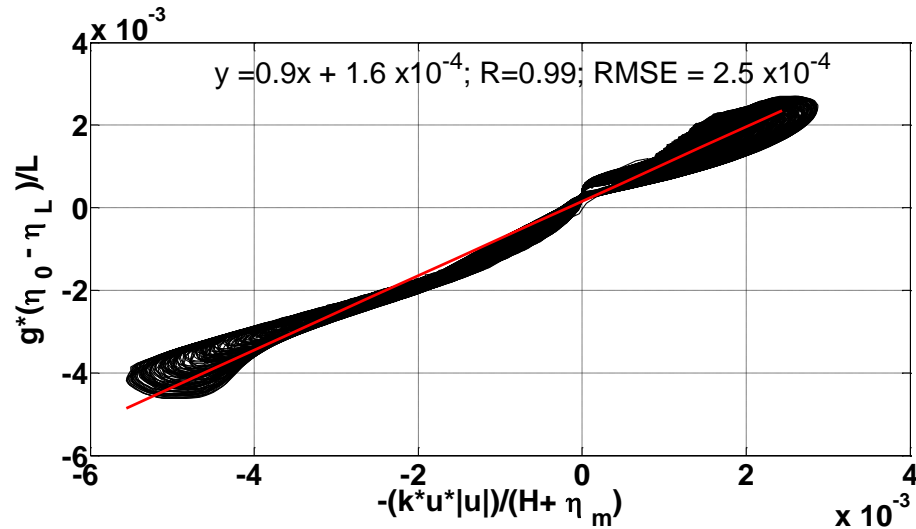


Figura 42. Diagrama de dispersión entre el término del gradiente de presión (ordenada) y el término de fricción (abscisas) en la parte superior de la gráfica se presenta la ecuación de la recta correspondiente al ajuste lineal, también se presenta el valor del coeficiente de correlación (R) y el valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés).

Por lo tanto, el balance entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de fricción queda comprobado. La principal consecuencia de que este balance exista es la generación de mareas de agua somera, tanto de alta frecuencia como de baja frecuencia. En alta frecuencia observamos que los constituyentes que se generan son las que resultan de la interacción del constituyente semidiurno lunar (M_2) con los otros constituyentes principales (O_1 , K_1 y S_2). En la baja frecuencia se observó una generación de una oscilación friccional catorcena sinódica y una oscilación mensual. Ambos grupos de frecuencias generadas fueron consecuencia de tener un forzamiento tipo mixto con predominancia semidiurna.

5. Conclusión y trabajo a futuro

Explicamos los cambios en la propagación de los principales constituyentes de la marea (diurnos y semidiurnos) utilizando como herramienta principal el modelo analítico, el cual nos indicó el balance longitudinal del sistema y lo caracterizó como un sistema altamente friccional; en palabras simples, nos otorgó un “diagnóstico” del sistema el cual fue corroborado utilizando el modelo numérico. La propagación de las ondas diurnas y semidiurnas en el EPB está forzada principalmente por los procesos friccionales con el fondo, atenuando las amplitudes y generando desfases. Encontramos que la consecuencia de un forzamiento de tipo mixto-semidiurno en una laguna costera con un rango mesomareal fue la generación de mareas de agua somera de alta frecuencia (MK_3 , MO_3 , M_4 , MS_4 y $2MS_6$) y de baja frecuencia (MS_r). Cuando el forzamiento incluye el constituyente semidiurno N_2 se da la generación adicional de MN_4 y de una oscilación mensual (M_m). Es importante mencionar que la principal contribución de este trabajo fue encontrar el punto de generación de las componentes no lineales de la marea y poder explicar físicamente qué es lo que generó mareas de agua somera. La zona de generación fue localizada en un cambio abrupto de profundidad donde el canal pasa de 3.5 m a 2 m, aproximadamente. Ya que se demostró que el balance longitudinal fue entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de fricción, se puede concluir que la fricción con el fondo fue la responsable de la generación de las mareas de agua somera, mientras que la contribución de la curvatura (geometría) del canal fue incrementar las magnitudes de la amplitud observada después del punto de máxima amplificación.

Este trabajo sirve como base para estudiar otras forzantes que contribuyen en la dinámica del EPB, siendo el más importante el forzamiento por marea. En un trabajo a futuro sería interesante estudiar cómo interactúan los distintos forzantes, por ejemplo los flujos inducidos por viento y marea pueden ser afectadas por la generación de mareas de agua somera en presencia de estratificación. Adicionalmente, para el estudio de los procesos de circulación termohalina y mezcla dentro de la laguna, trabajo que se propone hacer en el futuro inmediato, sin duda las aportaciones de este trabajo representan una línea base.

Lista de referencias bibliográficas

- Aguilar-Rosas, R. (1982). *Identificación y Distribución De Las Algas Marinas Del Estero De Punta Banda, Baja California, México*. *Ciencias Marinas*, 8(1), 78-87.
- Álvarez-Borrego, S., Granados-Guzmán, A. and Beltrán Félix, J.L. (1984). *Temperatura y salinidad en el Estero de Punta Banda: 1982–1983*. *Ciencias Marinas*, 10(3): 105–108
- Davies, J. L., and Moses, C. A. (1964). *A morphogenic approach to world shorelines*.
- Defant, A. (1958). Ebb and flow; the tides of earth, air, and water. *Ann Arbor, University of Michigan Press [1958], 1*.
- Dworak J. A. and Gómez-Valdés J., (2002) *Tide-induced residual current in a coastal lagoon of the Gulf of California*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(1), 99-109.
- Farreras, S.F. (2006) *Hidrodinámica de Lagunas Costeras México*, CONACyT, 177 pp.
- Fernandes E. H., Mariño-Tapia I., Dyer K. R. and Möller O. O., (2004). *The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary*. *Ocean Dynamics*, 54, 348-359.
- Filonov, A., Lavín, M. F., Ladah, L. B., and Tereshchenko, I. (2014). Spatial variability of internal waves in an open bay with a narrow steep shelf in the Pacific off NW Mexico. *Continental Shelf Research*, 78, 1-15.
- Fishman, M. J., and Friedman, L. C. (1989). Techniques of water-resources investigations of the United States Geological Survey. *Chapter A1: Methods for Determination of Inorganic Substances in Water and Fluvial Sediments, TWRI*, 5-A1.
- Gallo, M. N., and Vinzon, S. B. (2005). Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, 55(5-6), 441-448.
- Godin, G. (1988). Tides. *CICESE, ENSENADA (MEXICO)*, 1988, 290.
- Henrie, K., and Valle-Levinson, A. (2014). Subtidal variability in water levels inside a subtropical estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119 (11), 7483-7492.
- Hill, A. E. (1994). Fortnightly tides in a lagoon with variable choking. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38(4), 423-434.
- Kjerfve, B. (1986). Comparative oceanography of coastal lagoons. *Estuarine variability*, 6381.

- Kjerfve, B. and Magill, K.E., (1989). *Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons*. *Marine Geology*, 88, 187-199.
- LeBlond, P. H. (1979). Forced fortnightly tides in shallow rivers. *Atmosphere-ocean*, 17(3), 253-264.
- Lilly, J. M. (2014), JLAB: Matlab freeware for data analysis, Version 1.0, Recuperado de: <http://www.jmlilly.net/software.html>.
- Ortiz, M., Huerta-Tamayo, L., and Hinojosa, A. (2003). *Transporte de sedimento por tracción de marea en el Estero de Punta Banda, Baja California, México*. *GEOS*, 23(3), 283-294.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.
- Pugh, D.T. (1996) *Tides, surges and mean sea-level* Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd, 486pp.
- Pritchard, D. W., De-La-Paz-Vela, R., Cabrera-Muro, H., Farreras-Sanz, S., and Morales, E. (1978). *Hidrografía Física Del Estero De Punta Banda Parte 1: Análisis de datos*. *Ciencias Marinas*, 5(2), 1-23.
- Sumich, J. L., and Morrissey, J. F. (2004). *Introduction to the biology of marine life*. Jones & Bartlett Learning.
- Tenorio-Fernandez, L., Gomez-Valdes, J., Marino-Tapia, I., Enriquez, C., Valle-Levinson, A., and Parra, S. M. (2016). Tidal dynamics in a frictionally dominated tropical lagoon. *Continental Shelf Research*, 114, 16-28.
- Winant, C. D. (2007). *Three-Dimensional Tidal Flow in an Elongated, Rotating Basin*. *Journal of Physical Oceanography*, 37, 2345-2362.
- Zarzuelo, C., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., López-Ruiz, A., and Losada, M. Á. (2015). *Hydrodynamics response to planned human interventions in a highly altered embayment: The example of the Bay of Cádiz (Spain)*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 167, 75-85.