

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



Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

Contribución de las planicies de marea al balance sedimentario del Alto Golfo de California

Tesis

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

Presenta:

María Fernanda Valverde García

Ensenada, Baja California, México

2022

Tesis defendida por

María Fernanda Valverde García

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Ramírez Mendoza
Director de tesis

Dr. José Gómez Valdés

Dr. Ernesto García Mendoza



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dr. Pedro Negrete Regagnon
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta María Fernanda Valverde García como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Contribución de las planicies de marea al balance sedimentario del Alto Golfo de California

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Ramírez Mendoza
Director de tesis

Se analizaron datos hidrodinámicos y de turbidez de observaciones realizadas en las planicies de marea en el Alto Golfo de California (AGC) durante el invierno del 2009. Se implementó el Modelo General de Transporte Estuarino (GETM) para extender los resultados espacial y temporalmente y conocer los impactos de la dinámica de las planicies a lo largo de la línea de costa. Se utilizaron forzamientos de mareas, viento y oleaje de las observaciones analizadas para calibrar el modelo. Se encontró que el tamaño de grano más abundante en las planicies de marea son las arenas muy finas. En una de las estaciones se calculó que en mareas vivas existe un flujo neto promedio durante un periodo semidiurno de aproximadamente $0.14 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con dirección preferencial al sureste y en mareas muertas el flujo neto es de alrededor de $0.07 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con dirección al noroeste. En los cambios de marea durante pleamares se observó que la dirección que domina es al noroeste y en bajamares al sureste. Los valores más altos de material particulado en suspensión, los esfuerzos en el fondo y la energía cinética turbulenta se presentan en mareas vivas y bajamares mientras que los valores disminuyen en mareas muertas y pleamares. Los resultados sobre la implementación del modelo GETM indican que al principio de pleamares hay erosión y a finales de esta fase existe depósito. En bajamares se observa que la mayor parte del tiempo hay erosión. El oleaje es importante en la resuspensión de sedimentos entre mayor sea, mayor es la resuspensión de materia particulada en suspensión. Con base en los resultados del modelo, el transporte de sedimento a lo largo de un transecto paralelo a la línea de costa fue de 0.32 kg durante un ciclo semidiurno en mareas vivas con dirección al noroeste. Este bajo valor puede indicar un posible equilibrio en el intercambio de sedimento entre las planicies y el AGC.

Palabras clave: transporte de sedimentos, planicies, mareas, Alto Golfo de California

Abstract of the thesis presented by María Fernanda Valverde García as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Tidal flats contribution to the sediment budget of the Upper Gulf of California

Abstract approved by:

Dr. Rafael Ramírez Mendoza
Thesis Director

Hydrodynamic and turbidity data were analyzed from observations of the tidal flats in the Upper Gulf of California (UGC) during winter 2009. The General Estuarine Transport Model (GETM) was implemented with the aim to expand the results in space and time, and to know the effects of the tidal flats dynamics along the shoreline. Tidal currents, wind and waves from analyzed observations were used for model calibration. It was found that the most abundant grain size in the tidal flats corresponds to fine sands. At one of the sample stations, a southward net average flux of $0.14 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ was calculated for a semidiurnal period during spring. While for neap tides a northwest net average flux of $0.07 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ was obtained. During the tidal phase change, the flux direction was found mainly to the northwest on the flood tide and changed to the southeast on the ebb. The highest values of suspended particulate matter, bed shear stresses and turbulent kinetic energy were calculated for spring tides while the values diminished for neap tides. The results of the GETM model implementation indicate erosion at the beginning of the flood tide, but deposition was present at the end of this phase. Erosion was the dominant process during ebb. The effect of waves was significant for sediment resuspension, the higher the waves, the higher resuspension of suspended particulate matter was obtained. Based on modeling results, the sediment transport along a shoreline parallel transect of 0.32 kg was calculated during a semidiurnal spring tide with a northwest direction. This low value likely indicates an equilibrium of sediment exchange between the tidal flats and the UGC.

Keywords: sediment transport, plains, tides, Upper Gulf of California

Dedicatoria

Dedicatoria a Gustavo y a Bombón

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por brindarme el conocimiento, la oportunidad de crecer académicamente y el apoyo para concluir la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría No. de becario: 968022.

Al Dr. Rafael Ramírez que siempre me estuvo apoyando con mucha paciencia para realizar este proyecto de tesis y por la invitación a los cruceros oceanográficos, al Dr. José Gómez que durante toda mi estancia de la maestría me apoyó y principalmente en las observaciones y correcciones de la tesis. Al Dr. Ernesto García, por su apoyo desde el punto de vista biológico en la tesis, así como en los cruceros a los que asistí, siempre me respondió mis dudas sobre el océano.

A los que fueron mis profesores, me enseñaron muchísimo sobre la oceanografía física y como científicos siempre con la voluntad y pasión de compartir su gran conocimiento a las nuevas generaciones.

A Gustavo que es mi mayor motivación y mi gran apoyo para realizar desde un principio y hasta al final esta etapa de mi vida.

A mis padres y a mis chiquitos Bombón, Tormenta, Nenos y Luffy que también son mi motivación de seguir adelante.

A mis compañeros y amigos del CICESE, Siria, Yiyi, Bere, Natalia, Andrea, Iván, Citlalli, Ashida, Keiner, Gio, Valeria, Guzzi y los que me faltan, que siempre mostraron su apoyo, no me hicieron sentir lejos de casa y me hicieron amena la maestría.

Tabla de contenido

| | Página |
|--|--------|
| Resumen en español | ii |
| Resumen en inglés | iii |
| Dedicatoria | iv |
| Agradecimientos | v |
| Lista de figuras | viii |
| Lista de tablas | xiv |
| | |
| Capítulo 1. Introducción | |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.1.1. Características generales de las planicies de marea | 1 |
| 1.1.2. Área de estudio | 2 |
| 1.1.3. Sedimentos del AGC | 3 |
| 1.1.4. Planteamiento del problema | 5 |
| 1.2. Objetivos | 7 |
| 1.2.1. Objetivo general | 7 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 7 |
| | |
| Capítulo 2. Metodología | |
| 2.1. Factores importantes para el transporte de sedimento | 9 |
| 2.1.1. Velocidad de la corriente | 10 |
| 2.1.2. Granulometría y turbidez | 11 |
| 2.1.3. Viento | 11 |
| 2.1.4. Esfuerzos cortantes del fondo | 11 |
| 2.1.5. Materia Particulada en Suspensión | 12 |
| 2.1.6. Energía Cinética Turbulenta | 13 |
| 2.1.7. Oleaje | 13 |
| 2.1.8. Flujos de sedimento | 14 |
| 2.2. Simulación numérica de las planicies de marea | 14 |
| 2.2.1. Modelo numérico | 14 |
| 2.2.1.1. Condiciones de frontera | 15 |
| 2.2.1.2. Secado e inundado | 15 |
| 2.2.1.3. Cálculo de materia particulada en suspensión del modelo | 16 |
| 2.2.1.4. Módulo para el cálculo de oleaje del modelo | 18 |
| 2.2.1.5. Prisma de marea | 19 |
| 2.2.1.6. Datos de entrada del modelo | 19 |
| 2.3. Correlación entre dos variables | 21 |
| | |
| Capítulo 3. Resultados | |
| 3.1. Granulometría | 22 |
| 3.2. Viento | 23 |
| 3.3. Perfiles de velocidad de la corriente | 24 |

| | | |
|--------------------------|---|----|
| 3.4. | Corriente cerca del fondo y oleaje | 26 |
| 3.5. | Implementación del modelo GETM en las planicies de marea del Alto Golfo de California | 34 |
| 3.5.1. | Implementación con oleaje débil | 34 |
| 3.5.2. | Implementación con oleaje intenso | 38 |
| | | |
| Capítulo 4. | Discusiones y conclusiones | |
| 4.1. | Discusiones | 43 |
| 4.2. | Conclusiones | 47 |
| | | |
| Literatura citada | | 48 |
| | | |
| Anexo | | 51 |
| .1. | Obtención de datos | 51 |
| .1.1. | Datos de mar90901.vec | 51 |
| .1.2. | Datos de MR100901.vec | 53 |
| .1.3. | Datos de marz1501.vec (2) | 56 |
| .1.4. | Datos de marz1501-1.vec | 58 |

Lista de figuras

| Figura | Página |
|---|--------|
| 1. Las planicies de marea proporcionan refugio y alimento a aves migratorias (Miththapala, 2013). | 2 |
| 2. Alto Golfo de California. Modificado de Thompson (1968). | 3 |
| 3. Patrón de dispersión de sedimentos que indican la dirección del transporte. Tomada de Carriquiry y Sánchez (1999). | 4 |
| 4. Observaciones en las planicies de marea del lado oeste a pocos metros de donde se tomaron los datos observados en este trabajo. (a) Perfil 1, se localizan las estaciones e5 y e6. (b) Perfil 2, se localizan las estaciones e2 y e3. En ambas figuras las flechas azules indican las barras de arena y los espacios entre las barras son canales o pequeñas planicies. Modificado de Valencia (2009). | 5 |
| 5. Esquema de la metodología realizada. El primer paso fue limpiar y analizar los datos que se obtuvieron en el 2009. Después, con los datos analizados se calibró el modelo GETM (Burchard y Bolding, 2002) el cual se modeló con 4 tipos de sedimentos, cohesivos y no cohesivos, con oleaje y sin oleaje para finalmente extender la modelación durante mareas vivas y muertas. | 8 |
| 6. (a) Ubicación de las observaciones en el AGC. (b) Estaciones de los puntos en donde se adquirieron las observaciones para el estudio del mecanismo del transporte de sedimentos. Tomada de Google Satellite Hybrid (2020). | 9 |
| 7. Concentración de MPS contra τ_{bo} en las planicies de marea del Alto Golfo de California correspondiente a los días 20, 21 y 22 de julio del 2009. Modificada de Valencia (2009). | 12 |
| 8. Caso con puntos de presión secos. Modificado de Burchard y Bolding (2002). | 16 |
| 9. (a) Malla batimétrica completa proporcionada por el CICESE. (b) Malla utilizada en el modelo GETM que incluye las planicies de marea del AGC, abarcando 47.7 km en la longitud y en la latitud aproximadamente 28 km | 20 |
| 10. Porcentajes promedios temporales del tamaño de partículas del 15 al 24 de marzo del 2009 segmentado en mareas vivas, mareas medias, mareas muertas y general. | 22 |
| 11. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-4 desde las 00:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 8:46 hrs del 24 de marzo. | 23 |
| 12. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-4 desde las 00:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 8:46 hrs del 24 de marzo. | 24 |
| 13. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondientes al 9 de marzo del 2009 en la estación E-1. | 25 |
| 14. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 al día 12 de marzo del 2009 a las 16:30 correspondientes a la estación E-2. | 25 |
| 15. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 al 17 de marzo del 2009 a las 16:30 correspondiente a la estación E-2. | 26 |

| Figura | Página |
|---|--------|
| 16. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs de la estación E-2. (a) Componentes de la velocidad u , v y w . (b) Elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 28 |
| 17. Serie de tiempo correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs de la estación E-2. (a) Componentes de la velocidad u , v y w . (b) Elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 28 |
| 18. Diagrama de dispersión de las componentes de u y v de la estación E-2 correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs. | 29 |
| 19. Diagrama de dispersión de las componentes de u y v de la estación E-2 correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs. | 29 |
| 20. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs. Se conserva el signo de las componentes de velocidad para visualizar la dirección preferencial. (a) TKE , MPS y signo de u , (b) τ_{bo} , MPS y signo de u , (c) componente zonal contra τ_{bo} , (d) TKE , MPS y signo de v , (e) τ_{bo} , MPS y signo de v , (f) componente meridional contra τ_{bo} | 30 |
| 21. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs. Se conserva el signo de las componentes de velocidad para visualizar la dirección preferencial. (a) TKE , MPS y signo de u , (b) τ_{bo} , MPS y signo de u , (c) componente zonal contra τ_{bo} , (d) TKE , MPS y signo de v , (e) τ_{bo} , MPS y signo de v , (f) componente meridional contra τ_{bo} | 30 |
| 22. Datos correspondientes a la estación E-2 de los días del 10 de marzo del 2009 a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs, (a) TKE , τ_{bo} y signo de u , (b) TKE , τ_{bo} y signo de v , (c) MPS contra H_s | 31 |
| 23. Datos correspondientes a la estación E-2 de los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs. (a) TKE , τ_{bo} y signo de u , (b) TKE , τ_{bo} y signo de v , (c) MPS contra H_s | 32 |
| 24. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs. de la estación E-2. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación. | 33 |
| 25. Serie de tiempo correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs de la estación E-2. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos MPS positivos y negativos de la velocidad v y la elevación. | 33 |

| Figura | Página |
|---|--------|
| 26. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los resultados del modelo forzado con oleaje débil, mareas y viento comparado con las observaciones. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Velocidades zonales. (c) Velocidades meridionales, (d) Rapidez. | 34 |
| 27. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los datos observados con los resultados del modelo forzado con oleaje débil, mareas y viento. (a) Materia particulada en suspensión (<i>MPS</i>) junto con altura significativa (<i>H_s</i>). (b) Energía cinética turbulenta (<i>TKE</i>) de la capa más cercana al fondo marino. (c) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). | 35 |
| 28. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de los resultados del modelo de la estación E-2 con el forzante de oleaje débil, mareas y viento. (a) Se muestran datos de del esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}), (b) datos de la suma de las 5 sigmas de la columna de agua de la materia particulada en suspensión (<i>MPS</i>), (c) flujo de masa en la capa de intercambio, (d) carga del fondo de la materia particulada en suspensión. | 36 |
| 29. Serie de tiempo de las 19:40 hrs del 12 de marzo del 2009 a las 8:40 hrs del 13 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas vivas. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje débil, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). (c) Velocidad zonal (<i>u</i>). (d) Energía cinética turbulenta (<i>TKE</i>). (e) Velocidad meridional (<i>v</i>). (f) Materia particulada en suspensión (<i>MPS</i>). | 37 |
| 30. Serie de tiempo de las 21:00 hrs del día 16 de marzo del 2009 a las 09:40 hrs del 17 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas muertas. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje débil, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). (c) Velocidad zonal (<i>u</i>). (d) Energía cinética turbulenta (<i>TKE</i>). (e) Velocidad meridional (<i>v</i>). (f) Materia particulada en suspensión (<i>MPS</i>). | 38 |
| 31. Series de tiempo del 8 al 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los resultados del modelo forzado con oleaje intenso, mareas y viento comparado con las observaciones. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Velocidades zonales. (c) Velocidades meridionales. (d) Rapidez. | 39 |
| 32. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los datos observados con los resultados del modelo forzado con oleaje intenso, mareas y viento. (a) Materia particulada en suspensión (<i>MPS</i>) junto con altura significativa (<i>H_s</i>). (b) Energía cinética turbulenta (<i>TKE</i>) de la capa más cercana al fondo marino. (c) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). | 40 |

| Figura | Página |
|---|--------|
| 33. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de los resultados del modelo de la estación E-2 con el forzante de oleaje intenso, mareas y viento. (a) Se muestran datos de del esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}), (b) datos de la suma de las 5 sigmas de la columna de agua de la materia particulada en suspensión (MPS), (c) flujo de masa en la capa de intercambio, (d) carga del fondo de la materia particulada en suspensión. | 41 |
| 34. Serie de tiempo correspondiente a las 06:40 hrs a las 18:20 hrs del 10 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas vivas con oleaje intenso. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje intenso, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar, (b) esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}), (c) Velocidad zonal (u), (d) Energía cinética turbulenta (TKE). (e) Velocidad meridional (v). (f) Materia particulada en suspensión (MPS). Las escalas se han modificado respecto a la figura 29. | 41 |
| 35. Planicies de marea en San Felipe, Baja California. Foto: Luis Gustavo Álvarez. | 46 |
| 36. Serie de tiempo correspondiente al día 9 de marzo del 2009 a las 9 hrs al 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 51 |
| 37. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 al día 9 de marzo del 2009 a las 9:00 hrs al 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} | 51 |
| 38. Serie de tiempo obtenidos en la estación E-1 correspondiente a las 9:00 hrs de 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra H_s | 52 |
| 39. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v de la estación E-1 correspondiente a las 9:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día. | 52 |
| 40. Serie de tiempo correspondiente a las 9:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación. | 53 |
| 41. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 53 |

| Figura | Página |
|--|--------|
| 42. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 de los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} | 54 |
| 43. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días del 10 de marzo del 2009 a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs | 54 |
| 44. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v . de la estación E-1 correspondiente a los días del 10 de marzo del 2009 a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. | 55 |
| 45. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación. | 55 |
| 46. Serie de tiempo correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (Hs) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 56 |
| 47. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 de los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} | 56 |
| 48. Datos correspondientes a la estación E-1 de los días del 20 de marzo del 2009 a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs | 57 |
| 49. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v . de la estación E-1 correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. | 57 |
| 50. Serie de tiempo correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación. | 58 |

| Figura | Página |
|---|--------|
| 51. Serie de tiempo correspondiente a los días del 16 de marzo del 2009 a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs de la estación E-3. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables. | 58 |
| 52. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-3 de los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} | 59 |
| 53. Datos correspondientes a la estación E-3 de los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra H_s | 59 |
| 54. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v . de la estación E-3 correspondiente a los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. | 60 |
| 55. Serie de tiempo correspondiente a los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. de la estación E-3. (a) Se muestran los flujos de MPS positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación. . . . | 60 |

Lista de tablas

| Tabla | Página |
|-------|---|
| 1. | Fechas de las delimitaciones de mareas vivas, medias y muertas del tiempo estudiado. 9 |
| 2. | Observaciones del 8 al 25 de marzo de 2009 con los siguientes instrumentos: perfilador Acústico basado en el efecto Doppler (ADCP), velocímetros acústicos basados en el efecto Doppler (ADV), transmisómetro y dispersión láser in situ (LISST), sensores de retroesparcimiento óptico (OBS) y un anemómetro marca Young. La estación E-1 corresponde a las coordenadas 31°8'45", 114°53'19", E-2 a las coordenadas 31°8'50", 114°52'53", E-3 a las coordenadas 31°8'47", 114°53'08" y E-4 a las coordenadas 31°8'37", 114°53'40" 10 |
| 3. | Tipo de sedimentos representativos de las planicies de marea del AGC. 17 |
| 4. | Correlaciones entre las observaciones realizadas en las planicies de marea y el modelo GETM durante mareas muertas, mareas vivas con oleaje débil e intenso. 42 |

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Características generales de las planicies de marea

La morfodinámica y evolución de las planicies de marea se estudia tomando en cuenta el perfil del fondo, su forma y el tamaño del sedimento, los cuales varían en función de forzamientos como el oleaje y la corriente de marea. Este tipo de ambiente sedimentario se distribuye a lo largo de las costas de todo el mundo y es de gran importancia para la formación de humedales costeros. Las planicies de marea se dividen en tres partes de acuerdo con los niveles característicos de la marea (Shu, 2019): (1) zona supramareal, se encuentra sobre el nivel medio del mar y se inunda solo en condiciones extremas; (2) zona intermareal, ésta oscila sobre y bajo el nivel medio del mar, se inunda periódicamente a causa de la marea; y (3) zona submareal, se encuentra la mayoría del tiempo debajo del nivel medio del mar y rara vez se expone al aire.

Miththapala (2013) menciona diferentes características que hacen de las planicies de marea sitios de importancia:

- Al aumentar la contribución de sedimentos a las planicies de marea se evita la erosión.
- Las cianobacterias presentes tienen la capacidad de atrapar el nitrógeno atmosférico, de tal forma que otros organismos pueden aprovecharlo. Una parte escapa a los alrededores y con el flujo y reflujo diario de las mareas lleva estos nutrientes a las aguas costeras. Además, las cianobacterias juegan un papel importante porque en la superficie producen sustancias que favorecen la adhesión de sedimentos y evita la erosión. Las planicies de marea también se consideran importantes sumideros de carbono.
- Tienen un gran número de microorganismos, bacterias y cianobacterias que contribuyen a la dieta de muchos invertebrados, estos últimos son alimento para peces y aves como se muestra en la figura 1.
- Retienen agua, lo que proporciona un mecanismo natural de control de inundaciones al absorber y almacenar cantidades de agua en exceso.



Figura 1. Las planicies de marea proporcionan refugio y alimento a aves migratorias (Miththapala, 2013).

Prandle (2009) describe que en las zonas regidas por mareas la mayoría de sedimentos, con excepción de los más gruesos, sufren ciclos de reflujos y movimiento de inundación entre la erosión y del depósito posterior. Dado que el tiempo en suspensión aumenta para material de sedimentación más fino, tales mecanismos contribuyen a un residuo de sedimentos finos en las planicies de marea y los canales más profundos atrapan sedimentos más gruesos. Estudios recientes revelan que la misma vegetación provoca un flujo más turbulento y mayor resuspensión de sedimento a la columna de agua y por lo tanto mayor transporte (Yang y Nepf, 2018).

1.1.2. Área de estudio

El Alto Golfo de California (AGC) está ubicado al noroeste de la República Mexicana, entre los estados de Baja California al oeste y Sonora al este. Se encuentra a menos de 60 km de la frontera con los Estados Unidos de América. En el AGC está la Reserva Alto Golfo y Delta del Río Colorado (CONANP-SEMARNAT, 2007), como se representa en la figura 2.

El AGC tiene características de ambientes sedimentarios como desiertos, llanuras aluviales, depósitos de piamonte y el Delta del río Colorado al norte (Alvarez y Jones, 2001). La salinidad en el sur es de ~ 35.4 y en el norte ~ 39.0 en verano y ~ 37.0 en invierno. De acuerdo a Alvarez y Jones (2004), en invierno el agua de mar presenta valores de temperatura, densidad y salinidad de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1027.2 kg m^{-3} y 36.7 , mientras que en verano tienen $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1023.4 kg m^{-3} y 38.8 , respectivamente. El rango de

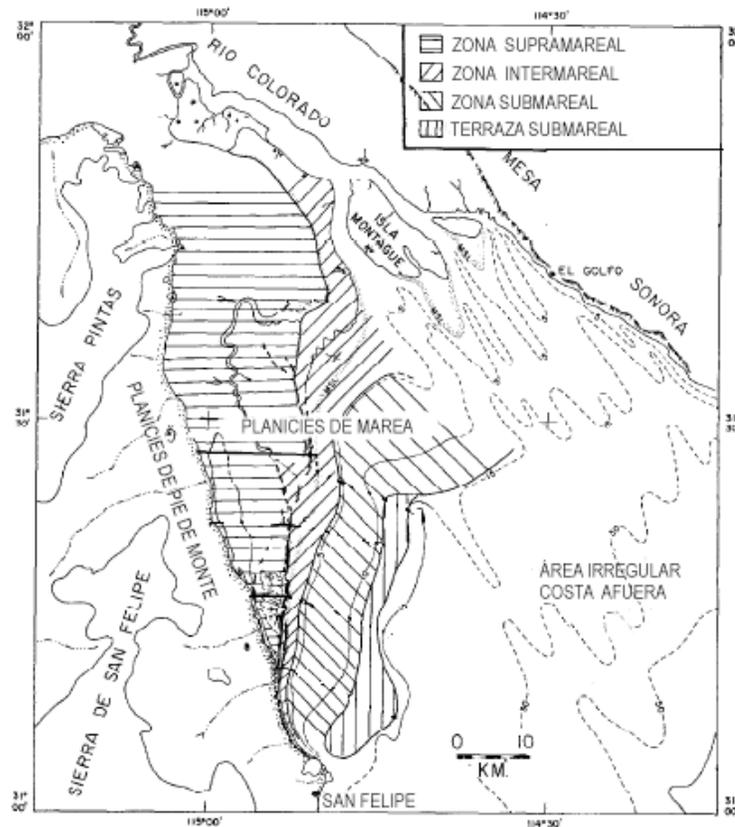


Figura 2. Alto Golfo de California. Modificado de Thompson (1968).

mareas tiene magnitud de 6 metros de altura cerca del poblado de San Felipe y de 9 metros cerca de la desembocadura del río Colorado (Thompson, 1968).

1.1.3. Sedimentos del AGC

La provincia sedimentaria de Sonora se caracteriza por tener principalmente minerales de granate y circón, los cuales provienen del Desierto de Sonora (Carriquiry y Sánchez, 1999). El tamaño de grano de los sedimentos superficiales frente a la costa de Sonora es de 76.9 - 143 μm y del lado de Baja California es 9 - 38.5 μm (Alvarez-Borrego, 2001). Adicionalmente, existe un patrón de distribución bruto de sedimentos superficiales del lado de Sonora donde lo que más abunda son las arenas finas a medias con un 83.4%, 10.1% de limos y en menor cantidad con 6.2% de arcillas. En contraste, en el lado de Baja California se presentan mayormente arcillas con un 54%, luego los limos con un 39% y por último arenas finas con un 7% (Alvarez et al., 2009).

De acuerdo con Nava-Sanchez et al. (2004), la sedimentación moderna en el AGC está dominada por planicies aluviales y en la costa por deltas progradantes que descargan sedimento de arenas lodosas

y gravas finas sobre la plataforma. El sedimento se deposita a través de la plataforma llegando a las cuencas axiales del Golfo. En la margen oeste, la sedimentación es por abanicos aluviales y abanico deltas erosionados los cuales descargan sedimentos muy gruesos sobre la estrecha plataforma o hacia el talud y cuencas marginales dominada por terrígenos con importantes aportes de carbonatos en algunos puntos, con tasas de sedimentación que varían entre 0.3 y 0.5 *mm/año*.

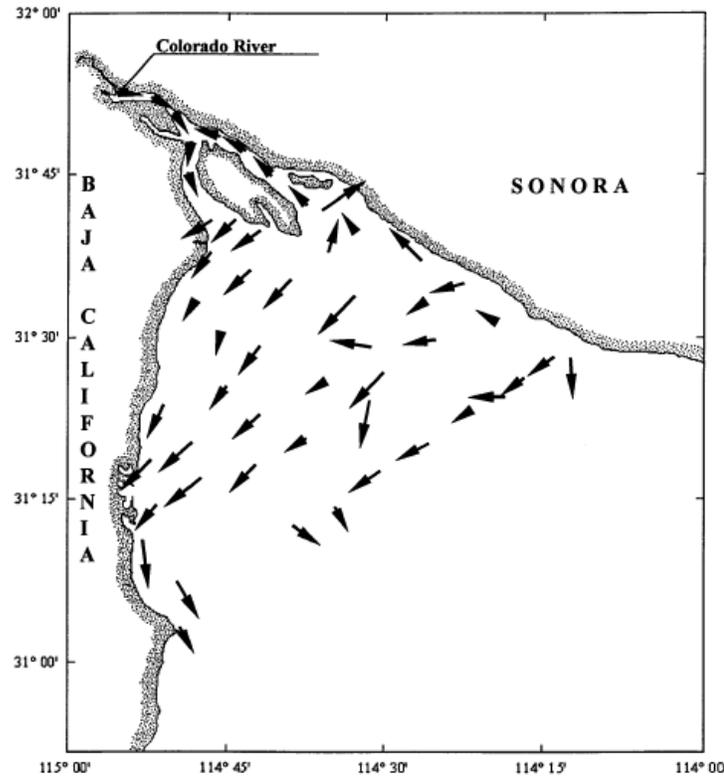


Figura 3. Patrón de dispersión de sedimentos que indican la dirección del transporte. Tomada de Carriquiry y Sánchez (1999).

Con base en estudios de sedimentos superficiales, Carriquiry y Sánchez (1999) sugieren una dirección preferencial de sureste a noroeste a lo largo de la costa de Sonora y adicionalmente existe aporte de sedimentos hacia aguas más profundas. En el norte se transportan los sedimentos en dirección sur (figura 3). El patrón general de transporte residual presenta circulación de sedimentos en sentido antihorario con transporte hacia el norte del lado de Sonora, en la región del delta se desvía hacia el oeste y continua hacia el sur del lado de Baja California. El transporte neto de sedimento resulta en dirección noreste a suroeste.

En particular el sedimento en las planicies de marea del AGC, según estudios de Thompson (1968) presenta zonificación de facies sedimentarias que son sometidos a procesos subaéreos, oleaje, corrientes de marea y actividad de organismos excavadores. Asimismo, Thompson (1968), investigó la evidencia

estratigráfica combinada con la observación de las condiciones modernas en la zona y encontró que la formación de las llanuras costeras involucraba dos procesos básicos: por depósito de arcilla por inundación de mareas y por la formación de playas debido al oleaje y las corrientes costeras asociadas.

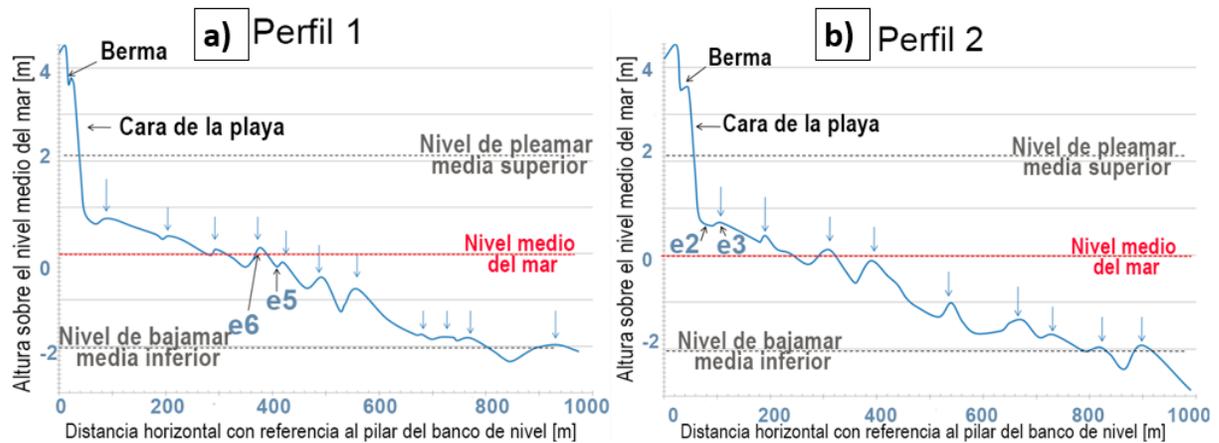


Figura 4. Observaciones en las planicies de marea del lado oeste a pocos metros de donde se tomaron los datos observados en este trabajo. (a) Perfil 1, se localizan las estaciones e5 y e6. (b) Perfil 2, se localizan las estaciones e2 y e3. En ambas figuras las flechas azules indican las barras de arena y los espacios entre las barras son canales o pequeñas planicies. Modificado de Valencia (2009).

A pesar de la importancia de las planicies de marea en el AGC solo se tiene el estudio de Valencia (2009). El autor utilizó métodos estadísticos para determinar los esfuerzos críticos de erosión en los sedimentos y estudió los cambios en la granulometría en las barras de arena y canales inter-barra paralelos a la línea de costa (figura 4). Encontró diferencias en los esfuerzos críticos de erosión asociados a la granulometría y a la morfología, y también notó un aumento en los esfuerzos críticos de erosión entre las observaciones de finales de invierno del 2009 comparado con el verano del 2008. El diámetro del grano fue el parámetro que determinó su esfuerzo crítico. Sin embargo, este esfuerzo crítico fue alto comparado con los esfuerzos calculados teóricamente y se le atribuyó al porcentaje de lodo, el cual favorece la adherencia de las partículas y por lo tanto el sedimento es más difícil de erosionar.

1.1.4. Planteamiento del problema

La Reserva de la Biosfera Alto Golfo y Delta del Río Colorado cuenta con gran variedad de biodiversidad, reproducción y crianza de especies marinas. En reconocimiento el Gobierno de México declaró el norte del Golfo de California como "Área natural protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región conocida como Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado" (DOF, 1993).

Sin embargo, Carriquiry y Sánchez (1999) concluyeron que la intervención humana en la cuenca

hidrológica del río Colorado ha llevado a la eliminación casi total del agua y la descarga de sedimentos en la región del delta. La construcción de las presas Hoover en 1935 y Glenn Canyon en 1962, el desvío de ríos para usos de riego, industriales y municipales a través del río Colorado han captado la mayoría de los sedimentos y agua dulce con un gran impacto en el AGC. El impacto ecológico más severo fue la transformación de un sistema estuarino a uno antiestuarino (Santa Rosa del Río et al., 2011).

Meckel (1975), en un estudio de distribución de arenas en el cual las organiza según su estructura interna, presenta que el AGC ha sufrido alteraciones desde varias perspectivas como por ejemplo la vida marina y el cambio en el balance sedimentario de la cuenca. Por el contrario, Brusca et al. (2017) en otro estudio sobre productividad biológica muestran que el ecosistema marino del AGC sigue siendo rico en nutrientes, alto en biodiversidad y productividad e igualmente parece seguir siendo saludable, excepto por los impactos de las pesquerías legales e ilegales.

Conocer las características de depósito, erosión y transporte de sedimento ayudará a entender mejor los procesos que dominan las planicies de marea en el AGC. Por lo tanto, se contribuirá a la prevención de posibles desastres relacionados con la morfología de la playa y la evolución de la línea de costa. Además, la dinámica de las planicies está relacionada con la ecología de todo el AGC y en consecuencia su estudio es importante con fines de conservación y aprovechamiento de recursos. Con ese propósito, en el presente estudio se analizan mediciones de campo y se usan como calibración de un modelo numérico.

El modelo utilizado es el GETM (Modelo de Transporte Estuarino General), el cual fue diseñado para procesos estuarinos y se utiliza con el fin de obtener el transporte de sedimento en un dominio más amplio que el de las observaciones y para mareas vivas y mareas muertas. La implementación del modelo en el AGC ayudará a reducir costos porque realizar muestreos de datos de campo de sedimentos suspendidos en planicies de marea suele ser muy costoso.

En las ventajas de usar el modelo GETM se puede mencionar que es de licencia libre, se usan coordenadas verticales generales, resuelve ecuaciones tridimensionales hidrostáticas y de Boussinesq, tiene la opción para resolver con coordenadas cartesianas, esféricas y curvilíneas. Finalmente, este método tiene la característica de resolver temporalmente la elevación de la superficie libre en particular en las planicies de marea, lo que es un requisito importante para los modelos que incluyen inundaciones y secado (Burchard y Bolding, 2002).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar la contribución de las planicies de marea al balance sedimentario del Alto Golfo de California.

1.2.2. Objetivos específicos

(1) Identificar el principal forzamiento y las características como depósito, erosión y dirección del transporte de sedimento.

(2) Estudiar la variabilidad espacial y temporal del transporte de sedimento mediante el Modelo de Transporte Estuarino General de Burchard y Bolding (2002).

Capítulo 2. Metodología

En las planicies del AGC se tomaron observaciones durante los días 9 a 24 de marzo del 2009 de velocidad de corrientes, turbidez, velocidad del viento, concentración y tamaño de partículas. La metodología que se siguió en este estudio se resume en la figura 5. Inicialmente se limpiaron y analizaron las observaciones realizadas, se obtuvo la energía cinética turbulenta (TKE), esfuerzos cortantes del fondo (τ_{bo}), materia particulada en suspensión (MPS), altura significativa del oleaje (H_s) y flujos de sedimento. Con esta información se calibró el modelo GETM (Burchard y Bolding, 2002), con el fin de extender el estudio espacialmente en las planicies de marea y temporalmente durante mareas vivas y muertas. De las estaciones con datos más completos en cuanto a variables medidas y series temporales es la estación E-2, ya que al ser un sitio un poco más profundo se secaba menos que los otros. Aunque este estudio se enfoca en la estación E-2, en el anexo se incluye información de observaciones en otras estaciones.

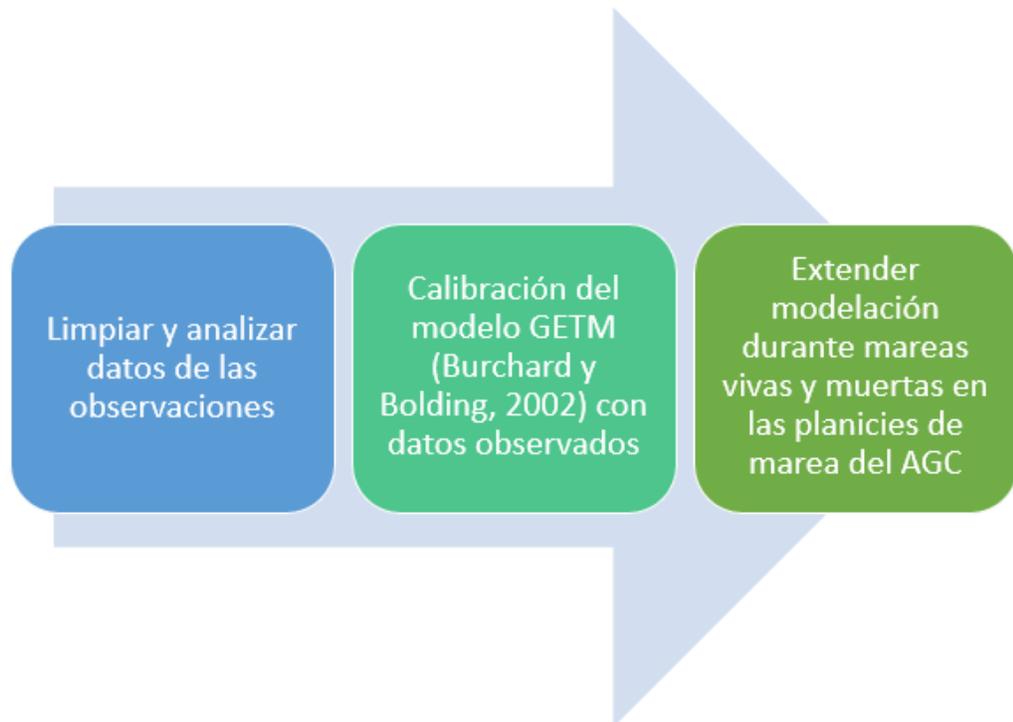


Figura 5. Esquema de la metodología realizada. El primer paso fue limpiar y analizar los datos que se obtuvieron en el 2009. Después, con los datos analizados se calibró el modelo GETM (Burchard y Bolding, 2002) el cual se modeló con 4 tipos de sedimentos, cohesivos y no cohesivos, con oleaje y sin oleaje para finalmente extender la modelación durante mareas vivas y muertas.

2.1. Factores importantes para el transporte de sedimento

Se realizaron observaciones del 9 al 24 de marzo del 2009 en las planicies de marea del AGC, cerca del poblado de San Felipe, Baja California en las estaciones que se muestran en la figura 6. Las observaciones fueron tomados en mareas vivas y muertas, se delimitaron las fechas de los periodos de mareas vivas, medias y muertas presentadas en la tabla 1. Se obtuvieron datos de velocidad de la corriente, viento, concentración y tamaño de partículas con los instrumentos de medición que se muestran en la tabla 2. Los instrumentos se colocaron en bajamares y midieron principalmente durante pleamares.

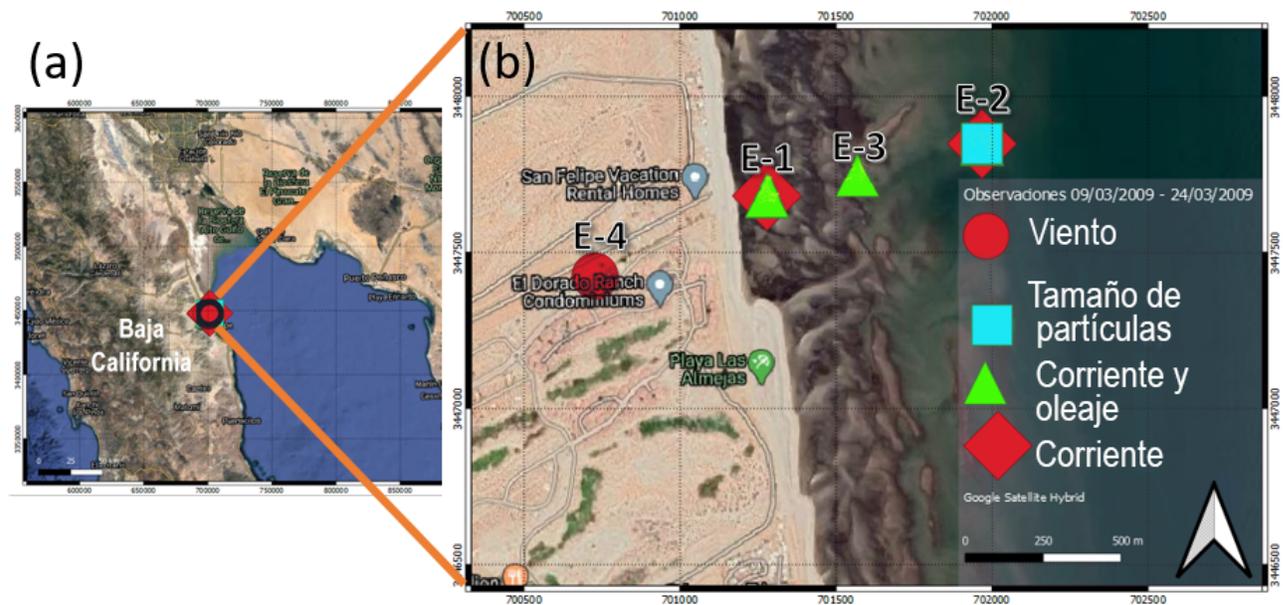


Figura 6. (a) Ubicación de las observaciones en el AGC. (b) Estaciones de los puntos en donde se adquirieron las observaciones para el estudio del mecanismo del transporte de sedimentos. Tomada de Google Satellite Hybrid (2020).

Tabla 1. Fechas de las delimitaciones de mareas vivas, medias y muertas del tiempo estudiado.

| Periodo | Mareas vivas | Mareas medias | Mareas muertas |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Fecha | 08/03/09 - 13/03/09 | 14/03/09 - 15/03/09 | 16/09/09 - 19/03/09 |
| | 23/03/09 - 25/03/09 | 20/03/09 - 22/03/09 | |

Tabla 2. Observaciones del 8 al 25 de marzo de 2009 con los siguientes instrumentos: perfilador Acústico basado en el efecto Doppler (ADCP), velocímetros acústicos basados en el efecto Doppler (ADV), transmisómetro y dispersión láser in situ (LISST), sensores de retroesparcimiento óptico (OBS) y un anemómetro marca Young. La estación E-1 corresponde a las coordenadas 31°8'45", 114°53'19", E-2 a las coordenadas 31°8'50", 114°52'53", E-3 a las coordenadas 31°8'47", 114°53'08" y E-4 a las coordenadas 31°8'37", 114°53'40" .

| Variable | Periodo, día, hora inicial y final | Nombre estación | Instrumento |
|---|---------------------------------------|--------------------|------------------|
| Corriente | 9, 08:30 - 9, 16:50 | E-1 | ADCP |
| | 10, 10:00 - 12, 04:30 | E-2 | |
| | 15, 10:00 - 17: 04:30 | E-2 | |
| Corriente y oleaje | 10, 10:00 - 15, 10:29 | E-1 | ADV |
| | 16, 08:40 - 20, 17:40 | E-3 | |
| | 20, 18:00 - 24, 15:13 | E-1 | |
| | 9, 09:00 - 19:27 | E-1 | ADV |
| | 10, 10:00 - 15, 08:01 | E-2 | |
| | 15, 10:20 - 24, 18:16 | E-2 | |
| Concentración y tamaño de partículas | 10, 09:00 - 15, 07:00 | E-2 | LISST |
| | 15, 09:00 - 24, 09:20 | E-2 | |
| Turbidez | 10, 10:00 - 15, 10:29 | E-1 | ADV (OBS D&A) |
| | 15 12:00 - 16, 08:20 | E-1 | |
| | 16, 08:40 - 20, 17:40 | E-3 | |
| | 20, 18:00 - 24, 15:13 | E-1 | |
| | 9, 06:31 - 9, 16:50 | E-1 | OBS Sea Point |
| | 9, 21:05 - 15, 08:34 | E-2 | |
| | 15, 08:43 - 24, 18:40 | E-2 | |
| Viento | 9, 00:00 - 24, 08:46 | E-4 | Anemómetro |

2.1.1. Velocidad de la corriente

Los datos de los velocímetros acústicos basados en el efecto Doppler (ADV) fueron medidos con una frecuencia de muestreo de 16 Hz , con un intervalo de ráfaga de medición de 1200 s y 2048 muestras por ráfaga. El ADV es un corrientímetro puntual que mide la velocidad de la corriente en un volumen de agua

de un cm^3 (Lohrmann et al., 1994). Para este estudio los corrientímetros tipo ADV se colocaron para medir a 0.3 m del fondo. Los datos del Perfilador Acústico basado en el Efecto Doppler (ADCP) fueron medidos con una frecuencia acústica de 614.4 Hz , con un intervalo de muestreo de 30 s y promedios cada 600 s .

2.1.2. Granulometría y turbidez

Se midió la distribución de partículas con el analizador LISST (Lasser In-Situ Scattering and Transmissometry) a una frecuencia de 1 Hz , con 29 tamaños de clase que abarcan de 2.72 μm a 460 μm en la estación E-2 en las fechas del 10 al 24 de marzo del 2009. Los datos fueron cortados cuando se secaban las planicies de marea. Los tamaños de grano se agruparon en arcillas gruesas, limos muy finos, limos finos, limos medios, limos gruesos, arenas muy finas, arenas finas y arenas medias de acuerdo con la metodología de clasificación de Folk (1974). La turbidez se midió con sensores de retroesparcimiento óptico u OBS (Optical Back Scatter) a una razón de muestreo de 1 Hz y con promedios cada 300 s . Finalmente se obtuvo el porcentaje de cada clasificación de granulometría de las series de tiempo segmentado de acuerdo con la tabla 1 por mareas vivas, mareas muertas, mareas medias y el promedio general de toda la serie de tiempo estudiada.

2.1.3. Viento

La magnitud y dirección del viento se midió durante el periodo de las observaciones con un anemómetro marca *Young* instalado en tierra. Se localizó a aproximadamente 0.5 km del área de estudio tierra adentro de las planicies de marea en una zona sin obstrucciones por edificios, a una razón de muestreo de 0.033 Hz y se promedió cada cinco minutos.

2.1.4. Esfuerzos cortantes del fondo

El esfuerzo cortante de fondo (τ_{bo}) es la fuerza por unidad de área con la que el flujo empuja el fondo, éste se obtuvo mediante la descomposición de Reynolds de las velocidades:

$$u' = U - \bar{u}, \quad (1)$$

$$v' = V - \bar{v}, \quad (2)$$

$$w' = W - \bar{w}, \quad (3)$$

donde u' , v' y w' son las fluctuaciones, U , V y W son las velocidades instantáneas y \bar{u} , \bar{v} y \bar{w} son las velocidades promedio. Después, usando las ecuaciones 1, 2 y 3, el esfuerzo cortante del fondo se obtuvo mediante la relación:

$$\tau_{bo} = \rho \sqrt{u'v'^2 + v'w'^2}, \quad (4)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, la cual es alrededor de 1025 kg m^{-3} .

2.1.5. Materia Particulada en Suspensión

Valencia (2009) obtuvo una relación entre los esfuerzos cortantes de fondo y la concentración de material particulado en suspensión (*MPS*) de las planicies de marea del AGC muy cerca de donde también se obtuvieron los datos analizados en este trabajo. En la figura 7 se muestran los resultados de la *MPS* con τ_{bo} . El autor utilizó un dispositivo *in situ* equipado con un motor calibrado para ejercer un esfuerzo conocido y se tomaron muestras para conocer el material particulado en suspensión producido. En el presente estudio se utilizó la curva obtenida por Valencia (2009) (figura 7) para obtener la concentración de *MPS* a partir de los esfuerzos del fondo.



Figura 7. Concentración de *MPS* contra τ_{bo} en las planicies de marea del Alto Golfo de California correspondiente a los días 20, 21 y 22 de julio del 2009. Modificada de Valencia (2009).

2.1.6. Energía Cinética Turbulenta

Se obtuvo una aproximación a la energía cinética turbulenta (TKE), la cual es la energía cinética media por unidad de masa asociada con los remolinos de un flujo turbulento y se obtuvo de la descomposición de Reynolds presentada en las ecuaciones 1, 2 y 3 de la siguiente forma:

$$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) . \quad (5)$$

2.1.7. Oleaje

La altura significativa fue calculada con el método PUV (presión y velocidad) con los datos de ADV de acuerdo al método propuesto por Gordon y Lohrmann (2001) el cual utiliza la teoría de ondas lineales para convertir los espectros de velocidad y presión en espectros de elevación de superficie. El método se basa en convertir los espectros de potencia de presión (C_{pp}) y velocidad (C_{uu}) a espectros de potencia de elevación de superficie con las siguientes ecuaciones:

$$C_{\eta p} = \left[\frac{\cosh kh}{\cosh k(h+z)} \right]^2 \frac{C_{pp}}{\rho^2 g^2} , \quad (6)$$

$$C_{\eta u} = \left[\frac{\sinh kh}{\cosh k(h+z)} \right]^2 \frac{C_{uu}}{\sigma^2} , \quad (7)$$

donde $C_{\eta p}$ y $C_{\eta u}$ son espectros de elevación de la superficie (η) basados en la presión (p) y la velocidad (u), k es el número de onda, h es el nivel medio del mar en relación con el lecho marino, z es la distancia vertical en relación con el nivel medio del mar, σ es la frecuencia, ρ es la densidad del agua y g es la aceleración gravitacional el cual tiene un valor global medio de 9.81 m s^{-2} .

2.1.8. Flujos de sedimento

Se estimó el flujo de *MPS* como lo obtuvieron Alvarez y Jones (2001) el cual está definido como el producto de las velocidades por componentes (γ) por la concentración de *MPS* (C). El flujo instantáneo en un punto *FIP* se calculó como en la siguiente ecuación:

$$FIP = \gamma C. \quad (8)$$

2.2. Simulación numérica de las planicies de marea

2.2.1. Modelo numérico

Se implementó el modelo numérico GETM propuesto por Burchard y Bolding (2002) con el fin de hacer aproximaciones del transporte de sedimentos en un amplio periodo temporal (mareas vivas y muertas) y para extender los resultados en la zona de planicies de marea.

El modelo hidrodinámico se basa en resolver por diferencias finitas las ecuaciones de movimiento hidrostáticas tridimensionales con la aproximación de Boussinesq y el supuesto de viscosidad:

$$\begin{aligned} -g\partial_x\zeta = & \\ & \partial_t u + \partial_z(uw) - \partial_z((\nu_t + \nu)\partial_z u) + \alpha(\partial_x(u^2) + \partial_y(uv)) \\ & - \partial_x(2A_h^M \partial_x u) - \partial_y(A_h^M(\partial_y u + \partial_x v)) - fv - \int_z^\zeta \partial_x b dz', \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} -g\partial_y\zeta = & \\ & \partial_t v + \partial_z(vw) - \partial_z((\nu_t + \nu)\partial_z v) + \alpha(\partial_x(vu) + \partial_y(v^2)) \\ & - \partial_y(2A_h^M \partial_y v) - \partial_x(A_h^M(\partial_y u + \partial_x v)) + fu - \int_z^\zeta \partial_y b dz', \end{aligned} \quad (10)$$

donde, u , v y w son las componentes de velocidad con respecto a la dirección x , y y z respectivamente (con x positiva al este, y positiva al norte y z vertical positiva hacia arriba). Las coordenadas verticales z van desde la profundidad $-H(x, y)$ hasta la superficie $\zeta(t, x, y)$ con t que denota el tiempo, ν_t es la

viscosidad vertical, ν la viscosidad cinemática, el parámetro de Coriolis f y g es la aceleración gravitacional. La mezcla horizontal se parametriza mediante términos que contienen la viscosidad horizontal A_h^M . Además, la columna de agua se dividió en cinco niveles sigma.

2.2.1.1. Condiciones de frontera

Se utilizaron condiciones de frontera de tipo Neumann cerradas y abiertas. En la zona continental se usaron fronteras cerradas donde las velocidades son siempre igual a 0 y se aplicaron fronteras abiertas en las zonas que tienen o llegan a tener tirante de agua.

En la frontera cerrada, el flujo es paralelo a la frontera y se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{u}_n \cdot \vec{\nabla} G^c = 0, \quad (11)$$

donde G^c es la frontera lateral y \vec{u}_n es el vector normal. Para el caso de fronteras abiertas se utilizan las relaciones:

$$\vec{\nabla}_n u \cdot \vec{\nabla} G^o = 0, \quad \vec{\nabla}_n v \cdot \vec{\nabla} G^o = 0, \quad (12)$$

donde $\vec{\nabla}_n$ es el operador gradiente normal, Para el caso de $\partial_x u$ es para las fronteras abiertas del este y oeste y en el caso de $\partial_x v$ para el caso de las fronteras abiertas del norte y sur.

2.2.1.2. Secado e inundado

El esquema de secado e inundado se aplicó en las planicies de marea del AGC. De acuerdo con Burchard y Bolding (2002) al usar esta opción en el modelo hidrodinámico se necesita que la integración vertical de flujos zonales y meridionales se controlen con el objetivo de que en ningún momento la profundidad del mar sea negativa. La forma de controlar la presión cuando está seco es manipulando una elevación virtual ζ de la superficie del mar. Por ejemplo, como se observa en la figura 8 en la celda izquierda se tiene una presión $\zeta_{i,j}$ incluso más baja que el punto crítico de la elevación $-H_{i,j} + H_{min}$, para que exista un equilibrio entre las dos celdas del lado derecho se asume una presión virtual $\tilde{\zeta}_{i+1,j}$

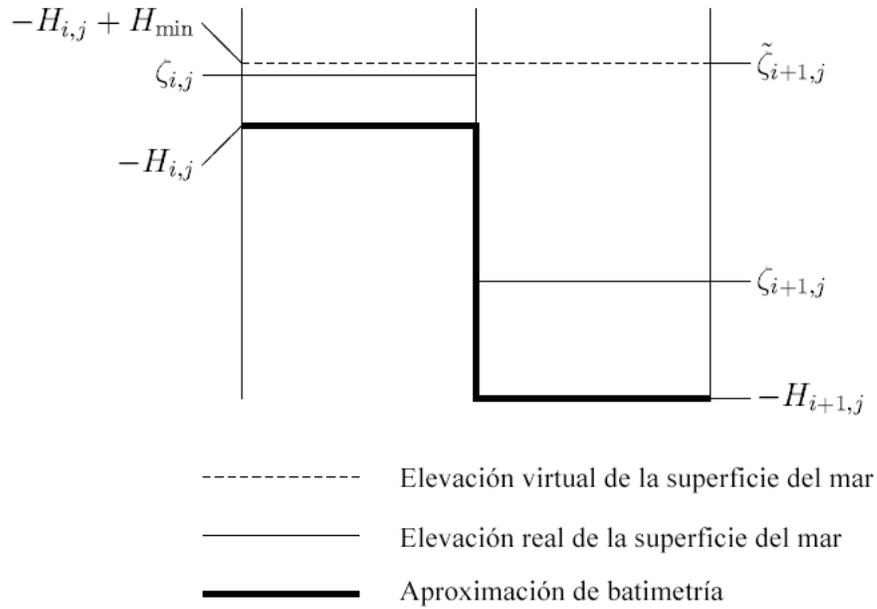


Figura 8. Caso con puntos de presión secos. Modificado de Burchard y Bolding (2002).

2.2.1.3. Cálculo de materia particulada en suspensión del modelo

El modelo tiene un módulo para calcular la concentración de *MPS*, el cual fue elaborado por Burchard y Bolding (2002). La modelación de la *MPS* parte de la concentración C y está sujeta a la siguiente ecuación:

$$\partial_t C + \partial_x(uC) + \partial_y(vC) + \partial_z[(w - w_s)C] - \partial_z(\nu'_t \partial_z C) - \partial_x(A_h^T \partial_x C) - \partial_y(A_h^T \partial_y C) = 0. \quad (13)$$

En la ecuación 13, w_s es una velocidad de asentamiento constante y positiva. Este modelo considera cada tamaño de partículas *MPS* no cohesivas o cohesivas que interactúan con el flujo promedio. En el fondo, el flujo neto de *MPS* es el residuo de los flujos de erosión y depósito:

$$-w_s C - \partial_z(\nu'_t \partial_z C) = F_e - F_s, \quad (14)$$

donde F_e es la tasa de erosión y F_s la tasa de depósito, estos se modelan de la forma propuesta por Krone (1962) como funciones del esfuerzo cortante del fondo modelada τ_{bm} y C la concentración inicial

de *MPS*. El flujo de erosión (F_e) solo es distinto de cero cuando el esfuerzo cortante de fondo excede un esfuerzo cortante crítico τ_{ce} y el flujo de sedimentación F_s solo es distinto de cero para esfuerzos cortantes inferiores más pequeños que un esfuerzo cortante crítico τ_{cs} . Este flujo está limitado por la concentración cercana al fondo C_b . La sedimentación de *MPS* se reduce linealmente hacia cero cuando la profundidad del mar se encuentra entre la profundidad crítica y la mínima.

Se usaron 4 tamaños de clase de sedimentos los cuales se muestran en la tabla 3. Para los datos de entrada del módulo de sedimentos se usaron dos tamaños de grano cohesivos y dos no cohesivos de acuerdo a los datos obtenidos en campo. Para cada tamaño de clase, el esfuerzo crítico de erosión fue obtenido de Julien (1998) donde observa que el esfuerzo cortante crítico se vuelve proporcional al tamaño del sedimento, y la velocidad de asentamiento de Rubey (1933) el cual sugiere equivalencias aproximadas de estas velocidades de sedimentación con las velocidades requeridas para transportar sedimentos en un flujo.

Tabla 3. Tipo de sedimentos representativos de las planicies de marea del AGC.

| Tipo de sedimento | Arenas muy finas | Limos gruesos | Arenas finas | Limos medios |
|---|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Diámetro del sedimento [μm] | 94 | 47 | 187.5 | 23.3 |
| Diámetro del sedimento [mm] | 0.094 | 0.047 | 0.1875 | 0.0233 |
| Esfuerzo crítico del fondo para la erosión [$N m^{-2}$] | 0.1275 (Julien, 1998) | 0.0963 (Julien, 1998) | 0.15 (Julien, 1998) | 0.0728 (Julien, 1998) |
| Cohesivo [sí/no] | no | sí | no | sí |
| Velocidad de asentamiento [$m s^{-1}$] | 0.0178 (Rubey, 1933) | 0.00781 (Rubey, 1933) | 0.0562 (Rubey, 1933) | 0.00178 (Rubey, 1933) |

El modelo calcula el esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}) como lo propuso Soulsby (1997), se obtiene para cada tipo de sedimento su tamaño adimensional con la siguiente ecuación:

$$D_s = \left[\frac{g(s-1)}{\eta^2} \right]^{1/3} d, \quad (15)$$

donde d es el tamaño del grano, g es la fuerza de gravedad, η es la viscosidad cinemática del agua de mar, $s = \frac{\rho_s}{\rho}$, ρ_s la densidad del grano de sedimento y ρ es la densidad del agua de mar. Después, el esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\tau_{bm} = \frac{0.3}{1 + 1.2 D_s} + 0.055[1 - \exp(-0.020 D_s)]. \quad (16)$$

La tasa de erosión se calcula como lo describe Yang y Hamrick (2003) de la siguiente forma:

$$F_e = \begin{cases} M_0 \left(\frac{\tau_{bm}}{\tau_{cr}} - 1 \right) & \tau_{bm} \geq \tau_{cd} \\ 0 & \tau_{bm} < \tau_{ce}, \end{cases} \quad (17)$$

donde M_0 es la tasa de resuspensión que es equivalente a la tasa de resuspensión cuando $\tau_{bm} = 2\tau_{cr}$ y τ_{cd} es el esfuerzo cortante crítico para el depósito, el cual se define como el esfuerzo cortante del fondo por encima del cual no se depositaría ninguno de los sedimentos inicialmente suspendidos. La concentración de la carga de fondo C_b en el modelo se calcula como lo propone Van Rijn (1984):

$$C_b = \frac{q_b}{u_b \delta_b}, \quad (18)$$

en el que δ_b es el espesor de la carga de la capa del fondo, q_b es la tasa del transporte del fondo y u_b es la velocidad de la partícula obtenida de la siguiente ecuación:

$$u_b = \left(9 + 2.6 \log D_s - 8 \left[\frac{\theta_{cr}}{\theta} \right] \right) u_* , \quad (19)$$

donde u_* es la velocidad cortante del fondo, θ es el parámetro de Shields y se calcula como en la ecuación:

$$\theta = \frac{\tau_{bm}}{(\rho_s - \rho) g d}, \quad (20)$$

θ_{cr} está en función de d y se obtiene del diagrama de iniciación del movimiento de Van Rijn (1984).

La tasa de depósito (F_s), de acuerdo a Krone (1962), puede obtenerse de la siguiente manera:

$$F_s = \begin{cases} w_s C_b \left(1 - \frac{\tau_{bm}}{\tau_{cd}} \right) & \tau_{bm} < \tau_{cd} \\ 0 & \tau_{bm} < \tau_{cr} . \end{cases} \quad (21)$$

2.2.1.4. Módulo para el cálculo de oleaje del modelo

Para incluir el oleaje al modelo, este se calcula como lo proponen Soulsby y Clarke (2005). Parte de obtener las características de una onda senoidal con periodo T , la amplitud de la velocidad orbital U_w

y la amplitud del esfuerzo cortante del fondo "debido al oleaje" a diferencia del τ_{bm} anterior, τ_{wr} es definida como:

$$\tau_{wr} = \frac{1}{2} \rho f_{wr} U_w^2, \quad (22)$$

donde f_{wr} es el coeficiente de fricción del oleaje y con z_0 la rugosidad del fondo puede calcularse como:

$$f_{wr} = 1.39 \left(\frac{A}{z_0} \right)^{-0.52}, \quad (23)$$

$$A = \frac{U_w T}{2\pi}. \quad (24)$$

Se realizaron dos implementaciones del modelo y ambas fueron calibradas con los datos de las observaciones de acuerdo a sus respectivas características, una con oleaje débil con una H_s de 10 *cm* con valores de MPS de $\sim 0.02 \text{ g l}^{-1}$ y otra con oleaje intenso que llega hasta 60 *cm* de H_s con un valor de MPS de $\sim 10 \text{ g l}^{-1}$.

2.2.1.5. Prisma de marea

El prisma de marea V_p es el intercambio de volumen de agua entre los ciclos de marea, esta se calcula de la siguiente forma:

$$V_p = (H_w - H_l) S_p, \quad (25)$$

donde S_p es el área de la superficie estudiada, H_w es el nivel del mar en pleamar y H_l en bajamar.

2.2.1.6. Datos de entrada del modelo

Se utilizó una malla con datos de batimetría que se muestra en la figura 9 proporcionados por el CICESE con resolución a lo largo de la longitud de 900 *m* y en la latitud de 900 *m*. Se seleccionó un dominio más pequeño para las planicies de marea y se interpoló con una resolución de 312 *m* en la

longitud y de 316 m en la latitud. Se llevaron a cabo simulaciones del 1 de noviembre del 2008 al 25 de marzo del 2009 con un periodo de estabilización de cuatro meses.

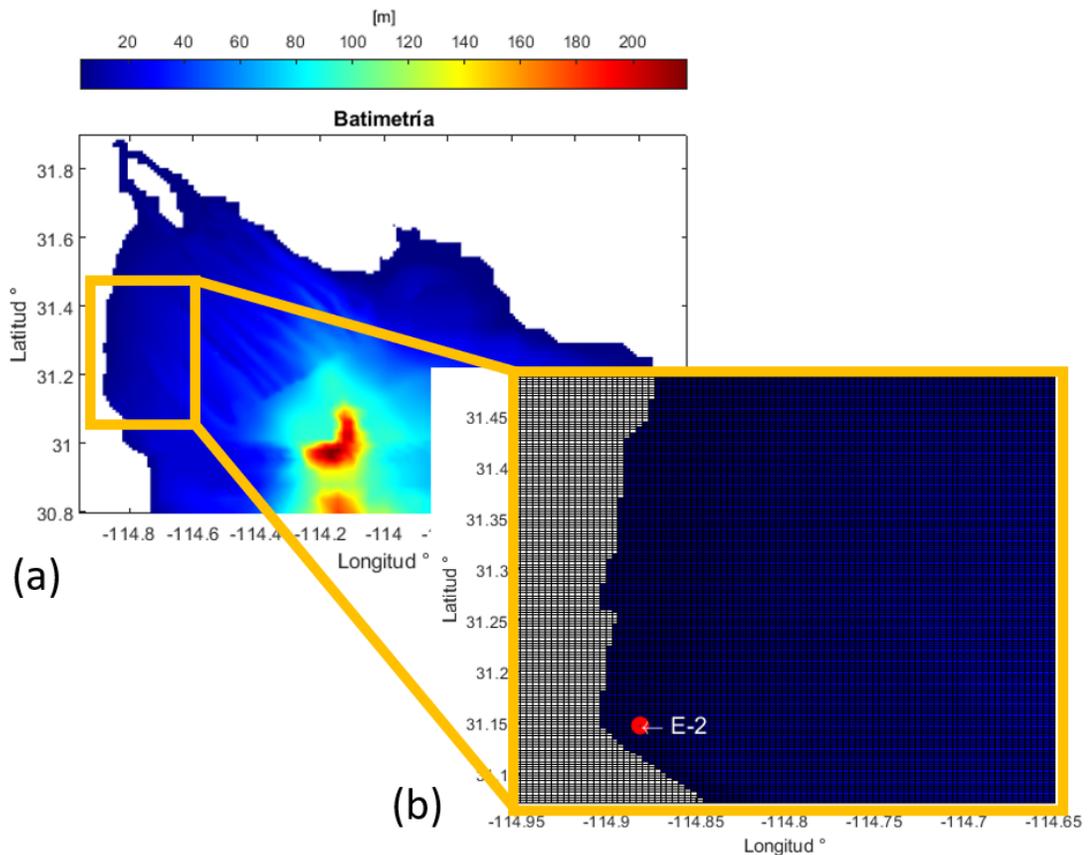


Figura 9. (a) Malla batimétrica completa proporcionada por el CICESE. (b) Malla utilizada en el modelo GETM que incluye las planicies de marea del AGC, abarcando 47.7 km en la longitud y en la latitud aproximadamente 28 km .

Se usaron los forzantes de mareas, viento y oleaje. En el caso del forzante de marea se utilizaron las predicciones de marea del Tide Model Driver (TMD) de Erofeeva et al. (2020) usando los coeficientes de los componentes armónicos M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , MF , MM , M_4 , MS_4 y MN_4 en los límites de la malla este, norte y sur. Para el forzante de viento se usó el promedio del valor de las velocidades u_w y v_w de las observaciones realizadas y por último el forzante de oleaje fue derivado del viento.

Después de diferentes pruebas, el coeficiente de arrastre usado en el modelo con el que se obtuvieron los mejores resultados fue de 2.5×10^{-3} . Para la rugosidad del fondo se usó el valor de 0.004 m obtenido por Alvarez (2010).

2.3. Correlación entre dos variables

El coeficiente de correlación r es una medida de dependencia entre dos variables aleatorias, este método se utilizó con el objetivo de comparar las observaciones de elevación del nivel del mar, velocidad u y v , rapidez, esfuerzo cortante del fondo, TKE y MPS con los datos obtenidos en el modelo GETM. De acuerdo con Press et al. (1992), si cada variable tiene N observaciones, el coeficiente de correlación de Pearson se define como:

$$r(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(\frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \left(\frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right), \quad (26)$$

donde σ_X y σ_Y es la desviación estándar de X y Y respectivamente, μ_X y μ_Y son la media de X y Y . La matriz de coeficientes de correlación de dos variables aleatorias es igual a la matriz de coeficientes de correlación para cada combinación de variables, escrita como:

$$R = \begin{pmatrix} r(X, X) & r(X, Y) \\ r(X, Y) & r(Y, Y) \end{pmatrix}, \quad (27)$$

debido a que la correlación de X y Y en sí mismas es igual a 1, entonces la ecuación 27 quedaría de la siguiente forma:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r(X, Y) \\ r(X, Y) & 1 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Capítulo 3. Resultados

3.1. Granulometría

Los tamaños de grano obtenidos en la estación E-2 se presentan en la figura 10, se puede observar que por orden de abundancia independientemente de si son mareas vivas, medias o muertas hay más arenas muy finas (23.48%), luego los limos gruesos (14.77%), arenas finas (14.52%), limos medios (13.47%), limos finos (10.23%), arenas medias (8.63%), limos muy finos (8.61%) y por último arcillas gruesas (6.15%).

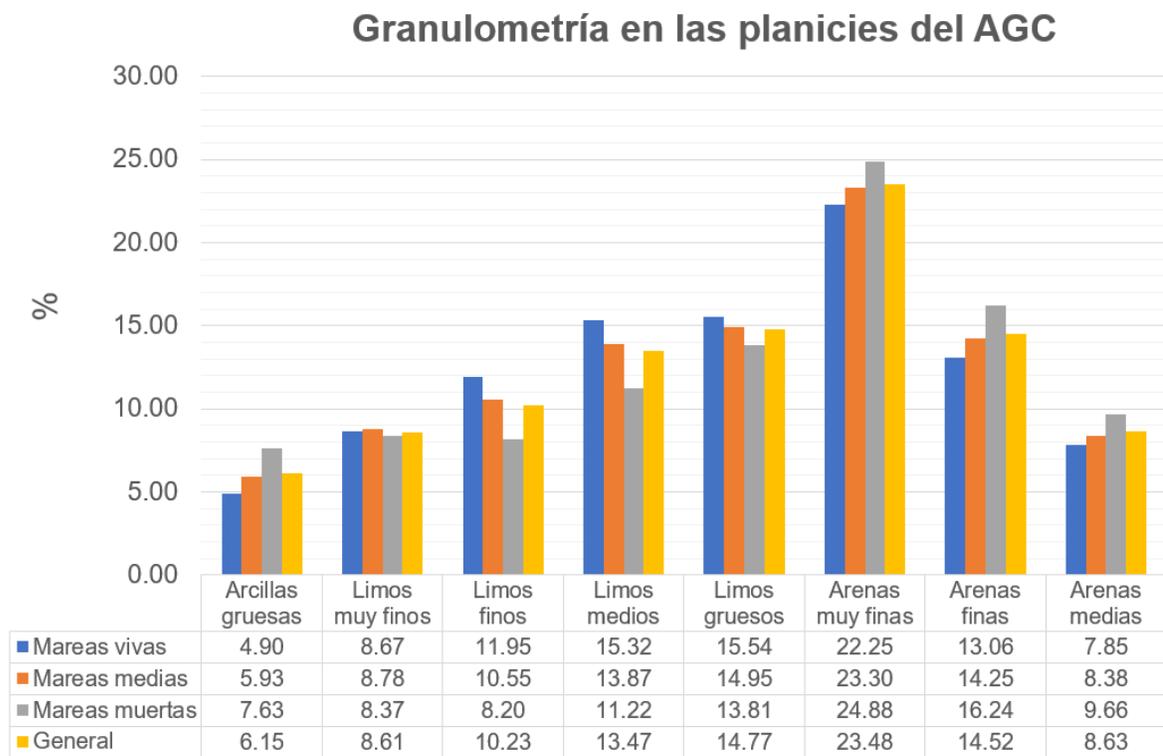


Figura 10. Porcentajes promedio temporales del tamaño de partículas del 15 al 24 de marzo del 2009 segmentado en mareas vivas, mareas medias, mareas muertas y general.

También se observa que en mareas vivas hay un mayor porcentaje de sedimento comparado con mareas medias y mareas muertas del tamaño correspondiente a limos finos, limos medios y limos gruesos al contrario de lo que se observa en mareas muertas donde tiene un menor porcentaje. De igual manera se observa un contraste en mareas muertas donde el tamaño de grano tiene mayor porcentaje comparándolo con mareas vivas y medias en las arenas muy finas, arenas finas y arenas medias. Durante mareas medias el tamaño de grano se encuentra generalmente entre los porcentajes de mareas vivas y

mareas muertas. Las diferencias en los porcentajes de mareas vivas, muertas y medias son parecidos en el caso de la granulometría de limos muy finos, en los otros tamaños de granulometrías sí hay un cambio significativo dependiendo del periodo estudiado.

3.2. Viento

La serie de tiempo de la magnitud de la velocidad del viento se muestra en la figura 11. Aunque el promedio tomando en cuenta todo el periodo de observaciones fue de 3.6 m s^{-1} , se observan valores significativamente altos los días 12, 22 y 23 de marzo. En la figura 12 se observa que los datos del viento con mayor frecuencia tuvieron una preferencia entre el oeste y oeste-suroeste. Los datos de estas direcciones muestran que la magnitud predominante fue de $4 - 6 \text{ m s}^{-1}$. En segundo lugar de ocurrencia fueron los datos principalmente desde el sureste y oeste con una magnitud predominante de $2 - 4 \text{ m s}^{-1}$. Las magnitudes en los rangos de $10 - 12 \text{ m s}^{-1}$ fueron desde el norte.

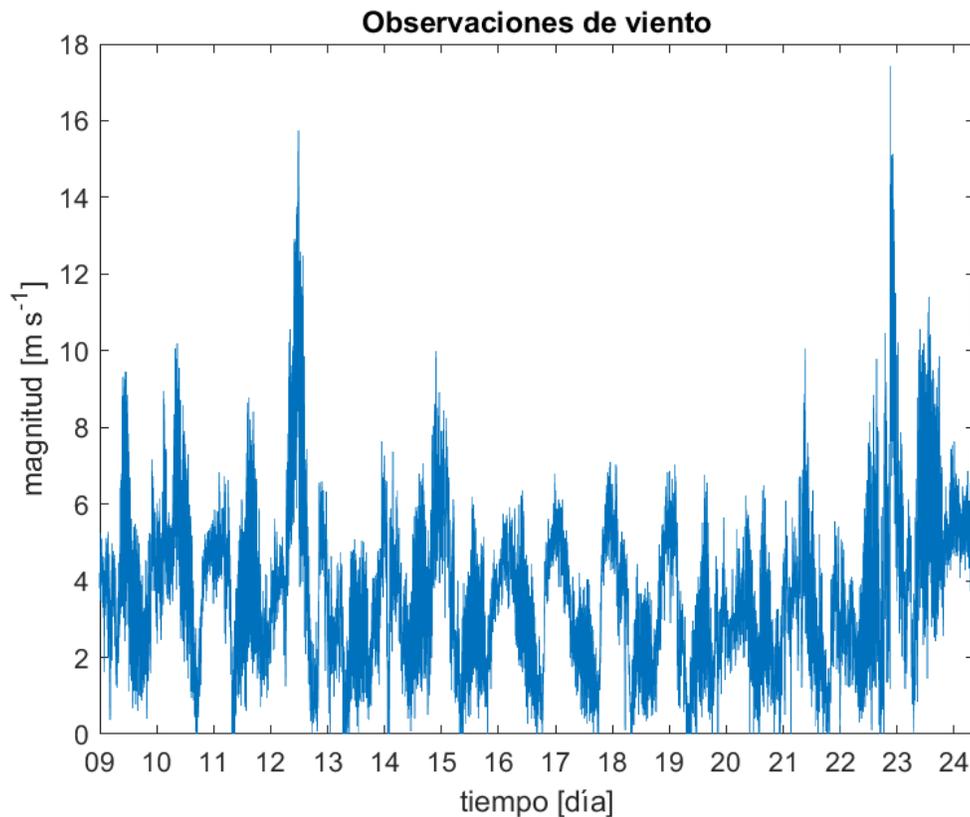


Figura 11. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-4 desde las 00:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 8:46 hrs del 24 de marzo.

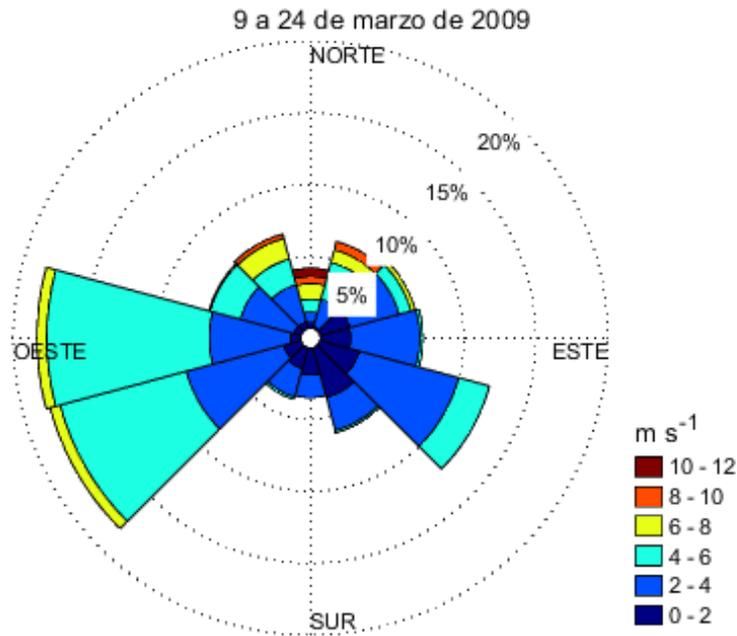


Figura 12. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-4 desde las 00:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 8:46 hrs del 24 de marzo.

3.3. Perfiles de velocidad de la corriente

La distribución vertical de la velocidad para la estación E-1 se muestra en la figura 13. La dirección preferencial de la corriente fue al suroeste y sureste durante pleamar y bajamar, respectivamente. Las magnitudes máximas de este periodo de muestreo fueron $-0.3 m s^{-1}$ a $0.1 m s^{-1}$ para estas dos fases de marea y ocurrieron aproximadamente a las 11 y a las 13 horas.

La figura 14 muestra los resultados de las observaciones ubicadas en la estación E-2 en la zona submareal. La dirección preferencial de la corriente fue al noroeste y sureste durante pleamar y bajamar, respectivamente. Las magnitudes máximas registradas en este periodo de muestreo fueron de $-0.4 m s^{-1}$ a $0.3 m s^{-1}$ para estas ocho fases de marea y ocurrieron el 10 de marzo alrededor de las 12 horas y el 11 de marzo a las 2 horas.

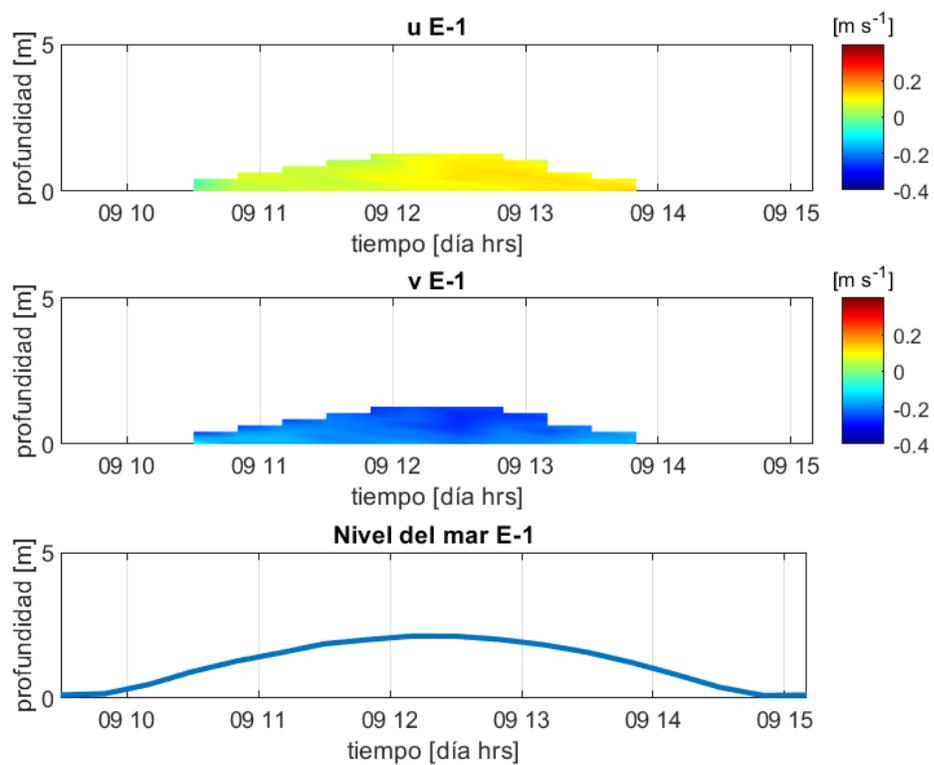


Figura 13. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondientes al 9 de marzo del 2009 en la estación E-1.

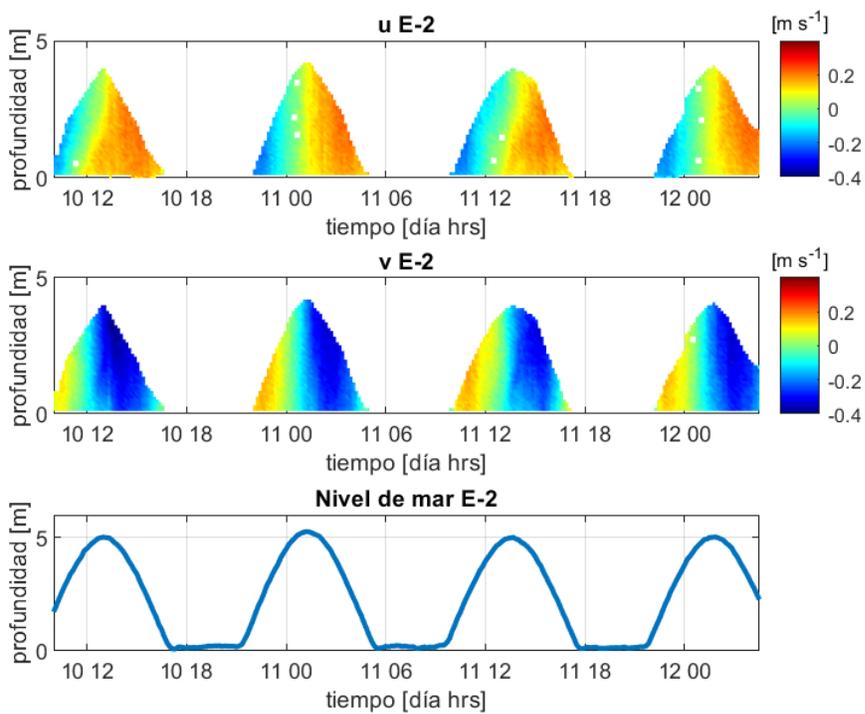


Figura 14. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 al día 12 de marzo del 2009 a las 16:30 correspondientes a la estación E-2.

Los resultados que se muestran en la figura 15 también fueron tomados en la estación E-2 y la serie de tiempo pertenece a la transición de mareas vivas a muertas. Podemos notar que la dirección preferencial de la corriente fue al noroeste y sureste durante pleamar y bajamar, respectivamente. Las magnitudes máximas registradas fueron de -0.15 m s^{-1} a 0.1 m s^{-1} para estas ocho fases de marea y ocurrieron el 15 de marzo alrededor de las 13 horas y el 15 de marzo a las 17 horas.

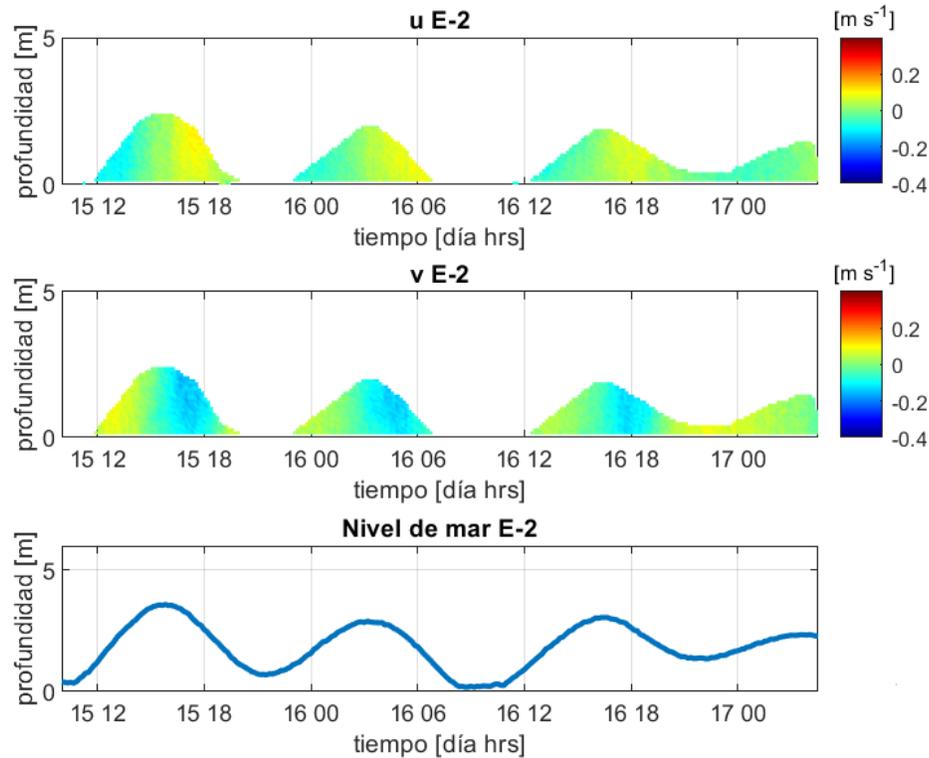


Figura 15. Velocidades zonales, meridionales y presión correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 al 17 de marzo del 2009 a las 16:30 correspondiente a la estación E-2.

3.4. Corriente cerca del fondo y oleaje

En las figuras 16a y 17a y se puede observar que durante pleamares en el periodo de mareas vivas la velocidad meridional es positiva y en bajamares negativa, mientras que en mareas muertas la velocidad meridional es positiva la gran mayoría del tiempo excepto en el punto del nivel del mar más alto durante dicho periodo. Las velocidades zonales en pleamares y en el periodo de mareas vivas son negativas, en mareas muertas se observa que la velocidad zonal es negativa salvo a las bajamares. En ambas situaciones las velocidades verticales tienen una magnitud menor comparada con las velocidades zonales

y meridionales, sin embargo no siempre tienen la misma magnitud, con una elevación del nivel del mar mayor sea observa que tiende a ser negativa con una magnitud más grande en mareas vivas que en mareas muertas. También se observa que entre mayor sea el nivel del mar, las velocidades tienen mayor magnitud. En la figura 16a las velocidades zonales y meridionales tienen aproximadamente la misma magnitud llegando a rangos de -0.15 a 0.1 m s^{-1} en la componente de la velocidad u y respecto a la componente de velocidad v abarca de -0.2 a 0.1 m s^{-1} . En la figura 17a los rangos de las velocidades zonales son de aproximadamente de -0.1 a 0.1 m s^{-1} alcanzando los valores máximos en mareas vivas y para las velocidades meridionales los rangos son de -0.18 a 0.1 m s^{-1} . En el diagrama de dispersión correspondiente a mareas vivas en la figura 18 se muestra una preferencia en la dirección sureste al igual que el diagrama de dispersión de la figura 19. Ambos diagramas con una gran concentración de observaciones en el rango de las velocidades u que abarca de -0.05 a 0.03 m s^{-1} y en la velocidad v de -0.05 a 0.05 m s^{-1} . Los valores máximos de las velocidades u y v llegan a ser casi 0.15 m s^{-1} y 0.2 m s^{-1} , respectivamente.

En las figuras 16b y 17b se observan las series de tiempo del nivel del mar, del esfuerzo cortante de fondo τ_{bo} , la concentración de MPS y la altura significativa del oleaje Hs . La diferencia entre ambas figuras es que la primera abarca mareas vivas y la segunda mareas muertas y vivas. Cuando la Hs aumenta, el esfuerzo en el fondo se incrementa y por lo tanto también la concentración de MPS . En mareas muertas tanto la Hs como τ_{bo} y la concentración de MPS tienen poca variabilidad, al contrario de lo que pasa en mareas vivas. No se nota alguna relación clara entre pleamares y bajamares con el comportamiento de Hs , la concentración de MPS y τ_{bo} .

En las figuras 20 y 21 se clasificó la energía cinética turbulenta (TKE) y esfuerzo cortante del fondo τ_{bo} de acuerdo a los signos positivo o negativo de las componentes de la velocidad u y v . En las figuras 20a y 20d observamos que la dirección preferencial con mayor concentración de observaciones de TKE es al sureste al igual que en las figuras 21a y 21d. También se nota que valores altos de TKE no implican incremento de material particulado en suspensión. En las figuras 20b y 20e observamos que entre mayor sea τ_{bo} hay mayor material particulado en suspensión, la curva está bien definida debido a que son variables dependientes debido a la forma en la que se calculó la concentración de MPS , lo mismo se pueden notar en las figuras 21b y 21e.

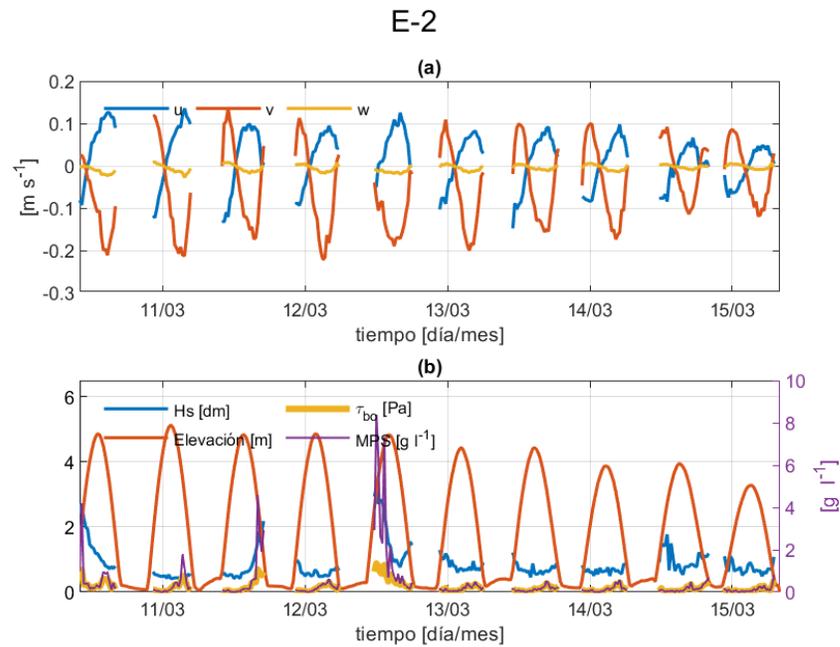


Figura 16. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs de la estación E-2. (a) Componentes de la velocidad u , v y w . (b) Elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

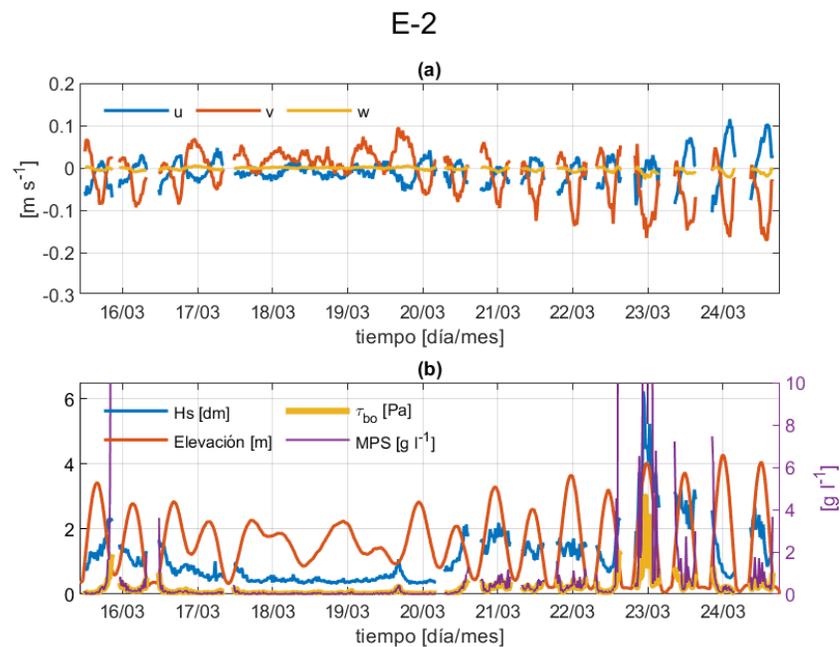


Figura 17. Serie de tiempo correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs de la estación E-2. (a) Componentes de la velocidad u , v y w . (b) Elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

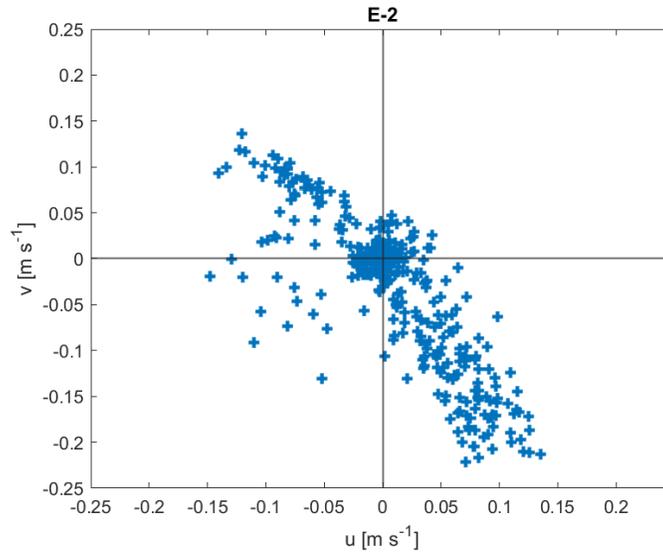


Figura 18. Diagrama de dispersión de las componentes de u y v de la estación E-2 correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs.

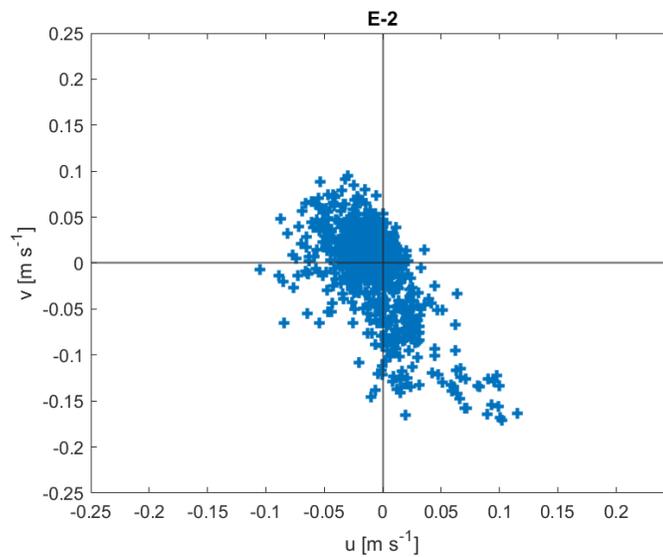


Figura 19. Diagrama de dispersión de las componentes de u y v de la estación E-2 correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs.

Los valores más altos del esfuerzo cerca del fondo mostrado en las figuras 20c y 20f coinciden también con una dirección preferencial de la corriente hacia el sureste. En contraste, el esfuerzo en las figuras 21c y 21f coinciden ligeramente con la dirección sur de la velocidad. En general, para mareas vivas (figura 20), los intervalos en los que se encuentra la mayor cantidad de observaciones son, para MPS 0 a $2 g l^{-1}$, y para τ_{bo} 0 a $0.4 Pa$. La energía cinética turbulenta presentó la mayor cantidad de observaciones alrededor del valor de $0.02 m^2 s^{-2}$ y alcanzó magnitudes de $0.03 m^2 s^{-2}$. Estos valores de TKE coincidieron con rangos de velocidad zonal y meridional de -0.1 a $0.1 m s^{-1}$ y -0.2 a $0.1 m s^{-1}$,

respectivamente. En la figura 21 la mayor cantidad de observaciones referente a la MPS está entre 0 y 5 g l^{-1} , con respecto a τ_{bo} la mayor cantidad de observaciones está en el intervalo de 0 a 0.7 Pa . Durante este periodo la TKE presento valores alrededor de $0.01 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y alcanzaron $0.02 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ con rangos de velocidad zonal y meridional de -0.1 a 0.1 m s^{-1} y -0.2 a 0.1 m s^{-1} , respectivamente.

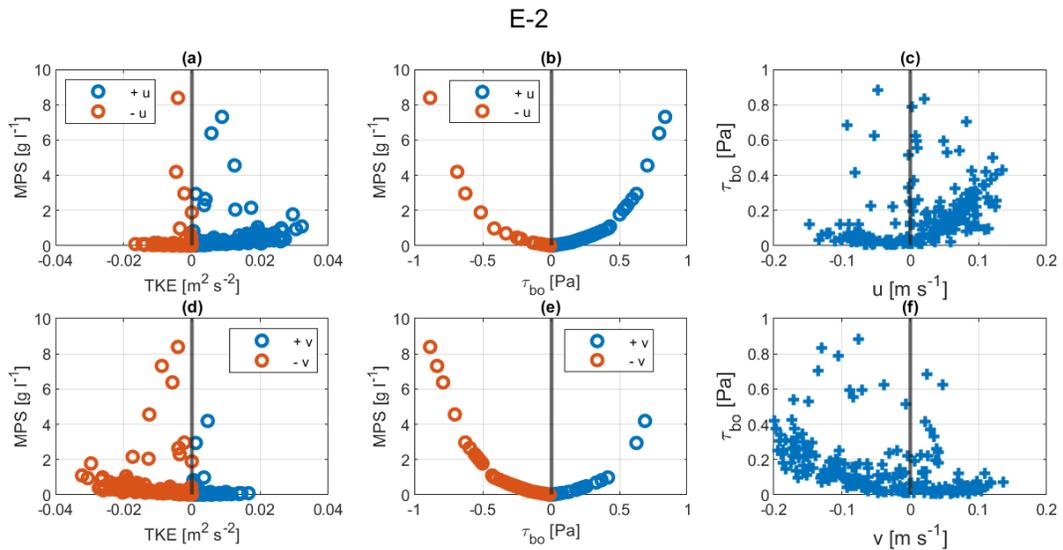


Figura 20. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs. Se conserva el signo de las componentes de velocidad para visualizar la dirección preferencial. (a) TKE , MPS y signo de u , (b) τ_{bo} , MPS y signo de u , (c) componente zonal contra τ_{bo} , (d) TKE , MPS y signo de v , (e) τ_{bo} , MPS y signo de v , (f) componente meridional contra τ_{bo} .

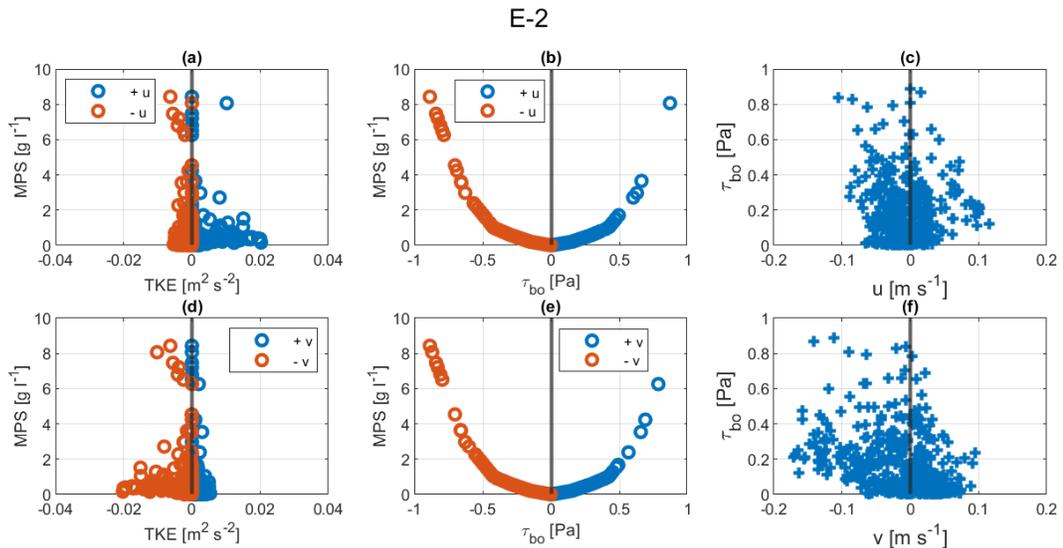


Figura 21. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs. Se conserva el signo de las componentes de velocidad para visualizar la dirección preferencial. (a) TKE , MPS y signo de u , (b) τ_{bo} , MPS y signo de u , (c) componente zonal contra τ_{bo} , (d) TKE , MPS y signo de v , (e) τ_{bo} , MPS y signo de v , (f) componente meridional contra τ_{bo} .

Las figuras 22a y 22b muestran las magnitudes de TKE durante el reflujo de marea (componentes u y v , positiva y negativa, respectivamente) junto con valores de alrededor de $1 Pa$ del esfuerzo cortante del fondo. Entre los intervalos de 0.2 a $0.4 Pa$ se encuentran los valores más altos de TKE . Esto también se observa en las figuras 23a y 23b, donde los valores de TKE son más pequeños aunque coinciden con valores de esfuerzo de hasta $0.9 Pa$. También en estas últimas figuras se nota que no hay una preferencia de dirección tan fuerte como con las figuras 22a y 22b.

Las figuras 22c y 23c presentan el comportamiento de la concentración de MPS con respecto a la altura significativa para los dos periodos de observaciones. La primera figura muestra la mayor cantidad de observaciones de Hs entre 0.05 y $0.15 m$ y concentraciones de hasta $1 g l^{-1}$. En la segunda figura Hs se incrementó a $0.25 m$ y se presentaron concentraciones de casi $2 g l^{-1}$. Entre mayor sea el oleaje mayor es la resuspensión de sedimentos, encontrando que con altos valores de Hs de hasta $0.3 m$ le corresponden valores desde 0.5 a $1.7 g l^{-1}$ y con un oleaje casi nulo corresponde a valores de 0 a $0.5 g l^{-1}$.

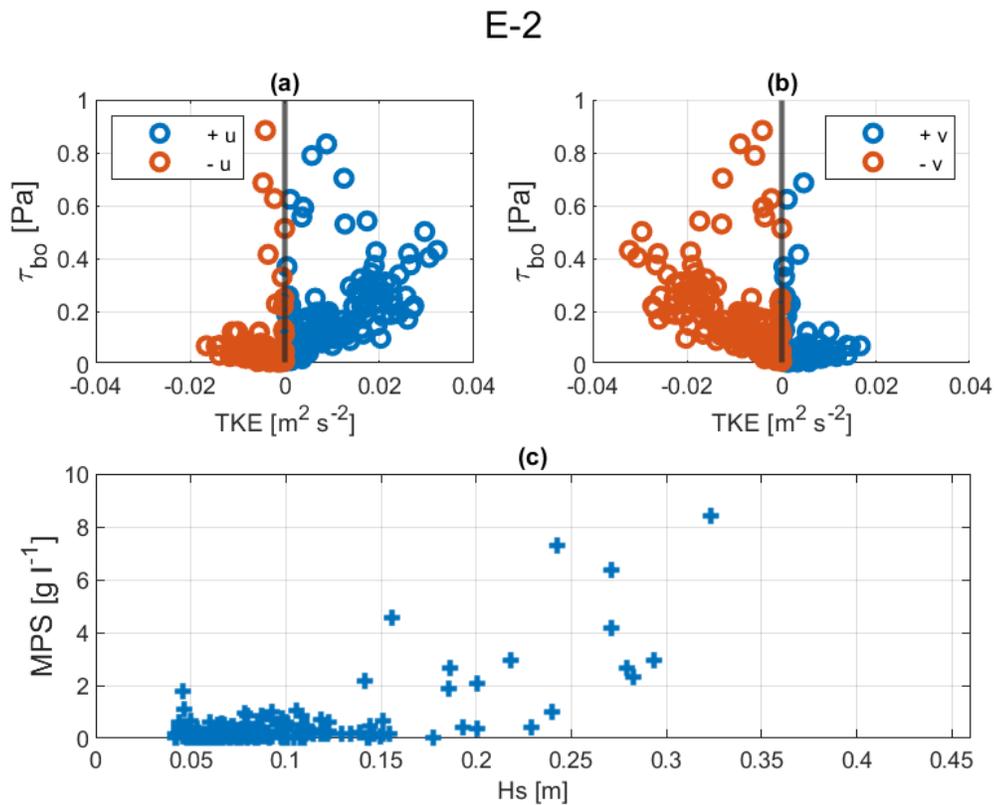


Figura 22. Datos correspondientes a la estación E-2 de los días del 10 de marzo del 2009 a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs, (a) TKE , τ_{bo} y signo de u , (b) TKE , τ_{bo} y signo de v , (c) MPS contra Hs .

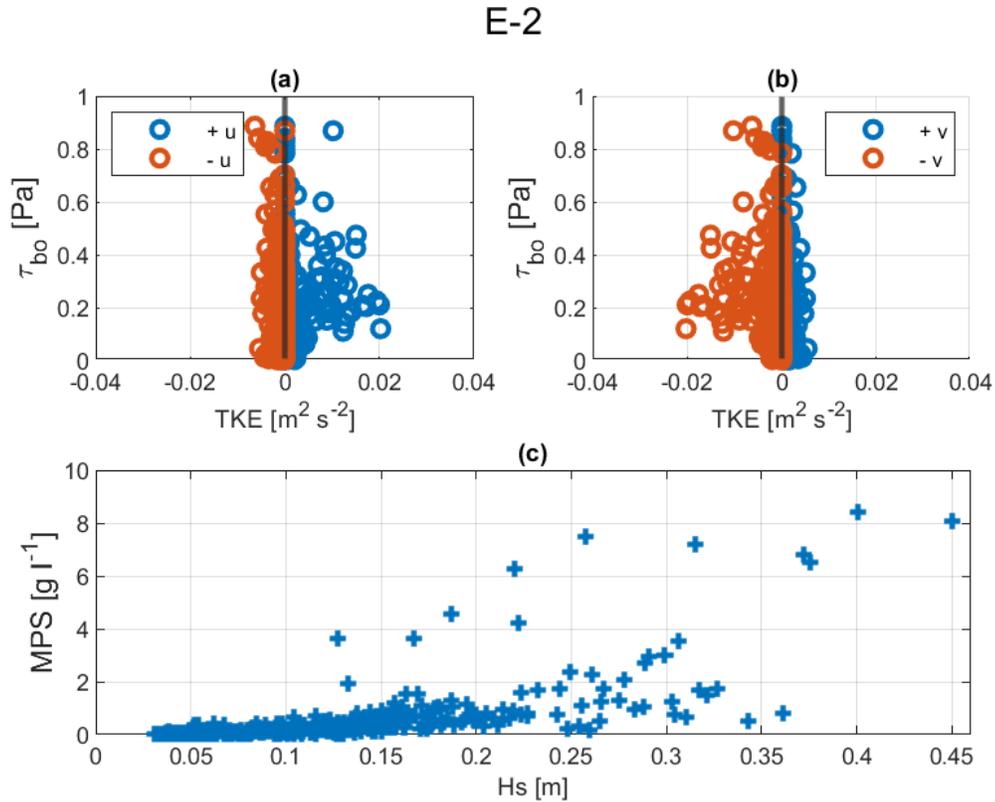


Figura 23. Datos correspondientes a la estación E-2 de los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs. (a) TKE , τ_{bo} y signo de u , (b) TKE , τ_{bo} y signo de v , τ_{bo} , (c) MPS contra Hs .

Las figuras 24 y 25 muestran que los flujos principales se presentan casi en el punto más alto de la elevación del nivel del mar y la dirección preferencial es diferente en los dos casos. Por ejemplo, en la primera figura se muestra que en mareas vivas los flujos de MPS al inicio de pleamares tienen una dirección preferente hacia el noroeste. Conforme llega al nivel máximo del nivel del mar durante el ciclo semidiurno la dirección cambia hacia el sureste manteniéndose en esa dirección hasta finales de las bajamares. Cabe resaltar la importante diferencia de magnitud de los flujos de pleamar y bajamar. Mientras que en el primero son de apenas $0.025 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en el segundo alcanza valores de $0.15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En la figura 25, correspondiente a mareas muertas y vivas, se observa que los flujos de MPS tienen dirección preferencial hacia el norte mientras que en mareas vivas en general existe un balance entre las direcciones. Dentro de este periodo se puede apreciar que durante mareas vivas el flujo es mayor que en mareas muertas. El oleaje mostrado durante los días 21 al 24 de marzo contribuye al incremento de flujos de MPS . Se obtuvo un flujo neto promedio de un periodo semidiurno en mareas vivas en la estación E-2 es de $0.14 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con dirección preferencial al sureste y en mareas muertas el flujo neto es de $0.07 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con dirección preferencial al noroeste.

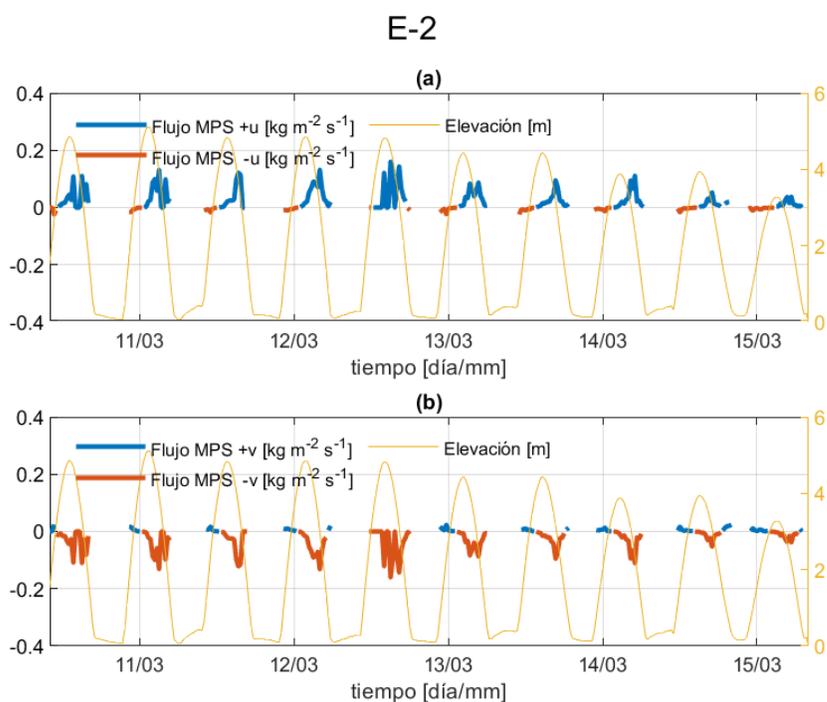


Figura 24. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 08:01 hrs. de la estación E-2. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de *u* y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de *v* y la elevación.

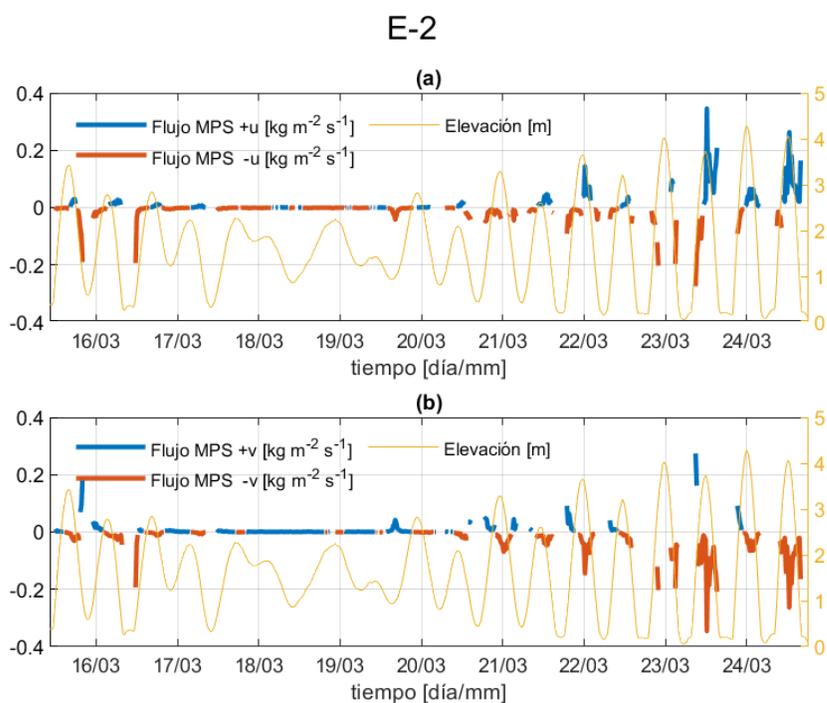


Figura 25. Serie de tiempo correspondiente a los días del 15 de marzo a las 10:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 19:30 hrs de la estación E-2. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de *u* y la elevación. (b) Flujos *MPS* positivos y negativos de la velocidad *v* y la elevación.

3.5. Implementación del modelo GETM en las planicies de marea del Alto Golfo de California

Se realizó la implementación del modelo GETM en las planicies de marea con forzamientos de marea, viento, oleaje débil e intenso. El intercambio de volumen de agua V_p entre los ciclos de marea de las planicies de marea corresponde al 5 % del dominio estudiado, lo que corresponde a $2.149 \times 10^8 \text{ m}^3$.

3.5.1. Implementación con oleaje débil

En la figura 26 podemos observar que la elevación del nivel del mar y las velocidades zonales y meridionales obtenidas por el modelo se resuelven de manera aceptable en comparación con las observaciones. El modelo resuelve mejor en mareas vivas que en mareas muertas pero hay una subestimación de las velocidades que se aprecia mejor en la rapidez. Aunque el comportamiento de la rapidez se logra reproducir, la magnitud modelada es menor en aproximadamente 0.1 m s^{-1} en mareas vivas.

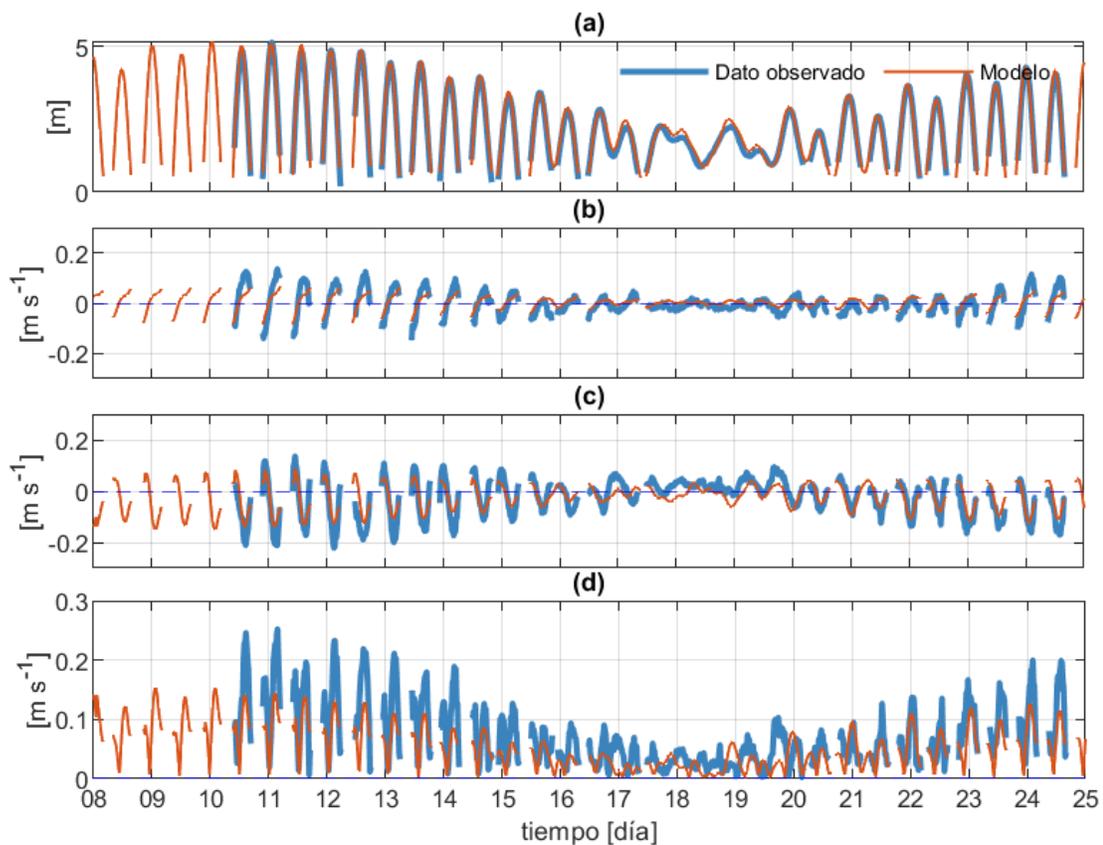


Figura 26. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los resultados del modelo forzado con oleaje débil, mareas y viento comparado con las observaciones. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Velocidades zonales. (c) Velocidades meridionales, (d) Rapidez.

En la figura 27 observamos que cuando en el modelo se usa oleaje débil, las concentraciones de *MPS* modeladas y observadas se acoplan y tienen el mismo comportamiento, podemos notar un patrón al inicio de pleamares y finales de bajamares cuando los valores de *MPS* son altos. En el caso de *TKE* y τ_{bm} se presentan los valores mas altos al principio de pleamares, finales de bajamares y en el punto máximo de la elevación del mar. Al aumentar el valor del esfuerzo cortante del fondo, también aumentan las magnitudes de la *TKE* y la concentración de *MPS*. Sin embargo cuando se alcanza el nivel máximo de elevación disminuye *MPS*. Aunque en general el comportamiento de las tres variables es capturado por el modelo, las magnitudes se subestiman y en el caso de la *TKE* es de tres órdenes de magnitud.

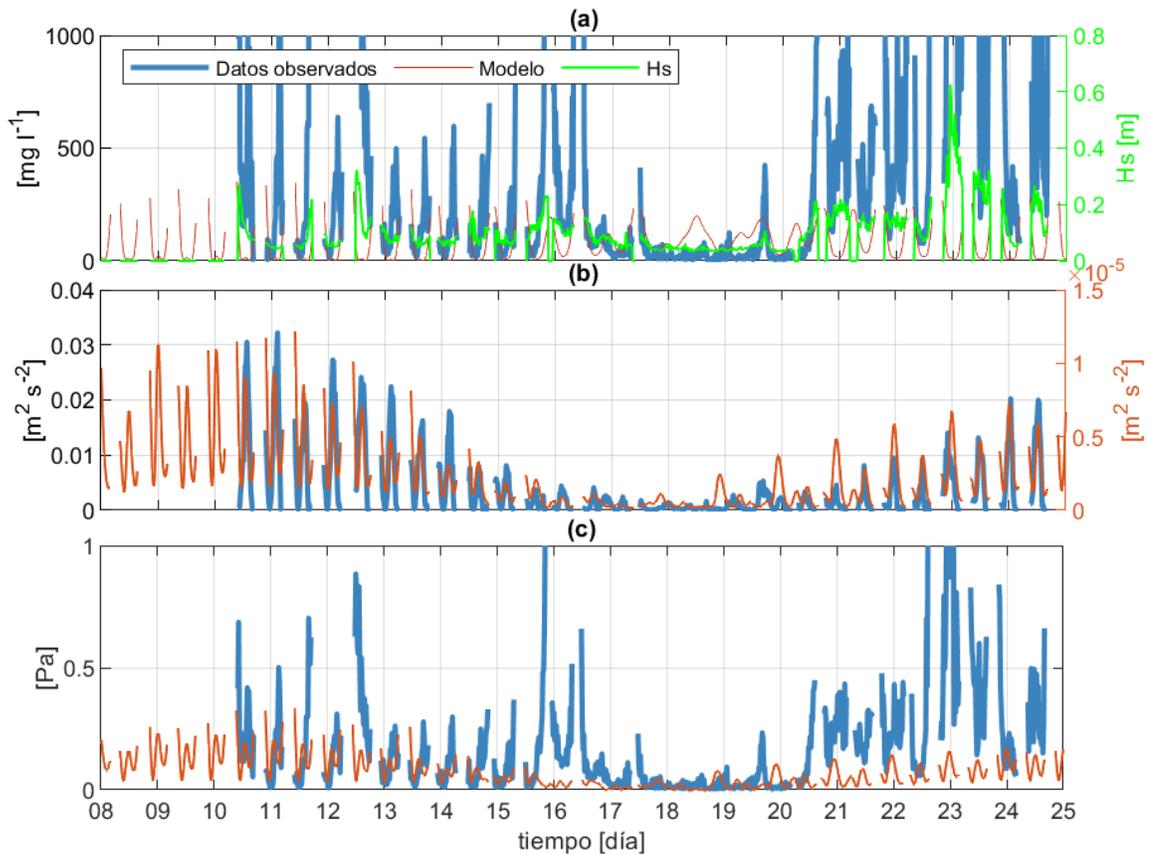


Figura 27. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los datos observados con los resultados del modelo forzado con oleaje débil, mareas y viento. (a) Materia particulada en suspensión (*MPS*) junto con altura significativa (*Hs*). (b) Energía cinética turbulenta (*TKE*) de la capa más cercana al fondo marino. (c) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}).

En la figura 28 se muestran resultados del modelo para el esfuerzo y transporte de sedimento cerca del fondo, así como para la suma de los cinco niveles en la vertical del *MPS*. Los valores del esfuerzo cortante del fondo son más altos al principio de las pleamares, en el punto más alto del nivel del mar y

a finales de las bajamares. Los valores más altos de la MPS ocurren solo al principio de las pleamares y finales de bajamares. Los flujos de masa en la capa de intercambio representan una aproximación al transporte vertical, estos tienen valores negativos al principio de las pleamares y finales de bajamares y positivos entre estos intervalos. Este comportamiento se observa mejor en mareas vivas mientras que en mareas muertas no se presenta con claridad este efecto. El promedio del flujo de masa en la capa de intercambio en un periodo semidiurno durante mareas vivas en las planicies de marea del dominio estudiado es de $-0.0308 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y en mareas muertas con un oleaje débil se encontró que el promedio del flujo de masa en la capa de intercambio en un periodo semidiurno es de alrededor de $-0.0543 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, al igual que en mareas vivas, existe erosión y es mayor en mareas muertas.

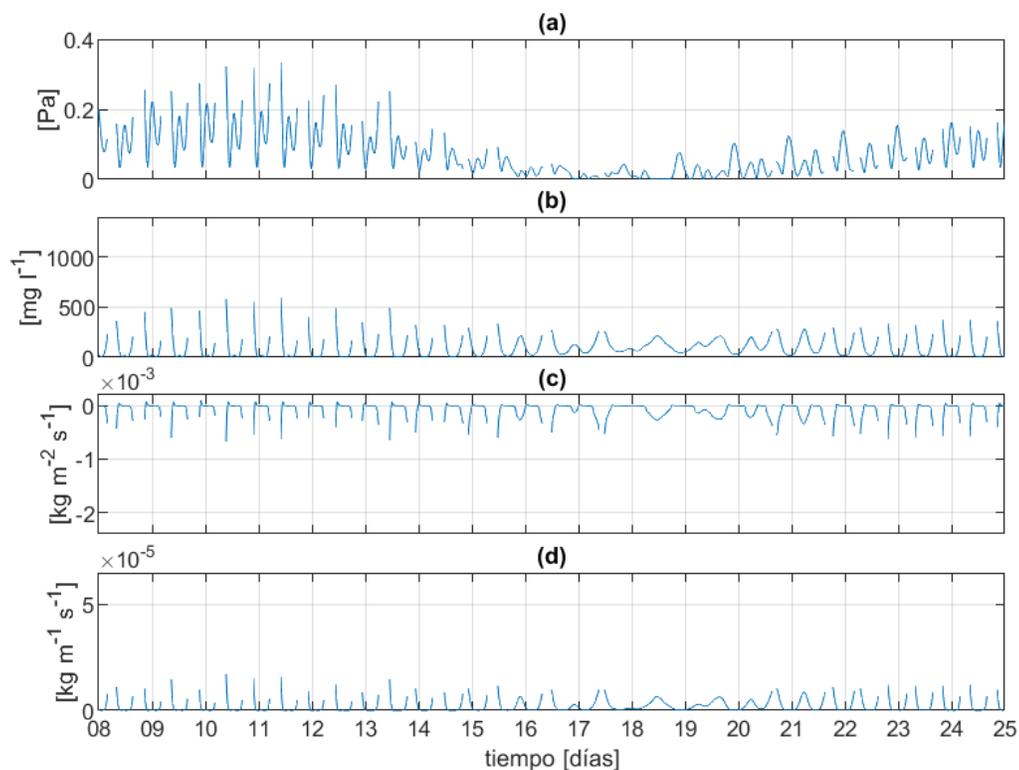


Figura 28. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de los resultados del modelo de la estación E-2 con el forzante de oleaje débil, mareas y viento. (a) Se muestran datos de del esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}), (b) datos de la suma de las 5 sigmas de la columna de agua de la materia particulada en suspensión (MPS), (c) flujo de masa en la capa de intercambio, (d) carga del fondo de la materia particulada en suspensión.

El transporte de sedimento por la carga del fondo es mayor a inicios de pleamares y disminuye notablemente al final de bajamares. Durante mareas vivas se alcanzan valores máximos de carga de fondo de $1.715 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y un promedio durante un ciclo semidiurno en mareas vivas de $4.0476 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y en mareas muertas de $3.8916 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Para observar mejor la comparación entre las observaciones y los resultados del modelo, la figura 29 muestra un acercamiento, éste se eligió porque pertenece a un ciclo durante mareas vivas con un oleaje débil. Podemos ver que tanto las elevaciones, como las velocidades zonales y la TKE tienen el mismo comportamiento aunque para ésta última la magnitud es mucho más baja. En el caso de la MPS y del esfuerzo cortante del fondo es únicamente durante la primera mitad del ciclo semidiurno, durante la pleamar, que el comportamiento de las observaciones se reproduce de forma aceptable.

En la figura 30 se muestra el mismo tipo de acercamiento para un periodo de mareas muertas. Aunque las elevaciones tienen el mismo comportamiento, es notable un ligero desfase temporal y una pequeña sobrestimación de la magnitud observada de un máximo de aproximadamente 0.25 m . En contraste, el modelo subestima las velocidades zonales y meridionales. Sin embargo, en la primera el comportamiento se reproduce adecuadamente y en la segunda solo durante la mitad del ciclo semidiurno. Los resultados del modelo en el caso del esfuerzo cortante del fondo fueron completamente opuestos. Mientras los máximos del esfuerzo cortante de las observaciones se presentaron al principio y final del ciclo, en el modelo resultaron valores muy bajos. Por el contrario, a la mitad del ciclo las observaciones del esfuerzo cortante del fondo fueron bajas y en el modelo se presentó un ligero aumento. A pesar de estos resultados para el esfuerzo cortante del fondo, el comportamiento de TKE y la concentración de MPS se modeló de manera aceptable. En el caso de la TKE la diferencia en órdenes de magnitud antes mencionada prevaleció, pero la magnitud de MPS resultó ligeramente por arriba de las observaciones.

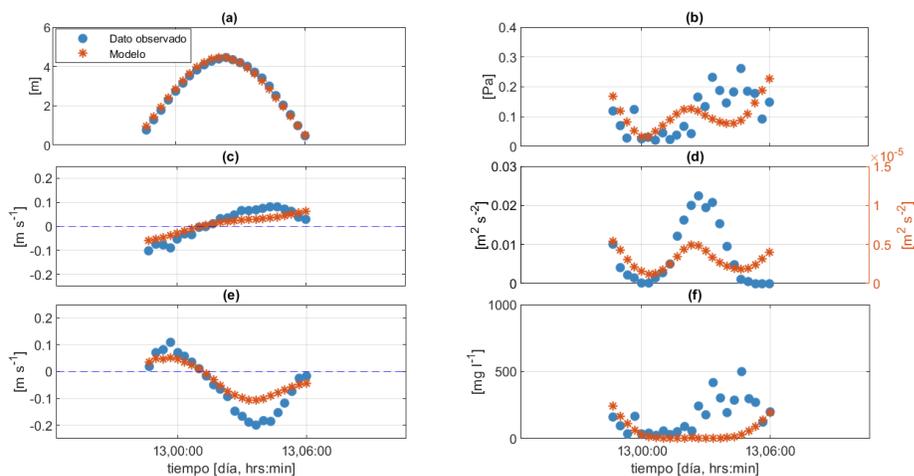


Figura 29. Serie de tiempo de las 19:40 hrs del 12 de marzo del 2009 a las 8:40 hrs del 13 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas vivas. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje débil, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). (c) Velocidad zonal (u). (d) Energía cinética turbulenta (TKE). (e) Velocidad meridional (v). (f) Materia particulada en suspensión (MPS).

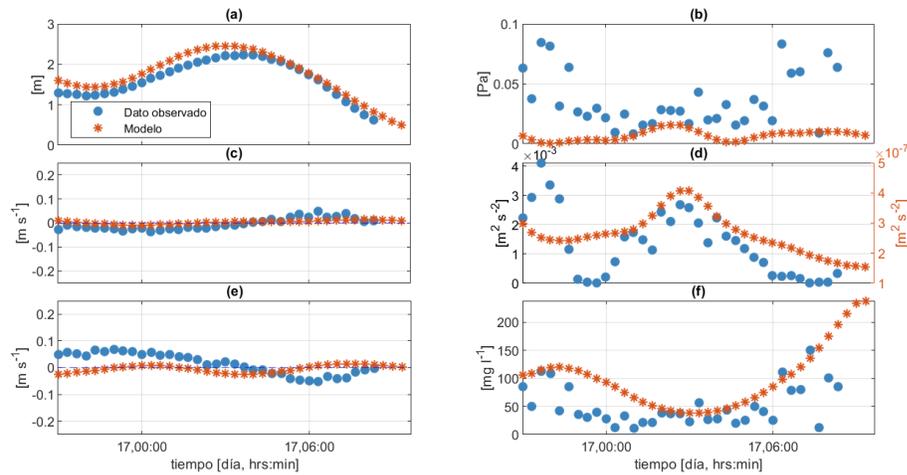


Figura 30. Serie de tiempo de las 21:00 hrs del día 16 de marzo del 2009 a las 09:40 hrs del 17 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas muertas. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje débil, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}). (c) Velocidad zonal (u). (d) Energía cinética turbulenta (TKE). (e) Velocidad meridional (v). (f) Materia particulada en suspensión (MPS).

3.5.2. Implementación con oleaje intenso

En esta sección se presentan los resultados de la modelación numérica tomando en cuenta oleaje intenso. En la figura 31 las elevaciones, la rapidez, las velocidades zonales y meridionales, al igual que los resultados modelados con oleaje débil, capturan el comportamiento observado excepto en mareas muertas. En general, el modelo subestima la magnitud de las velocidades por lo tanto también en la rapidez y hay diferencia en comparación con los resultados modelados con oleaje débil.

En la figura 32 se muestra que existen mayores valores de MPS debido al mayor efecto del oleaje, pero conserva el mismo comportamiento que con un oleaje débil. Los valores del esfuerzo cortante del fondo y de TKE también son mayores con oleaje intenso que con oleaje débil aunque no en la magnitud en la que se incrementó el MPS . A principios de pleamares y finales de bajamares se encuentran los valores más altos de MPS , TKE y esfuerzo cortante del fondo. También, en el punto máximo de elevación de cada periodo semidiurno existen valores máximos junto con los nombrados anteriormente en la TKE y el esfuerzo cortante del fondo. En mareas muertas se observa que hay un ligero desfase en la TKE con las observaciones.

De igual forma que para la situación con oleaje débil, la figura 33 muestra la suma de concentración de MPS en la columna de agua y los valores cerca del fondo del flujo de masa en la capa de intercam-

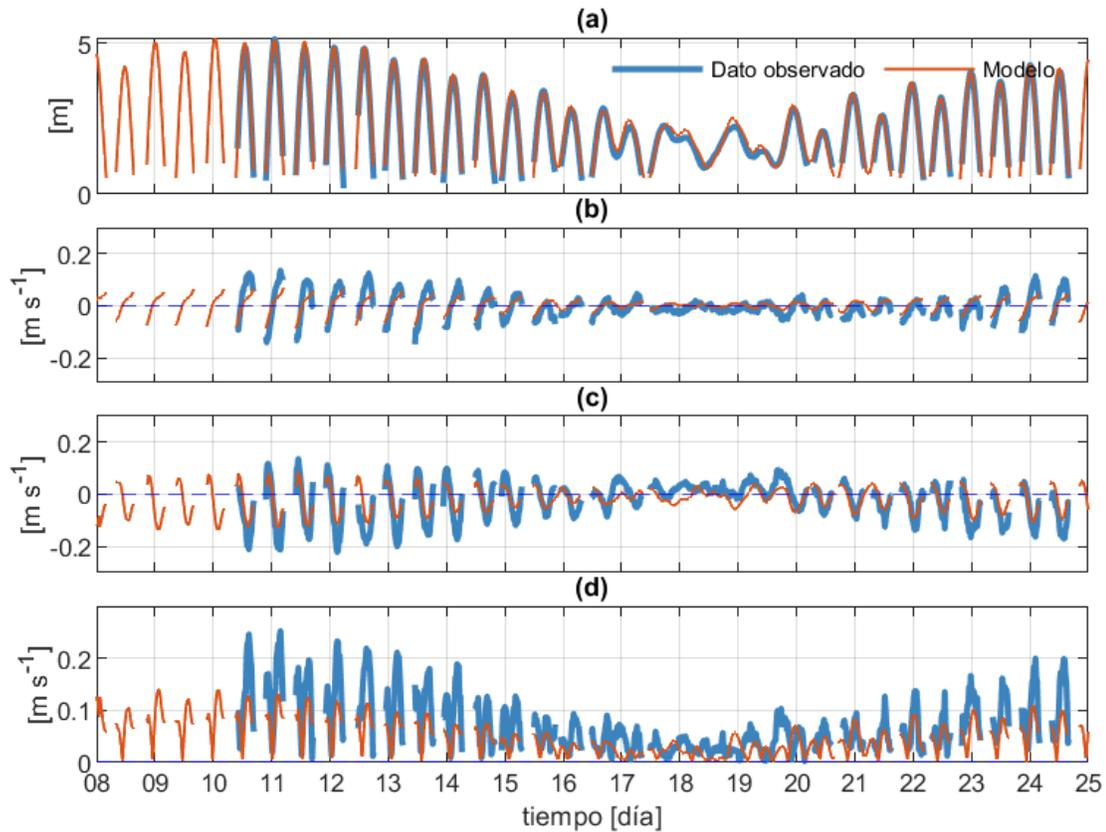


Figura 31. Series de tiempo del 8 al 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los resultados del modelo forzado con oleaje intenso, mareas y viento comparado con las observaciones. (a) Elevación del nivel del mar. (b) Velocidades zonales. (c) Velocidades meridionales. (d) Rapidez.

bio, la carga de fondo de materia particulada y el esfuerzo cortante del fondo. Los valores del esfuerzo cortante del fondo son más altos al principio de las pleamares, tal y como lo observamos con oleaje débil. Los valores del Flujo de masa en la capa de intercambio en pleamares muestran que existe erosión al principio, luego depósito y en bajamares erosión. En un periodo semidiurno con oleaje intenso durante mareas vivas en las planicies de marea del dominio implementado hay un promedio de flujo de masa en la capa de intercambio de $-0.0583 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo que significa que existe erosión. También podemos notar que en el caso de mareas vivas con oleaje débil e intenso, al inicio de las pleamares hay depósito y a finales erosión, después sigue el depósito en bajamares dando lugar a un comportamiento cíclico. La carga de fondo alcanza valores máximos a principios y finales de pleamares y bajamares respectivamente con un valor máximo de $3.3 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y un promedio en un periodo semidiurno durante mareas vivas de $1.7 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

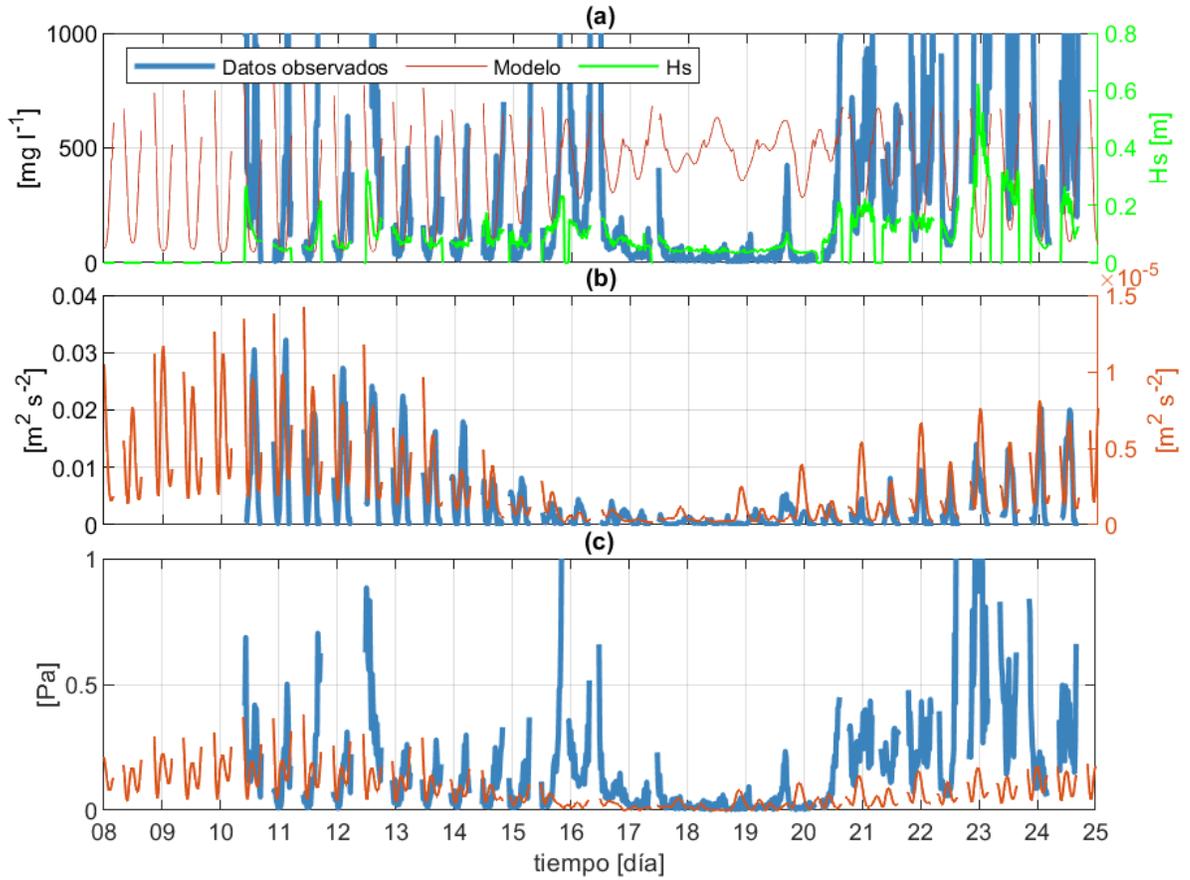


Figura 32. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de la estación E-2 de los datos observados con los resultados del modelo forzado con oleaje intenso, mareas y viento. (a) Materia particulada en suspensión (MPS) junto con altura significativa (H_s). (b) Energía cinética turbulenta (TKE) de la capa más cercana al fondo marino. (c) Esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}).

En la figura 34 se realizó un acercamiento al igual que con el oleaje débil, éste se eligió porque tiene oleaje intenso en el periodo de mareas vivas. Observamos que tanto las elevaciones, como las velocidades meridionales y zonales y TKE son muy parecidos a los datos observados. Al igual que con oleaje débil el modelo subestima los valores de TKE observados. La variabilidad del esfuerzo cortante del fondo y MPS modelada es muy diferente a la de los datos observados, pero los rangos son similares a las observaciones.

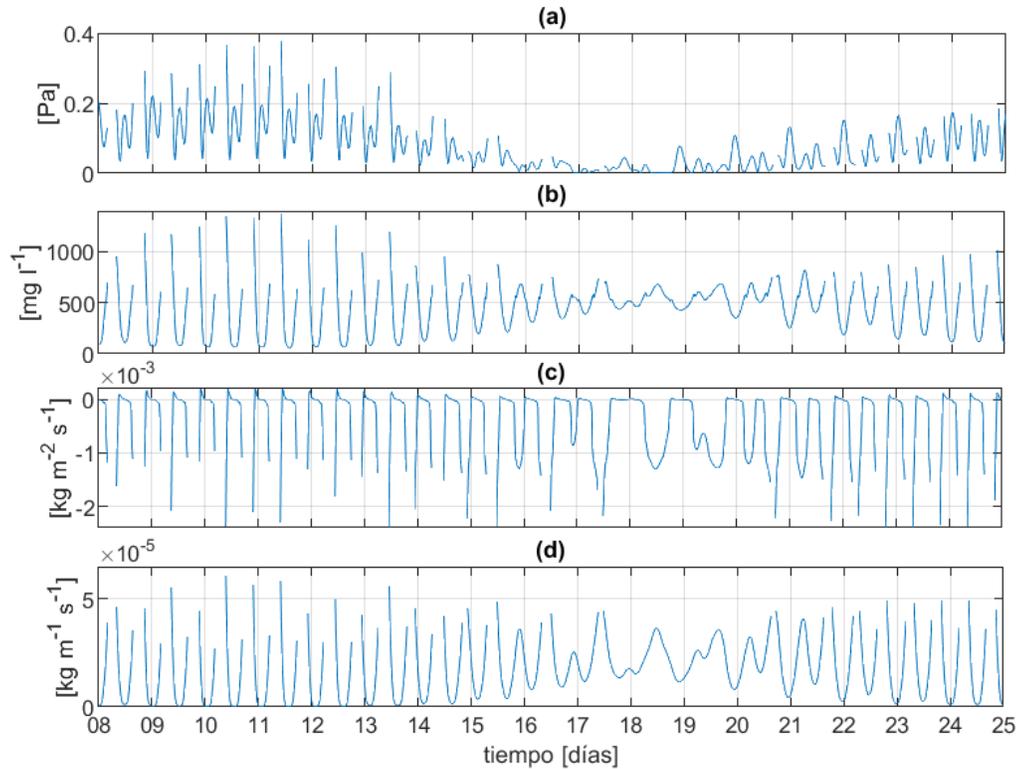


Figura 33. Series de tiempo del día 8 de marzo al día 25 de marzo del 2009 de los resultados del modelo de la estación E-2 con el forzante de oleaje intenso, mareas y viento. (a) Se muestran datos de del esfuerzo cortante del fondo (τ_{bm}), (b) datos de la suma de las 5 sigmas de la columna de agua de la materia particulada en suspensión (MPS), (c) flujo de masa en la capa de intercambio, (d) carga del fondo de la materia particulada en suspensión.

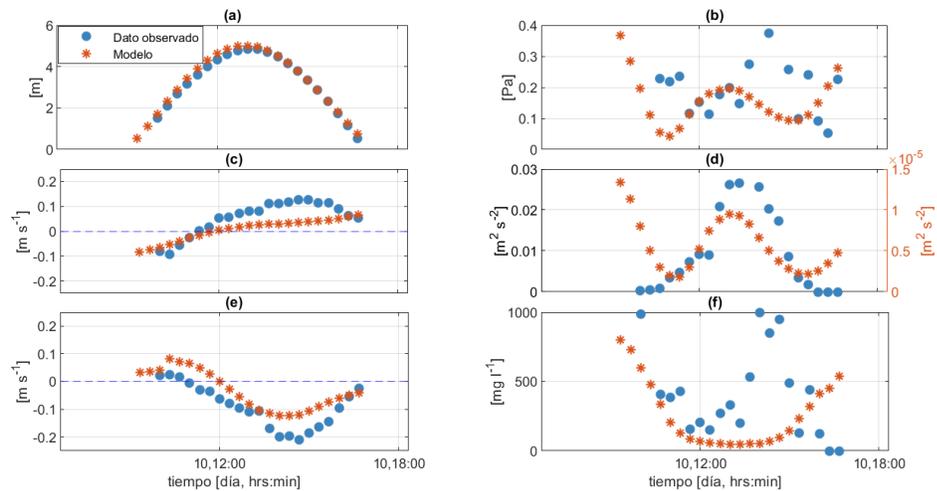


Figura 34. Serie de tiempo correspondiente a las 06:40 hrs a las 18:20 hrs del 10 de marzo del 2009 correspondiente a un periodo semidiurno en mareas vivas con oleaje intenso. Se comparan los resultados del modelo bajo los forzamientos de oleaje intenso, viento y mareas con los datos observados. (a) Elevación del nivel del mar, (b) esfuerzo cortante del fondo (τ_{bo} y τ_{bm}), (c) Velocidad zonal (u), (d) Energía cinética turbulenta (TKE). (e) Velocidad meridional (v). (f) Materia particulada en suspensión (MPS). Las escalas se han modificado respecto a la figura 29.

En la tabla 4 se muestran las correlaciones obtenidas entre los resultados del modelo y las observaciones. El modelo resolvió muy bien la elevación del nivel del mar. Las velocidades zonales y meridionales también se resolvieron satisfactoriamente, pero para el caso de la rapidez en mareas muertas se tiene una correlación baja tal y como se observa en la figura 26, donde el comportamiento del modelo en mareas muertas es distinto al de las observaciones. Para el esfuerzo cortante del fondo hay una correlación baja, sin embargo la *TKE* y la *MPS* muestran una correlación más alta. El modelo no calcula con las mismas magnitudes la *TKE*, sin embargo los resultados obtenidos tienen un comportamiento muy parecido con una correlación de 0.72 en mareas vivas con oleaje débil, de 0.69 en mareas vivas y con oleaje intenso y 0.81 en mareas muertas con oleaje débil.

Tabla 4. Correlaciones entre las observaciones realizadas en las planicies de marea y el modelo GETM durante mareas muertas, mareas vivas con oleaje débil e intenso.

| | Correlación en mareas vivas | | Correlación en mareas muertas |
|-------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------------|
| | Oleaje intenso | Oleaje débil | Oleaje débil |
| Elevación en el nivel del mar | 0.99 | 0.99 | 0.97 |
| Velocidad u | 0.88 | 0.95 | 0.94 |
| Velocidad v | 0.93 | 0.98 | 0.74 |
| Rapidez | 0.74 | 0.93 | -0.03 |
| Esfuerzo cortante del fondo | -0.18 | 0.37 | -0.07 |
| <i>TKE</i> | 0.69 | 0.72 | 0.81 |
| <i>MPS</i> | 0.63 | 0.77 | 0.27 |

Capítulo 4. Discusiones y conclusiones

4.1. Discusiones

En este trabajo se abordó la caracterización del transporte de sedimentos de las planicies de marea del AGC. A partir de la granulometría obtenida se observa que tanto sedimento cohesivo (limos gruesos y limos medios) y no cohesivo (arenas muy finas y arenas finas) son abundantes en las planicies de marea del AGC, mientras que Alvarez-Borrego (2001) menciona que en el oeste del AGC el tamaño de granulometría que predomina son las arcillas. Dado su importancia de los resultados del tamaño de grano obtenidos, es de gran interés implementar diferentes tipos de sedimento en el modelo con el fin de que se obtengan valores más semejantes a la realidad. Se observó que en mareas muertas hay un mayor porcentaje de arenas muy finas, arenas finas y arenas medias comparado con mareas vivas y medias, esto probablemente debido a que el fondo marino está más expuesto a que exista mayor *MPS* de mayor granulometría.

Los perfiles de velocidad de corriente mostraron ser homogéneos espacialmente en la columna del tirante de agua. Sobre los cambios temporales se puede observar que los cambios de signo de las velocidades zonales y meridionales coinciden con el flujo y reflujo de la corriente de marea. En los perfiles de velocidad presentaron dirección noroeste-sureste durante flujo y reflujo de la corriente de marea, respectivamente. Se presenta una magnitud mayor de casi el doble en la velocidad meridional durante el reflujo en mareas vivas esto posiblemente porque durante invierno la dirección del viento tiende a ir al sur, pero más importante para la asimetría de las velocidades es la deformación de la onda de marea al llegar a aguas someras y esto contribuye a que sea mucho mayor la velocidad. En bajamares se presenta una mayor concentración de *MPS* que en pleamares, este mismo comportamiento se presenta en distintos estudios en planicies de marea de diferentes partes del mundo, como por ejemplo: Shi et al. (2019) y Guo et al. (2018).

Además, en la velocidad del viento, mostrado en la figura 11, a mediados del día 12 se observa un pico en la velocidad y se ve reflejado también en la figura 16 donde no hay velocidad positiva meridional y a la vez aumenta la erosión del sistema de reflujo dominante. En el estudio de Guo et al. (2018) se llevaron a cabo observaciones en entornos de planicies de marea con zonas de inundado y secado y con tormentas esporádicas durante la serie de tiempo estudiada, se observó el mismo fenómeno de la casi anulación en este caso de la velocidad meridional positiva como consecuencia de periodos de tiempo con viento de magnitud alta. Sobre la relación entre *TKE* y la concentración de *MPS*, se aprecia que hay

mayor resuspensión de sedimento al alcanzar TKE valores mayores de $0.02 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (figuras 20 y 21). También, el MPS aumenta significativamente con respecto a un valor crítico de H_s de 0.2 m (figuras 22 y 23).

En los resultados y como era de esperarse observamos que entre mayor sea el oleaje mayor es la resuspensión de sedimentos. Mariotti y Fagherazzi (2013), en un estudio en las planicies de marea de la Costa del Atlántico Medio de los Estados Unidos, encontraron valores de concentración de MPS de $20 - 900 \text{ mg l}^{-1}$ mientras que en los datos observados en este estudio hay un rango de valores de $5 - 1000 \text{ mg l}^{-1}$. Aunque ambos rangos son semejantes también se pueden encontrar diferentes magnitudes de MPS con similares condiciones hidrodinámicas. Por ejemplo, MacVean y Lacy (2014) encontraron concentraciones de hasta 2000 mg l^{-1} con altura significativa de oleaje de 0.5 m . En el presente trabajo también se registró oleaje de esa magnitud e incluso mayor. La diferencia de concentración puede deberse al tipo de sedimento. Aunque esto no se reportó en el estudio de MacVean y Lacy (2014), podemos suponer que el sedimento es mas fino y por lo tanto habrá mayor resuspensión en condiciones similares de esfuerzo sobre el fondo

Con base en los resultados del modelo con respecto al flujo de masa en la capa horizontal de intercambio se interpreta que existe erosión. En presencia de oleaje intenso en mareas vivas el promedio es de $-0.583 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Para el caso de oleaje débil el promedio es de $-0.0308 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $-0.0543 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en mareas vivas y mareas muertas respectivamente, por lo tanto con los datos modelados se infiere que la pérdida de sedimento ocurre con mayor magnitud con oleaje intenso. El esfuerzo cortante debido al oleaje es un factor importante debido a que al aumentar, también se incrementa la concentración de MPS y la erosión. Zhu et al. (2014), en un estudio de procesos sedimentarios de las planicies de marea en China determinaron que el oleaje tuvo una influencia mayor para la erosión. Durante mareas vivas con oleaje intenso es mayor el flujo de masa en la capa de intercambio, pero muy parecido el promedio al caso de mareas muertas con oleaje débil. Esto puede ser resultado de que en mareas muertas el nivel del mar se mantiene alrededor del promedio. En estas condiciones los niveles mas bajos no son suficientes para dejar seca la planicie y los niveles mas altos tampoco se alejan mucho del fondo. Por lo tanto, es posible que oleaje débil produzca erosión de forma continua y comparable con la de mareas vivas como se observa en la figura 28. Para estimar el intercambio de material particulado en suspensión entre las planicies y el AGC se seleccionó del domino del modelo un transecto latitudinal (paralelo a la línea de costa) correspondiente a la longitud 114.8496° W . Para todo el transecto se calculó la cantidad de masa de sedimento por metro, promediada en un ciclo semidiurno durante mareas vivas y conservando la dirección de la corriente y se obtuvo un valor de 0.32 kg con dirección noroeste. La dirección concuerda

con las pleamares de las observaciones, pero no con el flujo neto durante un periodo semidiurno. Sin embargo, el valor obtenido es bajo si se tiene en cuenta que representa un transecto de 28 *km* de paralelos a la línea de costa. Esto puede significar que el intercambio entre las planicies y el AGC está muy cerca del equilibrio.

Montes et al. (2015) señalan que en invierno el viento en el AGC es dirección sureste y en verano al noroeste, ocasionando una circulación residual ciclónica en verano y anticiclónica más débil en invierno. Con base en esos resultados, es muy probable que en otra época del año cambie el régimen de transporte de sedimento. En este trabajo se encontró erosión de las planicies y corresponde a invierno. Se puede suponer que, durante el verano, cuando la circulación residual ciclónica es importante, el transporte de sedimento hacia las planicies se incrementa y se recuperen de la erosión de invierno. Para obtener una mejor aproximación se tendría que modelar numéricamente durante otra estación del año, incluir el forzamiento del viento y aumentar la escala temporal para corroborar si existe un balance sedimentario durante el periodo anual.

El modelo resolvió con una alta correlación en el periodo de mareas vivas con oleaje intenso y débil las variables estudiadas, a excepción del esfuerzo cortante del fondo. En mareas muertas no se tiene alta correlación en las variables de *MPS*, rapidez y esfuerzo cortante del fondo, probablemente a falta de una batimetría más fina.

Una limitante de este proyecto fue la batimetría. La batimetría con la que se trabajó tiene una resolución de ~ 312 *m* en la longitud y en la latitud de ~ 316 *m*. Sin embargo, la batimetría disponible no tiene la resolución de las barras de arena de las planicies de marea que se pueden observar en la figura 35, estas barras se comportan de una manera compleja y adicionalmente podrían cambiar su ubicación debido a los cambios estacionales. Por lo tanto, si se tuviera una batimetría con mejor resolución se podría obtener el comportamiento de las barras, cuánto se mueven y cómo interactúan con el sedimento. Por otro lado se podría obtener más exactitud sobre todas las variables estudiadas como lo son τ_{bm} , *TKE* y la concentración de *MPS* con mediciones de largo periodo de granulometría, velocidades cerca del fondo así como en un perfil y concentración de *MPS*. Al final se obtendría una mejor aproximación del flujo de masa en las planicies de marea del AGC.



Figura 35. Planicies de marea en San Felipe, Baja California. Foto: Luis Gustavo Álvarez.

Además con una batimetría más fina se podría realizar una estimación cuantitativa de una profundidad límite, que separa una condición de erosión de una no erosión. En el caso de que sí exista erosión durante periodos anuales se recomienda que se delimite el área erosionada como lo han realizado varios autores (Petti et al. 2019, Reed et al. 2018) para un mejor cuidado de la zona y mantener las planicies de marea porque son de gran importancia como lo menciona Miththapala (2013).

4.2. Conclusiones

(1) Se identificó que en mareas vivas y con un oleaje intenso existe una mayor erosión de sedimento, también hay un depósito significativo en mareas vivas y con un oleaje débil. Con oleaje débil se observó que en mareas muertas el flujo de masa en la capa de intercambio es mayor que en mareas vivas. Se identificó en general que bajo las condiciones de oleaje intenso o débil a principios de las pleamares hay erosión, finales del mismo hay depósito y en bajamares de nuevo hay erosión.

(2) Dentro del periodo de estudio de 15 días en un área delimitada y estudiada de las planicies de marea del AGC se identificó que el forzamiento principal para el sentido de las velocidades es el de las corrientes de mareas. Si comparamos los datos durante mareas vivas con oleaje débil e intenso (figuras 28, 29, 33 y 34) podemos observar una notable diferencia en el aumento de concentración de *MPS* así como el flujo de masa en la capa de intercambio con el oleaje intenso, así se puede concluir que el viento es el principal forzamiento para que exista la resuspensión de sedimentos. El forzamiento de oleaje intenso llega a aumentar aproximadamente el doble la concentración de *MPS*, cuatro veces más el flujo de masa en la capa de intercambio vertical, la carga de fondo de materia particulada es hasta cinco veces mayor.

(3) Por medio del modelo se calculó que durante la serie de tiempo estudiada correspondiente a invierno el flujo de masa en la capa de intercambio las planicies de marea hay mayor erosión que depósito con oleaje intenso o débil. En las observaciones al igual que en el modelo se aprecia que la corriente de marea tiene una dirección preferencial de sureste al noroeste en las planicies de marea y con el modelo se observó que también tiene este comportamiento en la zona más profunda del mar del dominio de las planicies estudiada. El intercambio de materia particulada en suspensión en un periodo semidiurno en mareas vivas a lo largo de un transecto paralelo a la línea de costa fue de 0.32 kg con dirección al noroeste y parece existir un equilibrio en el intercambio de sedimentos entre las planicies de marea y el AGC con base en los resultados del modelo.

Literatura citada

- Alvarez, L.. 2010. Características de la capa límite del fondo en el Alto Golfo de California a partir de perfiles de velocidad. *Ciencias Marinas*, 36(3), pp. 285–299.
- Alvarez, L. y Jones, S.. 2001. Factors influencing suspended sediment flux in the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1(54), pp. 747–759.
- Alvarez, L. y Jones, S.. 2004. Short-term observations of suspended particulate matter in a macro-tidal inverse estuary: The Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 20(3), pp. 645–654.
- Alvarez, L., Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., y González-Escobar, M.. 2009. Bathymetry and active geological structures in the Upper Gulf of California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61(1), pp. 129–141.
- Alvarez-Borrego, S.. 2001. *The Colorado River Estuary and Upper Gulf of California, Baja, Mexico*. Springer-Verlag.
- Brusca, R., Álvarez Borrego, S., Hastings, P., y Findley, L.. 2017. Colorado river flow and biological productivity in the northern Gulf of California, Mexico. *Earth-Science Reviews*, 1(164).
- Burchard, H. y Bolding, K.. 2002. GETM, a general estuarine transport model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1(23237).
- Carriquiry, J. y Sánchez, A.. 1999. Sedimentation in the Colorado river delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics*, 158(1-4), pp. 125–145.
- CONANP-SEMARNAT. 2007. Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. CONANP.
- DOF. 1993. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región conocida como Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, ubicada en aguas del Golfo de California y los municipios de Mexicali, BC, de Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado, Son. Gobierno de México.
- Erofeeva, S., Padman, L., y Howard, S. L.. 2020. Tide Model Driver (TMD) version 2.5, toolbox for Matlab. GitHub.
- Folk, R.. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Diesel Eng Schools.
- Gordon, L. y Lohrmann, A.. 2001. Near-shore doppler current meter wave spectra. ocean wave measurement and analysis. *Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, 1, pp. 33–43.
- Guo, C., He, Q., Van Prooijen, B., Guo, L., Manning, A., y Bass, S.. 2018. Investigation of flocculation dynamics under changing hydrodynamic forcing on an intertidal mudflat. *Marine Geology*, 395(1), pp. 120–132.
- Julien, P.. 1998. *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press.
- Krone, R. B.. 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory. University of California, Berkeley.
- Lohrmann, A., Cabrera, R., y Kraus, N.. 1994. *Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use*. ASCE Library.

- MacVean, L. y Lacy, J.. 2014. Interactions between waves, sediment, and turbulence on a shallow estuarine mudflat. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, pp. 1534–1553.
- Mariotti, G. y Fagherazzi, S.. 2013. Critical width of tidal flats triggers marsh collapse in the absence of sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, pp. 5353 – 5356.
- Meckel, L.. 1975. Holocene sand bodies in the Colorado delta area, northern Gulf of California. In: Broussard MC (ed) *Deltas, models for exploration*, 9(68), pp. 239–265.
- Miththapala, S.. 2013. *Tidal Flats*. IUCN, Sri Lanka Country Office.
- Montes, J., Lavín, M., y Páres-Sierra, A.. 2015. Seasonal heat and salt balance in the Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 32(4), pp. 853–862.
- Nava-Sanchez, E., Miranda-Avilés, R., Bourrouilh, R., y Murillo-Jiménez, J.. 2004. Sedimentación reciente en las márgenes de un rift asimétrico: el Golfo de California, México. *GEOS*, 24(2), pp. 367–368.
- Petti, M., Pascolo, S., Bosa, S, B. A., y Fontolan, G.. 2019. Tidal flats morphodynamics: A new conceptual model to predict their evolution over a medium-long period. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11(6), pp. 1–22.
- Prandle, D.. 2009. *Dynamics, mixing, sedimentation and morphology*. Cambridge University Press.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W., y Flannery, B. P.. 1992. *Numerical recipes in C : the art of scientific computing*. Cambridge University Press.
- Reed, D., van Wesenbeeck, B., Herman, P., y Meselhe, E.. 2018. Tidal flat-wetland systems as flood defenses: Understanding biogeomorphic controls. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213(1), pp. 269–282.
- Rubey, W. W.. 1933. Settling velocity of gravel, sand, and silt particles. *American Journal of Science*, s5-25(148), pp. 325–338.
- Santa Rosa del Río, M. A., Ávila Serrano, G. E., Téllez-Duarte, M. A., Gonzalez-Yajimovich, O., y Cupul-Magaña, L. A.. 2011. Distribución y abundancia de tanatocenosis de foraminíferos bentónicos submareales en el delta del río Colorado. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), pp. 445–45.
- Shi, B., Cooper, J. R., Li, J., Yang, Y., Yang, S. L., Luo, F., Yu, Z., y Wang, Y. P.. 2019. Hydrodynamics, erosion and accretion of intertidal mudflats in extremely shallow waters. *Journal of Hydrology*, 573, pp. 31–39.
- Shu, G.. 2019. *Coastal Wetlands*. Elsevier.
- Soulsby, R. L.. 1997. *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications*. Telford Publications.
- Soulsby, R. L. y Clarke, S.. 2005. *Bed shear-stresses under combined waves and currents on smooth and rough beds*. HR Wallingford.
- Thompson, R.. 1968. *Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, Northwestern Gulf of California*. The Geological Society of America.
- Valencia, F.. 2009. *Observación del esfuerzo crítico de erosión en una planicie intermareal del Alto Golfo de California*. Instituto Politécnico Nacional.

- Van Rijn, L.. 1984. Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), pp. 1431–1456.
- Yang, J. Q. y Nepf, H. M.. 2018. A turbulence-based bed-load transport model for bare and vegetated channels. *Geophysical Research Letters*, 45(10), pp. 428–10,436.
- Yang, Z. y Hamrick, J.. 2003. Variational inverse parameter estimation in a cohesive sediment transport model: An adjoint approach. *Journal of Geophysical Research*, 108(C2), pp. 37–47.
- Zhu, Q., Yang, S., y Ma, Y.. 2014. Intra-tidal sedimentary processes associated with combined wave–current action on an exposed, erosional mudflat, southeastern Yangtze River Delta, China. *Marine Geology*, 347, pp. 95–106.

Anexo

.1. Obtención de datos

.1.1. Datos de mar90901.vec

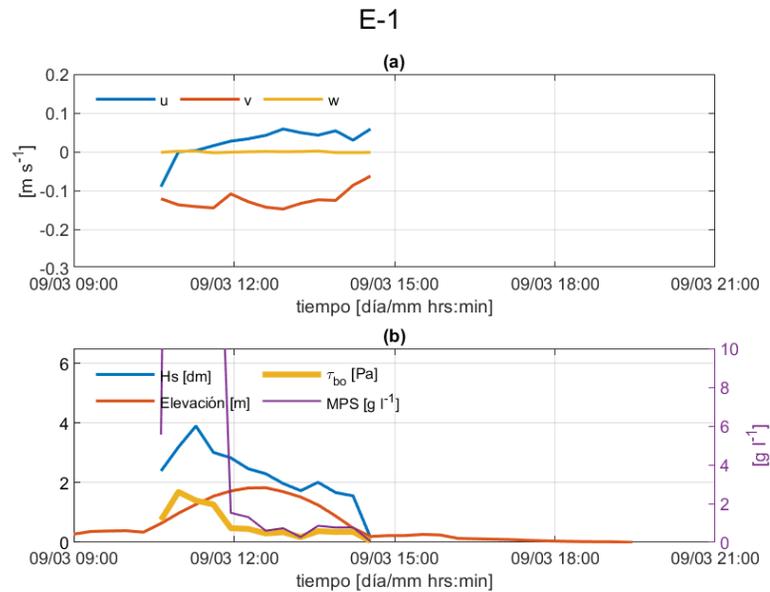


Figura 36. Serie de tiempo correspondiente al día 9 de marzo del 2009 a las 9 hrs al 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (H_s) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

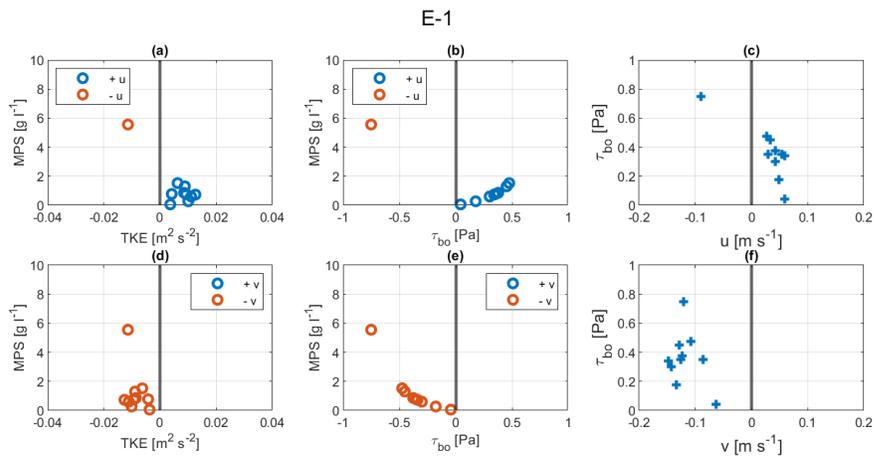


Figura 37. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 al día 9 de marzo del 2009 a las 9:00 hrs al 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} .

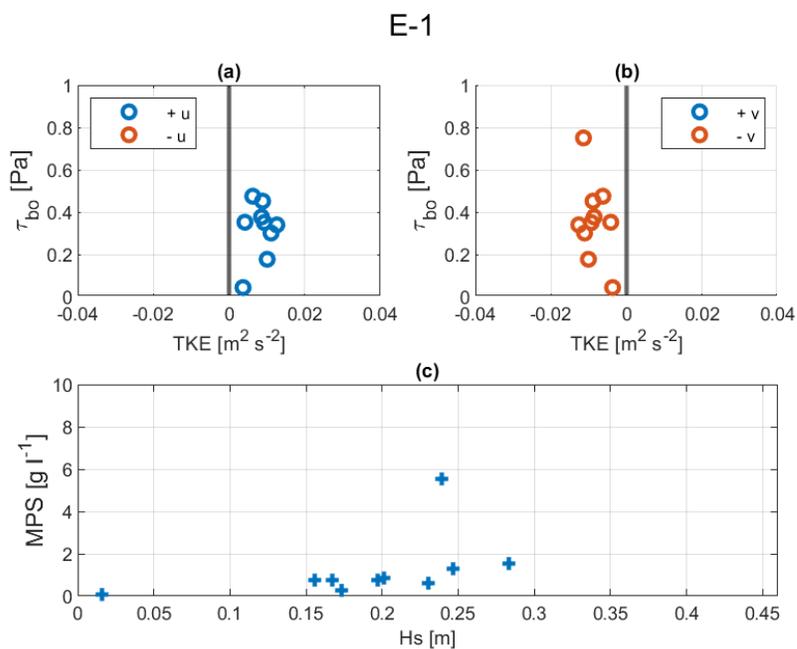


Figura 38. Serie de tiempo obtenidos en la estación E-1 correspondiente a las 9:00 hrs de 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs .

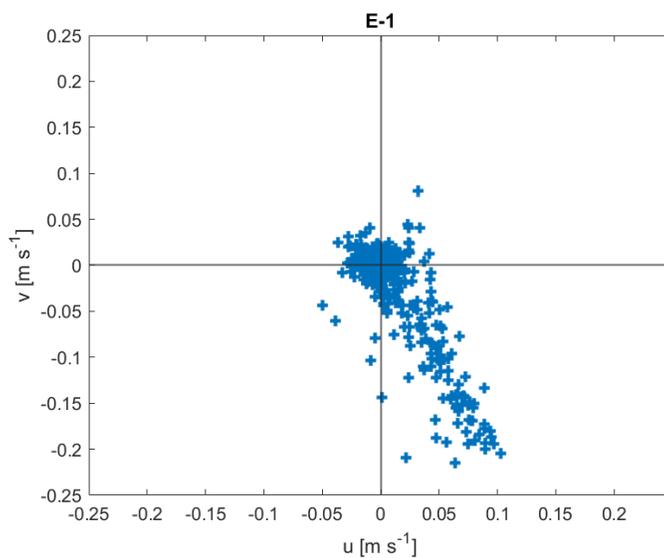


Figura 39. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v de la estación E-1 correspondiente a las 9:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día.

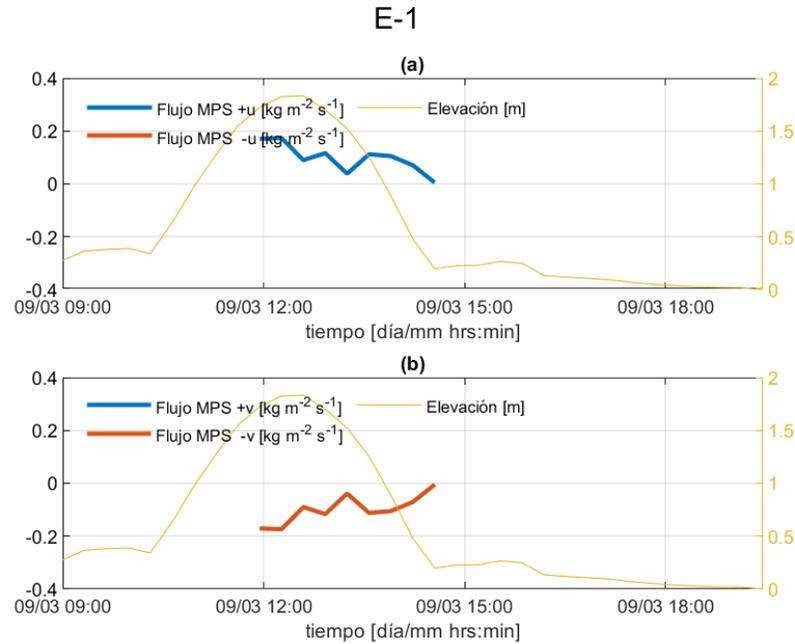


Figura 40. Serie de tiempo correspondiente a las 9:00 hrs del 9 de marzo del 2009 a las 19:27 hrs del mismo día. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de *u* y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de *v* y la elevación.

.1.2. Datos de MR100901.vec

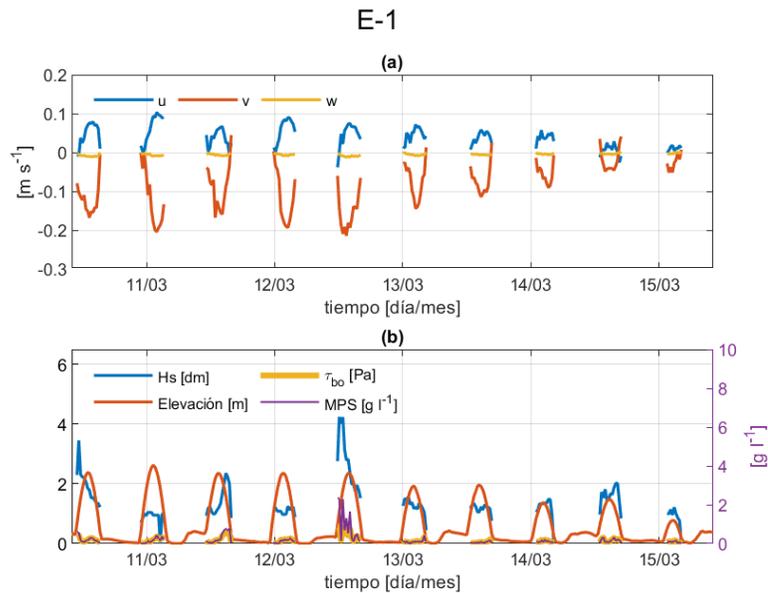


Figura 41. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de *u*, *v* y *w*. (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de *MPS* y altura significativa (*Hs*) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

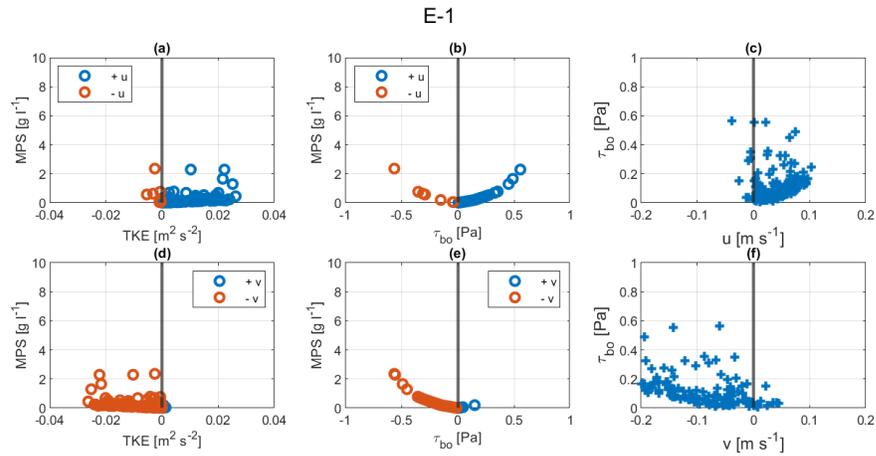


Figura 42. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 de los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} .

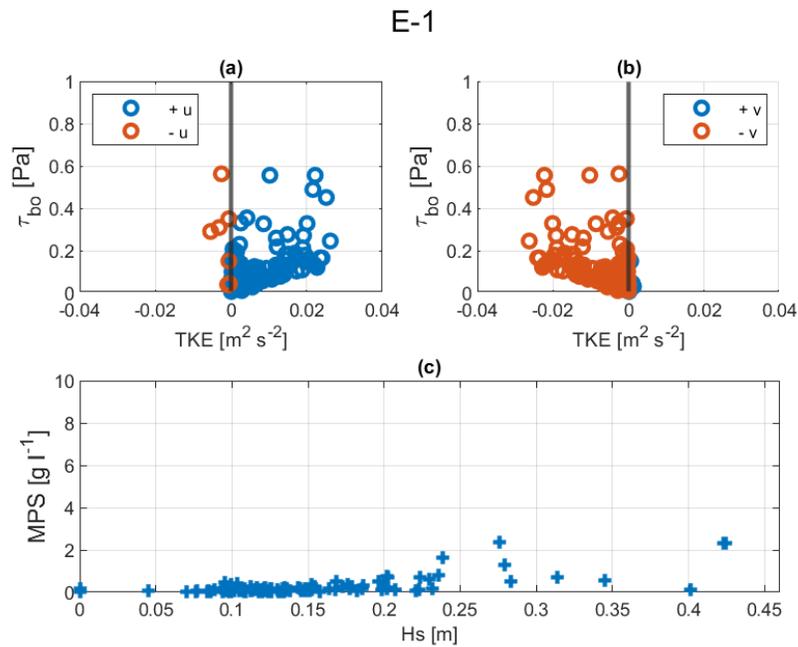


Figura 43. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-2 de los días del 10 de marzo del 2009 a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs .

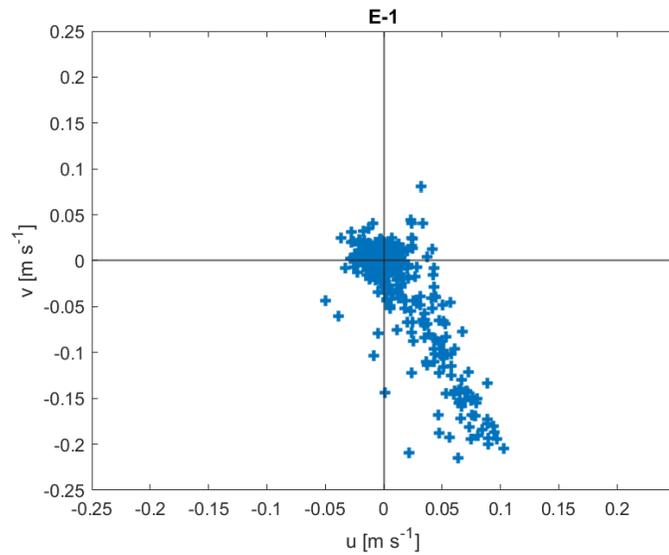


Figura 44. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v , de la estación E-1 correspondiente a los días del 10 de marzo del 2009 a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs.

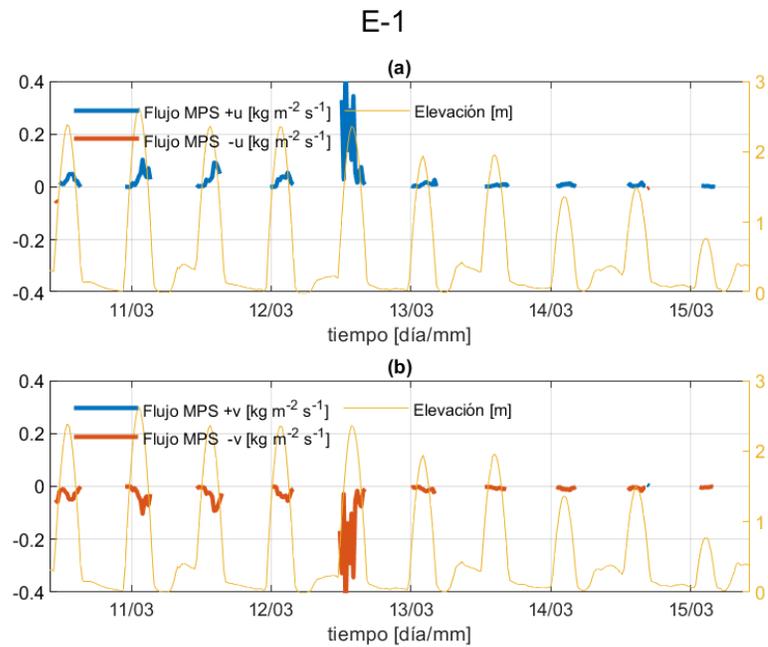


Figura 45. Serie de tiempo correspondiente a los días del 10 de marzo a las 10:00 hrs al 15 de marzo del 2009 a las 10:29 hrs. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación.

.1.3. Datos de marz1501.vec (2)

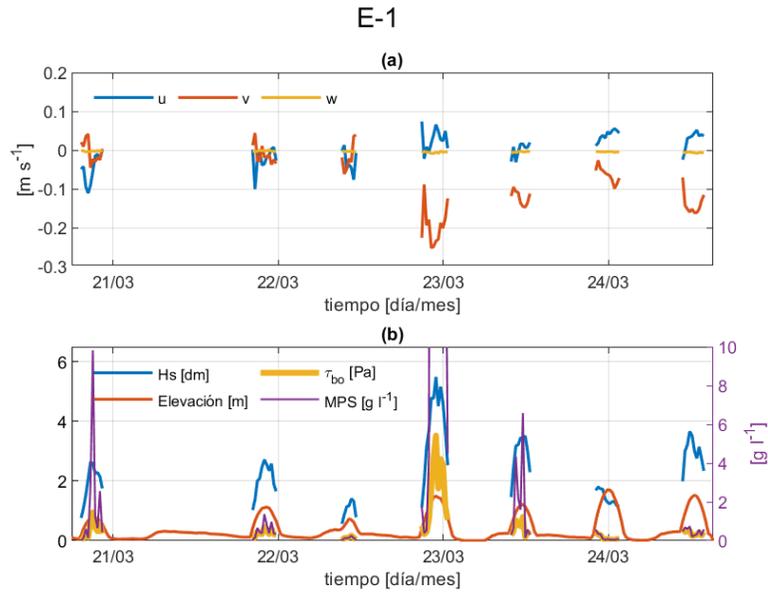


Figura 46. Serie de tiempo correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs de la estación E-1. (a) Componentes de las velocidades de u , v y w . (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de MPS y altura significativa (Hs) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

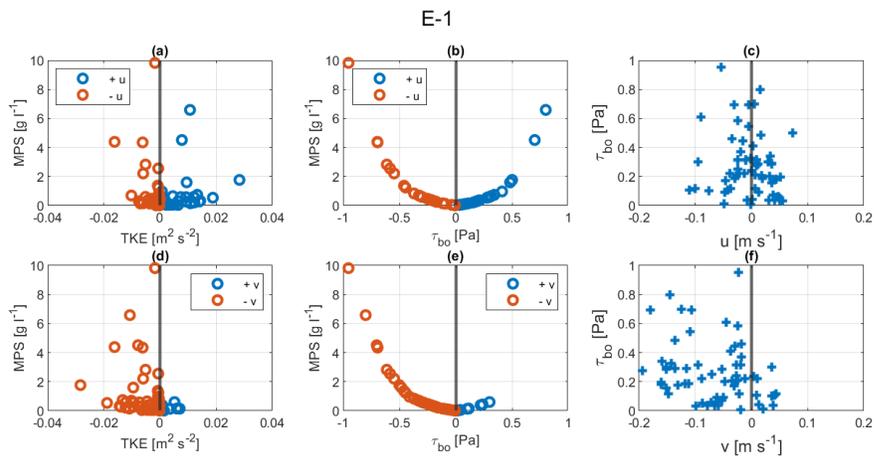


Figura 47. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-1 de los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} .

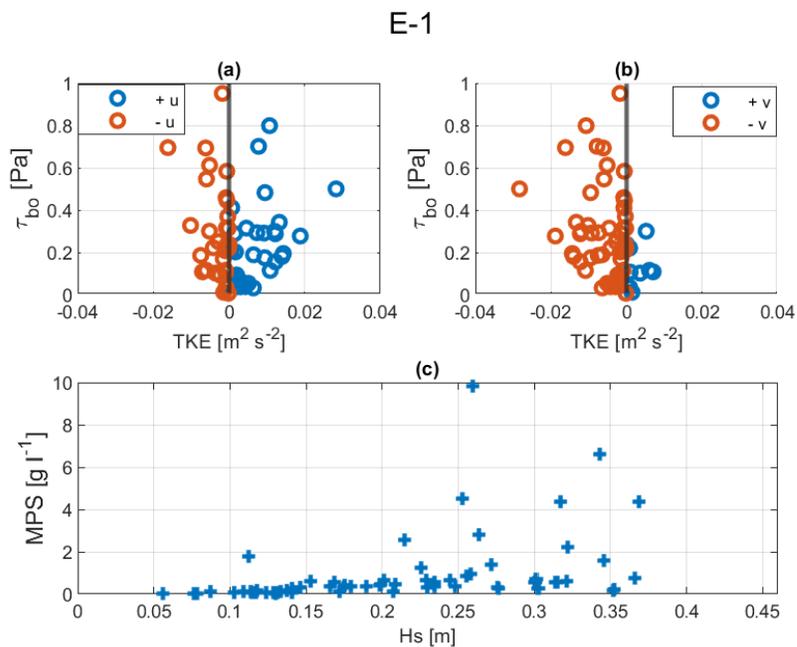


Figura 48. Datos correspondientes a la estación E-1 de los días del 20 de marzo del 2009 a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs .

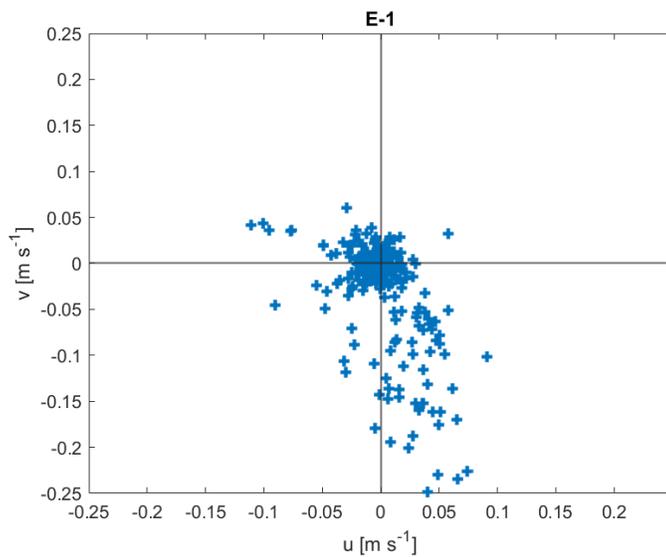


Figura 49. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v , de la estación E-1 correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs.

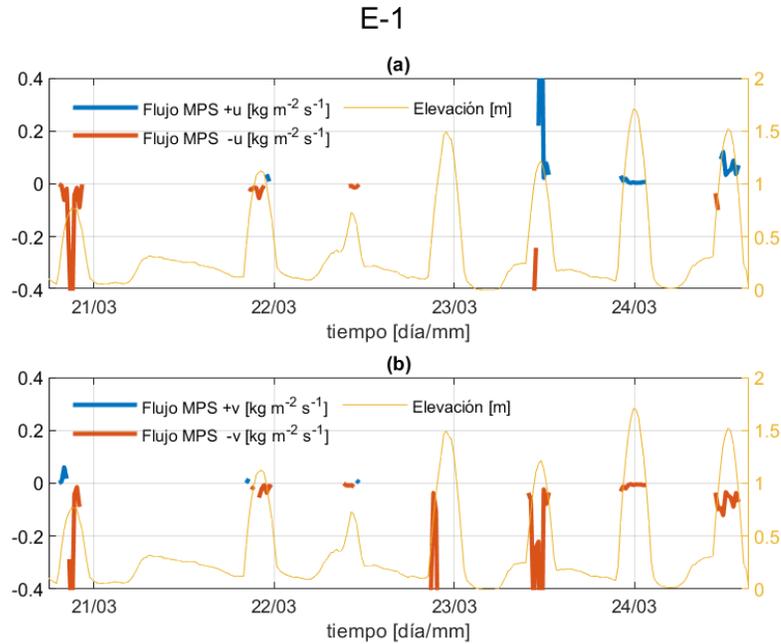


Figura 50. Serie de tiempo correspondiente a los días del 20 de marzo a las 18:00 hrs al 24 de marzo del 2009 a las 15:13 hrs. de la estación E-1. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de *u* y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de *v* y la elevación.

.1.4. Datos de marz1501-1.vec

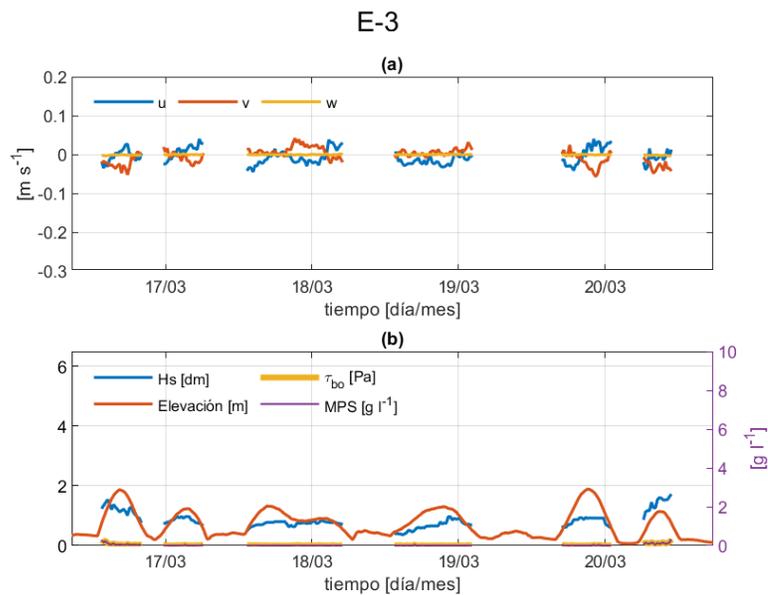


Figura 51. Serie de tiempo correspondiente a los días del 16 de marzo del 2009 a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs de la estación E-3. (a) Componentes de las velocidades de *u*, *v* y *w*. (b) Representación de la elevación, esfuerzo en el fondo (τ_{bo}), concentración de *MPS* y altura significativa (*Hs*) en decímetros para una mejor comparación con las demás variables.

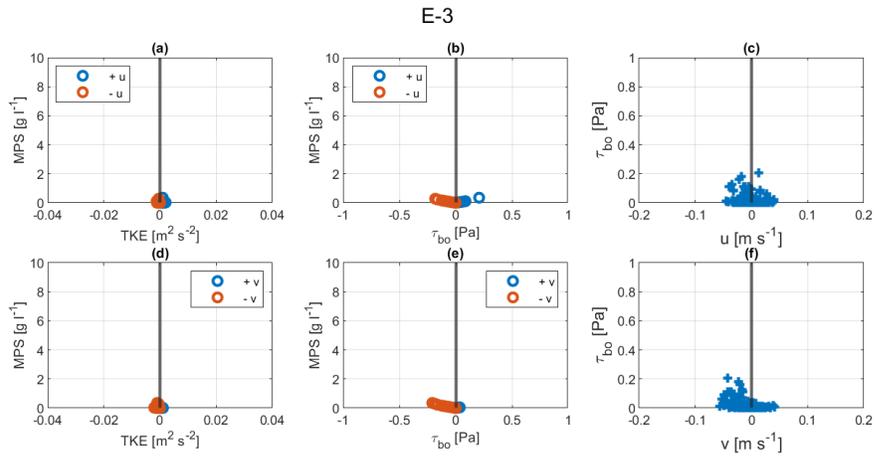


Figura 52. Serie de tiempo correspondiente a la estación E-3 de los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. (a) Componente u positiva y negativa contra TKE . (b) Componente u positiva y negativa contra τ_{bo} . (c) u contra τ_{bo} . (d) Componente v positiva y negativa contra TKE . (e) Velocidad v positiva y negativa contra τ_{bo} . (f) Componente v contra τ_{bo} .

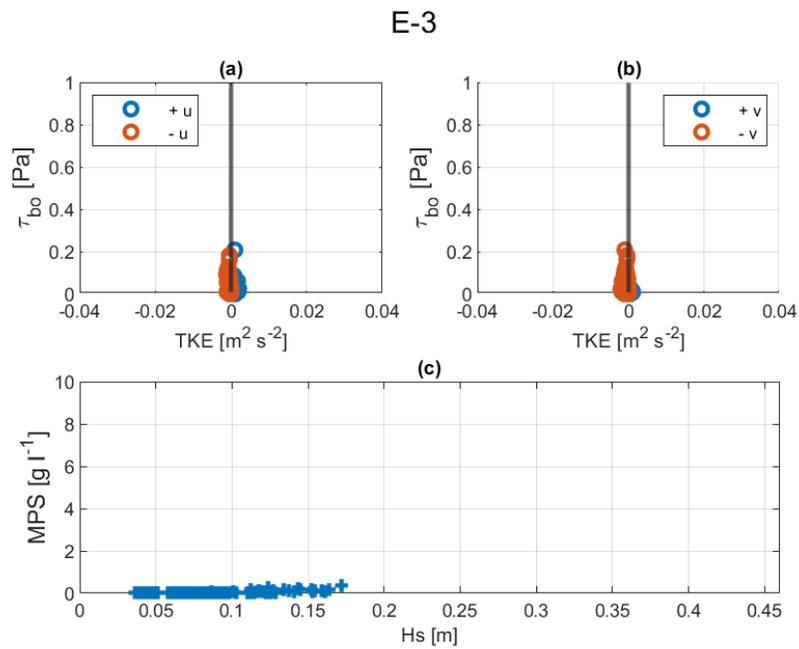


Figura 53. Datos correspondientes a la estación E-3 de los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. (a) Componente u positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (b) Componente v positiva y negativa de TKE contra τ_{bo} . (c) MPS contra Hs .

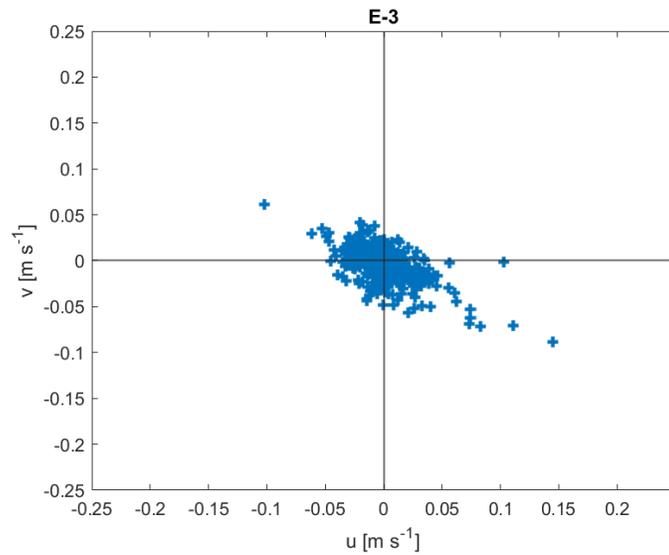


Figura 54. Diagrama de dispersión de las velocidades u y v , de la estación E-3 correspondiente a los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs.

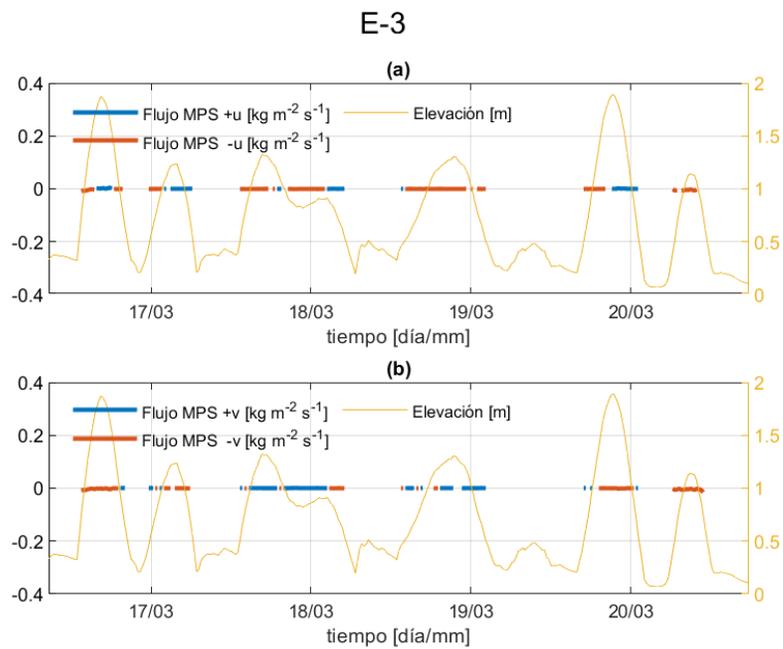


Figura 55. Serie de tiempo correspondiente a los días del 16 de marzo a las 8:40 hrs al 20 de marzo del 2009 a las 17:40 hrs. de la estación E-3. (a) Se muestran los flujos de *MPS* positivos y negativos de u y la elevación. (b) Flujos positivos y negativos de v y la elevación.