



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA
FÍSICA DE LA ATMÓSFERA

RESPUESTA HIDRODINÁMICA DE LAS LAGUNAS Y RÍOS DEL ESTUARIO
DEL PAPALOAPAN A FORZAMIENTO METEOROLÓGICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ERICK RAÚL OLVERA PRADO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JORGE ZAVALA HIDALGO
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

MÉXICO, D. F., JUNIO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Respuesta hidrodinámica de las lagunas y ríos del estuario
del Papaloapan a forzamiento meteorológico

Erick Raúl Olvera Prado

Junio 2014

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Jorge Zavala Hidalgo por darme la oportunidad de trabajar con él. Su confianza, apoyo y conocimiento brindados fueron una componente clave en la realización de este trabajo y en mi formación; también a los miembros del jurado: Dra. Patricia Moreno-Casasola Barceló, Dr. Angel Ruiz Angulo, Dr. Artemio Gallegos García y Dr. Benjamín Martínez López, por haber invertido tiempo revisando la tesis.

A cada uno de los miembros del grupo Interacción Océano-Atmósfera del CCA, su amistad y las experiencias compartidas son invaluable, esta etapa de mi vida concluye con más que un grado académico.

A mi familia, que siempre ha estado y estará presente. En especial a mis padres, que con su incesante apoyo e infinito cariño han moldeado cada una de las etapas de mi vida, mi gratitud a ellos es inmensurable.

A Lulu, por su apoyo y por la manera en que ha enriquecido mi vida desde que apareció en ella.

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra, al Centro de Ciencias de la Atmósfera y a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado para la realización y conclusión de mis estudios. En particular quisiera agradecer a la UNAM y al CONACYT por apoyar con los proyectos PAPIIT IN116111 y RR116111 y CONACYT 133299.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estuarios	3
1.3.1	Definición	3
1.3.2	Clasificación estuarina en base al balance de agua	3
1.3.3	Clasificación estuarina en base a su geomorfología	5
1.3.4	Clasificación estuarina en base a la estructura vertical de salinidad	6
1.3.5	Clasificación estuarina en base a la hidrodinámica	8
1.4	Área de estudio	10
2	Datos y metodología	13
2.1	Nivel del mar	14
2.1.1	Red de muestreo	14
2.1.2	Extracción del residual del nivel del mar y la interacción mareal	14
2.1.3	Asimetría de la marea	20
2.2	Corrientes	22
2.2.1	Sitio de muestreo	22
2.2.2	La circulación estuarina	22
2.3	Batimetría y topografía	24
2.4	Hidrografía	25
2.5	Datos meteorológicos	26
2.6	Datos Hidrométricos	27
3	Resultados y discusión	29
3.1	Nivel del mar	29
3.2	Corrientes	51

3.3	Hidrografía	55
3.3.1	Variación espacial de temperatura y salinidad	55
3.3.2	Diagramas T-S	67
3.3.3	Transectos longitudinales en el canal de la Boca	71
4	Conclusiones	79
	Glosario	81

Índice de figuras

1.1	Tipos de estuarios en base al balance de agua: a) positivo: entrada de agua dulce por descarga del río es mayor a la pérdida por evaporación, b) negativo: pérdida de agua dulce por evaporación excede entrada por precipitación, y c) afluencia-baja: zona de máxima salinidad generada por alta tasa de evaporación y descarga de río pequeña. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].	4
1.2	Tipos de estuarios en base a su geomorfología: a) planicie costera, b) fiordo, c) tectónico y d) hecho por barrera. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].	6
1.3	Tipos de estuarios en base a su estructura vertical de salinidad: a) cuña salada: descarga del río alta y forzamiento mareal débil, b) fuertemente estratificado: descarga moderada a grande y forzamiento mareal débil a moderado, c) débilmente estratificado: forzamiento mareal moderado a fuerte y descarga de débil a moderada d) mezclado verticalmente: forzamiento mareal fuerte y descarga débil. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].	8
1.4	Fracción de flujo de sal difusiva en el espacio del parámetro de estratificación/circulación. El transporte de sal esta dominado por procesos advectivos bajo una alta circulación gravitacional o condiciones de estratificación fuertes, X y por procesos difusivos cuando el parámetro de circulación es bajo independientemente del parámetro de estratificación. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].	9
1.5	Ubicación del estuario del Papaloapan y mapa batimétrico. La integración batimétrica fue hecha con ayuda de la Ing. Maria Elena Osorio Tai.	11
2.1	Ubicación de los sensores de presión y temperatura (círculos), el corrientímetro (cuadrado), el punto de malla donde se extrajo información meteorológica (diamante) y la estación hidrométrica de la CONAGUA (triángulo).	15

2.2	Diagrama esquemático de una sinusoidal cuya fase es alterada pero cuya frecuencia y amplitud permanecen igual. La línea sólida representa las observaciones (O), la línea punteada representa la marea pronosticada (T) y la línea discontinua representa el residual obtenido (R). Figura tomada de Horsburgh (2007) [7].	17
2.3	(a) Puente Alvarado visto desde adentro de la laguna, (b) cruceta con sensor de presión y (c) pilar del puente Alvarado donde se colocó el ADCP.	18
2.4	Distorsión de una onda progresiva que viaja en aguas someras en la dirección positiva x (el eje x representa la distancia). Se puede notar el corto tiempo que le toma a la onda subir conforme pasa a un observador fijo, aumentando la distorsión. Figura tomada de Pugh (2004) [17].	21
2.5	Curvatura de las líneas de corriente para el flujo de la marea cerca de la costa (líneas sólidas). Los gradientes en la superficie, los cuales producen la curvatura, estan representados por las flechas punteadas, las cuales apuntan pendiente abajo. Figura tomada de Pugh (2004) [17].	21
2.6	Red de estaciones de CTD.	25
2.7	Dominio 2 del pronóstico operativo del grupo Interacción Oceano-Atmósfera.	26
3.1	Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substraer el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la Boca (línea verde olivo) y el río Papaloapan (línea azul) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.	33
3.2	Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substraer el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la laguna de Alvarado 1 (línea azul) Alvarado 2 (línea roja) Alvarado 3 (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.	34

<p>3.3 Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substraer el residual filtrado del residual armónico en los sitios del río Acula (línea azul) y el río Limón (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.</p>	<p>35</p>
<p>3.4 Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: el residual d) inducido por procesos, obtenido por filtrado; y el e) residual causado por interacción de procesos, obtenido al substraer el residual armónico - residual filtrado en los sitios de la laguna Camaronera (línea azul) y la laguna Buen País (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.</p>	<p>36</p>
<p>3.5 Componentes que forman la a elevación total): b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substraer el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la laguna de Tlalixcoyan (línea verde olivo) y la boca de la laguna de Tlalixcoyan (línea azul) para los años 2011-2012. Loa escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.</p>	<p>37</p>
<p>3.6 El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la Boca; b) el río Papaloapan; y c) el río Acula, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río Papaloapan (línea verde), también se muestran.</p>	<p>40</p>

- 3.7 El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la Boca de Tlalixcoyan; b) la laguna Tlalixcoyan; y c) el río Limón, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran. 41
- 3.8 El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la laguna de Alvarado 1; b) la laguna de Alvarado 2; y c) la laguna de Alvarado 3, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas(sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran. 42
- 3.9 El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la laguna Camaronera; y b) la laguna Buen País, para los años 2011-2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie , d) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran. 43
- 3.10 La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) el río Papaloapan, b) la Boca, y el c) río Acula, durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde). 44
- 3.11 La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Tlalixcoyan, b) la Boca de la laguna Tlalixcoyan, y c) el río Limón, durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde). 45

3.12	La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Camaronera, y b) la laguna Buen País), durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, d) la presión atmosférica invertida (línea roja) y el gasto del río (línea verde).	46
3.13	La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) el río Papaloapan, y b) el río Acula, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1. . . .	47
3.14	La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Tlalixcoyan, b) la Boca de la laguna Tlalixcoyan, y c) el río Limón, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.	48
3.15	La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna de Alvarado 1, b) Alvarado 2, y c) Alvarado 3, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.	49
3.16	La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Camaronera, y b) la laguna Buen País, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.	50
3.17	Rosa de corrientes de todo el periodo de medición.	52
3.18	Flujo medio en la boca (línea azul) a lo largo del eje principal, desviación estandar del flujo medio (línea roja), flujo medio observado en la máxima llenante (puntos y líneas), flujo medio observado en la máxima vaciante (línea punteada) y perfil teórico (línea cafe).	53
3.19	(a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal para el mes de Agosto de 2011.	54

3.20	(a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal para el mes de Septiembre de 2011.	54
3.21	(a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal del 1º al 6 de Octubre de 2011.	55
3.22	(a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 2 (1º y 2 de Agosto, 2011).	57
3.23	(a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 2 (1º y 2 de Agosto, 2011).	58
3.24	(a) Salinidad máxima,(b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 3 (3 y 5 de Diciembre, 2011).	59
3.25	(a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 3 (3 y 5 de Diciembre, 2011).	60
3.26	(a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 4 (18-20 de Marzo, 2012).	61
3.27	(a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 4 (18-20 de Marzo, 2012).	62
3.28	(a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima , (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 5 (19 y 20 de Mayo, 2012).	63
3.29	(a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 5 (19 y 20 de Mayo, 2012).	64
3.30	(a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima , (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 6 (9 y 10 de Septiembre, 2012).	65
3.31	(a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 6 (9 y 10 de Septiembre, 2012).	66
3.33	Distribución de las estaciones de CTD consideradas para definir las zonas en los diagramas T-S	68
3.32	Diagrama T-S de todas las campañas de medición.	69
3.34	Diagramas T-S para la Zona 1 (laguna Camaronera) (a), Zona 2 (lagunas de Alvarado y Buen País) (b), Zona 3 (laguna Tlalixcoyan) (c) y Zona 4 (Río Papaloapan y la Boca) (d).	70

3.35	Transecto longitudinal en el canal de la Boca y batimetría.	73
3.36	Salinidad en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).	74
3.37	Densidad en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).	75
3.38	Temperatura en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).	76
3.39	Frecuencia de flotación N^2 en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).	77

Índice de cuadros

1.1	Tipología del estuario del Papaloapan.	10
2.1	Relación de número y fecha de las campañas en el estuario del río Papaloapan.	13
2.2	Periodos de medición y especificaciones de los sensores en cada ubicación.	16
2.3	Estación hidrométrica de la CONAGUA en el cauce del río Papaloapan.	27
3.1	Factor de Forma (FF), que determina el régimen de marea, el Rango de Marea medio para el periodo de medición y el Coeficiente de Determinación (R^2), que indica la contribución de la elevación de la marea pronosticada a la elevación total, para cada ubicación. Su ubicación se muestra en la figura 2.1	30
3.2	Amplitud y fase respecto al meridiano de Greenwich de las principales componentes de marea para cada sitio. Los valores de los parámetros son reportados con un estimado del 95 % de intervalos de confianza. Su ubicación se muestra en la figura 2.1	31
3.3	Elipses de corriente observadas para los principales constituyentes en la Boca. U_{mayor} , amplitud del eje mayor; <i>Fase</i> , fase de la velocidad máxima respecto al meridiano de Greenwich. La amplitud del eje menor es mucho más pequeña que U_{mayor} y por lo tanto no se muestra. Los valores de los parámetros de la elipse son reportados con un estimado del 95 % de intervalos de confianza.	55

Resumen

La costa mexicana del Golfo de México ha experimentado en los últimos años un desarrollo urbano y suburbano importante, el cual intensifica la presión sobre los sistemas costeros. En este estudio se analiza el estado actual de las lagunas y los ríos del estuario del Papaloapan, en Veracruz, a fin de identificar los diferentes procesos físicos que gobiernan la hidrodinámica del sistema y generar una línea base que puede ser utilizada para comparar distintos escenarios de aumento del nivel del mar, regímenes hidrológicos y determinar niveles extremos de manera estadística. En particular, se explora el comportamiento del nivel del mar, el contenido de sal y la distribución de la temperatura en respuesta a eventos atmosféricos como huracanes y nortes. Estos objetivos son abordados a través de mediciones hidrográficas, de nivel del mar, batimétricas, y de corrientes, creando así una base de datos que no existía anteriormente. Se llevaron a cabo seis campañas de medición en las cuales se cubrió una red de 49 estaciones de CTD en cada una, se instalaron 11 sensores de presión y temperatura, y se colocó un corrientímetro en el canal que comunica el estuario con el mar. También se utilizaron datos de viento y presión atmosférica producto del modelo Weather Research and Forecasting Model, utilizado de manera operativa en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, y datos de gasto de río de una estación hidrométrica. La mayor parte de estos datos durante un periodo de aproximadamente un año (Agosto 2011-Septiembre 2012). Se encontró que la contribución al aumento de la elevación en el residual de marea es debida principalmente al esfuerzo del viento más que a cambios de la presión atmosférica. Por otro lado, la interacción de la marea con el forzamiento meteorológico juega un papel importante generando una señal diurna en el residual. La circulación estuarina en el canal principal durante el periodo de muestreo, es restringida a un movimiento rectilíneo y exhibe una dirección hacia el mar en toda la columna de agua, lo cual podría tener implicaciones en el transporte de sedimentos a largo plazo. Además, es posible observar una variación estacional en la salinidad, que se caracteriza por valores que no sobrepasan los 5 PSU en la mayoría de las lagunas en

temporada de lluvias, mientras que en la temporada seca se pueden encontrar valores de hasta 30 PSU y una penetración de la cuña salina de hasta 15 km aguas arriba del río Papaloapan.

Abstract

The southwestern Gulf of Mexico coast is experiencing an imminent urban and suburban development that intensifies pressure on estuarine regions. The current state of the lagoons and rivers of the Papaloapan estuary, in Veracruz, is studied in order to identify the distinct physical processes which govern the hydrodynamics of the system and have a base line which can be used to compare different sea-level rise, hydrological regimes scenarios and statistically determine extreme sea levels. In particular, the behavior of the sea level, the salt content and temperature distribution in response to atmospheric events such as hurricanes and cold fronts are explored. These objectives are addressed through hydrographic, water level, bathymetric, and current measurements in the region, creating a database that had been absent until now. Six surveys covering a network of 49 CTD stations were carried out, 11 pressure and temperature sensors, and a current meter at the channel that communicates the estuary with the sea were deployed. In addition, wind and atmospheric pressure data from the operational Weather Research and Forecasting model running at the Centro de Ciencias de la Atmósfera of UNAM, and river flow data from an stream gauge were used. Most of this data during a period of approximately one year (August 2011-September 2012). It was found that the surge generated by the wind from the atmospheric events mentioned above, is the main contributor to the residual elevation rather than the atmospheric pressure, on the other hand, interaction between the tide and the atmospheric forcing comes into play as a component of the residual elevation. The estuarine circulation in the main channel during the period of observation is rectilinear and restricted by the channel and exhibit a seaward direction throughout the water column, suggesting possible implications on sediment transport. In addition, it is noticeable the seasonal variation in salinity, characterized by values of about 5 PSU in most of the lagoons in the wet season, meanwhile in the dry season maximum values are about 30 PSU, and the salt wedge can intrude up to 15 km upstream the Papaloapan river.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La costa mexicana del Golfo de México ha experimentado en los últimos años un desarrollo urbano y suburbano importante, el cual intensifica la presión sobre los sistemas costeros. Sin embargo, para determinar los efectos del desarrollo costero en los procesos biológicos y químicos en sistemas como son los estuarios es necesario comprender el marco físico subyacente a estos procesos, específicamente la dinámica estuarina [12].

La mayor parte de los estudios sobre la circulación estuarina llevados a cabo en el continente americano han sido en latitudes templadas donde la fuerza mareal es un agente importante en la modulación de la circulación neta. Por ejemplo, asimetrías en la vaciante y en la llenante de la marea debidas a la fricción de fondo y a la no uniformidad de la batimetría pueden inducir un flujo residual [22]; la modulación de la marea por el ciclo de mareas vivas/muertas genera una frecuencia con periodo quincenal en el bombeo mareal de salinidad hacia la cabeza del estuario, y un intercambio de flujos netos tiende a ser más fuerte en mareas muertas, donde la mezcla inducida por la marea es más debil [9]. Además, las mareas en sistemas tropicales y subtropicales a lo largo del Golfo de México exhiben rangos pequeños o de tipo micromareal (< 2 m) comparados con los de latitudes templadas los cuales exhiben rangos de tipo macromareal (> 4 m). En parte debido a lo anterior, la mayoría de los estudios en estuarios sobre la variación del nivel del mar, del residual de elevación, y su interacción con eventos meteorológicos [2] [7], así como de la estimación de niveles extremos [4], se han hecho en estas latitudes, en mayor medida debido a la magnitud de estas

variaciones y su importancia en el manejo de riesgo por inundaciones.

Por otro lado, muchos sistemas subtropicales muestran fluctuaciones estacionales en el gasto de ríos lo cual impone un ciclo anual a la estratificación y por lo tanto en la circulación [21]. Otros estudios de sistemas subtropicales a lo largo de la costa del Golfo de México han encontrado una coherencia de 3-5 días entre el aumento del intercambio submareal (periodo > 24 horas) y el forzamiento meteorológico asociado con el paso de *nortes*, ya que estos tienen un efecto doble. Primero, por el intercambio de agua entre un estuario/laguna y el mar adyacente, que puede estar influenciado por el efecto del barómetro invertido y segundo, por el apilamiento de agua debido a transporte de Ekman o advección por viento, que puede llevar agua hacia adentro o hacia afuera de estos sistemas a volúmenes mayores a los del prisma de marea.

En este trabajo se analiza el comportamiento en escala submareal (> 24 hrs) del nivel de la superficie para todo el periodo de medición, y en particular se tomaron dos eventos de norte para analizar el comportamiento en escala mareal del residual de elevación.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar la distribución espacial de la salinidad y la temperatura y su relación con los patrones de circulación, y por lo tanto, con la variación del nivel del mar presentes en el sistema. En particular busca valorar el papel que juega el forzamiento mareal en modificar tal distribución, así como el del forzamiento meteorológico en el nivel del mar. Este objetivo es abordado con la recolección de datos en el estuario del Papaloapan en diferentes campañas y el uso de información meteorológica producto del modelo WRF. Con lo anterior es posible generar una línea base cuyo objetivo a futuro será dar pie a investigaciones específicas, por ejemplo, análisis de niveles extremos, comparación de diferentes escenarios de aumento del nivel medio del mar y de regímenes hidrológicos mediante modelación numérica, análisis de sensibilidad, etc. Dicha línea base se compone de información hidrodinámica que había permanecido ausente hasta ahora.

La tesis consta de cuatro capítulos. En este primer capítulo se da una pequeña introducción del estado del arte en estudios de elevación del nivel del mar en mares costeros y estuarios, los objetivos generales y particulares del trabajo, se da una des-

cripción de la zona de estudio y se introduce al lector con la teoría de los estuarios. El capítulo dos resume los métodos y los datos usados para realizar el estudio así como una descripción de la física detrás del comportamiento observado en los registros de elevación del nivel del mar y de corrientes. El capítulo tres contiene los resultados obtenidos y la discusión. Y en el capítulo cinco se presentan las conclusiones finales.

1.3 Estuarios

1.3.1 Definición

Una definición de estuario generalmente aceptada es la propuesta por Cameron y Pritchard (1963) [3], que dice que un estuario es *un cuerpo de agua costero semicerrado, con comunicación libre con el mar, y dentro del cual el agua oceánica es diluida por agua dulce proveniente de un río*. El agua dulce que entra a una cuenca semicerrada establece un gradiente longitudinal de densidad que resulta en un flujo superficial hacia afuera del estuario y un flujo de agua oceánica salada hacia adentro en el fondo. En estuarios *clásicos*, la entrada de agua dulce es el agente principal de la circulación promedio a través de la adición de flotabilidad del agua dulce respecto al agua de mar, más densa. La definición anterior no aplica a todos los estuarios. Por ejemplo, es irrelevante para cuencas áridas, tropicales y subtropicales que exhiben una hidrodinámica que es consistente con aquella propia de los estuarios clásicos aunque tengan poca o nula influencia de agua dulce. En algunos sistemas áridos la pérdida de agua dulce a través de la evaporación es el agente forzador principal, y causa el desarrollo de gradientes longitudinales de densidad, en analogía con estuarios clásicos.

1.3.2 Clasificación estuarina en base al balance de agua

En base a la definición anterior, y en términos del balance de agua, los estuarios pueden clasificarse en tres tipos: *positivos*, *inversos* y de *afluencia-baja* (Figura 1.1). Los estuarios positivos son aquellos en los cuales la entrada de agua dulce de la descarga de los ríos, precipitación y derretimiento de hielo excede las pérdidas por evaporación o congelación y establece un gradiente longitudinal de densidad. En este tipo de estuarios, el gradiente longitudinal de densidad genera un transporte de volumen hacia el océano, lo cual se nota como un flujo superficial más fuerte hacia afuera que el flujo hacia adentro en el fondo, en respuesta al agua dulce adicional (Figura 1.1 a). La circulación inducida por el volumen de agua dulce añadida al sistema es mejor conocida

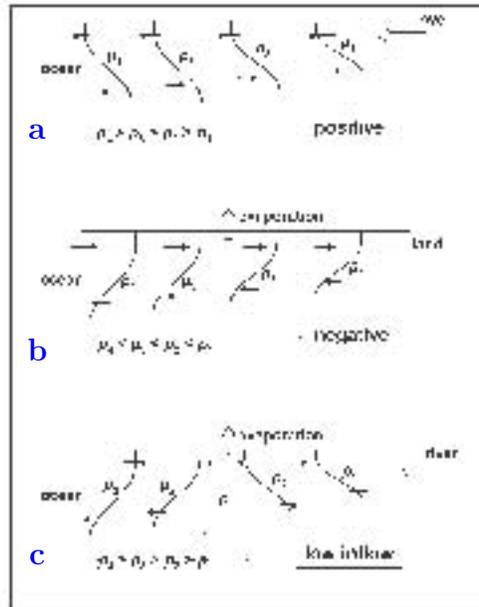


Figura 1.1: Tipos de estuarios en base al balance de agua: a) positivo: entrada de agua dulce por descarga del río es mayor a la pérdida por evaporación, b) negativo: pérdida de agua dulce por evaporación excede entrada por precipitación, y c) afluencia-baja: zona de máxima salinidad generada por alta tasa de evaporación y descarga de río pequeña. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].

como la circulación "estuarina" o "gravitacional".

Los estuarios inversos típicamente se encuentran en regiones áridas donde la evaporación local de agua dulce excede la entrada de agua dulce por precipitación. En este tipo de sistemas la descarga de los ríos es escasa o nula. Son llamados inversos o negativos, porque el gradiente longitudinal de densidad tiene el signo opuesto que en estuarios positivos, es decir, la densidad del agua aumenta tierra adentro (Figura 1.1 b). Los estuarios inversos exhiben entradas de volumen netas asociadas con flujos superficiales más fuertes que los flujos de salida cerca del fondo.

Los estuarios de afluencia-baja también se presentan en regiones con altas tasas de evaporación pero con una pequeña (orden de pocos m^3/s) influencia de descargas de ríos. Durante las temporadas secas y calientes, los procesos de evaporación pueden generar una zona de máxima salinidad dentro de este tipo de estuarios de tal forma que la densidad del agua disminuye hacia el mar en esta zona, como en un estuario inverso, y aumenta hacia la cabeza, como en un estuario positivo (Figura 1.1 c).

1.3.3 Clasificación estuarina en base a su geomorfología

Los estuarios pueden ser clasificados de acuerdo a su geomorfología como *planicie costera*, *fiordo*, *tectónico* y *hecho por barrera* (Figura 1.2). Los estuarios de planicies costeras, también llamados bahías de río inundado, son aquellos que se formaron como resultado del aumento del nivel del mar en el Pleistoceno, comenzando hace ~15,000 años. Originalmente ríos, estos estuarios se formaron durante inundaciones que tomaron miles de años. Su forma se parece a la de los ríos actuales pero mucho más ancha (Figura 1.2 a). Son típicamente anchos (orden de kilómetros) y someros (orden de metros), con una relación ancho/profundidad grande. Algunos ejemplos de estos sistemas son la bahía de Chesapeake y Delaware en la costa este de Estados Unidos.

Los fiordos están asociados con latitudes altas donde la actividad glacial es intensa. Son caracterizados por un canal alargado y profundo y una plataforma (Figura 1.2 b). La plataforma está relacionada con una pila de piedras de un glaciar activo o extinto. En el sentido de actividad glacial, se puede decir que hay fiordos fluviales y glaciales. Los fiordos fluviales están relacionados con glaciares extintos y su principal fuente de flotabilidad viene de la entrada de ríos. Se encuentran usualmente en latitudes menores a las de los fiordos glaciales, los cuales están relacionados con glaciares activos y cuya principal fuente de flotabilidad es derivada del derretimiento del glaciar y por hielo y nieve de montañas cercanas. Los fiordos son profundos (varios cientos de metros) y angostos (algunos cientos de metros) y su relación ancho/profundidad es pequeña con paredes laterales muy inclinadas. Los fiordos son localizados comúnmente en Groelandia, Alaska, Columbia Británica, Escandinavia, Nueva Zelanda, la Antártica, Islandia y Chile.

Los estuarios tectónicos se formaron por sismos o por fracturas en la corteza terrestre, y pliegues que generaron fallas en regiones adyacentes al océano. Las fallas causan que parte de la corteza se hunda formando un hueco. Entonces, un estuario se forma cuando la cuenca es llenada por el agua del océano (Figura 1.2 c). Algunos ejemplos de este tipo de estuarios son la bahía de San Francisco en Estados Unidos, el puerto de Manukau en Nueva Zelanda, la bahía de Guaymas en México y algunas rías en Nueva España.

Los estuarios hechos por barrera, originalmente bahías, se convirtieron en sistemas semicerrados como consecuencia de un apilamiento litoral que causó la formación de una barra de arena entre la costa y el océano. Algunas de estas barras están unidas

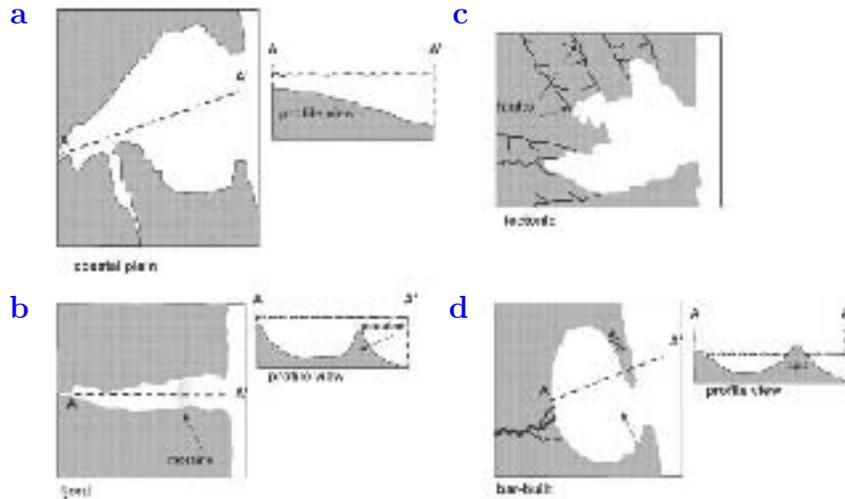


Figura 1.2: Tipos de estuarios en base a su geomorfología: a) planicie costera, b) fiordo, c) tectónico y d) hecho por barrera. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].

a una de las puntas de alguna bahía más antigua y muestran una pequeña entrada (orden de unos cientos de metros) donde el estuario se comunica con el océano (Figura 1.2 d). Hay que destacar que el estuario del Papaloapan pertenece a este tipo en esta clasificación. Otras barras de arena pueden estar separadas de la costa y representan islas que resultan en una o más bocas que permiten la comunicación entre el estuario y el océano (un ejemplo es la laguna de Términos en Campeche). En algunos casos adicionales, las barras de arena fueron formadas simplemente por el aumento del nivel del mar. Algunos ejemplos de este tipo de estuarios se encuentran en regiones subtropicales del continente Americano (Carolina del Norte, Florida, México) y Portugal.

1.3.4 Clasificación estuarina en base a la estructura vertical de salinidad

De acuerdo con la estratificación de la columna de agua o la estructura vertical de la salinidad, los estuarios pueden ser clasificados como de *cuña salada*, *fuertemente estratificados*, *debilmente estratificados* o *mezclados verticalmente* [16]. Esta clasificación considera la competencia entre la fuerza de flotación provocada por la descarga del río y la mezcla por forzamiento de marea. La mezcla por forzamiento mareal es proporcional al volumen de agua oceánica entrando al estuario en cada ciclo de marea, lo cual se conoce como prisma de marea. Grandes descargas del río y débil forzamiento por marea resulta en un estuario de cuña salada tal como el Mississippi (USA), Río

de la Plata (Argentina), Vellar (India), Ebro (España), Pánuco (México), y Itajai-Acu (Brasil). Estos sistemas están fuertemente estratificados durante la llenante, cuando el agua oceánica penetra por el fondo en forma de cuña (Figura 1.3 a). Algunos de estos sistemas pierden su naturaleza de cuña durante periodos secos. Los perfiles típicos de salinidad promediados sobre un ciclo de marea exhiben una haloclina muy inclinada (o picnoclina), con flujos medios dominados por un flujo hacia afuera en la mayor parte de la columna de agua y una penetración débil cerca de la capa del fondo. Este flujo medio resulta de una mezcla relativamente débil entre el agua oceánica que entra y el agua dulce del río.

Los estuarios fuertemente estratificados presentan descargas de moderadas a grandes y forzamiento mareal de débil a moderado (Figura 1.3 b). Estos estuarios tienen una estratificación similar a los de cuña salada, solo que esta estratificación permanece a través de todo el ciclo de marea como es el caso de los fiordos y otros estuarios profundos (típicamente > 20 m). Los perfiles de salinidad promediados sobre un ciclo de marea tienen una haloclina (o picnoclina) bien desarrollada con variaciones verticales débiles por debajo y por encima de esta. El flujo medio exhibe entradas y salidas de agua bien establecidas, sin embargo las entradas son débiles por la poca mezcla con el agua dulce y por los gradientes de densidad horizontales menos fuertes.

Los estuarios debilmente estratificados o parcialmente mezclados resultan de la presencia de un forzamiento mareal de moderado a fuerte y una descarga de río débil a moderada (Figura 1.3 c)). Muchos estuarios localizados en latitudes templadas, como la bahía de Chesapeake, la bahía de Delaware y el río James (todos en la costa este de Estados Unidos) caen en esta categoría. El perfil de salinidad medio tiene una haloclina (o picnoclina) débil o una estratificación continua de la superficie al fondo, excepto cerca de la capa de mezcla de fondo. El flujo de intercambio medio es más vigoroso (cuando se compara con otro tipo de estuarios) debido a la mezcla entre el agua dulce y el agua oceánica salada.

Un forzamiento de marea fuerte y una descarga de río débil resulta en un estuario mezclado verticalmente. Los perfiles de salinidad media en estos estuarios son prácticamente uniformes y los flujos medios son unidireccionales con la profundidad (Figura 1.3 c). En estuarios anchos y someros, la entrada de agua oceánica se puede desarrollar en un lado de la sección transversal del estuario y la salida en el otro lado, especialmente durante la temporada seca. Algunas partes de la bahía de Chesapeake

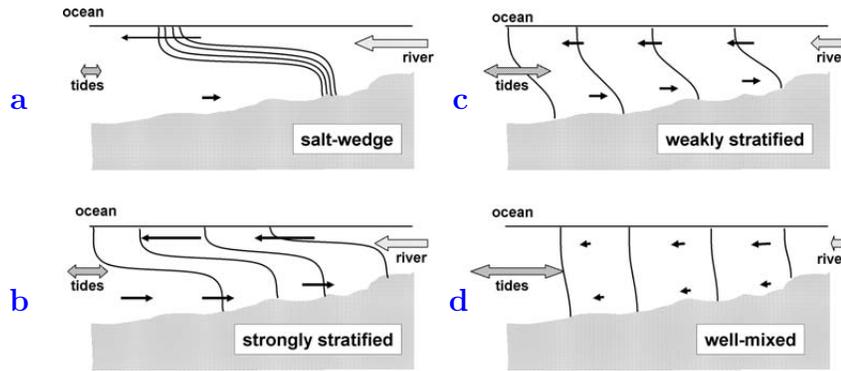


Figura 1.3: Tipos de estuarios en base a su estructura vertical de salinidad: a) cuña salada: descarga del río alta y forzamiento mareal débil, b) fuertemente estratificado: descarga moderada a grande y forzamiento mareal débil a moderado, c) débilmente estratificado: forzamiento mareal moderado a fuerte y descarga de débil a moderada d) mezclado verticalmente: forzamiento mareal fuerte y descarga débil. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].

pueden exhibir este comportamiento a principios del Otoño. En estuarios angostos y bien mezclados, la entrada de salinidad puede ocurrir solo durante la llenante porque el flujo medio será hacia el mar. Algunos ejemplos de este tipo de estuarios son escasos porque, bajo condiciones bien mezcladas, el flujo medio será mayormente causado por forzamiento por viento o marea.

1.3.5 Clasificación estuarina en base a la hidrodinámica

Una clasificación estuarina ampliamente aceptada es la propuesta por Hansen y Rattray (1996) [5], en base a la hidrodinámica del estuario. Esta clasificación se apoya en dos parámetros adimensionales: (a) el parámetro de circulación y (b) el parámetro de estratificación. Estos parámetros están relacionados con variables que están promediadas horizontalmente sobre la sección transversal y sobre un ciclo de marea. El parámetro de circulación es el cociente de la rapidez del flujo cerca de la superficie u_s y el flujo promediado sobre la sección U_f , es decir, u_s/U_f . La rapidez del flujo cerca de la superficie está típicamente relacionada con la descarga del río y en el orden de 0.1 m/s. En estuarios con una entrada de agua oceánica neta pequeña, tales como los de cuña salada y los mezclados verticalmente, el flujo promediado en la vertical será similar en magnitud al flujo de salida en la superficie, por lo tanto el parámetro de circulación es > 10 en estuarios con una circulación gravitacional fuerte y cercano a 1 en estuarios con flujo unidireccional o barotrópico. En general, mientras más grande es el parámetro de circulación, más fuerte la circulación gravitacional.

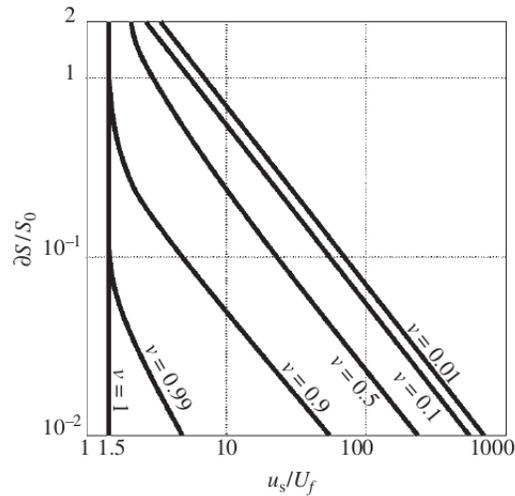


Figura 1.4: Fracción de flujo de sal difusiva en el espacio del parámetro de estratificación/circulación. El transporte de sal esta dominado por procesos advectivos bajo una alta circulación gravitacional o condiciones de estratificación fuertes, X y por procesos difusivos cuando el parámetro de circulación es bajo independientemente del parámetro de estratificación. Figura tomada de Valle-Levinson (2010) [22].

El otro parámetro adimensional, el parámetro de estratificación, es el cociente de la diferencia de salinidad entre la superficie y el fondo δS , y la salinidad media sobre una sección transversal, $\delta S/S_0$. Un cociente con valor a 1 indica que la estratificación de la salinidad es tan grande como la salinidad media de la sección. Por ejemplo, si un estuario muestra una salinidad media de 20 PSU, debería tener una estratificación grande (del orden de 20) para que resulte un parámetro con valor de 1. En general, los estuarios comunmente tendrán parámetros de estratificación < 1 . Mientras más débil sea la estratificación de la columna de agua, el parámetro de estratificación será más pequeño.

Los dos parámetros arriba descritos pueden ser utilizados en conjunto para caracterizar la naturaleza del transporte de sal en estuarios. Por ejemplo, la contribución de la porción difusiva (respecto a la porción advectiva) del flujo de sal total dentro del estuario se puede llamar ν . Este parámetro puede oscilar entre 0 y 1. Cuando el valor de ν se encuentra cerca de 0, el transporte de sal hacia la cabeza del estuario esta dominado por la advección, es decir, por la circulación gravitacional. En este caso, los procesos de mezcla son débiles, como en un estuario altamente estratificado (fiordo). Cuando ν se aproxima a 1, el transporte total de sal esta dominado por pro-

cesos difusivos (por ejemplo, mezcla por marea), como en los flujos unidireccionales. El parámetro ν puede representarse en términos del parámetro de estratificación y de circulación (Figura 1.4). Este diagrama muestra que el transporte de sal esta dominado por procesos advectivos bajo una alta circulación gravitacional o condiciones de estratificación fuertes. También muestra que los procesos difusivos dominan el flujo de sal cuando el parámetro de circulación es bajo independientemente del parámetro de estratificación. Entre estos dos extremos, el transporte de sal tiene contribuciones tanto de parámetros difusivos como advectivos.

Clasificación	Tipo de estuario
Balance de agua	<i>Positivo</i>
Geomorfología	<i>Hecho por barrera</i>
Estructura vertical de salinidad	<i>Cuña salada</i>
Hidrodinámica	<i>Dominado por difusión</i>

Cuadro 1.1: Tipología del estuario del Papaloapan.

1.4 Área de estudio

La cuenca del río Papaloapan tiene un área de 46,517 km² (Diario Oficial de la Federación, 2005) y tiene asociada una precipitación promedio que supera los 1,800 mm anuales (smn.conagua.gob.mx). Este sistema fluvial pertenece a la vertiente del Golfo de México y es el de mayor importancia en el país, después del sistema Grijalva-Usumacinta. El sistema hidrológico de esta área geográfica está constituido por el río Papaloapan, que es la corriente principal, cuyos principales afluentes son los ríos: Santo Domingo, Blanco, San Juan, y Tesechoacán; y sus principales efluentes son los ríos Limón, Acula y Blanco.

En la parte baja de la cuenca hay un conjunto de lagunas y ríos que se comunican con el mar a través de una boca (Figura 1.5) y que forman lo que aquí se denomina *Estuario del Papaloapan*. Existe un intercambio significativo de flujos modulado por un rango de marea de aproximadamente 80 cm que da lugar a un régimen estuarino. Este sistema se extiende longitudinalmente en dirección este-oeste a lo largo de aproximadamente 37 km y el sistema lagunar se introduce tierra adentro hasta 10 km. El canal principal hacia el mar tiene una ancho variable que va de 400 m en su parte más

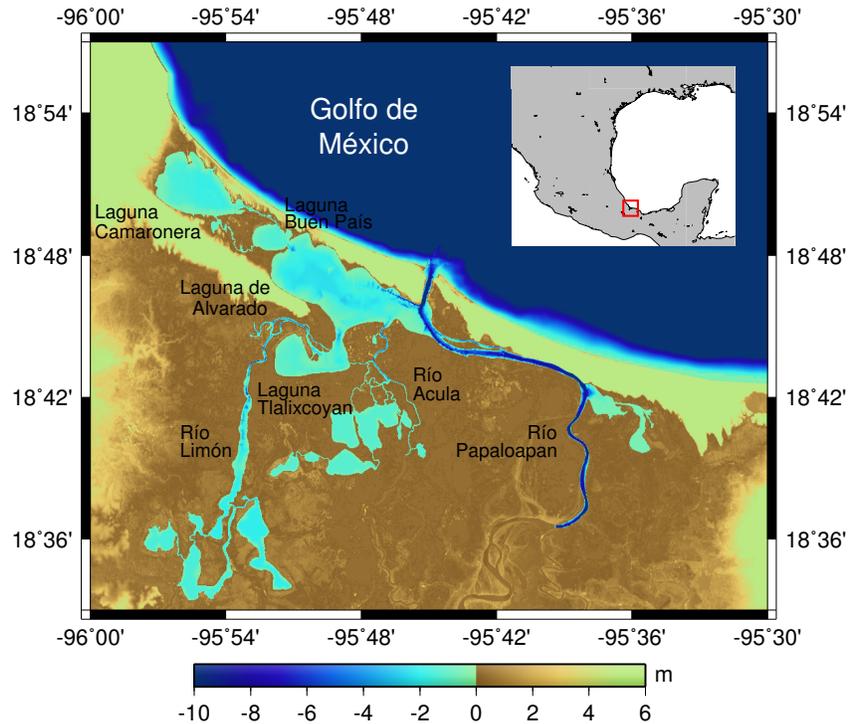


Figura 1.5: Ubicación del estuario del Papaloapan y mapa batimétrico. La integración batimétrica fue hecha con ayuda de la Ing. Maria Elena Osorio Tai.

angosta hasta 1.1 km en la Boca, alcanzando una profundidad máxima de 18 m. Las lagunas principales abarcan las siguientes áreas: Camaronera 21.6 km²; Buen País 4.8 km²; Alvarado 46.7 km² y Tlalixcoyan 12.1 km² que, en conjunto, representan menos del 0.2% del área de la cuenca. Los principales ríos son el Papaloapan, con un gasto medio anual de 650 m³/s, y el Río Blanco, con un gasto medio anual de 68 m³/s, pero ambos con una gran variabilidad a lo largo del año.

La llanura costera en esta zona del País, es una planicie sedimentaria cuyo origen está íntimamente relacionado con la regresión marina del océano Atlántico, iniciada en el terciario inferior y debida al relleno gradual de la cuenca oceánica, donde fueron acumulados grandes volúmenes de materiales rocosos provenientes del continente. El rejuvenecimiento continuo de la plataforma costera ha permitido la erosión subsecuente de los depósitos marinos terciarios, que actualmente tienen poca elevación sobre el área [10].

El tipo de sedimentos es arenoso, limo-arcilloso y areno-limo-arcilloso. Prácticamente todo el contorno de las lagunas y los ríos que componen el sistema se rodean de manglares; y en pequeños tramos se encuentran pastos halófitos como palmeras y árboles de tamaño mediano.

Hasta ahora se han introducido los fundamentos básicos de la teoría de estuarios y el area de estudio, el primero con la finalidad de generar un marco de referencia para los siguientes capítulos. En el siguiente capítulo se presenta la metodología utilizada para generar la información necesaria para este estudio, además, se describe la física subyacente al comportamiento particular presentado en los resultados del análisis de nivel del mar y de corrientes.

Capítulo 2

Datos y metodología

El estado actual de las lagunas y los ríos del estuario del Palaloapan se estudia con el fin de identificar los distintos procesos físicos que gobiernan la respuesta hidrodinámica del sistema, así como la forma en que los procesos se acoplan entre ellos. Para tal propósito se llevaron a cabo mediciones de nivel del mar, hidrográficas, de corrientes y batimétricas a través de seis campañas de muestreo en las cuales se realizaron alrededor de 49 estaciones de CTD en cada una, se instalaron y recuperaron 11 sensores de Presión/Temperatura, y se colocó un corrientímetro en la boca del estuario. En la Tabla 2.1 se resumen las fechas de las seis campañas realizadas. Además, se utilizaron datos meteorológicos del pronóstico operativo del grupo Interacción Oceano-Atmósfera (IOA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera producto del modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) y datos de gasto del río Papaloapan de estaciones hidrométricas del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional.

No. de Campaña	Fecha
1	28 y 29 Nov, 2008
2	1 y 2 Ago, 2011
3	3-5 Dic, 2011
4	18-20 Mar, 2012
5	19 y 20 May, 2012
6	9 y 10 Sep, 2012

Cuadro 2.1: Relación de número y fecha de las campañas en el estuario del río Papaloapan.

2.1 Nivel del mar

2.1.1 Red de muestreo

El nivel del mar se midió en once sitios cubriendo las lagunas, ríos y la Boca del estuario (Figura 2.1) en un periodo aproximado de Agosto de 2011 a Septiembre de 2012, los sitios se escogieron con el propósito de tener datos representativos del nivel del mar en las lagunas y ríos principales. El periodo exacto, la profundidad a la que fueron colocados, así como las coordenadas de cada sensor se muestran en la Tabla 2.2. Los sensores de presión y temperatura utilizados son marca HOB0, modelo U20 Titanium Water Level Data Logger U20-001-01, los cuales son recomendados para su utilización en agua salada y se caracterizan por tener una gran precisión y baja demanda en su mantenimiento. Estos sensores fueron programados con el software HOB0ware Pro para medir con un intervalo de muestreo de 15 min. Los sensores se colocaron en bases que constan de dos barras de acero en forma de cruceta y un espárrago que las une, en el cual se coloca el sensor (Figura 2.3 (b)). Estas bases fueron colocadas en el fondo de la laguna cuya profundidad varía de acuerdo a cada punto. Los datos proveen información de la elevación total del nivel del mar, en centímetros, y de la temperatura, en grados Celsius, en tiempo del meridiano de Greenwich (GMT).

2.1.2 Extracción del residual del nivel del mar y la interacción mareal

El nivel del mar se compone de un nivel medio, una elevación por marea y una componente residual, esta elevación residual es el resultado de una combinación de procesos que influyen el nivel del mar y depende de la ubicación en la que nos encontremos sobre el oceano. En el caso de estuarios, dichos procesos pueden ser: forzamiento meteorológico, marea de tormenta, estratificación y flujo inducidos por el río, *run up* debido al oleaje y Coriolis. En este contexto, es importante tener conocimiento sobre que causa la elevación total del mar tanto para ingeniería y manejo costero como para escenarios de incremento del nivel del mar. Por lo tanto, se requiere un residual preciso en combinación con un buen pronóstico de marea para obtener un buen entendimiento de la elevación total. En este estudio se utilizan técnicas de análisis armónico clásico y de filtrado tales como las descritas por Brown et al (2012), para extraer la marea, obtener el residual asociado y estimar los componentes de este residual de los registros de nivel del mar de cada uno de los sensores colocados en el sistema.

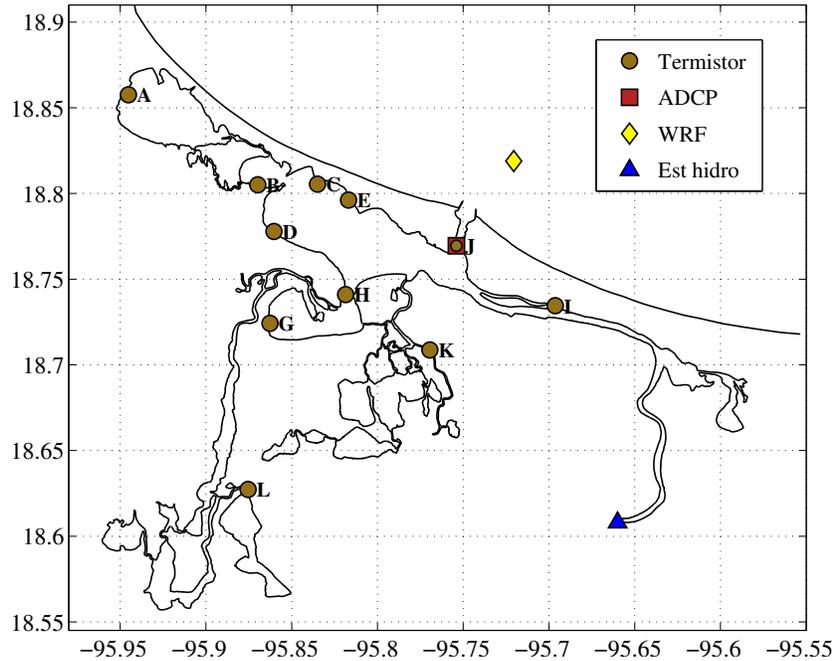


Figura 2.1: Ubicación de los sensores de presión y temperatura (círculos), el corrientímetro (cuadrado), el punto de malla donde se extrajo información meteorológica (diamante) y la estación hidrométrica de la CONAGUA (triángulo).

En el sistema estuarino del río Papaloapan la marea domina la varianza e interactúa de una manera particular con los procesos que inducen el residual, es decir, la elevación del residual también puede ser fuertemente afectada por las interacciones no-lineales entre estos procesos físicos y la marea, por ejemplo, la rapidez de propagación de la onda de marea puede ser influida por cambios en la profundidad debido a marea de tormenta y viceversa. En consecuencia, un residual obtenido por algún método de una serie de tiempo de elevación total, contendrá energía en frecuencias mareales en respuesta a un cambio de fase de la marea inducido, conforme se propaga en aguas someras. Dado que el paso de sistemas meteorológicos es independiente de la marea, si el nivel del mar fuera simplemente una superposición lineal de la marea y esta elevación, entonces el pico del residual ocurriría en cualquier momento. La física subyacente a esta interacción se representa en la figura 2.2 de la siguiente manera [7], asumamos que la línea punteada en la figura 2.2 representa la marea pronosticada utilizando análisis armónico y la línea sólida representa la elevación del nivel del mar observada. En este caso, podemos pensar que la marea llega antes que lo pronosticado (debido a efectos meteorológicos por ejemplo) aunque no hay un cambio claro en la

Sensor	Periodo de medición	Prof (m)	Lon O	Lat N
Camaronera (A)	1 Ago 2011 - 8 Sep 2012	1.13	95° 56' 42.8"	18° 51' 27.4"
Buen País (B)	1 Ago 2011 - 6 Ago 2012	1.15	95° 52' 11.2"	18° 48' 18.1"
Alvarado 1 (C)	8 Dic 2011 - 8 Sep 2012	1.01	95° 50' 05.9"	18° 48' 19.6"
Alvarado 2 (D)	8 Dic 2011 - 9 Sep 2012	0.87	95° 51' 37.2"	18° 46' 40.3"
Alvarado 3 (E)	8 Dic 2011 - 9 Sep 2012	1.09	95° 49' 0.7"	18° 47' 46.1"
Tlalixcoyan (G)	2 Ago 2011 - 8 Sep 2012	1.09	95° 51' 45.5"	18° 43' 27.2"
Tlalix boca (H)	2 Ago 2011 - 8 Sep 2012	1.12	95° 49' 07.0"	18° 44' 27.6"
Papaloapan (I)	2 Ago 2011 - 9 Sep 2012	0.97	95° 41' 46.8"	18° 44' 04.2"
Boca (J)	1 Ago 2011 - 4 Dic 2011	4.31	95° 45' 14.3"	18° 46' 10.2"
Acula (K)	11 Ago 2011 - 8 Sep 2012	1.21	95° 46' 10.0"	18° 42' 31.1"
Limón (L)	10 Ago 2011 - 8 Sep 2012	1.10	95° 52' 31.7"	18° 37' 38.3"

Cuadro 2.2: Periodos de medición y especificaciones de los sensores en cada ubicación.

amplitud de la curva. Si se define como "residual" a la diferencia entre las observaciones y lo pronosticado, entonces se obtiene la línea discontinua, la cual tiene el mismo periodo que la marea y un máximo en la llenante.

Aunque el desfase entre la marea pronosticada y la elevación observada es el mecanismo físico clave en la generación de un conjunto de picos en el residual con frecuencia mareal, Horsburgh (2007) [7] encontró otro mecanismo importante el cual observó como el responsable de generar una elevación en el residual considerablemente más grande en marea baja que en marea alta. Esta producción del residual modulada por la marea es también otro mecanismo que controla el comportamiento del residual calculado para los sitios en el estuario del Papaloapan. Pugh (1987) y Horsburgh (2007) mostraron como se puede obtener una expresión idealizada en donde la pendiente de la superficie del mar ($\delta\eta/\delta x$) se encuentra en equilibrio con un campo de viento constante:

$$\frac{\delta\eta}{\delta x} = C \frac{W^2}{H} \quad (2.1.2.1)$$

donde W es la rapidez del viento en la dirección x , H es la profundidad total del agua y C es una constante que combina los efectos de la gravedad, la densidad y un coeficiente de arrastre empírico. Por otro lado, el campo de viento no es constante, por lo tanto tal equilibrio es improbable; sin embargo, la ecuación 2.1.2.1 plantea el punto fundamental de que el esfuerzo del viento es más efectivo aumentando el nivel del mar en aguas someras que en aguas profundas. Por ejemplo, durante un evento de Norte, los vientos fuertes soplan persistentemente por más de 24 horas, y abarcan más de un ciclo de marea. En este caso se podría esperar que el aumento del residual debido a esfuerzo del viento sea mayor en marea baja que en marea alta y esto es evidente en

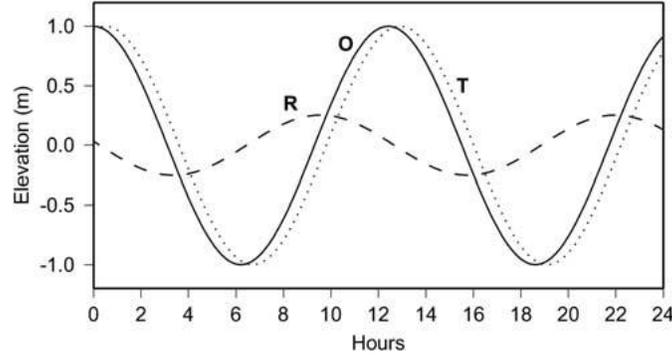


Figura 2.2: Diagrama esquemático de una sinusoidal cuya fase es alterada pero cuya frecuencia y amplitud permanecen igual. La línea sólida representa las observaciones (O), la línea punteada representa la marea pronosticada (T) y la línea discontinua representa el residual obtenido (R). Figura tomada de Horsburgh (2007) [7].

algunos eventos analizados en la sección 4.1.

Aquí se utilizan los términos *elevación total* para referirse a la serie de tiempo de elevación observada; *marea pronosticada* para referirse a la marea astronómica pronosticada a partir de los constituyentes obtenidos del análisis armónico de la elevación total. Así mismo, *residual armónico* al residual obtenido de la substracción de la marea pronosticada a la elevación total.

Para separar la parte mareal, de la no-mareal, de la elevación total, se utilizaron y combinaron dos métodos, el primero fué el análisis armónico de marea clásico. En esta aproximación la señal mareal es modelada como la suma de un conjunto finito de sinusoidales a frecuencias específicas relacionadas con parámetros astronómicos y se utiliza un ajuste de mínimos cuadrados para determinar la amplitud y fase relativas de cada frecuencia dentro de la elevación total. Se utilizó el paquete T_TIDE, desarrollado por Rich Pawlowicz et al. (última versión disponible en: archivo zip). Esta herramienta utiliza 24 constituyentes en el análisis, los cuales dependen de la ubicación geográfica de la serie de tiempo, hace correcciones nodales, inferencia de constituyentes, etc. Existen algunas desventajas al usar análisis armónico clásico tales como el requisito de tener series de tiempo de por lo menos ~ 18.6 años de longitud (ciclo donde se observa la máxima inclinación de la luna respecto al plano ecuatorial de la Tierra) para resolver todas las frecuencias listadas, o la respuesta de la propagación de la onda de marea conforme se aproxima a la costa etc., sin embargo este tipo de problemas son manejados por T_TIDE de tal modo que el error asociado a estos es minimizado,

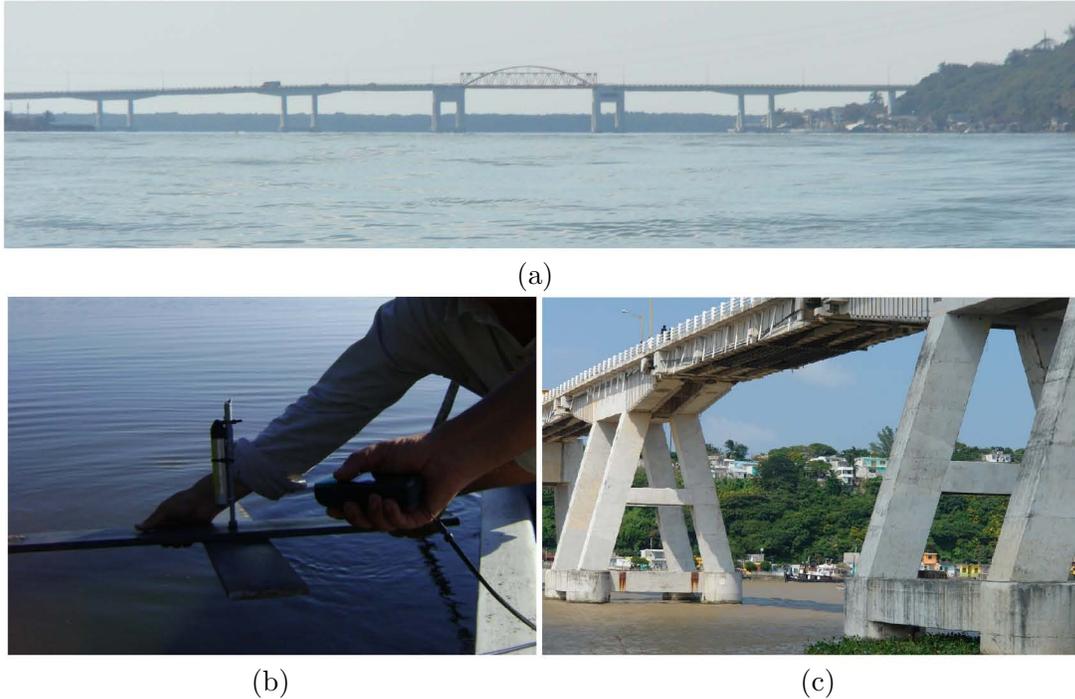


Figura 2.3: (a) Puente Alvarado visto desde adentro de la laguna, (b) cruceta con sensor de presión y (c) pilar del puente Alvarado donde se colocó el ADCP.

obteniendo así reportes de amplitud, fase y parámetros de elipse de corrientes con un estimado del 95 % de intervalos de confianza [14].

El segundo método para la estimación de residuales es un *filtro paso-bajo*, de esta manera es posible remover todas las oscilaciones de periodo corto (< 26 hrs), la principal característica de esta técnica aplicada a las observaciones es que permite una valoración directa de la componente del residual que no contiene influencia de la interacción de los procesos que lo producen con la marea. Se escogió un filtro *ventana de Lanczos* del tipo *coseno*. Este tipo de filtros son filtros rectangulares (ideales) que incorporan un factor multiplicativo (la ventana de Lanczos) para asegurar una atenuación más rápida de las ondulaciones que se generan a los lados de la ventana (fenómeno de Gibbs) evitando así la fuga de frecuencias no deseadas. Los parámetros que se escogieron para el diseño de este filtro fueron una frecuencia de corte de 26 horas y un número de coeficientes de Fourier igual a 100.

El grado en el cual el análisis armónico combina la energía de la marea astronómica y la energía del residual depende de la longitud de la serie de tiempo, es decir, días, meses, años. En este caso, ya que la mayoría de las series de tiempo tienen una longitud de ~ 1 año, implica que cualquier interacción creando una señal no-mareal con frecuencias que corresponden a las de los constituyentes de marea, es improbable que continúe a largo plazo, tomando el ejemplo mencionado en la sección 3.1.2 como referencia, cualquier interacción con marea de tormenta será estacional, y por lo tanto dicha señal será conservada en el residual armónico. Por otro lado, a corto plazo (pocos meses) una interacción fuerte persistente podría influenciar el ajuste de los constituyente de marea, y de este modo, una modulación mareal importante del residual puede ser perdida cuando se remueve la marea pronosticada. Sin embargo, lo observado en la Boca (Figura 3.10) puede ser erróneamente interpretado como interacción mareal, debido a ligeras discrepancias entre la marea pronosticada y la marea real. Este tipo de discrepancias pueden ocurrir debido a asimetría de la marea formándose dentro del estuario, lo cual genera armónicos mayores [2].

A fin de cuantificar la contribución de la elevación de la marea astronómica en la elevación total, en este estudio se utiliza el Coeficiente de Determinación (R^2) en su forma de varianza explicada, para determinar la variación de la elevación total explicada por la marea pronosticada, el cual está definido como:

$$R^2 = \left[1 - \frac{Var_{res}}{Var_{tot}} \right] \times 100 = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Et_i - Mp_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Et_i)^2} \right] \times 100 \quad (2.1.2.2)$$

Donde n es el número total de datos, Var_{res} es la varianza de los residuales estimados, es decir, la elevación total, Et_i , menos la marea pronosticada, Mp_i y Var_{tot} es la varianza de la elevación total, Et . El segundo término de la ecuación 2.1.2.2 está expresado como el cociente de la diferencia entre el nivel observado y el pronosticado por la marea astronómica y la varianza total, por lo tanto al restarle este término a 1, el resultado es el porcentaje de la varianza explicada por la marea pronosticada en la elevación total.

2.1.3 Asimetría de la marea

En general se sabe que la amplitud de las ondas de marea astronómica generadas en el oceano abierto se incrementan cuando se propagan en plataformas continentales someras. Es aquí donde otros procesos, incluyendo la generación de onda estacionarias, alteran las características de la onda de marea. Sin embargo es importante considerar también el efecto de fricción de fondo y otras distorsiones extraordinarias y extremas que ocurren conforme las ondas de marea se propagan en aguas costeras, incluyendo ríos y estuarios que son aún mas someros.

Mediante este mecanismo de distorsión de las ondas de marea, se generan constituyentes compuestos y constituyentes de aguas someras. Debido a la superposición de estos constituyentes, la elevación del nivel del mar y las corrientes de marea son distorsionadas al grado en que pierden su forma sinusoidal, lo cual da lugar a la *asimetría de la marea*. Los procesos físicos no-lineales son los responsables de la producción de estos constituyentes de frecuencias mayores a las de las fundamentales. Aunque existen muchos tipos de actividad no-lineal que pueden interactuar e influenciar la dinámica, hay tres factores físicos principales que pueden contribuir a la distorsión de la marea [17]:

- *Fricción de fondo*. El arrastre causado por la fricción de fondo se opone a las corrientes fuertes que se desarrollan en aguas someras, un proceso que eventualmente remueve energía de la marea que se propaga y reduce la amplitud de la onda. La ley que relaciona la rapidez de la corriente y el arrastre de fondo establece que la fricción que el fondo ejerce sobre la corriente aumenta con el cuadrado de la rapidez, este es un ejemplo del significado físico del término "*no-lineal*".
- *Profundidad media del canal*. A diferencia de las olas, para la onda de marea el someramiento no es un factor esencial para su distorsión, en cambio sí lo es el hecho de que la amplitud de la marea sea comparable con la profundidad. Se sabe que la rapidez de la onda c esta dada por $c = \sqrt{gD}$, cuando la profundidad es grande comparada con la amplitud, y la longitud de onda es grande comparada con la profundidad. Dado que la rapidez disminuye conforme la profundidad disminuye, los valles de las ondas tenderán a ser rebasados por las crestas (figura 2.4). Esto da lugar a la asimetría.
- *Curvatura de la corriente*. Considerando una corriente de marea a lo largo de una costa irregular con cabos y bahías, esta tiende a seguir el contorno de la

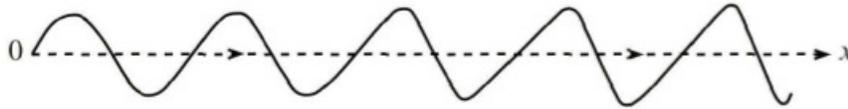


Figura 2.4: Distorsión de una onda progresiva que viaja en aguas someras en la dirección positiva x (el eje x representa la distancia). Se puede notar el corto tiempo que le toma a la onda subir conforme pasa a un observador fijo, aumentando la distorsión. Figura tomada de Pugh (2004) [17].

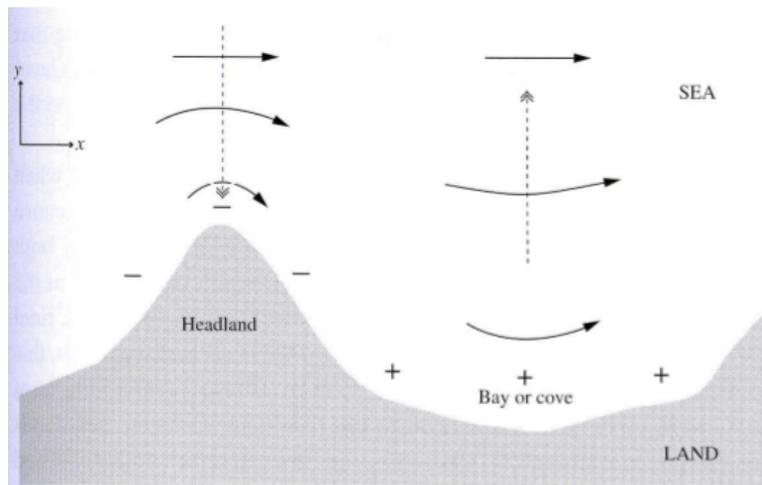


Figura 2.5: Curvatura de las líneas de corriente para el flujo de la marea cerca de la costa (líneas sólidas). Los gradientes en la superficie, los cuales producen la curvatura, están representados por las flechas punteadas, las cuales apuntan pendiente abajo. Figura tomada de Pugh (2004) [17].

costa, desviándose hacia dentro de las bahías y hacia afuera de los cabos (figura 2.5). Las fuerzas que cambian la dirección del flujo a lo largo de la costa están dadas por el gradiente de presión, cuya dirección es normal a la de las líneas de corriente, lo cual genera pendientes en la superficie del mar ocasionadas por un nivel ligeramente más bajo en los cabos y ligeramente más alto en las bahías en comparación con el nivel costa afuera. Por ejemplo, en un análisis armónico este efecto se ve reflejado en un aumento del constituyente M_4 .

2.2 Corrientes

2.2.1 Sitio de muestreo

El sitio donde se realizó la medición de corrientes fué debajo del puente que se encuentra en el canal de la Boca, a un costado de un pilar, tiene coordenadas $95^{\circ} 45' 14.3''$ W y $18^{\circ} 46' 10.2''$ N (figura 2.3 (a)). El instrumento es un corrientímetro Aquadopp Profiler marca Nortek de 600kHz (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) y mide la rapidez y dirección de la corriente en multiples capas o celdas. Se programó con el software AquaPro para que midiera a partir del 1^o de Agosto DE 2011 a las 15 hrs GMT y se recuperó el 4 de Diciembre de 2011. Se incluyeron 15 celdas de 1 metro y el intervalo de muestreo fué de 30 minutos, además se incluyó una actualización de la brújula interna cada 30 min. Finalmente se colocó a una profundidad de 18 metros en el canal mediante una estructura en forma de trípode fija al fondo (Figura 2.3 (c)).

2.2.2 La circulación estuarina

Una característica propia de los estuarios es la presencia de un gradiente horizontal de salinidad. Normalmente la salinidad disminuye del oceano hacia la cabeza del estuario debido a la entrada de agua dulce. Este gradiente horizontal de salinidad $\delta s/\delta x$ es un indicador clave para explicar la circulación estuarina, que a su vez juega un papel importante en mantener la estratificación en los estuarios. El término $\delta s/\delta x$ induce un gradiente de presión $\delta p/\delta x$ que varía verticalmente, el cual se puede expresar como la influencia combinada de la pendiente de la superficie del agua $\delta \eta/\delta x$ y $\delta s/\delta x$ [22]

$$\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} = g \frac{\delta \eta}{\delta x} + \beta g \frac{\delta s}{\delta x} (H - z) \quad (2.2.2.1)$$

donde ρ es la densidad del agua (dominada por la salinidad), β es un coeficiente de contracción salina, g es la aceleración debida a la gravedad, H es la profundidad total, y z la coordenada vertical medida desde el fondo. Hay que notar que el segundo término del lado derecho de la ecuación 2.2.2.1, $\beta g(\delta s/\delta x)(H - z)$, es cero en la superficie ($z=H$) y tiene un valor máximo en el fondo, y esta orientado hacia la cabeza del estuario. La pendiente de la superficie del agua promediada sobre un ciclo de marea se inclina en la dirección opuesta a la del gradiente de presión, es decir, hacia la boca del estuario, con una magnitud tal, relativa al gradiente de salinidad, como para que el gradiente de presión se invierta en algún lugar cerca de la mitad de la columna del

agua. De esta forma el agua superficial se dirige hacia el mar y el agua en el fondo hacia el interior del estuario.

Por otro lado, la fuerza más importante que interviene en el balance del gradiente de presión es el esfuerzo interno (o flujo vertical de momento) que actúa en el flujo cortante del estuario. Este esfuerzo está representado en términos de una viscosidad turbulenta A_z :

$$\tau = \rho A_z \frac{\delta u}{\delta z} \quad (2.2.2.2)$$

donde τ es el esfuerzo (en unidades de *fuerza/area* o *Pascales*) y $\delta u/\delta z$ es la cizalla vertical del flujo horizontal. Las unidades de A_z son *longitud²/tiempo*. La magnitud de la viscosidad turbulenta es impuesta por la intensidad del flujo de marea y la estratificación; sus valores típicos en estuarios varían de 10^{-4} a 10^{-2} m^2/s . A_z varía considerablemente en espacio y tiempo debido a cambios en el forzamiento, pero el balance de momento puede ser aproximado usando un valor constante que represente una viscosidad turbulenta "efectiva" promediada sobre un ciclo de marea.

La ecuación que relaciona el gradiente de presión y la circulación estuarina es una representación muy simplificada de la ecuación de momento horizontal donde se toman en cuenta varias suposiciones como el hecho de que se trate de un flujo en estado estacionario, movimiento lineal, sin rotación y solo fricción en la vertical:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau}{\delta z} = A_z \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = g \frac{\delta \eta}{\delta x} + \beta g \frac{\delta s}{\delta x} (H - z) \quad (2.2.2.3)$$

aquí se asume que la viscosidad turbulenta es constante en la vertical y la magnitud de la pendiente de la superficie del agua depende del flujo medio del río. Resolviendo la ecuación 2.2.2.3 para la velocidad u , se tiene:

$$u(z) = \frac{gGH^3}{48\rho A_z} \left[9 \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) - 8 \left(1 + \frac{z^3}{H^3} \right) \right] + \frac{3R}{2H} \left[\left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) \right] \\ + \frac{\tau_a H}{4\rho A_z} \left[4 \left(1 - \frac{z}{H} \right) - 3 \left(1 - \frac{z^2}{H^2} \right) \right] \quad (2.2.2.4)$$

donde $G = \beta \delta s / \delta x$; $\tau_a = \beta \rho_a C_d w^2$ es el esfuerzo del viento sobre la superficie, ρ_a la densidad del aire, C_d el coeficiente de arrastre y w la rapidez del viento; y R el gasto del río por unidad de longitud.

La forma del perfil de velocidad obtenida a partir de la ecuación 2.2.2.4 debe ser considerada una solución cualitativa, ya que la estructura real vertical de la velocidad en un estuario difiere debido a variaciones espaciales y temporales de la viscosidad turbulenta A_z , así como a otros factores tales como advección lateral. Sin embargo, produce la forma y magnitud generales de la circulación estuarina, y es una aproximación útil para analizar su influencia sobre la estratificación y el balance de salinidad.

Por otro lado, existe una formulación un tanto diferente si el flujo del río es pequeño comparado con la circulación estuarina, pero una descripción más detallada de esta va más allá del objetivo de esta sección [22].

2.3 Batimetría y topografía

La parte baja de la cuenca del río Papaloapan se compone de una planicie con extensas zonas muy bajas cubiertas de humedales, por lo tanto se generó un mapa batimétrico y topográfico de la región basado en una recopilación de la mejor información con que se cuenta en la actualidad, con el objetivo de tener la mayor resolución posible. Para la integración batimétrica se utilizaron datos de sondeos realizados en distintas campañas, de la Carta Náutica de la Secretaría de Marina del Puerto de Alvarado y datos de Lidar proporcionados por el INEGI. Debido a las características de la región, también se consideraron los ríos que desembocan en la laguna, midiendo su profundidad a lo largo de su eje y en secciones transversales.

El levantamiento batimétrico se realizó con una ecosonda marca Garmin de la serie 440 con un GPS integrado que tiene una precisión de 3 metros con el sistema WAAS activado. El sonar tiene integrado un sensor de temperatura, con un rango de medición de -15°C a 55°C , y la máxima profundidad que puede medir es de 450 metros aproximadamente, con una frecuencia de 200 kHz.

También se utilizaron mediciones de CTD ya que, cuando éste mide hasta el fondo, nos permite complementar la información en zonas donde se tienen pocos datos de

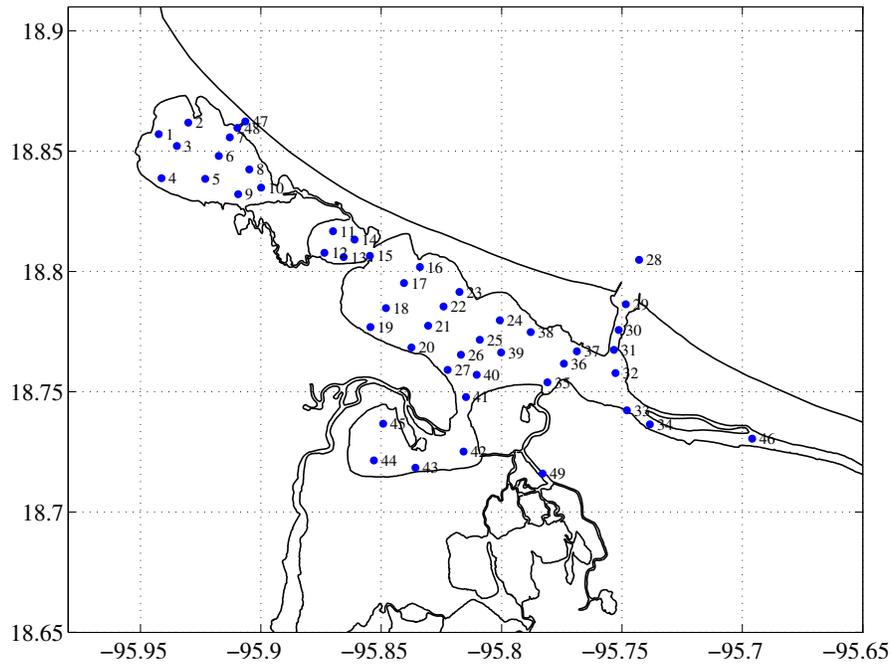


Figura 2.6: Red de estaciones de CTD.

ecosondeo. Finalmente se interpoló la batimetría utilizando el sistema de información geográfica ArcGis, mediante el método de spline bicúbico, y se usó el software Matlab para integrar la información topográfica, de batimetría oceánica y de batimetría de lagunas y ríos. En la figura 1.5 se muestra el mapa resultante.

2.4 Hidrografía

Se diseñó una red de estaciones donde se realizaron perfiles de temperatura y salinidad en la columna de agua en las lagunas y ríos del estuario, a partir de mediciones discretas a una alta resolución, utilizando un instrumento de Profundidad Temperatura y Conductividad (CTD por sus siglas en inglés) modelo SeaCAT Profiler CTD, SBE 19plus V2 marca Sea-Bird Electronics, el cual fue programado para medir a una frecuencia de 4Hz y que tiene una memoria interna en la cual se van guardando los datos de cada perfil y que posteriormente son descargados y procesados utilizando el software de Sea-Bird Instruments. Se realizaron 49 estaciones en cada campaña, las cuales cubren las lagunas Camaronera, Buen País, Alvarado y Tlalixcoyan, la Boca y un segmento de los ríos Papaloapan y Acula. En la figura 2.6 se muestra la red de

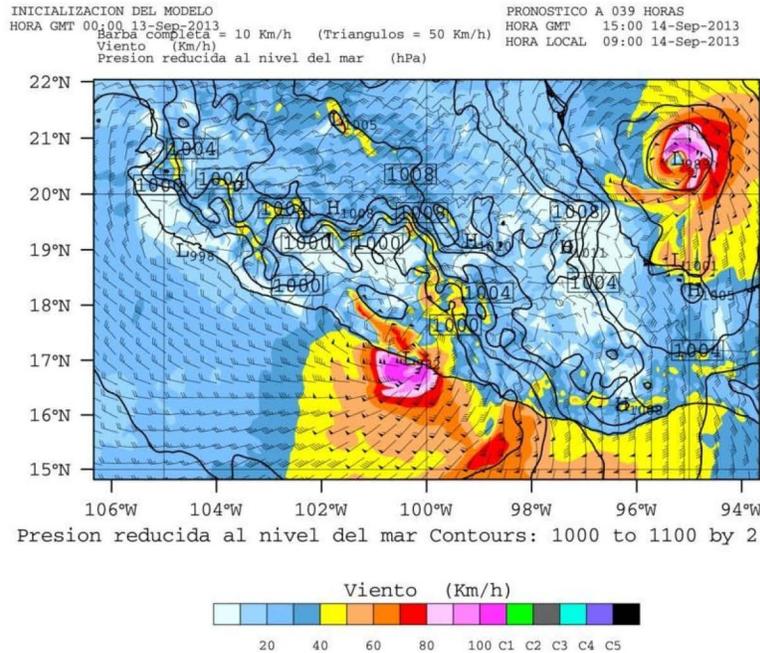


Figura 2.7: Dominio 2 del pronóstico operativo del grupo Interacción Oceano-Atmósfera.

estaciones de CTD.

2.5 Datos meteorológicos

Una componente importante en el estudio de la respuesta hidrodinámica del estuario del Papaloapan es su reacción al forzamiento atmosférico. Con ella es posible determinar la contribución meteorológica a los distintos procesos que ocurren en el sistema. Debido a esto, se extrajo información de viento a una altura de 10 metros y presión reducida al nivel del mar producto del modelo numérico Weather Research and Forecasting Model (WRF), el cual actualmente se corre en modo operativo por el grupo Interacción Oceano-Atmósfera (Fig. 2.7). Básicamente, en este sistema se tienen operando dos dominios para la república mexicana: el primero abarca toda la república, el Golfo de México y parte del Océano Pacífico, su resolución espacial es de 20 km en la horizontal; el segundo dominio está anidado y solo abarca el centro de la república, su resolución espacial es de 6.66 km. Para el propósito de este estudio, se acordó adecuado utilizar un punto de malla cerca de la Boca del estuario costa afuera (Fig. 2.1), tomado del segundo dominio. El modelo corre cada 24 horas y tiene un tiempo de simulación

de 5 días, por lo tanto solo se extrajeron las series de tiempo correspondientes a las primeras 24 horas de cada corrida diaria y después se concatenaron los datos extraídos, el resultado final fue una serie de tiempo con datos horarios. El periodo de tiempo utilizado fue del 1º de Agosto de 2011 al 31 de Septiembre de 2012.

2.6 Datos Hidrométricos

Como se mencionó en un principio, el río Papaloapan es uno de los más importantes en el país y con los caudales más grandes, por lo cual se obtuvo información de gasto de las estaciones hidrométricas que se encuentren en el cauce del río. La fuente fue el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) el cual es administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). La estación que se utilizó en este estudio se encuentra aguas arriba de la Boca y aguas abajo de la presa Miguel Alemán. Su ubicación aproximada se muestra en la figura 2.1 y se resume en la tabla siguiente:

Nombre	Clave	Periodo de muestreo	Dist de la Boca	Lon (O)	Lat (N)
Chacaltianguis	28135	Abril, 1973 - Dic, 2011	89 km	95° 50' 10"	18° 20' 25"

Cuadro 2.3: Estación hidrométrica de la CONAGUA en el cauce del río Papaloapan.

La información histórica para hidrometría en esta base de datos consiste básicamente de datos diarios, mensuales, anuales, limnigrama, hidrograma y sedimentos. Para nuestro propósito utilizamos la información de los hidrogramas, es decir, un archivo que incluye la fecha en que ocurre el gasto, hora en que ocurre el gasto y el gasto instantáneo (m^3/s). El periodo de medición que se procesó y que posteriormente se utilizó para este estudio comprende del 1º de Agosto de 2011 al 31 de Diciembre de 2011. Durante este periodo se registraron datos a una frecuencia horaria o menor, de esta manera fue posible observar la variación a escala mareal y submareal del gasto y su correlación con los demás procesos que ocurren en el sistema.

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1 Nivel del mar

Los resultados presentados en esta sección se enfocan en la descripción de la variación del nivel del mar a escala sub-mareal y mareal, ya sea por contribuciones meteorológicas genuinas o en su caso por el efecto de la interacción entre la marea y el forzamiento meteorológico [7] [23], como se describió en el capítulo 3.1.2, con ayuda de la información meteorológica obtenida del pronóstico operativo del grupo IOA. Se espera que algunas de las características observadas en estos resultados sirvan en el manejo de riesgo por inundaciones en la región, así como de una línea base para futuros experimentos numéricos de escenarios de aumento del nivel del mar.

De acuerdo al factor de forma[18], FF, el régimen de marea dominante que se observa en la región es diurno (Tabla 3.1), a excepción de la Boca y el río Limón cuyos valores son más bajos, lo cual significa que la marea pierde su característica semidiurna conforme se propaga hacia adentro del estuario, con probables implicaciones en la circulación. La mayor amplitud en el rango de marea se observó en la Boca con un valor medio de 28 cm (Tabla 3.1) y hasta 80 cm durante mareas vivas, seguido del Río Papaloapan (figura 3.1 a) y la laguna de Alvarado (figura 3.2 a) con valores medios que van de los 22.7 a los 24.5 cm y hasta 60 cm en mareas vivas, mientras que las menores amplitudes se observaron en el Río Limón (figura 3.3 a) y en la Laguna Camaronera (figura 3.4 a) en donde los rangos de marea medios son del orden de 7 cm y no sobrepasan los 20 cm durante mareas vivas. Por otro lado, el *Coefficiente de Determinación* definido en la ecuación 2.1.2.2 señala que en la mayoría de los sitios,

Ubicación	FF	Régimen	Rango (cm)	R^2 (%)
Boca (J)	2.6	Mixta, diurna	27.98	71
Camaronera (A)	3.3	Diurna	6.87	30
Buen País (B)	3.3	Diurna	22.02	63
Alvarado 1 (C)	3.3	Diurna	23.50	53
Alvarado 2 (D)	3.3	Diurna	22.77	68
Alvarado 3 (E)	3.4	Diurna	23.50	65
Tlalixcoyan (G)	3.1	Diurna	19.09	46
Tlalix boca (H)	3.7	Diurna	20.6	58
Papaloapan (I)	3.1	Diurna	24.52	67
Acula (K)	3.8	Diurna	16.52	51
Limón (L)	2.7	Mixta, diurna	7.15	52

Cuadro 3.1: Factor de Forma (FF), que determina el régimen de marea, el Rango de Marea medio para el periodo de medición y el Coeficiente de Determinación (R^2), que indica la contribución de la elevación de la marea pronosticada a la elevación total, para cada ubicación. Su ubicación se muestra en la figura 2.1

la elevación debida a la marea pronosticada domina sobre cualquier otro proceso en la contribución a la elevación total (Tabla 3.1), en general, en la Boca, el río Papaloapan, y la laguna de Alvarado, R^2 es mayor, lo cual es consistente con el hecho de que son los sitios más próximos al mar y por lo tanto tienen mayor rango de marea, en el río Limón, el río Acula y la laguna Tlalixcoyan la contribución es de $\sim 50\%$ y en la laguna Camaronera la contribución es más pequeña.

En la Tabla 3.2 se presentan la amplitud y la fase (GMT), resultado del análisis armónico, de los principales constituyentes de marea para cada ubicación. En la Boca el constituyente más importante es la O_1 con 13.5 cm, seguida de la K_1 con 12.3 cm y la M_2 con 7.8 cm. Adentro del estuario el constituyente O_1 sigue siendo la que tiene mayor amplitud, con valores entre 8.6 y 11.0 cm en el río Papaloapan y las lagunas de Alvarado, Buen País y Tlalixcoyan y alrededor de 2.0 cm en la laguna Camaronera y el Río Limón. El constituyente K_1 sigue siendo la segunda en importancia adentro del estuario.

Una vez que se obtiene el residual armónico, a cada uno se le aplicó un filtro de Lanczos, como se describió en la sección 3.1.2, para obtener la componente inducida por fenómenos atmosféricos, como tormentas o nortes. El resultado fue la remoción de cualquier oscilación diurna causada ya sea por la brisa marina o seiche. A esta componente se le llamó *residual filtrado* (figuras 3.1 d - 3.5 d).

	O_1		K_1		Q_1		P_1		M_2	
	Amp (cm)	Fase ($^\circ$)								
Boca (J)	13.55	18.11	12.27	22.51	3.1	6.07	-	-	7.8	252.08
Camaronera (A)	2.06	106.59	1.72	114.57	0.39	83.87	0.2	173.17	0.33	10.36
Buen País (B)	10.26	44.10	10.01	51.95	2.04	24.01	2.81	54.72	5.73	299.91
Alvarado 1 (C)	11.05	38.96	10.77	43.86	2.07	19.40	3.6	48.36	6.11	288.15
Alvarado 2 (D)	10.88	38.98	10.68	45.87	2.06	21.77	3.35	49.28	6.06	288.29
Alvarado 3 (E)	11.00	38.94	10.74	43.50	2.07	19.65	4.6	359.99	6.03	287.70
Tlalixcoyan (G)	8.63	47.21	8.61	57.04	1.63	34.73	2.50	60.83	4.83	310.25
Tlalix boca (H)	9.66	42.20	10.74	43.50	1.87	28.72	2.81	51.66	5.19	297.07
Papaloapan (I)	11.21	30.25	11.35	34.98	2.22	14.51	4.10	41.74	6.37	277.48
Acula (K)	7.23	59.18	7.06	66.04	1.32	43.14	2.23	68.34	3.22	315.58
Limón (L)	2.09	96.63	2.14	113.63	0.31	81.6	0.97	117.46	0.5	229.36

Cuadro 3.2: Amplitud y fase respecto al meridiano de Greenwich de las principales componentes de marea para cada sitio. Los valores de los parámetros son reportados con un estimado del 95% de intervalos de confianza. Su ubicación se muestra en la figura 2.1

En las figuras 3.6 - 3.9 se graficaron las series de tiempo del residual filtrado y de la temperatura filtrada con un filtro de medias móviles de 26 horas, para cada ubicación, junto con la rapidez y dirección del viento a una altura de 10 metros sobre la superficie, la presión atmosférica multiplicada por un factor -1 y el gasto del río Papaloapan, los tres filtrados con medias móviles de 26 horas para un punto de malla cerca de la Boca sobre el Golfo de México (figura 2.1) correspondiente al periodo de medición. En estas figuras se puede observar la contribución del aumento del nivel en el residual armónico debido a procesos tales como Huracanes y eventos de escala sinóptica como Nortes. Estos últimos se manifiestan como un aumento en la rapidez del viento hasta 15 m/s y en la presión atmosférica hasta 1028 mb. Destaca la influencia en el nivel del mar de los Nortes del 6-7 y 25 de Diciembre de 2011, 3 y 13 de Enero, 7 y 24 de Febrero, y 4 y 21 de Marzo de 2012, en cuyos casos se observa un claro aumento del nivel del residual de alrededor de 25 cm y un consistente descenso en la temperatura del agua de 6 $^\circ$ C que pueden durar hasta una semana. También se pueden observar los aumentos del nivel provocados por los huracanes Debby y Ernesto, los cuales ocurrieron el 23 de Junio y el 8 de Agosto de 2012 respectivamente, en ambos casos se observa un aumento del nivel en el residual que dura casi 4 semanas, sin embargo la variación de la rapidez del viento y la presión atmosférica no fué tan grande como en el caso de los Nortes, lo cual podría deberse a que entra en juego la contribución de otros procesos como podría ser el aumento en el gasto de los ríos en la época de avenidas.

Por otro lado, se observa una señal de baja frecuencia con una elevación del residual

armónico hacia la primera quincena del mes de Septiembre de 2011 y un descenso gradual de la temperatura, lo cual está asociado a una elevación de todo el occidente del Golfo de México [24]. Dicho aumento es más claro y rápido en la Boca, los ríos Papaloapan y Acula (figura 3.6), en la Boca de la laguna Tlalixcoyan y adentro de ella (figura 3.7 a y b) y más paulatino en las lagunas Buen País y Camaronera (figura 3.9) y en el río Limón (figura 3.7 c).

El análisis armónico aplicado a la elevación total parece mostrar en la mayoría de los casos una variación diurna considerable en el residual armónico, lo cual sugiere que se ha dejado energía mareal en él como sucede en los ríos Acula y Limón, las lagunas Camaronera, Buen País, y de Alvarado, y en el interior y la boca de la laguna Tlalixcoyan (figuras 3.2 c, 3.3 c, 3.4 c, y 3.5 c respectivamente); en otros casos como en la Boca y el río Papaloapan (figura 3.1 c), esa variación diurna es más fuerte. Lo anterior sugiere que puede deberse a la interacción del forzamiento meteorológico con la marea, lo cual se demuestra a continuación.

La diferencia entre el residual armónico y el residual filtrado provee la componente inducida por interacción de procesos que no han sido considerados (figuras 3.1 e - 3.5 e), en este caso se obtienen mediante un filtro paso-alto. Se escogieron dos periodos de tiempo de 6 días cada uno, considerando que en estos se observara el inicio de algún evento atmosférico importante y que además se tuvieran datos en la mayoría de los sitios. Estos eventos se denominaron *Evento a* y *Evento b*. El primero para el periodo del 4 al 10 de septiembre de 2011 y el segundo del 1^o al 7 de Enero de 2012. En las figuras 3.10 - 3.12 se muestran las series de tiempo de los residuales armónicos junto con la elevación total y la marea pronosticada para los sitios mostrados en la figura 2.1, además de la rapidez y dirección del viento a 10 metros sobre la superficie, la presión atmosférica multiplicada por -1 y el gasto del río Papaloapan para el *Evento a*, periodo durante el cual se presenta la elevación de todo el occidente del Golfo de México; y en las figuras 3.13 - 3.16 para el *Evento b*, en el cual se presentó un Norte.

Durante el *Evento a*, ocurrió un aumento en la magnitud de la rapidez del viento que llegó a 17 m/s, a partir de las 12 hrs GMT del 6 de Septiembre que fué acompañado de un aumento de la elevación total respecto a la marea pronosticada y por lo tanto del residual, alcanzando hasta 20 cm por encima del nivel promedio. Es posible observar algunas características en el comportamiento del residual una vez que comienza el evento, la primera es causa del desfase entre la onda de marea pronos-

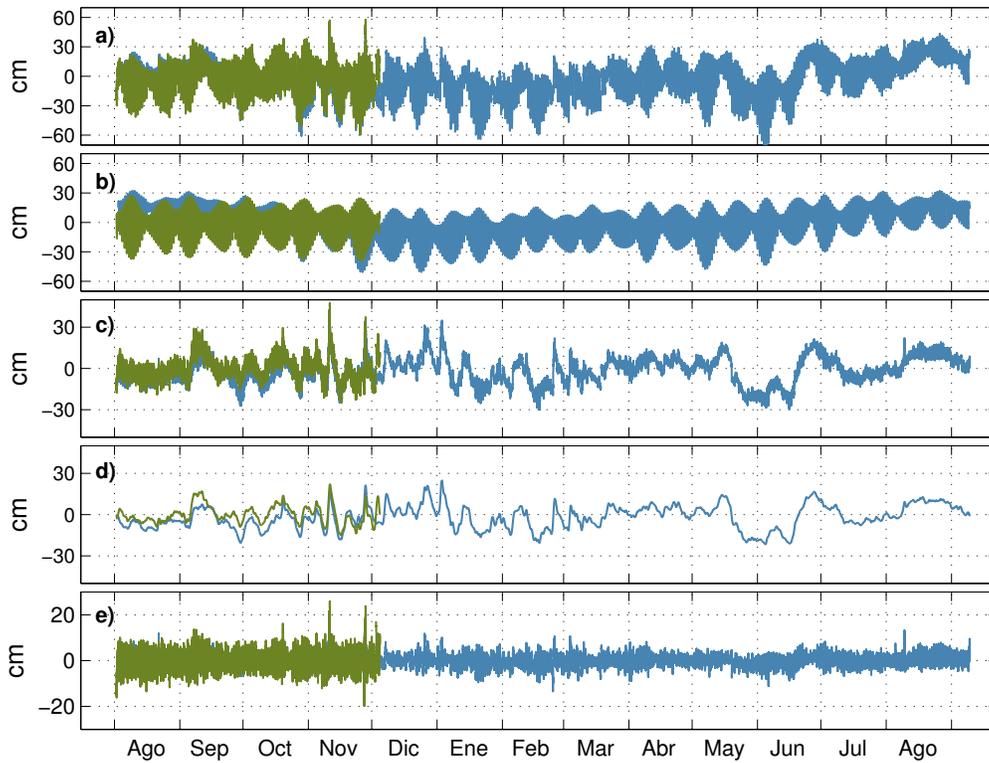


Figura 3.1: Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substrair el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la Boca (línea verde olivo) y el río Papaloapan (línea azul) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.

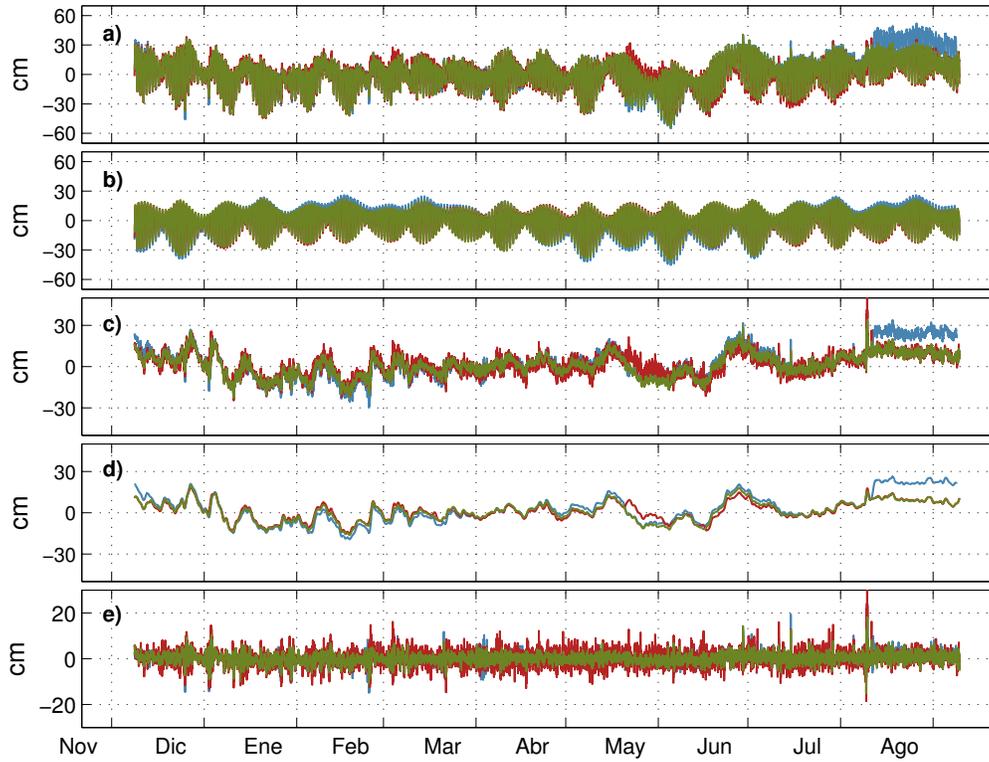


Figura 3.2: Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substrair el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la laguna de Alvarado 1 (línea azul) Alvarado 2 (línea roja) Alvarado 3 (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios están indicados en la figura 2.1.

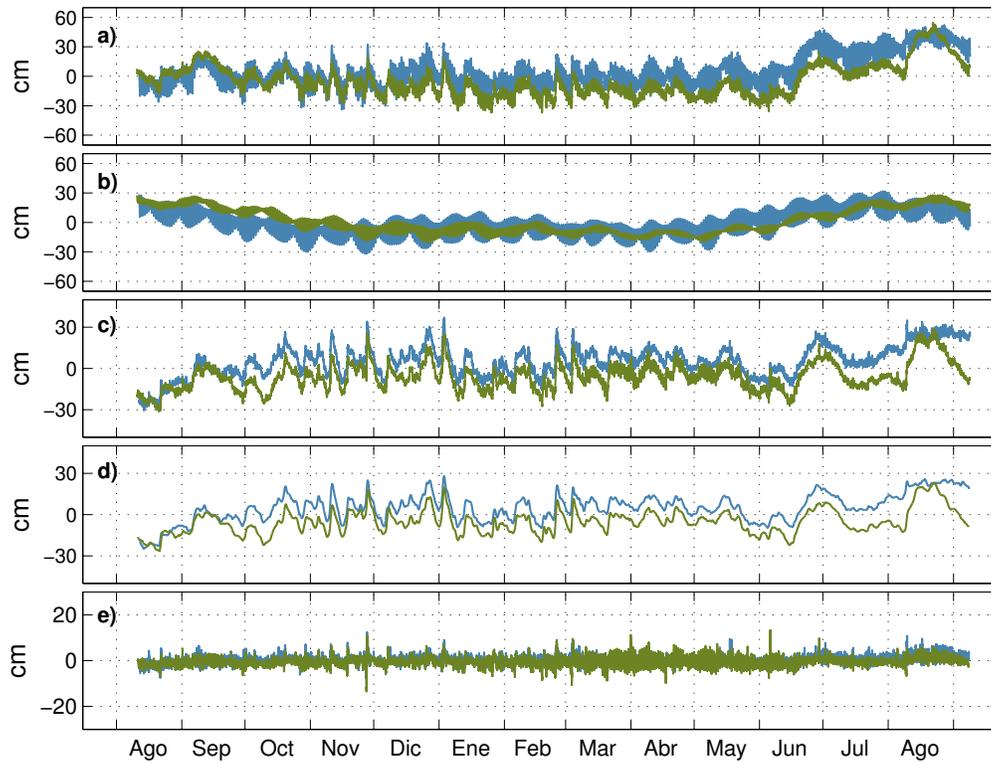


Figura 3.3: Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substrair el residual filtrado del residual armónico en los sitios del río Acula (línea azul) y el río Limón (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios están indicados en la figura 2.1.

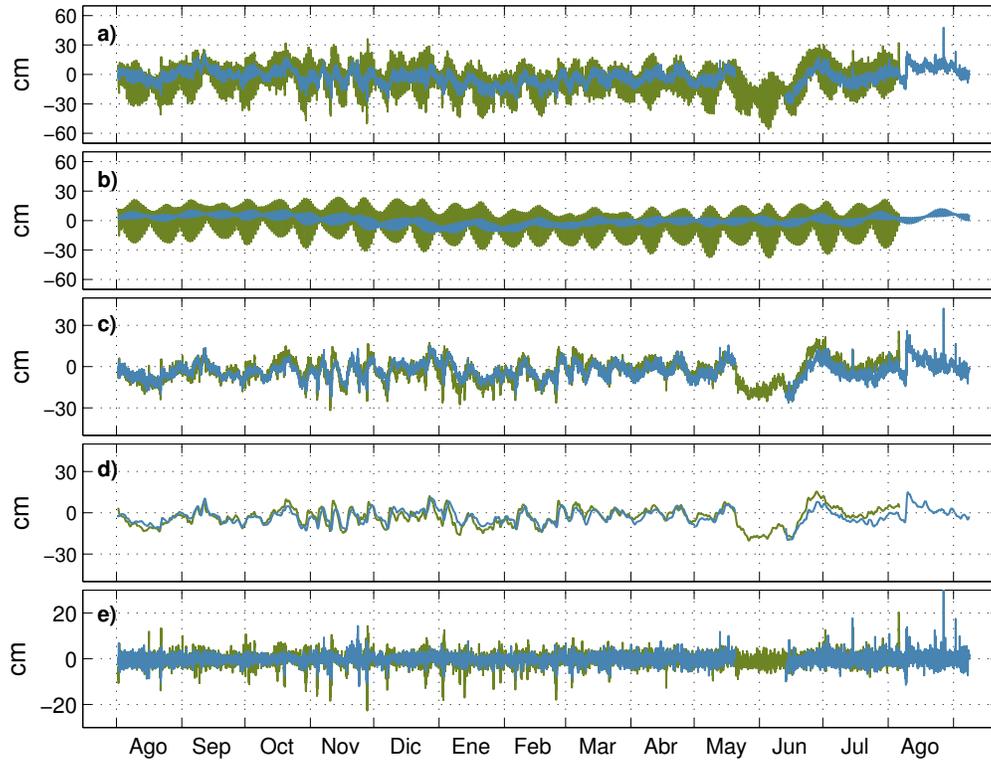


Figura 3.4: Componentes que forman la a) elevación total: b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: el residual d) inducido por procesos, obtenido por filtrado; y el e) residual causado por interacción de procesos, obtenido al substrar el residual armónico - residual filtrado en los sitios de la laguna Camaronera (línea azul) y la laguna Buen País (línea verde olivo) para los años 2011-2012. La escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios están indicados en la figura 2.1.

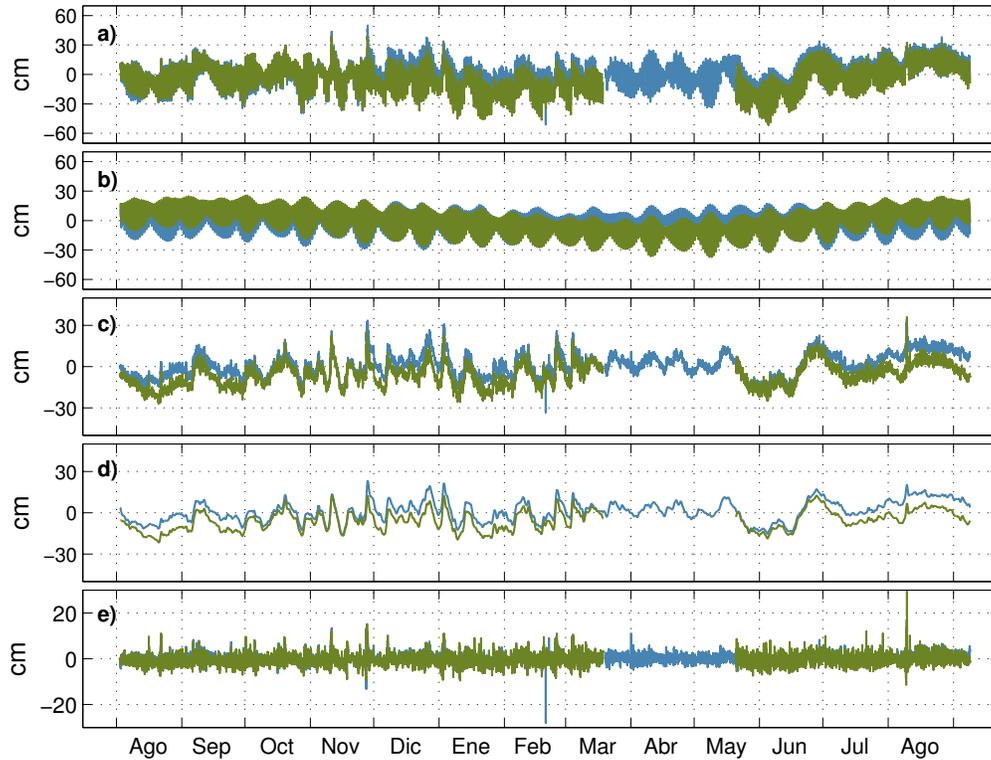


Figura 3.5: Componentes que forman la a elevación total): b) marea pronosticada y c) residual armónico; y los componentes que forman el residual armónico: d) el residual inducido por procesos, obtenido por filtrado; y e) el residual causado por interacción de procesos, obtenido al substrar el residual filtrado del residual armónico en los sitios de la laguna de Tlalixcoyan (línea verde olivo) y la boca de la laguna de Tlalixcoyan (línea azul) para los años 2011-2012. Loa escala de los ejes varía para que los residuales puedan identificarse con claridad. Los sitios estan indicados en la figura 2.1.

ticada y la elevación total, la cual se manifiesta como un conjunto de picos en la vaciante, como es el caso de la Boca (figura 3.10 b) y de manera menos notoria en la laguna Tlalixcoyan y en su Boca (figura 3.11 a y b respectivamente). Como se mencionó en la sección 3.1.2, dicho conjunto de picos observados en el residual durante la vaciante, ocurre cuando la onda de marea observada sufre un retraso con respecto a la marea pronosticada. El otro tipo de desfase, cuando la onda de marea observada se adelanta al pronóstico, se manifiesta como un conjunto de picos en la llenante, y no se observó de una manera clara, en algún caso durante este periodo. En otros casos es posible observar el pico del residual más cerca de la marea baja, lo cual ocurre debido a que el efecto del viento para apilar agua es más efectivo cuando la profundidad es menor. Este efecto se presenta de manera más clara en los ríos Papaloapan y Acula (figura 3.10 a y c) una vez que comienza el incremento en la rapidez del viento.

Durante el *Evento b*, ocurrieron tanto un aumento como una disminución paulatinos de la magnitud de la rapidez del viento, el cual duró aproximadamente tres días. En la mayoría de los casos se observó un aumento de la elevación total de hasta 30 cm, como en los ríos Papaloapan y Acula (figura 3.13 a y b). En las series de tiempo de los residuales es posible notar claramente un conjunto de picos en marea baja una vez que inicia el paso del Norte. Lo anterior indica la magnitud de la influencia del esfuerzo del viento por encima de la presión atmosférica la cual no se observa que tenga un efecto directo en la elevación del residual, p. ej., durante el Norte, la presión atmosférica aumenta 15 mb, esto debería provocar una disminución de la elevación de aproximadamente 15 cm debido al efecto del barómetro invertido, sin embargo este efecto no se observa por el apilamiento debido al esfuerzo del viento, que es mayor. En general la contribución más grande a la elevación del residual (en este caso el residual armónico), es causado por el proceso mismo, es decir, eventos de escala sinóptica y tormentas, más que la interacción entre estos y la marea.

Por otro lado, a partir de la variación del nivel del mar registrada por el sensor de presión del corrientímetro en la Boca (Figura 2.1), se pueden observar ciertas características típicas de una onda de marea, como es el caso del ciclo de *mareas muertas* y *mareas vivas*, cuyo ciclo dura aproximadamente 14 días. Las mareas vivas ocurren uno o dos días después de Luna Nueva y Luna Llena y se caracterizan por tener los rangos máximos, a este tiempo se le denomina *sizigia*: momento en el cual la Luna, la Tierra y el Sol están alineados. Las mareas muertas, caracterizadas por los rangos mínimos, ocurren poco después de los Cuartos Crecientes y Cuartos Menguantes, a

estos momentos se les llama *cuadratura*: tiempo en el cual la Luna se encuentra a 90 grados respecto a la línea imaginaria entre el Sol y la Tierra. En general los rangos grandes de marea diurna ocurren cuando las mareas vivas coinciden con el *perigeo*, provocando así una atracción mayor, que aumenta el nivel del mar, lo cual se puede observar que sucede a inicios de Agosto de 2011 (figura 3.19 (a), el perigeo ocurre el 2 de Agosto) donde el rango llega a ser de hasta 1 metro.

Otra característica notable es el hecho de que en mareas muertas es posible observar que las mareas semidiurnas son similares en magnitud a las mareas diurnas (días 16-19 y 30-31 de Agosto figura 3.19), dicha naturaleza mixta presente en estos periodos se debe a que el valor de las mareas diurnas se reduce.

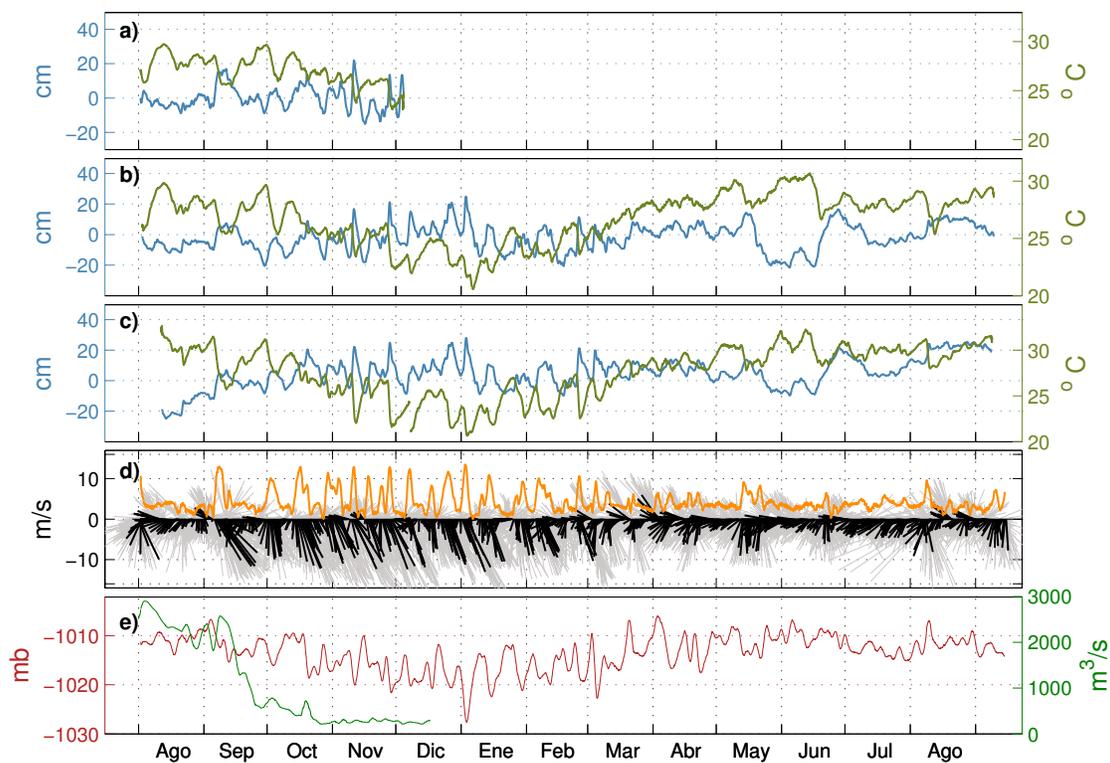


Figura 3.6: El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la Boca; b) el río Papaloapan; y c) el río Acula, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río Papaloapan (línea verde), también se muestran.

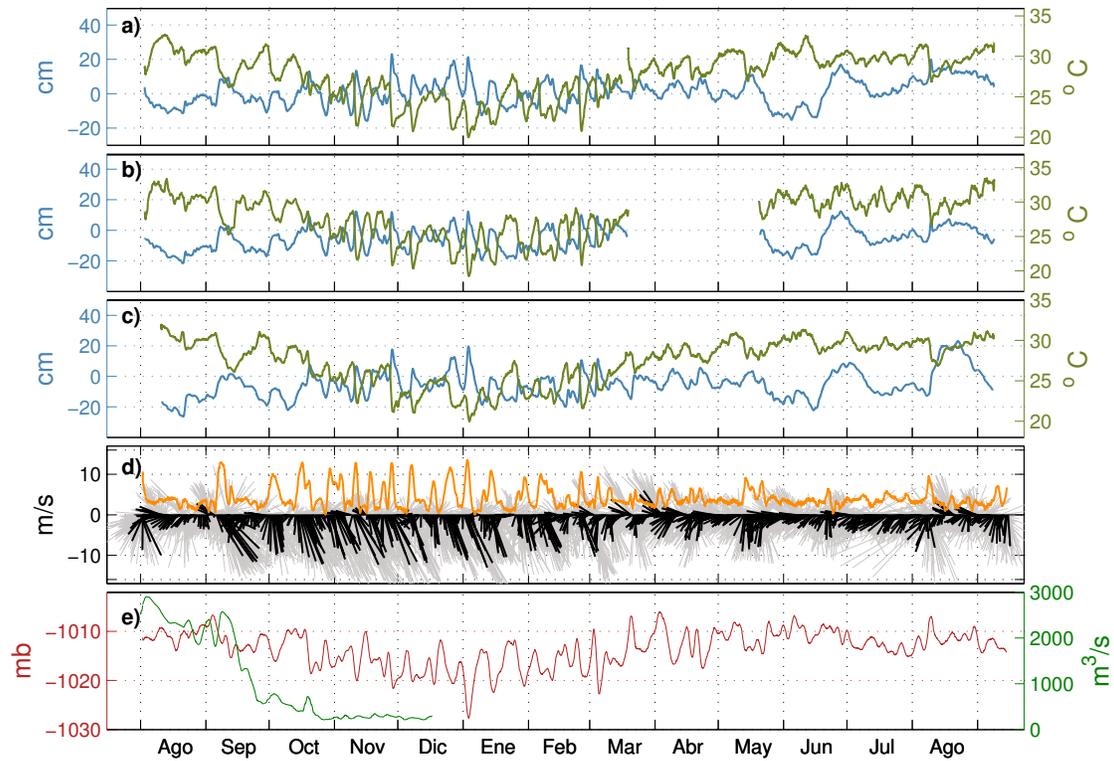


Figura 3.7: El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la Boca de Tlalixcoyan; b) la laguna Tlalixcoyan; y c) el río Limón, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran.

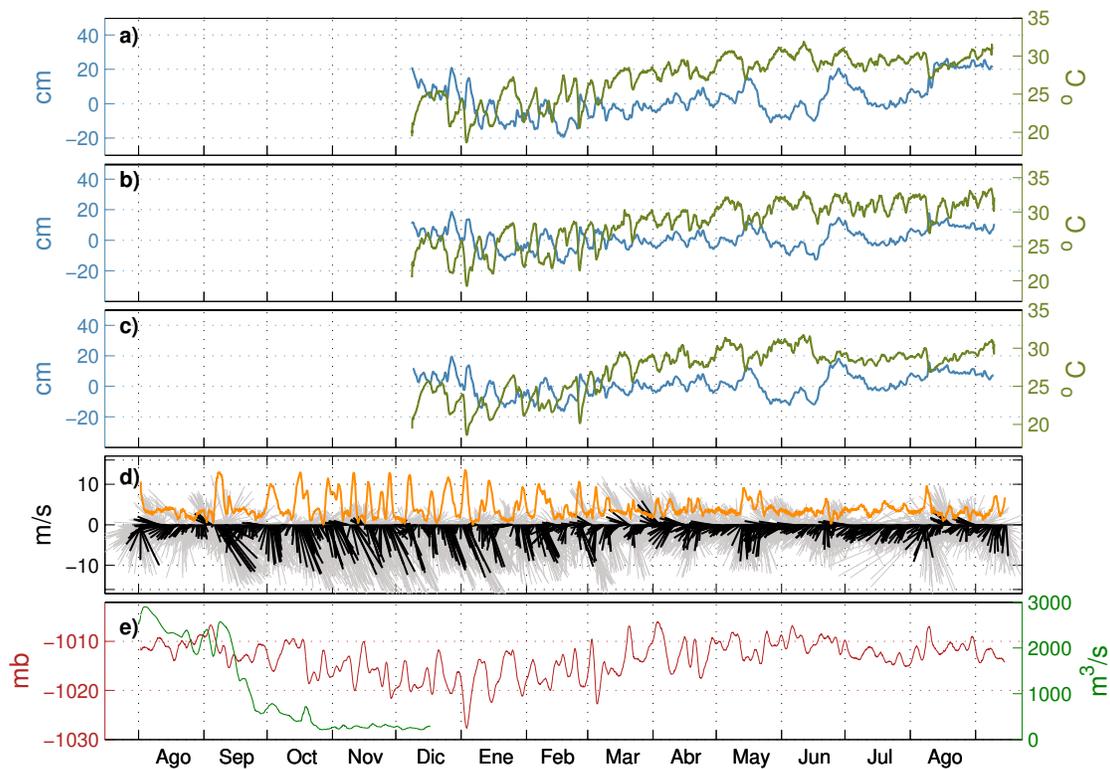


Figura 3.8: El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la laguna de Alvarado 1; b) la laguna de Alvarado 2; y c) la laguna de Alvarado 3, para los años 2011-2012. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran.

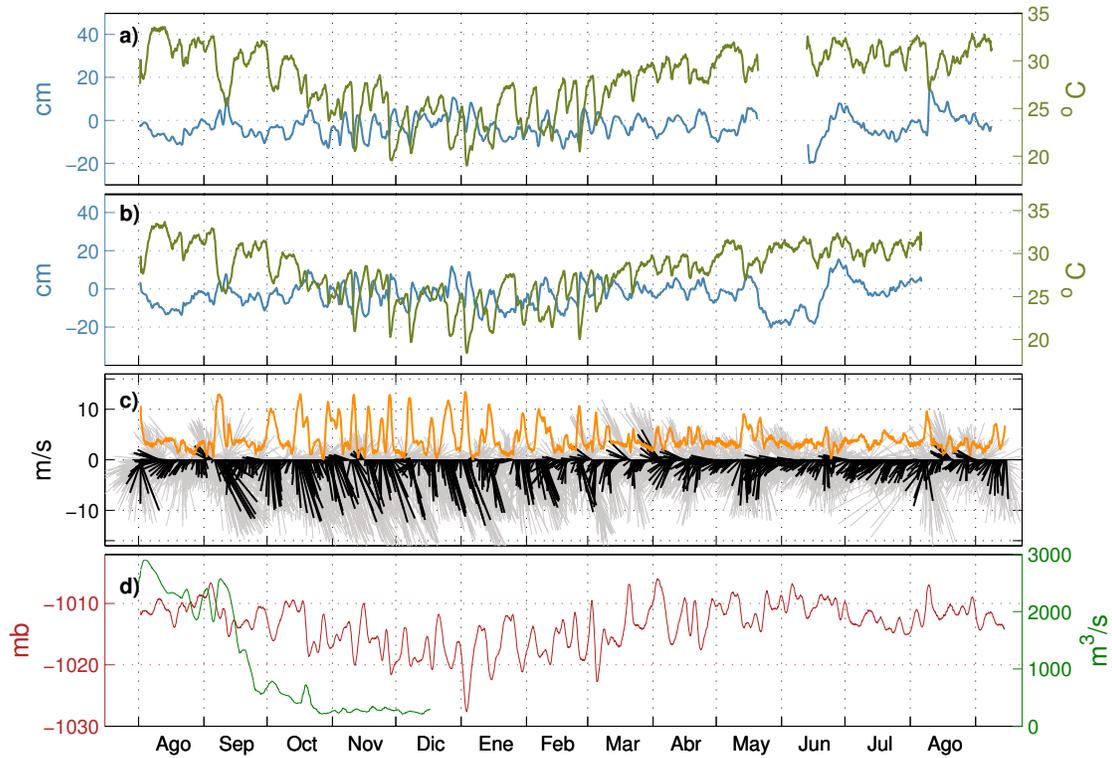


Figura 3.9: El residual filtrado (línea azul) y la temperatura observada (línea verde olivo) filtrada con medias móviles de 26 hrs, para los sitios de a) la laguna Camaronera; y b) la laguna Buen País, para los años 2011-2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento en astillas (sin filtrar grises, filtradas negras) a 10 metros arriba de la superficie, d) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde), también se muestran.

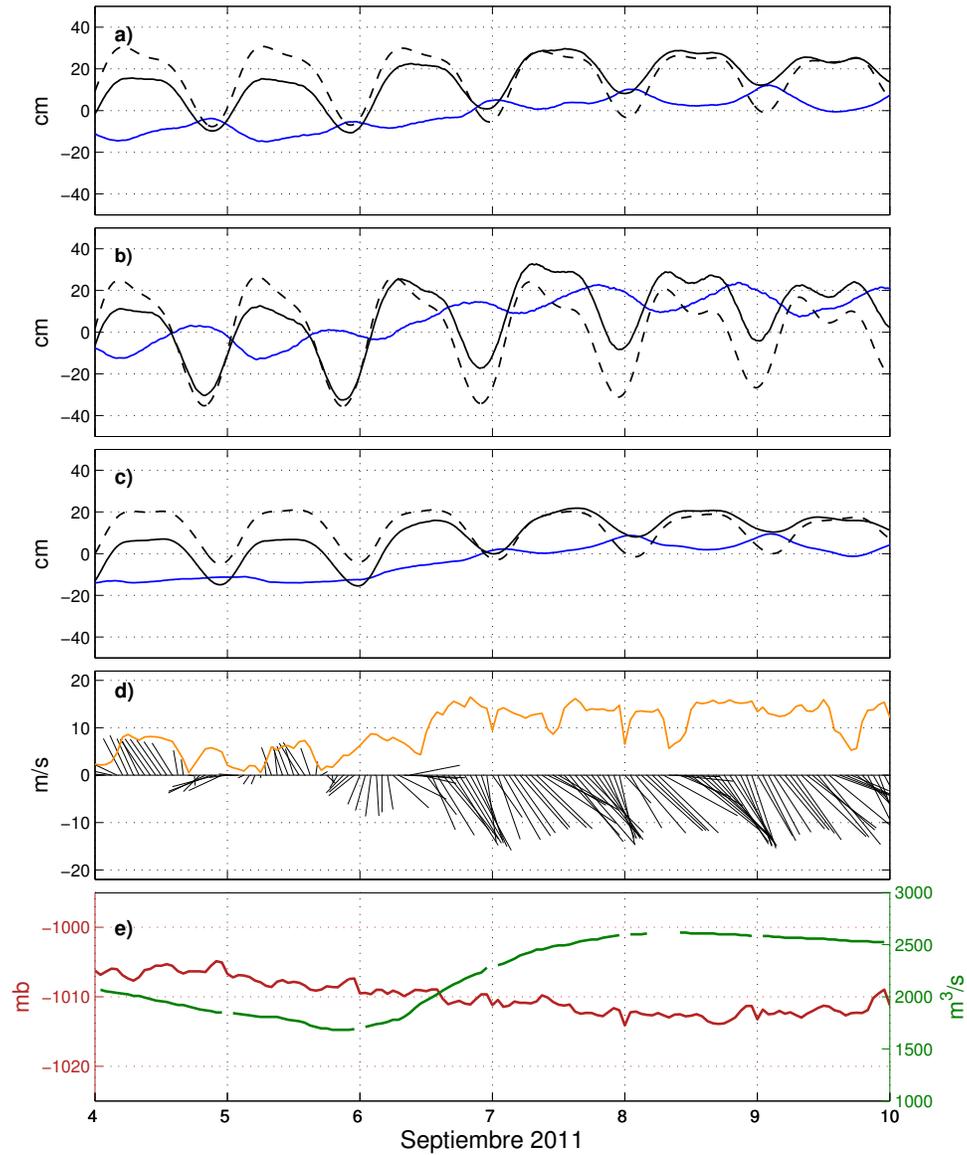


Figura 3.10: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) el río Papaloapan, b) la Boca, y el c) río Acula, durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde).

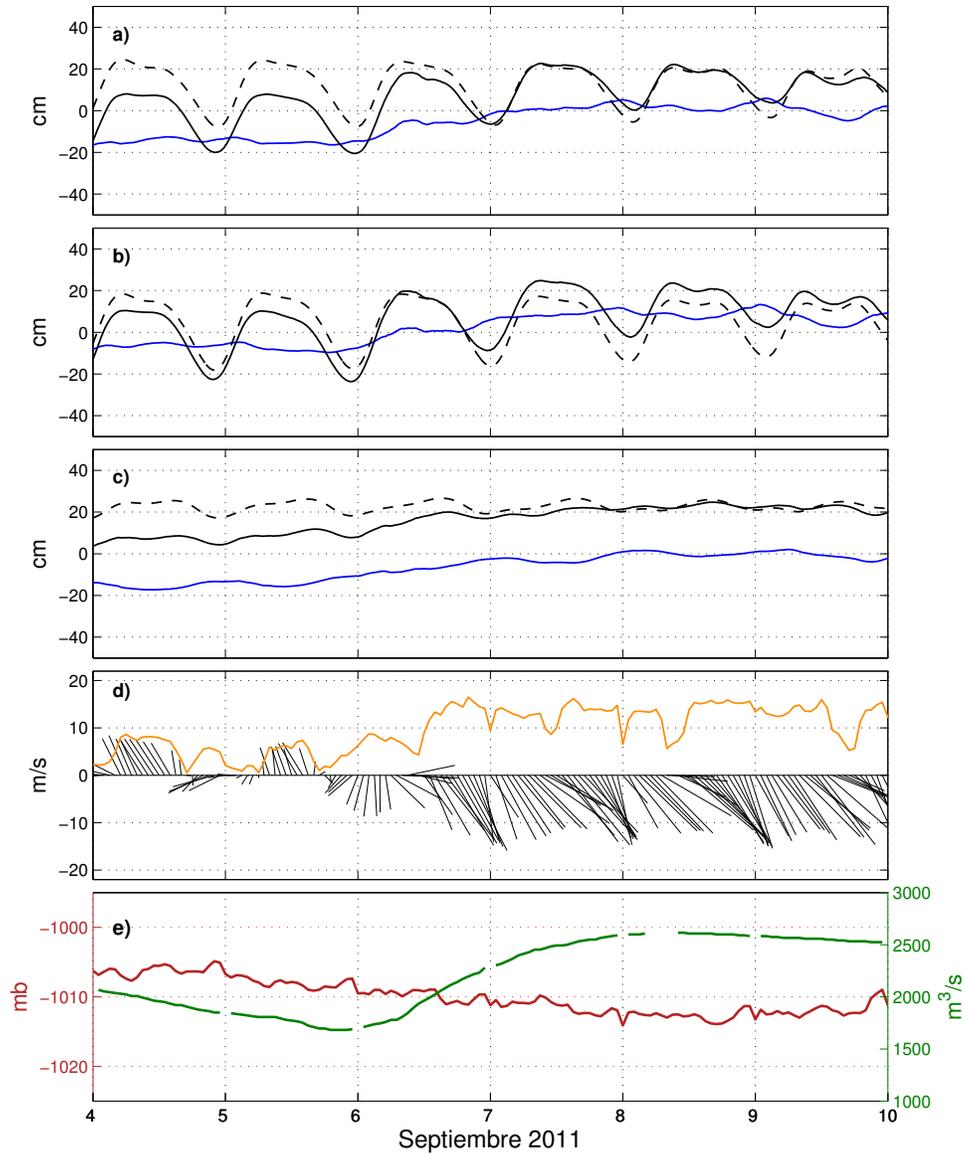


Figura 3.11: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Tlalixcoyan, b) la Boca de la laguna Tlalixcoyan, y c) el río Limón, durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. d) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, e) la presión atmosférica multiplicada por -1 (línea roja) y el gasto del río (línea verde).

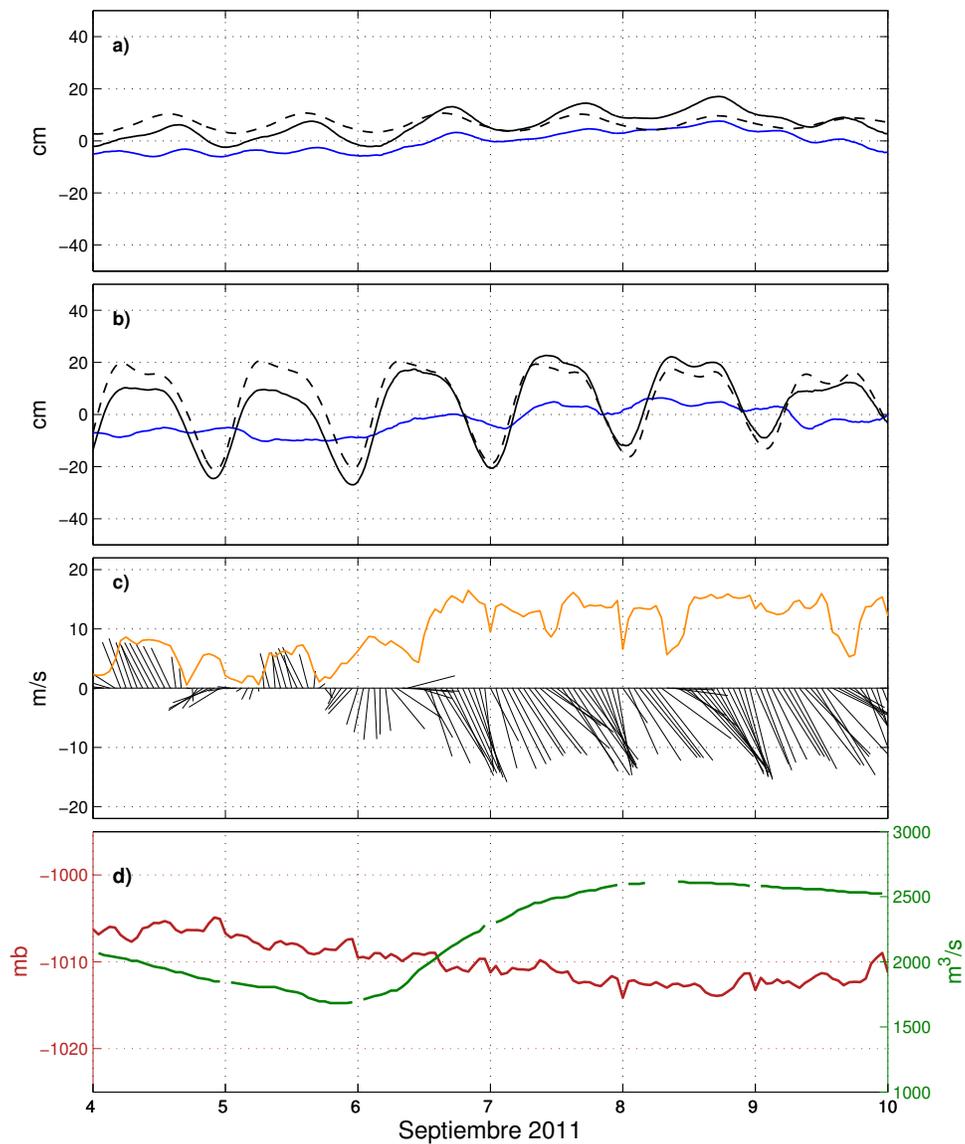


Figura 3.12: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Camaronera, y b) la laguna Buen País), durante el evento del 6 al 10 de Septiembre de 2011. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, d) la presión atmosférica invertida (línea roja) y el gasto del río (línea verde).

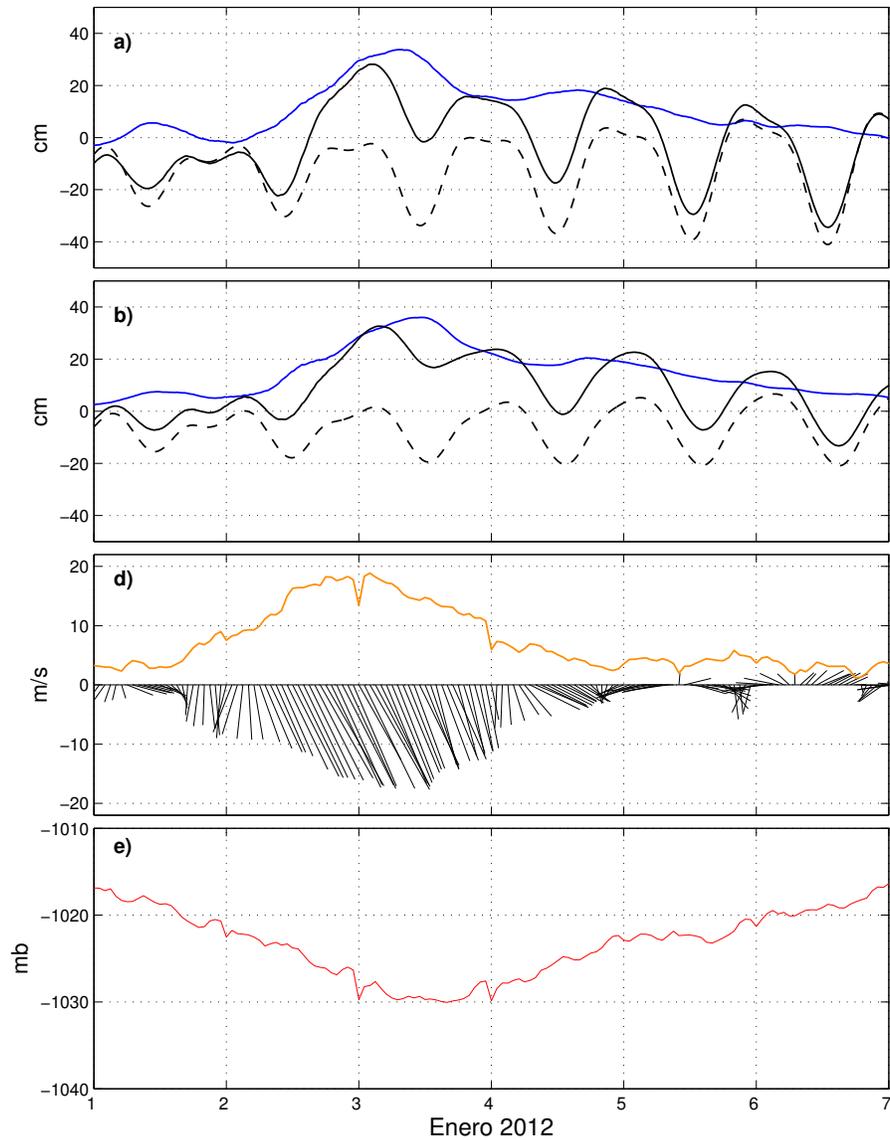


Figura 3.13: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) el río Papaloapan, y b) el río Acula, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.

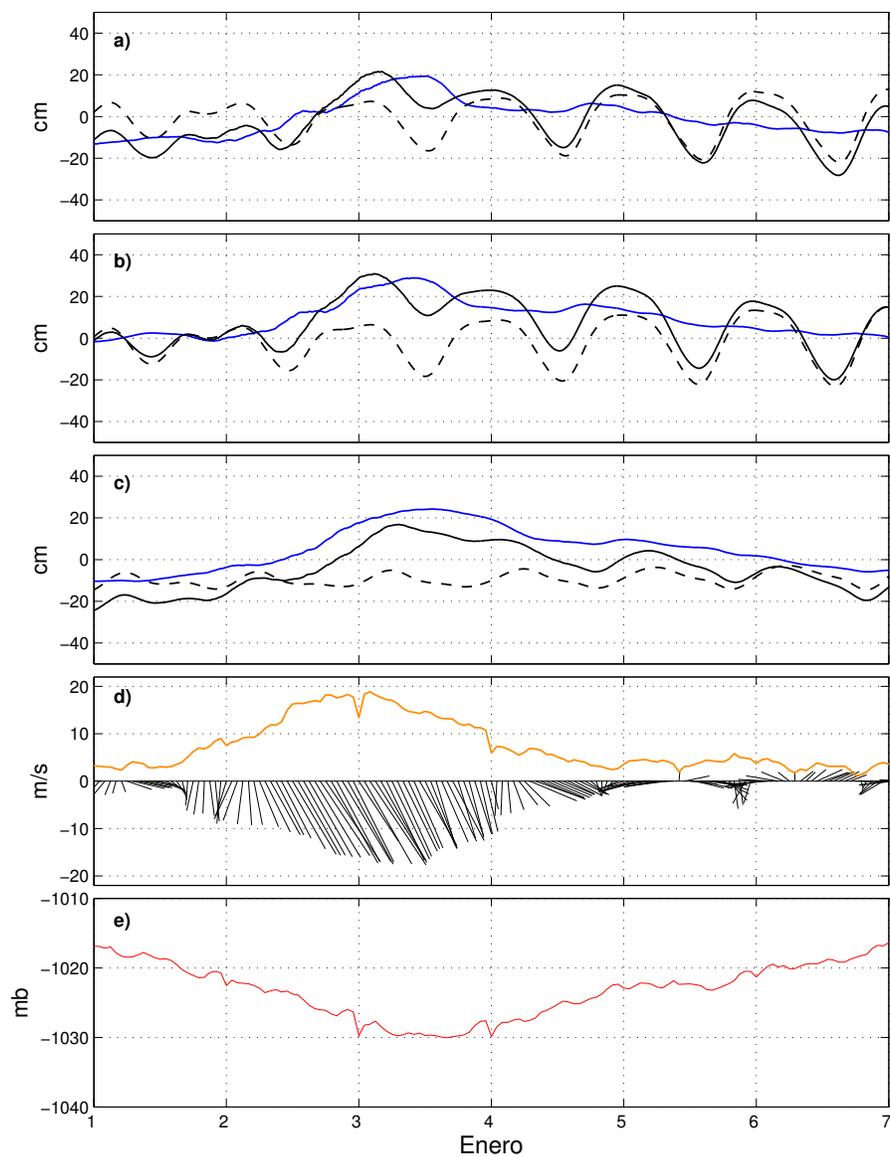


Figura 3.14: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Tlalixcoyan, b) la Boca de la laguna Tlalixcoyan, y c) el río Limón, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.

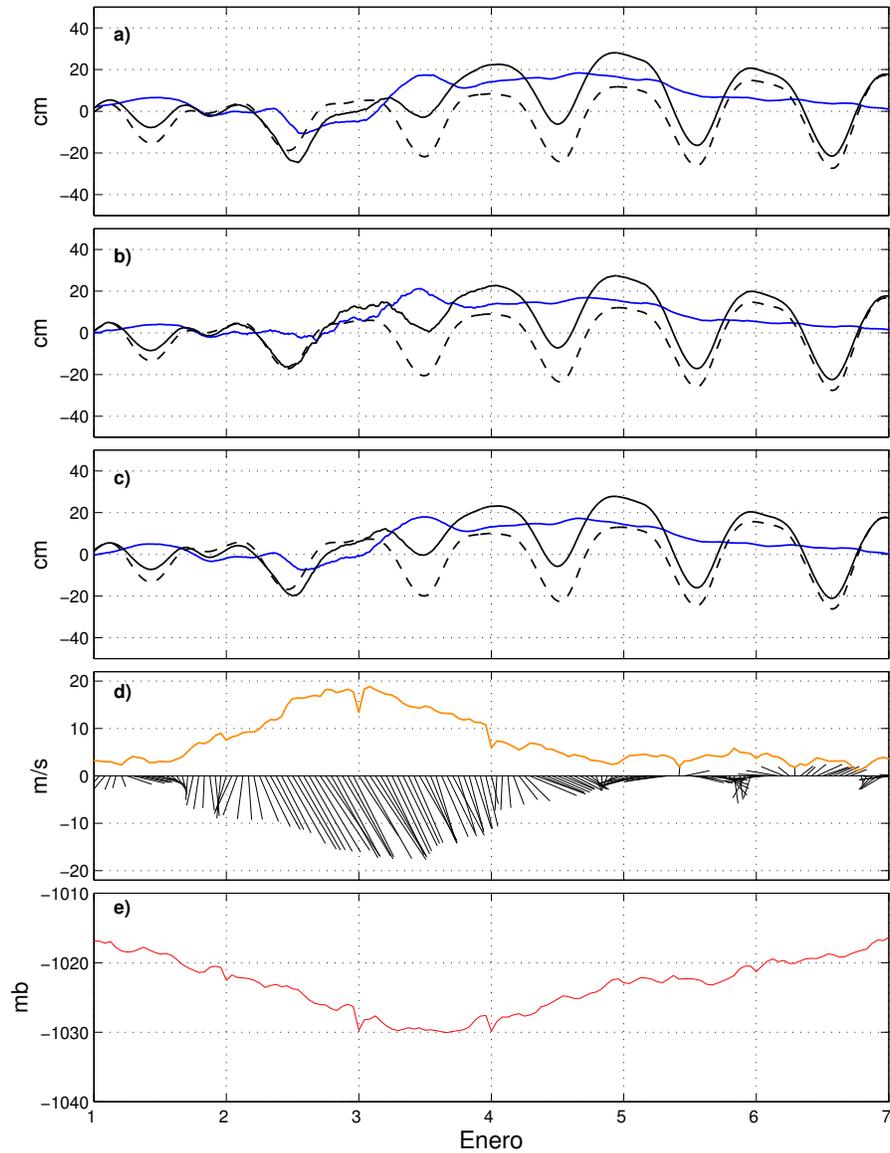


Figura 3.15: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna de Alvarado 1, b) Alvarado 2, y c) Alvarado 3, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.

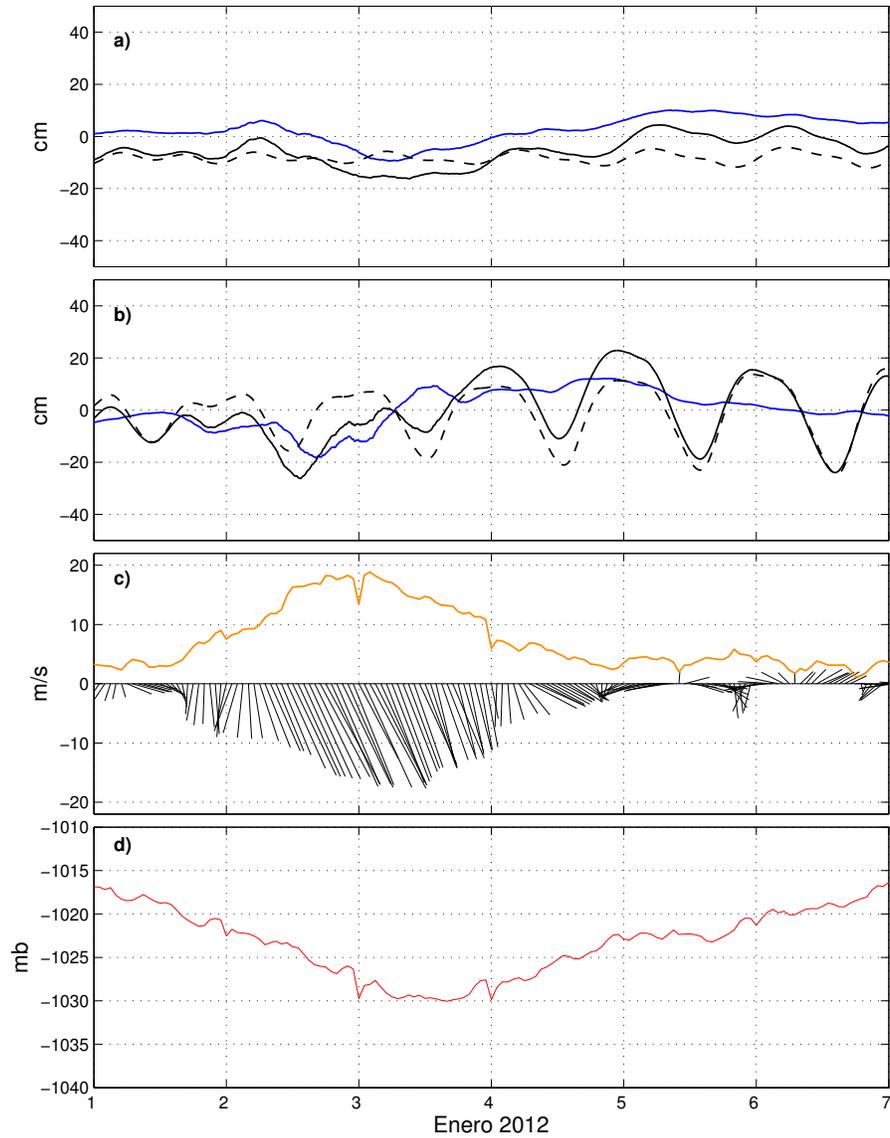


Figura 3.16: La elevación total (línea negra continua), la marea pronosticada (línea negra punteada) y el residual armónico (línea azul), para los sitios de a) la laguna Camaronera, y b) la laguna Buen País, durante el Norte del 2 al 5 de Enero de 2012. c) la rapidez (línea anaranjada) y dirección del viento (astillas negras) a 10 metros arriba de la superficie, y d) la presión atmosférica multiplicada por -1.

3.2 Corrientes

De acuerdo con las mediciones de corriente en la Boca (capítulo 3.2.1), se puede ver que la dirección principal del flujo es hacia el NE (figura 3.17) durante la mayor parte del periodo de medición. Para obtener esta componente del flujo, es decir, la corriente a lo largo del eje principal del canal, se llevó a cabo un análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) a partir de las componentes u (este-oeste) y v (norte-sur) de la corriente. De esta forma se encontró que el modo 1, asociado a la dirección en la que el flujo exhibe la máxima variabilidad, explica el 99% de la varianza de las corrientes medidas en la Boca del estuario.

Pritchard (1952) mostró que las corrientes de marea son típicamente más fuertes que la circulación estuarina, pero que si las corrientes horizontales que varían en la vertical son medidas a través del curso de un ciclo de marea y después son promediadas, la circulación "residual" o estuarina (capítulo 3.2.2) sería *revelada* [15] [22], en la mayoría de los casos el resultado es un perfil típico de un estuario "normal" o positivo, es decir, uno con exceso de entrada de agua dulce y con el flujo cerca del fondo en dirección hacia la cabeza del estuario. En este caso el promedio se obtuvo tomando en cuenta todo el periodo de medición (figura 3.18). De acuerdo con Geyer [22], la fuerza de la circulación estuarina es típicamente de -0.05 a -0.3 m/s (midiendo el flujo promediado sobre un ciclo de marea cerca del fondo), sin embargo esta condición no se cumple en este caso ya que como se observa, el flujo promedio es positivo en toda la columna de agua y excede este rango de valores durante todo el periodo. Esto puede deberse al exceso de gasto proveniente del río Papaloapan en la temporada de lluvias. Este efecto se observa de manera más extrema en el perfil del flujo en la máxima llenante, la cual se observó el 29 de Septiembre de 2011 (Figura 3.20), donde se puede ver que la velocidad cerca del fondo del canal (~ 17 metros de profundidad) no alcanza a revertirse, es decir, nunca tiene un valor negativo; en el otro extremo se encuentra el perfil del flujo medio en la máxima vaciante, la cual se observó el 10 de Agosto de 2011 (Figura 3.19), cuya velocidad máxima de ~ 0.7 m/s se presenta a una profundidad de 14 metros. Finalmente se presenta el perfil teórico obtenido a partir de la ecuación 2.2.2.4, cuyo valor de coeficiente de difusión turbulenta vertical, A_z , es $8e^{-3}$.

En la figura 3.19 se muestran las series de tiempo de la corriente promediada en la vertical a lo largo del eje principal y la elevación total en la Boca del estuario para el mes de Agosto de 2011. Es posible observar que en todo el periodo la corriente

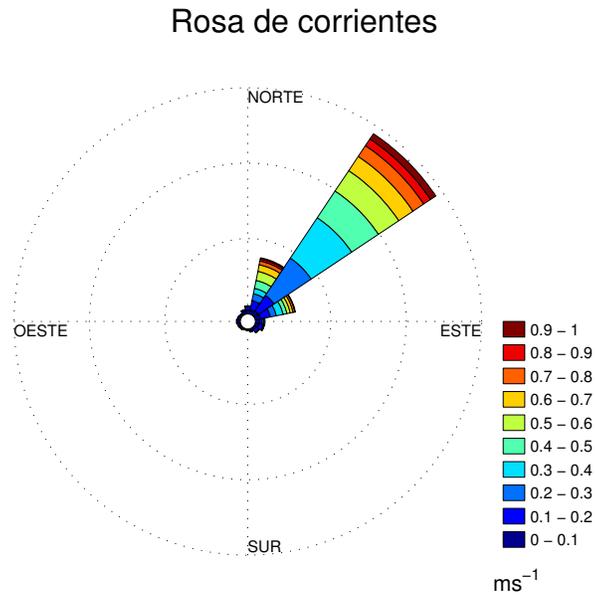


Figura 3.17: Rosa de corrientes de todo el periodo de medición.

máxima en la vaciante ocurre más cerca de la estoa de marea en bajamar que en la de pleamar.

Por otro lado es notable que en los periodos de mareas muertas donde se observa una componente semidiurna en la forma de dos mareas altas, dicha condición modula la penetración de agua oceánica salada en el fondo del canal como se puede apreciar en los días 26-30 de Septiembre de 2011 (figura 3.20). En este periodo gran parte de la columna de agua tiene velocidad cero o un poco negativa ($\sim 10-18$ metros de profundidad), lo cual se debe a que las mareas bajas no son tan "bajas" como el resto del registro, esto provoca que la vaciante no dure lo suficiente como para revertir el sentido del flujo en toda la columna de agua.

Las constantes armónicas de las componentes de la velocidad promediada en la vertical en la boca de la laguna se presentan en la tabla 3.3. Debido a la naturaleza del flujo, el canal confina el movimiento de la corriente a uno casi rectilíneo, como consecuencia, los ejes menores de las elipses de corriente son mucho más pequeños que

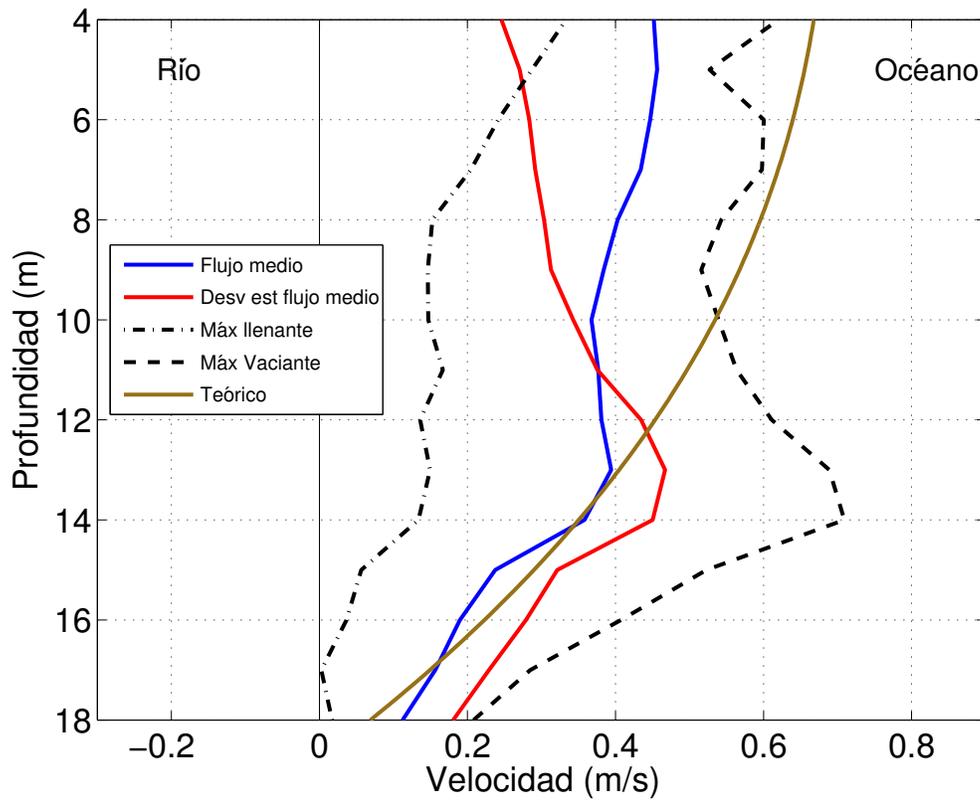


Figura 3.18: Flujo medio en la boca (línea azul) a lo largo del eje principal, desviación estándar del flujo medio (línea roja), flujo medio observado en la máxima llenante (puntos y líneas), flujo medio observado en la máxima vaciante (línea punteada) y perfil teórico (línea café).

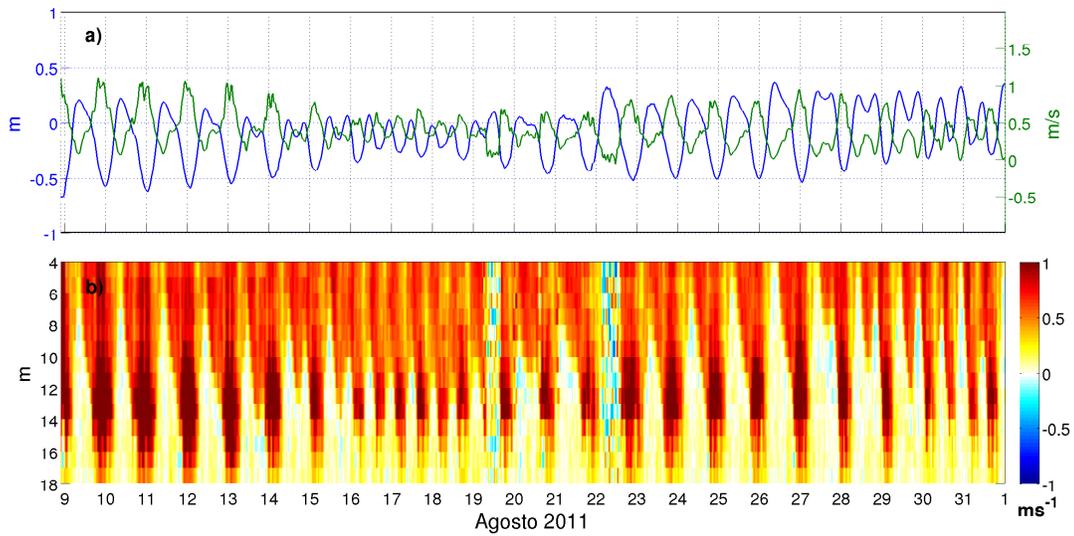


Figura 3.19: (a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal para el mes de Agosto de 2011.

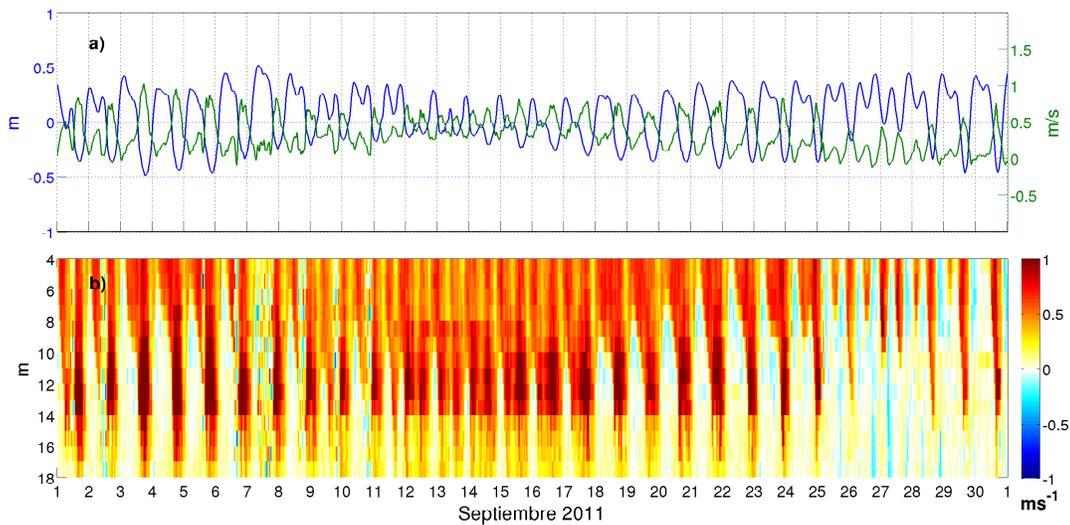


Figura 3.20: (a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal para el mes de Septiembre de 2011.

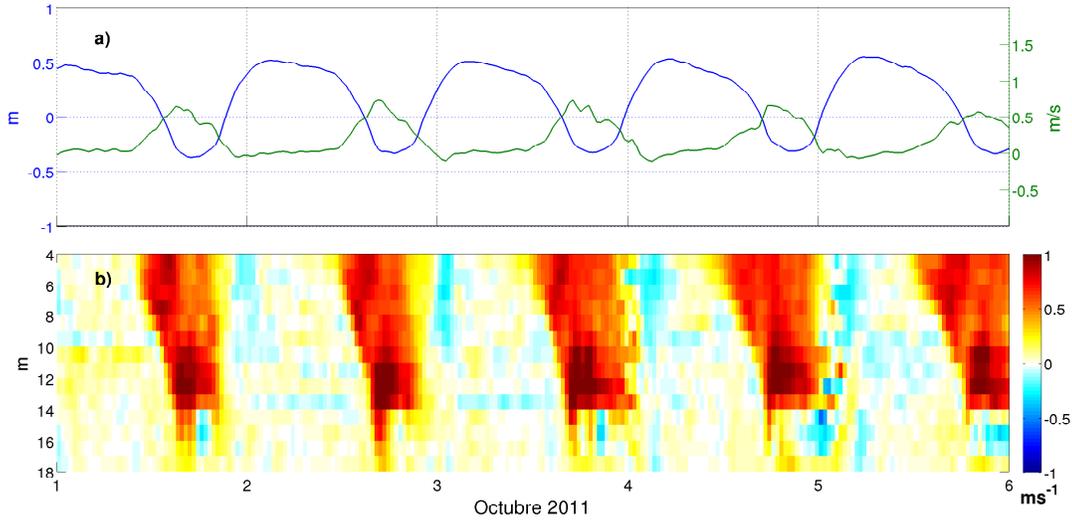


Figura 3.21: (a) Series de tiempo de elevación total (línea azul) y velocidad promediada en la vertical (línea verde) a lo largo del eje principal, y (b) perfil de corriente a lo largo del eje principal del 1º al 6 de Octubre de 2011.

los ejes mayores, por lo tanto solo se muestran estos últimos en la tabla. Como se puede ver, de la misma manera que para la elevación, el constituyente que más contribuye a las corrientes de marea es el O_1 con 0.176 m/s, le siguen en importancia K_1 con 0.143 m/s, M_2 con 0.127 m/s, Q_1 con 0.053 m/s y S_2 con 0.047 m/s. Lo anterior confirma lo mencionado en el capítulo 3.1.2, es decir, en este sistema la marea domina la varianza.

	O_1		K_1		Q_1		M_2		S_2	
	U_{mayor} (m/s)	Fase (°)								
Boca	0.176	174.63	0.143	196.64	0.053	178.49	0.127	53.58	0.047	70.92

Cuadro 3.3: Elipses de corriente observadas para los principales constituyentes en la Boca. U_{mayor} , amplitud del eje mayor; $Fase$, fase de la velocidad máxima respecto al meridiano de Greenwich. La amplitud del eje menor es mucho más pequeña que U_{mayor} y por lo tanto no se muestra. Los valores de los parámetros de la elipse son reportados con un estimado del 95% de intervalos de confianza.

3.3 Hidrografía

3.3.1 Variación espacial de temperatura y salinidad

Se intentó cubrir de manera fiel la red de estaciones de CTD (Fig. 2.6) durante todas las campañas, de tal forma que se tuvieran mediciones consistentes y así poder

construir mapas de buena calidad de las variables hidrográficas. Para estudiar la distribución de la temperatura y la salinidad, tanto en la horizontal como en la vertical, se elaboraron mapas con los valores de estas variables en superficie y fondo y con los valores extremos, independientemente de la posición en la columna de agua en que éstos se alcanzaron. En las lagunas y ríos la salinidad varía desde agua con características oceánicas, de más de 35.0 psu, hasta agua dulce, 0 psu. En primavera y verano, la temperatura en las lagunas tiende a ser más alta que en el mar (Figs. 3.23, 3.27, 3.29 y 3.31) y en invierno se observa lo contrario (Figura 3.25). En general, el agua proveniente del río Papaloapan tuvo temperaturas más bajas que las observadas en las lagunas y en el mar, excepto en la campaña 3 (Diciembre de 2011) cuando su temperatura fue mayor que la de las lagunas de Alvarado y Buen País. En ese periodo la temperatura más baja se observó en la laguna Camaronera debido a la influencia directa de la descarga de los ríos en las demás lagunas. Las salinidades más altas se observaron en el fondo del canal de la Boca y en la desembocadura del río Papaloapan, aunque en esas zonas se observaron salinidades muy bajas en la superficie debido a que el agua más salada, y por lo tanto más densa, penetra por el fondo del canal hacia aguas arriba, mientras que el agua más dulce y menos densa tiene dirección hacia el mar (Figs. 3.22, 3.24, 3.26, 3.28 y 3.30). En general, durante la mayoría de las campañas de medición la cuña de agua profunda y salina cubrió todo el canal y entró hacia el Papaloapan, excepto en Agosto de 2011 cuando la cuña salina no fue más allá de la Boca a causa del incremento en la descarga del río en esa temporada.

En la laguna Camaronera se observaron generalmente, salinidades más altas que en las lagunas de Alvarado, Tlalixcoyan y Buen País, muy probablemente debido a que en esta laguna existen dos tubos de conexión hacia el mar. En esta laguna no descarga ningún río, por lo que habría que cuantificar la evaporación menos la precipitación para descartar estos procesos como los causantes de la relativamente alta salinidad en la región. Sin embargo, en las campañas 4 y 5 se observó un máximo local de salinidad en la vecindad de estos tubos, lo que sugiere su importancia en la salinidad de esta laguna. La laguna de Tlalixcoyan presenta salinidades más bajas que la laguna de Alvarado, pero su salinidad también se ve afectada por el ciclo anual, observándose salinidades más altas en Diciembre de 2011 y en Marzo y Mayo de 2012 y más bajas en Agosto de 2011 y Septiembre de 2012.

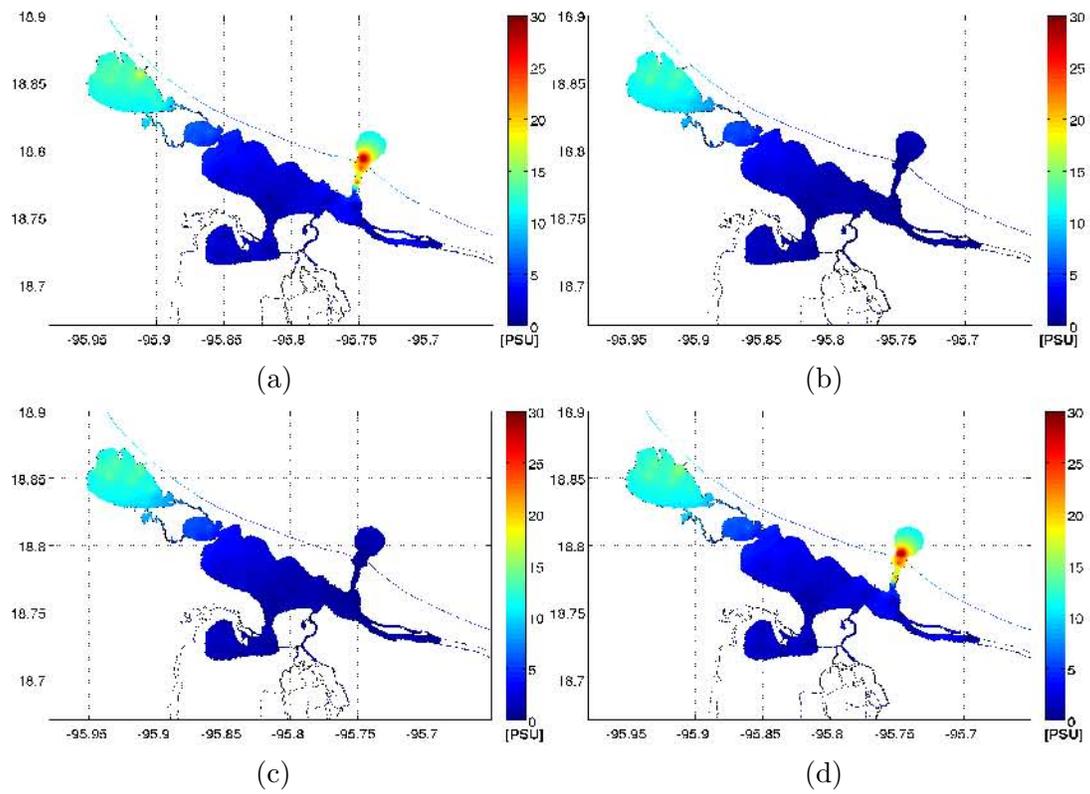


Figura 3.22: (a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 2 (1º y 2 de Agosto, 2011).

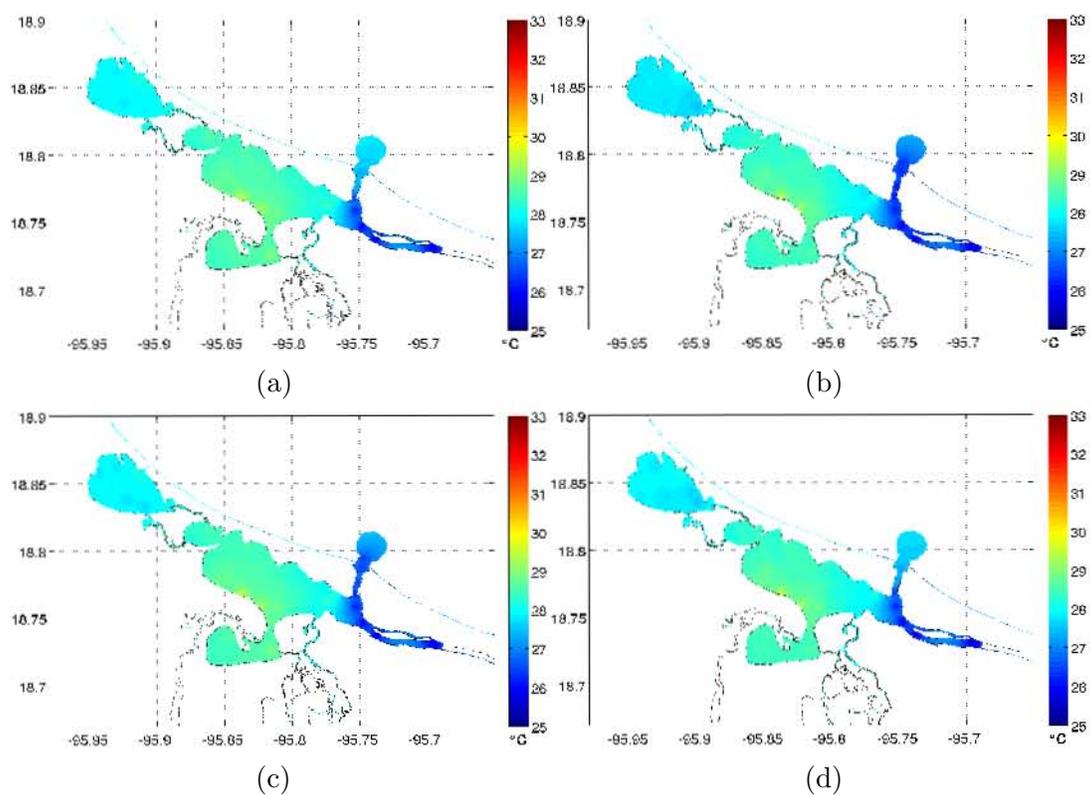


Figura 3.23: (a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 2 (1^o y 2 de Agosto, 2011).

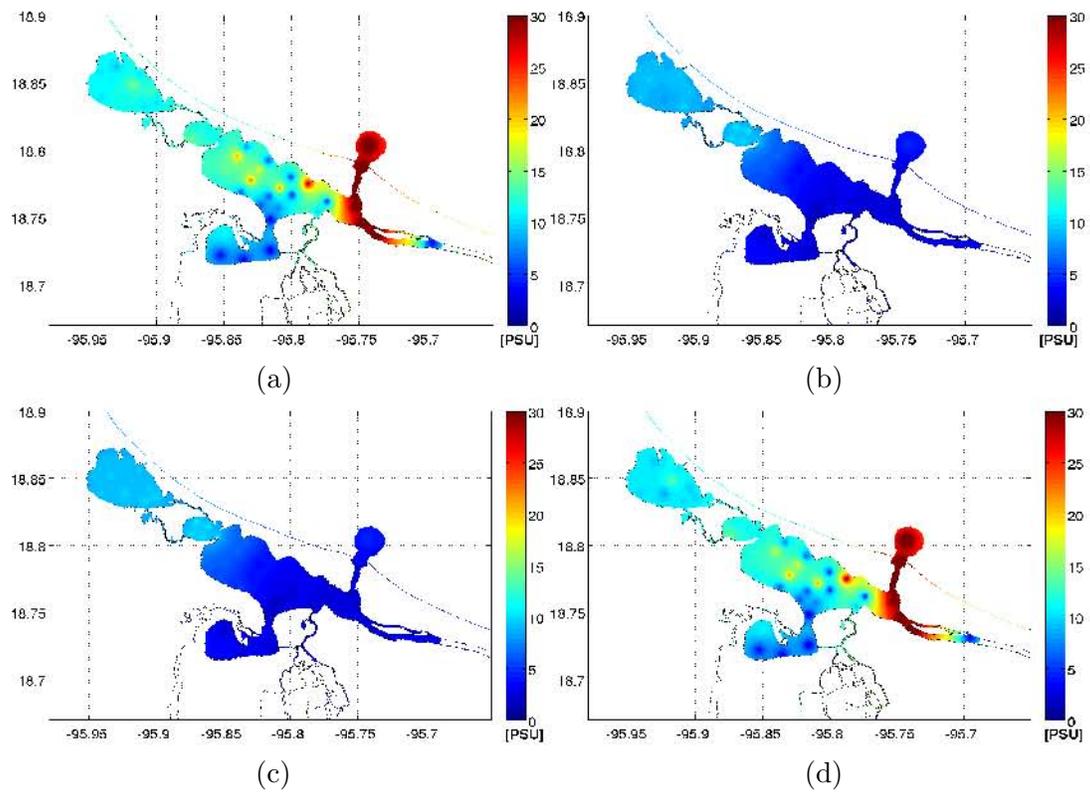


Figura 3.24: (a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 3 (3 y 5 de Diciembre, 2011).

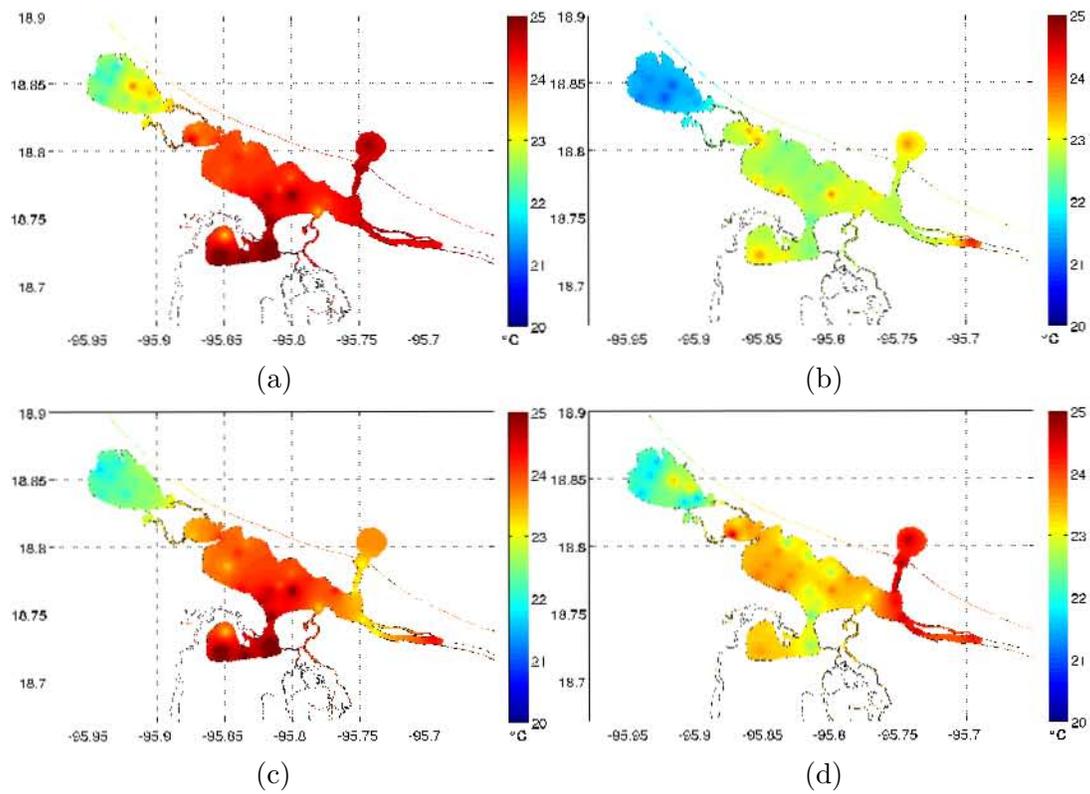


Figura 3.25: (a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 3 (3 y 5 de Diciembre, 2011).

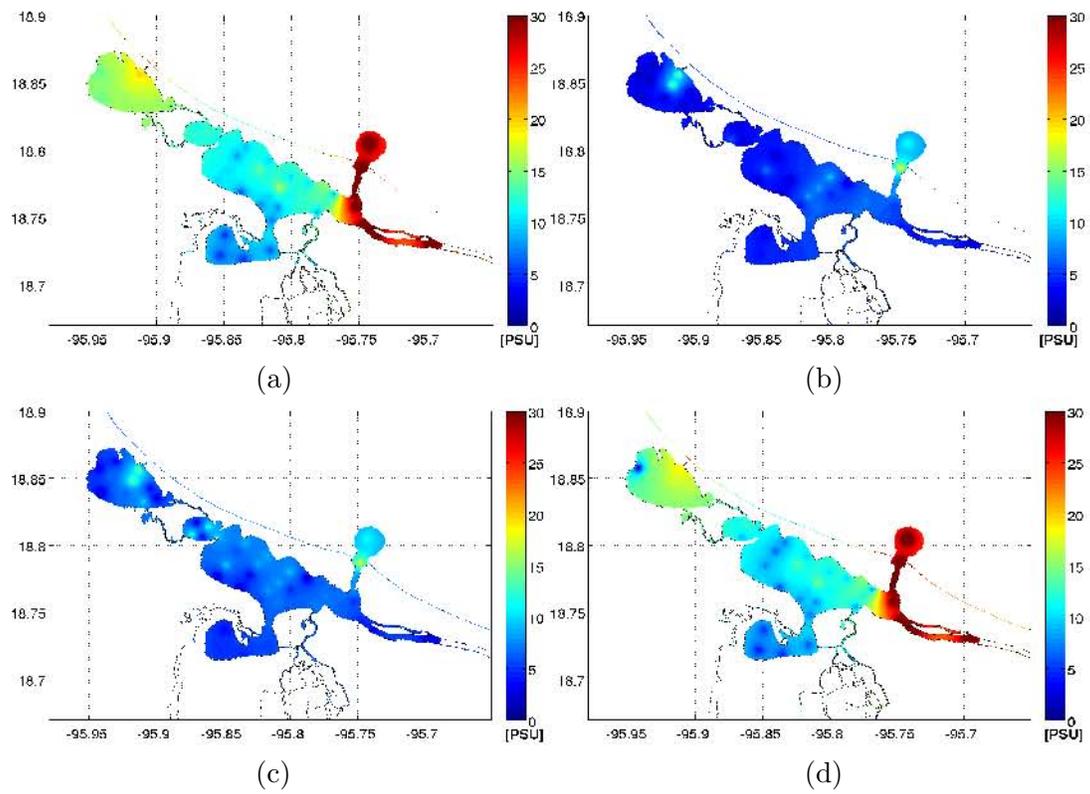


Figura 3.26: (a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 4 (18-20 de Marzo, 2012).

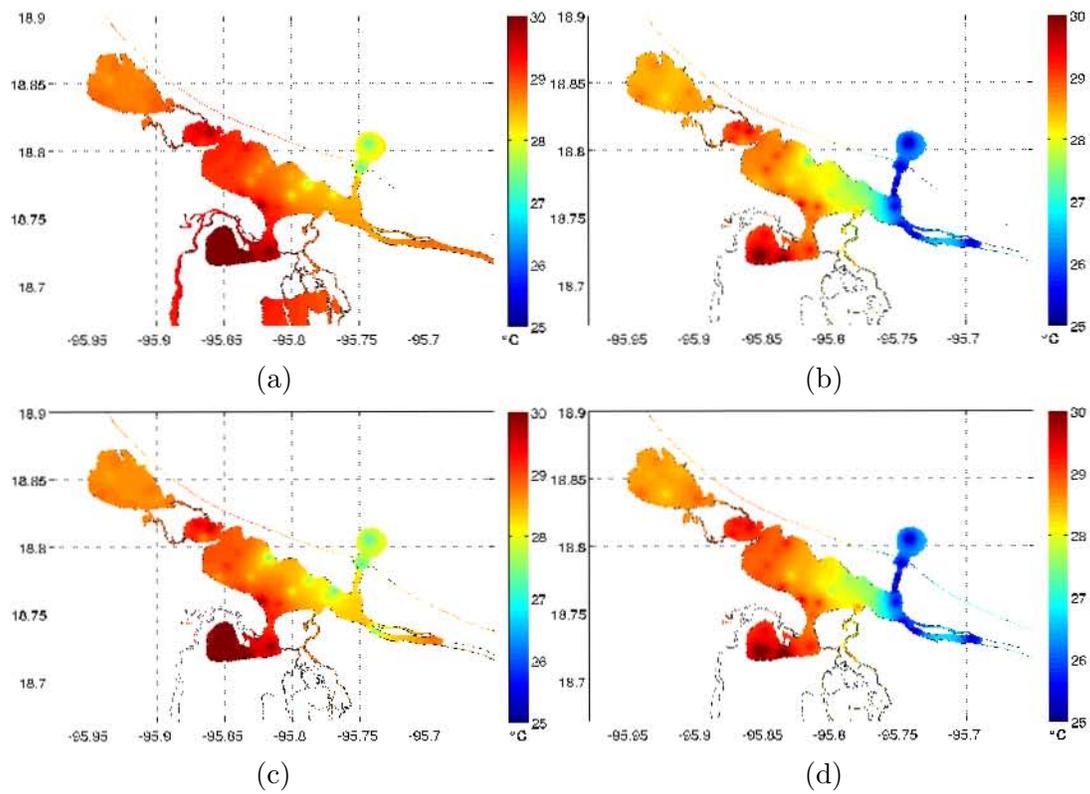


Figura 3.27: (a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 4 (18-20 de Marzo, 2012).

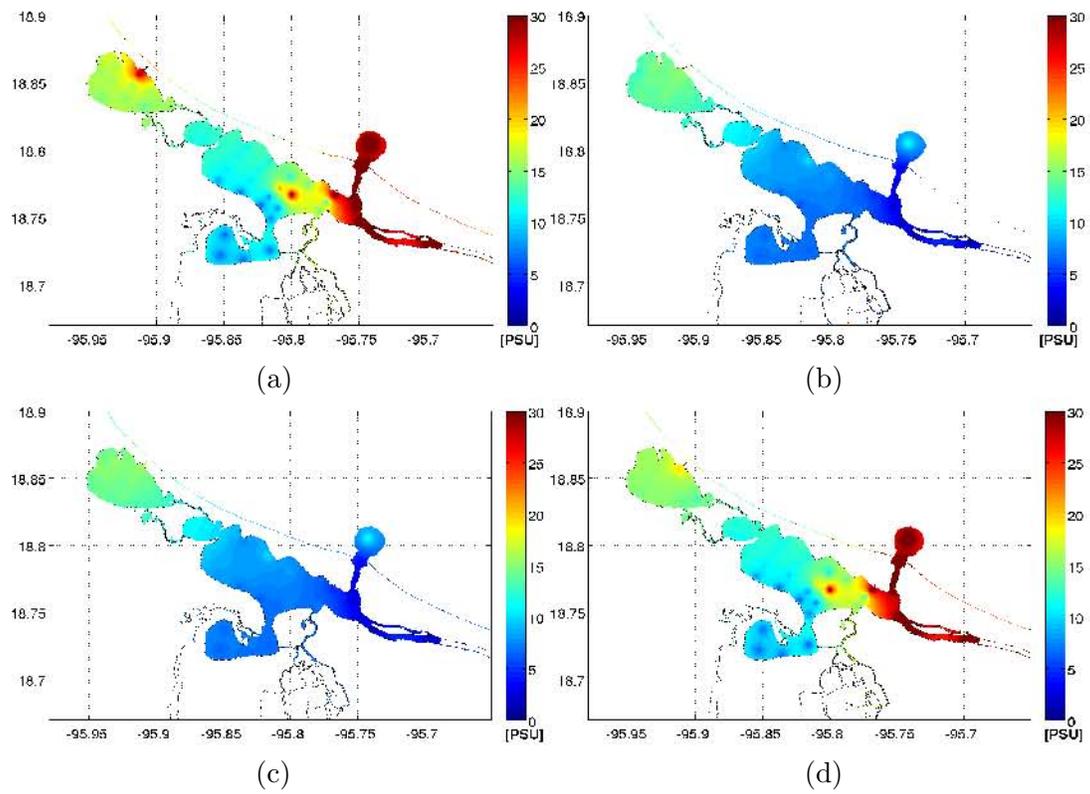


Figura 3.28: (a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 5 (19 y 20 de Mayo, 2012).

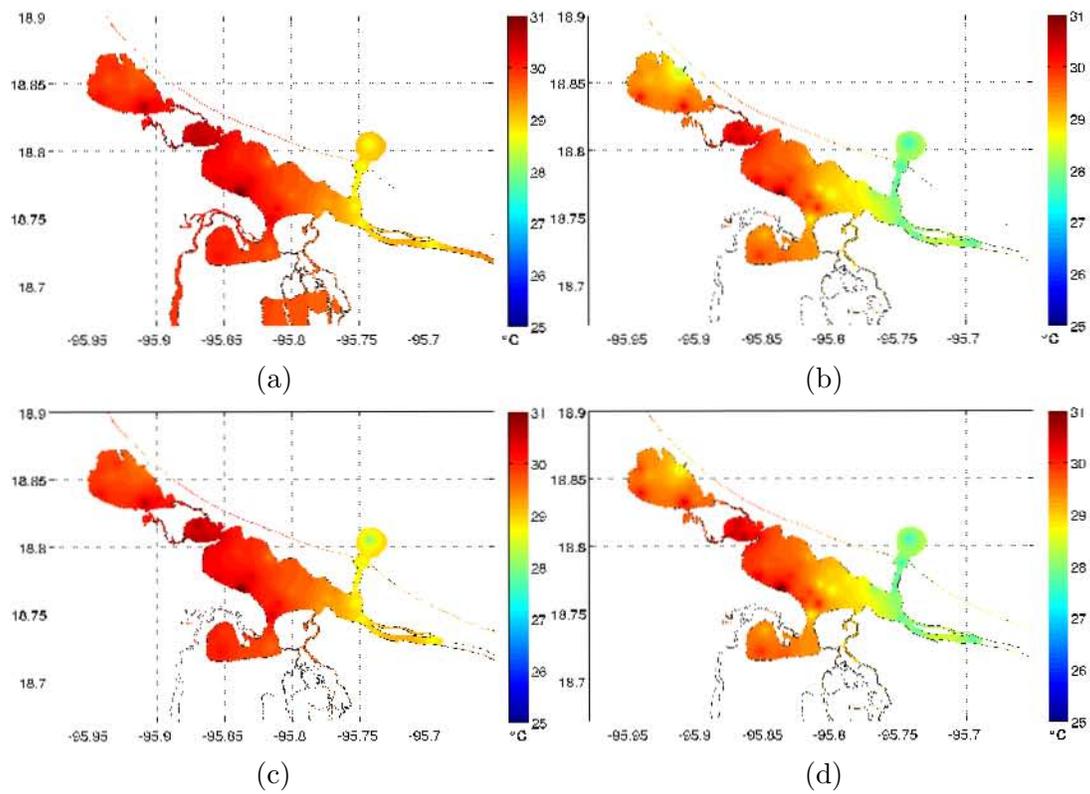


Figura 3.29: (a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 5 (19 y 20 de Mayo, 2012).

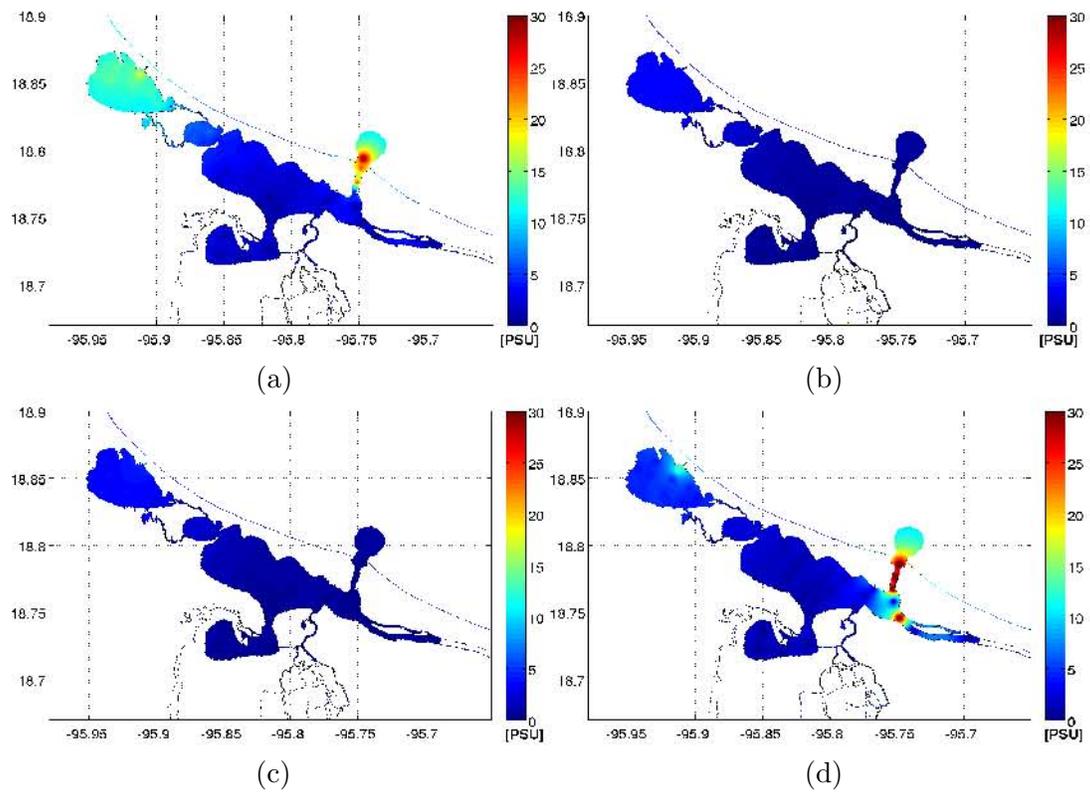


Figura 3.30: (a) Salinidad máxima, (b) salinidad mínima, (c) salinidad en superficie y (d) salinidad en fondo para la campaña 6 (9 y 10 de Septiembre, 2012).

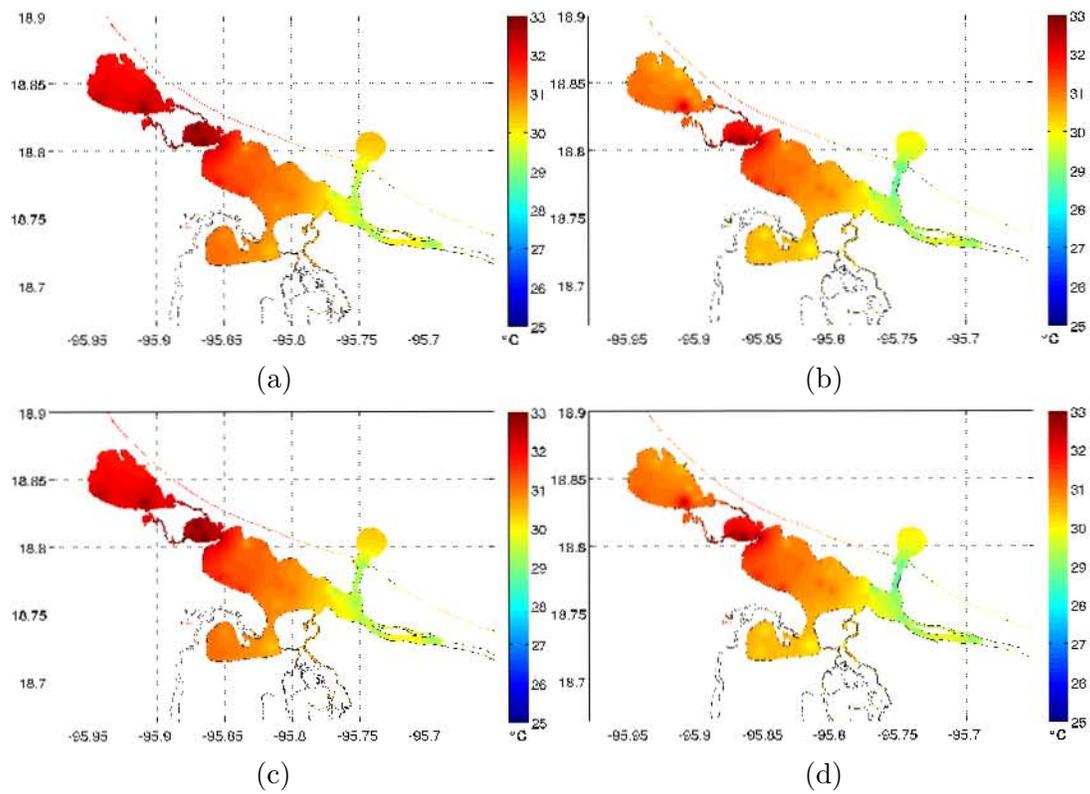


Figura 3.31: (a) Temperatura máxima, (b) temperatura mínima, (c) temperatura en superficie y (d) temperatura en fondo para la campaña 6 (9 y 10 de Septiembre, 2012).

3.3.2 Diagramas T-S

Los diagramas T-S son comunmente usados para analizar las masas de agua que existen en ciertas zonas del oceano. En este caso estos diagramas nos proporcionan una idea de la circulación local relativa a la circulación regional o del tipo de agua en el estuario con relación a la del mar adyacente. Los resultados muestran que la variación estacional de la temperatura en el estuario del río Papaloapan es mayor que la del mar adyacente. En todas las campañas de medición los datos hidrográficos mostraron que la temperatura del mar (aguas con salinidad mayor a 35 psu) varió de 24.5 °C a 28.0 °C, mientras que en los ríos y lagunas este rango fué de 21.0 °C a 33.5 °C (Fig. 3.32). El diagrama T-S de todas las campañas es muy útil ya que se puede observar la evolución de la temperatura y la salinidad a lo largo del año; sin embargo, un análisis regional resulta interesante por lo que se agruparon las estaciones hidrográficas en cuatro zonas, en la figura 3.33 se muestra cada zona. Esta "regionalización" se hizo en función de los distintos procesos físicos que pudieran gobernar en diferentes zonas del sistema. Se definió la laguna Camaronera como la *Zona 1* por estar relativamente menos influenciada por la marea que el resto del sistema y, por lo tanto, pudiera estar más afectada por otros procesos como la evaporación. Hay que mencionar que esta laguna está conectada con el mar a través de dos tuberías de aproximadamente 1.5 metros de diámetro. La *Zona 2* incluye las lagunas de Alvarado y Buen País; esta zona tiene una influencia directa de la marea, la descarga de los ríos Papaloapan, Acula y Limón, y, como se mencionó en el capítulo 4.1, del viento que sopla sobre ella, resultando en una dinámica compleja. La *Zona 3*, que abarca la laguna de Tlalixcoyan, está afectada por la descarga directa del río Limón y sus intercambios de masa con la laguna de Alvarado. Finalmente, la *Zona 4* está conformada por el río Papaloapan y la Boca. Es una de las zonas más dinámicas debido a la interacción entre el agua dulce proveniente del río y el agua salada marina.

El diagrama T-S de las aguas de la laguna Camaronera (Fig. 3.34 (a)) para las campañas de Noviembre 2008, Diciembre 2011 y Septiembre 2012, muestra aguas con un rango de variación de salinidad pequeño y una variación de la temperatura de aproximadamente 2 °C, con una dispersión de valores mayor en las campañas de Agosto 2011, Marzo 2012 y Mayo 2012. En el caso de las lagunas de Alvarado y Buen País (Fig. 3.34 (b)), se observan aguas con salinidades entre 2 y 15 psu y rangos de temperatura distintos para las diferentes temporadas del año. En la laguna Tlalixcoyan (Fig. 3.34 (c)) la variación anual de la salinidad es apenas de 0 a 6 psu, lo anterior es probablemente el resultado de la mezcla entre las aguas de la laguna y del río Limón.

Finalmente, el diagrama T-S para la zona del río Papaloapan y el Canal (Fig. 3.34 (d)) muestra una variación de 1 °C en la temperatura dentro de cada una de las campañas, mientras que en la salinidad se observa una variación más lineal entre los valores de altos y bajos, sugiriendo que las aguas con salinidades intermedias son producto de la mezcla más que de la influencia atmosférica.

Los datos hidrográficos, junto con los diagramas T-S, muestran que en algunos casos las lagunas estuvieron bien mezcladas y en otros estratificadas. Esto se debe, en buena medida, al ciclo diurno de calentamiento y estratificación por la mañana y de mezcla generada por los vientos de la tarde y el enfriamiento nocturno. En las lagunas la estratificación se da principalmente en temperatura y en el río Papaloapan se da tanto en salinidad, y por lo tanto en densidad, como en temperatura debido al flujo del río que en temporada de lluvias induce esta estratificación.

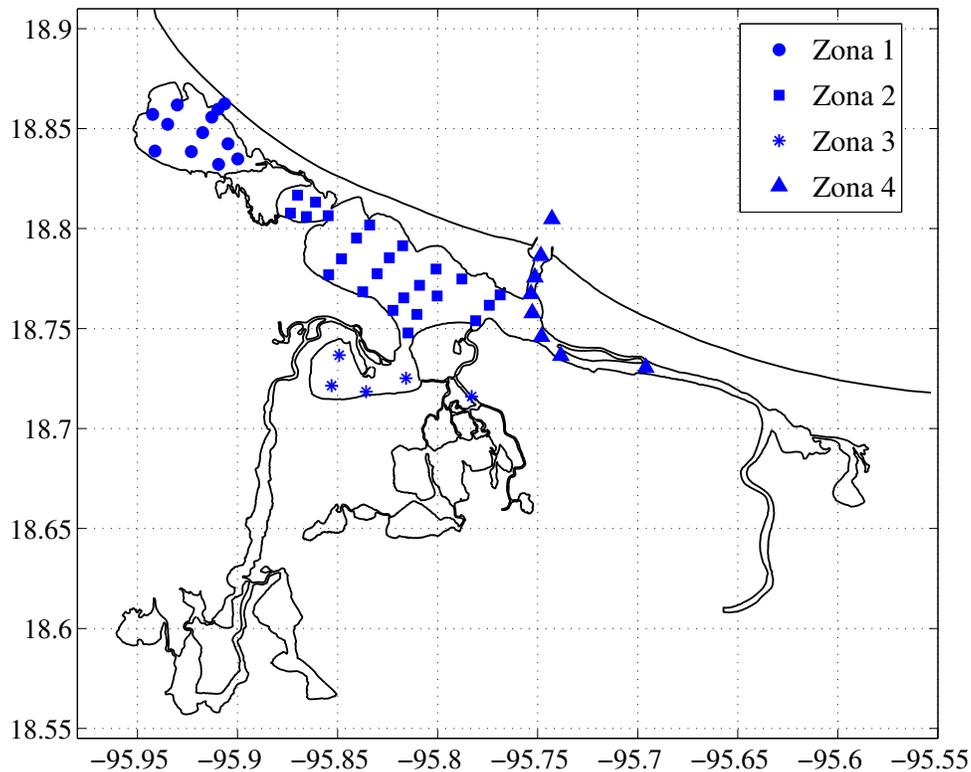


Figura 3.33: Distribución de las estaciones de CTD consideradas para definir las zonas en los diagramas T-S .

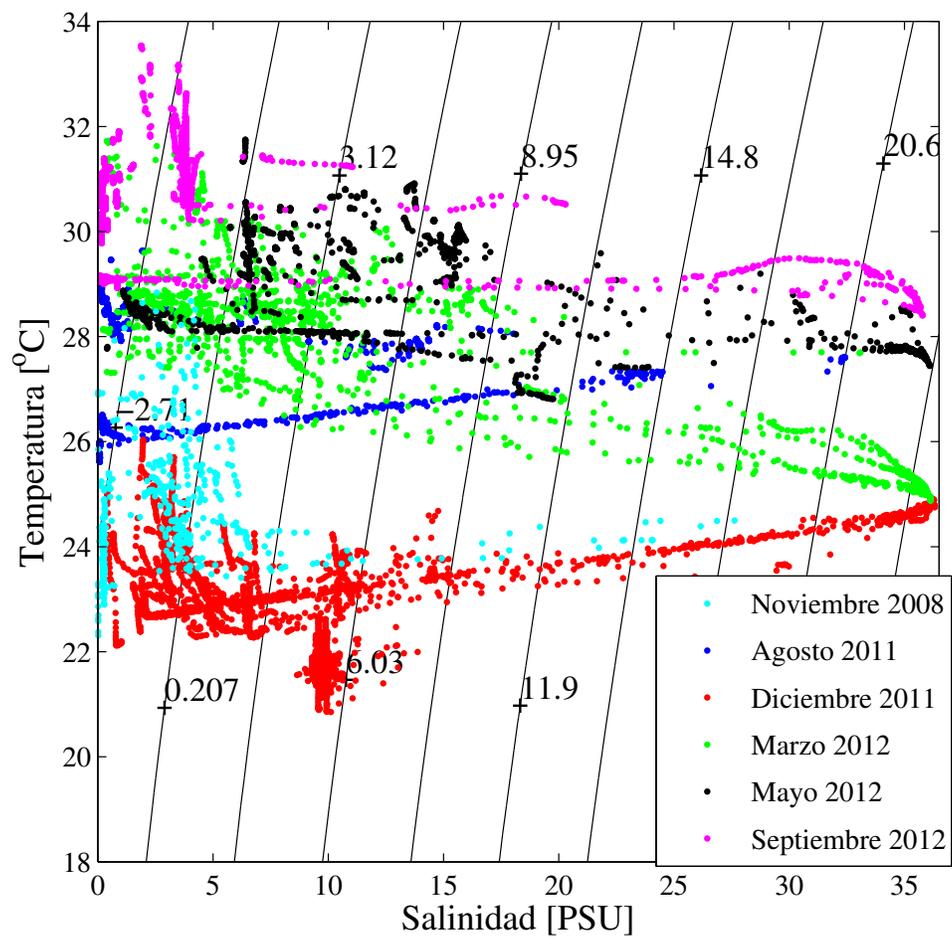


Figura 3.32: Diagrama T-S de todas las campañas de medición.

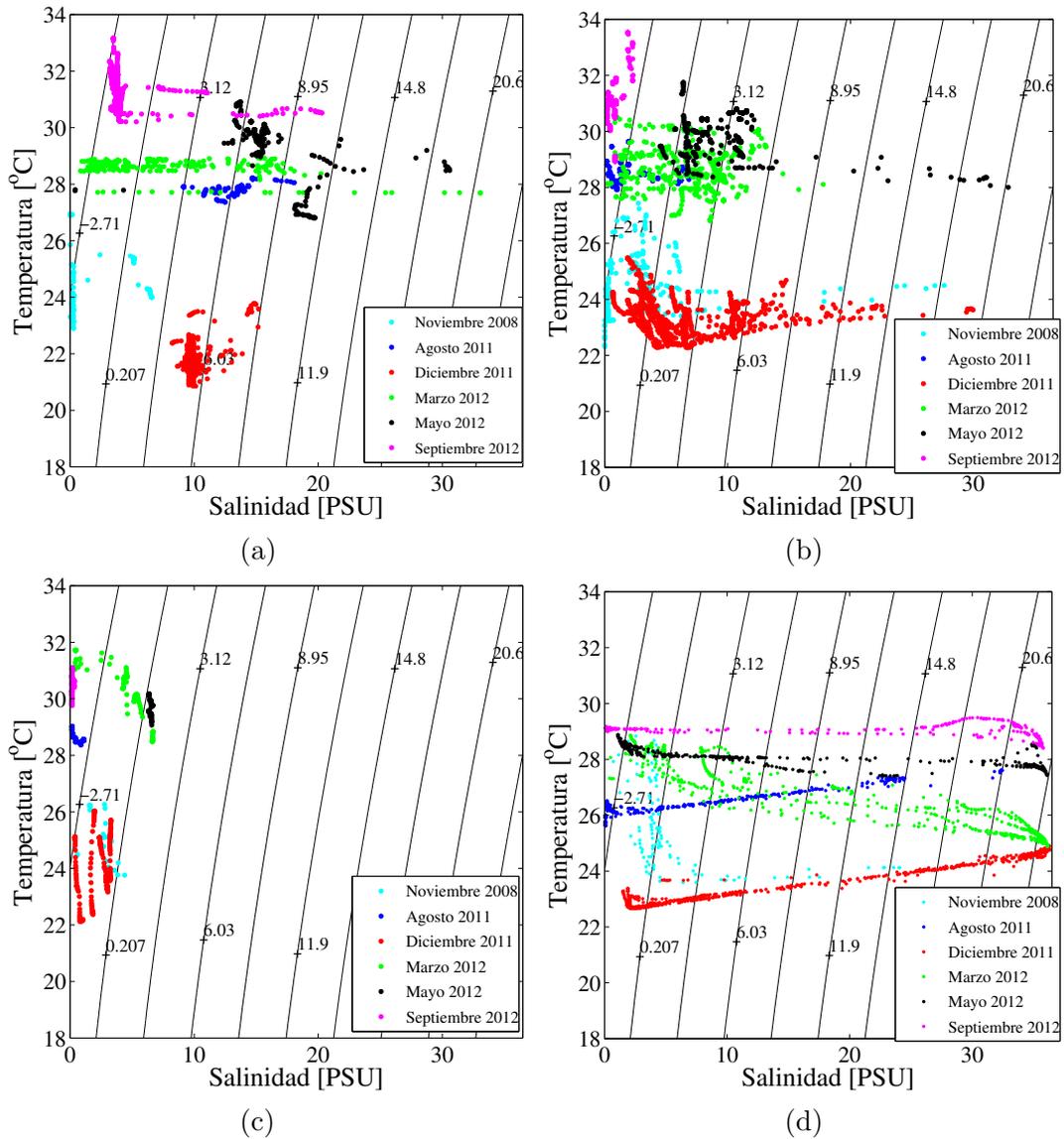


Figura 3.34: Diagramas T-S para la Zona 1 (laguna Camaronera) (a), Zona 2 (lagunas de Alvarado y Buen País) (b), Zona 3 (laguna Tlalixcoyan) (c) y Zona 4 (Río Papaloapan y la Boca) (d).

3.3.3 Transectos longitudinales en el canal de la Boca

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es generar una línea base identificando los procesos físicos clave que caracterizan la dinámica en el estuario, de esta forma se puede comparar dicha referencia con los impactos que tendría un potencial incremento del nivel del mar. Entre los impactos que causaría este incremento es que puede aumentar la distancia de la intrusión salina así como su distribución vertical y por lo tanto la estratificación vertical [6].

Por un lado, la distancia que penetra la salinidad aguas arriba del estuario, depende de una serie de factores: el gasto del río, la mezcla por marea y por viento así como la circulación estuarina. En algunos trabajos como en Hong, 2012, la intrusión salina esta definida como la distancia aguas arriba desde la Boca hasta el límite donde se encuentra la isohalina del fondo con valor de 0.5 ups. En ese mismo trabajo, Hong encontró una correlación positiva fuerte entre la distancia de la intrusión salina y el aumento del nivel del mar así como una correlación negativa con la descarga del río. En la figura 3.36 se muestran los perfiles longitudinales de salinidad de un transecto que abarca el canal de la Boca y aguas arriba del río Papaloapan (Figura 3.35), de las campañas 2-6 (Tabla 2.1). Debido a la planeación de las campañas, aquí se presentan instantaneas de este perfil, pero experimentos que abarquen más de un ciclo de marea resultarían bastante interesantes a futuro. En la figura se puede observar una variación estacional marcada: una penetración mayor en invierno (Fig. 3.36 (b)) y primavera (Fig. 3.36 (c) y (d)) donde es claro que la cuña salina con valor de 30 psu va más allá de los 12 km aguas arriba en estas épocas del año en que se presentan gastos bajos del río; y una menor en verano (Fig. 3.36 (a) y (e)) cuando la cuña apenas y penetra unos cuantos cientos de metros y la descarga del río es muy grande. En la figura 3.37 se muestran los perfiles de la anomalía de densidad para las mismas fechas, es posible observar la clara relación entre esta variable y la salinidad, es decir, valores altos de la anomalía de densidad estan controlados por los valores altos en la salinidad.

En cuanto a la temperatura, es interesante lo que sucede en las campañas 3 y 4 (Diciembre 2011 y Marzo 2012, Figs. 3.38 (b) y (c) respectivamente), por ejemplo, en invierno es notable que el río descarga agua con temperatura menor a la del mar adyacente llegando a tener una diferencia de 2 °C, esto muy probablemente se debe a que al ser época de avenidas, agua de lluvia con una temperatura menor escurre hacia el cauce. En primavera este patrón se invierte, es decir, ahora el agua con temperatura más alta se encuentra en la superficie y proviene del río. En verano (Agosto

2011 y Septiembre 2012, Figs. 3.38 a) y e) respectivamente), la mezcla por la descarga del río es tal que la columna de agua se homogeneiza y es por eso que se observan valores constantes en todo el transecto de hasta 29 °C en el caso de Septiembre de 2012.

Por otro lado, actualmente la estratificación vertical es un tema de interés entre la comunidad científica ya que está altamente correlacionada con hipoxia y el habitat acuático. Existen estudios que documentan una correlación cercana entre la estratificación en un estuario e hipoxia [12]. La estratificación vertical inhibe la mezcla que de otra manera repondría el oxígeno en aguas profundas. A fin de cuantificar la estratificación en esta parte del sistema, se calculó el cuadrado de la *Frecuencia de Brunt-Väisälä*, N^2 , para medir la fuerza de la estratificación a cada nivel de profundidad z_i :

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho} \frac{\delta\rho_i}{\delta z_i} \quad (3.3.3.1)$$

Aquí, g es la constante gravitacional, ρ es la densidad del agua (en kg m^{-3}), y $\delta\rho_i/\delta z_i$ es el gradiente de densidad a la profundidad z_i . El máximo valor de N^2 y su profundidad estan identificados como la fuerza y la profundidad de la pycnoclina. En la figura 3.39 se muestran los perfiles de la *Frecuencia de Brunt-Väisälä* para las campañas mencionadas, se puede observar la variación estacional de la estratificación: en los meses de verano (Agosto 2011 y Septiembre 2012, Figuras 3.39 (a) y (b) respectivamente) prácticamente no se observa alguna señal importante de esta variable, es importante recordar que en esta época el gasto del río es muy grande a tal grado que la mezcla aumenta y por lo tanto los valores de N^2 son cercanos a cero en toda la columna de agua; en cambio, en los meses de invierno y primavera (Diciembre 2011, Marzo 2012 y Mayo 2012, Figuras 3.39 (b), (c) y (d)) se observan valores altos de estratificación en la zona de la interface entre el agua dulce del río y el agua salada del mar adyacente, lo cual es consistente con la forma de la cuña salina, es en esta zona donde el cambio de salinidad en la vertical, y por lo tanto de densidad, es el mayor (Fig. 3.36 (d)).

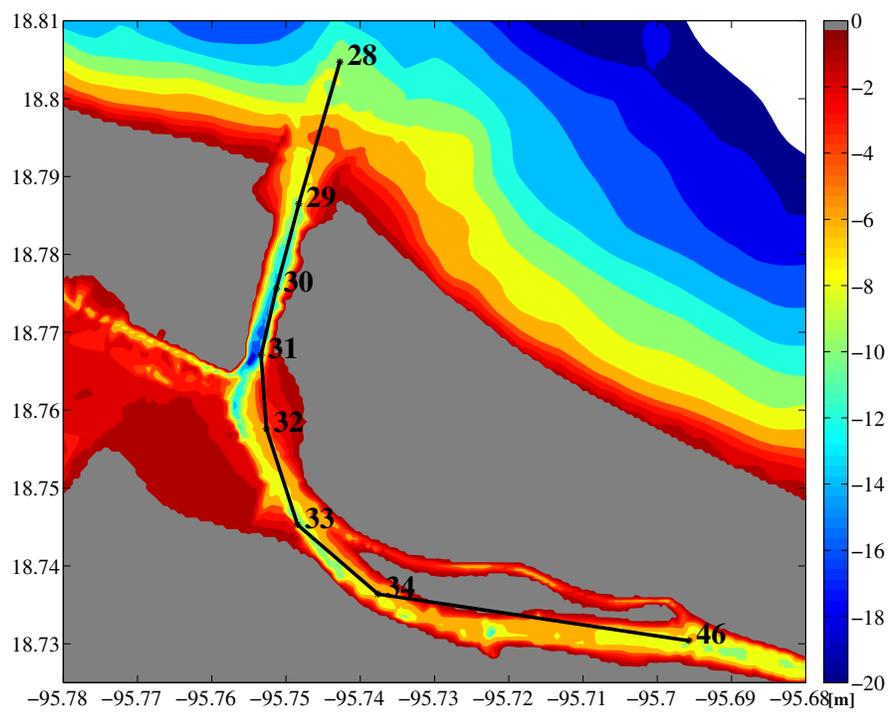


Figura 3.35: Transecto longitudinal en el canal de la Boca y batimetría.

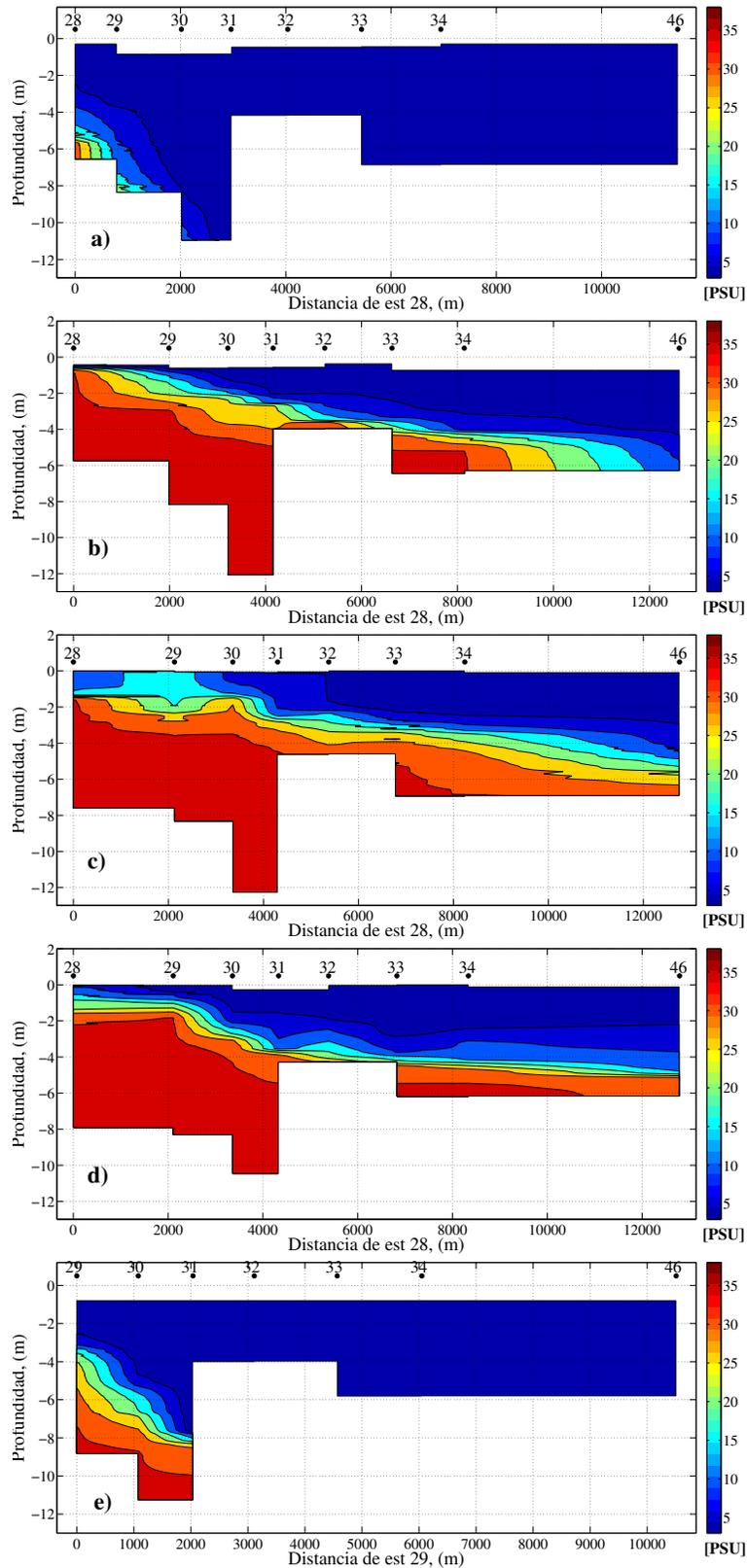


Figura 3.36: Salinidad en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).

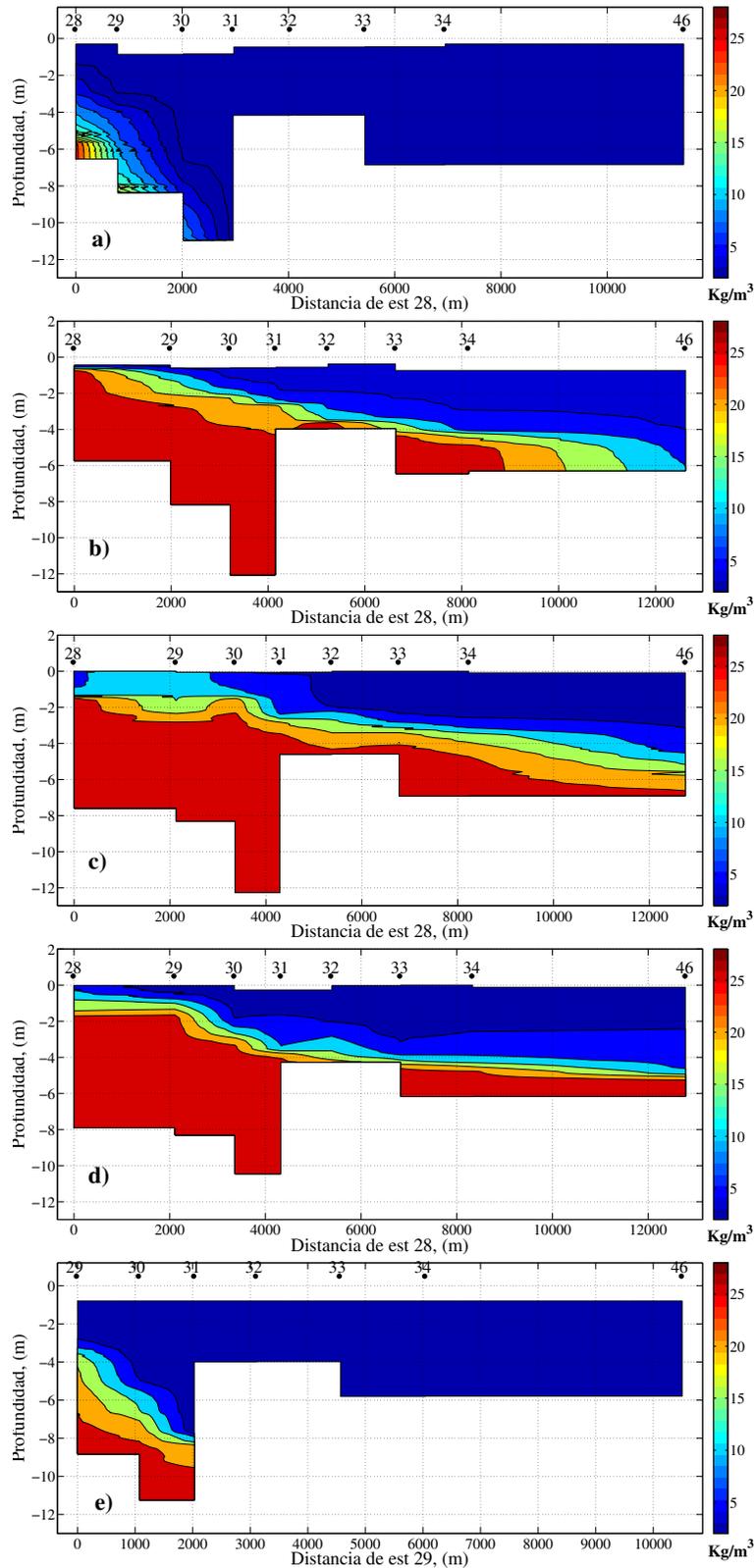


Figura 3.37: Densidad en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).

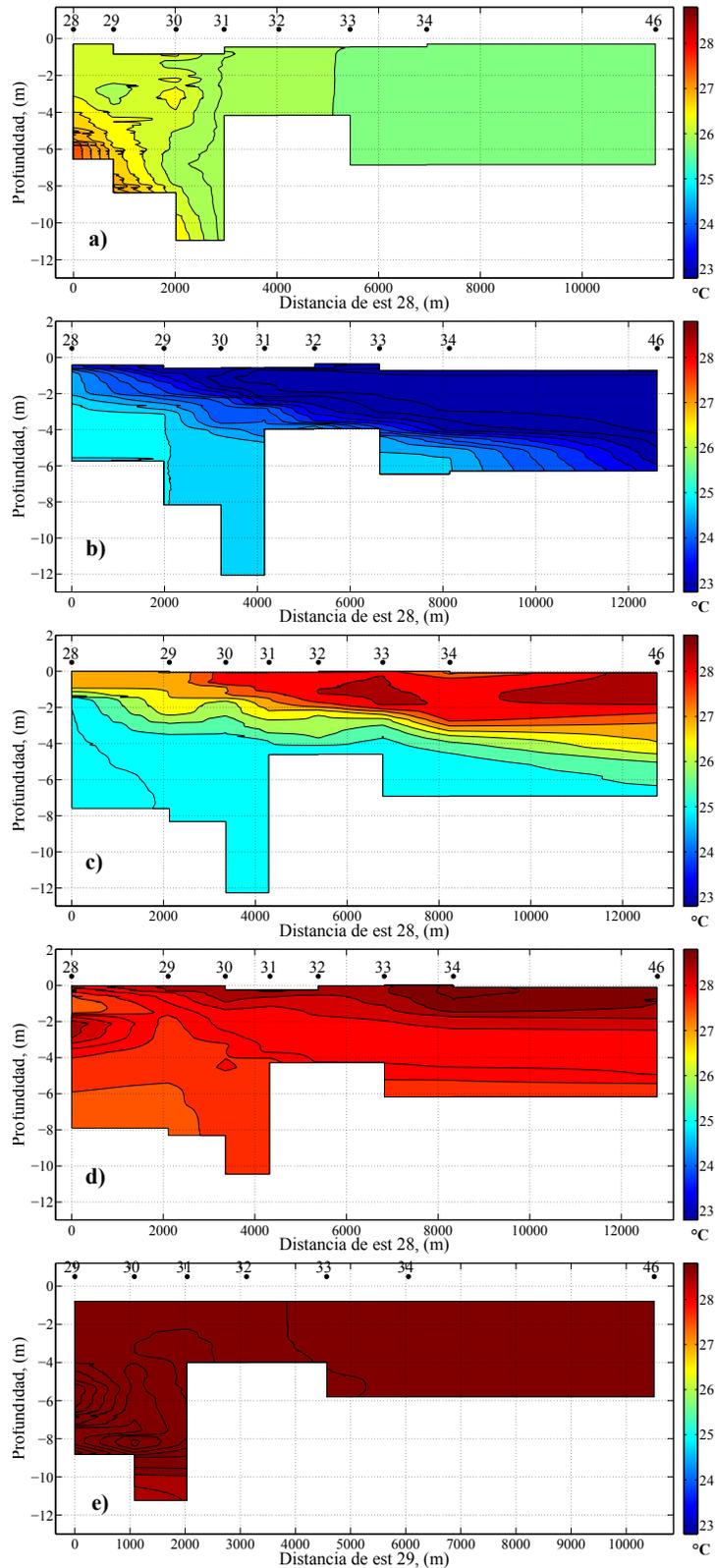


Figura 3.38: Temperatura en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).

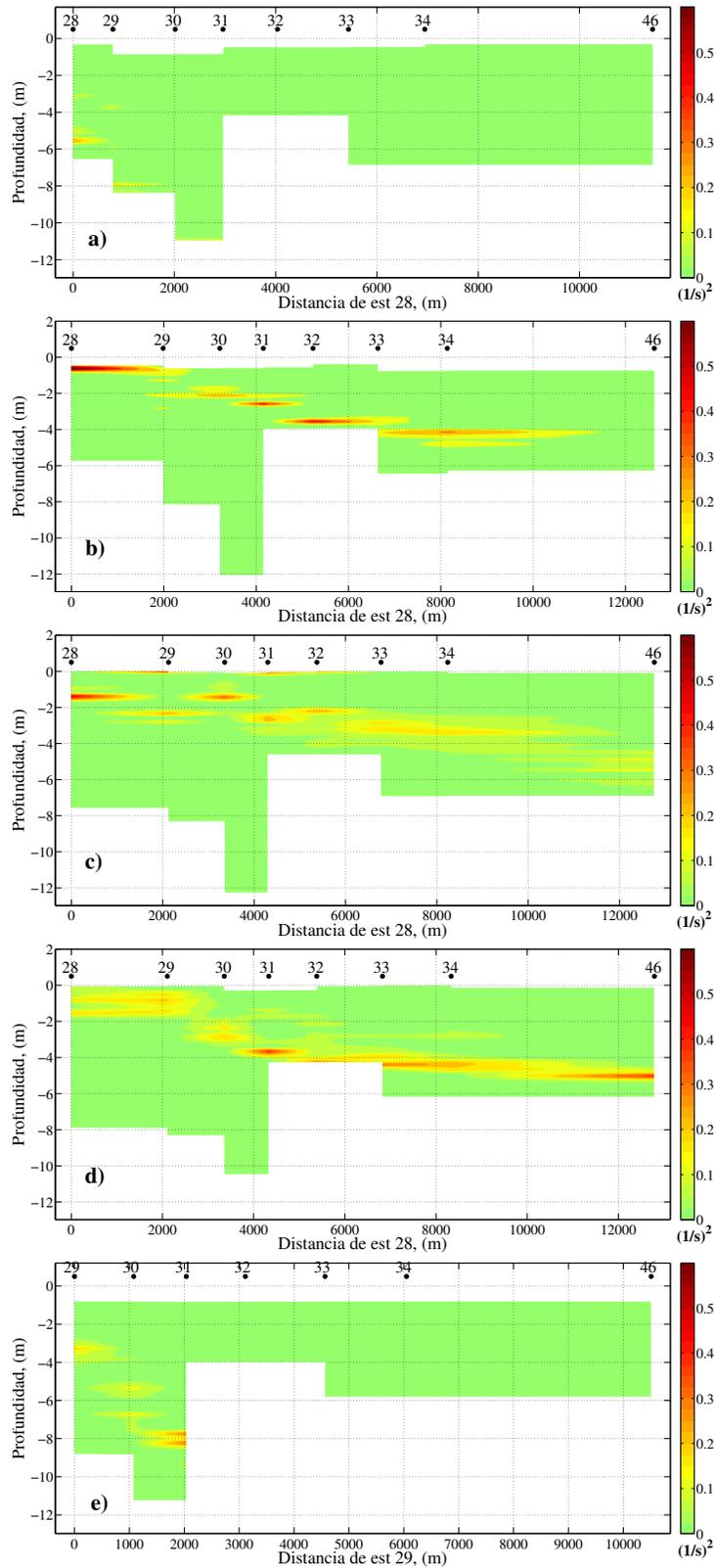


Figura 3.39: Frecuencia de flotación N^2 en un transecto longitudinal del canal de la Boca para la campaña 2 (Agosto 2011) (a), la campaña 3 (Diciembre 2011) (b), la campaña 4 (Marzo 2012) (c), la campaña 5 (Mayo 2012) (d) y la campaña 6 (Septiembre 2012) (e).

Capítulo 4

Conclusiones

De acuerdo a la definición de un estuario propuesta por Cameron y Pritchard (1963) (sección 2.2.1), el estuario del Papaloapan es de tipo *clásico* y *positivo*, es decir, la entrada de agua dulce proveniente del río Papaloapan es el agente principal que establece el gradiente de densidad longitudinal y además excede las pérdidas que pueden ser causadas por evaporación. En cuanto al origen geomorfológico, este estuario puede entrar en los *hechos por barrera*, es decir lo que hoy se conoce como el pueblo de Alvarado es el resultado de un apilamiento que causó la formación de esta barra de arena entre la costa y el océano.

El impacto de la interacción de los procesos no-lineales y la marea puede tener un desfase notable en la elevación total respecto a la marea pronosticada, generando un residual inducido por interacción de procesos. Utilizando información de la elevación total en el estuario del Papaloapan, esta componente del residual puede ser parcialmente removida usando análisis armónico clásico y es totalmente removida usando métodos de filtrado. Trabajo a futuro en modelación numérica resulta apropiado para investigar el comportamiento del sistema en un escenario de aumento del nivel del mar así como la contribución aislada de procesos físicos al residual y la fuerza de la interacción entre estos procesos y la marea.

Las componentes diurnas de la marea son más importantes en la Boca y la laguna de Alvarado. Las amplitudes de marea son similares en las tres primeras lagunas y menores en la laguna Camaronera y aguas arriba del río Limón.

En frecuencias submareales se identificaron variaciones importantes del nivel del agua asociadas al paso de los Nortes en otoño-invierno, del orden de 40 cm, las cuales se observan en toda la región. También ocurrió una elevación que se mantuvo por más de 20 días en Septiembre de 2011, que muy probablemente fue causada por el máximo estacional del nivel del mar en el oeste del Golfo de México observado en ese mes. Otra elevación ocurrió de Junio a Agosto de 2012 asociada a las precipitaciones.

La temperatura tiene un marcado ciclo anual, con mayor amplitud en las aguas oceánicas contiguas, llegando a los 36°C y bajando a 17°C. Existe además una variación importante asociada al paso de los nortes, con una duración de 2-10 días y una variación diurna que alcanza los 4°C, aunque en los ríos es mucho menor ($\sim 0.5^\circ\text{C}$). También se observó una disminución de la temperatura en Septiembre de 2011, que muy probablemente se debió a la entrada de agua de mar de menor temperatura como consecuencia de una elevación del nivel del mar.

El agua salobre alcanzó las lagunas aguas arriba del Río Limón durante Mayo y Junio de 2012 y en Julio, Agosto y hasta mediados de Septiembre, cuando se retiraron los sensores, ya no había penetración de aguas salobres.

Glosario

afuente En hidrología, un afluente corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que no desemboca en el mar sino en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia. 10, 81

apogeo Punto más alto o más alejado al cual se encuentra un objeto de la Tierra. 81

bajamar Nivel más bajo registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o también que tengan influencia sobre las mismas los efectos de condiciones meteorológicas. 52, 81

buoyancia Estratificación en la columna de agua, causada por la descarga de agua dulce de un río, por precipitación o por evaporación. 81

constituyentes compuestos Son constituyentes de marea armónicos (o de corriente de marea) con una rapidez igual a la suma o diferencia de las rapidezces de dos o más constituyentes elementales. La presencia de los constituyentes compuestos es usualmente atribuida a condiciones de aguas someras. 20, 81

constituyentes de aguas someras Es un término armónico de periodo corto introducido en la fórmula de los constituyentes de marea (o de corriente de marea) para justificar el cambio en la forma de la onda de marea que resulta de las condiciones de aguas someras. 20, 81

efecto del barómetro invertido Es la corrección de variaciones en la altura del nivel del mar debidas a variaciones de presión atmosférica (carga atmosférica). Puede alcanzar hasta +/- 15 cm y es calculado por los modelos meteorológicos. 2, 38, 81

efluente En hidrología, un efluente corresponde a un curso de agua, también llamado distributivo, que desde un lugar llamado confluencia se desprende de un lago o río como una derivación menor, ya sea natural o artificial. 10, 81

escala submareal Escala de tiempo con variaciones mayores a 24 horas. 2, 81

estoa de marea El estado en el cual la rapidez de una corriente de marea es casi cero, especialmente el momento cuando una corriente que se esta revirtiendo, cambia de dirección y su rapidez es cero. El término también se aplica al periodo completo en el cual la rapidez es baja, cerca del tiempo de revertimiento de la corriente cuando es tan débil que no tiene importancia práctica en la navegación. La relación del tiempo de la estoa de marea y la fase de la marea varía en diferentes localidades. 52, 81

factor de forma Número que mide la importancia relativa de los constituyentes de marea diurnos y semidiurnos, y se deriva de las amplitudes de los constituyentes armónicos de la siguiente forma:

$$FF = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2} + H_{S_2}}$$

En términos del factor de forma, FF, las mareas se pueden clasificar como:

FF = 0 a 0.25	forma semidiurna
FF = 0.25 a 1.50	mixta, principalmente semidiurna
FF = 1.50 a 3.00	mixta, principalmente diurna
FF = más de 3	forma diurna. 29, 81

latitudes templadas Franja climática que cae entre los trópicos y los círculos polares. Los cambios entre verano e invierno en estas regiones son generalmente relativamente moderados, en lugar de extremadamente calientes o fríos. 1, 81

llenante El movimiento de una corriente de marea costa adentro o aguas arriba de un río o estuario. 1, 16, 81

macromareal Sistema en el cual el rango de marea excede los cuatro metros. 1, 81

mareas muertas Mareas con un rango pequeño o corrientes de marea con rapidez baja que ocurren quincenalmente cuando la Luna está en cuarto menguante o

cuarto creciente. El rango en mareas muertas es el rango promedio en este periodo y es mas conveniente que se calcule a partir de las constantes armónicas. Es más pequeño que el rango medio donde el tipo de marea es semidiurna o mixta, y no tiene un significado práctico donde el tipo de marea es predominantemente diurno. 38, 81

mareas vivas Mareas con un rango grande o corrientes de marea con rapidez alta que ocurren quincenalmente en Luna llena o Luna nueva. El rango en mareas vivas es el rango promedio en este periodo y es mas conveniente que se calcule a partir de las constantes armónicas. Es más grande que el rango medio donde el tipo de marea es semidiurna o mixta, y no tiene un significado práctico donde el tipo de marea es predominantemente diurno. 38, 81

mesomareal Sistema en el cual el rango de marea se encuentra entre los dos y los cuatro metros. 81

micromareal Sistema en el cual el rango de marea no excede los dos metros. 1, 81

onda estacionaria Onda que oscila sin progresar. La mitad de dicha onda se puede ilustrar como la oscilación del agua en un sartén cuando este es inclinado. Cerca del eje, el cual se llama nodo o línea nodal, no hay movimiento vertical del agua. Los extremos de la onda se llaman *loops* y en estos lugares el movimiento vertical es máximo. La corriente es máxima cerca del nodo y mínima en los *loops*. El periodo de una onda estacionaria depende de la longitud y la profundidad del cuerpo de agua y, para una cuenca rectangular simple, se puede expresar con la fórmula:

$$T = 2L/gd$$

donde T es el periodo de la onda, L es la longitud de la cuenca, d la profundidad, y g la aceleración de la gravedad. Una onda estacionaria puede resolverse como dos ondas progresivas de igual amplitud y rapidez iguales, moviéndose en direcciones opuestas. 20, 81

perigeo Punto más cercano al cual se encuentra un objeto de la Tierra. 39, 81

pleamar Nivel más alto registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o también a que tengan influencia sobre las mismas los efectos de condiciones meteorológicas. 52, 81

prisma de marea Volumen de agua que entra o sale de la boca de un estuario con el aumento o el descenso de la marea, sin incluir la descarga de ríos. 2, 6, 81

regresión marina Es un proceso geológico que ocurre cuando áreas sumergidas son expuestas por arriba del nivel del mar, ocasionado por un descenso en el nivel. 11, 81

seiche Onda estacionaria causada usualmente por vientos fuertes y/o cambios en presión barométrica. Se encuentran en lagos, estuarios y en áreas del océano abierto. El periodo de un seiche en un cuerpo de agua rectangular cerrado se representa usualmente por la fórmula:

$$T = 2L/gd$$

donde T es el periodo de la onda, L es la longitud, d la profundidad promedio del cuerpo de agua, y g la aceleración de la gravedad. 30, 81

vaciante El movimiento de una corriente de marea costa afuera o aguas abajo de un río o estuario. 1, 38, 81

Bibliografía

- [1] Bolaños, R., Brown, J. M., Amoudry, L. O. and Souza, A. J., 2012. *Tidal, Riverine, and Wind influences on the Circulation of a Macrotidal Estuary*. Journal of Physical Oceanography 43, 29-50.
- [2] Brown, J. M., Bolaños, R., Howart M. J., Souza A. J., 2012. *Extracting sea level residual in tidally dominated estuarine environments*. Ocean Dynamics 62, 969-982.
- [3] Cameron, W. M. and Pritchard, D. W., 1963. *Estuaries*. En Hill M. N., *The Sea*, Vol. 2. John Wiley and Sons, New York, 306-324.
- [4] Goring, D. G., Stephens, S. A., Bell, R. G. and Pearson C. P., 2011. *Estimation of extreme sea levels in a tide-dominated environment using short data records*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 137, No. 3, 150-159.
- [5] Hansen, D. V. and Rattray, Jr., 1966 *New dimensions in estuary classification*. Limnol. Oceanogr. 11, 319-326.
- [6] Hong, B., Shen J., 2012. *Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 104-105, 33-45.
- [7] Horsburgh, K. J. and Wilson, C., 2007. *Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea*. Journal of Geophysical Research 112.
- [8] Huang, H., Chen C., Blanton J. O., Andrade F. A., 2007. *A numerical study of tidal asymetry in Okatee Creek, South Carolina*. Estuarine Coastal and Shelf Science 78, 190-202.

- [9] Jay, D., Smith D., 1990. *Residual circulation in shallow estuaries: 1. Highly stratified, narrow estuaries*. Journal of Geophysical Research 95, 711-731.
- [10] Moreno-Casasola, et al, 2010. *Inventario, delimitación, caracterización y uso sustentable de los humedales de la cuenca del río Papaloapan, México*. Instituto de Ecología, 811pp.
- [11] Morey, S. L., S. Baig, M. A. Bourassa, D. S. Dukhovskoy, and J. J. O'Brien, 2006. *Remote forcing contribution to storm-induced sea level rise during Hurricane Dennis*. Geophys. Res. Lett., 33, L19603, doi:10.1029/2006GL027021.
- [12] Murphy, P., Valle-Levinson, A., 2008. *Tidal and residual circulation in the St. Andrew Bay system, Florida*. Continental Shelf Research 28, 2678-2688.
- [13] Nihoul J. C. J. , Ronday F. C., Peters J. J., Sterling A., 1978. *Hydrodynamics of the Scheldt Estuary*. Hydrodynamics of Estuaries and Fjords 23, 27-53.
- [14] Pawlowicz, R., Beardsley, R. C., Lentz, S., 2002. *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE*. Computers and Geosciences 28, 929-937.
- [15] Pritchard, D. W. 1952. *Salinity distribution and circulation in the Chesapeake bay estuarine system*. Journal of Marine Research XI, 2. 106-123.
- [16] Pritchard, D. W. 1955. *Estuarine circulation patterns*. Proc. Am. Soc. Civil Eng. 81(717), 1-11.
- [17] Pugh, D., 2004. *Changing sea levels, effects of tides, weather and climate*. Cambridge University Press, 265pp.
- [18] Pugh, D., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley and Sons, 472pp.
- [19] Simpson, J. H., Brown, J., Matthews, J., Allen, G., 1990. *Tidal Straining, Density currents, and Stirring in the Control of Estuarine Stratification*. Estuaries, 13, 125-132.
- [20] Tomczak, M., 1998. *Shelf and Coastal Oceanography*. URL <http://www.es.flinders.edu.au/mattom/ShelfCoast/index.html>.
- [21] Valle-Levinson, A., Delgado, J., Atkinson, L., 2001. *Reversing water exchange patterns at the entrance to a semiarid coastal lagoon*. Estuarine, Coastal and Research Science, 53, 825-838.

- [22] Valle-Levinson, A., 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press, 315pp.
- [23] Valle-Levinson, A., M. Olabarrieta, and A. Valle, 2013. *Semidiurnal perturbations to the surge of hurricane Sandy*. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2211-2217, doi:10.1002/grl.50461.
- [24] Zavala-Hidalgo, J., de Buen Kalman, R., Romero-Centeno, R., Hernandez-Maguey, F., 2010. *Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas*. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J. L. Rojas Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SyG Editores. Gobierno del Estado de Tabasco. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 249-267, 514 p. ISBN 978-607-7887-11-9 (v. impresa). ISBN 978-607-7887-12-6 (v. electrónica), 2010.