

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



---

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

---

**Cambios seculares en las componentes armónicas de la  
marea en la Bahía de San Francisco ocasionados por la  
fiebre del oro y la construcción de grandes presas**

Tesis

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

Presenta:

**Isaac Rodríguez Padilla**

Ensenada, Baja California, México  
2015

Tesis defendida por  
**Isaac Rodríguez Padilla**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Modesto Ortiz Figueroa**

Director del Comité

**Dr. David Alberto Rivas Camargo**

**Dr. José Gómez Valdés**

**Dr. José Luis Ochoa de la Torre**

---

**Dr. Francisco Javier Ocampo Torres**

Coordinador del Posgrado en  
Oceanografía Física

---

**Dr. Jesús Favela Vara**

Director de Estudios de Posgrado

*Isaac Rodríguez Padilla © 2015*

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

Resumen de la tesis que presenta Isaac Rodríguez Padilla como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

**Cambios seculares en las componentes armónicas de la marea en la Bahía de San Francisco ocasionados por la fiebre del oro y la construcción de grandes presas**

Resumen aprobado por:



---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
Director de tesis

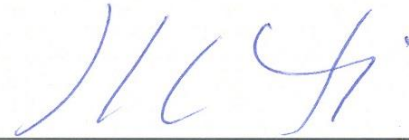
Con el objetivo de explicar los cambios seculares observados en las componentes de marea en la Bahía de San Francisco, se analizaron registros horarios de nivel del mar de un mareógrafo situado cerca de la boca de la bahía para el periodo de 1901 a 2012. Parte del análisis consistió en extraer la amplitud y fase de la componente  $M_2$  por medio de la demodulación compleja a las observaciones horarias de nivel del mar empleando como filtro pasa bajas una ventana de 8760 horas. Además, se utilizó el potencial de la marea de equilibrio para remover la señal nodal de 18.6 años. Los resultados obtenidos indican una tendencia positiva en la amplitud de la componente  $M_2$ , con un aumento aproximado de 4 cm en un lapso de 111 años y un correspondiente adelanto en la fase de alrededor de 17 minutos respecto al año 1901. Asimismo, se encontró una correlación inversa entre las variaciones anuales de la amplitud de la marea y el caudal de los ríos que desembocan en la bahía. Por otra parte, los resultados obtenidos de un modelo numérico hidrodinámico de dos capas, revelan que los cambios seculares en la marea se encuentran relacionados de manera consistente con la evolución morfológica de una barra de arena submarina situada en las afueras de la Bahía de San Francisco. Dicha barra de arena alcanzó su menor profundidad durante la denominada "Fiebre del Oro" (1848-1884), cuando grandes cantidades de escombros y sedimento fueron depositados al interior del estuario. En 1933, tras entrar en vigor el "Proyecto del Valle Central", se dio inicio a la construcción de una cadena de grandes presas, lo que representó una reducción sustancial en el aporte de sedimento. Con el paso del tiempo, la disminución en el aporte de sedimento implicó mayor erosión, y consecuentemente mayores profundidades en la barra de arena. Este hecho explica el adelanto de la fase, así como el incremento a largo plazo de la amplitud de la componente  $M_2$  de marea.

Palabras clave: **Bahía de San Francisco, Componentes de marea, Cambios seculares**

Abstract of the thesis presented by Isaac Rodríguez Padilla as a partial requirement to obtain the Master in Science Degree with orientation in Physical Oceanography.

**Secular changes in the tidal constituents in San Francisco Bay originated by the California Gold Rush and major dam-buildings projects**

Abstract approved by:



---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
Thesis director

Hourly sea-level records for the time period of 1901 to 2012 at Fort Point tidal station in San Francisco Bay are analyzed in an attempt to find the origin of the secular changes found in the tidal constituents. Complex demodulation implemented with a low pass filter window of 8760 hours was employed to extract the amplitude and phase of the principal tidal constituent  $M_2$  as a function of time. The 18.6 year nodal signal was removed by using the tide potential of the equilibrium tide. The results show significant trends up to 4 cm in amplitude as well as phase shifts of 17 minutes per century. Moreover, yearly amplitude variations of  $M_2$  show to be inversely correlated to river flow discharge. On the other hand, the results of a simplified two-layer numerical hydrodynamic model indicate that long-term tide variations are directly related to the morphological evolution of a sandbank located outside the bay surrounding its entrance, acting as a hydraulic control for the whole bay. According to historical results, the sandbank reached its shallowest depth during the California Gold Rush (1848-1884), when mining debris together with large amounts of sediment were deposited into the estuary. After the Central Valley Water Project was approved (1933), many dams were built decreasing significantly the sediment supply. With the passage of time, the gradual loss of sedimentation also diminished the sandbank, increasing its depth. This fact explains the observed secular long-term advance of the tidal phase, as well as the increasing trend of the  $M_2$  amplitude.

**Keywords: San Francisco Bay, Secular changes, Tidal constituents**

## Dedicatoria

A mi novia y mejor amiga *Abril Yael Jiménez De Paz*. Te subiste al barco conmigo sin temerle a la tempestad y ahora le has dado rumbo a mi vida.

A mis dos seres de luz incondicionales, mis padres *Raúl Rodríguez Anda* y *Gpe. Yolanda Padilla Jiménez* que sembraron la semilla de la superación en mí. Este logro representa el primero de muchos más y se los debo a ustedes.

A mis hermanos *Josué Rodríguez Padilla* y *Eréndira Rodríguez Padilla* como muestra de que sí se puede y que siempre hay que ir hacia adelante; como diría mi viejo: “atrás ni para agarrar vuelo”.

Al resto de la familia, así como a mis amigos de mil batallas por depositar su confianza y creer en mí.

## Agradecimientos

A mi director de tesis, el Dr. Modesto Ortiz Figueroa quien sin duda merece el mérito de este trabajo. Agradezco infinitamente su disposición, paciencia, consejos, así como esa sencillez tan característica de él, para explicar y transmitir el conocimiento de una manera tan cautivante. Admiro su increíble capacidad para buscar y encontrar soluciones, pero sobre todo admiro su tremenda calidad de persona. Honor a quien honor merece.

A los miembros que formaron parte del comité de tesis: Dr. David Alberto Rivas Camargo, Dr. José Gómez Valdés y Dr. José Luis Ochoa de la Torre. Agradezco sus valiosos comentarios, observaciones y sugerencias que ayudaron a mejorar y enriquecer este trabajo.

A todos mis profesores y compañeros a lo largo de la maestría. Es increíble darse cuenta como uno puede aprender tanto en dos simples años.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por darme la oportunidad de haber formado parte de esta maravillosa institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), así como al Departamento de Oceanografía Física por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A todas las personas que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo.

## Tabla de contenido

	Página
<b>Resumen español</b> .....	ii
<b>Resumen inglés</b> .....	iii
<b>Dedicatorias</b> .....	iv
<b>Agradecimientos</b> .....	v
<b>Lista de Figuras</b> .....	viii
<b>Lista de Tablas</b> .....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción y antecedentes</b>	
1.1 Fiebre del oro.....	4
<b>Capítulo 2. Área de estudio y obtención de datos</b>	
2.1 Área de estudio.....	6
2.2 Datos.....	8
2.2.1 Observaciones de nivel del mar.....	8
2.2.2 Estimaciones de caudal de río.....	9
<b>Capítulo 3. Modelo numérico-hidrodinámico</b>	
3.1 Modelo de dos capas.....	10
3.1.1 Introducción.....	10
3.1.2 Ecuaciones del modelo.....	11

3.1.3 Batimetría y parámetros del modelo.....	13
3.1.4 Forzamientos y condiciones de frontera.....	15
3.2 Modelo barotrópico.....	17
<b>Capítulo 4. Análisis de los datos</b>	
4.1 Demodulación compleja.....	18
4.2 Relación entre la marea y el flujo neto del río.....	21
4.3 Simulación numérica del flujo del río y la marea.....	24
4.4 Cambios seculares en el espacio-fase.....	30
<b>Capítulo 5. Discusión</b>	
5.1 Interacción entre la descarga del delta Sacramento-San Joaquín y la marea (variaciones de periodo corto).....	36
5.2 Interacción entre la barra de arena submarina y la marea (variaciones de periodo largo; cambios seculares).....	36
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b>	
6 Conclusiones.....	38
<b>Lista de referencias bibliográficas.....</b>	<b>39</b>
<b>Apéndice</b>	
Demodulación compleja.....	43
Criterio de Rayleigh.....	44
Todas las componentes de marea se comportan igual.....	45



## Lista de figuras

Figura		Página
1	Bahías que componen en su conjunto a la Bahía de San Francisco. Se incluye además la posición geográfica del mareógrafo utilizado....	7
2	Estimaciones diarias de flujo neto de agua dulce (NDOI) que ingresa al interior de la Bahía de San Francisco para el periodo comprendido de 1956 a 2012.....	9
3	Esquema conceptual de la circulación estuarina. Figura modificada; <a href="http://www.geom4me.com">http://www.geom4me.com</a> .....	10
4	Batimetría de San Francisco con resolución espacial $dx=dy=450$ m...	14
5	Esquema que muestra los forzamientos externos y condiciones de frontera utilizados en el modelo numérico de dos capas.....	15
6	Calibración del modelo numérico con observaciones de nivel del mar en Fort Point, San Francisco.....	16
7	Espectro de amplitud para dos ciclos de marea (26/04/2011 – 25/05/2011). La subfigura es un acercamiento a las frecuencias que corresponden a las componentes de aguas someras.....	17
8	Amplitud y fase demoduladas para la frecuencia de la componente $M_2$ de marea, obtenidas a partir tanto de las observaciones del nivel del mar, como de la predicción de marea correspondiente.....	18
9	Admitancia y diferencia de fase en unidades de minutos de tiempo de la componente $M_2$ de la marea, con respecto a la amplitud y fase de la marea observada en el año 2011. Amplitud de referencia = 0.57 m.....	20
10	La imagen izquierda representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia de la componente $M_2$ con respecto a la amplitud de la marea observada en el año 2011 (0.57m). La imagen derecha representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento- San Joaquín y la diferencia de fase en unidades de minutos de tiempo de la componente $M_2$ de marea.....	22
11	La imagen izquierda representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia sin tendencia lineal de la componente $M_2$ de marea. La imagen derecha representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la diferencia de fase sin tendencia lineal de la componente $M_2$ de	

	marea.....	23
12	Correlación lineal y cuadrática entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia demodulada de la componente $M_2$ de marea. Amplitud de referencia = 0.57 m.....	24
13	Simulación numérica. La línea azul representa la componente $M_2$ de marea en ausencia de descarga de ríos, mientras que la línea roja representa la componente $M_2$ de marea en presencia de un aporte exagerado de agua dulce ( $18,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).....	25
14	Simulación del comportamiento de la admitancia y desfase de la componente $M_2$ de marea ante distintos flujos del río, mediante un modelo de dos capas y un modelo barotrópico.....	26
15	Correlación inversa entre el gasto del río (NDOI) y la admitancia de la componente $M_2$ . Amplitud de referencia = 0.57 m.....	27
16	Admitancia y desfase en unidades de minutos de tiempo de la componente $M_2$ calculadas para toda la Bahía de San Francisco con referencia al 2011.....	28
17	Esquema conceptual que ilustra la circulación estuarina en condiciones normales (figura de la izquierda) y en condiciones cuando la descarga del río aumenta (figura de la derecha). Ambas figuras muestran un corte transversal de la entrada de la bahía (debajo del puente del Golden Gate) con vista desde el exterior hacia el interior de la bahía. La capa azul corresponde al agua dulce de río que sale de la bahía y la capa amarilla corresponde al agua salada proveniente del Océano Pacífico que ingresa al estuario.....	29
18	Resultados del modelo de dos capas: flujo del río contra flujo de agua salada que entra al estuario de San Francisco a través de la capa inferior únicamente durante la pleamar.....	30
19	Localización de la barra de arena submarina que se sitúa en el exterior de la entrada de la Bahía de San Francisco.....	31
20	Admitancia y desfase en unidades de minutos de tiempo de la componente $M_2$ de marea. Se hace una simulación con la componente $M_2$ de marea contemplando una batimetría con la barra de arena 30% menos profunda y se compara contra otra simulación de la $M_2$ con una batimetría “actual” del 2010. No se toman en cuenta aportes por agua dulce.....	33
21	Admitancia y diferencia de fase en unidades de minutos de tiempo de la componente $M_2$ de marea con respecto al año 2011. La línea roja representa un ajuste lineal. Las cruces son resultado del modelo de dos capas e indican el porcentaje que se redujo la profundidad de	

	la barra de arena respecto a la batimetría del 2010.....	34
22	Observaciones de admitancia contra diferencia de fase de la componente $M_2$ correspondientes a los años 1956-2012 (línea azul; la línea negra representa su ajuste lineal y corresponde a los cambios seculares en la componente $M_2$ de marea). La línea roja y la línea morada son resultados obtenidos mediante el modelo de dos capas y el modelo barotrópico, respectivamente.....	35
23	Correlación cualitativa entre los cambios de fase observados en la componente $M_2$ de la marea en el estuario del Río Astoria, Oregon, y las fechas de construcción de grandes presas río arriba. Figura tomada de Ortiz (2007).....	37
24	La figura superior muestra el desfase de la correlación máxima que existe entre el nivel del mar y la predicción del 2011. La figura inferior muestra el desfase de la componente $M_2$ respecto al año 2011.....	45
25	La figura superior muestra la admitancia en bruto de la marea con respecto al pronóstico con base en el 2011. La figura inferior muestra la admitancia de la componente $M_2$ de la marea, con respecto a la amplitud del pronóstico de marea con base en el año 2011.....	46

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Características del mareógrafo.....	8

## Capítulo 1. Introducción y antecedentes

---

Dado que los movimientos relativos del Sol y la Luna se encuentran bien establecidos, las frecuencias de la marea astronómica en la Tierra se han calculado con la suficiente exactitud como para representar o modelar adecuadamente a la marea vertical como una superposición de ondas senoidales:

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\sigma_k t - \phi_k), \quad (1)$$

donde  $A_k$  representan las amplitudes,  $\phi_k$  las fases,  $N$  el número total de componentes armónicos y  $\sigma_k = \frac{2\pi}{T_k}$  las frecuencias de marea. Las “constantes armónicas”,  $A_k$  y  $\phi_k$  se obtienen mediante el análisis armónico de las observaciones del nivel del mar, analizando un año de datos horarios mediante el método de mínimos cuadrados, para posteriormente reconstruir la marea para años pasados o en su caso pronosticar la marea para un futuro inmediato o tan lejano como cientos de años.

Si bien las constantes armónicas debieran permanecer constantes con respecto al paso del tiempo (tal como su nombre lo refiere), registros históricos de nivel del mar de diversas partes del mundo han demostrado lo contrario, dejando en evidencia un aumento/disminución en la amplitud así como un adelanto/retraso en la fase. Más allá de considerar estas variaciones de largo plazo como consecuencia de cambios en la órbita de los astros, se deben tomar en cuenta otros procesos o factores físicos locales que pudieran involucrar a su vez alteración en las componentes armónicas de marea.

A través del continuo estudio de la marea, diversos autores han documentado variaciones significativas en las principales componentes armónicas de marea durante escalas de tiempo mayores a 18.6 años. El primero en notar dichos cambios fue Doodson (1924), quien analizó 40 años de registros de nivel del mar de los mareógrafos instalados en el Océano Índico por el Servicio Trigonométrico de la India a finales de los

años 1870's, concluyendo que estos cambios podían deberse a modificaciones en el relieve del fondo marino en la proximidad de los puertos.

Al paso del tiempo, Cartwright (1972) examinó registros históricos (1711-1716; 1864-1936) y recientes (1916-1936, 1960) de nivel del mar, afirmando que hay evidencia de cambios seculares en la marea en escalas de tiempo de siglos atribuidos a causas naturales, dejando abierta la pregunta si estos cambios son de origen puramente oceánicos o de alteraciones locales en la morfología costera. Por otra parte, Amin (1983; 1993) y Bowen (1972) concluyen que la variación de profundidad en la proximidad de los puertos es la responsable de los cambios en la amplitud y en la fase de la marea.

Cabe mencionar que las variaciones observadas en la marea no se limitan únicamente a ciertas estaciones en particular, sino que también ocurren a lo largo de grandes secciones de línea de costa. Estudios recientes como los de Ray (2006; 2009) no sólo mostraron incrementos en la amplitud de la componente  $M_2$  en el Golfo de Maine y en general para toda la costa noreste de los Estados Unidos, sino que también se observó una disminución significativa (0.1% al año) en la amplitud de la  $S_2$ . Por su parte, Jay (2009) describió variaciones seculares en estaciones mareográficas distribuidas a largo de las costas norte y sur del Pacífico con incrementos en amplitud del orden de 2% por siglo (0.02% por año) tanto en las componentes diurnas como semidiurnas.

De igual forma, se han llevado a cabo estudios regionales en la costa oeste europea (Araujo, 2006), en el Mar Caribe (Torres y Tsimplis, 2011), en bahías alemanas (Mudersbach, 2013), e incluso en mar abierto (Zaron y Jay, 2009), o a escalas cuasi-globales (Müller et al., 2011; Woodworth, 2010; Wetzel et al., 2014; Mawdsley et al., 2015).

Dar explicación a los procesos físicos responsables de las variaciones seculares ha sido una tarea ardua y compleja y aunque se han formulado diversas hipótesis al respecto, en ciertos casos las causas siguen permaneciendo inciertas. La explicación mayormente aceptada y en la que diversos autores coinciden, propone que los cambios

seculares surgen a consecuencia de modificaciones en la geomorfología costera, lo que a su vez genera diferencias en la fase y la magnitud de la marea observada (Pugh y Woodworth, 2014). Otros posibles mecanismos se resumen en trabajos previos e incluyen variaciones seculares a causa de cambios climáticos (Jay, 2009) o en respuesta a cambios en la estratificación del océano (Colosi y Munk, 2006), cambios en la profundidad de la columna de agua debido a variaciones en el promedio global de nivel del mar y/o por cambios isostáticos en la superficie terrestre (Flather et al., 2001; Müller et al., 2011; Pickering et al., 2012).

Asimismo, han surgido otras ideas y evidencias nuevas como la propuesta por Ortiz (2007), quién encontró una correlación cualitativa entre las fechas de construcción de presas y las variaciones abruptas o adelantos en la fase de la marea en la Bahía de San Francisco, California y en el estuario del Río Astoria en Oregon entre los años 1920 y 2005. Con base en la presunta correlación cualitativa entre los cambios de fase de la componente  $M_2$  y la construcción de presas, Ortiz (2007) sugiere que los cambios seculares de la marea se deben a la reducción en el caudal de los ríos.

En este trabajo se pretende dar explicación a los cambios seculares tanto en la amplitud como en la fase observados en la marea total (o en algunas componentes de marea) en la Bahía de San Francisco.

## 1.1 Fiebre del oro

El año 1848 dio comienzo a la denominada fiebre del oro en California, fenómeno social que atrajo una gran cantidad de inmigrantes tanto de Estados Unidos como de otros países a las cercanías de San Francisco en la búsqueda del preciado metal. Durante esta etapa San Francisco pasó de ser una aldea a convertirse en la ciudad más grande de la costa oeste, trayendo consigo efectos importantes como la construcción de caminos y escuelas, la introducción de nuevos medios de transporte, como el barco de vapor y el ferrocarril, el inicio de la agricultura e incluso la creación de un sistema legal y de gobierno como tal.

No obstante, la fiebre del oro también tuvo efectos negativos, consecuencia de las técnicas mal empleadas para la obtención del mismo. La necesidad de encontrar oro de otros lugares que no fueran del río y además poder hacerlo a gran escala introdujo a la minería hidráulica. La minería hidráulica consistió en lanzar “chorros” de agua a alta presión contra las laderas de la montaña para así erosionar la roca de forma masiva y desprender el mineral que posteriormente pudiera ser recolectado con mayor facilidad. Esta operación se llevó a cabo durante varios años y en torno a toda la Sierra Nevada, lo que implicó un alto impacto ambiental no sólo en la montaña sino también en los alrededores. Grandes cantidades de sedimento, escombros y otros contaminantes remanentes producto de la minería hidráulica fueron depositados en los ríos Sacramento y San Joaquín, que poco a poco con el tiempo se fueron transportando hacia el estuario de San Francisco, lo que resultó en problemas de navegación e inundación. No fue sino hasta el año 1884 que la corte estadounidense decidió tomar cartas en el asunto prohibiendo el uso de la minería hidráulica para la extracción del oro.

Otro momento clave en la historia de San Francisco se suscitó en la década de 1930 con la entrada en vigor del plan federal “Proyecto del Valle Central” para la gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos. Este proyecto dio inicio a la construcción en cadena de grandes presas en los principales tributarios de San Francisco incluyendo por supuesto los ríos Sacramento y San Joaquín. Mientras que los efectos de la minería



hidráulica significaron un notable incremento en el depósito de sedimento en la bahía, los efectos de la construcción de presas conllevaron a la retención paulatina de dicho sedimento. Gracias a las cartas batimétricas y sondeos históricos, se ha podido seguir de cerca la evolución y los cambios en los procesos de sedimentación y erosión en distintas partes de la bahía. Ejemplo de estos estudios son el de Jaffe et al. (1998) para la zona Norte de la bahía de San Francisco (Bahía de San Pablo), el de Fregoso et al. (2008) para la zona central de la bahía, Foxgrover et al. (2004) y Jaffe y Foxgrover (2006) para la zona Sur de la bahía, y recientemente el de Hanes y Barnard (2007) para la región cercana a la boca del estuario de San Francisco. Este último trabajo se enfoca en la formación y la evolución morfológica de las denominadas “ondas de arena” que se localizan a escasos kilómetros de la entrada de la bahía.

## Capítulo 2. Área de estudio y obtención de datos

---

### 2.1 Área de estudio

El estuario de San Francisco se localiza en la costa oeste de los Estados Unidos en el estado de California y se compone de una serie de bahías interconectadas entre sí (Bahía Suisin, Bahía San Pablo, Bahía central de San Francisco y Bahía Sur de San Francisco; ver figura 1) que en conjunto recibe el nombre de Bahía de San Francisco. Se cuentan algunas islas en su interior (isla Alcatraz, isla Ángel, isla Treasure e isla Yerba Buena) y mantiene solo una conexión permanente con el Océano Pacífico a través de una boca estrecha sobrevolada por el puente “Golden Gate”. Asimismo, la parte Norte de la bahía se comunica a través de un delta donde desembocan los ríos Sacramento y San Joaquín; estos dos ríos representan el mayor aporte de agua dulce hacia el interior de la bahía, con una contribución promedio anual de  $754 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (<http://www.water.ca.gov/dayflow/>).



**Figura 1. Bahías que componen en su conjunto a la Bahía de San Francisco. Se incluye además la posición geográfica del mareógrafo utilizado.**

La Bahía de San Francisco es considerada como uno de los estuarios más grandes y antropológicamente más alterados de Estados Unidos (Nichols et al., 1986), con una extensión territorial de 4,144 km<sup>2</sup> (U.S. Environmental Protection Agency, 2015). La mayor parte de la cuenca hidrológica presenta una batimetría somera con profundidad promedio de 6 m (referido al nivel de bajamar media inferior), así como una configuración compleja de canales angostos con profundidades entre los 10 y 20 m que se extienden predominantemente a lo largo del estuario. Las mayores profundidades (113 m) se localizan en la entrada de la bahía, en toda la región del estrecho que separa la península de San Francisco de la península de Marín, justo debajo de donde se encuentra el puente Golden Gate. La reducida boca del estuario genera intensas

corrientes de marea ( $2.5 \text{ ms}^{-1}$ ) que dragan y a su vez transportan sedimento hacia el exterior, formando uno de los canales naturales más profundos en el mundo (Hanes y Barnard, 2007). El régimen de marea es mixto con predominancia semidiurna y el rango de marea máximo es de 2.6 m.

## 2.2 Datos

Los datos que se utilizaron para el presente trabajo fueron los registros horarios de nivel del mar, las estimaciones diarias de caudal de río, y los datos de batimetría de la Bahía.

### 2.2.1 Observaciones de nivel del mar

Los registros de nivel del mar se obtuvieron a partir de la base de datos de la Universidad de Hawaii (UHSLC, por sus siglas en inglés) directamente del sitio web: <http://uhslc.soest.hawaii.edu>. La estación mareográfica de donde se obtuvieron los datos se ubica cerca del Golden Gate a 1.2 km al Este de Fort Point.

En la tabla 1 se especifica la posición geográfica, el número de identificación asignado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) y el periodo de registro de datos del mareógrafo. Los datos provinieron de distintos instrumentos de medición a medida en que los mareógrafos fueron evolucionando. Primeramente se obtuvieron de un mareógrafo mecánico estándar convencional de su época. Después, a partir de 1975 hubo una renovación en los equipos de medición cambiando a un mareógrafo de presión con registro analógico y digital (ADR). Finalmente, desde 1991 hasta la fecha, el mareógrafo que opera en el sitio es un Aquatrak con sensor de tipo acústico.

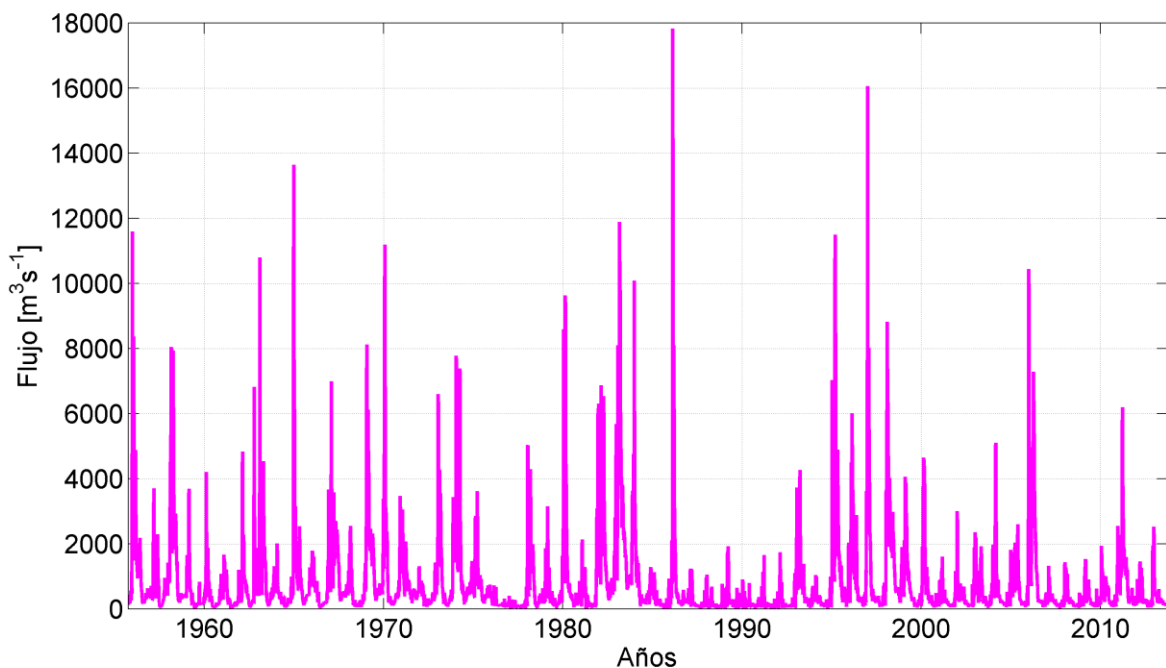
**Tabla 1. Características del mareógrafo.**

Área de estudio	NOAA; estación mareográfica	Coordenadas Geográficas	Periodo de registro de datos
San Francisco, CA	9414290	37°48.4'N y 122°27.9'O	1901-2012

## 2.2.2 Estimaciones de caudal de río

Para obtener un estimado del aporte diario de agua dulce que ingresa a la Bahía de San Francisco proveniente del delta Sacramento-San Joaquin, se recurrió al índice del flujo neto del río llamado *Net Delta Outflow Index* (NDOI por sus siglas en inglés), que es una salida del programa computacional “Dayflow”, desarrollado por el departamento de recursos hídricos de California. El NDOI además de tomar en cuenta la contribución de los ríos Sacramento y San Joaquín, considera también el aporte de agua dulce debido a la precipitación, deshielo y otros tributarios locales, así como el agua que no ingresa a la bahía y es destinada a la agricultura, la industria y a la demanda poblacional.

Considerando que el NDOI representa la mejor aproximación del flujo neto diario que ingresa a la bahía, se descargaron a través de la página web: <http://www.water.ca.gov/dayflow/output/> los datos de este índice para el periodo de 1956 a 2012 (figura 2).



**Figura 2. Estimaciones diarias de flujo neto de agua dulce (NDOI) que ingresa al interior de la Bahía de San Francisco para el periodo comprendido de 1956 a 2012.**

## Capítulo 3. Modelo numérico-hidrodinámico

---

### 3.1 Modelo de dos capas

#### 3.1.1 Introducción

La finalidad de trabajar con el modelo numérico hidrodinámico es la de obtener una aproximación de la distribución espacio-temporal de la elevación de la superficie libre y la velocidad de la corriente inducida por la marea. Ahora, la razón de optar por un modelo de dos capas es la de poder simular adecuadamente la interacción entre la cuña salina (ingreso de agua salada producida por el gradiente de densidad) y la pluma de agua dulce proveniente del río. Esta estructura vertical de doble celda da lugar a la denominada circulación estuarina o gravitacional (figura 3), que básicamente causa que el agua dulce de menor densidad fluya sobre el agua salada hacia el exterior del estuario, mientras que en la parte de abajo, donde se encuentra el agua salada y más densa, se desarrolla un flujo en dirección contraria (Castillo y Valenzuela, 2006).

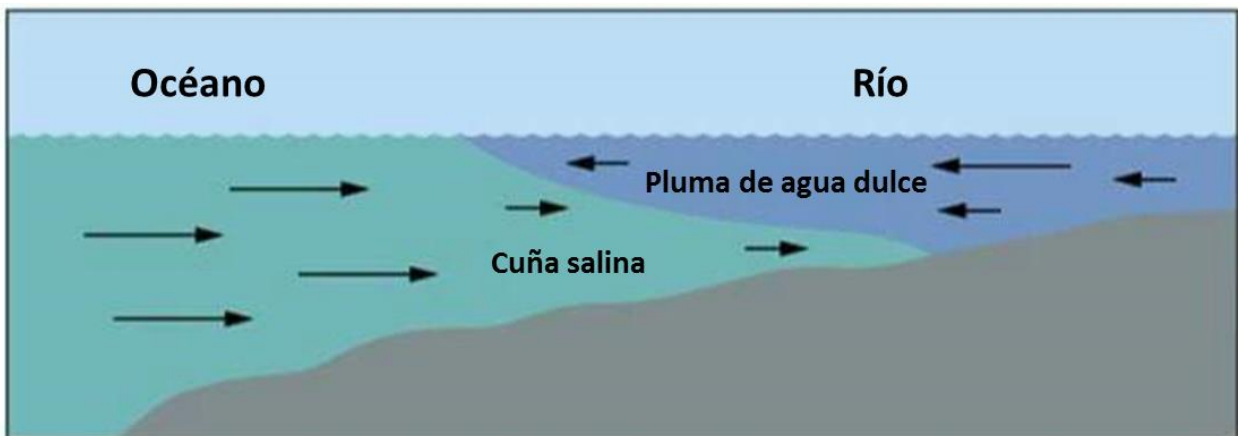


Figura 3. Esquema conceptual de la circulación estuarina. Figura modificada;  
<http://www.geom4me.com>

### 3.1.2 Ecuaciones del modelo

En este trabajo de tesis se construyó el algoritmo numérico del modelo hidrodinámico bidimensional de dos capas de Imamura e Imteaz (1995). Este modelo lo construyeron a partir de la integración vertical de las ecuaciones de momento y de continuidad en aproximaciones propias para aguas someras. El modelo incluye términos no lineales de advección y fricción, así como un término de Coriolis o de rotación.

Ecuaciones de momento, capa 1:

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) - f N_1 + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{g m_1^2}{D_1^{7/3}} M_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) + f M_1 + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + \frac{g m_1^2}{D_1^{7/3}} N_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0 \quad (3)$$

Ecuación de continuidad, capa 1:

$$\frac{\partial(\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Ecuaciones de momento, capa 2:

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) - f N_2 + g' D_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} + \frac{g m_2^2}{D_2^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = -\frac{\rho_1}{\rho_2} g D_2 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) + f M_2 + g' D_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial y} + \frac{g m_2^2}{D_2^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = -\frac{\rho_1}{\rho_2} g D_2 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \quad (6)$$

Ecuación de continuidad, capa 2:

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Donde:

$x, y$  = Coordenadas cartesianas.

$t$  = Tiempo.

$M_1$  = Componente de la velocidad en la dirección  $x$  para la capa 1, integrada verticalmente en toda la extensión de la capa 1.

$M_2$  = Componente de la velocidad en la dirección  $x$  para la capa 2, integrada verticalmente en toda la extensión de la capa 2.

$N_1$  = Componente de la velocidad en la dirección  $y$  para la capa 1, integrada verticalmente en toda la extensión de la capa 1.

$N_2$  = Componente de la velocidad en la dirección  $y$  para la capa 2, integrada verticalmente en toda la extensión de la capa 2.

$\eta_1$  = Elevación de la superficie libre del mar.

$\eta_2$  = Desplazamiento vertical de la interfase entre la capa 1 y capa 2.

$h_1$  = Profundidad media de la columna de agua de la capa 1.

$h_2$  = Profundidad media de la columna de agua de la capa 2.

$D_1 = \eta_1 + h_1$  = Profundidad instantánea de la columna de agua de la capa 1.

$D_2 = \eta_2 + h_2$  = Profundidad instantánea de la columna de agua de la capa 2.

$\rho_1$  = Densidad de masa de la capa 1.

$\rho_2$  = Densidad de masa de la capa 2.

$g$  = Gravedad.

$g' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$  = Gravedad reducida.

$f$  = Parámetro de Coriolis.

$m_1$  = Coeficiente de rugosidad de Manning de la capa 1.

$m_2$  = Coeficiente de rugosidad de Manning de la capa 2.

El sistema de ecuaciones diferenciales se resolvió utilizando una malla Arakawa C con base al esquema de "salto de rana" (Goto et al., 1997), que consiste en sustituir las derivadas por diferencias finitas centradas en el espacio y adelantadas en el tiempo e integrarlas en todo el espacio para cada paso de tiempo.



### 3.1.3 Batimetría y parámetros del modelo

Se descargó una batimetría digital con resolución de 1 segundo de arco (~30 m) de toda la zona central de California (<http://www.ngdc.noaa.gov/dem/squareCellGrid/download/739>). Esta batimetría fue elaborada originalmente para apoyar al programa de Tsunamis (Carignan et al., 2011). Para ahorrar tiempo y recursos de cómputo, en este trabajo se decidió disminuir la resolución de la batimetría por medio de suavizado e interpolación, a un tamaño de celda de 450 m x 450 m (figura 4), con un total de 124 nodos en el eje longitudinal  $x$  y 214 nodos en el eje meridional  $y$ . A la capa 1 se le dio la densidad correspondiente al agua dulce de río ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) y se le asignó una profundidad inicial uniforme de 0.25 m. La fricción entre las dos capas así como la fricción con el fondo es parametrizada usando coeficientes de rugosidad de Manning (i.e. parámetros  $m_1$  y  $m_2$  en ecuaciones de momento). La capa 2 ocupó básicamente toda la malla en que la batimetría era negativa y además se le asignó una densidad de  $1035 \text{ kg/m}^3$ , valor típico del agua salada. El paso de tiempo utilizado en el modelo fue de 2 seg; la estabilidad se verificó por medio de la condición de Courant-Friederichs-Lewy:

$$CFL = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda,  $\Delta t$  el paso del tiempo y  $\Delta x$  la resolución espacial de la malla del modelo para el caso unidimensional. Dado que trabajamos con un modelo de dos capas, la velocidad de fase se encuentra ahora en función de la densidad ( $\rho_1$  y  $\rho_2$ ) y de la profundidad instantánea de la columna de agua de cada capa ( $h_1$  y  $h_2$ ), por lo tanto calculamos la condición CFL independientemente para cada capa:

$$CFL_1 = c_1 \frac{\Delta t}{\Delta x} = \sqrt{gh_1(1 + \alpha\beta)} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (9)$$

$$CFL_2 = c_2 \frac{\Delta t}{\Delta x} = \sqrt{gh_2 \left( \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha\beta} \right)} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad , \quad \beta = \frac{h_2}{h_1} \quad (11)$$

Dando valores a los parámetros de estas ecuaciones se corroboró que el modelo se mantenía bastante estable con un paso del tiempo de 2 seg ( $CFL_1 = 0.128$  y  $CFL_2 = 0.001$ ).

Por otra parte, se hizo correr durante 24 ciclos de marea semidiurna (540000 número de iteraciones) dando tiempo suficiente para alcanzar un estado con oscilaciones y flujos cuasi permanentes.

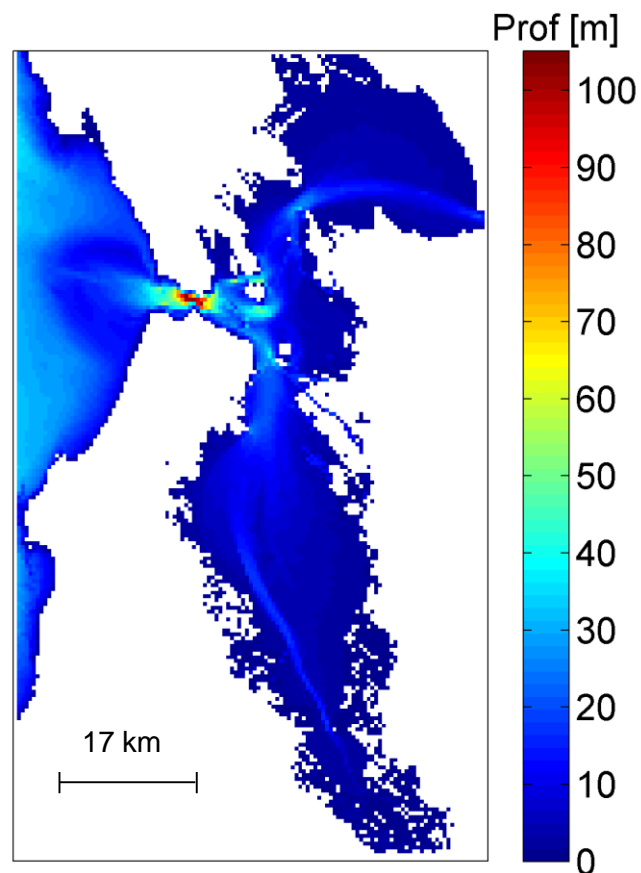
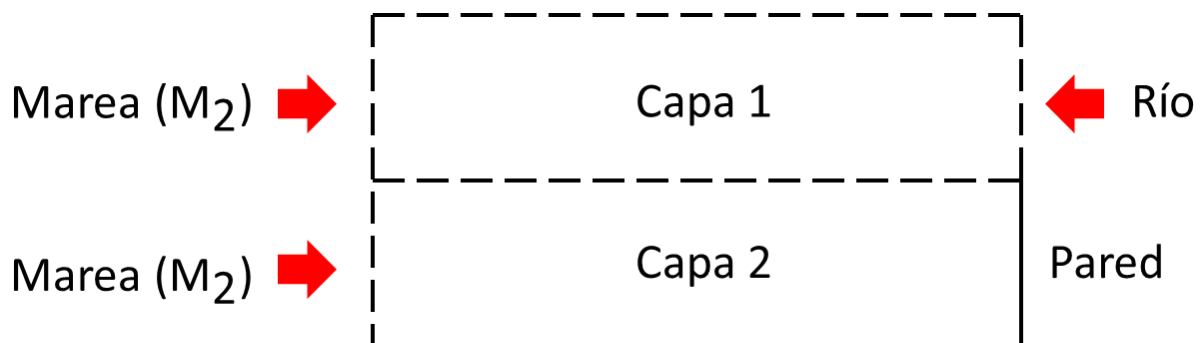


Figura 4. Batimetría de San Francisco con resolución espacial  $dx=dy=450$  m.

### 3.1.4 Forzamientos y condiciones de frontera

Se implementaron forzamientos externos al modelo a través de fronteras abiertas, tales como marea y descarga del río, siguiendo el método de las características (Goto et al., 1997). El modelo contempla inundación de zonas costeras por medio de la condición de frontera móvil de Iwasaki y Mano (1979). La marea se representó mediante un solo armónico con la frecuencia de la componente  $M_2$  en las condiciones de frontera. Para simular la acción de la marea, se impuso en la frontera oeste (delimitada por el Océano Pacífico) dicho armónico tanto en la superficie (capa 1) como en la interfase (capa 2). La descarga del río se impuso en la frontera lateral este de la capa 1, y se utilizó una frontera cerrada en este lugar para la capa 2, con la intención de representar únicamente la pluma de agua dulce proveniente del río (figura 5).



**Figura 5.** Esquema que muestra los forzamientos externos y condiciones de frontera utilizados en el modelo numérico de dos capas.

A manera de ejemplo de los resultados del modelo numérico, en la figura 6 se muestra para su comparación la marea registrada en la boca del estuario y la marea resultante del modelo numérico en la localidad donde se ubica el mareógrafo (Fort Point), para un periodo comprendido del 26/04/2011 al 25/05/2011 (que corresponde a dos ciclos de marea). En este caso, se forzó la frontera oeste (capas 1 y 2) con el pronóstico de marea, es decir, con todas las componentes armónicas de marea a excepción de las componentes de aguas someras; no se tomaron en cuenta las componentes de aguas someras en el forzamiento porque en principio el modelo numérico tiene la capacidad de generar estos términos que son de carácter no lineal (ver figura 7). Se hizo variar la amplitud de la marea en la boca hasta que ésta coincidiera con la amplitud observada

en la estación mareográfica. Asimismo, no se consideró la descarga del río proveniente del delta Sacramento-San Joaquín. Los resultados obtenidos a partir del modelo numérico reproducen adecuadamente a las observaciones de nivel del mar para el sitio donde se encuentra el mareógrafo (coeficiente de correlación de 0.99).

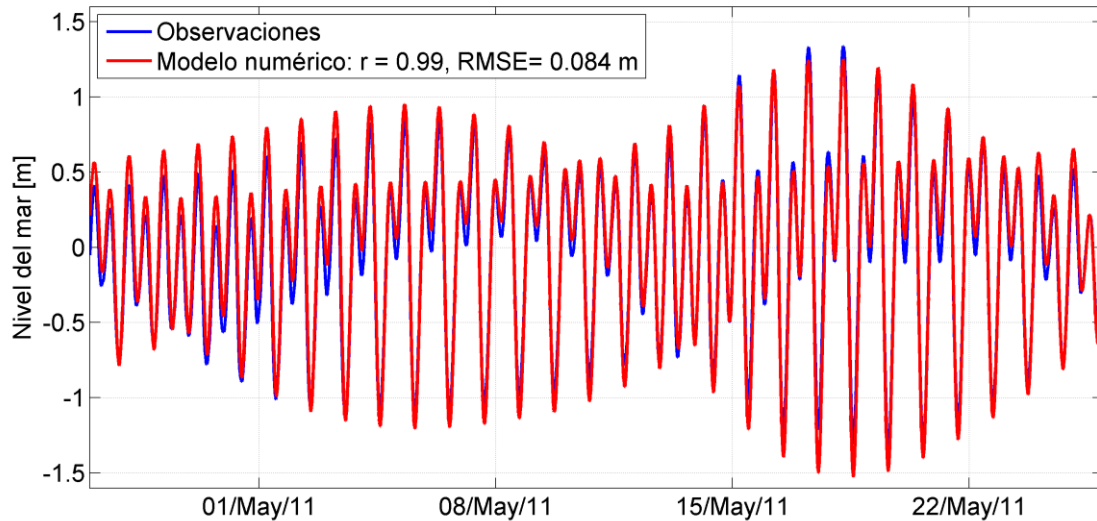


Figura 6. Calibración del modelo numérico con observaciones de nivel del mar en Fort Point, San Francisco.

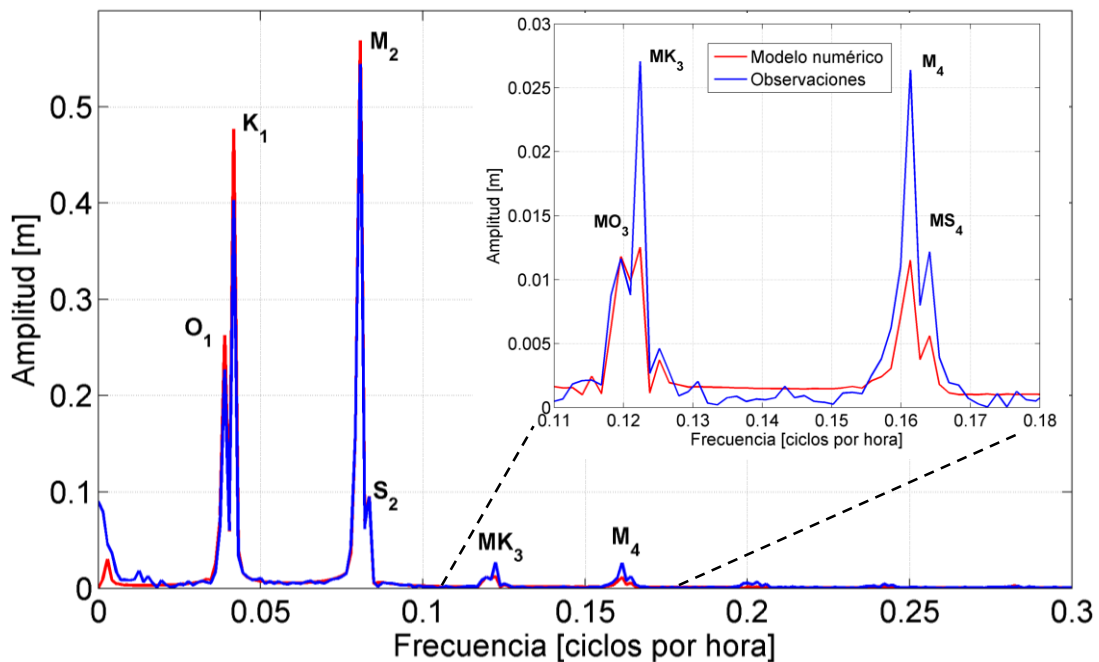


Figura 7. Espectro de amplitud para dos ciclos de marea (26/04/2011 – 25/05/2011). La subfigura es un acercamiento a las frecuencias que corresponden a las componentes de aguas someras.

### 3.2 Modelo barotrópico

El modelo barotrópico se construyó siguiendo la metodología de Goto et al. (1997) y se adaptó con base en las mismas ecuaciones que el modelo de dos capas (términos advectivos, fricción, Coriolis y 2D), con la diferencia de que se descarta la capa asociada al agua dulce de río.

Ecuaciones de momento:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) - fN + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + fM + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (13)$$

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

Donde:

$x, y$  = Coordenadas cartesianas.

$t$  = Tiempo.

$M$  = Componente de la velocidad en la dirección  $x$  integrada verticalmente en toda la columna de agua.

$N$  = Componente de la velocidad en la dirección  $y$  integrada verticalmente en toda la columna de agua.

$\eta$  = Elevación de la superficie libre del mar.

$h$  = Profundidad media de la columna de agua.

$D = \eta + h$  = Profundidad instantánea de la columna de agua.

$\rho$  = Densidad de masa del fluido.

$g$  = Gravedad.

$f$  = Parámetro de Coriolis.

$m$  = Coeficiente de rugosidad de Manning.

## Capítulo 4. Análisis de los datos

### 4.1 Demodulación compleja

Una vez descargados los registros horarios de nivel del mar para el periodo comprendido del 1 de enero de 1901 al 31 de diciembre del 2012, se les aplicó la demodulación compleja empleando como filtro pasa bajas el filtro recursivo de Godin. Esta demodulación es para identificar cambios o variaciones (de baja frecuencia  $< 1$  ciclo/año) tanto en la amplitud como en la fase de la componente  $M_2$  de la marea (figura 8). La restricción en el ancho de banda del filtro se debe al criterio de Rayleigh (ver apéndice), que establece que se necesita al menos 1 año de datos horarios de nivel del mar para resolver correctamente (separar entre sí) cada una de las componentes de marea. La misma demodulación compleja se aplicó al correspondiente “pronóstico” de la marea de San Francisco empleando las constantes armónicas calculadas para el año 2011, por ser este un año reciente sin falta de datos.

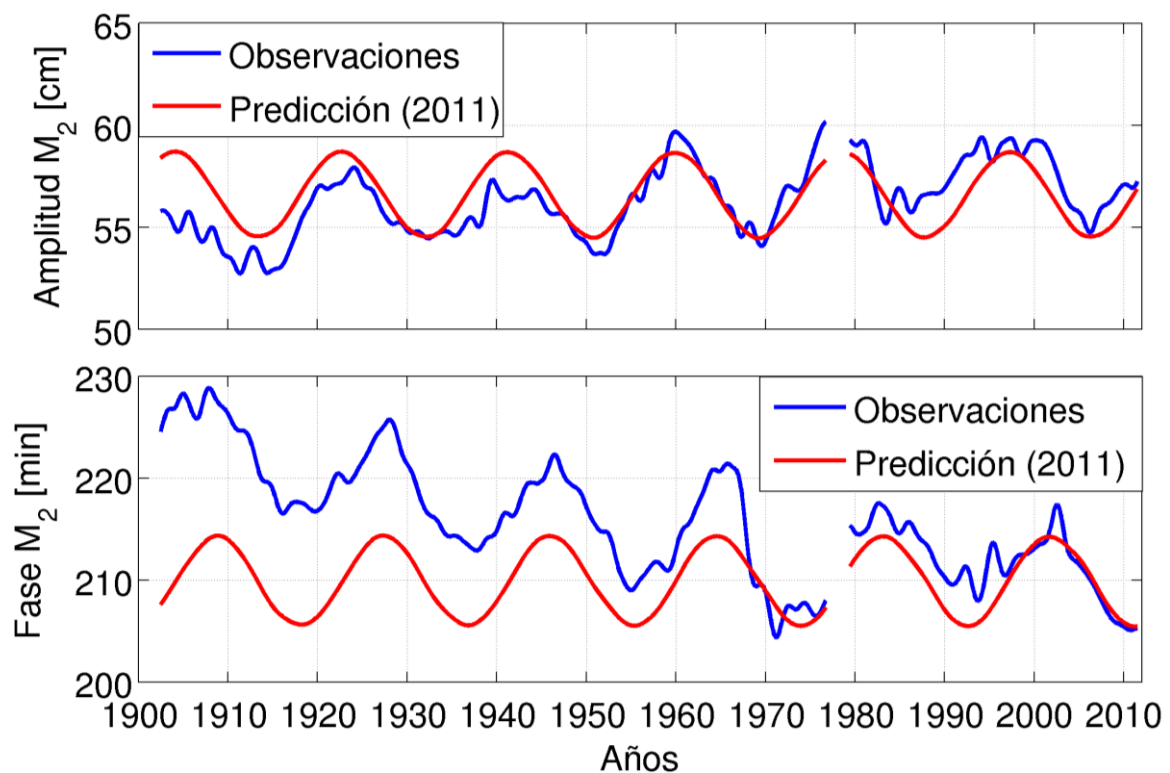


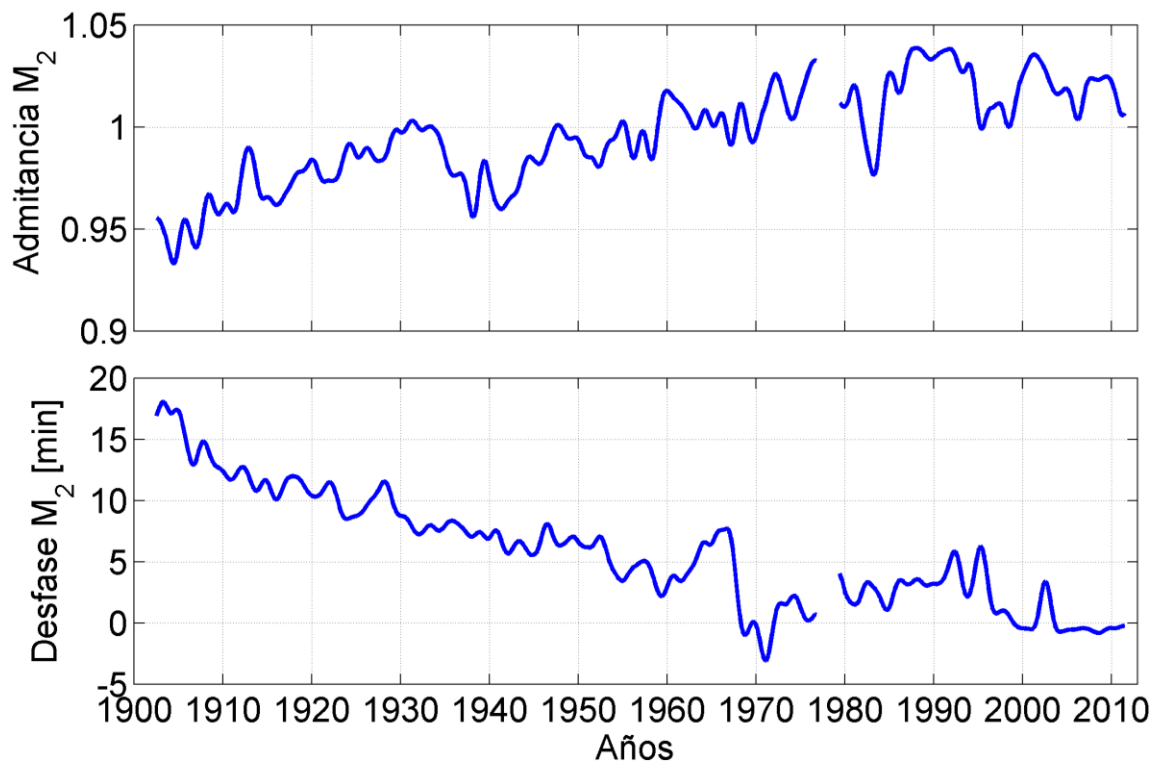
Figura 8. Amplitud y fase demoduladas para la frecuencia de la componente  $M_2$  de marea, obtenidas a partir tanto de las observaciones del nivel del mar (línea azul), como de la predicción de marea correspondiente (línea roja).

Sin necesidad de recurrir a un espectro de amplitud, se puede apreciar a simple vista (figura 8) cómo la componente de marea  $M_2$  se encuentra dominada por una variabilidad periódica de largo plazo tanto en las observaciones como en el pronóstico. La naturaleza de esta señal debe su origen a la variación en la inclinación de la órbita de la luna relativa al ecuador terrestre (eclíptica) y coincide con la regresión de los nodos lunares. Esta inclinación varía de  $18.5^\circ$  a  $28.5^\circ$  y tarda aproximadamente 18.6 años en completar cada ciclo. Hay que recordar que el propósito de este trabajo radica en estudiar las variaciones (a largo plazo) ajenas al movimiento de los astros, por lo que fue necesario remover esta señal nodal. Para esta tarea primeramente se seleccionó un buen año de datos que sirviera como año de referencia. La sofisticación cada vez más reciente en los instrumentos de medición dio lugar a que se eligiera el año 2011 como año de referencia, donde en principio los datos suponen que han sido obtenidos con la mayor precisión posible. Para dicho año de referencia, mediante análisis armónico (Foreman, 1977), se calcularon las constantes armónicas: amplitud y fase de la componente  $M_2$  de marea. A partir de las constantes armónicas obtenidas del año de referencia, se hizo el cálculo de las variaciones de marea con todo y su variación por declinación nodal de la luna, es decir, se hizo una predicción o pronóstico sobre todo el periodo de registro de datos (1901-2012). A esta predicción, al igual que con las observaciones, se le extrajo de manera continua tanto la amplitud como la fase por medio de demodulación compleja; el resultado dejó como remanente un armónico con periodo de 18.6 años (figura 8). Para eliminar todo rastro de la señal nodal se calculó la admitancia entre la señal demodulada a partir de las observaciones y la señal demodulada a partir de la estimación de la marea con base en los armónicos de 2011, i.e.,

$$Admitancia = \frac{A_{obs}e^{i\theta_{obs}}}{A_{pred}e^{i\theta_{pred}}} = \underbrace{\frac{A_{obs}}{A_{pred}}}_{\text{amplitud}} e^{i(\underbrace{\theta_{obs}-\theta_{pred}}_{\text{fase}})} \quad (15)$$

En otras palabras, se dividió la amplitud de las observaciones ( $A_{obs}$ ) entre la amplitud de la predicción ( $A_{pred}$ ). Este cociente entre amplitudes se le conoce comúnmente

como la amplitud de la admitancia o simplemente como la admitancia<sup>1</sup>, e indica la variación de la amplitud de la componente  $M_2$  con respecto a la amplitud del año de referencia 2011 (0.57 m). Si la admitancia es mayor que 1, quiere decir que la amplitud es mayor respecto a la del 2011, si la admitancia es menor que 1, la amplitud es menor a la del 2011, y en todo caso en que la admitancia sea igual a 1, la amplitud coincide con la amplitud de referencia. Por otra parte, la fase de la admitancia corresponde a la diferencia de fase entre la fase observada ( $\theta_{obs}$ ) y la fase de referencia del año 2011 ( $\theta_{pred}$ ); desfases positivos indicaron retraso, y desfases negativos indicaron adelanto respecto a la fase de referencia (2011). El resultado de la admitancia se ilustra en la figura 9, en donde, además de variaciones de diferentes períodos, se puede apreciar una tendencia secular tanto en la admitancia como en la fase de la componente  $M_2$ , lo que indica que la amplitud ha aumentado aproximadamente 4 cm en 111 años y la fase se ha adelantado aproximadamente 17 minutos en ese mismo lapso de tiempo.



**Figura 9. Admitancia y diferencia de fase en unidades de minutos de tiempo de la componente  $M_2$  de la marea, con respecto a la amplitud y fase de la marea observada en el año 2011. Amplitud de referencia = 0.57 m.**

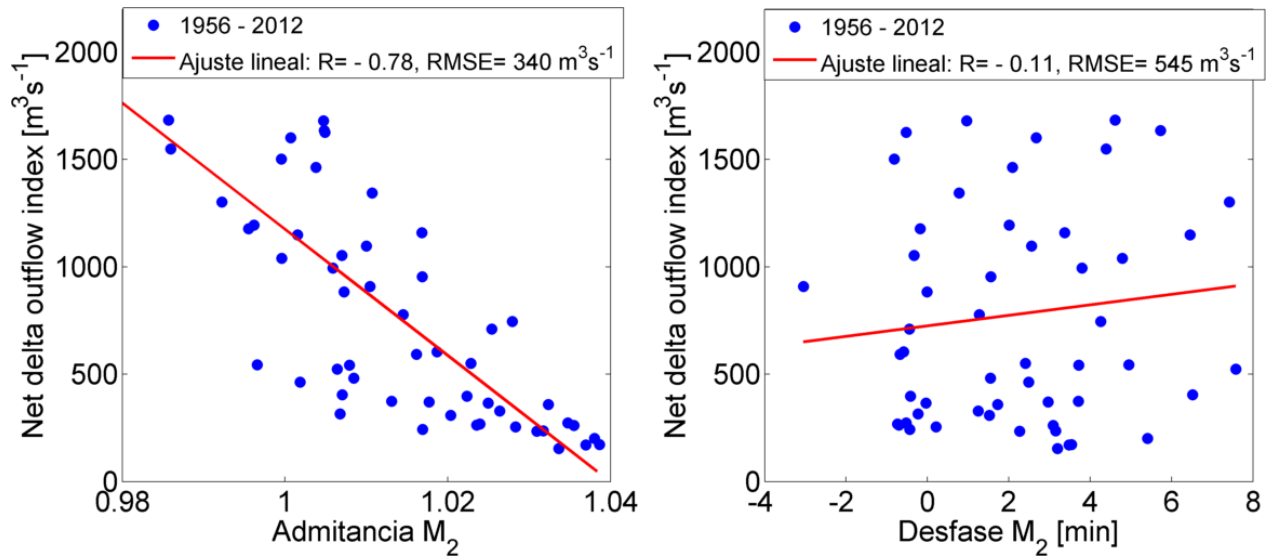
<sup>1</sup> Aun cuando la admitancia es una función compleja, nos referimos a la magnitud de ésta como admitancia y fase (o desfase), a la diferencia de fase del cociente.



## 4.2 Relación entre la marea y el flujo neto del río

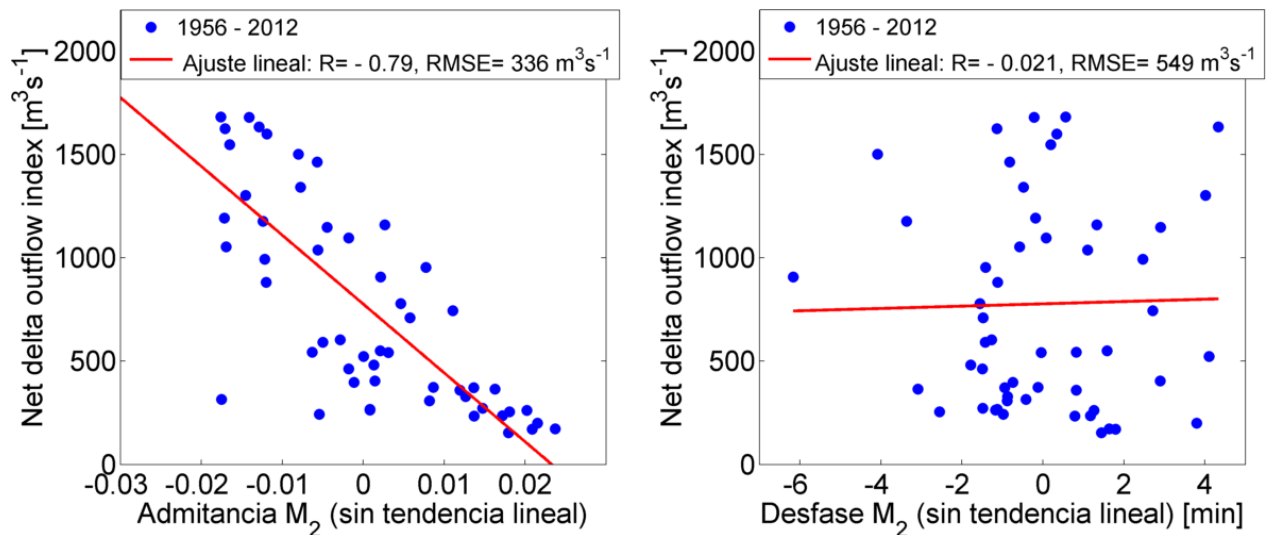
La teoría establece que las constantes armónicas de marea en principio no deben cambiar, a menos que algún factor físico local (de origen no astronómico) se encuentre involucrado. Bajo esta premisa, se especuló la existencia de alguna posible relación entre los cambios seculares en las componentes armónicas de marea y las variaciones del aporte de agua dulce hacia el interior de la Bahía de San Francisco.

Se promediaron año con año datos diarios de estimaciones de flujo proveniente del delta Sacramento-San Joaquín para el periodo de 1956 a 2012. Para el mismo lapso de tiempo se seleccionaron datos anuales de admitancia y de diferencia de fase demoduladas de la componente  $M_2$  de marea. Estos conjuntos de datos anuales se graficaron por medio de un diagrama de dispersión (flujo del río contra admitancia  $M_2$  y flujo del río contra desfase  $M_2$ ) y posteriormente se calculó su correlación lineal. En los resultados obtenidos (figura 10) se aprecia que tanto la amplitud demodulada como la descarga del río (delta Sacramento-San Joaquín) se encuentran inversamente correlacionados, con un coeficiente de correlación relativamente alto de -0.78. Esto resulta bastante interesante, ya que quiere decir que al incrementarse el flujo del río, la marea entra a la bahía con menor amplitud. O en otras palabras, al disminuir el flujo del río, aumenta la amplitud de la marea. Por otra parte, el coeficiente de correlación de apenas 0.11 sugiere que los desfases de la componente  $M_2$  se encuentran completamente desvinculados de la influencia del caudal del río.



**Figura 10.** La imagen izquierda representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia de la componente  $M_2$  con respecto a la amplitud de la marea observada en el año 2011 (0.57 m). La imagen derecha representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la diferencia de fase en unidades de minutos de tiempo de la componente  $M_2$  de marea.

Posteriormente se dispuso a eliminar la tendencia lineal, tanto de la admitancia como del desfase de la componente  $M_2$ , esto con el fin de averiguar si los cambios seculares de la marea se encuentran relacionados con el flujo del río. Como se observa en la figura 11, a pesar de haber eliminado la tendencia lineal de la admitancia, sigue existiendo una buena correlación de -0.79 (inclusive mayor que la calculada anteriormente) entre la admitancia y el flujo del río. Este resultado obtenido descarta la hipótesis propuesta por Ortiz (2007), quien sugiere que los cambios seculares de la marea se deben a la reducción en el caudal de los ríos. Por otro lado, el desfase de la componente  $M_2$ , con tendencia o sin tendencia lineal, sigue sin tener relación alguna con el caudal del río.



**Figura 11.** La imagen izquierda representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia sin tendencia lineal de la componente  $M_2$  de marea. La imagen derecha representa la correlación lineal entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la diferencia de fase sin tendencia lineal de la componente  $M_2$  de marea.

La siguiente etapa consistió en promediar cada 15 días de manera consecutiva (promedios corridos de 15 días) las estimaciones de flujo del río, así como la admitancia demodulada de la componente  $M_2$  de marea. La finalidad de este procedimiento consiste en poder aumentar la resolución en la dispersión de datos. En los resultados con mayor resolución (figura 12) se aprecia que la relación inversa entre el flujo del río y la admitancia demodulada ya no resulta tan lineal después de todo. Esto queda en evidencia al comparar el coeficiente de determinación entre el ajuste lineal ( $R^2 = 0.33$ ) y el ajuste cuadrático ( $R^2 = 0.6$ ). La realidad es que esta relación funcional entre el caudal del río y la amplitud de la componente  $M_2$  (por medio de la admitancia) no es un descubrimiento nuevo, sin embargo sí es reciente, y su potencial llega a tal grado que se pueden hacer estimaciones del caudal de río a partir de datos de marea de un simple mareógrafo (Moftakhari et al., 2013). Como se mencionó anteriormente, eliminar la tendencia lineal o secular en la admitancia es un factor clave que se debe tener en consideración para que efectivamente exista una buena correlación entre la amplitud de la marea y la descarga del río. Esto por consecuencia refuta la posibilidad de atribuir los cambios seculares en la amplitud de la componente  $M_2$  de la marea a las variaciones del flujo de los ríos Sacramento y San Joaquín, ya que en el flujo de los ríos no se aprecia un cambio secular.

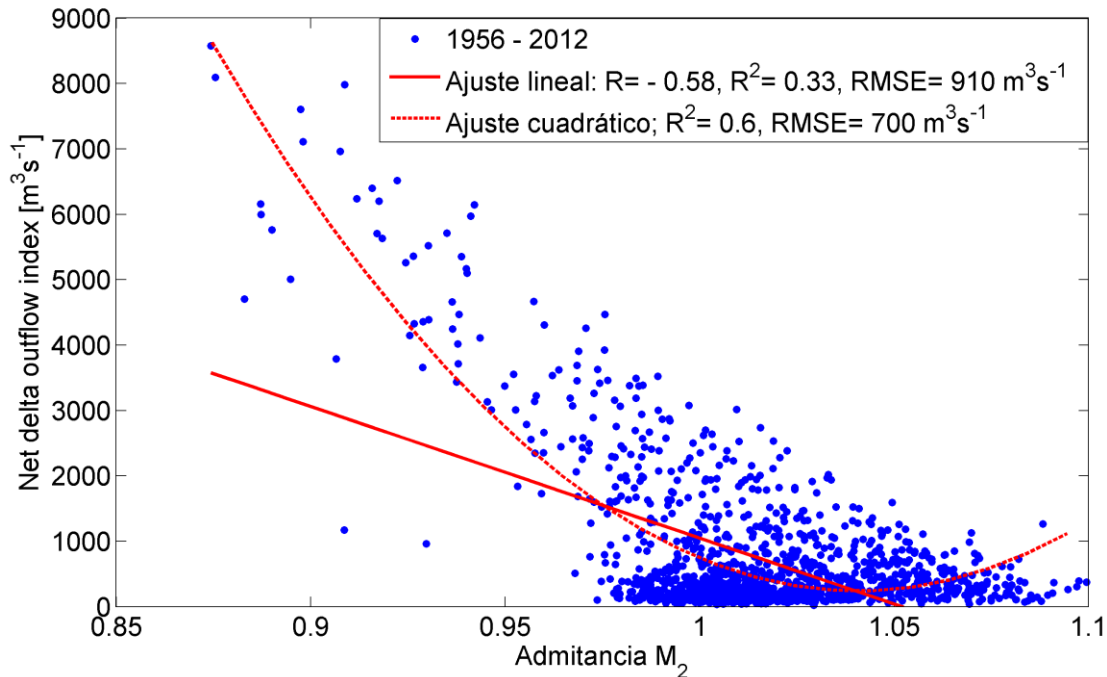


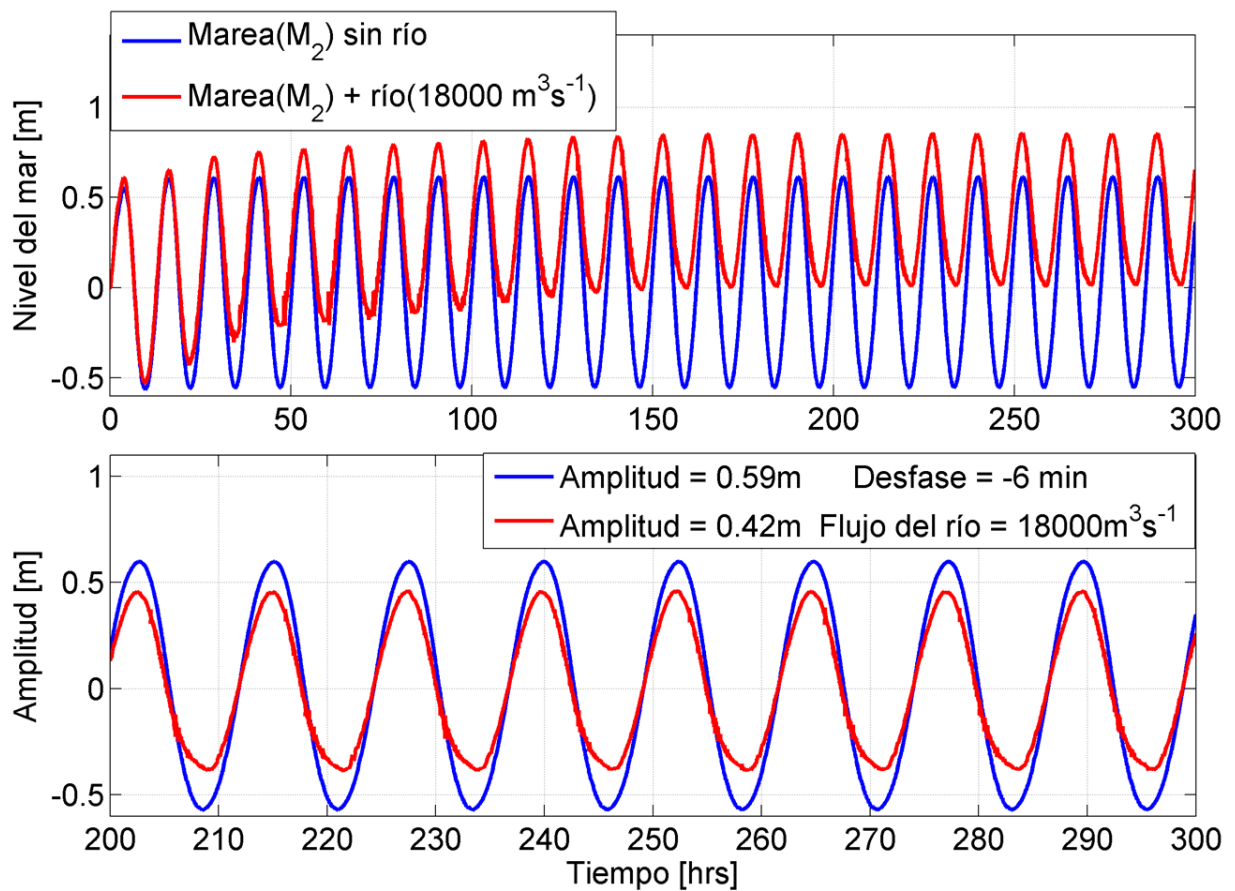
Figura 12. Correlación lineal y cuadrática entre el flujo del delta Sacramento-San Joaquín y la admitancia demodulada de la componente  $M_2$  de marea. Amplitud de referencia = 0.57 m.

### 4.3 Simulación numérica del flujo del río y la marea

El modelo numérico descrito en la sección 3.1.2 se empleó con la finalidad de estudiar la variación en la amplitud y fase de la marea en la Bahía de San Francisco en respuesta al flujo de agua dulce proveniente de los ríos Sacramento y San Joaquín. Sin embargo, simular continuamente un siglo de datos horarios de nivel del mar, además de paciencia, requiere de una gran capacidad de cómputo. Dada esta limitante de recursos, se optó mejor por llevar a cabo simulaciones de corto periodo contemplando distintos escenarios de caudal de río. Cada corrida del modelo se realizó con una duración correspondiente de 24 ciclos de marea semidiurna (540,000 iteraciones con un paso de tiempo de 2 segundos), con la finalidad de dar tiempo suficiente al modelo para estabilizar la respuesta del estuario tanto a la marea como al flujo del río.

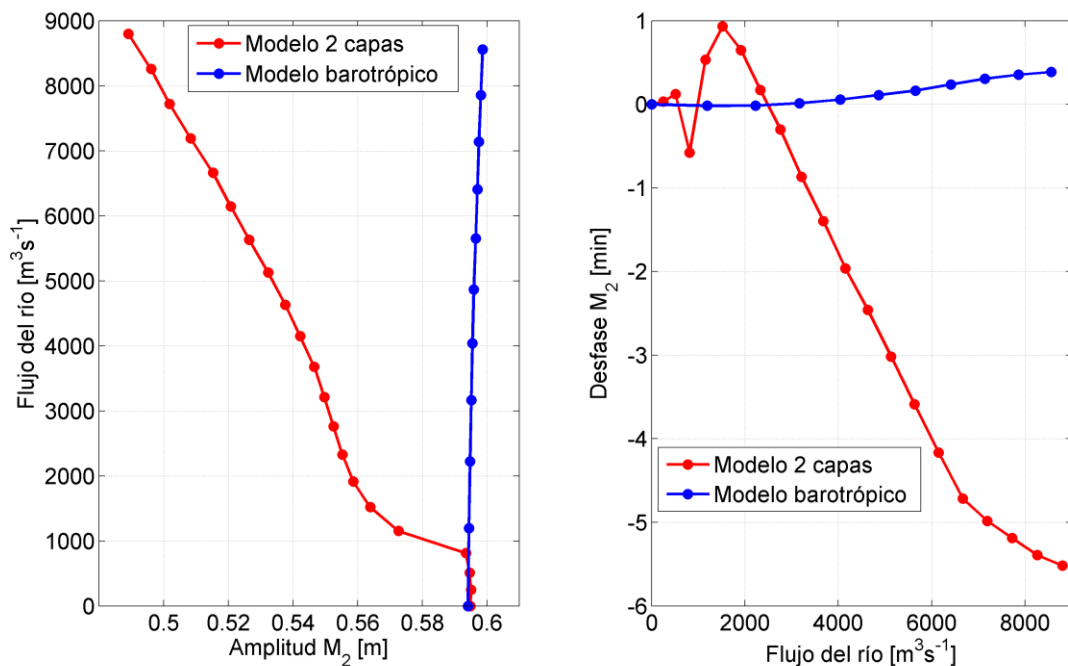
La figura 13 es un ejemplo particular que muestra el resultado de dos simulaciones hechas con el modelo para obtener la marea en el sitio donde se encuentra localizado

el mareógrafo cerca del Golden Gate. Como se observa en la parte superior de la figura 13, a medida que el flujo del río ingresa a la bahía, el nivel medio del mar comienza a aumentar hasta llegar a un equilibrio. Para analizar los efectos del río sobre la marea, se cortaron ambas series a partir de que el nivel del mar alcanzó dicho equilibrio, es decir, a partir de las 200 horas. A las series resultantes se les extrajo el promedio con la finalidad de referenciar cada serie respecto a su nivel medio y así poder compararlas (figura 13, parte inferior). Finalmente se aplicó análisis armónico a las series recortadas para calcular amplitudes y fases. Los resultados muestran que para una descarga de río de  $18,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la amplitud de la componente  $M_2$  disminuye aproximadamente 17 cm, mientras que la fase se adelanta 6 minutos.



**Figura 13. Simulación numérica.** La línea azul representa la componente  $M_2$  de marea en ausencia de descarga de ríos, mientras que la línea roja representa la componente  $M_2$  de marea en presencia de un aporte exagerado de agua dulce ( $18,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).

La siguiente etapa consistió en simular la componente  $M_2$  con diferentes valores de caudal de río (en un rango de  $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y  $9,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), empleando tanto el modelo de dos capas como el modelo barotrópico. En los resultados del modelo de dos capas (figura 14) se aprecia cómo la amplitud de la marea disminuye hasta 17 cm conforme aumenta el flujo del río, mientras que, contrario a la intuición, la fase primeramente se retrasa y después se adelanta hasta 6 minutos al aumentar el flujo del río. En contraste, en los resultados correspondientes al modelo barotrópico (misma figura 14), tanto la amplitud como la fase permanecen prácticamente constantes ante las mismas variaciones del flujo del río.

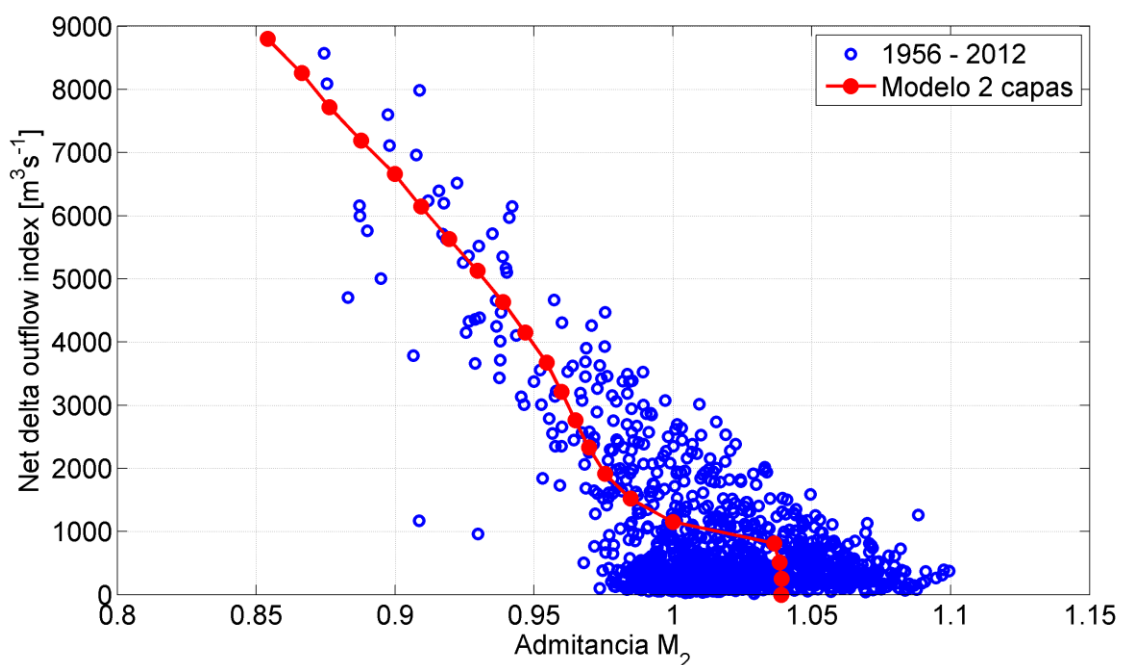


**Figura 14. Simulación del comportamiento de la admitancia y desfase de la componente  $M_2$  de marea ante distintos flujos del río, mediante un modelo de dos capas y un modelo barotrópico.**

Una de las hipótesis propuestas por Ortiz (2007) fue la de asociar los adelantos de fase observados en los registros de las componentes de marea a la reducción en el caudal de los ríos (debido principalmente a la construcción de grandes presas). Si bien la idea era que con el paso del tiempo las presas redujeran el caudal del río y a su vez disminuyera la resistencia al paso de la marea (que equivaldría en un adelanto en la fase), los datos sintéticos son evidencia en contra de esta hipótesis ya que precisamente contradicen dicha propuesta; al aumentar el flujo del río, la fase de la

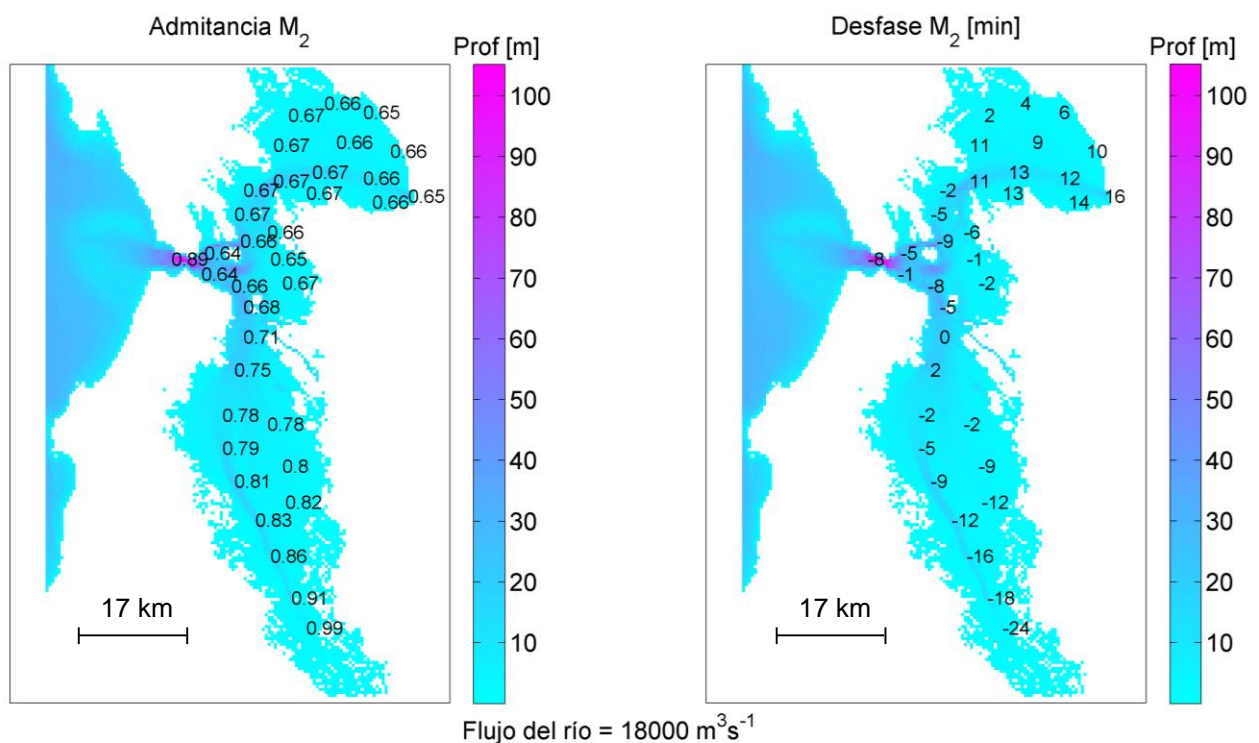
componente  $M_2$  se adelanta, y por el contrario si el flujo del río disminuye, la fase se retrasa.

A pesar de que los resultados no explican los cambios seculares (de baja frecuencia) observados en la amplitud y fase de la componente  $M_2$  (figura 9), la admitancia resultante coincide y es congruente con las variaciones de alta frecuencia observadas en los datos. Por ejemplo, en la figura 15 se muestra un diagrama de dispersión entre el flujo estimado de caudal de río y la admitancia de la componente  $M_2$ . Los puntos azules muestran observaciones reales que comprenden un periodo de 1956 a 2012 y la línea roja muestra datos sintéticos obtenidos por el modelo numérico de dos capas. Si comparamos las simulaciones del modelo de dos capas con las observaciones previamente calculadas notaremos que efectivamente se validan los datos obtenidos por el modelo y consecuentemente se valida la operación del modelo. Note que en los resultados que se muestran en la figura 15, la admitancia del modelo de dos capas se calculó tomando como referencia la amplitud de la componente  $M_2$  del año 2011 (0.57 m) y un flujo de  $1053 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  correspondiente al flujo promedio del delta Sacramento-San Joaquín del año 2011.



**Figura 15. Correlación inversa entre el gasto del río (NDO) y la admitancia de la componente  $M_2$ . Amplitud de referencia = 0.57 m.**

Con la finalidad de averiguar la respuesta del estuario ante el aumento del flujo del río, (no solamente para la localidad de Fort Point, sino para toda la bahía en general), se obtuvo la comparación de la marea resultante con caudal de río (flujo de  $18,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), contra la marea resultante sin caudal de río, empleando la función de admitancia (amplitud y desfase) en distintos puntos del estuario. Como se muestra en la figura 16, la amplitud de la componente  $M_2$  disminuye en todas partes de la bahía ante la presencia de la descarga del río. La fase, en cambio, se retrasa en toda la parte norte de la bahía cerca de donde ingresa el caudal del río y se adelanta para el resto de la bahía (zona central y sur del estuario).



**Figura 16. Admitancia y desfase en unidades de minutos de tiempo de la componente  $M_2$  calculadas para toda la Bahía de San Francisco con referencia a 2011.**

La figura 17 representa un esquema conceptual cuyo objetivo es explicar de una manera sencilla el mecanismo por el que la amplitud de la componente  $M_2$  disminuye y la fase de la  $M_2$  se adelanta al aumentar el flujo del río. Si hiciéramos un corte transversal en la boca del estuario de San Francisco (justo debajo del puente del Golden Gate) veríamos que prácticamente toda la columna de agua sería agua salada entrando proveniente del Océano Pacífico. A su vez, notaríamos sólo una pequeña



porción de agua dulce saliendo cerca de la superficie. Esta circulación descrita se presenta para condiciones normales de aporte de agua dulce proveniente del delta Sacramento-San Joaquín (flujo promedio  $\approx 754 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Por otra parte, si el flujo de agua dulce que ingresa a la bahía se incrementa, la capa superior asociada al agua dulce comienza a engrosarse, hundiendo de esta manera la pycnoclina y reduciendo a su vez el área transversal de la capa inferior por el que entra la marea. Esta restricción del paso de la marea hacia el interior de la bahía (debido al aumento en el espesor de la capa de agua dulce) por continuidad atenúa la amplitud de la marea (componente  $M_2$ ). La figura 18 muestra cuantitativamente cómo en el modelo de dos capas el flujo de agua salada que entra a la bahía por la capa inferior se reduce a medida que el flujo del río aumenta (sin considerar mezcla vertical).

El adelanto de fase de la componente  $M_2$  también se puede relacionar al aumento del caudal del río. Como se vio anteriormente (figura 13), al aumentar el flujo del río se eleva el nivel medio del mar y dado que la velocidad a la que se propaga la onda de marea (velocidad de fase barotrópica) se encuentra en función de la profundidad de la columna de agua, la fase se adelanta.

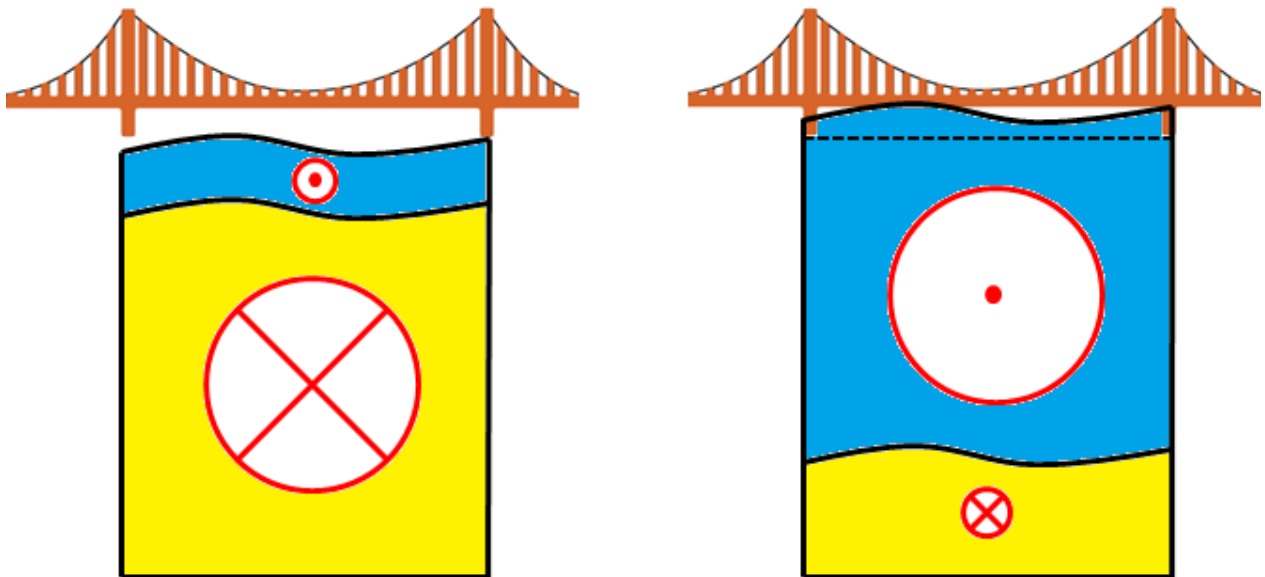


Figura 17. Esquema conceptual que ilustra la circulación estuarina en condiciones normales (figura de la izquierda) y en condiciones cuando la descarga del río aumenta (figura de la derecha). Ambas figuras muestran un corte transversal de la entrada de la bahía (debajo del puente del Golden Gate) con vista desde el exterior hacia el interior de la bahía. La capa azul corresponde al

agua dulce de río que sale de la bahía y la capa amarilla corresponde al agua salada proveniente del Océano Pacífico que ingresa al estuario.

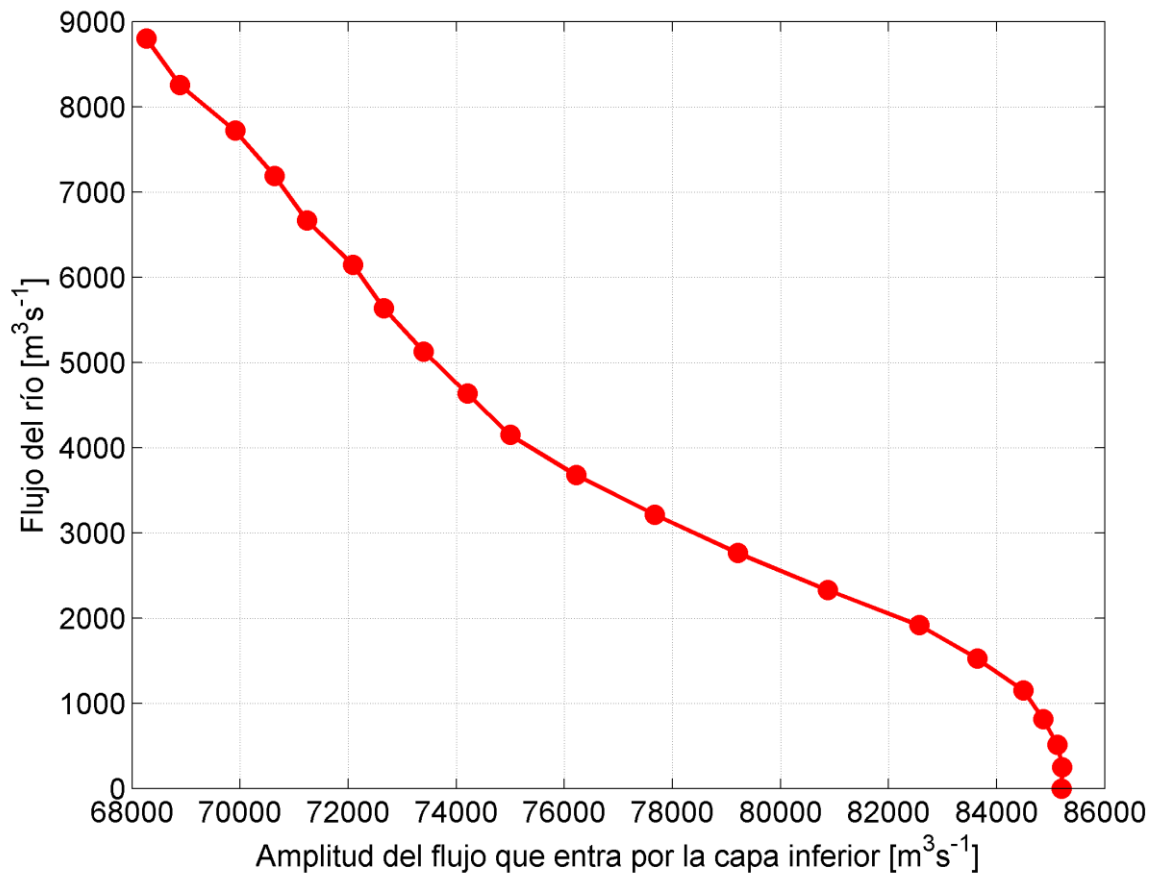


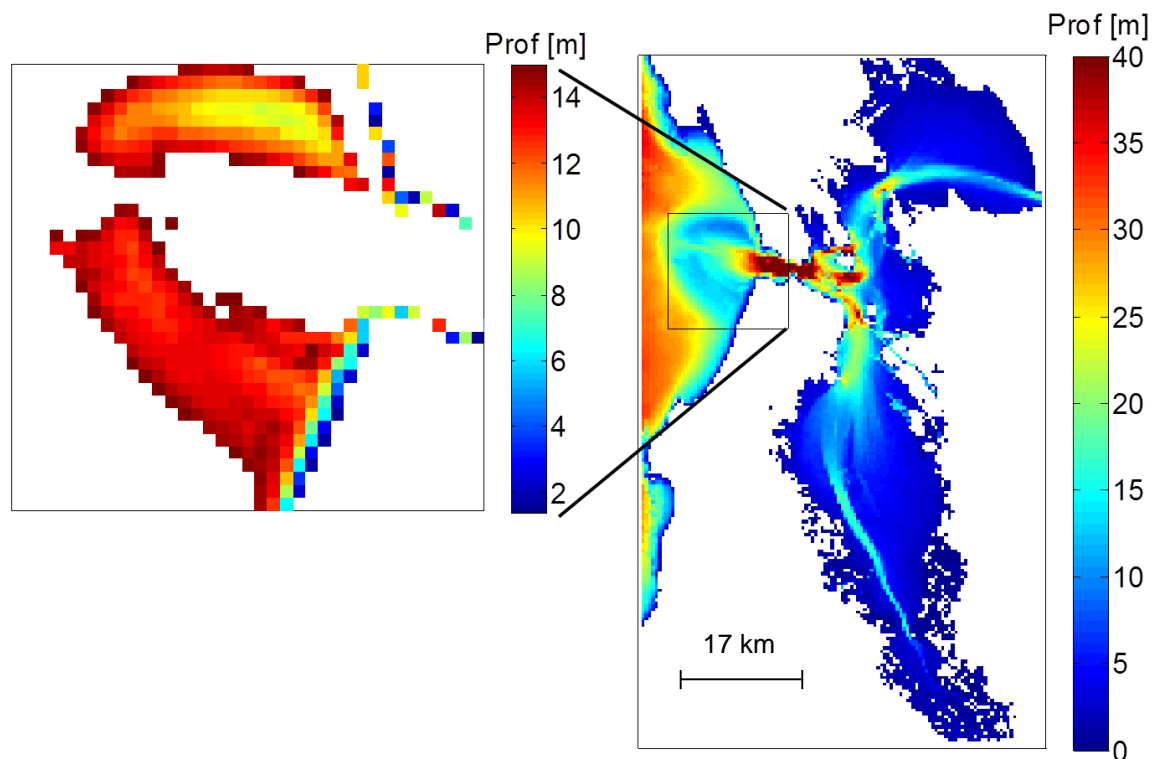
Figura 18. Resultados del modelo de dos capas: flujo del río vs. flujo de agua salada que entra al estuario de San Francisco a través de la capa inferior únicamente durante la pleamar.

#### 4.4 Cambios seculares en el espacio-fase

Si bien la descarga del río explica las variaciones a corto plazo en la amplitud de la componente  $M_2$ , no explica la causa de los cambios seculares observados en la amplitud y fase de la marea. Encontrar el origen de dichos cambios seculares, sugiere la idea de remontarse un siglo atrás en busca de factores y condiciones físicas claves de la época. Si se piensa en la historia de San Francisco, un acontecimiento importante fue sin duda la fiebre del oro, periodo durante el cual se depositaron más de  $350 \times 10^6$   $\text{m}^3$  de sedimento al interior de la bahía. Con el tiempo, gracias a la acción de las corrientes de marea, parte del sedimento fue transportado y depositado justo en las

afueras de la bahía en lo que se conoce como una duna o barra de arena submarina. Dicha barra de arena juega un papel fundamental, ya que obstruye el paso de la marea. Bajo esta premisa, se hicieron simulaciones numéricas, variando únicamente la profundidad de la barra para ver si implicaba algún cambio en la amplitud y fase de la marea, manteniendo la misma batimetría al interior de la Bahía.

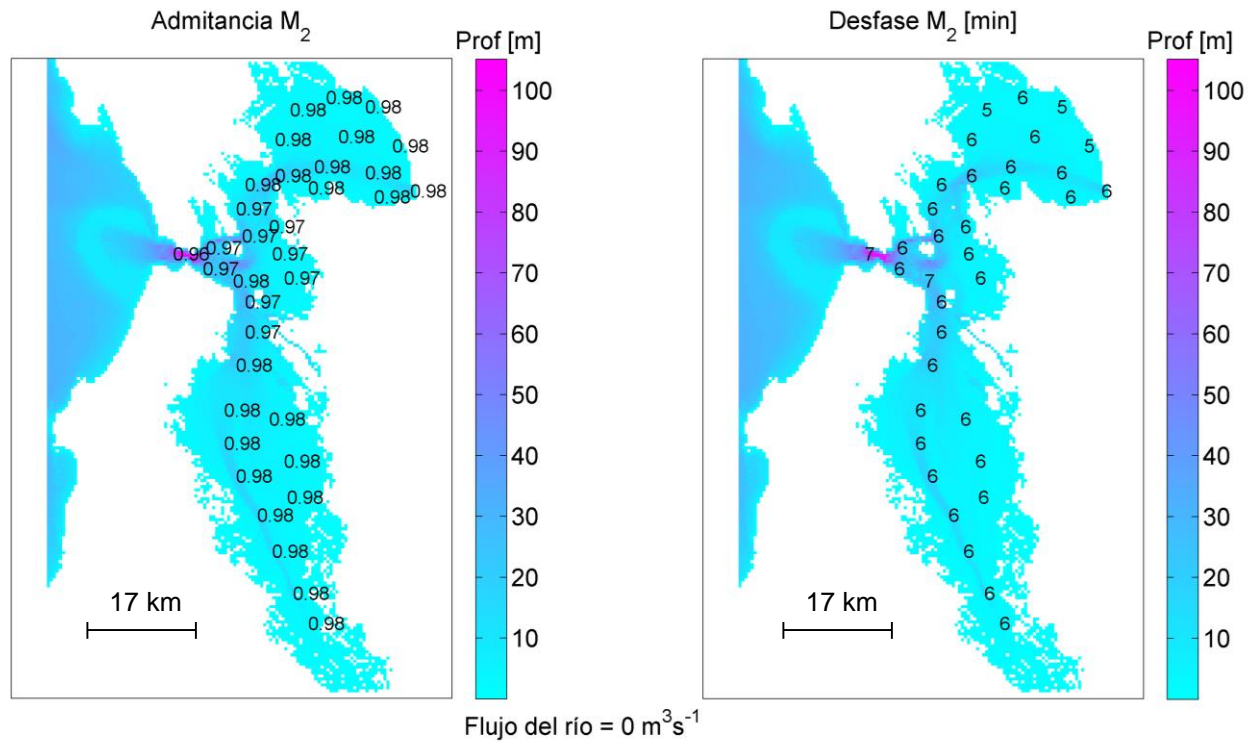
Primeramente se identificó la barra de arena en el modelo batimétrico; se hizo un polígono en la región exterior de la boca de la bahía y se buscaron profundidades que estuvieran entre los primeros 15 metros de profundidad (figura 19). Una vez identificado el polígono que encierra o abarca a la barra de arena, se modificaron las profundidades dentro del polígono multiplicándolas por un factor diferente en cada experimento.



**Figura 19. Localización de la barra de arena submarina que se sitúa en el exterior de la entrada de la Bahía de San Francisco.**

Dado que a principios del siglo XX se empezaron a construir diversas presas a lo largo de los ríos Sacramento y San Joaquín, el aporte de sedimento decreció dando inicio a una etapa de erosión en toda la bahía. Esto supone que la profundidad de la barra de arena también tuvo que aumentar respecto a cómo se encontraba originalmente tras el periodo de la denominada fiebre del oro. Con base en esto, los factores que se

utilizaron para multiplicar la batimetría dentro del polígono, fueron: 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55 y 0.50, que corresponde respectivamente a disminuir la profundidad en un 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% y 50% con respecto a la batimetría “actual” (elaborada en 2010). El canal principal que atraviesa la barra de arena es actualmente un canal de navegación que se mantiene bajo constantes operaciones de dragado (17 metros de profundidad). Ignorando esto, los factores se aplicaron por igual modificando la profundidad del canal principal dentro del polígono. Una vez obtenidas las batimetrías con diferentes profundidades de la barra, éstas se incluyeron tanto en el modelo numérico de dos capas como en el modelo barotrópico. Posteriormente, se forzó tanto al modelo de dos capas como al modelo barotrópico mediante una marea armónica con la frecuencia de la componente  $M_2$ . En todos los experimentos con el modelo de dos capas se consideró un flujo constante del río equivalente al flujo promedio de  $754 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Al igual que en los experimentos anteriores, cada simulación se llevó a cabo para un periodo de 24 ciclos de marea semidiurna. De los resultados de cada uno de los experimentos numéricos, considerando las diferentes profundidades de la barra de arena, se obtuvo la admitancia y desfase de la marea con respecto a los resultados obtenidos con la batimetría actual. La figura 20 es un ejemplo de la respuesta de la admitancia y el desfase de la componente  $M_2$  de marea en toda la bahía, ante un cambio en la profundidad de la barra de arena (30% más somera). Cabe mencionar que aún sin haber contemplado descargas de agua dulce en el modelo (para este caso en particular), la amplitud de la componente  $M_2$  disminuye en todo el estuario y la fase se retrasa en todas partes por igual.



**Figura 20. Admitancia y desfase de la componente  $M_2$  de marea. Se hace una simulación con la componente  $M_2$  de marea contemplando una batimetría con la barra de arena 30% menos profunda y se compara contra otra simulación de la  $M_2$  con una batimetría “actual” del 2010. No se toman en cuenta aportes por agua dulce.**

Algo importante a tener en consideración es que no se conoce la fecha a la que correspondería cada batimetría con las diferentes profundidades o espesor de la barra de arena. Por este motivo en la figura 21 se muestra un intento por acomodar los resultados de admitancia y diferencia de fase obtenidos por el modelo de dos capas en distintos años, de acuerdo a la mejor aproximación del ajuste lineal tanto de la admitancia y desfase de la componente  $M_2$  obtenidas de las observaciones.

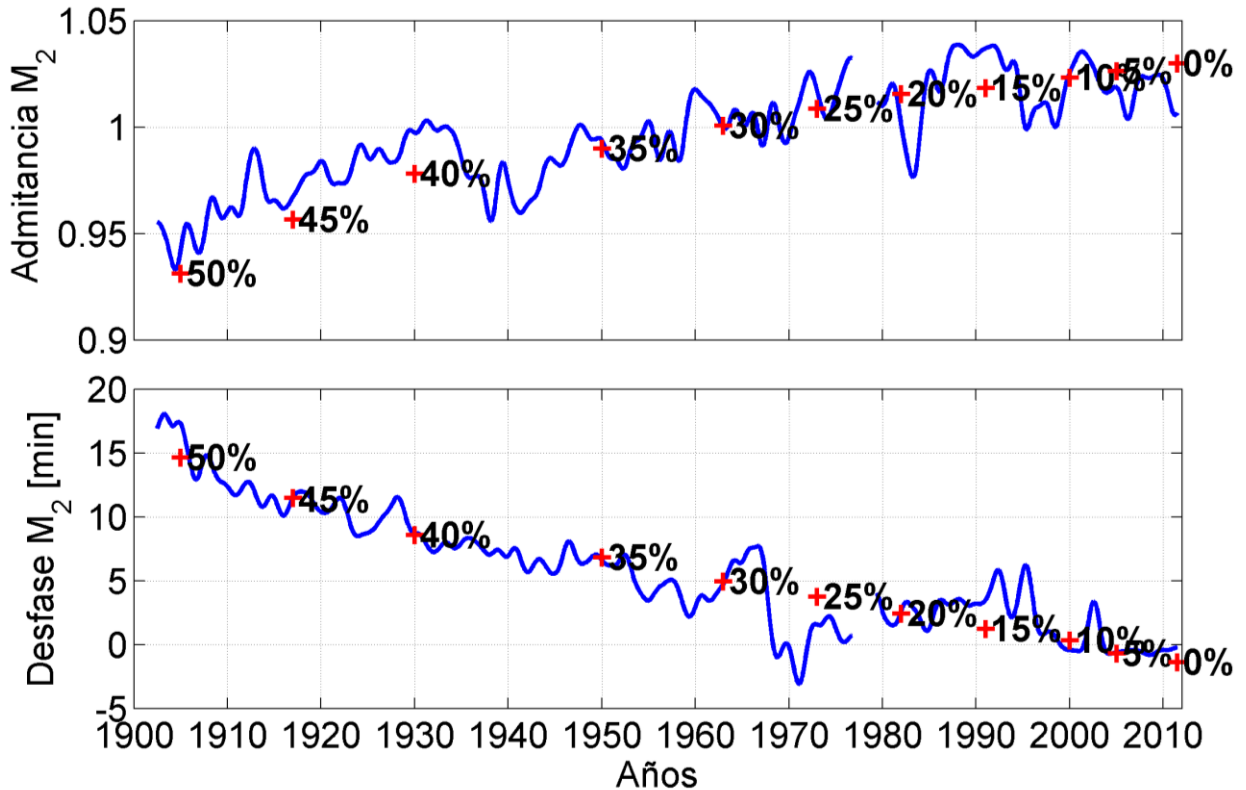
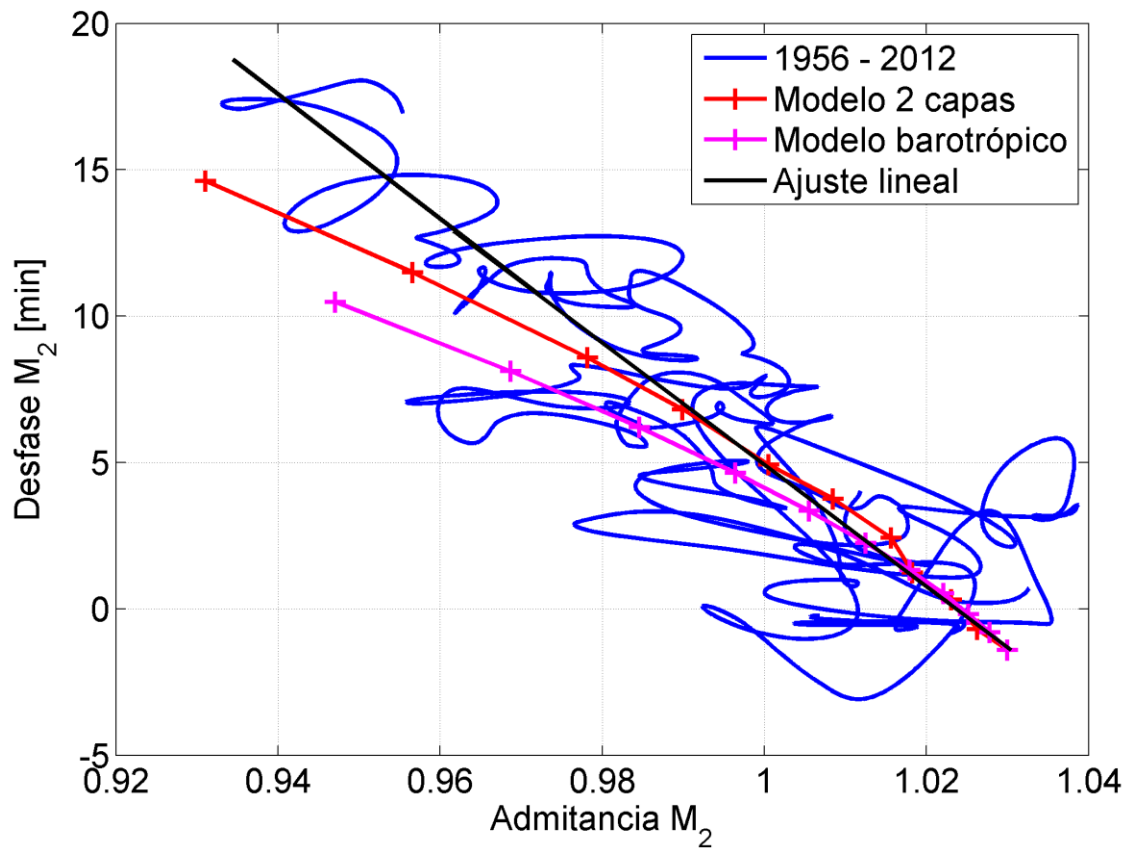


Figura 21. Admitancia y diferencia de fase de la componente  $M_2$  de marea con respecto al año 2011. Las cruces son resultado del modelo de dos capas e indican el porcentaje que se redujo la profundidad de la barra de arena respecto a la batimetría del 2010.

Para no tener que adivinar la fecha exacta en que la barra de arena se fue modificando, se procedió a graficar, en un diagrama de espacio-fase, la admitancia contra la diferencia de fase de las observaciones (figura 22), así como de los resultados, tanto del modelo de dos capas como del modelo barotrópico. A pesar de la gran variabilidad en la traza de las observaciones se aprecia en general la relación inversa de la admitancia y desfase de la componente  $M_2$ , y se aprecia cómo los resultados de ambos modelos (dos capas y barotrópico) tienden a seguir esta relación inversa al hacer variar la profundidad de la barra de arena.



**Figura 22.** Observaciones de admitancia contra diferencia de fase de la componente  $M_2$  correspondientes a los años 1956-2012 (línea azul; la línea negra representa su ajuste lineal y corresponde a los cambios seculares en la componente  $M_2$  de marea). La línea roja y la línea morada son resultados obtenidos mediante el modelo de dos capas y el modelo barotrópico, respectivamente.

La variabilidad en la traza de las observaciones corresponde a las variaciones de corto plazo de la componente  $M_2$  originadas por cambios en la descarga del río (al menos para la admitancia). La tendencia lineal de dichas observaciones representa en sí, los cambios seculares o variaciones de baja frecuencia de la fase y de la admitancia (y por ende de la amplitud) de la componente  $M_2$ . Los resultados tanto del modelo de dos capas como del modelo barotrópico se aproximan bastante bien al ajuste lineal de las observaciones. Este hecho valida la hipótesis de que los cambios seculares observados en la componente  $M_2$  deben su origen y están en función de los cambios en la morfología de la barra de arena que se encuentra situada en el exterior de la bahía en la vecindad de la boca del estuario.

## Capítulo 5. Discusión

---

### 5.1 Interacción entre la descarga del delta Sacramento-San Joaquín y la marea (variaciones de periodo corto)

Las variaciones del flujo del río están relacionadas de manera no lineal con las variaciones de corto plazo de la amplitud de la marea; en particular, la amplitud de la componente  $M_2$  de marea se ve amortiguada conforme el flujo del río aumenta. A diferencia del modelo barotrópico, el modelo de dos capas logra recrear de manera satisfactoria el comportamiento de la admitancia (amplitud) de la  $M_2$  ante distintos escenarios de descargas de río. La atenuación de la amplitud de la componente  $M_2$  de marea se debe a que el río (la capa de agua dulce asociada) actúa como un reductor de del área por donde ingresa el flujo de la marea en la boca del estuario, sin que necesariamente aumente la velocidad del flujo, debido a que no está aumentando el gradiente de presión entre el mar abierto y la boca del estuario.

### 5.2 Interacción entre la barra de arena submarina y la marea (variaciones de periodo largo; cambios seculares)

Se rechaza la hipótesis que sugiere que los cambios seculares de la marea se deben a la reducción en el caudal del río. Sin embargo, es la reducción del aporte de sedimento (en gran medida debido a la construcción de presas) lo que regula la morfología de la barra de arena (localizada en la boca del estuario) y modifica las constantes armónicas. Esto explica la correlación cualitativa que existe entre los cambios de fase de la componente  $M_2$  y la construcción de presas. Por otra parte, es importante notar que tanto el modelo de dos capas como el modelo barotrópico son congruentes para explicar las tendencias a largo plazo de las observaciones.

La contribución de esta tesis al conocimiento universal permite interpretar los cambios observados en las componentes armónicas en otras localidades. En general, es de esperar adelantos de fase significativos en los estuarios importantes por la descarga de grandes ríos, debido a que todos los grandes ríos han sido represados en los últimos cien años. Por ejemplo, con base en los resultados de este estudio, se presume que los



cambios de fase de la marea observados en el estuario de Astoria, Oregon (figura 23), se deben a la construcción de grandes presas.

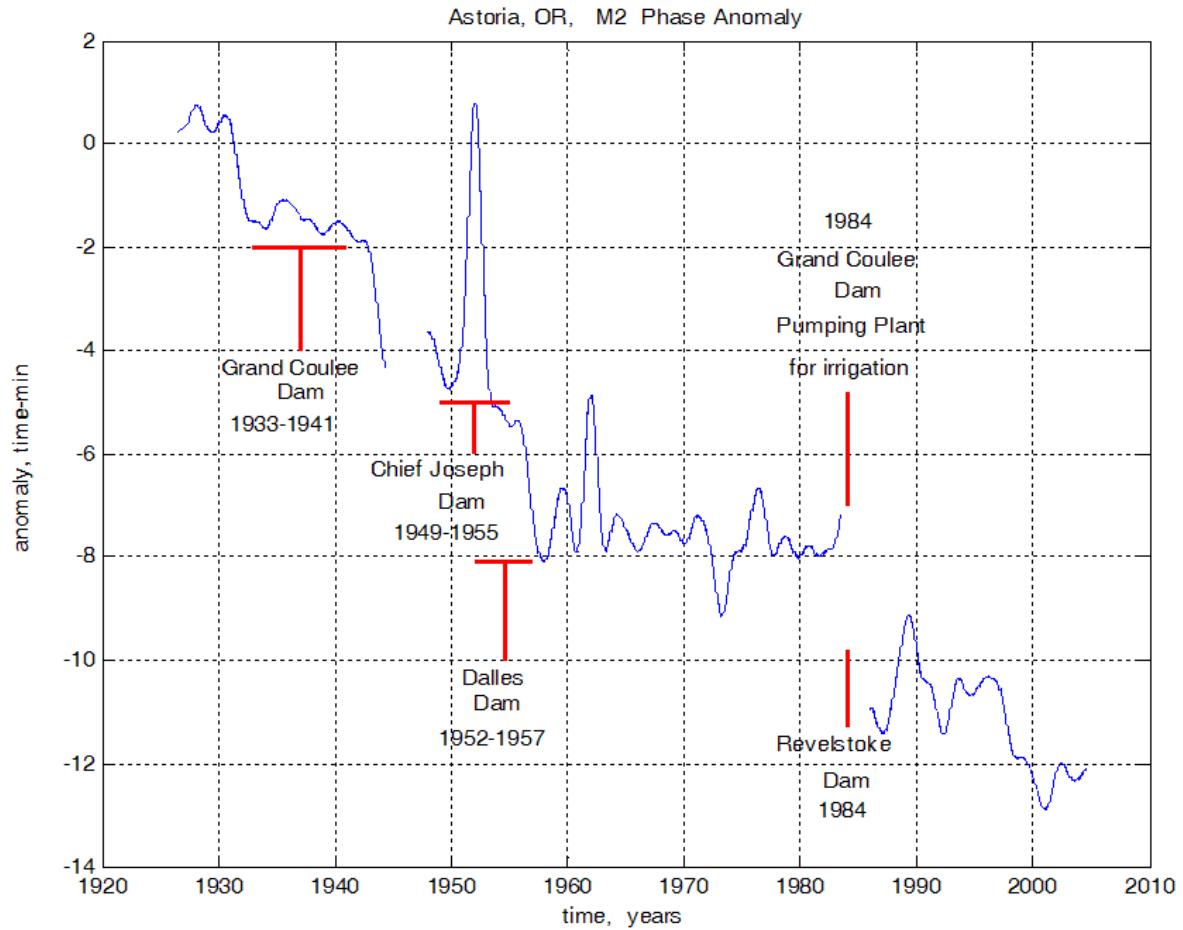


Figura 23. Correlación cualitativa entre los cambios de fase observados en la componente  $M_2$  de la marea en el estuario del Río Astoria, Oregon, y las fechas de construcción de grandes presas río arriba. Figura tomada de Ortiz (2007).

## Capítulo 6. Conclusiones

---

La conclusión más significativa del presente trabajo expone que los cambios seculares observados en las componentes armónicas de marea, es decir en la amplitud y fase, se encuentran estrechamente relacionados con las variaciones morfológicas de una barra de arena situada a la entrada de la boca de la Bahía de San Francisco. La descarga de agua dulce proveniente del delta Sacramento-San Joaquín no contribuye con dichos cambios seculares, sin embargo es la causante de las variaciones de corto plazo en la amplitud de la componente  $M_2$ . Finalmente se puede decir que el modelo de dos capas es capaz de reproducir dichas variaciones de corto plazo más no así el modelo barotrópico (figura 14).

## Lista de referencias bibliográficas

- Amin, M. (1983). *On perturbations of harmonic constants in the Thames Estuary*. *Geophysical Journal International*, 73(3), 587-603.
- Amin, M. (1993). *Changing mean sea level and tidal constants on the west coast of Australia*. *Marine and Freshwater Research*, 44(6), 911-925.
- Araujo, I.G. de B. (2006) *Sea level variability: examples from the Atlantic coast of Europe*. University of Southampton, Faculty of Engineering Science and Mathematics, School of Ocean and Earth Science, Doctoral Thesis , 216 p.
- Bloomfield, P. (1976). *Fourier Decomposition of Time Series, An Introduction*. Wiley, New York, 258 p.
- Bowen, A. J. (1972). *The tidal regime of the River Thames; long-term trends and their possible causes*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 272(1221), 187-199.
- Castillo, M. and C. Valenzuela (2006). *Régimen de circulación en canales y fiordos australes*. En: *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. N. Silva & S. Palma (eds.), 59-62 p.
- Carignan, K.S., L.A. Taylor, B.W. Eakins, R.J. Caldwell, D.Z. Friday, P.R. Grothe, and E. Lim, (2011). *Digital Elevation Models of Central California and San Francisco Bay: Procedures, Data Sources and Analysis*, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-52, U.S. Dept. of Commerce, Boulder, CO, 49 pp. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/dem/squareCellGrid/download/739>
- Cartwright, D. E. (1972). *Secular changes in the oceanic tides at Brest, 1711–1936*. *Geophysical Journal International*, 30(4), 433-449.
- Colosi, J. A., and Munk, W. (2006). *Tales of the Venerable Honolulu Tide Gauge\**. *Journal of physical oceanography*, 36(6), 967-996.
- DAYFLOW Data, 2013. California Department of Water Resources. Recuperado en junio 2015 de: <http://www.water.ca.gov/dayflow/output>
- Doodson, A. T. (1924). *Perturbations of harmonic tidal constants*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 513-526.

- Flather, R. A., T. F. Baker, P. L. Woodworth, I. M. Vassie, and D. L. Blackman (2001). *Integrated effects of climate change on coastal extreme sea levels*. Proudman Oceanographic Laboratory Internal Document No.140, 20 p.
- Foreman, M.G.G. (1977). *Manual for tidal heights analysis and prediction, Pacific Marine Science Report 77-10*. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, BC, 97 p.
- Foxgrover, A. C., Higgins, S. A., Ingraca, M. K., Jaffe, B. E. and Smith, R. E. (2004). *Deposition, erosion, and bathymetric change in South San Francisco Bay: 1858-1983* (p. 25). US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Fregoso, T. A., Foxgrover, A. C., and Jaffe, B. E. (2008). *Sediment deposition, erosion, and bathymetric change in central San Francisco Bay: 1855-1979*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1312., 41 p.
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N., and F. Imamura, (1997). *IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme*. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides \# 35, Paris, 4 Parts.
- Hanes, D. M. and Barnard, P. L. (2007). *Morphological Evolution in the San Francisco Bight*. Journal of Coastal Research, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), pg – pg. Gold Coast, Australia, ISBN.
- Imamura, F. and Imteaz, M. A. (1995). *Long Waves in Two-Layers: Governing Equations and Numerical Model*. *Sci. of Tsunami Hazards*, Vol. 13, No. 1, 3-24 p.
- Iwasaki, T. and Mano, A. (1979). *Two dimensional numerical simulation of tsunami run-ups in the Eulerian description*. Proc. 26th Conf. Coastal Eng., JSCE, 70-74 p.
- Jay, D. A. (2009). *Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean*. Geophysical Research Letters, 36(4).
- Jaffe, B. E. and Foxgrover, A. C. (2006). *Sediment Deposition and Erosion in South San Francisco Bay, California from 1956 to 2005*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1287, 24 p.
- Jaffe, B. E., Smith, R. E., and Torresan, L. Z. (1998). *Sedimentation and bathymetric change in San Pablo Bay, 1856-1983*. Geological Survey.
- Mawdsley, R. J., Haigh, I. D., and Wells, N. C. (2015). *Global secular changes in different tidal high water, low water and range levels*. *Earth's Future*, 3(2), 66-81.

- Moftakhari, H. R., D. A. Jay, S. A. Talke, T. Kukulka, and P. D. Bromirski. (2013). *A novel approach to flow estimation in tidal rivers*. *Water Resour. Res.*, 49, 4817–4832, doi:10.1002/wrcr.20363.
- Mudersbach, C., Wahl, T., Haigh, I. D., and Jensen, J. (2013). *Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes*. *Continental Shelf Research*, 65, 111-120.
- Müller, M., Arbic, B. K., and Mitrovica, J. X. (2011). *Secular trends in ocean tides: Observations and model results*. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 116(C5).
- Nichols, F. H., Cloern, J. E., Luoma, S. N., and Peterson, D. H. (1986). *The modification of an estuary*. *Science*(Washington), 231(4738), 567-573.
- Ortiz, M. (2007). *Secular changes in the harmonic tidal components. Global warming? Man-made changes?*. Proceedings of the first International Meeting of Students in Physical Oceanography held at CICESE, Ensenada, B. C. México, June 27-29, 2007.
- Pickering, M. D., Wells, N. C., Horsburgh, K. J., and Green, J. A. M. (2012). *The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides*. *Continental Shelf Research*, 35, 1-15.
- Pugh, D., and Woodworth, P. (2014). *Sea-level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-level Changes*. Cambridge University Press.
- Ray, R. D. (2006). *Secular changes of the M2 tide in the Gulf of Maine*. *Continental shelf research*, 26(3), 422-427.
- Ray, R. D. (2009). *Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean*. *Geophysical Research Letters*, 36(19).
- Torres, R. R., and Tsimplis, M. N. (2011). *Tides and long-term modulations in the Caribbean Sea*. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 116(C10).
- UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center), 2011. University of Hawaii Sea Level Center, Recuperado en Junio 2015 de: <http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/download/fd>

U.S. Environmental Protection Agency, 2015, San Francisco Estuary Project Web site, 2015, Recuperado en Agosto 2015 de: <http://www2.epa.gov/sfbay-delta/about-watershed>

Wetzel, A. N., Arbic, B. K., Cerovecki, I., Hendershott, M. C., Karsten, R. H., Miller, P. D., and Molinari, J. F. (2013). *On stratification, barotropic tides, and secular changes in surface tidal elevations: Two-layer analytical model*. arXiv preprint arXiv:1311.6349.

Woodworth, P. L. (2010). *A survey of recent changes in the main components of the ocean tide*. Continental Shelf Research, 30(15), 1680-1691.

Zaron, E. D., and Jay, D. A. (2014). *An analysis of secular change in tides at open-ocean sites in the Pacific*. Journal of Physical Oceanography, 44(7), 1704-1726.

## Apéndice

---

### Demodulación Compleja

La Demodulación Compleja (DC) es un método que consiste en determinar a partir de una serie temporal, los cambios instantáneos tanto de la amplitud como de la fase de una frecuencia en particular. Se puede considerar como una versión local del análisis armónico con la ventaja de que la amplitud y la fase se obtienen en función del tiempo.

Siguiendo la explicación de Bloomfield (1976), supóngase un conjunto de datos  $x(t)$  que consta de una componente periódica más un término que incluye todas las demás contribuciones no periódicas ( $\xi(t)$ ):

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)] + \xi(t) \quad (16)$$

$$= \frac{1}{2} A(t) \{ e^{i[2\pi f_0 t + \phi(t)]} + e^{-i[2\pi f_0 t + \phi(t)]} \} + \xi(t), \quad (17)$$

donde la amplitud  $A(t)$  y la fase  $\phi(t)$  pueden variar continuamente en el intervalo de frecuencia,  $f_0 + \varepsilon$ . El procedimiento para obtener las variaciones en amplitud y fase consiste primero en multiplicar  $x(t)$  por la función  $e^{-2\pi i f_0 t}$ , esto con el fin de correr la frecuencia de interés  $f_0$  hacia el origen de manera que quede localizada en  $f = 0$ .

$$y(t) = x(t) e^{-2\pi i f_0 t} \quad (18)$$

$$= \underbrace{\frac{1}{2} A(t) e^{i\phi(t)}}_{(a)} + \underbrace{\frac{1}{2} A(t) e^{-i[4\pi f_0 t + \phi(t)]}}_{(b)} + \underbrace{\xi(t) e^{-2\pi i f_0 t}}_{(c)} \quad (19)$$

El término  $(b)$  y  $(c)$  oscilan a las frecuencias  $4f_0$  y  $2f_0$  respectivamente. El siguiente paso es separar el término  $(a)$  de los otros dos mediante el uso de un filtro lineal y simétrico  $g(t)$  con frecuencia de corte  $f_c = \varepsilon$  y respuesta unitaria en  $f = 0$ . La señal compleja demodulada,  $z(t)$ , se define entonces como la convolución del producto de  $x(t) e^{-2\pi i f_0 t}$  con el filtro  $g(t)$ .

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-2\pi i f_0 \tau} g(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

La amplitud y la fase demoduladas estarán dadas por:

$$A(t) = |z(t)| \quad ; \quad e^{i\phi(t)} = \frac{z(t)}{|z(t)|} \quad (21)$$

en donde la frecuencia instantánea estará dada por:

$$f(t) = f_0 + \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (22)$$

Finalmente cabe mencionar que la elección del filtro dependerá siempre del problema en particular y de las propiedades de  $x(t)$ . Para el presente trabajo se utilizó el filtro de Godin, que tiene la propiedad de ser un filtro de tipo recursivo y la ventaja de ser computacionalmente rápido.

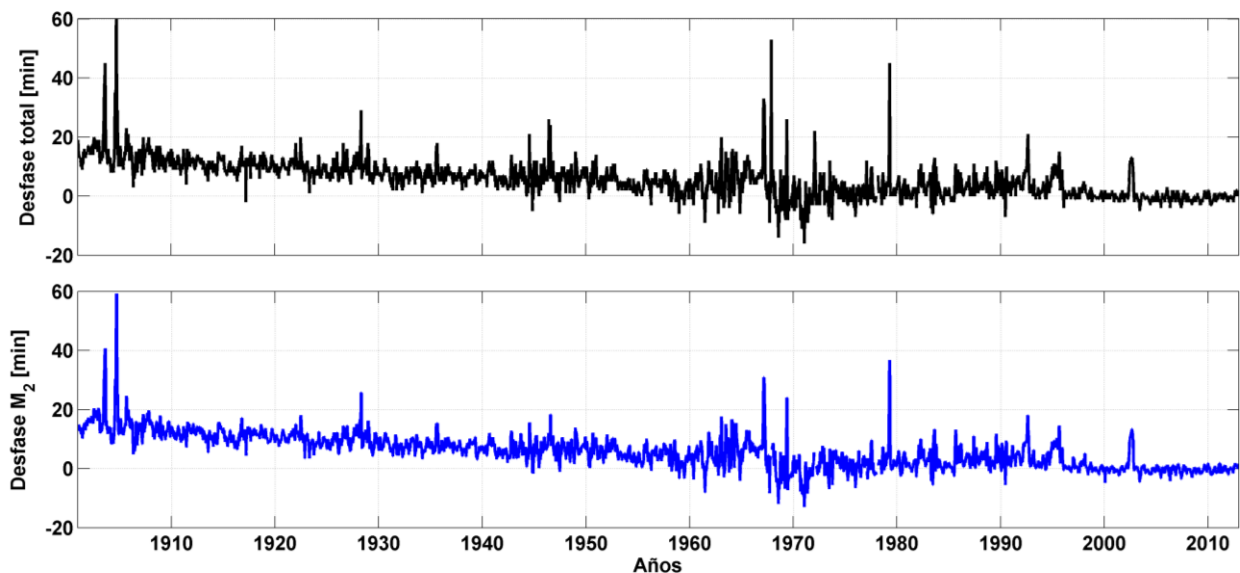
### **Criterio de Rayleigh**

Además de elegir un método (ya sea análisis armónico o demodulación compleja) para identificar cambios en la amplitud y en la fase de las componentes de marea, surge la interrogante de determinar cuál es la resolución de frecuencia mínima necesaria para identificar dichas variaciones. La respuesta a esta pregunta se obtiene con base al criterio de Rayleigh, que manifiesta que dos componentes adyacentes de frecuencia se pueden resolver mientras se mantengan separados por una diferencia de frecuencia de  $\Delta f = f_0 = 1/N\Delta t$ . Siguiendo el criterio de Rayleigh e inspeccionando la “distancia” mínima entre cada una de las componentes de marea, se llegó a la conclusión de que se necesita al menos 1 año de datos horarios de nivel del mar para resolver correctamente cada una de las componentes de marea, o lo que es lo mismo, cualquier método que se utilice para identificar cambios en las componentes de marea está limitado solamente a encontrar variaciones de baja frecuencia ( $< 1$  ciclo/año), siempre y cuando se utilicen registros horarios de nivel del mar.



## Todas las componentes de marea se comportan igual

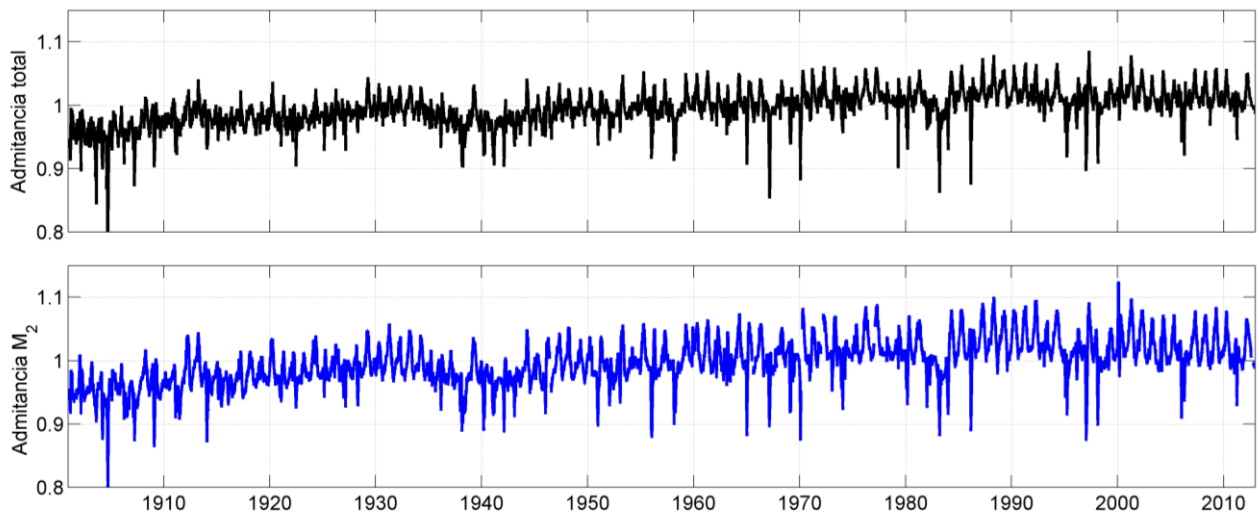
Se llevó a cabo un experimento con la finalidad de averiguar si todas las componentes de la marea se desfasaban por igual, o si únicamente se trataba de un caso en particular de la componente  $M_2$ . Para ello, se elaboró primeramente una predicción de marea sobre todo el periodo de registro de datos utilizando las constantes armónicas del año 2011. A continuación se interpolaron con el método de splines los datos horarios, tanto de las observaciones de nivel del mar como de la predicción, a un dato por minuto. Finalmente se hizo una correlación cruzada, a intervalos de un ciclo de mareas vivas, entre los datos de nivel del mar y la predicción hecha con base al 2011, esto con el fin de calcular el desfase que contempla a todas las componentes de marea. Como se muestra en la figura 24, parece ser que todas las componentes de marea se desfasan por igual y se desfasan de la misma manera que la componente  $M_2$ .



**Figura 24.** La figura superior muestra el desfase de la correlación máxima que existe entre el nivel del mar y la predicción de marea del 2011. La figura inferior muestra el desfase de la componente  $M_2$  respecto al año 2011.

Asimismo, para investigar si las amplitudes de todas las componentes de marea seguían el mismo comportamiento que la amplitud de la componente  $M_2$ , se llevó a cabo el siguiente procedimiento. A intervalos de cada ciclo de mareas vivas se realizó un diagrama de dispersión de datos de nivel del mar contra datos de predicción del

nivel del mar con base al año 2011. A cada conjunto de datos se le ajustó una recta y se le calculó su respectiva pendiente; dicha pendiente se puede interpretar como una admitancia en bruto de la marea respecto a la predicción del 2011. La figura 25 muestra cómo la admitancia en bruto muestra el mismo patrón que la admitancia formal de la componente  $M_2$  de marea con respecto al pronóstico.



**Figura 25.** La figura superior muestra la admitancia en bruto de la marea con respecto al pronóstico con base en el 2011. La figura inferior muestra la admitancia de la componente  $M_2$  de la marea, con respecto a la amplitud del pronóstico de marea con base en el año 2011.