

TESIS DEFENDIDA POR
Rafael Ramírez Mendoza
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Luis Gustavo Álvarez Sánchez
Director del Comité

Dr. Silvio Guido L. Marinone Moschetto
Miembro del Comité

Dr. Luis Zavala Sansón
Miembro del Comité

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas
Miembro del Comité

Dr. Luis Zavala Sansón
*Coordinador del programa de posgrado
en Oceanografía Física*

Dr. Edgar G. Pavía López
Director de Estudios de Posgrado

Mayo de 2007

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**VARIABILIDAD DEL MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN
DEBIDO A MAREA EN EL ALTO GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

RAFAEL RAMÍREZ MENDOZA

Ensenada, Baja California, México, Mayo de 2007

RESUMEN de la tesis de **RAFAEL RAMÍREZ MENDOZA**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **OCEANOGRAFÍA FÍSICA**. Ensenada, Baja California. Mayo de 2007.

**VARIABILIDAD DEL MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN
DEBIDO A MAREA EN EL ALTO GOLFO DE CALIFORNIA**

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Gustavo Álvarez Sánchez
Director de Tesis

El Alto Golfo de California (AGC) tiene uno de los rangos mas amplios de marea (~ 7 m) y fuertes corrientes ($\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), los cuales son factores importantes para la resuspensión de sedimento del fondo. La concentración del material particulado en suspensión (MPS) en la columna de agua cambia con la fase de la marea y con la granulometría del sedimento de fondo. Este trabajo combina observaciones de turbidez y los resultados de un modelo hidrodinámico bidimensional con forzamiento de las componentes M_2 y S_2 de la marea. Se calcularon perfiles de concentración de MPS en el AGC durante un ciclo quincenal de marea con base en el modelo de Rouse. Las observaciones y los resultados del modelo numérico se utilizaron para encontrar la forma de la relación para calcular la concentración de referencia de MPS cerca del fondo que utiliza el modelo de Rouse. Los coeficientes de la relación cambian con base en las observaciones de turbidez y la concentración de referencia calculada está de acuerdo con la granulometría del sedimento de fondo. Los resultados reprodujeron la variabilidad quincenal y cuartidurna de la concentración de MPS observada. Las concentraciones máximas se obtuvieron cerca del fondo durante mareas vivas mientras que los mínimos en períodos de mareas muertas. En los ciclos cuartidurnos la concentración aumenta cuando la corriente es rápida y disminuye cuando la corriente es lenta. La distribución horizontal de la concentración de MPS calculada presentó mayores concentraciones hacia la cabeza del AGC y del lado de Baja California, y los mínimos en el extremo sureste del AGC. La variabilidad espacial y temporal calculada está de acuerdo con estudios cualitativos reportados. Los máximos de concentración se obtuvieron donde el sedimento es predominantemente fino (oeste y noroeste), en los períodos de máximo esfuerzo de la corriente sobre el fondo, cuando la resuspensión es más efectiva y en las zonas someras. Los mínimos de concentración se obtuvieron del lado de Sonora, donde el sedimento es mas grueso, la resuspensión debida al esfuerzo de la corriente es menor y en las áreas profundas. La concentración más alta obtenida fue $150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ durante mareas vivas, cerca del fondo, mientras que en mareas muertas fue menor a $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En la comparación con estaciones fijas, la concentración de MPS calculada subestimó la concentración observada durante períodos de corriente lenta, mientras que en los máximos de corriente las diferencias fueron mínimas.

Palabras Clave: Alto Golfo de California, resuspensión de sedimentos, ecuación de Rouse, material particulado en suspensión

ABSTRACT of the thesis presented by **RAFAEL RAMÍREZ MENDOZA**, as a partial fulfillment to obtain MASTER IN SCIENCE degree in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California. May, 2007.

SUSPENDED PARTICULATE MATTER VARIABILITY DUE TO TIDE IN THE UPPER GULF OF CALIFORNIA

The Upper Gulf of California (UGC) has one of the highest tidal ranges (~ 7 m) and strong currents ($\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), which are important factors for the resuspension of bed sediments. Suspended particulate matter (SPM) concentration in the water column changes with the phase of the tidal cycle and with bed sediment granulometry. This study combines turbidity observations and results of a hydrodynamic two-dimensional model forced with M_2 and S_2 tidal constituents. SPM concentration profiles were computed for the UGC, during a fortnightly tidal period, based in the Rouse model. Based on the observations and the numerical model results a relationship was found for assessing the near-bed reference SPM concentration required by the Rouse model. The relationship linking computed current speed and observed near bed concentration reflect the bed sediment granulometry. The results reproduce fortnightly and quarter-diurnal SPM concentration variability. The maximum values were obtained near-bed during spring tides while minimum values were obtained in neap tides. Within a quarter-diurnal cycle the concentration is high in peak currents and low during slack current periods. The SPM horizontal distribution concentration computed shows the maximum concentration at the head of the UGC on the Baja California side, and the minimum values at the south-east side of the UGC. The spatial and temporal variability computed is in agreement with expected values based in earlier studies. The concentration maxima were obtained where fine sediment (west and north-west) dominate, at maximum bed shear stress current periods, and over the shallow areas. The concentration minima were obtained on the Sonora side, where coarser sediment dominate, the resuspension due to shear stress current is lower, and in deeper areas. The highest concentration obtained was $150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ during spring tides, near the bed; the lowest concentration was less than $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ in neap tides. A comparison of the observed and computed SPM concentrations at fixed sites showed underestimation of the observed concentration during slack current periods, while minimum differences were obtained during peak current periods.

Keywords: Upper Gulf of California, sediment resuspension, Rouse equation, suspended particulate matter

Dedicatoria

Para Aglael

porque a tu lado culaquier reto es alcanzable

Agradecimientos

Este trabajo fué posible en gran medida al apoyo de mi director de tesis y jefe inmediato Luis G. Álvarez, desde lograr que los muestreos utilizados se llevaran a cabo hasta darle forma decente al escrito final. Agradezco a mis sinodales, Guido Marinone, Luis Zavala y Arturo Martín Barajas por su activa participación durante todo el proceso de la tesis.

Un agradecimiento especial a los que de muchas formas, no solo por trabajo sino también por amistad me brindaron su ayuda incondicional: Victor M. Godínez, Carlos E. Cabrera, Salvador Sánchez y Arturo I. Ocampo.

La mayor parte de los datos de material particulado en suspensión se obtuvieron durante cruceros en los cuales el Dr. Miguel F. Lavín nos dió la oportunidad de conectar los turbidímetros al CTD.

Este estudio no hubiera sido posible sin la autorización del CICESE y sobre todo del apoyo en todo momento del Departamento de Oceanografía Física.

Un reconocimiento a la tripulación del B/O Francisco de Ulloa y al técnico Juan Fco. Moreno por su arduo trabajo y apoyo en todas las campañas.

Este estudio forma parte del proyecto CONACyT PCI-50668: "Movilidad de sedimentos superficiales del Alto Golfo de California".

Contenido

I	Introducción	1
I.1	Área de estudio	2
I.2	Antecedentes	6
II	Objetivos	15
III	Metodología	16
III.1	Modelo de Rouse	16
III.1.1	Valor de β	19
III.1.2	Constante de von Karman κ	19
III.1.3	Velocidad de asentamiento de las partículas w_s	19
III.1.4	Modelo numérico de marea	20
III.1.5	Altura de la columna de agua h	22
III.1.6	Velocidad de fricción u_*	22
III.1.7	Concentración de referencia C_a	23
III.2	Cálculo de la distribución espacial y temporal de MPS	28
IV	Resultados	29
IV.1	Marea y corriente del modelo numérico y de observaciones	29
IV.2	Concentración de referencia y velocidad de la corriente	33
IV.3	Comparación de concentración de MPS calculada y medida	40
IV.3.1	Distribución vertical de MPS durante variaciones diurnas	40
IV.3.2	Ciclo quincenal de MPS	46
IV.4	Distribución espacial de la concentración de MPS calculada	49
IV.4.1	Mareas vivas	49
IV.4.2	Mareas muertas	56
IV.4.3	Comparación de concentración de MPS y coeficiente de atenuación de luz	63
V	Discusión	65
V.1	Introducción	65
V.2	Distribución espacial de la concentración de MPS en mareas vivas	66
V.3	Distribución espacial de la concentración de MPS en mareas muertas	68

Contenido (continuación)

V.4	Comparaciones de concentración de MPS calculada y observada	70
V.4.1	Ciclos diurnos	70
V.4.2	Ciclo quincenal	73
V.4.3	Alcances del cálculo de la concentración de MPS	74
V.5	Concentración de referencia	76
V.6	Modelo numérico	77
VI	Conclusiones	79

Índice de figuras

Figura		Página
1	Localización y batimetría del área de estudio (de Álvarez-Sánchez, 2003).	3
2	Variación espacial del tamaño de grano promedio en el delta y el Alto Golfo de California (Carriquiry y Sánchez, 1999).	7
3	a) Posición de transectos y contornos batimétricos en metros, b) concentración de MPS para el transecto A y c) concentración de MPS para el transecto B (Álvarez y Jones, 2001).	8
4	a) Posición de las estaciones W3 y E1. Para la estación W3, b) y c) muestran para mareas muertas y mareas vivas respectivamente, la velocidad de la corriente a 1.5 m de altura sobre fondo girada al eje del AGC y la concentración de MPS (Álvarez-Sánchez, 2003).	9
5	En la estación E1 (ver figura 4a), a) y b) muestran, para mareas vivas y mareas muertas respectivamente, la velocidad de la corriente girada al eje del Golfo de California a 4.5 m de altura sobre fondo y la concentración de MPS (Álvarez-Sánchez, 2003).	10
6	Concentración de MPS con corriente menor a $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Álvarez y Jones, 2004).	11
7	Perfiles de concentración de MPS ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en mareas vivas (MV), observado y calculado con base en el modelo de Rouse de 1938 (Loo-Fierro, 2003).	12
8	Flujo turbulento vertical $\overline{w'c'}$ y flujo de asentamiento de las partículas $\overline{C}w_s$, donde C es la concentración, w es la componente vertical de la velocidad de la corriente y w_s la velocidad de asentamiento de las partículas.	17
9	Perfiles de concentración de MPS obtenidos de la ecuación de Rouse para diferentes valores de B . Con $C_a = 50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, $h = 30 \text{ m}$ y $a = 1.5 \text{ m}$. . .	18
10	Batimetría (en metros) del Alto Golfo de California.	21
11	Posiciones en las que se midieron perfiles de CTD y de concentración de MPS durante mareas vivas en el Alto Golfo de California.	24
12	a) turbidímetro, b) dimensiones y c) diseño óptico.	25

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
13	Posición de los anclajes con observaciones de variaciones diurnas (W3 y E1), serie de tiempo y velocidad (W3) y concentración de MPS (W3 y E1).	30
14	Comparación de observaciones y resultados del modelo numérico para el sitio W3. a) rapidez, b) diferencia entre la rapidez observada y modelada, c) nivel del mar, d) diferencia entre nivel del mar observado y calculado.	31
15	Ejemplos de distribución espacial del nivel del mar (figuras de contornos en metros, lado izquierdo) y velocidad de la corriente (figuras del lado derecho) obtenidas del modelo numérico.	32
16	Rapidez de la corriente obtenida del modelo numérico y concentración de referencia observada en campañas oceanográficas.	34
17	Sitios de observación de concentración de referencia agrupados en 15 zonas del AGC. Los símbolos indican los perfiles incluidos en cada grupo.	35
18	Observaciones y curvas de ajuste para cada grupo de datos. Los tonos de gris identifican a que curva pertenecen los muestreos. a) Grupos 1 y 2, b) grupos 3, 4 y 5, c) grupos 6, 7 y 8, d) grupos 9, 10 y 11, e) grupos 12, 13 y 14 y f) grupo 15.	37
19	Distribución espacial de la concentración de referencia C_a de MPS calculada para la corriente máxima. a) Calculada con promedios de E, F , b) calculada con E, F variables para cada grupo de datos.	39
20	Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio W3 en mareas vivas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical.	42
21	Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio E1 en mareas vivas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala entre esta figura y la figura 20.	44
22	Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio W3 en mareas muertas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala de esta figura y las de las figuras 20 y 21.	45

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
23	Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio E1 en mareas muertas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala de esta figura y las de las figuras 20 y 21.	47
24	Series de tiempo para el sitio W3 de concentración de MPS observado y extraído de los perfiles de MPS calculados con el modelo de Rouse. a) Ciclo quincenal completo, b) sección de días 11 a 16, c) sección de días 16 a 21 y d) sección de días 21 a 26.	48
25	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	51
26	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	52
27	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	53
28	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	54
29	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	55
30	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	58
31	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	59
32	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	60
33	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	61
34	Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.	62

Índice de figuras (continuación)

Figura		Página
35	Comparación de la distribución espacial superficial del coeficiente de atenuación de luz observado en imagen de satélite durante mareas vivas del 29 de agosto de 1997 a ~21:30 (GMT) y la correspondiente distribución espacial superficial de MPS calculada.	64

Índice de tablas

Tabla	Página
I	Campañas de medición con CTD y turbidímetro. 24
II	Observaciones y resultados del modelo para la componente M_2 29
III	Criterios cualitativos para separar los datos en 15 grupos diferentes. 36
IV	Resultados del ajuste por mínimos cuadrados. 38

I

Introducción

Si la zona costera es la región donde los continentes y el océano se traslapan, los estuarios son el lugar donde realmente se enfrentan (Tomczack y Godfrey, 1994). A lo largo de muchas costas la interacción entre tierra y mar se hace más compleja por la acción de la marea y sus corrientes. La mezcla turbulenta resultante presenta interesantes problemas hidrodinámicos. Los estuarios existen en muchas formas, desde planicies costeras a fiordos, pero todos tienen el rasgo común de ser zonas donde los ríos y mares se juntan e interactúan (Dyer, 1977).

Los estuarios han sido aprovechados de diferentes formas: la presencia de agua dulce ha favorecido los asentamientos humanos; la pesca comercial y la acuicultura se han explotado en algunos casos; se han construido pequeños puertos para embarcaciones menores donde se usa la protección de los estuarios de tipo semicerrado; la industria se beneficia de los estuarios al usar el agua para sistemas de enfriamiento o usándolos como depósitos de agua de desecho; en otros lugares su importancia es de carácter recreativo, desde simple vista panorámica hasta actividades de pesca deportiva, natación, etc.

Un estuario puede ser definido en una variedad de formas que dependen del punto de vista. Para la mayoría de los oceanógrafos, ingenieros y naturalistas, los estuarios son áreas de interacción entre agua dulce y agua salada (Dyer, 1977). Estos son conocidos como positivos y para incluir otros tipos se deben tomar en cuenta tres características en la definición: la primera permite que la entrada hacia el mar sea intermitente; la segunda es el caso del estuario inverso, donde la evaporación excede el aporte de agua dulce y la tercera que debe ser angosto. Por lo tanto, un estuario es un cuerpo de agua

costero semicerrado y angosto con conexión libre hacia el mar abierto, por lo menos intermitentemente y dentro del cual la salinidad es claramente distinta de la de mar abierto (Tomczack y Godfrey, 1994).

Los estuarios reciben grandes cantidades de material en suspensión, principalmente de ríos y en menor medida de otros factores localmente importantes (Eisma, 1993). En conjunto con los mecanismos de resuspensión y transporte, el material en suspensión influencia la calidad del agua al estar ligado a procesos químicos y biológicos: puede limitar la producción primaria y afectar la dispersión de contaminantes (Jago y Jones, 1998). Se ha encontrado el efecto inverso, en que la producción fitoplanctónica puede afectar la concentración del material en suspensión, y así influir en la dinámica (Jones *et al.*, 1998).

I.1 Área de estudio

Uno de los lugares de relevancia económica y natural en México es el Alto Golfo de California (AGC). Es considerado como uno de los ambientes más dinámicos debido a su amplio rango de marea (~ 7 m) y rápidas corrientes generadas ($\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en mareas vivas (Álvarez y Jones, 2001). El Alto Golfo de California está ubicado en la parte norte del Golfo de California (Figura 1), delimitado al oeste por las costas de Baja California, al este por las de Sonora y en la parte norte por la desembocadura del Río Colorado. Aproximadamente 10 km antes de que el río llegue al golfo, el canal principal se divide y forma la isla Montague. Un tercer canal de menor tamaño forma la isla Pelicano del lado este. Hacia el sur y del lado oeste, frente a las costas de Baja California, una suave planicie se extiende desde el nivel medio del mar hasta cerca de 15 m de profundidad y hacia el sur hasta San Felipe, mientras que muy cerca de la costa de Sonora hay

profundidades entre 20 y 30 metros. El fondo es irregular, con crestas y valles paralelos al eje del golfo y pueden alcanzar 30 km de largo hacia la cuenca de Wagner de 200 m de profundidad (Álvarez-Sánchez, 2003).

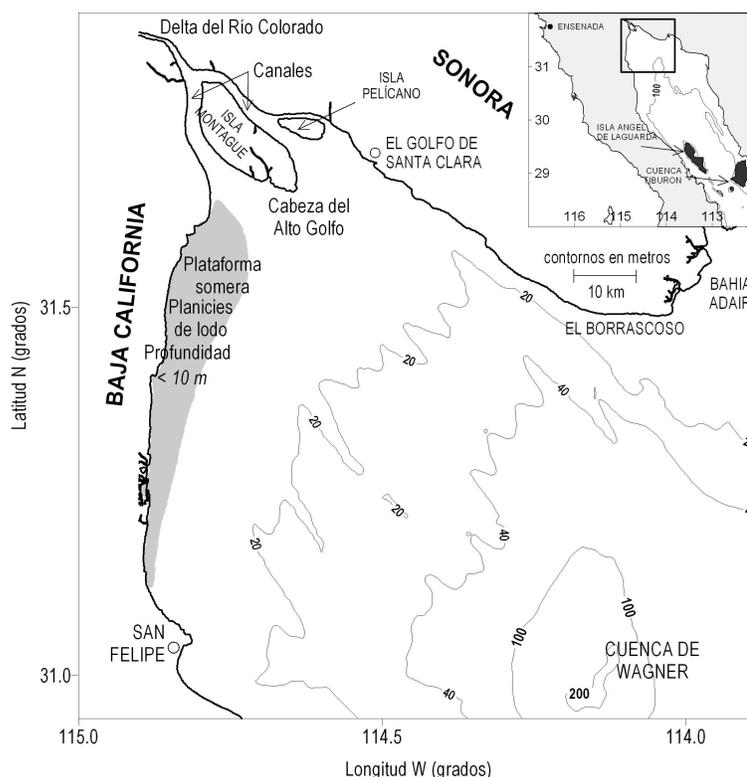


Figura 1: Localización y batimetría del área de estudio (de Álvarez-Sánchez, 2003).

El clima es de tipo continental-árido. La precipitación promedio anual es de 4.5 mm y la evaporación de 1.1 m por año. La temperatura superficial del agua tiene un rango de variación muy amplio a lo largo del año: mientras que en invierno es aproximadamente de 17°C, en verano alcanza los 30°C. La densidad (σ_t) en invierno es alrededor de 26.5, mientras que en verano es de 22.5 (Lavín y Sánchez, 1999). El AGC presenta comportamiento de estuario inverso debido a la baja precipitación y al nulo aporte de agua dulce del Río Colorado (Lavín *et al.*, 1998). La salinidad aumenta desde la boca del golfo, con aproximadamente 35.4 en la entrada y 39 en la cabeza en verano (Lavín

y Sánchez, 1999).

Un estuario clásico requiere de la descarga de agua dulce y sedimentos de ríos a la zona costera, mientras que el estuario inverso en regiones áridas requiere un flujo neto de agua oceánica hacia la cabeza para compensar la pérdida de agua por evaporación (Álvarez y Jones, 2001). El desarrollo del delta del Río Colorado ha estado controlado por la interacción de dos procesos opuestos: el Río Colorado y un rango de marea de los más grandes del mundo (Carriquiry y Sánchez, 1999). Antes de 1930, el aporte de agua dulce del río era de aproximadamente 20×10^9 m³ por año y de 180×10^6 toneladas de sedimento por año (Thompson, 1968). Después de 1930 aumentó la cantidad de campos de cultivo en los Estados Unidos de América (EUA) y disminuyó el aporte del río hacia el delta. Posteriormente se construyeron dos presas: Hoover en 1935 y Glen Canyon en 1963; al terminar de llenarse ésta última el aporte del río era sólo el 4% de lo que se recibía antes de 1935. Los tratados internacionales estipulan que los EUA deben dejar pasar a México 1.8×10^6 m³ por año. Esta cantidad se usa para la agricultura y en consecuencia, el aporte de agua dulce hacia el delta del Río Colorado es actualmente nulo (Carbajal *et al.*, 1997).

Los deltas de ríos son estructuras geológicas sensibles a disturbios antropogénicos en sus cuencas de drenaje. Para favorecer la construcción de un delta, el aporte de sedimentos debe exceder al removido por las fuerzas hidrodinámicas. Cualquier modificación en la descarga o en la extracción de sedimentos altera el balance sedimentario, ya sea a favor de la formación del delta o en contra al causar su destrucción. Sin un nuevo aporte de sedimentos por medio del río, el delta del Río Colorado se encuentra actualmente en fase destructiva debido a las fuertes corrientes de marea y el oleaje (Carriquiry y Sánchez, 1999).

La región del AGC es de importancia comercial debido a las múltiples actividades

de pesca que se llevan a cabo. Poblaciones como Santa Clara, Puerto Peñasco y San Felipe viven de esta actividad y se han desarrollado recientemente granjas de cultivo de camarón. La relación entre la fauna del AGC y el aporte del río es muy importante según se ha reportado en eventos extraordinarios de lluvias en los que se dejó pasar agua dulce de las presas hasta el delta del Río Colorado (Lavín y Sánchez, 1999). Con las alteraciones a la descarga del río, las actividades de pesca han reducido su producción considerablemente; especies que anteriormente eran desechadas por pesca incidental ahora tienen que ser comercializadas.

Se ha considerado a los ríos como una fuente importante de nutrientes al medio ambiente costero y están relacionados directamente con las especies que en esta zona viven. Una modificación drástica puede cambiar los procesos físicos, geológicos, químicos y biológicos en un estuario. Antes de 1930, el Alto Golfo de California recibía una gran cantidad de nutrientes a través del Río Colorado, parte de la cual se acumuló en el agua intersticial que quedó al depositarse los sedimentos en el delta. Actualmente la concentración de nutrientes depende de los procesos de resuspensión del sedimento de fondo, la mezcla de agua intersticial con la columna de agua, el aporte de nutrientes por las marismas, la variación quincenal de la marea y los procesos de erosión del delta (Cupul-Magaña, 1994). En particular se ha encontrado que el sedimento en suspensión está ligado a diferentes procesos biológicos, con la biota en general, con distribución de plancton y como atenuador de la producción primaria (Loo-Fierro, 2003).

Diversos factores se combinan en la región del AGC para hacer de esta una zona de estudio interesante social y científicamente. El delta está en una fase destructiva (Carriquiry y Sánchez, 1999) causada por el transporte de sedimentos hacia el sur y la ausencia de nuevos aportes del río. Los nutrientes acumulados en el fondo son aprovechados gracias a los procesos de resuspensión, pero son un recurso finito (Cupul-Magaña,

1994) que podría estar relacionado con el equilibrio ecológico, afectado también por las actividades pesqueras. Las alteraciones a la ecología y en particular a la cadena alimenticia, han puesto en peligro de extinción especies endémicas: la vaquita marina (*Phocoena sinus*) y la totoaba (*Totoaba macdonaldi*).

I.2 Antecedentes

La literatura sobre estuarios clásicos es abundante (e. g. Jones *et al.* (1998); Jago y Jones (1998); Karageorgis y Anagnostou (2001)), mientras que acerca de los estuarios inversos hay muy pocos estudios, probablemente debido a su escasez (Álvarez y Jones, 2004). En el AGC se han llevado a cabo diversos estudios con respecto al sedimento de fondo y en suspensión. Análisis texturales (Thompson, 1968; Carriquiry y Sánchez, 1999), muestran que los sedimentos varían entre arenas y arcillas (Figura 2), con la parte fina predominante en el lado oeste. Carriquiry y Sánchez (1999) propusieron un mecanismo de circulación de sedimento donde la costa oeste funciona principalmente como depósito de sedimento fino, aunque también exporta hacia el sur a zonas más profundas y que el transporte de sedimento en la parte central es de este a oeste por marea, mientras que en la costa de Sonora es hacia el norte por oleaje. Para la desembocadura del Río Colorado se ha determinado la relación entre los flujos de sedimento en suspensión y los nutrientes, en condiciones de aporte de agua dulce del río y sin aporte Cupul-Magaña (1994). El mismo autor observó que la resuspensión de sedimento está relacionada con la pleamar y la bajamar, así como también la magnitud de la concentración de material particulado en suspensión (MPS) depende del ciclo quincenal de la marea.

Álvarez y Jones (2001) reportaron la variación espacial de concentración de MPS a lo largo de 2 transectos longitudinales en el lado oeste, frente a Baja California, desde 10

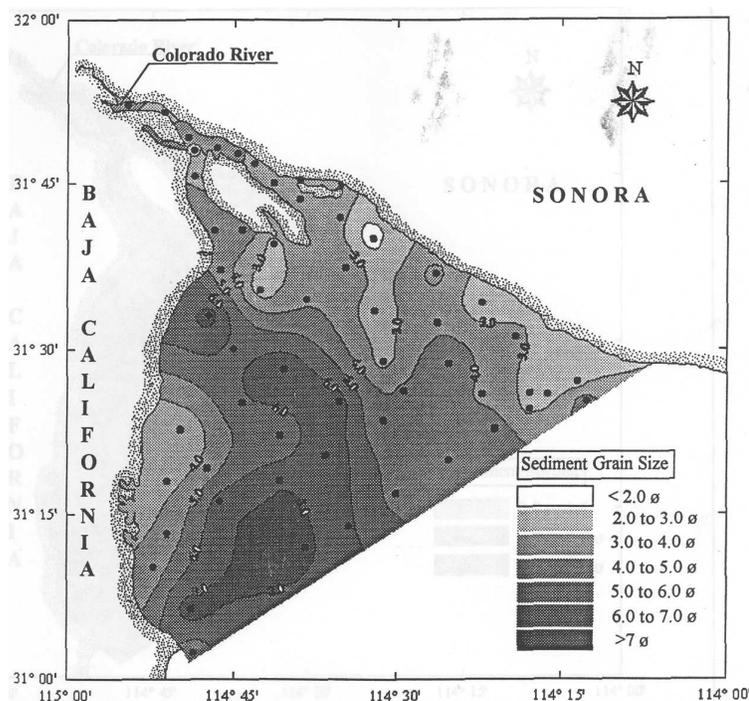


Figura 2: Variación espacial del tamaño de grano promedio en el delta y el Alto Golfo de California (Carriquiry y Sánchez, 1999).

m de profundidad hasta la cuenca de Wagner. Encontraron concentración de $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ en la parte somera y en el fondo de cada transecto y disminuye hacia la cuenca (Figura 3). En este estudio no se menciona que la fase de la marea haya sido tomada en cuenta.

Mediciones simultáneas de sedimento en suspensión, corriente y marea en el AGC son reportadas por Álvarez-Sánchez (2003) para dos sitios, uno al oeste y otro al este en el AGC y durante mareas vivas y mareas muertas (Figuras 4 y 5). Sus resultados confirman que la marea es un factor importante para la resuspensión de sedimentos. La concentración de sedimento en suspensión es de $60 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ cerca del fondo en los periodos de corriente máxima y decae a $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ cuando la onda de marea está en un valle o en una cresta y la corriente es muy lenta. En mareas vivas (Figura 4c) se encontró que la resuspensión registra concentraciones de por lo menos $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ en el fondo en casi todo el período de muestreo (concentración residual).

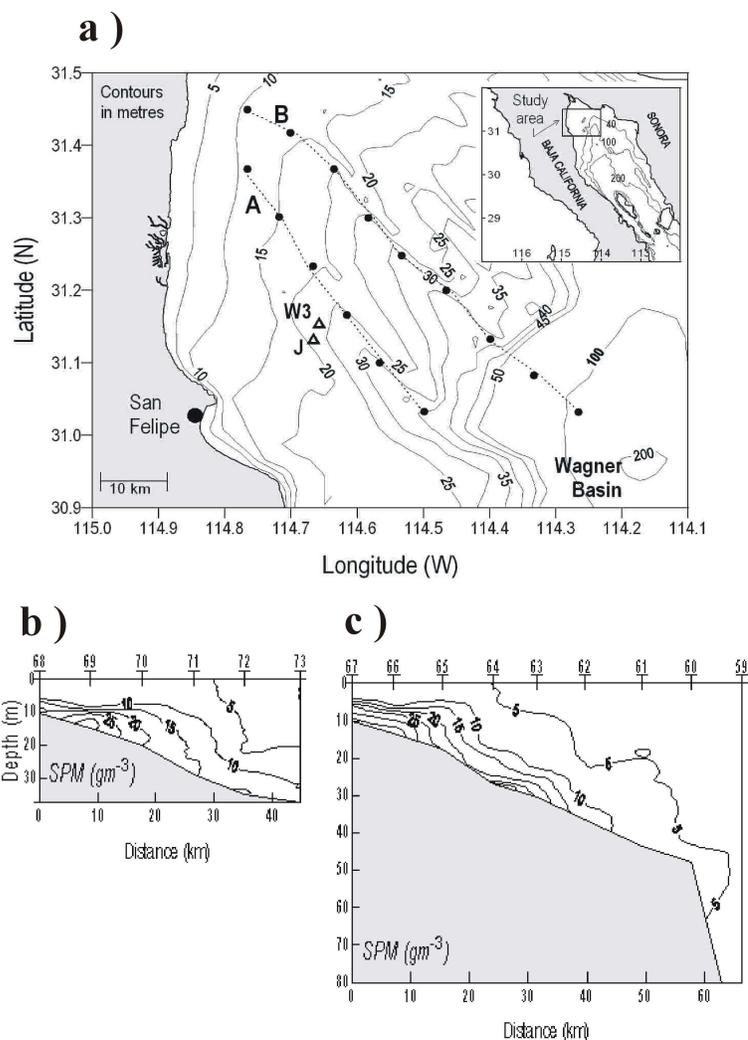


Figura 3: a) Posición de transectos y contornos batimétricos en metros, b) concentración de MPS para el transecto A y c) concentración de MPS para el transecto B (Álvarez y Jones, 2001).

Probablemente el único intento en el que se obtuvo una variación espacial horizontal de MPS satisfactoria es el de Álvarez y Jones (2004), donde toman en cuenta solo los datos de concentración con corriente igual o menor a $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ medida a 1 metro de altura sobre fondo. Las concentraciones más altas se encontraron del lado oeste en los dos niveles tomados en cuenta: en superficie y a 4 metros de altura sobre el fondo (Figura 6).

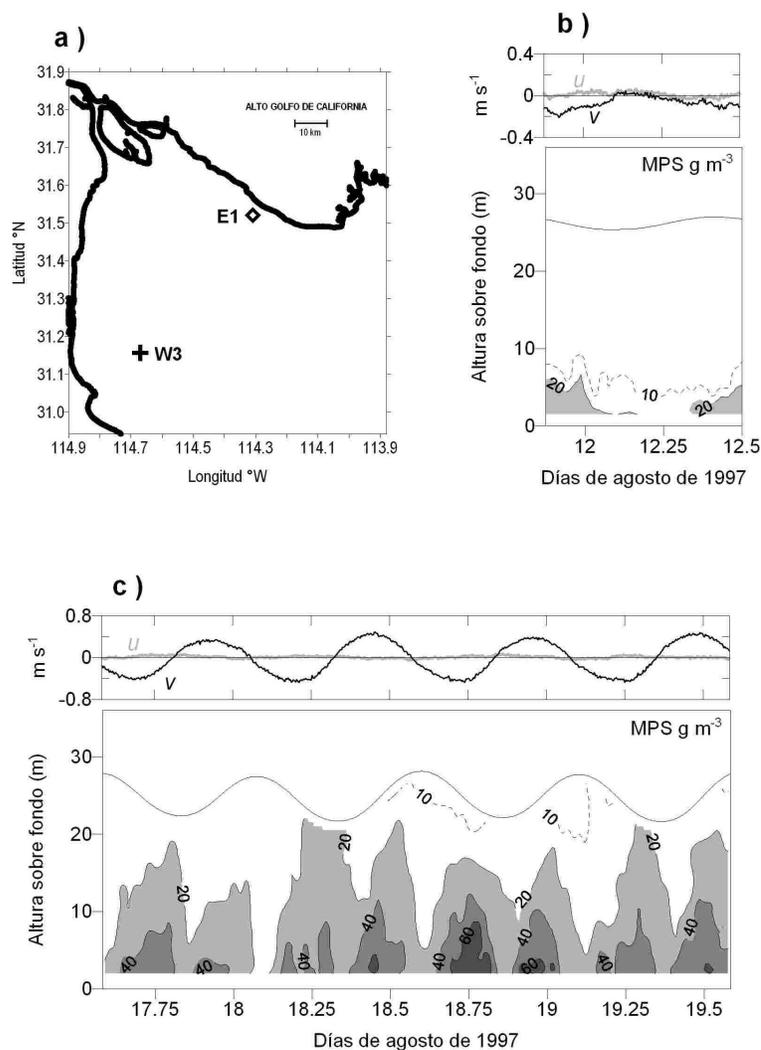


Figura 4: a) Posición de las estaciones W3 y E1. Para la estación W3, b) y c) muestran para mareas muertas y mareas vivas respectivamente, la velocidad de la corriente a 1.5 m de altura sobre fondo girada al eje del AGC y la concentración de MPS (Álvarez-Sánchez, 2003).

Diversos cálculos con respecto al sedimento en suspensión han sido posibles por medio de observaciones *in-situ*. Con mediciones en dos sitios en el lado oeste del AGC los flujos netos fueron de $2.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ hacia el sur y se les atribuyó a corrientes de gravedad (Álvarez-Sánchez, 2003). En mareas vivas los flujos instantáneos excedieron los $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ por la resuspensión, mientras que el flujo neto fue muy cercano a cero (Álvarez y Jones, 2001). Se ha encontrado también, que el transporte de MPS está

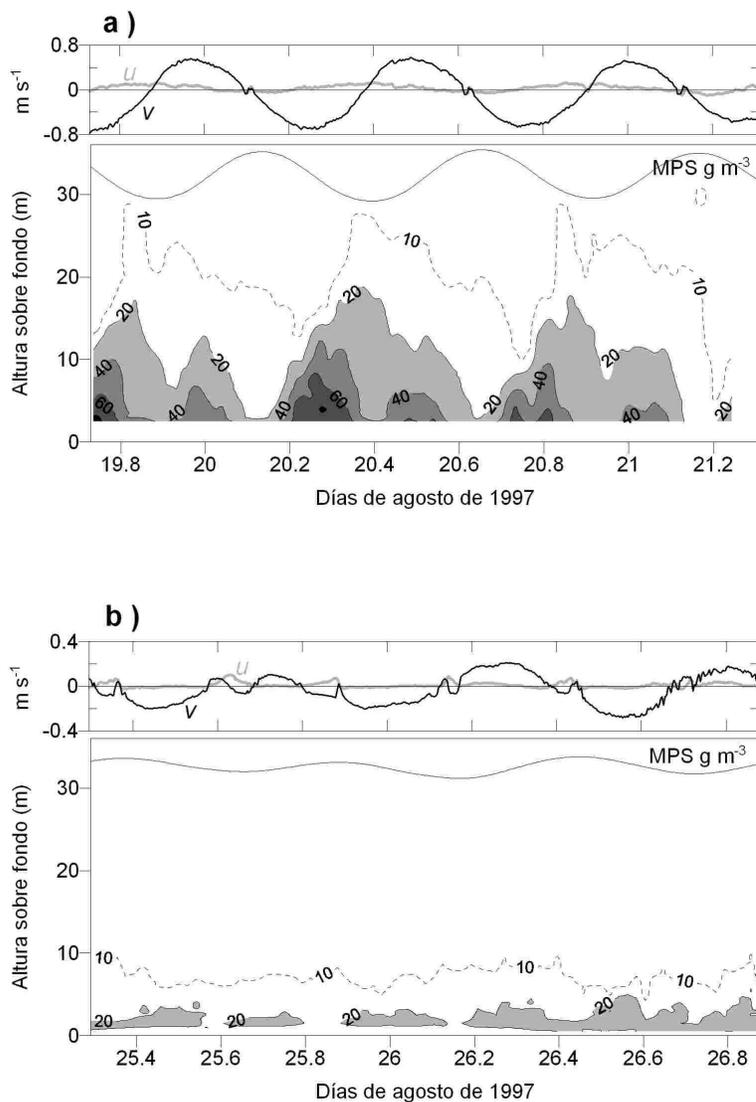


Figura 5: En la estación E1 (ver figura 4a), a) y b) muestran, para mareas vivas y mareas muertas respectivamente, la velocidad de la corriente girada al eje del Golfo de California a 4.5 m de altura sobre fondo y la concentración de MPS (Álvarez-Sánchez, 2003).

fuertemente ligado al comportamiento de estuario inverso del AGC. Se ha reportado una pérdida neta de sedimentos finos del lado oeste relacionada con el flujo cerca del fondo, donde el agua es más densa durante mareas muertas (Álvarez y Jones, 2004).

Concentraciones de MPS de 10^{-2} a $10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ se han encontrado cerca del fondo y decrecieron hacia la superficie a aproximadamente $0.005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ con la resuspensión por

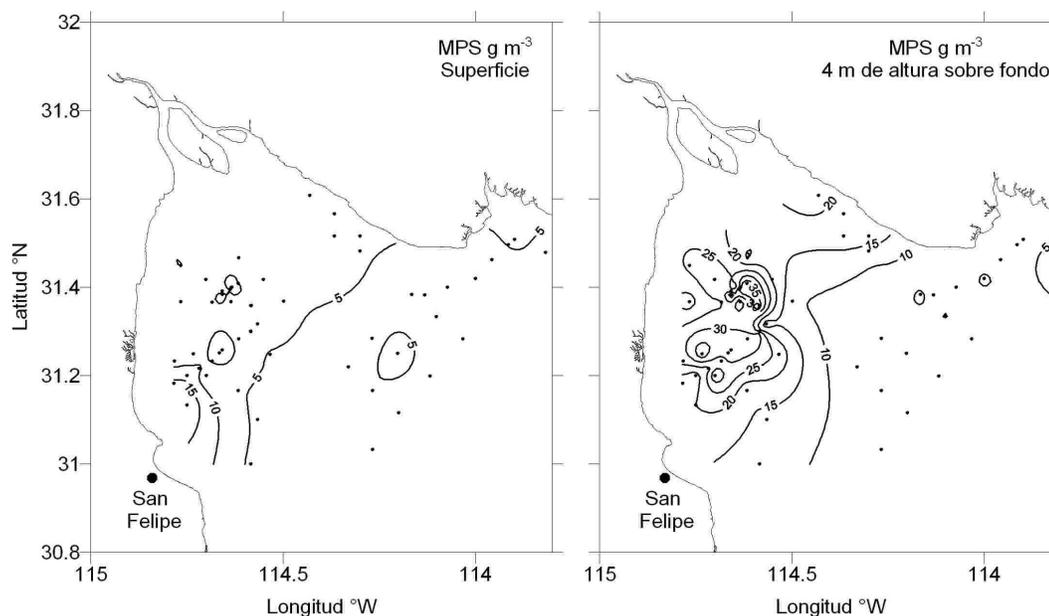


Figura 6: Concentración de MPS con corriente menor a $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Álvarez y Jones, 2004).

marea como el principal medio de control del MPS y con una modulación quincenal de los máximos de concentración (Álvarez-Sánchez, 2003). Estos resultados se obtuvieron con perfiles y series de tiempo de MPS medidos desde 1 m de altura sobre el fondo hacia la superficie. Otros cálculos de flujos de sedimento, en los cuales también se usaron mediciones *in-situ*, se han llevado a cabo en un solo sitio sobre las planicies de marea en la costa de Baja California. Álvarez *et al.* (2003) intentaron aproximar el perfil de concentración de sedimento en suspensión en toda la columna de agua con objeto de incluir la parte cerca del fondo, donde se encuentran las concentraciones más altas. Con el mismo propósito, Loo-Fierro (2003) usó perfiles de concentración de MPS en un sitio al oeste del AGC y obtuvo una buena aproximación al ajustar los perfiles de concentración con el modelo propuesto por Rouse (Figura 7).

Con base en los estudios anteriores se puede afirmar que la concentración de MPS en el AGC esta afectada por los siguientes factores: a) la resuspensión de sedimentos debida

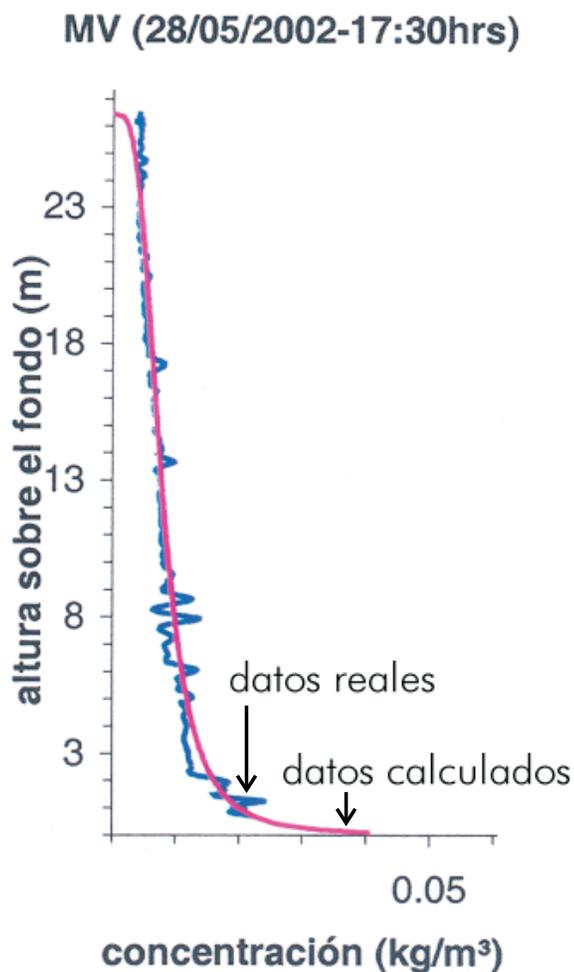


Figura 7: Perfiles de concentración de MPS ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en mareas vivas (MV), observado y calculado con base en el modelo de Rouse de 1938 (Loo-Fierro, 2003).

a las corrientes de marea, la cual cambia en ciclos semidiurnos, diurnos y quincenales, y b) se presenta mayor resuspensión en zonas someras donde la corriente ejerce un esfuerzo más grande sobre el fondo que en zonas profundas. Sin embargo, estos estudios están limitados espacial y temporalmente, las distribuciones espaciales horizontales son escasas o poco confiables, las series de tiempo de casi toda la columna de agua son muy cortas y las series temporales largas son solo a niveles específicos. Por ejemplo, García de Ballesteros y Larroque (1974) usaron técnicas en fase de prueba y los mismos autores

discuten acerca de los factores que afectaron la precisión de sus resultados. Cupul-Magaña (1994) se limita al área de los canales del delta del Río Colorado. Álvarez y Jones (2001) reportan resultados para dos transectos únicamente. Álvarez-Sánchez (2003) reporta mediciones en toda la columna de agua pero con duración máxima de 48 horas y solo en dos sitios. Loo-Fierro (2003) reproduce los perfiles de concentración de sedimento en suspensión pero solo para un sitio del AGC. Álvarez y Jones (2004) hicieron una distribución espacial de concentración de sedimento en suspensión con muestras cuando la corriente fue inferior a $15 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, sin embargo las mayores concentraciones se han reportado cuando la corriente es máxima.

Geológicamente, el AGC está en fase destructiva y las alteraciones que se presenten tendrán efectos en la flora, la fauna, etc. Es necesario extender los conocimientos acerca de la concentración de sedimentos en suspensión de todo el AGC y responder a las preguntas que todavía persisten para completar los estudios anteriormente mencionados. ¿Cómo cambia espacialmente la concentración de MPS? ¿Cómo influye la profundidad en la resuspensión de sedimentos en zonas someras o profundas? ¿Es mayor la concentración de MPS del lado oeste que en el este? ¿Cómo cambia la concentración de MPS en un ciclo quincenal? ¿Cuál es la diferencia de MPS en el fondo y en superficie en mareas vivas y mareas muertas? ¿Dónde y cuándo se presenta el máximo de concentración de MPS? ¿En qué parte del AGC la resuspensión por corrientes de marea ya no es importante? ¿Cuánto sedimento se resuspende, cuánto se deposita y cuánto queda en la columna de agua en un ciclo quincenal de marea? ¿Cuánto del sedimento que queda en resuspensión se mueve horizontalmente?

Para contestar las preguntas anteriores, es necesario conocer la distribución espacial horizontal y vertical del MPS en el AGC, así como los cambios que se presentan en un ciclo quincenal (mareas vivas a mareas muertas). Sin embargo, es impráctico y muy cos-

toso diseñar un muestreo que permita medir la concentración de MPS simultáneamente en todo el AGC, en toda la columna de agua y en un período quincenal de marea. El presente trabajo es una aproximación para conocer los cambios espaciales y temporales de la concentración de material particulado en suspensión en el AGC principalmente con base en: a) observaciones de turbidez llevadas a cabo en diferentes campañas oceanográficas, las cuales fueron diseñadas para otro tipo de estudios pero que cubren todo el AGC, b) los resultados de circulación y elevación del nivel del mar de un modelo numérico y c) la distribución vertical de MPS con base en el modelo propuesto por Rouse en 1938 (Rouse, 1961) y que se describirá en la sección III.1 .

II

Objetivos

- a) Calcular perfiles de concentración de sedimento en suspensión para todo el AGC con base en el modelo de Rouse (1961).
- b) Describir la variación espacial y temporal del material particulado en suspensión en el Alto Golfo de California debida a marea.

III

Metodología

III.1 Modelo de Rouse

Un método para aproximar la distribución de MPS en la columna de agua es la ecuación de Rouse (1961), la cual puede obtenerse con base en las siguientes consideraciones (Dyer, 1977).

En condiciones estacionarias y en la ausencia de una velocidad vertical promedio, el flujo de asentamiento de las partículas $\overline{C}w_s$ debe estar en equilibrio con el flujo turbulento vertical $\overline{w'c'}$ (figura 8)

$$\overline{C}w_s + \overline{w'c'} = 0. \quad (1)$$

Si se supone que el flujo turbulento puede ser expresado como un gradiente de concentración media multiplicado por un coeficiente de difusión de las partículas K_s , entonces

$$\overline{C}w_s = -K_s \frac{d\overline{C}}{dz}. \quad (2)$$

Al integrar la relación anterior y suponiendo una distribución lineal del esfuerzo horizontal desde la superficie hacia el fondo, K_s puede expresarse como

$$K_s = \frac{\beta\kappa u_* z(h-z)}{h} \quad (3)$$

y se obtiene la ecuación que describe el perfil de concentración o ecuación de Rouse (por simplicidad se omiten las barras que denotan promedios)

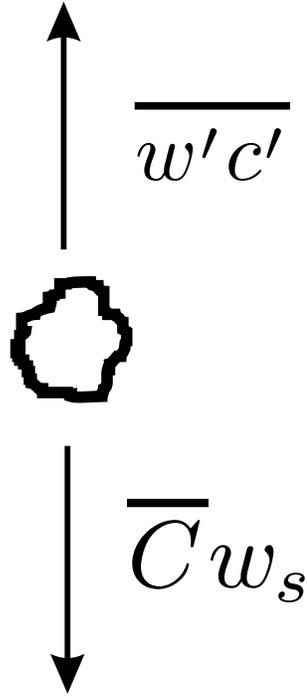


Figura 8: Flujo turbulento vertical $\overline{w'c'}$ y flujo de asentamiento de las partículas $\overline{C}w_s$, donde C es la concentración, w es la componente vertical de la velocidad de la corriente y w_s la velocidad de asentamiento de las partículas.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^B, \quad (4)$$

donde $z > 0$, C es la concentración a la profundidad z , C_a es una concentración de referencia al nivel a , h es la profundidad total y B es el número de Rouse definido como

$$B = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*}, \quad (5)$$

donde β es una constante numérica que relaciona los coeficientes de difusión de sedimento y de momento, κ es la constante de von Karman y u_* es la velocidad de fricción.

La ecuación de Rouse es válida para condiciones estacionarias, unidimensionales y donde existe equilibrio entre el flujo de partículas hacia el fondo y los esfuerzos turbulentos que producen resuspensión y velocidad de asentamiento constante en la columna

de agua. En el presente estudio se supone que se cumplen estas condiciones con un perfil de Rouse bien desarrollado a cada paso de tiempo (0.5 h), no hay intercambio de material particulado en la horizontal y se utiliza una velocidad de asentamiento constante espacial y temporalmente.

Este método ha sido ampliamente usado para aproximar el perfil del material particulado en suspensión de toda la columna de agua a partir de una concentración de referencia. Esta concentración debe ser muy cerca del fondo o bien debe ser la concentración a 0.05 de la profundidad total (Eisma, 1993). En el modelo de Rouse, B determina como está distribuido el material en suspensión en la columna de agua con base en la relación entre la velocidad de fricción y la velocidad de asentamiento (Figura 9).

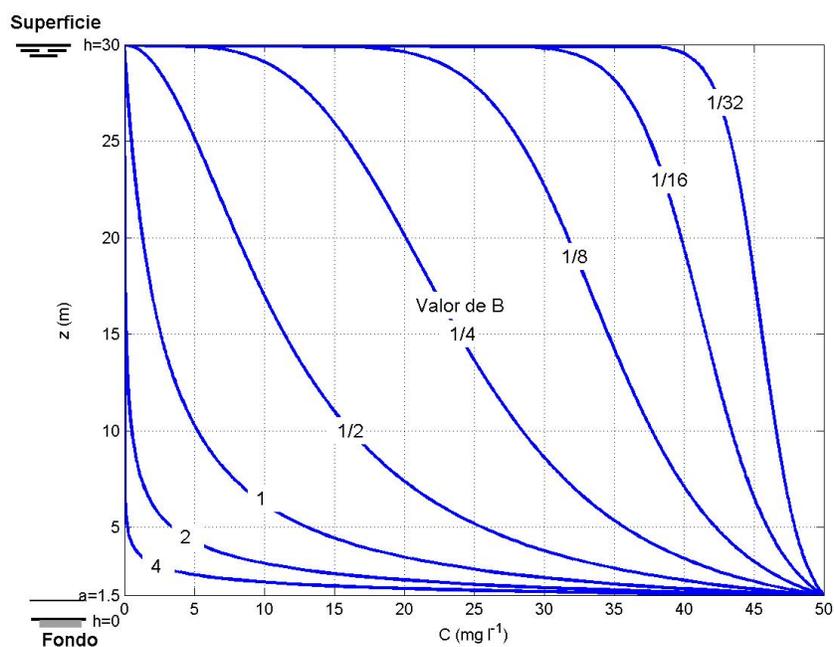


Figura 9: Perfiles de concentración de MPS obtenidos de la ecuación de Rouse para diferentes valores de B . Con $C_a = 50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, $h = 30 \text{ m}$ y $a = 1.5 \text{ m}$.

Para conocer la variación espacial y temporal de MPS en todo el AGC se calculó

un perfil de Rouse para cada intervalo de tiempo definido y para diferentes puntos geográficos del AGC. Por lo tanto, se deben obtener los parámetros de la ecuación de Rouse y sus correspondientes cambios espaciales y temporales. Las secciones siguientes explican qué valores se usaron o cómo fueron obtenidos estos parámetros. En particular la velocidad de fricción y la concentración de referencia dependen de la velocidad de la corriente y por lo tanto de la variabilidad que ésta presenta. Se usó un modelo numérico hidrodinámico para calcular la velocidad de la corriente como se explica en la sección III.1.4 .

III.1.1 Valor de β

La constante numérica β es la relación entre el coeficiente de difusión de sedimento y el coeficiente de difusión de momento. No existe un valor de β bien definido para determinadas circunstancias, sin embargo, con base en observaciones se encontró que para arena muy fina es de aproximadamente 1 (Dyer, 1985). En el presente estudio se supone que $\beta = 1$.

III.1.2 Constante de von Karman κ

La constante de von Karman es el coeficiente de intercambio de momento turbulento, el cual experimentalmente se ha encontrado que es igual a 0.4 (Dyer, 1985).

III.1.3 Velocidad de asentamiento de las partículas w_s

Fisher (1998) y Probert (1998) calcularon w_s para dos sitios al oeste y al este en el AGC con base en muestreos con tubo de sedimentación y encontraron valores de $0.0001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el oeste y de $0.0002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el este. Sin embargo, se han reportado diferencias de

hasta un orden de magnitud en w_s calculada con el método del tubo de sedimentación (Jones y Jago, 1996). Se calcularon perfiles de concentración de MPS con el modelo de Rouse y con los valores de velocidad de asentamiento obtenidos por Fisher (1998) y Probert (1998). Al compararlos con perfiles de concentración de MPS observados se encontró que los perfiles calculados sobrestimaron la concentración.

Álvarez-Sánchez (2003) calculó $w_s=0.003 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para mareas vivas en un sitio al oeste del AGC con base en el perfil de Rouse y observaciones. Debido a que no existen otras mediciones de velocidad de asentamiento en el mismo sitio o en el resto del AGC, el valor encontrado por Álvarez-Sánchez (2003) se tomó como constante para todo el AGC y para todo el ciclo quincenal.

III.1.4 Modelo numérico de marea

El modelo numérico SPMOD es un modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado para la Defense Research Agency (DRA) por la Unidad para Estudios Costeros y Estuarinos en los Laboratorios de Ciencias Marinas en Menai Bridge, Reino Unido. El modelo evalúa por diferencias finitas las ecuaciones de Navier Stokes en dos dimensiones, promediadas en la vertical y usa la marea como forzamiento. Más información acerca del modelo puede encontrarse en Jones (1993).

Para el forzamiento se usaron los datos de Morales y Gutierrez (1986) de las componentes M_2 y S_2 de la marea, las cuales representan $\sim 65\%$ de la variabilidad quincenal en el AGC.

Se llevaron a cabo corridas del modelo para diferentes valores de fricción de fondo C_d y se compararon los resultados con observaciones del nivel del mar en diferentes estaciones en el AGC para elegir el valor óptimo, el cual fue 3.5×10^{-3} .

El modelo se corrió con tres mallas de diferente resolución: de 9 km por 9 km con

frontera abierta en 28.7917° de latitud norte (malla gruesa), de 4.5 km por 4.5 km con frontera abierta en 29.875° de latitud norte (malla intermedia) y de 0.9 km por 0.9 km con frontera abierta en 30.79° de latitud norte (malla fina), que es la de mayor resolución disponible para el área de estudio y que refleja las principales estructuras del fondo (Figura 10).

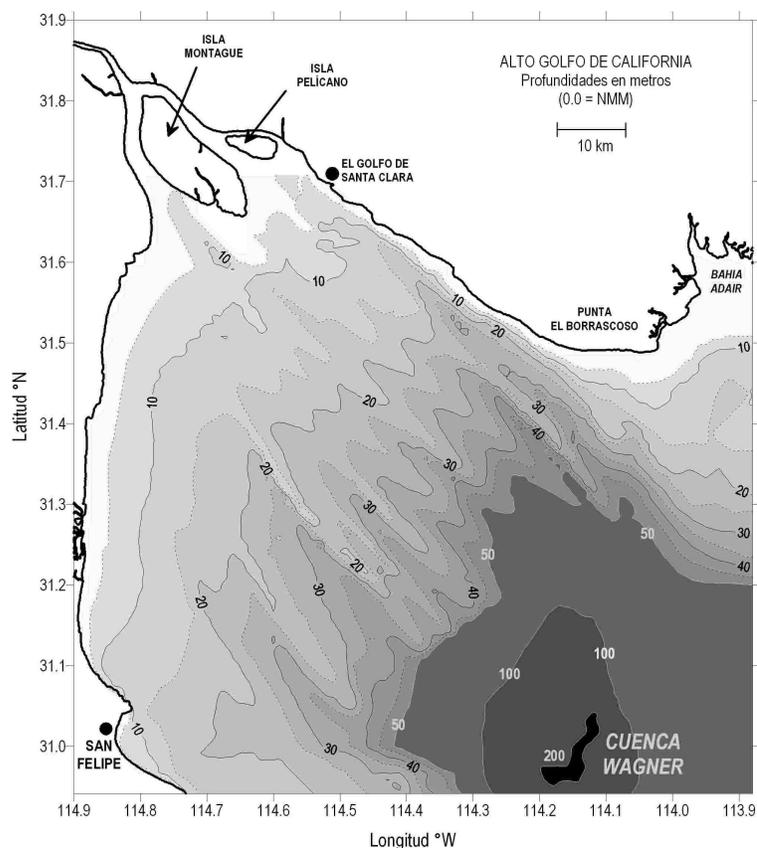


Figura 10: Batimetría (en metros) del Alto Golfo de California.

Para cada malla el modelo se corrió con intervalo de tiempo de 5 segundos. La estabilización de los resultados se obtiene después de 3 ciclos quincenales. Se extrajeron los datos de marea de la corrida con malla gruesa a la latitud de la frontera abierta de la malla intermedia para usarse como forzamiento. De la misma forma se extrajeron los resultados de marea para el forzamiento de la malla fina.

Los resultados finales del modelo son series quincenales de corriente y marea cada media hora para cada punto de la malla fina. Estos datos se usaron para calcular la altura total de la columna de agua, la velocidad de fricción y la concentración de referencia como se explica en las secciones siguientes.

III.1.5 Altura de la columna de agua h

Los datos de batimetría de la malla fina contienen la profundidad referida al nivel medio del mar. A esta cantidad se sumó la elevación del nivel del mar resultado del modelo para cada paso de tiempo y cada punto de la malla y se obtuvo la profundidad total h .

III.1.6 Velocidad de fricción u_*

La velocidad de fricción se calculó con base en el esfuerzo de fondo

$$\tau_o = \rho C_d U^2 \quad (6)$$

y

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}, \quad (7)$$

por lo tanto

$$u_* = \sqrt{C_d} U, \quad (8)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, C_d es el coeficiente de arrastre y U es la rapidez horizontal promediada verticalmente.

III.1.7 Concentración de referencia C_a

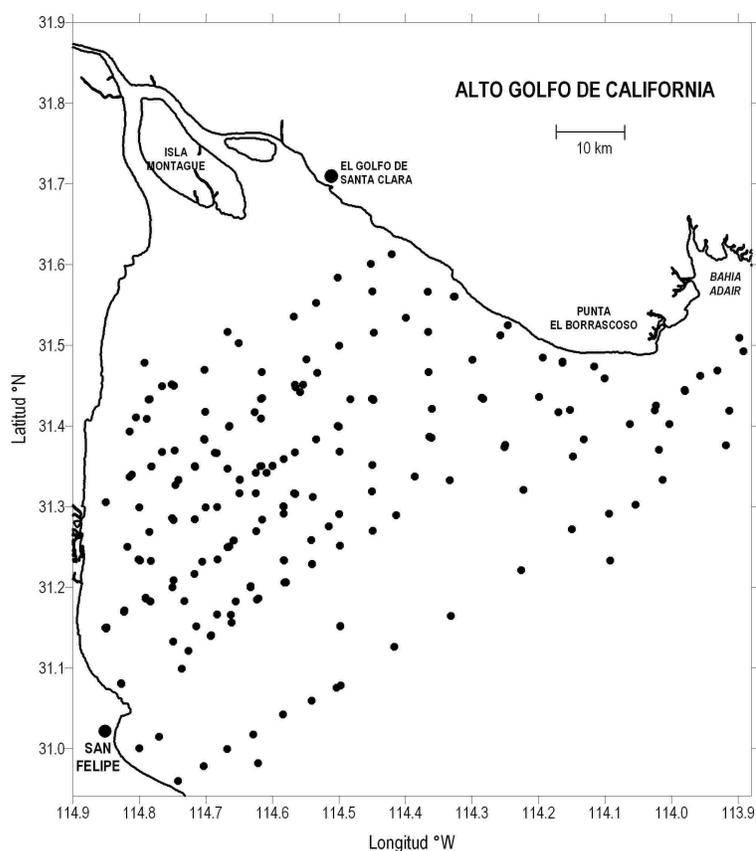
La concentración de referencia debe ser una concentración cerca del fondo e idealmente se debe conocer en cada punto de la malla fina y durante un ciclo quincenal para obtener los perfiles de Rouse. Las observaciones de turbidez de campañas oceanográficas entre 1997 y 2002 no tienen la cobertura espacial y temporal para obtener C_a en cada punto de la malla fina. Sin embargo, la mayor parte de la concentración de MPS en la columna de agua depende de la corriente y por lo tanto también el valor de C_a . En el presente estudio se supone que existe una relación entre la concentración de referencia y la corriente de marea que permite calcular C_a con base en la velocidad de la corriente. Para encontrar esta relación es necesario tener observaciones suficientes de corriente y concentración en un mismo sitio y se consideró que muestreos cercanos son representativos de C_a en el área en que fueron tomados. Durante los muestreos no se midió la corriente pero fue posible asociarles valores de velocidad de la corriente resultado del modelo numérico. Con la relación entre C_a y corriente de marea se calculó la concentración de referencia para todo el ciclo quincenal de marea. Las secciones siguientes explican detalles de este procedimiento y de las observaciones de turbidez.

Observaciones de material particulado en suspensión

En campañas oceanográficas entre 1997 y 2002 se llevaron a cabo muestreos con turbidímetro en el AGC. Aunque entre los objetivos de las campañas no estaba medir turbidez (a excepción de la campaña de 1997), se obtuvieron perfiles de todo el AGC en diferentes temporadas del año y distintas fases de marea. Las altas concentraciones de material particulado en suspensión se encuentran en mareas vivas, por lo tanto en este estudio se consideran las campañas llevadas a cabo en esta fase de la marea. Los períodos de medición se muestran en la tabla I y la cobertura espacial en la figura 11.

Tabla I: Campañas de medición con CTD y turbidímetro.

Campaña Oceanográfica	Inicio		Fin	
	Fecha-Hora		Fecha-Hora	
FU9708	13/ago/97	19:23	15/ago/97	05:26
FU9708	21/ago/97	22:37	24/ago/97	01:36
FU9906	29/jun/99	17:43	04/jul/99	10:02
FU9908	15/ago/99	06:02	23/ago/99	00:48
FU0002	24/feb/00	12:18	01/mar/00	21:02
FU0206	11/jun/02	16:30	15/jun/02	11:56
FU0208	14/ago/02	02:42	18/ago/02	15:15

**Figura 11:** Posiciones en las que se midieron perfiles de CTD y de concentración de MPS durante mareas vivas en el Alto Golfo de California.

Las observaciones de concentración de MPS se llevaron a cabo con un turbidímetro Seapoint o sensor de retro-esparcimiento óptico (OBS, optical backscatter, figura 12) conectado a un CTD. El turbidímetro u OBS emite luz a 880 nm de longitud de onda y registra la cantidad de luz que regresa debido al material en suspensión en el volumen de agua dentro de 5 cm del sensor (SeaPoint Turbidimeter, Owner's Manual).

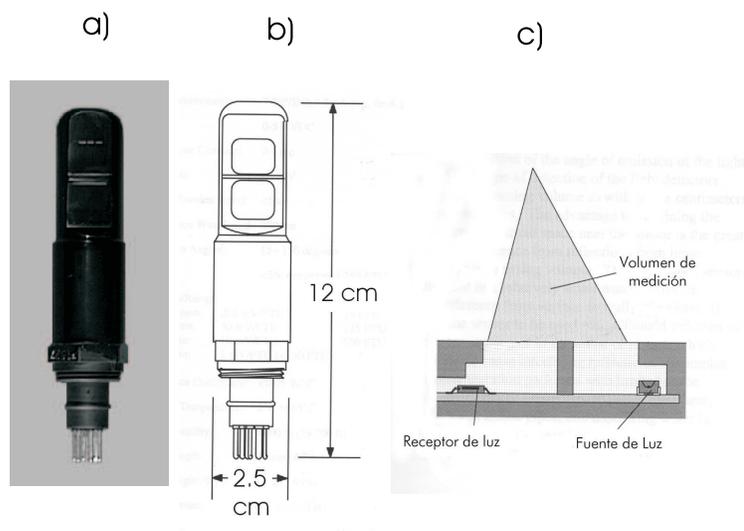


Figura 12: a) turbidímetro, b) dimensiones y c) diseño óptico.

La señal de salida, entre 0 y 5 voltios de corriente directa, se calibra con muestreos *in-situ* en el área de estudio para asociarla a la turbidez. Las muestras se toman al mismo tiempo y altura que el OBS, se filtran y por diferencia de peso y el volumen de agua filtrado se conoce su concentración. La relación lineal entre la turbidez y la señal del OBS permite ajustar una recta y encontrar las constantes de ésta para posteriores mediciones del OBS. La calibración de los sensores usados en este estudio fue reportada por Álvarez-Sánchez (2003) y fue

$$MPS \text{ (mg}\cdot\text{l}^{-1}\text{)} = 3.44 + 16.03(\text{voltaje del OBS}). \quad (9)$$

Relación entre corriente y C_a

De los perfiles de MPS obtenidos en las campañas oceanográficas, se extrajeron las concentraciones de referencia observadas al nivel común de 1.5 m de altura sobre fondo.

Para asociar valores de concentraciones de referencia a la corriente de marea se usaron las series de velocidad obtenidas con el modelo numérico y la predicción de marea en la fecha y hora de cada concentración. Inicialmente se generaron series de predicciones de marea con el programa MAR 2.0 de CICESE para cada fecha de muestreo y para las tres localidades disponibles en el AGC (San Felipe, Puerto Peñasco y Santa Clara). Se llevó a cabo un promedio de las series entre los tres lugares ponderado con las distancias a los sitios de muestreo. Las series finales de predicción de marea se compararon con las series de marea obtenidas del modelo numérico correspondientes a la posición geográfica de cada muestreo. Por medio de correlación cruzada se obtuvo el menor desfase para el cual la correlación entre las series de marea de predicción y del modelo fue mayor. El desfase encontrado permitió asociar a las series del modelo numérico, marea y velocidad, el tiempo real de las series de predicción de marea. Finalmente, con base en la fecha y hora de cada muestreo se les asignó el correspondiente valor de corriente de marea obtenida del modelo numérico.

El sedimento en suspensión que se mide en un lugar puede deberse a distintos procesos, principalmente: sedimento resuspendido por marea y actividad biológica, sedimento transportado horizontalmente, sedimento muy fino en suspensión semipermanente. Con el objetivo de tomar en cuenta solo los efectos de las corrientes de marea, se usó el esfuerzo crítico de erosión igual a 0.33 Pa para el AGC (Álvarez-Sánchez, 2003), éste es el esfuerzo mínimo necesario para producir resuspensión de sedimento y la rapidez de la corriente que corresponde a este esfuerzo es de $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Por lo tanto, si la ve-

locidad de la corriente a la hora de cada muestreo fue menor a $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y sin embargo se registraron concentraciones altas, se supuso que esas concentraciones no se debieron a efectos de corriente de marea. En estos casos se reasignó la concentración más baja registrada por el conjunto completo de concentraciones de referencia de las campañas oceanográficas (promedio de $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), es decir, la concentración registrada aún con velocidad de corriente muy cercana a cero.

Para encontrar la relación entre la concentración de referencia y la velocidad de la corriente de marea se agruparon los datos en zonas con base en los siguientes criterios: 1) diferencias en la distribución textural, transversalmente al AGC se encuentra grano fino del lado oeste, una zona de transición en la parte central y grano más grueso del lado este, 2) longitudinalmente al AGC también deben existir diferencias desde la desembocadura del Río Colorado hacia todo el AGC, los granos más finos deben encontrarse predominantemente en la región noroeste y 3) el esfuerzo de la corriente y la profundidad, hay mayor resuspensión de sedimentos en las partes someras donde la corriente ejerce mayor influencia que en las regiones profundas. Por lo tanto, cada uno de los grupos de datos representa un área específica en el AGC. Posteriormente se graficaron por separado cada grupo de observaciones de C_a y sus correspondientes valores de corriente y se ajustó por cuadrados mínimos una curva de la forma $C_a = f(U)$.

Con el procedimiento anterior, para cada grupo de datos la concentración de referencia depende sólo de la corriente U , pero debido a que las curvas de ajuste son diferentes, también hay dependencia espacial horizontal.

III.2 Cálculo de la distribución espacial y temporal de MPS

Con base en las suposiciones anteriores la ecuación de Rouse toma la forma

$$C = C_a \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{0.127U^{-1}} \quad (10)$$

donde $C_a = f(U)$ y U depende de x , y y t . Con base en esta forma de la ecuación de Rouse se calcularon perfiles de concentración de MPS para cada punto de la malla fina y cada 0.5 horas del ciclo quincenal con lo cual se obtuvo la variabilidad espacial y temporal.

IV

Resultados

IV.1 Marea y corriente del modelo numérico y de observaciones

Los resultados del modelo numérico de amplitud y fase de la marea para la componente M_2 se compararon con datos de observaciones en diferentes sitios en el Golfo de California reportados por Morales y Gutiérrez (1989) y se muestran en la tabla II. El coeficiente de arrastre que dio mejores resultados fue 3.5×10^{-3} .

Tabla II: Observaciones y resultados del modelo para la componente M_2

	Observaciones		Modelo		Diferencias	
	Amplitud (cm)	Fase (°)	Amplitud (cm)	Fase (°)	Amplitud (cm)	Fase (°)
San Felipe	164.5	64.92	167.6	66.9	-3.09	-1.98
Pto. Peñasco	157.04	58.59	156.2	56.8	0.84	1.79
Pta. Peñasco N	164.3	58	162.5	58.3	2.13	-0.3
Pta. Peñasco S	152.62	54.61	153.7	56.4	-1.08	-1.79
Roca San Jorge	149.42	54.04	147.8	55.4	1.62	-1.36
Promedio del valor absoluto de las diferencias					1.75	1.44

En 1997 se colocó un anclaje en el sitio W3 (Figura 13) con un corrientímetro acústico (ADP Sontek), el cual también estuvo equipado con un sensor de presión que permitió registrar la marea durante el período de muestreo. A los datos de presión se les quitó

el promedio para obtener solo la variación del nivel del mar. La comparación de estas observaciones y los resultados del modelo se muestra en la figura 14. El máximo de la serie de rapidez de la corriente observada es de $68.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que el de la serie de rapidez obtenida del modelo es de $67.4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. La máxima diferencia entre las dos series es de $27.7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Durante mareas vivas las diferencias son menores a $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ y de casi $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en mareas medias y muertas. La máxima diferencia en el nivel del mar fue de 1.2 metros.

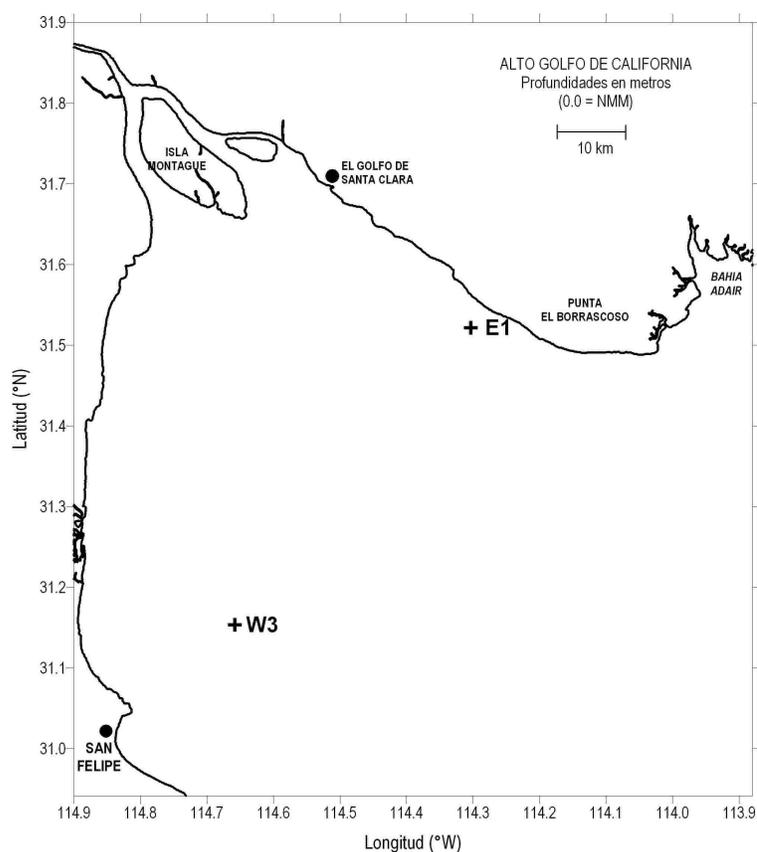


Figura 13: Posición de los anclajes con observaciones de variaciones diurnas (W3 y E1), serie de tiempo y velocidad (W3) y concentración de MPS (W3 y E1).

La distribución espacial de nivel de marea y corriente se muestra en la figura 15, donde se grafican como ejemplo distintas fases con intervalo de 3 horas de un ciclo semidiurno durante mareas vivas. Cuando la marea está muy cerca de su nivel medio

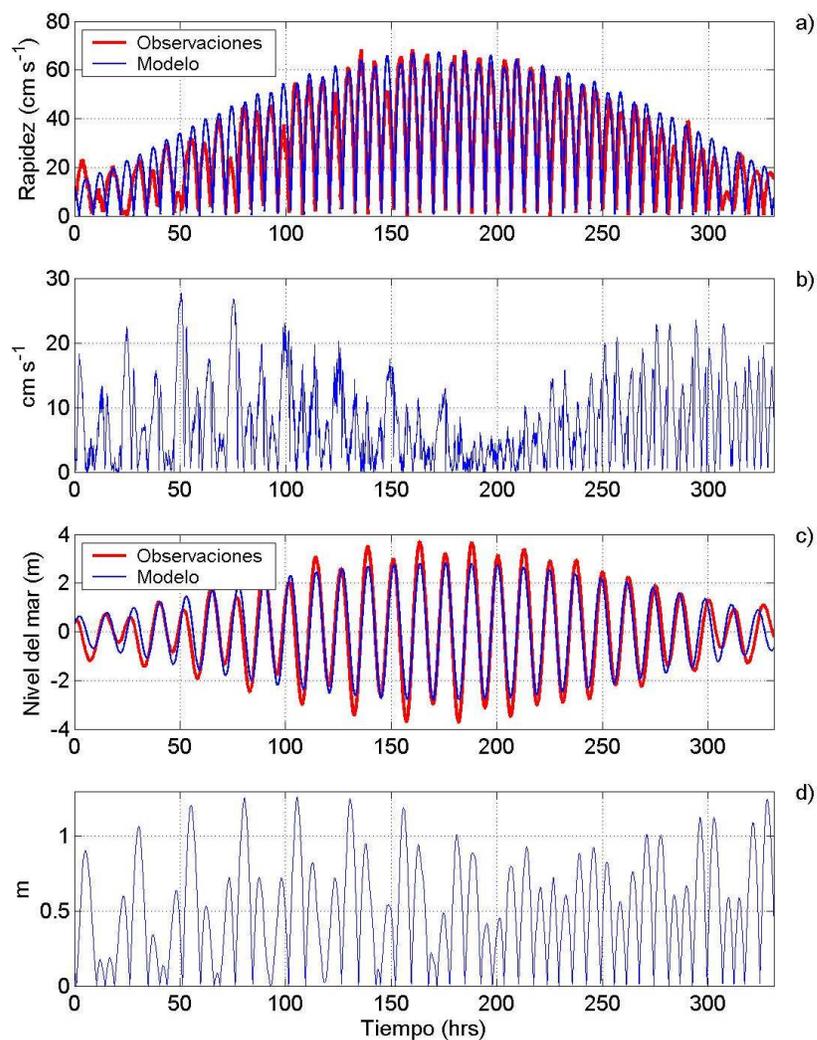


Figura 14: Comparación de observaciones y resultados del modelo numérico para el sitio W3. a) rapidez, b) diferencia entre la rapidez observada y modelada, c) nivel del mar, d) diferencia entre nivel del mar observado y calculado.

la velocidad es alta sobre todo en las zonas someras. En las áreas profundas, la parte central y sureste del área de estudio, se presentan las menores magnitudes de la corriente para esta fase de mareas vivas. En el oeste del AGC la velocidad de la corriente tiene orientación sureste-noroeste. En la parte suroeste predomina la dirección norte-sur tanto

en flujo como en reflujó.

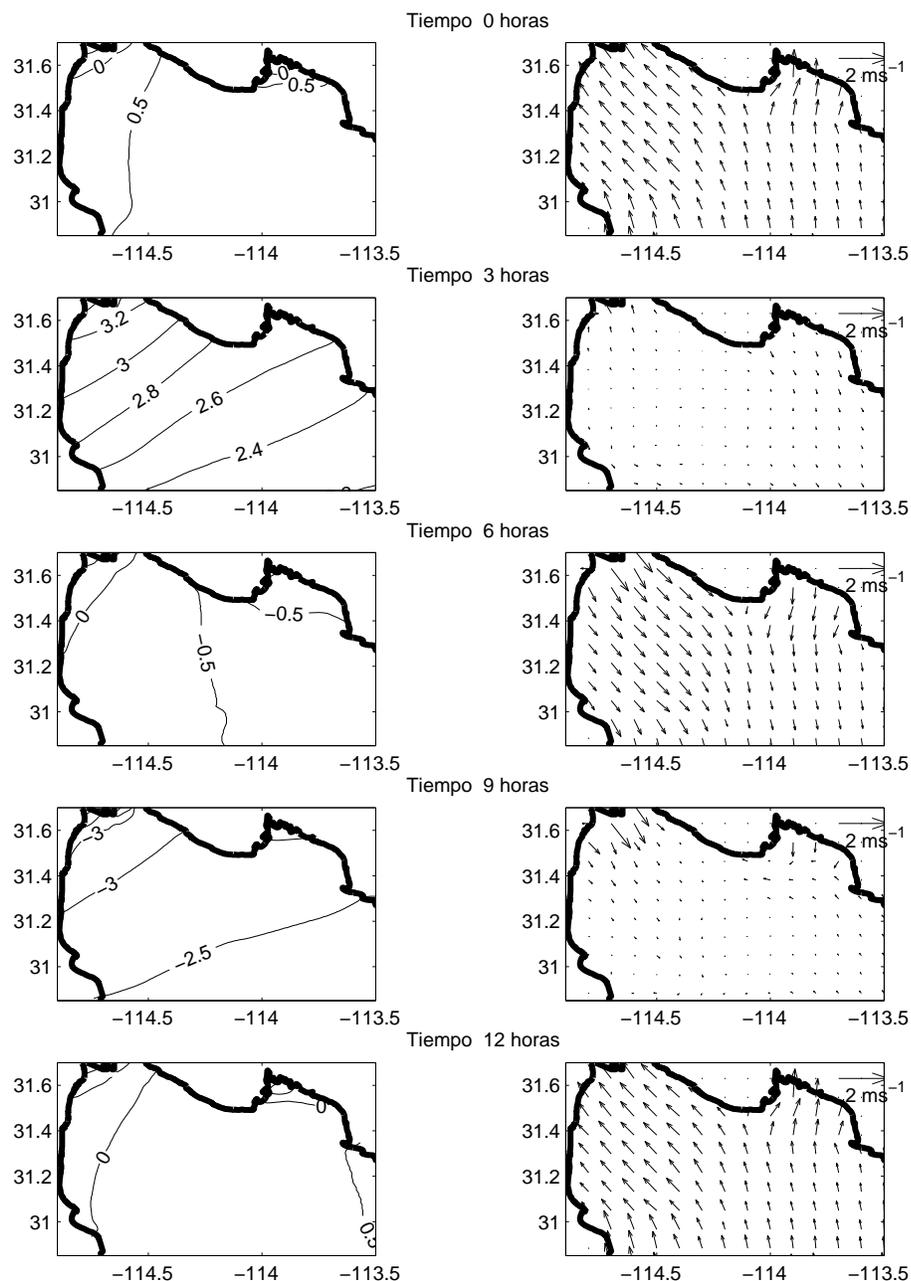


Figura 15: Ejemplos de distribución espacial del nivel del mar (figuras de contornos en metros, lado izquierdo) y velocidad de la corriente (figuras del lado derecho) obtenidas del modelo numérico.

Cuando la marea está aproximadamente en los niveles máximo y mínimo las velocidades son más bajas, menores a $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en la mayor parte del AGC. Sobresalen

corrientes altas en dos zonas muy reducidas: en el noroeste frente a la desembocadura del Río Colorado, con más de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, y en el noreste en la parte poco profunda de Bahía Adahír, con más de $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Estas dos áreas de corriente alta sólo se observan cuando la marea está en el nivel mínimo.

IV.2 Concentración de referencia y velocidad de la corriente

Las observaciones de concentración de referencia a 1.5 m de altura sobre fondo (ASF) tomadas de los perfiles de turbidez y la velocidad de la corriente obtenida del modelo numérico se muestran en la figura 16. Se observa una región de concentración de MPS constante de $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ debida a que en estos casos se reasignó esta concentración de MPS como se explicó en la sección III.1.7. Cuando la rapidez de la corriente es superior a $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ los valores de concentración de MPS y velocidad no presentan un comportamiento definido. La corriente más alta encontrada fue de $0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ con concentración de $4.3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La concentración más alta fue de $63 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con corriente de $0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Las áreas delimitadas y numeradas para cada grupo de observaciones se muestran en la figura 17 en 15 zonas diferentes, las observaciones del extremo sureste se dejaron como un solo grupo debido a que presentaron concentraciones muy bajas, entre 5 y $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ aproximadamente. Las zonas representadas por cada grupo de datos son franjas perpendiculares al eje del AGC, de aproximadamente 10 km de ancho y longitud variable. La tabla III muestra los diferentes criterios cualitativos utilizados para formar los diferentes grupos de valores de C_a y U . La figura 18 muestra éstos grupos en 6 gráficas ordenados de noroeste a sureste y en tonos de gris se han diferenciado los grupos desde la costa de Baja California hacia la costa de Sonora. También se incluyen las curvas

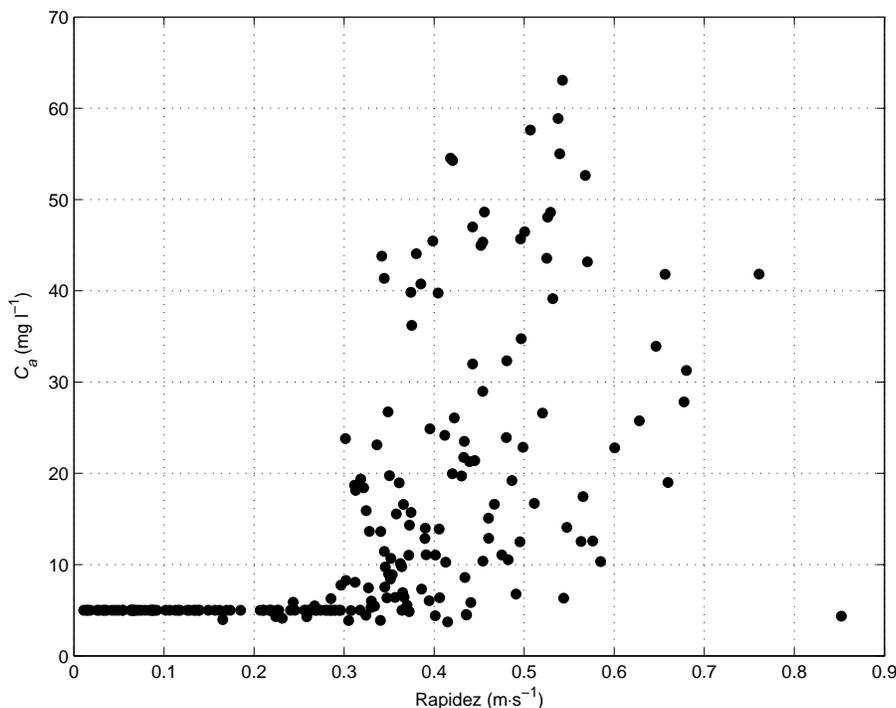


Figura 16: Rapidez de la corriente obtenida del modelo numérico y concentración de referencia observada en campañas oceanográficas.

que se ajustaron a los datos de cada grupo.

La forma de la ecuación encontrada para ajustar las curvas fué

$$C_a = Ee^{FU}, \quad (11)$$

donde C_a es la concentración de referencia, U es la rapidez de la corriente y E, F son constantes. La tabla IV muestra las constantes encontradas, el valor de R^2 , el número de datos utilizado y el promedio y desviación estándar de los coeficientes.

En la figura 18, incisos (e) y (f), se observa que la ecuación 11 no es el mejor ajuste para la dispersión de datos que presentan los grupos 14 y 15. Sin embargo estos grupos de datos se ajustaron de la misma forma que los demás para ser consistente con el análisis. El número de datos usado para cada ajuste fue desde 7 (grupos 2 y 3) hasta 44 datos (grupo 15). Las magnitudes de la corriente máximas estuvieron entre $0.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

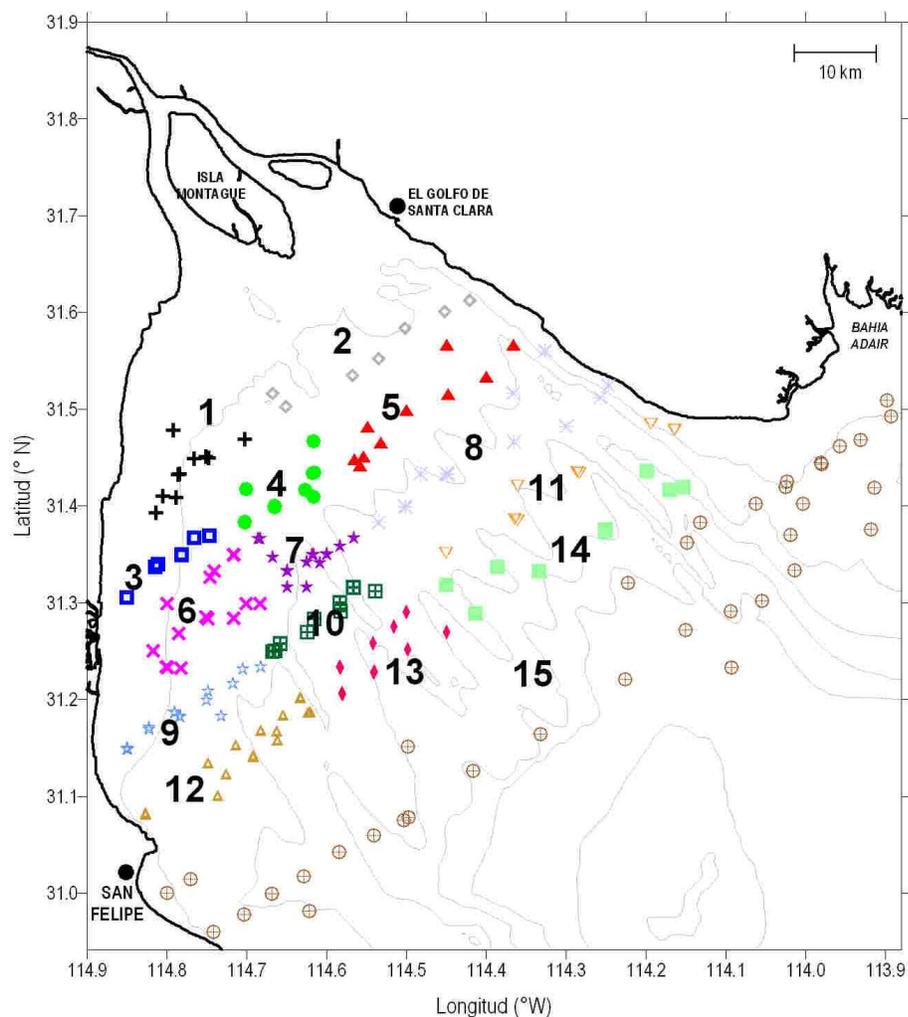


Figura 17: Sitios de observación de concentración de referencia agrupados en 15 zonas del AGC. Los símbolos indican los perfiles incluidos en cada grupo.

del grupo 1 a $0.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el grupo 15.

Se probaron dos formas de obtener la concentración de referencia: a) para simplificar los resultados se usó el promedio de los coeficientes E, F y b) se consideraron estos coeficientes variables. Para el primer caso se obtuvo la siguiente relación

$$C_a = 3.4631e^{0.0366U}. \quad (12)$$

En la figura 19 se muestra una comparación de la distribución de la concentración

Tabla III: Criterios cualitativos para separar los datos en 15 grupos diferentes.

Grupo	$\sim h(\text{m})$	τ_o	Tamaño de grano
1	10	Muy alto	Fino
2	10	Muy alto	Mezclado
3	10	Alto	Fino
4	15	Alto	Mezclado
5	15	Alto	Grueso
6	15	Intermedio	Fino
7	20	Intermedio	Mezclado
8	20	Intermedio	Grueso
9	15	Bajo	Fino
10	20	Bajo	Mezclado
11	30	Bajo	Grueso
12	15	Muy bajo	Fino
13	30	Muy bajo	Mezclado
14	35	Muy bajo	Grueso
15	40	Casi nulo	Mezclado

de referencia calculada con la ecuación 12, inciso (a) y con la ecuación 11, inciso (b). En la primera, los valores altos de concentración de referencia se deben a la magnitud de la corriente. En la segunda, además de la corriente, influye también la distribución textural del sedimento, por lo que la concentración de referencia tiene valores más altos en la parte noroeste y oeste del AGC, lo cual es similar a los resultados esperados. Por lo tanto, en los cálculos subsecuentes la concentración de referencia se obtuvo con la ecuación 11 y los valores de E y F de la tabla IV.

Las curvas de regresión para cada grupo de datos que se muestran en la figura 18 están ordenadas de noroeste a sureste del AGC con el objetivo de apreciar la variabilidad

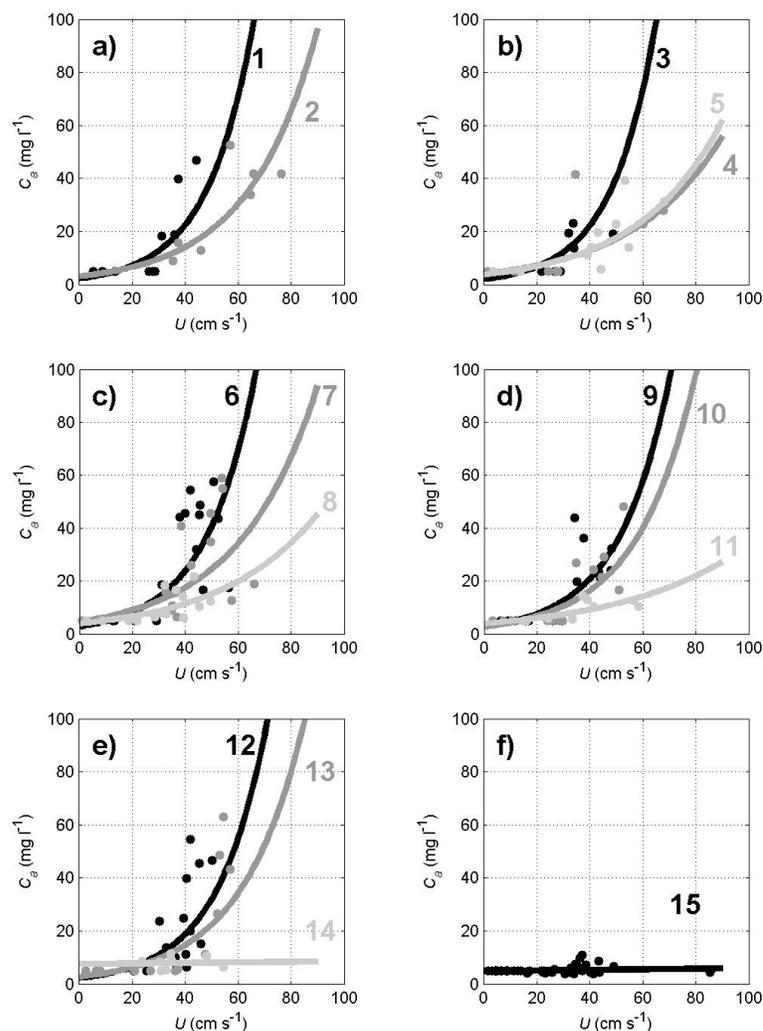


Figura 18: Observaciones y curvas de ajuste para cada grupo de datos. Los tonos de gris identifican a que curva pertenecen los muestreos. a) Grupos 1 y 2, b) grupos 3, 4 y 5, c) grupos 6, 7 y 8, d) grupos 9, 10 y 11, e) grupos 12, 13 y 14 y f) grupo 15.

espacial de la concentración de referencia desde el lado oeste al lado este. Los incisos (a), (c), (d) y (f) de la figura muestran mayores concentraciones de referencia en las zonas del lado oeste para una velocidad dada, en comparación con las zonas intermedias donde la concentración de referencia disminuye, y las de la parte frente a Sonora donde

Tabla IV: Resultados del ajuste por mínimos cuadrados.

Grupo de datos	E	F	R^2	Número de datos
1	2.2518	0.0575	0.6173	10
2	3.0198	0.0385	0.7297	7
3	1.5192	0.0601	0.4956	7
4	3.8779	0.0296	0.6308	10
5	3.6747	0.0314	0.6536	10
6	2.8011	0.0535	0.6613	16
7	4.5585	0.0336	0.4080	15
8	3.7843	0.0276	0.4945	14
9	2.7046	0.0510	0.7187	15
10	2.7097	0.0449	0.6809	13
11	3.8287	0.0218	0.5917	9
12	2.1554	0.0540	0.4622	16
13	2.6599	0.0426	0.6680	12
14	4.5088	0.0013	0.0017	9
15	4.8731	0.0020	0.0216	44
Promedio	3.4631	0.0366		
Desv. Estándar	1.4101	0.0174		

se presentan las concentraciones de referencia más bajas. La figura 18b muestra las curvas para las zonas 3, 4 y 5. La curva del grupo 3, del lado oeste, muestra mayores concentraciones de referencia que las de los grupos 4 y 5; sin embargo, éstas son muy similares entre sí, e inclusive la del grupo 5, del lado de Sonora, presenta mayores concentraciones que el grupo 4 ubicado en una zona intermedia. El inciso (f) muestra el grupo de datos número 15 del área más al sureste del AGC en el cual se observan concentraciones entre 5 y 10 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

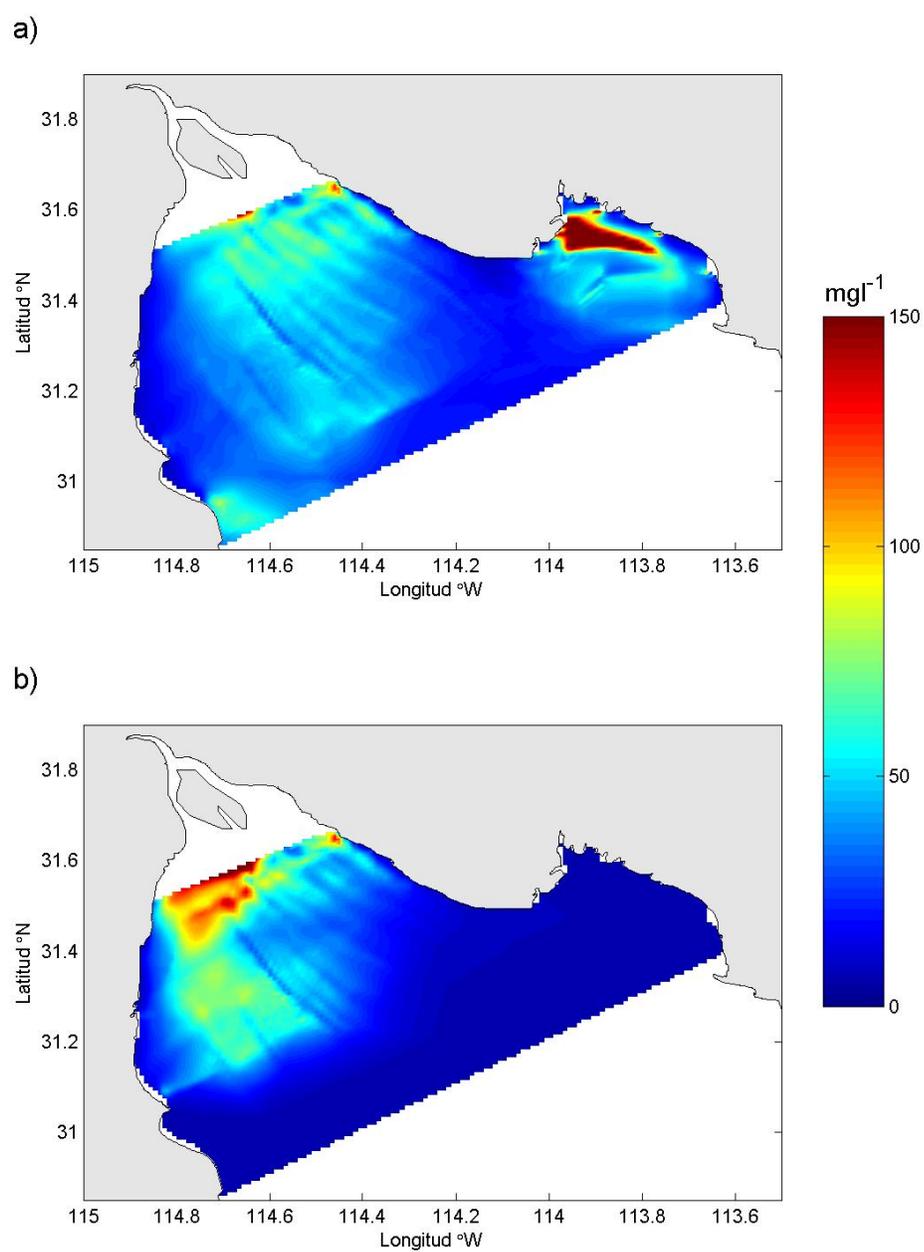


Figura 19: Distribución espacial de la concentración de referencia C_a de MPS calculada para la corriente máxima. a) Calculada con promedios de E, F , b) calculada con E, F variables para cada grupo de datos.

IV.3 Comparación de concentración de MPS calculada y medida

IV.3.1 Distribución vertical de MPS durante variaciones diurnas

En las estaciones W3 y E1 (figura 13), en 1997, se llevaron a cabo variaciones diurnas durante mareas vivas y mareas muertas. El muestreo consistió en hacer perfiles de turbidez cada media hora en cada estación. En W3 se completaron 48 horas en mareas vivas y en mareas muertas el muestreo fue de 15 horas. En la estación E1 se observó durante 36.5 horas en mareas vivas y 38.5 horas en mareas muertas.

Las figuras 20 y 21 muestran la comparación durante mareas vivas en las estaciones W3 y E1, respectivamente. Las figuras 22 y 23 presentan la comparación durante mareas muertas en los sitios W3 y E1, respectivamente.

En la figura 20a se pueden observar las concentraciones más altas cuando la marea se encuentra en sus puntos intermedios y las concentraciones bajas cuando se encuentra en máximos o mínimos del nivel del mar. Se llegan a registrar aproximadamente $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca de la superficie mientras que en el fondo la máxima concentración observada fue de $84.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En los cuatro ciclos de marea semidiurna muestreados hay variaciones significativas de la distribución de sedimentos en la columna de agua en los períodos de máxima corriente. En el tercer ciclo semidiurno de marea es donde se registraron las máximas concentraciones aunque se limitan a la parte cerca del fondo. La figura 20b muestra la distribución espacial calculada con los perfiles de Rouse para esta estación y el mismo período de muestreo. Se obtuvieron altas concentraciones de MPS en los períodos de máxima corriente pero con diferencia entre el flujo y el refluo de la marea.

Durante el flujo la concentración es más alta y llega a niveles más altos en la columna de agua que durante el reflujó. Las diferencias entre las concentraciones de MPS observadas y calculadas se presentan en la figura 20c, donde se muestra que los perfiles de Rouse son muy similares a los perfiles observados cuando la corriente es rápida pero existe una significativa subestimación de la concentración observada, que llega a ser de $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo cuando la corriente es lenta. La concentración de MPS integrada en la vertical de los perfiles observados está directamente relacionada con el flujo y reflujó de la marea con un desfase debido a la respuesta de la resuspensión de sedimentos a la corriente. Para los perfiles calculados la concentración integrada en la vertical también presenta una relación directa con el flujo y el reflujó pero con la diferencia que en corriente lenta la concentración de MPS es aproximadamente cero. En los períodos de corriente máxima las concentraciones integradas calculada y observada son muy similares en magnitud pero en la primera no se presenta el desfase de las observaciones.

En la figura 21a se muestran las observaciones de MPS para el sitio E1 durante mareas vivas. Las concentraciones altas también se presentan durante el flujo y el reflujó, pero la resuspensión de sedimentos se concentra en la parte más baja de la columna de agua, por debajo de los 10 m de ASF, sin embargo el máximo de concentración de MPS fue de $103.3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En los tres ciclos semidiurnos se registraron concentraciones más altas cerca del fondo durante el reflujó que durante el flujo. La distribución obtenida de los perfiles de Rouse para E1 en mareas vivas se muestra en la figura 21b, en donde se observa que la concentración aumenta desde cerca de cero en corriente baja hasta aproximadamente $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo en corriente máxima. No se aprecia diferencia de concentración en la columna de agua entre flujo y reflujó. Concentraciones de $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ se obtuvieron con corriente máxima a 10 m de ASF y disminuyó hacia niveles superiores de la columna de agua. Existen grandes diferencias entre la concentración

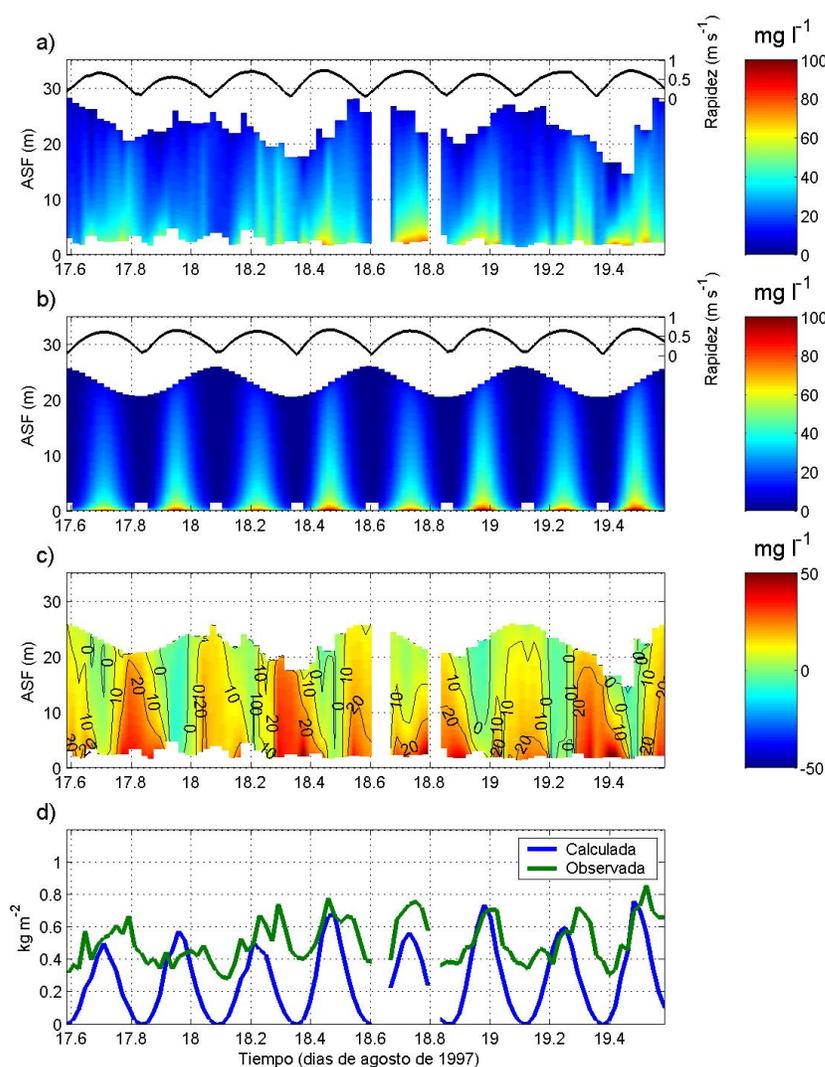


Figura 20: Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio W3 en mareas vivas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical.

de MPS observada y calculada que se muestra en la figura 21c, donde difieren desde 10 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en superficie a más de 20 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo cuando la marea está en un mínimo. Las menores diferencias se encontraron cuando la marea estaba en un máximo

y también con corriente máxima, y las mayores se concentraron en la mitad inferior de la columna de agua. En toda la serie la concentración de MPS calculada subestimó la observada y este resultado se reflejó en la concentración integrada en la vertical que se muestra en la figura 21d. La concentración integrada calculada presenta el mismo comportamiento temporal que la observada. Sin embargo la concentración calculada es aproximadamente $0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ menor que la observada.

La serie de observaciones durante mareas muertas en W3 se presenta en la figura 22a, en la que no se aprecian diferencias significativas entre flujo y reflujos. Las altas concentraciones se ubican cerca del fondo donde se registraron $27.4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mientras que en la columna de agua la concentración es de aproximadamente $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Las concentraciones calculadas con el perfil de Rouse se presentan en la figura 22b y al igual que en las concentraciones observadas, no se registra diferencia entre flujo y reflujos. Las altas concentraciones se obtienen cerca del fondo pero en comparación con las concentraciones observadas la magnitud es más baja. En las diferencias entre la concentración observada y calculada que se muestra en la figura 22c se observa que la magnitud de la subestimación de los valores reales se hace más notoria al acercarse al fondo. En superficie la diferencia es de $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y cerca del fondo llega a $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Este comportamiento se mantiene en la mayor parte de la serie. En la figura 22d la concentración integrada en la vertical calculada es muy baja comparada con la observada que presenta un valor aproximadamente constante de casi $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

En las observaciones para el sitio E1 durante mareas muertas (figura 23a) la concentración se mantiene casi constante durante toda la serie y no se observa claramente el efecto del flujo y reflujos de la marea. Existe un fuerte gradiente de concentración en la parte inferior de la columna de agua, donde se encuentran $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de concentración de MPS desde los 8 m de ASF y aumenta hacia el fondo donde se alcanza una concen-

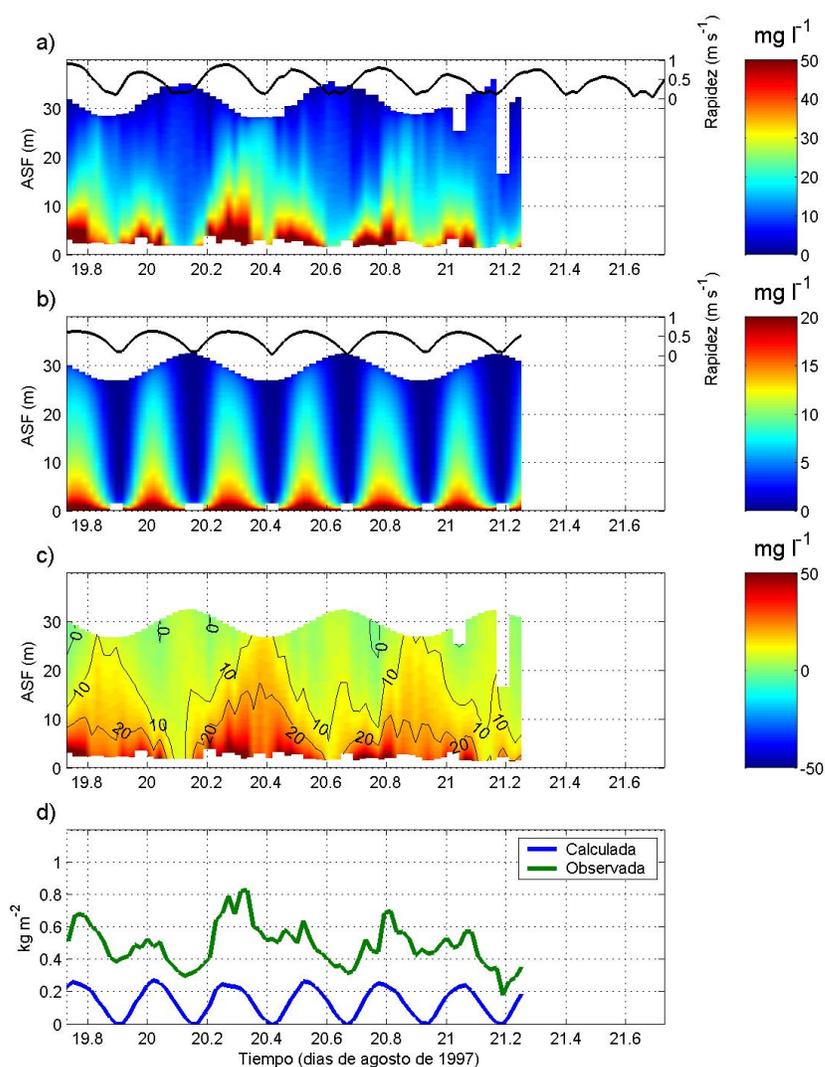


Figura 21: Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio E1 en mareas vivas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala entre esta figura y la figura 20.

tración máxima de $32.1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Arriba de los 8 m de ASF la concentración disminuye hasta aproximadamente $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La figura 23b muestra la serie de concentración calculada con los perfiles de Rouse para E1 en mareas muertas. Se observa el aumento

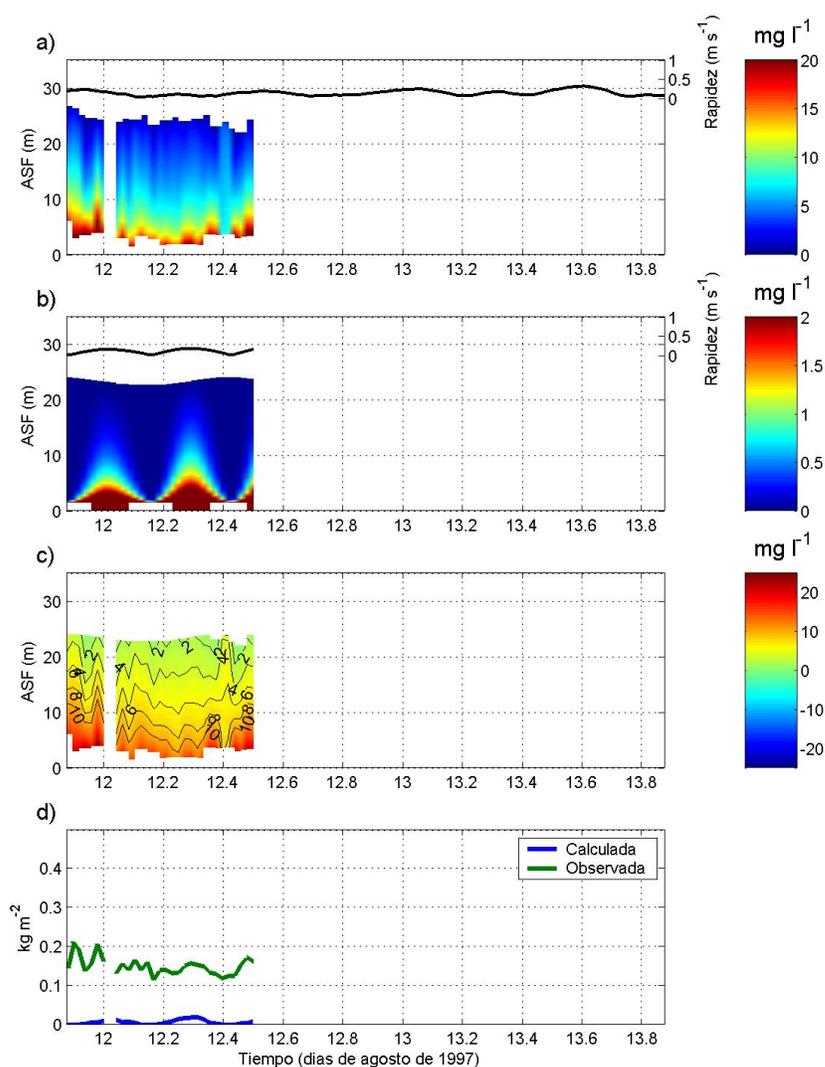


Figura 22: Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio W3 en mareas muertas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala de esta figura y las de las figuras 20 y 21.

de concentración en los períodos de flujo y reflujos y una tendencia de la resuspensión a llegar a niveles más altos en la columna de agua a lo largo de la serie. Las diferencias mostradas en la figura 23c entre los perfiles de concentración observados y calculados

presentan un gradiente hacia el fondo que se mantiene a lo largo de la mayor parte de la serie. En superficie la diferencia es de $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y aumenta hasta más de $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo. Se presenta también una ligera disminución de las diferencias en superficie desde la mitad y hacia el final de la serie donde su valor es de $2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Este comportamiento se refleja en la concentración integrada en la vertical de la figura 23d, donde los valores de las observaciones presentan un valor promedio de $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que la concentración integrada para los perfiles calculados está muy cerca de cero al principio de la serie pero aumenta en fase con la corriente de marea desde la mitad y hacia el final y se obtiene un máximo de $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

IV.3.2 Ciclo quincenal de MPS

De los perfiles de concentración de MPS calculados con el modelo de Rouse se extrajeron los valores a 1.5 m de ASF correspondientes a la posición del sitio W3 (figura 13), que es donde se cuenta con observaciones de turbidez en un ciclo quincenal a 1 m de ASF. La figura 24 muestra las series de concentración de MPS calculada y observada. La serie de turbidez observada presenta máximos de concentración en mareas muertas y mareas medias en la primera mitad del registro que no se presentan en la serie calculada (figura 24b). Sin embargo, el comportamiento temporal general durante mareas vivas es similar a la serie de concentración de MPS calculada, pero la diferencia en magnitud es considerable. Durante los máximos de mareas vivas la serie calculada presenta concentraciones de $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más altas que las concentraciones de la serie observada.

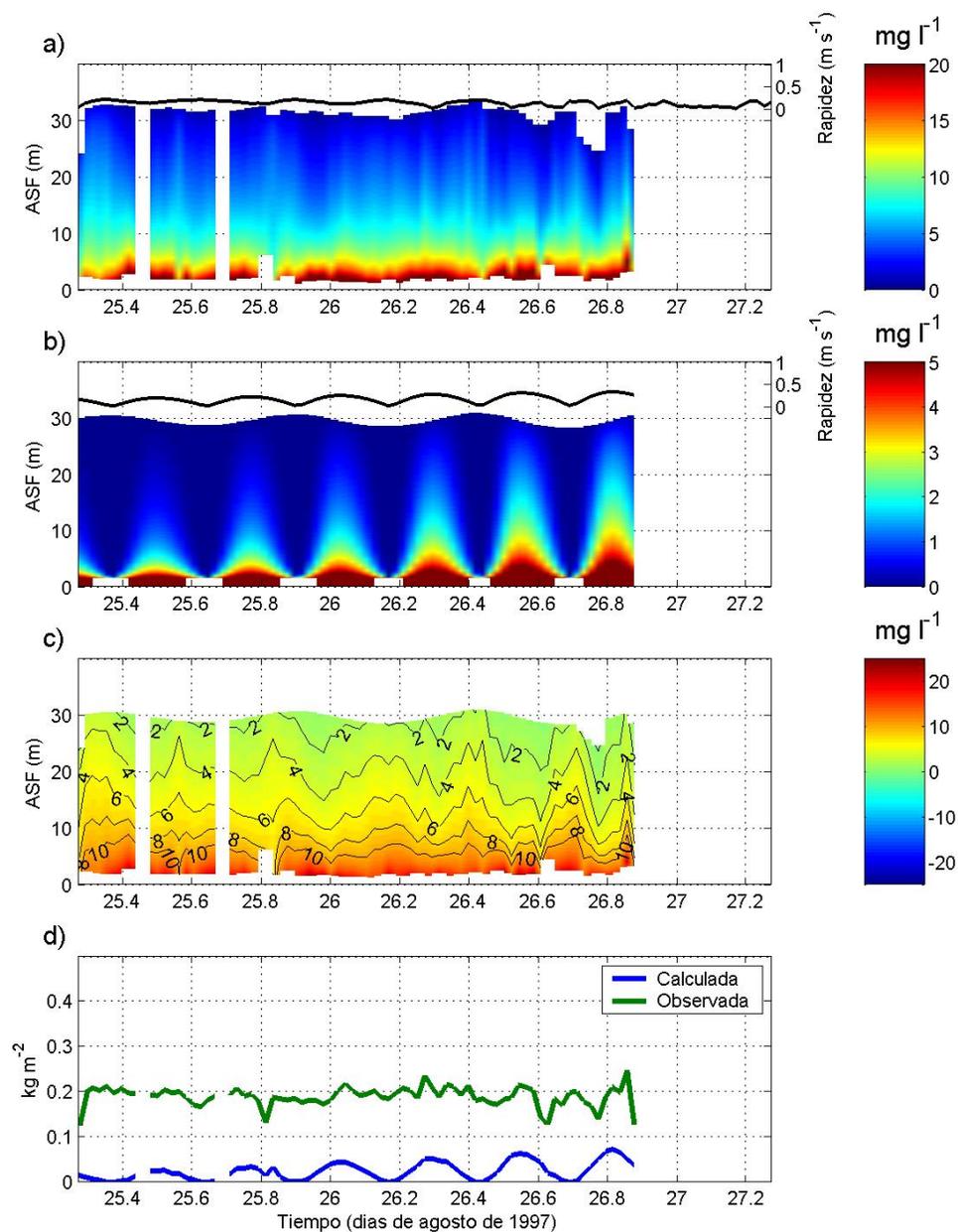


Figura 23: Comparación de concentración de MPS (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el sitio E1 en mareas muertas. a) Perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) observados, b) perfiles y rapidez (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) calculados con el modelo de Rouse y el modelo hidrodinámico respectivamente, c) diferencia entre perfiles observados y calculados y d) concentración integrada en la vertical. Note el cambio de escala de esta figura y las de las figuras 20 y 21.

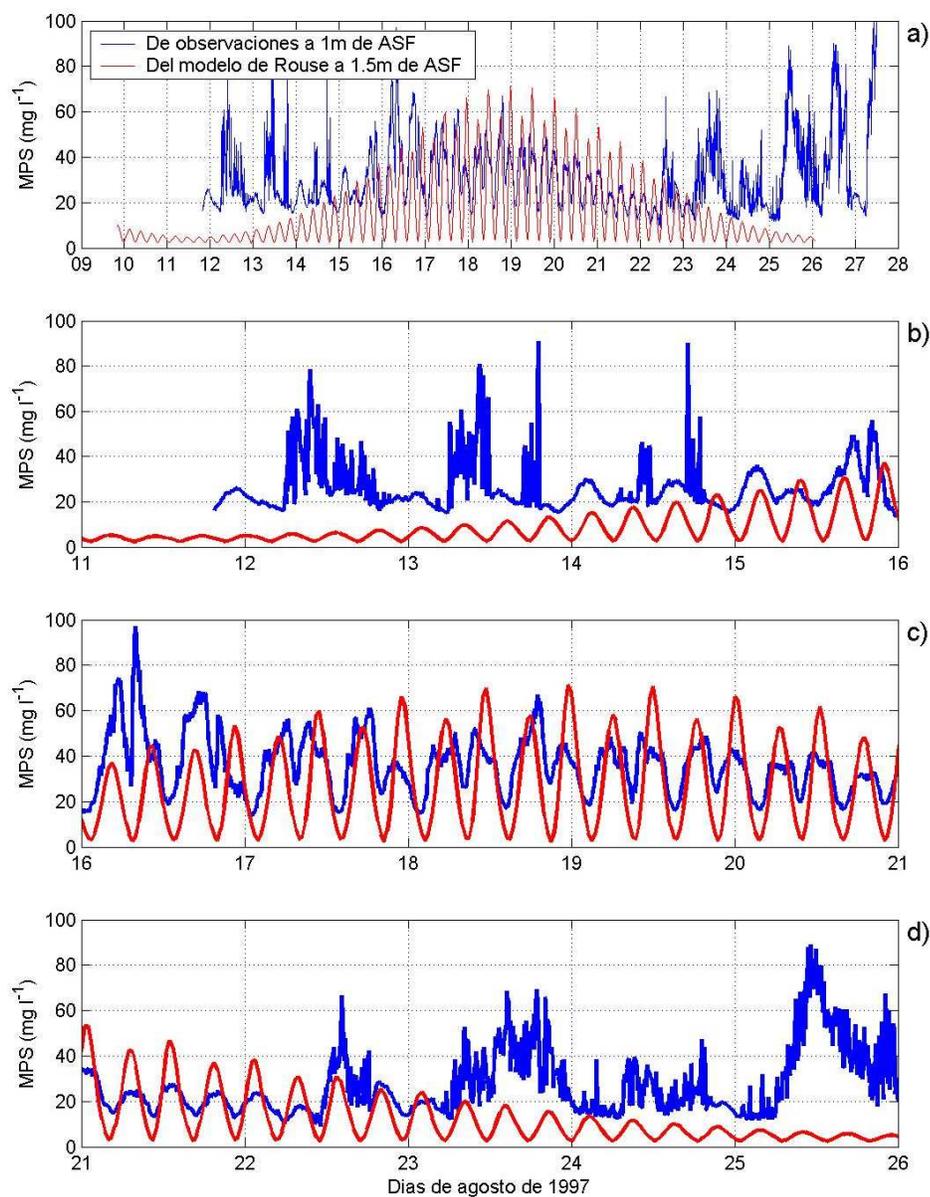


Figura 24: Series de tiempo para el sitio W3 de concentración de MPS observado y extraído de los perfiles de MPS calculados con el modelo de Rouse. a) Ciclo quincenal completo, b) sección de días 11 a 16, c) sección de días 16 a 21 y d) sección de días 21 a 26.

IV.4 Distribución espacial de la concentración de MPS calculada

IV.4.1 Mareas vivas

Las figuras 25 a 29 muestran las distribuciones de concentración de MPS durante un ciclo cuartidurno de mareas vivas a 1 m bajo la superficie y a 1.5 m de ASF. Las figuras representan la distribución horizontal de MPS cada hora durante la máxima resuspensión. La fase de la marea calculada se muestra en el recuadro para la estación W3.

En general, en todas las figuras, tanto en superficie como en fondo la concentración es más alta en la parte noroeste del AGC frente a la desembocadura del Río Colorado y disminuye hacia el sureste, pero frente a Sonora la concentración disminuye más que frente a Baja California (BC). En las partes profundas y en Bahía Adahír la concentración de MPS se mantiene por debajo de los $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ aún con la corriente máxima (figura 26).

En la figura 25a (superficie) la mayor concentración de MPS es de $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y disminuye hacia el sureste a $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Frente a BC la concentración de $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ llega más al sur que frente a Sonora. En el fondo la concentración es de más de $70 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y llega a $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ frente a San Felipe, en BC, extendiéndose hasta antes de la punta El Borrascoso en Sonora. Frente a BC se localiza un área con concentración de $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, la cual no se presenta del lado de Sonora.

Durante el máximo refluo (figura 26) se presentan las mayores concentraciones del ciclo tanto en superficie como en fondo. La distribución general presenta mayor concentración de MPS en el noroeste (frente a la desembocadura del Río Colorado) y disminuye

hacia el sur (frente a BC) y sureste (frente a Sonora). En superficie la concentración más alta fue de $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mientras que cerca del fondo la concentración máxima fue de $150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En superficie la concentración disminuye a menos de $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en la mayor parte del AGC. Cerca del fondo disminuyó la concentración a menos de $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en las áreas profundas, frente a El Borrascoso y Bahía Adahír. Frente a Baja California la concentración que se alcanzó fue siempre mayor que la concentración frente a Sonora. Sin embargo, cerca de la costa de BC la concentración es de $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, mientras que hacia el este se encuentra la zona de mayor concentración (más de $60 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) pero todavía en la mitad del lado de BC.

En la figura 27 la corriente empieza a disminuir y la concentración baja en el fondo en aproximadamente $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en las isolíneas de mayor concentración. En superficie se encuentran $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más hacia el noroeste aunque en el extremo de esta parte se tienen concentraciones altas.

En la figura 28 en superficie la concentración en la mayor parte del AGC es menor a $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, solo en el extremo noroeste en la mitad del lado de BC la concentración es más alta y llega a más de $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En el fondo la concentración disminuye en las zonas de mayor concentración en aproximadamente $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ comparado con la etapa anterior (figura 27b).

En la figura 29 la corriente es mínima y la concentración disminuye considerablemente tanto en superficie como en fondo. En superficie solo un área en la esquina noroeste tiene concentración mayor a $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En el fondo también la mayor parte del AGC tiene concentración menor a $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y se llega a $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en una zona reducida también en el extremo noroeste.

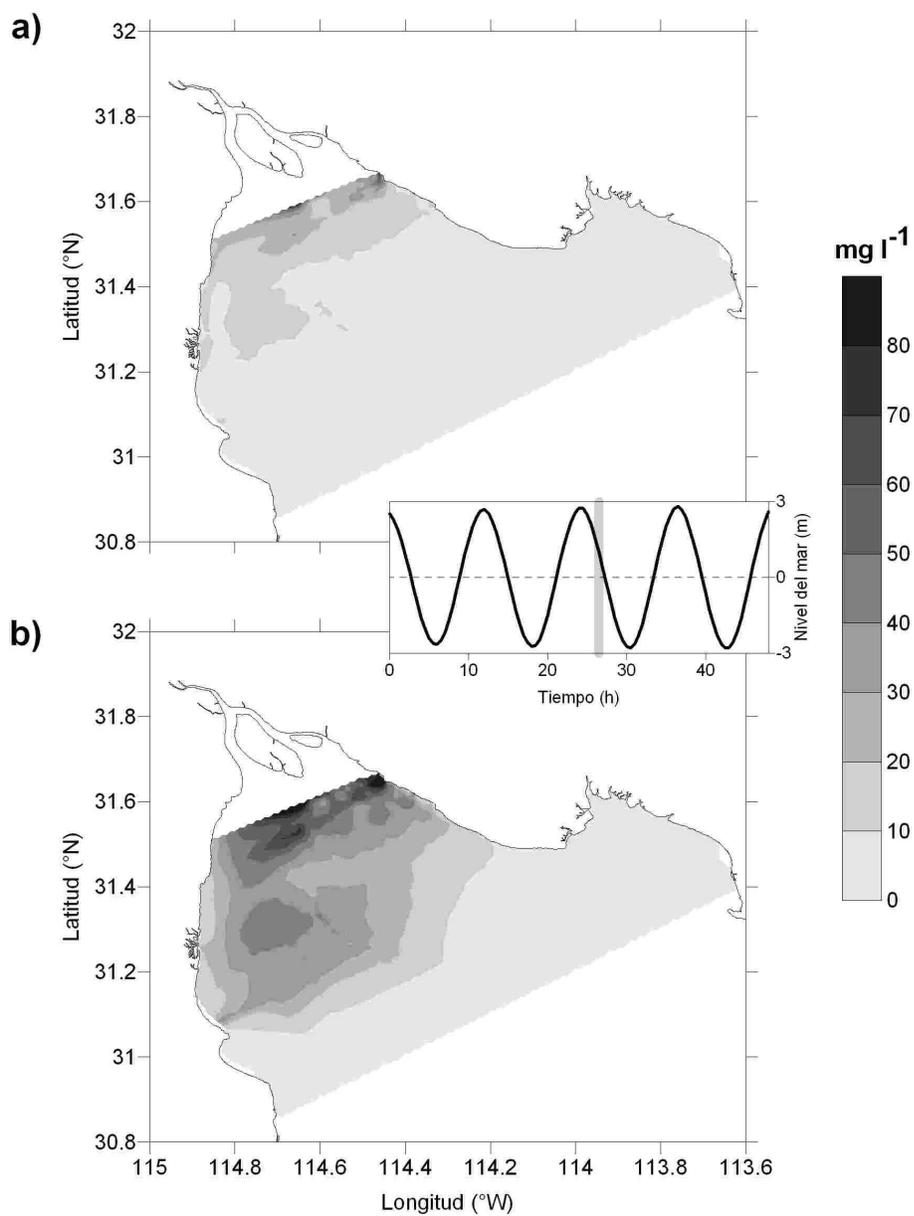


Figura 25: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

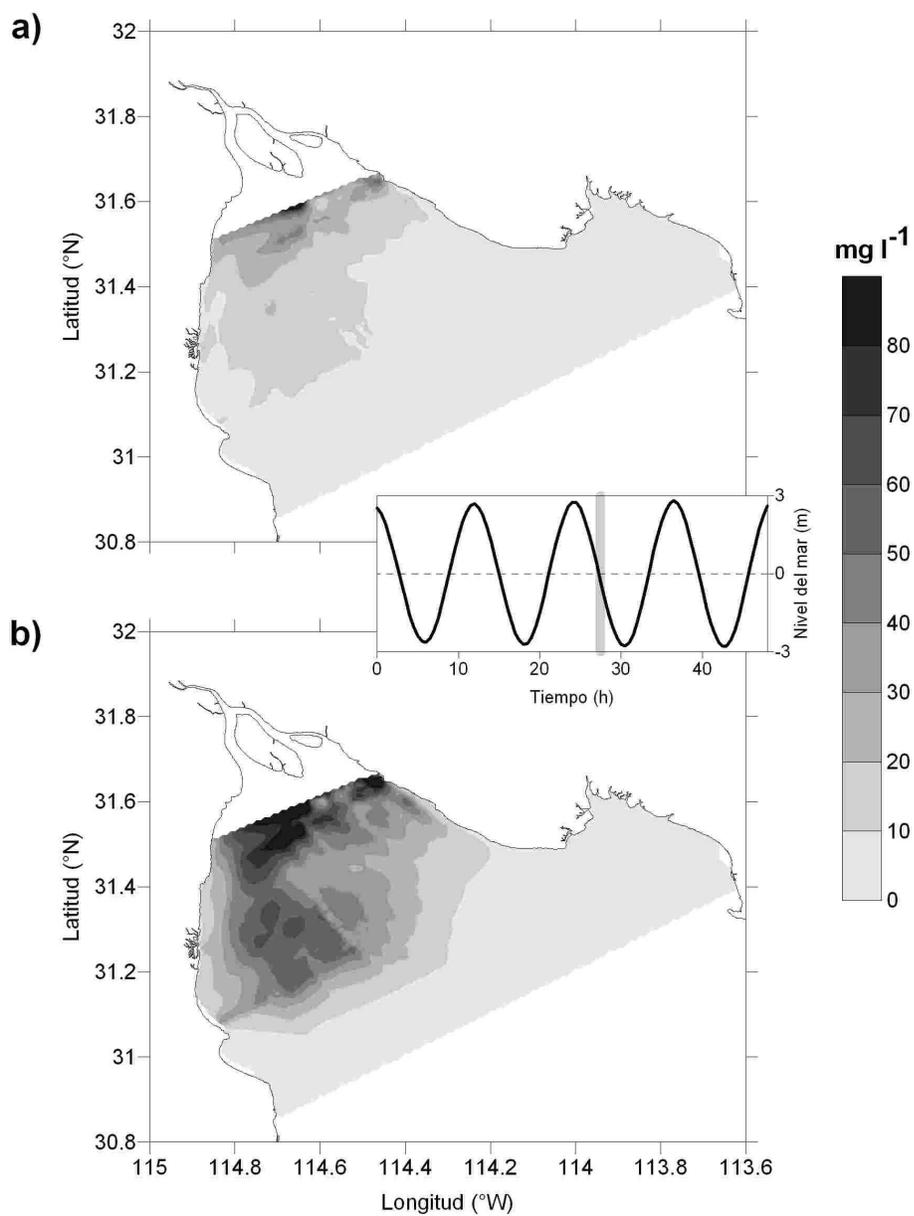


Figura 26: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

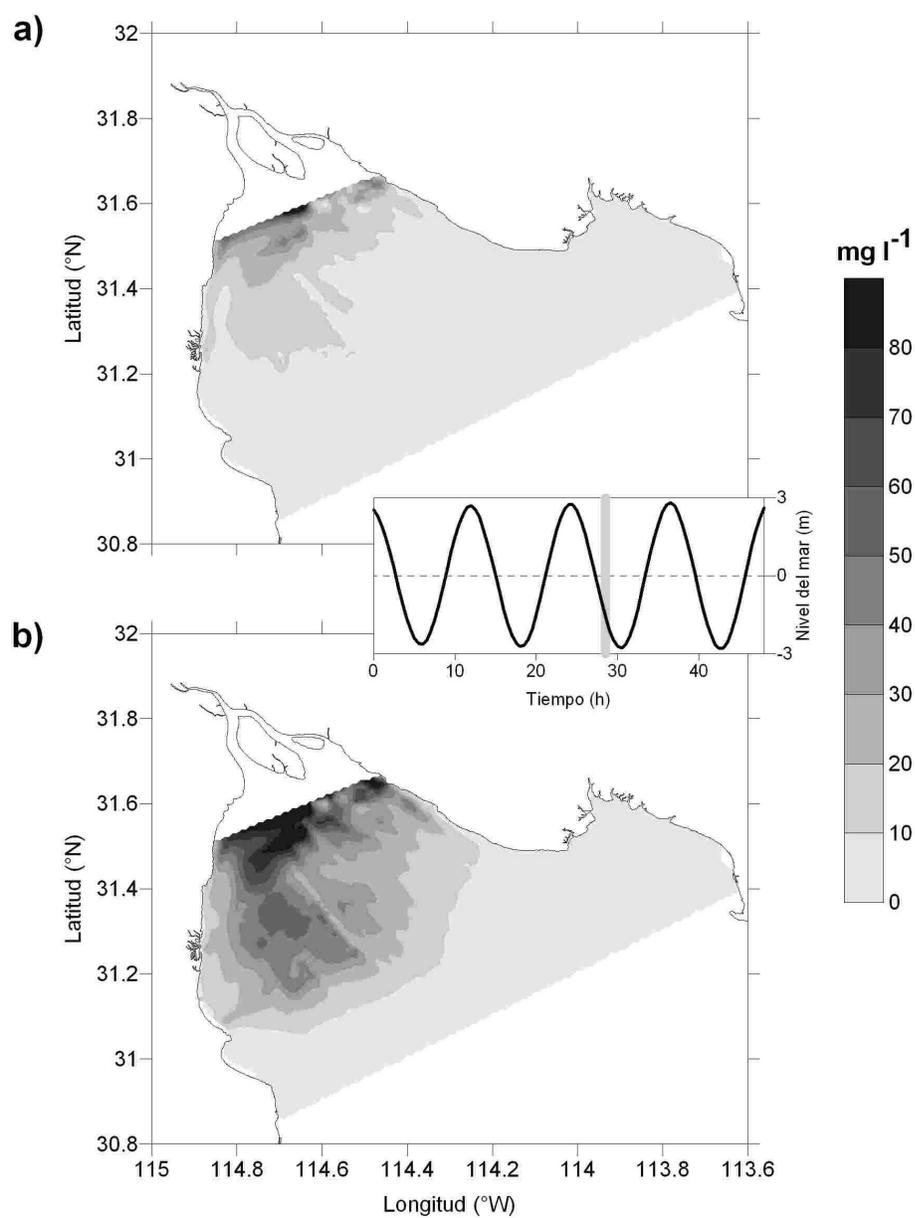


Figura 27: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

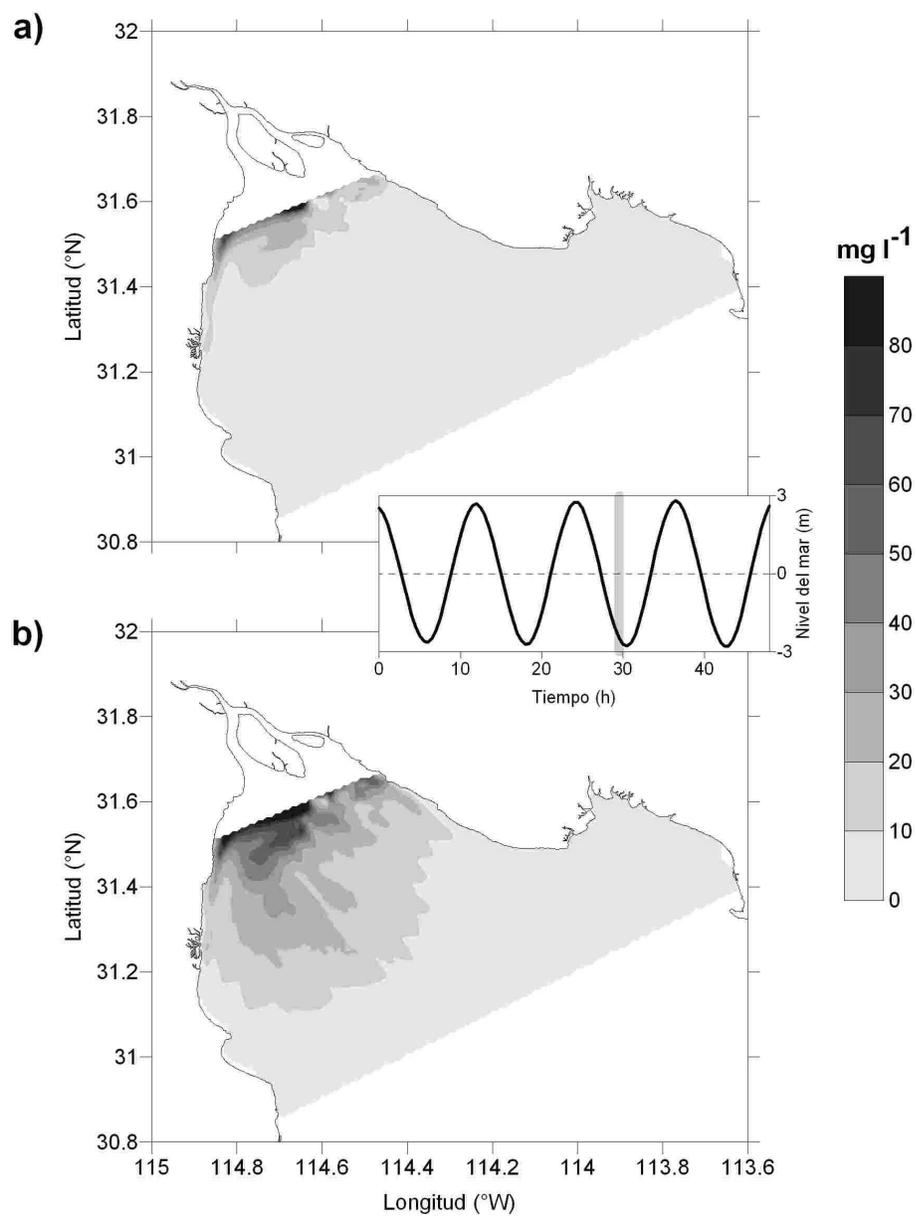


Figura 28: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

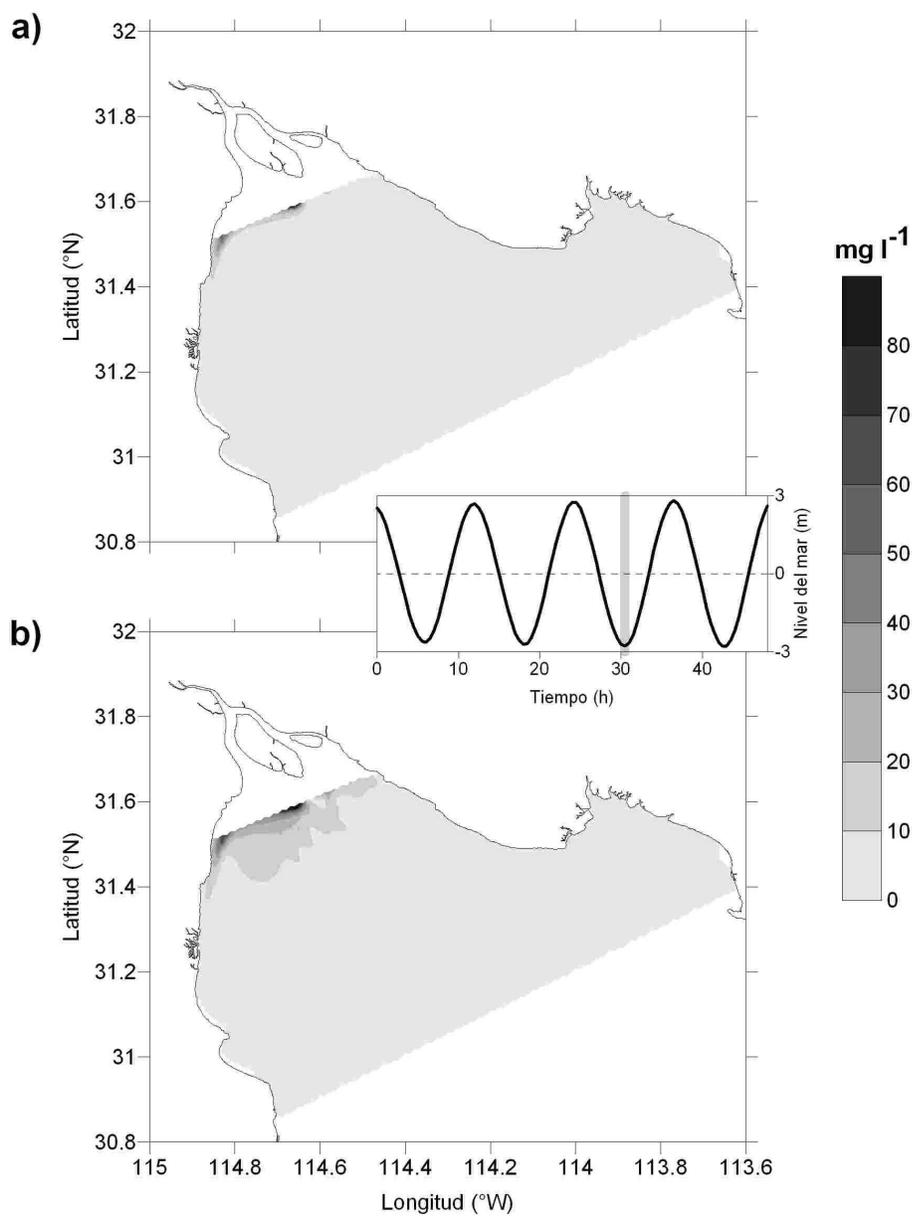


Figura 29: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas vivas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

IV.4.2 Mareas muertas

La distribución espacial de concentración de MPS durante un ciclo cuartidiurno en mareas muertas a 1 m bajo la superficie y a 1.5 m de ASF se presenta en las figuras 30 a 34. Las figuras representan la distribución horizontal de MPS cada hora durante la mínima resuspensión. La concentración de MPS en todo el ciclo cuartidiurno fue menor a $12 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En superficie la máxima concentración alcanzada fue de $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en Bahía Adahír. Cerca del fondo se obtuvieron máximos de concentración ($\sim 10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) frente a la desembocadura del Río Colorado, frente a El Borrascoso y a $\sim 20 \text{ km}$ frente a BC (31.35°N). La concentración frente a El Borrascoso se mantiene en $\sim 10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ durante todo el ciclo cuartidiurno, mientras que en los otros dos sitios la concentración disminuye.

En la figura 30 la corriente está en un mínimo y en superficie (figura 30a) la concentración de MPS en todo el AGC es de $\sim 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con los máximos en Bahía Adahír y la costa de BC, mientras que cerca del fondo (figura 30b) la concentración se aproxima a $6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. A excepción del máximo frente a BC, la concentración es $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más alta en las zonas profundas y en el lado de Sonora ($>4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) que frente a Baja California ($<4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

En la figura 31 la corriente empieza a aumentar y en superficie (figura 31a) la concentración de MPS se incrementa en $\sim 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con los máximos en las mismas áreas que la etapa anterior. En el fondo (figura 31b) la concentración de MPS también aumenta en $\sim 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en casi todo el AGC, pero en las zonas profundas y en Bahía Adahír se mantiene igual que en la etapa anterior. Del lado de Sonora la concentración es de $\sim 6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y sigue siendo más alta que frente a BC ($\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

En la figura 32 la corriente se acerca al máximo y es donde se presentan las más

altas concentraciones del ciclo cuartidiurno. En superficie la concentración llega a $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ frente a El Borrascoso pero en general es menor a $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. A 1.5 m de ASF la concentración aumenta $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en todo el AGC. En las zonas profundas y en Bahía Adahír se obtuvo concentración de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En la parte norte de la costa de BC se obtuvo la concentración más baja de $\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Los máximos de concentración llegaron a más de $7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y desde la parte media y hacia Sonora la concentración fue mayor ($\sim 6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) que frente a BC ($\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

En la figura 33 la corriente ya pasó por el máximo y las concentraciones empiezan a disminuir. En superficie (figura 33a) en la distribución horizontal de MPS aun se encuentra concentración de $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ frente a El Borrascoso y las concentraciones más altas en Bahía Adahír y frente a la costa norte de BC, pero en general la concentración de MPS en superficie es menor a $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Cerca del fondo (figura 33b) la concentración disminuye menos de $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pero la distribución general se mantiene igual que en la etapa anterior.

En la figura 34 la corriente es más lenta que en la etapa anterior y la concentración presenta cambios significativos. En superficie (figura 33a) la concentración disminuye y ya no se encuentra el máximo de $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de etapas anteriores, y en algunas partes de Bahía Adahír la concentración a disminuido en $\sim 1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. En el fondo (figura 33b) los máximos de concentración han disminuido a menos de $7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, las zonas profundas y Bahía Adahír a menos de $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y en el extremo noroeste del AGC, desde la parte media y hacia Sonora la concentración es de $\sim 5.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Frente a BC persiste un mínimo de concentración, igual que en etapas anteriores, menor a $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

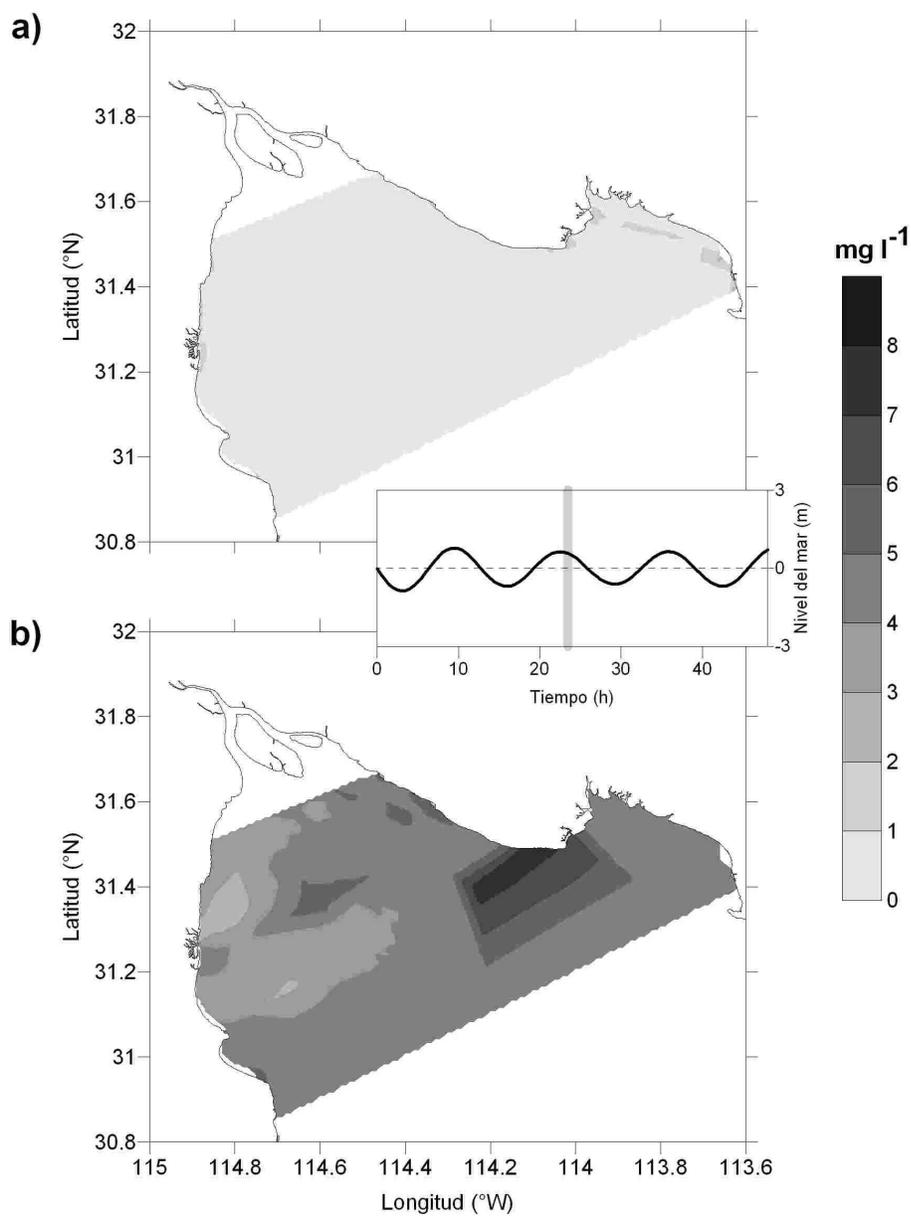


Figura 30: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

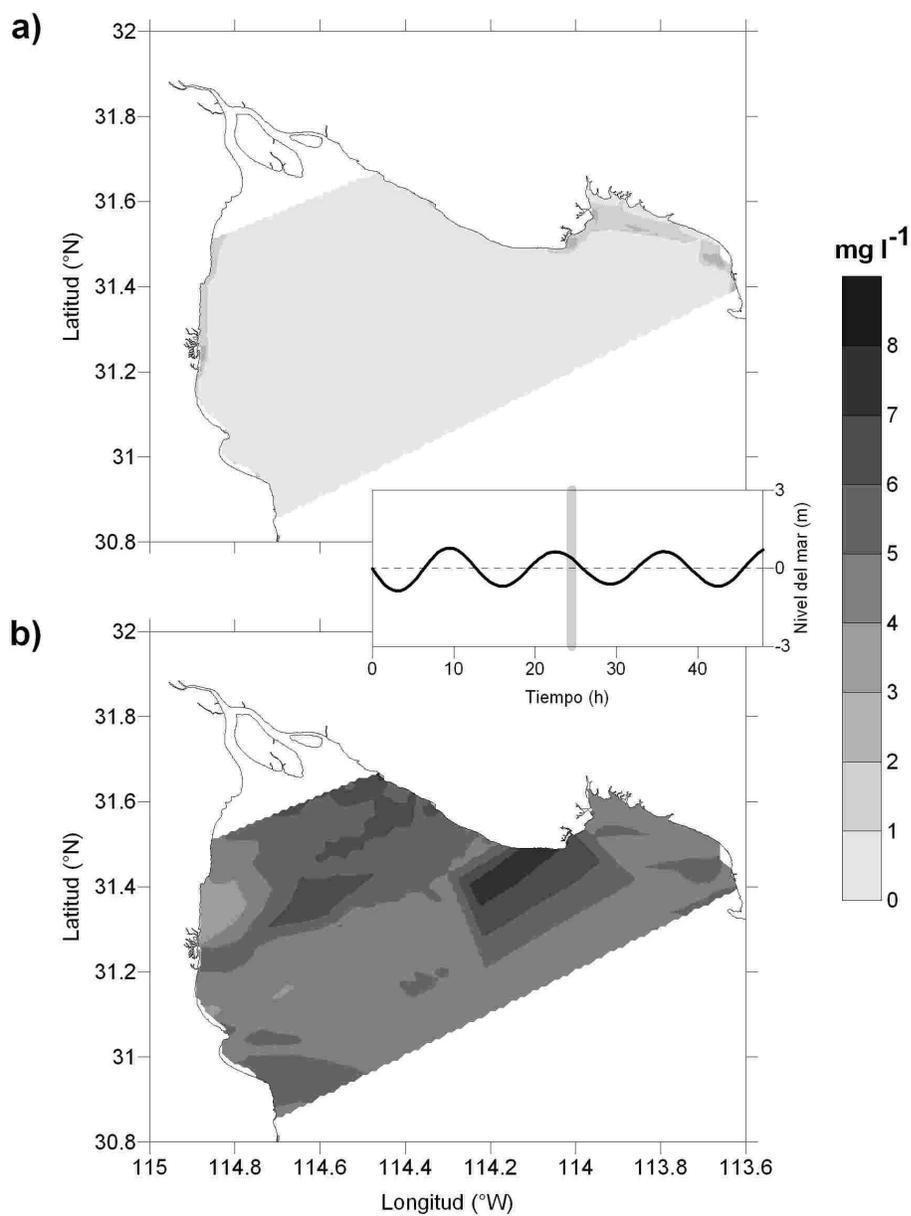


Figura 31: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

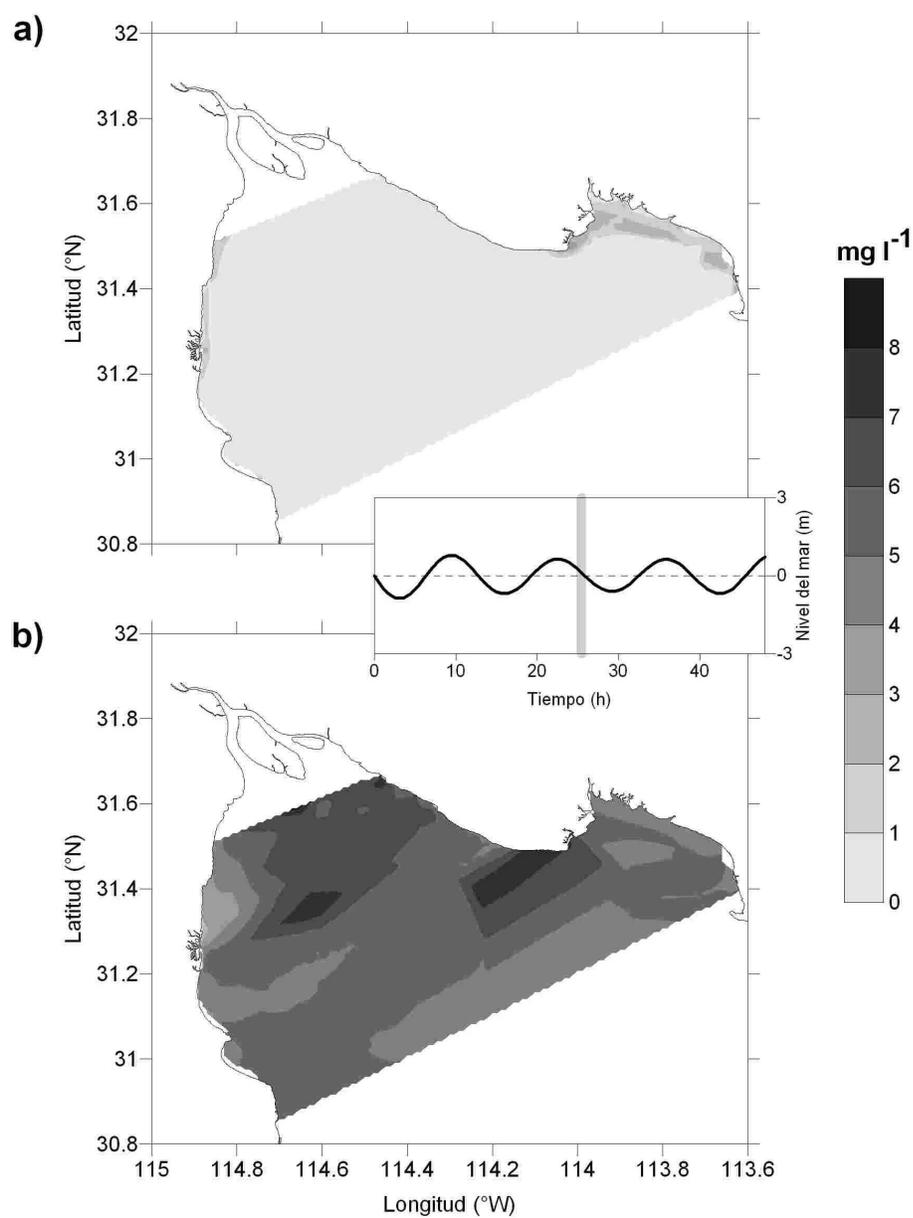


Figura 32: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

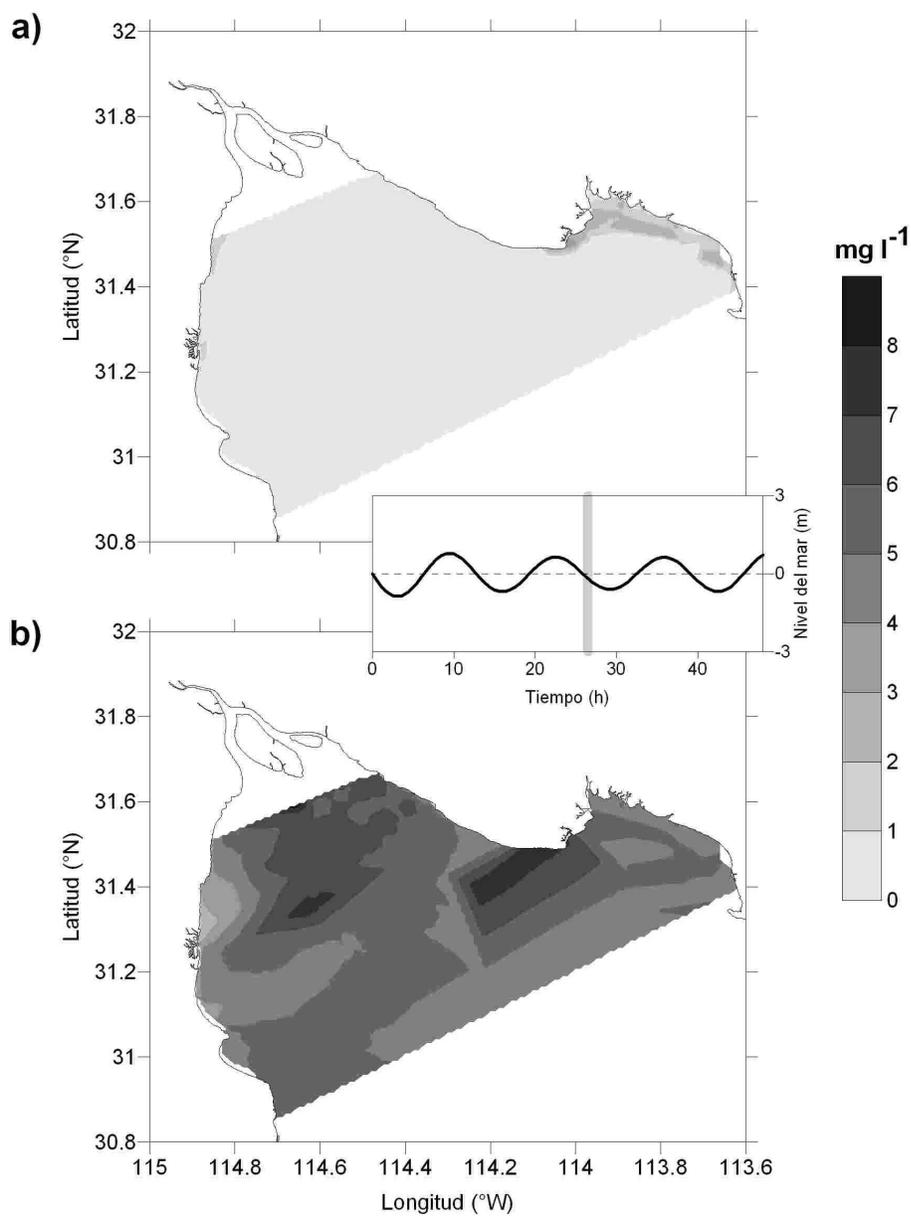


Figura 33: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

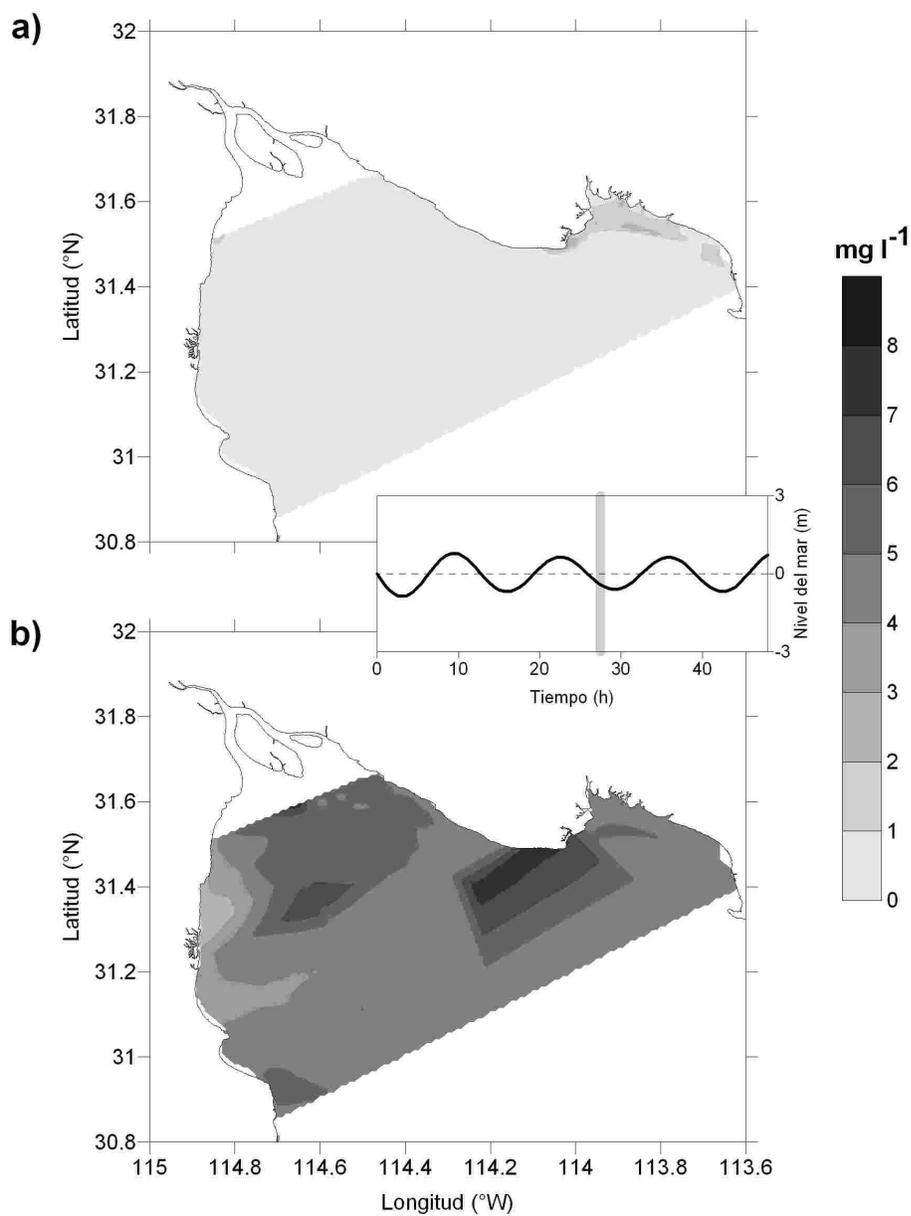


Figura 34: Distribución espacial de concentración de MPS en mareas muertas. a) 1 m bajo el nivel del mar y b) 1.5 m de altura sobre fondo. El recuadro muestra el nivel del mar en la estación W3.

IV.4.3 Comparación de concentración de MPS y coeficiente de atenuación de luz

A partir de imágenes AVHRR se obtiene para la superficie el coeficiente de atenuación de luz a 660 nm, el cual es proporcional a la turbidez y por lo tanto es posible hacer una comparación cualitativa con la distribución superficial de la concentración de MPS calculada. La figura 35 muestra el coeficiente de atenuación de luz correspondiente a mareas vivas del 19 de agosto de 1997 a las 21:30 horas (R.W. Gould, com. pers.) y la distribución espacial de la concentración de MPS calculada a 1 m bajo la superficie para aproximadamente la misma fase de marea. Cualitativamente la distribución superficial mostrada por las magnitudes del coeficiente de atenuación de luz y la concentración de MPS es similar. Se presentan los valores más altos en la región noroeste, disminuyen hacia el sureste y se reflejan también los rasgos batimétricos en forma de bandas paralelas al eje del AGC.

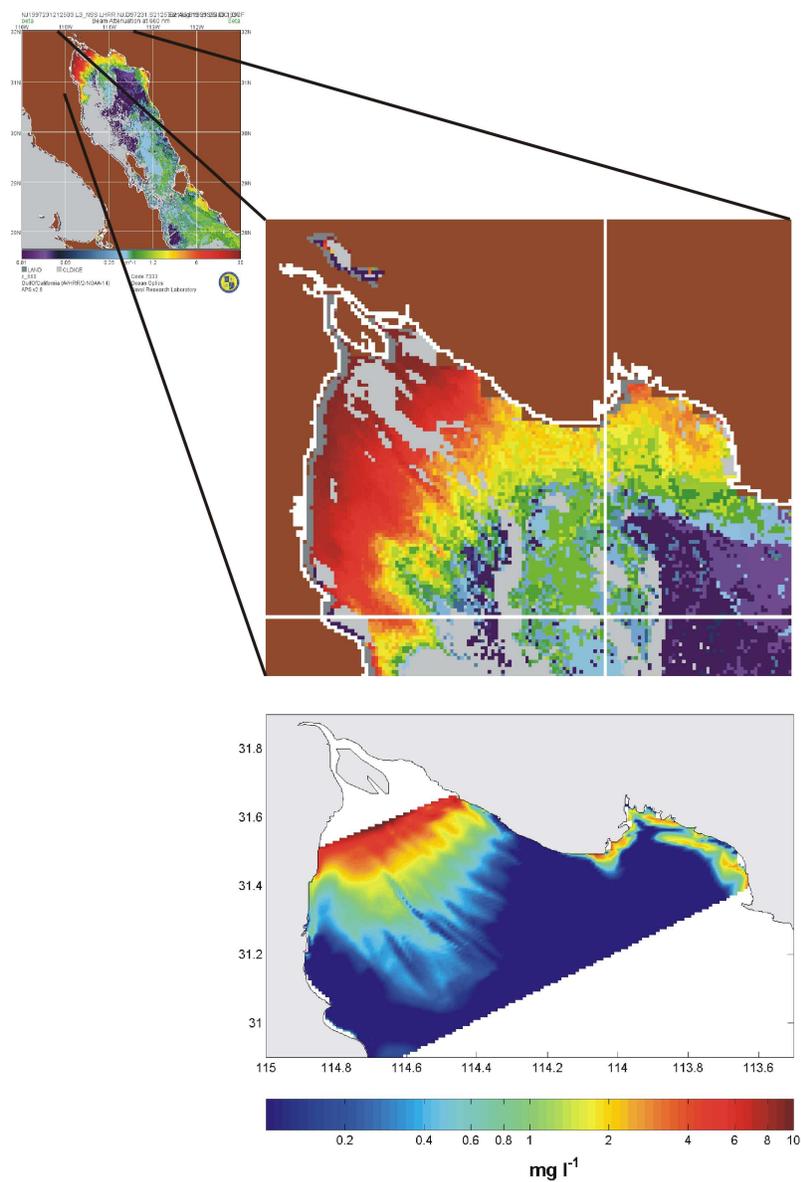


Figura 35: Comparación de la distribución espacial superficial del coeficiente de atenuación de luz observado en imagen de satélite durante mareas vivas del 29 de agosto de 1997 a ~21:30 (GMT) y la correspondiente distribución espacial superficial de MPS calculada.

V

Discusión

V.1 Introducción

Los estuarios se consideran de gran importancia por las múltiples actividades que se llevan a cabo en ellos (pesca, acuicultura, puertos, industrias y actividades recreativas). La explotación racional requiere conocer y entender los procesos físicos en los estuarios. En particular, aquellos involucrados con el material en suspensión son importantes debido a las grandes cantidades que los estuarios reciben y a su influencia en la calidad del agua, la producción primaria y la dispersión de contaminantes. Las observaciones para estudiar el comportamiento del material en suspensión están limitadas en espacio y tiempo, la alternativa es combinarlas con modelos numéricos. Un método sencillo de estimar la distribución vertical instantánea del material particulado en suspensión es el modelo de Rouse, el cual utiliza una concentración de MPS de referencia medida cerca del fondo, la velocidad de asentamiento de las partículas y la velocidad de fricción que las mantiene en suspensión.

El AGC recibía grandes cantidades de sedimento del Río Colorado y por lo tanto es importante conocer los procesos involucrados en la dinámica del MPS. El presente estudio se enfoca en conocer la variabilidad espacial y temporal del MPS debidas a resuspensión por corrientes de marea en un ciclo quincenal. Se combinan observaciones de concentración de MPS cerca del fondo con cálculos de rapidez de la corriente obtenidas de un modelo numérico para calcular la variabilidad quincenal de la concentración de referencia en todo el AGC. Estas concentraciones de referencia se usaron para obtener

perfiles de concentración de MPS con base en la ecuación de Rouse en cada punto de una malla de 0.9 por 0.9 km y a intervalos de 0.5 h en un ciclo quincenal. A continuación se discuten los resultados de la variación espacial de concentración de MPS durante mareas vivas y mareas muertas y la comparación con concentraciones de MPS observadas en ciclos diarios y quincenales. También se discuten los alcances del método para calcular la concentración de referencia llevado a cabo en este trabajo así como las parametrizaciones de la ecuación de Rouse y los resultados del modelo numérico.

V.2 Distribución espacial de la concentración de MPS en mareas vivas

La distribución horizontal de la concentración de MPS calculada durante mareas vivas presenta altas concentraciones en el oeste y noroeste del AGC, lo cual está de acuerdo con la distribución granulométrica de sedimento de fondo descrita por Thompson (1968) y Carriquiry y Sánchez (1999). Los autores encuentran que el sedimento del lado de BC es predominantemente fino (limo) y por lo tanto se resuspende con un esfuerzo crítico menor mientras que del lado de Sonora el sedimento es más grueso y más difícil de resuspender. En el sentido longitudinal al eje del Golfo de California se encontraron las concentraciones más altas hacia la cabeza del AGC, lo cual se puede atribuir a un mayor esfuerzo de fondo producido por la corriente en esta zona.

Aunque la comparación entre las distribuciones de concentración superficial de MPS calculada y coeficiente de atenuación de luz de la imagen de satélite es cualitativa (Figura 35), los resultados concuerdan en las características generales. Se presentan los valores más altos frente a la desembocadura del Río Colorado, en la parte somera y los más bajos hacia el sureste, en la parte profunda. En Bahía Adahír también se calcularon

valores altos de concentración de MPS que coinciden con valores altos de coeficiente de atenuación de luz. La diferencia más grande en la distribución de estas dos cantidades se encuentra en la región a lo largo de la costa de Baja California, donde hay valores altos del coeficiente de atenuación de luz mientras que la concentración de MPS es muy baja. Esta diferencia probablemente se debe a que el lado oeste del AGC está formado de planicies lodosas donde efectivamente existe una alta resuspensión durante el flujo y reflujo de la marea y se intensifica debido al efecto del oleaje. Esta característica no puede ser reproducida por el modelo numérico utilizado debido a que la corriente disminuye al acercarse a esta frontera (Figura 15) y se obtienen bajos valores de concentración de MPS.

La batimetría del AGC presenta en la parte central una serie de bajos y depresiones alargadas orientadas aproximadamente con el eje del Golfo de California. Estas estructuras se reflejaron en la magnitud de la corriente calculada, la cual es un poco más lenta en los bajos que en las depresiones (máximo de $\sim 0.1 \text{ m s}^{-1}$) y por lo tanto la concentración de MPS calculada también disminuye en los bajos (máximo de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). La variabilidad espacial del coeficiente de atenuación de luz observada en la imagen de satélite muestra una morfología semejante a la de los bajos y depresiones observados en la batimetría, aunque no fue posible definir si los valores altos de dicho coeficiente coinciden con las depresiones y los valores menores con los bajos de profundidad. Sin embargo se puede afirmar que la distribución espacial horizontal de la concentración de MPS calculada es una buena aproximación de las características globales ($>10 \text{ km}$) pero no se puede asegurar que a escalas más pequeñas ($<10 \text{ km}$) la concentración refleje las observaciones.

La distribución espacial de la concentración de MPS calculada en mareas vivas está de acuerdo con los resultados esperados con base en la granulometría de sedimentos de

fondo y la magnitud de la corriente en el extremo norte y en zonas profundas del AGC. También se obtuvo en mareas vivas la concentración más alta ($\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) que en mareas muertas ($\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), las cuales se discuten a continuación.

V.3 Distribución espacial de la concentración de MPS en mareas muertas

Las concentraciones de MPS más bajas se obtuvieron durante mareas muertas. A un metro bajo la superficie resaltan solo algunas zonas con mayor concentración que la mayor parte del AGC que coinciden con profundidades menores a 5 m. Cerca del fondo la distribución espacial de la concentración es en promedio $4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más alta que a 1 m bajo la superficie y no refleja ningún rasgo de batimetría, en contraste con la distribución espacial en mareas vivas. Tampoco se observa relación entre la distribución granulométrica de fondo y la concentración, e inclusive la concentración de MPS hacia el lado de Sonora es $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más alta que del lado de BC. En condiciones de corriente lenta la posición de las altas concentraciones de MPS calculadas en este estudio ($10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) coincide con los sitios de altas concentraciones observadas por Álvarez-Sánchez (2003), $\sim 114^\circ\text{W}$ y 31°N , pero son $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ más bajas. Esta diferencia disminuye si se comparan otras regiones del AGC (Figuras 6 y 31). Sin embargo, en la mayor parte la concentración reportada por Álvarez-Sánchez (2003) es más alta. Las diferencias se atribuyen a que la concentración de MPS (p. ej. Figura 31) se calculó con base en la corriente debida al forzamiento de las componentes M_2 y S_2 de la marea, mientras que las observaciones (Figura 6) registran también la contribución de componentes de marea no incluidas y otros factores a la concentración de material particulado (concentración residual, transporte horizontal de partículas, resuspensión por actividad biológica). En

condiciones de corriente lenta en mareas muertas ($<0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), el transporte de MPS debido a advección horizontal debe ser de menor importancia por lo que los otros factores mencionados deben contribuir con la mayor parte de la diferencia de concentración encontrada. Una característica sobresaliente en la distribución espacial de MPS cerca del fondo durante mareas muertas es la presencia de una región de alta concentración frente a El Borrascoso (p. ej. Figura 30). Este resultado se debe a que la concentración de referencia calculada para esta zona (grupo 14, figura 18e) es más alta que la calculada para otras regiones del AGC en velocidades lentas. En la región representada por el grupo 14 se obtiene concentración de referencia de $\sim 7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ para todo el rango de corriente ($0\text{-}0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), mientras que la concentración de referencia de los otros grupos es de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en corriente lenta ($<0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Por lo tanto, se obtiene un máximo de concentración de MPS que no se observa en la distribución de Álvarez-Sánchez (2003) mostrada en la Figura 6 y que tampoco puede explicarse con la distribución granulométrica de sedimentos de fondo. Al parecer es necesario contar con más observaciones para confirmar si el máximo de concentración en esta región existe.

Durante mareas muertas la distribución espacial de la concentración de MPS fue similar a la distribución espacial observada por Álvarez-Sánchez (2003) para corriente menor a $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aunque la magnitud calculada fue menor.

V.4 Comparaciones de concentración de MPS calculada y observada

V.4.1 Ciclos diurnos

Durante las variaciones diurnas en las dos estaciones (W3 y E1), el comportamiento de las concentraciones de MPS observadas y calculadas fue similar. Las altas concentraciones de MPS calculadas y observadas se presentan en los períodos de máxima corriente cuando la resuspensión es más fuerte y las concentraciones de MPS son más bajas cuando la corriente es lenta y favorece el asentamiento de las partículas. La concentración calculada presenta diferencias entre los máximos alcanzados durante el flujo y reflujo que también se presentan en las concentraciones de MPS observadas. Estas diferencias se discutirán más adelante. En la mayor parte de los períodos de tiempo en corriente alta ($>0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) las diferencias entre la concentración calculada y observada fueron cercanas a cero y en los casos de corriente lenta ($<0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) la concentración de MPS calculada fue más baja que la observada. En promedio las diferencias son de $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en mareas vivas y de $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en mareas muertas como se observa en las figuras 20 a 23.

En la estación W3 la distribución vertical de la concentración de MPS calculada es similar a la distribución observada durante los máximos de corriente. En estos períodos la diferencia entre la concentración observada y calculada es cercana a cero. Esto indica que los parámetros usados para calcular la concentración de MPS de la columna de agua son adecuados para esta estación y condiciones de corriente. En los periodos de corriente lenta la distribución vertical de la concentración de MPS calculada subestima las observaciones. De hecho, la concentración calculada cerca del fondo es cercana a cero

mientras que en las observaciones se registraron $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. La concentración integrada en la vertical también muestra este comportamiento, con valores muy similares en los máximos de corriente y diferencias significativas en corriente lenta debidas a la baja concentración de MPS calculada. La subestimación de las observaciones se debe a que por lo menos alguno de los valores usados en el cálculo de la concentración de MPS es diferente al considerado (de w_s , u_* o C_a) o bien existen factores importantes no tomados en cuenta (p. ej. advección horizontal). Para los períodos de corriente lenta la velocidad de fricción debe producir poca o nula resuspensión y la advección horizontal también debe ser mínima. También se supuso una velocidad de asentamiento constante pero calculada con base a observaciones en esta estación (Álvarez-Sánchez, 2003). Por lo tanto la subestimación de la concentración observada debe originarse en el cálculo de C_a .

En los mínimos de corriente, la concentración de referencia debe ser muy cercana a la concentración residual local, la cual durante mareas vivas se forma de una concentración permanente de sedimento muy fino y una concentración de sedimento más grueso que no se asienta entre flujo y reflujo. Este sedimento es el que ya no está presente durante mareas muertas porque se alcanza a asentar durante los períodos de corriente lenta, que son más prolongados que en mareas vivas (Figura 22), y en la columna de agua queda solo la concentración residual quincenal, es decir, la concentración de material particulado muy fino presente tanto en mareas vivas como en mareas muertas. Para todo el AGC se observó concentración mínima de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ que debía ser la concentración residual, pero para esta estación (W3) la concentración mínima observada cerca del fondo es de $\sim 15 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Álvarez-Sánchez, 2003) y por lo tanto esta cantidad debe ser la concentración de MPS residual local a este nivel. Weeks, et al. (1993) también encontraron dificultades para simular la serie de concentración durante los periodos de corriente lenta y durante

mareas muertas; en este último caso la varianza explicada por su simulación disminuye a 30% mientras que en mareas vivas es mayor al 70%. Para este estudio, que solo toma en cuenta la resuspensión debida a corriente de marea inducida por las componentes M_2 y S_2 , se puede decir que para mareas vivas la distribución de la concentración de MPS es adecuada durante $\sim 50\%$ del tiempo, mientras que en mareas muertas es menor a $\sim 25\%$.

En la estación E1 la concentración de MPS calculada en mareas vivas reproduce la concentración observada en la mayor parte de la columna de agua en corriente lenta al terminar el flujo, mientras que en el reflujó las diferencias son significativas. La concentración integrada en la vertical muestra que la diferencia entre las dos series es un valor constante tanto para mareas vivas como para mareas muertas. En esta estación las diferencias tienen mayor relación con el flujo y el reflujó de la corriente, las cuales se discuten a continuación.

Las desigualdades de concentración de MPS entre flujo y reflujó observadas en mareas vivas se deben a la magnitud de la corriente alcanzada en cada fase. Como en este estudio, Weeks et al. (1993) y Jones et al. (1998) también encontraron diferencias en la concentración de MPS dependientes del sentido de la corriente. En la estación W3 (figura 20b) las concentraciones son mayores durante el flujo y se deben a diferencias de $\sim 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la magnitud de la corriente, pero en las observaciones (Figura 20a) no es clara la desigualdad entre flujo y reflujó. Para la estación E1 en mareas vivas la diferencia de rapidez calculada entre flujo y reflujó es de $\sim 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 21b). Con esta cantidad no se aprecian desigualdades entre flujo y reflujó de la distribución de la concentración de MPS calculada (Figura 21b). En la concentración observada sí se obtuvieron diferencias entre flujo y reflujó debidas a la magnitud de la corriente, la cual fue más rápida durante el reflujó y donde se presentaron los máximos de concentración

(Figura 21a). Sin embargo, las diferencias entre concentración calculada y observada son mínimas al finalizar el flujo (Figura 21c), lo cual indica que la magnitud de la concentración calculada en esta fase es congruente con las observaciones, pero existe una subestimación durante el reflujó debida a la diferencia de corriente que no se presenta en la rapidez calculada por el modelo.

En resumen, el comportamiento de la concentración de MPS calculada para los ciclos diurnos fue similar al observado, con mayores concentraciones en mareas vivas que en mareas muertas. Se logró reproducir con diferencias mínimas la concentración de la columna de agua en la estación W3 en mareas vivas en los máximos de corriente mientras que para E1 durante mareas vivas, las desigualdades entre la concentración de MPS en la columna de agua observada y calculada fueron mínimas al finalizar el flujo.

V.4.2 Ciclo quincenal

El ciclo quincenal de concentración de MPS calculada para la estación W3 a 1 m de ASF presenta la variabilidad esperada, con las mayores concentraciones en mareas vivas y las menores en mareas muertas. En la comparación con las observaciones de concentración (Figura 24a) se observa que la concentración residual calculada subestima el valor real en $\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Esta diferencia sugiere que la concentración de referencia real es más alta que la teórica considerada para todo el AGC ($\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Sin embargo, las altas concentraciones se obtienen durante mareas vivas igual que en las observaciones. En mareas muertas la concentración de MPS observada presenta picos más altos que en mareas vivas. Estos máximos pueden ser producto de factores distintos a los tomados en cuenta en este estudio para resuspensión tales como: diferente concentración residual, transporte horizontal de sedimentos, actividad biológica y corrientes de gravedad (Álvarez-Sánchez, 2003), y por lo tanto no se puede reproducir con el método seguido

en este estudio. No se encontró un comportamiento semejante en series de tiempo reportadas por otros autores (Clarke y Elliot, 1998; Jago y Jones, 1998; Jones *et al.*, 1998; Weeks *et al.*, 1993) y por lo tanto puede ser una característica particular del AGC. Durante mareas vivas los máximos de concentración calculados exceden en $\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a los máximos observados. Este resultado es evidencia de que la resuspensión de MPS calculada está sobrestimada o que la velocidad de asentamiento está subestimada.

V.4.3 Alcances del cálculo de la concentración de MPS

Las diferencias entre la concentración de MPS observada y calculada probablemente se deben a distintos motivos, los cuales se pueden ordenar en dos grupos: a) los debidos a las limitaciones de la ecuación de Rouse y b) los que se deben a factores físicos no tomados en cuenta en el presente trabajo. Las limitaciones de la ecuación de Rouse se mencionaron en la sección III.1 y de las cuales la velocidad de asentamiento es tal vez el factor más importante. La velocidad de asentamiento w_s considerada fue un valor constante para todo el AGC durante el ciclo quincenal, pero este valor depende del tamaño y forma del grano y de factores como floculación de sedimentos cohesivos. Según la granulometría de sedimentos de fondo (Thompson, 1968), el sedimento del lado oeste debe ser cohesivo y tiende a formar agregados, lo cual cambia su velocidad de asentamiento mientras que del lado este el sedimento está compuesto principalmente por arena. Para tomar en cuenta las diferencias de w_s en el AGC se pueden asignar valores de esta variable obtenidos experimentalmente con base en el tamaño de grano, sin embargo se obtiene un gradiente horizontal de velocidad de asentamiento que da lugar a concentraciones de MPS que no concuerdan con las observaciones. Kineke y Sternberg (1989) compararon diferentes formas de obtener la velocidad de asentamiento y sus mejores resultados fueron con la estimación de w_s *in-situ*. En el AGC se estimó w_s

con el tubo de asentamiento usado por Jones y Jago (1996), pero la distribución de MPS obtenida con estos valores fue muy diferente a los resultados esperados con base en la granulometría de sedimentos de fondo. Según Milligan (1995) y Jones y Jago (1996) los resultados de estimar w_s *in-situ* con tubo de asentamiento pueden no ser satisfactorios. Además de cambiar espacialmente, también existen cambios temporales de w_s durante el proceso de asentamiento del sedimento en suspensión (Kineke y Sternberg, 1989; Milligan, 1995), lo cual tampoco fue considerado en este trabajo.

Entre los factores que no se toman en cuenta en este estudio se deben considerar todos los que contribuyan con sedimento en suspensión a la columna de agua: a) concentración residual, b) transporte de partículas por advección horizontal, c) corrientes de gravedad, d) factores biológicos, e) oleaje, f) viento y g) otras componentes de la marea. Una parte de la concentración residual se incluyó al calcular la concentración de referencia ya que las observaciones para obtener esta cantidad no disminuyeron de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en todo el AGC. Este valor representa una concentración permanente común a todo el AGC; sin embargo, con base en las observaciones, la concentración residual debe cambiar de región a región y depende de la corriente y la granulometría de los sedimentos. El transporte horizontal de partículas puede sumar o restar material particulado en suspensión a las observaciones puntuales mientras que la concentración de MPS calculada se debe solo a resuspensión por corriente de marea.

No existen antecedentes para el AGC de la contribución a la concentración de MPS de cada uno de los factores mencionados, pero se debe hacer énfasis en que el presente trabajo toma en cuenta los que probablemente sean los más importantes en esta región: la corriente de marea (M_2 y S_2) y la distribución granulométrica de sedimentos. Es necesario ampliar las observaciones a otras estaciones del AGC que sirvan como referencia para conocer la contribución de los diferentes factores a la variabilidad espacial

y temporal de la concentración de MPS.

V.5 Concentración de referencia

Las concentraciones de referencia calculadas a 1.5 m de ASF reflejaron la distribución granulométrica reportada para el AGC por Thompson (1968) y Carriquiry y Sánchez (1999), en la cual el sedimento fino está del lado oeste, el grueso del lado este y una zona central de transición. En consecuencia, las concentraciones de referencia fueron más altas del lado oeste ($\sim 100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) y más bajas del lado este ($\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). También se logró reproducir la magnitud de la concentración de referencia del sedimento en suspensión desde el noroeste con las mayores concentraciones, hacia las partes profundas en el sureste de muy baja concentración. La varianza explicada para la mayoría de los grupos de datos está entre el 40% y el 70% y solo en los grupos del extremo sureste fue menor al 2%, donde las bajas concentraciones de MPS muestran un comportamiento lineal y el ajuste es diferente al de los grupos de datos hacia el noroeste.

Para intentar simplificar la forma de obtener la concentración de referencia se promediaron los coeficientes de ajuste E y F de cada grupo de datos y se calculó su distribución espacial con la ecuación (12). Los resultados mostraron que la mayor concentración de todo el AGC se obtuvo en Bahía Adahír, donde la corriente calculada es más rápida. Sin embargo, esta distribución no refleja la concentración de MPS esperada para el AGC con base en la granulometría de sedimento de fondo, en imágenes de satélite (p. ej. Figura 35) y en observaciones (Thompson, 1968, García de Ballesteros y Larroque, 1976; Álvarez-Sánchez, 2003). En contraste, en la relación propuesta en la ecuación (11) los coeficientes E y F incluyen una variabilidad espacial relacionada con la granulometría del AGC que se puede observar en las curvas de la figura 18. Por lo

tanto los resultados que reflejan las características espaciales y temporales esperadas se obtuvieron al mantener los coeficientes E y F variables espacialmente.

La concentración de referencia calculada en este trabajo está de acuerdo con las concentraciones de MPS cerca del fondo reportadas por Cupul-Magaña (1994) y Álvarez-Sánchez (2003). Durante los periodos de máxima corriente y en la parte noroeste del área de estudio se calculó concentración de referencia de $\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ mientras que en condiciones de corriente lenta la concentración cerca del fondo fue de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Cupul-Magaña (1994) reporta concentraciones de $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en corriente baja y más de $4000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en corriente alta, las cuales son mayores que las obtenidas en este trabajo; pero la diferencia es de esperarse debido a que las estaciones de muestreo del autor se localizan dentro de los canales que desembocan al AGC ($\sim 60 \text{ km}$ al noroeste del área de estudio), donde la profundidad es menor a 5 m y la corriente alcanza los $2.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Álvarez-Sánchez (2003) reporta observaciones de distribución horizontal de concentración de MPS con corriente menor a $0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 1 m de ASF de $\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ para la mayor parte del AGC, el cual es el valor obtenido en este estudio en corriente lenta.

V.6 Modelo numérico

El modelo numérico hidrodinámico usado fue adecuado para obtener la corriente y el nivel del mar con las componentes M_2 y S_2 de la marea y permitió calcular las concentraciones de referencia en el AGC en una primera aproximación. Las diferencias entre las observaciones y los resultados del modelo para estaciones costeras son, en promedio, menores a 2 cm en amplitud y menores a 2° en fase (tabla II). De los estudios de modelación numérica en el Golfo de California no se reportan resultados de circulación en el AGC porque sus escalas temporales son diferentes o bien el AGC no se incluye

en el área de estudio. En el caso de las estaciones de San Felipe y Puerto Peñasco las diferencias de amplitud y fase para M_2 reportadas por Marinone (1997) son más grandes que las obtenidas en este estudio. La comparación de series de tiempo de los resultados del modelo y observaciones en la estación W3 es buena (Figura 14). Tanto en rapidez de la corriente como en nivel del mar se logró reproducir la variación quincenal y semidiurna. En general, las magnitudes calculadas son menores a las observaciones presentándose diferencias de hasta $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en corriente y de 1 m en nivel del mar. Durante mareas vivas las diferencias de magnitud representan aproximadamente 10% de las observaciones de corriente y menos del 10% en nivel del mar, mientras que en mareas muertas las diferencias en magnitud llegan al 100% en corriente y a más del 50% en marea. La diferencia entre la marea observada y calculada por el modelo (Figura 14d) no presenta una variación durante el ciclo quincenal, pero la diferencia en mareas muertas se debe al desfase entre las dos series de tiempo, mientras que en mareas vivas se debe a una subestimación de las observaciones. Las diferencias en magnitud se atribuyen a la falta de componentes de marea para el forzamiento del modelo, sin embargo no se puede asegurar que los desfases en mareas muertas se deban a este mismo motivo. No se encontró en la literatura ninguna comparación de series de tiempo del tipo aquí presentado a pesar de que se ha trabajado con diferente número de componentes de marea. El coeficiente de arrastre usado finalmente para el modelo numérico es similar al de otros estudios para el Golfo de California (GC). Una comparación de diferentes coeficientes usados puede encontrarse en García-Silva y Marinone (2000). El coeficiente de arrastre óptimo para este trabajo (3.5×10^{-3}) fue ligeramente menor a los presentados por los autores. La diferencia puede deberse a que el área de estudio fue solamente el AGC y la batimetría es más fina que las usadas para todo el GC.

VI

Conclusiones

- 1) La combinación de los perfiles de Rouse y el modelo hidrodinámico fue un método adecuado para aproximar los rasgos principales de la distribución espacial y temporal de MPS en el AGC debida a resuspensión por corrientes de marea (M_2 y S_2).
- 2) La distribución espacial de la concentración de MPS calculada presentó las más altas concentraciones del lado oeste del AGC y frente a la desembocadura del Río Colorado mientras que la distribución de las más bajas concentraciones fue homogénea en todo el AGC.
- 3) Se logró reproducir la variación quincenal y cuartidurna de la concentración de MPS en el área de estudio debidas a las frecuencias semidiurnas dominantes M_2 y S_2 . Las concentraciones de MPS más altas se obtuvieron durante mareas vivas mientras que las concentraciones más bajas se obtuvieron en mareas muertas. En la frecuencia cuartidurna las altas concentraciones de MPS fueron más altas en los máximos de corriente y las concentraciones más bajas en los mínimos de corriente.
- 4) Las concentraciones de MPS más altas fueron de $\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo y se obtuvieron durante mareas vivas frente a la desembocadura del Río Colorado.
- 5) Las concentraciones más bajas fueron menores a $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ cerca del fondo para todo el AGC y durante mareas muertas.

Literatura citada

- Álvarez, L. G. y Jones, S. E. (2001). Factors influencing suspended sediment flux in the upper gulf of california. *Estuarine, Coastal an Shelf Science*, **54**:1–5.
- Álvarez, L. G. y Jones, S. E. (2004). Short-term observations of suspended particulated matter in a macro-tidal inverse estuary: the upper gulf of california. *Journal of Coastal Research*, **20**:85–94.
- Álvarez, L. G., Dickey, T. D., y Chang, G. C. (2003). Concentración y flujo de sedimento en suspensión en las planicies de marea del alto golfo de california. Informe final proyecto ucmexus-cicese, CICESE, Ensenada, B. C., México. 55 p.
- Álvarez-Sánchez, L. G. (2003). *Suspended sediment dynamics in the Upper Gulf of California*. Tesis de doctorado, University of Wales, Bangor, United Kingdom. 175 p.
- Carbajal, N., Souza, A., y Durazo, R. (1997). A numerical study of the ex-rofi of the colorado river. *Journal of Marine Systems*, **12**:17–33.
- Carriquiry, J. D. y Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the colorado river delta and upper gulf of california after a nearly century of discharge loss. *Marine Geology*, **158**:125–145.

- Clarke, S. y Elliot, A. J. (1998). Modelling suspended sediment concentrations in the firth of forth. *Estuarine, Coastal an Shelf Science*, **47**:235–250.
- Cupul-Magaña, A. L. (1994). *Flujos de sedimento en suspensión y de nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado*. Tesis de maestría, UABC, Ensenada, B. C., México. 117 p.
- Dyer, K. R. (1977). *Estuaries: A Physical Introduction*. John Wiley and Sons. 140 p.
- Eisma, D. (1993). *Suspended Matter in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Alemania. 315 p.
- Fisher, N. (1998). Tidal variations in the characteristics of suspended particulate matter at a site in the gulf of california. Proyecto de tercer año de licenciatura. University of Wales, Bangor, United Kingdom, 32 p.
- García de Ballesteros, M. G. y Larroque, M. (1974). Elementos sobre la distribución de turbidez en el alto golfo de california. *Ciencias Marinas*, **1**(2):1–30.
- García-Silva, G. y Marinone, S. G. (2000). Caracterización dinámica y energética de la marea en el golfo de california. *Ciencias Marinas*, **26**(2):323–353.
- Jago, C. F. y Jones, S. E. (1998). Observation and modelling of the dynamics of benthic fluff resuspended from a sandy bed in the southern north sea. *Continental Shelf Research*, **18**(11):1255–1282.
- Jones, B. (1993). *A general purpose two dimensional hydrodynamic model (SPMOD) a user guide*. Unit for Coastal and Estuarine Studies, Menai Bridge, United Kingdom. 51 p.

- Jones, S. E. y Jago, C. F. (1996). Determination of settling velocity in the elbe estuary using quisset tubes. *Journal of Sea Research*, **36**(1/2):63–67.
- Jones, S. E., Jago, C. F., Bale, A. J., Chapman, D., Howland, R. J. M., y Jackson, J. (1998). Aggregation and resuspension of suspended particulate matter at a seasonally stratified site in the southern north sea: physical and biologic controls. *Continental Shelf Research*, **18**(11):1283–1309.
- Karageorgis, A. P. y Anagnostou, C. L. (2001). Particulate matter spatial-temporal distribution and associated surface sediment properties: Thermaikos gulf and sporades basin. *Continental Shelf Research*, **21**:2141–2153.
- Kineke, G. C. y Sternberg, R. W. (1989). The effect of particle settling velocity on computed suspended sediment concentration profiles. *Marine Geology*, **90**:159–174.
- Lavín, M. F. y Sánchez, S. (1999). On how the colorado river affected the hydrography of the upper gulf of california. *Continental Shelf Research*, **19**:1545–1560.
- Lavín, M. F., Godinez, V. M., y Álvarez, L. G. (1998). Inverse-estuarine features of the upper gulf of california. *Estuarine, Coastal an Shelf Science*, **47**:769–795.
- Loo-Fierro, C. M. (2003). Cuantificación de material particulado en suspensión en la columna de agua mediante la utilización del perfil de rouse en el alto golfo de california. Tesis Licenciatura, UABC. Ensenada, B. C., México. 66 p.
- Marinone, S. G. (1997). Tidal residual currents in the gulf of california: Is the m_2 tidal constituent sufficient to induce them? *J. Geophys. Res.*, **102**:8611–8623.
- Milligan, T. G. (1995). An examination of the settling behaviour of a flocculated suspension. *Netherlands Journal of Sea Research*, **33**(2):163–171.

- Morales, R. y Gutierrez, G. (1986). 1986. Informe Técnico OC-85-03, CICESE, Ensenada, Baja California, México. 40 p.
- Probert, D. W. (1998). Resuspension and transportation of sediments in the gulf of california. Proyecto de tercer año de licenciatura. University of Wales, Bangor, United Kingdom, 54 p.
- Rouse, H. (1961). *Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers*. Dover Publications, Inc., New York, tercera edición, 356 p.
- Thompson, R. W. (1968). Tidal flat sedimentation on the colorado river delta, northwestern gulf of california. Bulletin of the Geological Society of America Memories. 107 p.
- Tomczack, M. y Godfrey, J. S. (1994). *Regional Oceanography: an introduction..* Buttler and Tanner Ltd., Gran Bretaña. 390 p.
- Weeks, A. R., Simpson, J. H., y Bowers, D. (1993). The relationship between concentrations of suspended particulate material and tidal processes in the irish sea. *Continental Shelf Research*, **13**(12):1325–1334.