



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS COSTEROS
HIDRODINÁMICOS EN LAGUNA DE MECOACÁN
TABASCO, MÉXICO.**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
ÁREA OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

PRESENTA:

JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

MÉXICO D.F. , CIUDAD UNIVERSITARIA

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Jurado asignado:

Presidente:	Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta
Secretario:	Dr. Adrián Pedrozo Acuña
Vocal:	Dra. Adela Monreal Gómez
Suplente:	Dr. Rodolfo Silva Casarín
Suplente:	Dr. Ismael de Jesús Mariño Tápia

Lugar de realización de tesis:

Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pedrozo Acuña



A handwritten signature in dark ink, consisting of a large, stylized 'A' followed by a horizontal line and a diagonal stroke, positioned above a solid horizontal line.

FIRMA

*A mis ángeles Gabriela, Mariana y Samuel, que son el estímulo constante y la razón de
mis esfuerzos,*

El brillo de sus ojos es la alegría de mi corazón y la fortaleza que necesita mi vida.

*A mi Madre, mi respeto y eterno agradecimiento por su apoyo incondicional. Es la
tranquilidad que me quita la distancia.*

Agradecimientos

Mi agradecimiento al Instituto de Ingeniería por el apoyo para realizar este trabajo, en especial, al Dr. Adrian Pedrozo Acuña por su disposición y confianza. Con su amistad y consejo fue posible llegar a culminar esta nueva etapa en mi vida.

Gracias al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología y a sus profesores por sus aportes y conocimientos, que me brindaron importantes bases para mi formación profesional.

Gracias al grupo de Ingeniería de Costas y Puertos por su apoyo, al Dr. Rodolfo Silva por sus grandes aportes y lineamientos, y a todos los compañeros que compartieron conmigo en todo este tiempo de estadía en México.

Gracias a mis asesores Dr. Ismael Mariño Tápia, Dra. Adela Monreal Gómez, y Dr. Miguel Ángel Alatorre por sus aportes para la realización de este trabajo. Igualmente a la Dra. Cecilia Enríquez Ortiz por su colaboración.

Gracias a mis compañeros de cubículo, Miguel, Alejandra, Ariadna, Jorge... por su amistad que es invaluable para que día a día me sienta como en casa.

Gracias a Carolina, compañera y cómplice que me apoyo siempre.

Gracias a mi familia: mis niños hermosos Gabriela, Mariana y Samuel, a “mamita Ruth”, Fernando y mis hermanos Johanna, Paula y Andrés, por su amor y apoyo.

Gracias a mis amigos, los que están lejos: Eduardo, Carlos, Andrés, Cristian y Diego y los que se encuentran cerca: Brayan, Diana y Cesar por su apoyo e incondicionalidad.

Gracias a la Universidad Autónoma de México y en general a México por compartir su esencia y espíritu. Gracias por permitirme ser parte de ustedes.

ÌNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. ESTRUCTURA DE LA TESIS	2
1.2. INTRODUCCION	3
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4. OBJETIVO	6
1.5. METODOLOGIA.....	6
2. SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN	2
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	2
2.1.1. DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN	2
2.1.2. GEOMORFOLOGÍA.....	4
2.1.2.1. FORMACIÓN DE LA LAGUNA.....	5
2.1.2.2. EDAFOLOGÍA	6
2.1.3. CLIMA.....	7
2.1.3.1. VIENTOS.....	8
2.1.3.2. CICLONES TROPICALES.....	10
2.1.4. OLEAJE	12
2.1.5. MAREA.....	13
2.1.6. IMPORTANCIA DE LA ZONA.....	15
2.2. ANTECEDENTES – ESTADO DEL ARTE.....	15
2.2.1. INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS	16
2.2.1.1. HIDRODINÁMICA Y MORFOLOGÍA.....	16
2.2.2. INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS/GEOGRÁFICAS	18

Índice

2.2.3. INVESTIGACIONES QUÍMICO-BIOLÓGICAS	19
2.2.3.1. ESTUDIOS BIOLÓGICOS.....	19
2.2.3.2. ESTUDIOS QUÍMICOS	20
3. CAMPAÑA DE CAMPO	21
3.1. BATIMETRÍA.....	21
3.2. GASTO Y CORRIENTES EN LA BOCA LAGUNAR	23
3.3. GASTO EN EL RÍO HONDO.....	27
3.4. SALINIDAD, TEMPERATURA Y DENSIDAD EN LA LAGUNA	28
3.4.1. SALINIDAD	31
3.4.2. TEMPERATURA.....	32
3.4.3. ESTRATIFICACIÓN DE LA LAGUNA.....	34
4. MODELADO NUMÉRICO DEL SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN, TABASCO.....	43
4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO (MIKE21FM)	43
4.1.1. ECUACIONES DE GOBIERNO	44
4.1.1.1. CONTINUIDAD DE MASA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO	44
4.1.1.2. TRANSPORTE DE TEMPERATURA Y SALINIDAD	46
4.1.1.3. ESFUERZO EN EL FONDO	48
4.1.1.4. ESFUERZO DEL VIENTO.....	48
4.2. MALLA DE MODELACIÓN	49
4.3. CONDICIONES DE FRONTERA	51
4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	52
4.4.1. SALINIDAD	55
4.4.2. TEMPERATURA Y DENSIDAD	56
5. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA – MODELACIÓN DE ESCENARIOS.....	57
5.1. PREDOMINANCIA DE MAREA DE TORMENTA	57
5.1.1. CORRIENTES – CIRCULACIÓN.....	59

Índice

5.1.2.	SALINIDAD	62
5.1.3.	TEMPERATURA.....	63
5.1.4.	IMPACTO HIDRÁULICO BAJO MAREA DE TORMENTA EXTREMA. 65	
5.2.	PREDOMINANCIA DE CAUDALES FLUVIALES	66
5.2.1.	CORRIENTES – CIRCULACIÓN.....	67
5.2.2.	SALINIDAD	69
5.2.3.	TEMPERATURA.....	71
5.2.4.	IMPACTO HIDRÁULICO BAJO CAUDAL EXTREMO	73
5.3.	PREDOMINANCIA DE VIENTOS	75
5.3.1.	CORRIENTES – CIRCULACIÓN.....	75
5.3.2.	SALINIDAD	78
5.3.3.	TEMPERATURA.....	79
5.3.4.	IMPACTO HIDRÁULICO BAJO VIENTO EXTREMO	81
5.4.	ESCENARIO SIMULTÁNEO – MAREA DE TORMENTA Y DESCARGA EN EL RÍO	82
5.4.1.	CORRIENTES – CIRCULACIÓN.....	83
5.4.2.	SALINIDAD	85
5.4.3.	TEMPERATURA.....	87
5.4.4.	IMPACTO HIDRÁULICO BAJO CONDICIONES SIMULTÁNEAS... ..	89
5.5.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA BOCA LAGUNAR	91
5.5.1.	HIDRODINÁMICA DE LA BOCA	92
5.5.2.	ESTABILIDAD DEL SEDIMENTO	101
5.5.3.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EQUILIBRIO.....	104
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
7.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	118
8.	BIBLIOGRAFIA.....	120

Índice

ANEXO A EQUIPOS DE MEDICIÓN CAMPAÑA DE CAMPO

ANEXO B RESULTADOS DE MODELACIÓN

RESUMEN

Alrededor del mundo, las lagunas costeras representan zonas de alto valor ecológico, económico y social dado que albergan una gran variedad de actividades antropogénicas, entre las que destacan la pesca y el albergue de ecosistemas únicos. Recientemente, y como resultado de su gran capacidad de almacenamiento, se ha resaltado su uso potencial como zonas de amortiguamiento ante la incidencia de eventos meteorológicos extremos (ej. inundaciones fluviales). Sin embargo, para un manejo adecuado de estos sistemas, es importante comprender y predecir los impactos que las actividades humanas y las fuerzas naturales tienen sobre ellos.

Esta investigación presenta la evaluación integral de la hidrodinámica de la laguna de Mecoacán, en el estado de Tabasco, México, con el propósito de analizar los posibles impactos de eventos extremos incidentes sobre la misma. Para ello, se emplean dos vías de trabajo paralelas, la primera considera la generación de una base de datos de alta resolución de las variables hidrodinámicas (gastos, salinidad, temperatura) más importantes registradas durante condiciones normales de operación. La segunda, consiste en la utilización de estos datos para forzar, calibrar y validar un modelo numérico bidimensional. Una vez validado, el modelo se utiliza para generar diferentes escenarios de operación que consideran los efectos de eventos extremos debidos a descargas de los afluentes fluviales y la marea de tormenta incidente en la boca lagunar. La discusión de los resultados incluye una descripción de la distribución de la salinidad y temperatura al interior del cuerpo lagunar bajo los distintos forzamientos.

Los resultados indican que la hidrodinámica de la laguna de Mecoacán está dominada principalmente por la circulación asociada a las corrientes de marea, lo que la identifica como un estuario dominando por factores marinos. Notablemente, el cuerpo lagunar es un excelente amortiguador hidráulico ante eventos meteorológicos extremos debidos al incremento del gasto en el río, los vientos y la sobre-elevación del nivel de mar. De forma complementaria, el estudio incluye un análisis de estabilidad de la boca lagunar, en el que se identifica la estabilidad del brazo Este de la laguna y la tendencia al cierre del brazo Oeste.

Recomendaciones para investigaciones posteriores incluyen el estudio de la respuesta morfodinámica de la laguna ante distintos forzamientos y la caracterización de los sedimentos al interior de la misma.

ABSTRACT

Worldwide, coastal lagoons are identified as zones of high ecologic, economic and social importance due to the great variety of human activities that they attract, as well as their significance as basis of unique ecosystems. Recently, as a result of their great storage ability, their use as storage zones during the incidence of extreme meteorological events (e.g. fluvial floods) has been highlighted. However, for the proper management of these systems, it is important to be able to understand and predict the impacts of human activities and natural forces.

This investigation presents the integrated evaluation of the hydrodynamics observed in the lagoon of Mecoacán, located in the Mexican State of Tabasco, with the purpose of analysing possible impacts of the incidence of extreme events. For this, we employ a two-prone approach which includes in one hand the generation of a high-quality dataset of the most relevant hydrodynamic variables (discharge, salinity, temperature) during normal conditions. On the other hand, the dataset is employed to force, calibrate and validate a bidimensional numerical model. Once validated, the model is utilised to generate different extreme forcing due to the incidence of fluvial discharges, storm surge and winds on the lagoon. Results include a description of the salinity, temperature and density distribution within the lagoon under the different extreme scenarios.

Results indicate that the hydrodynamic conditions within Mecoacán lagoon are primarily dominated by the induced tidal currents, which identify the system as an estuary dominated by marine forcing. Notably, the lagoon is recognised as an excellent storage zone for the protection of the region to the incidence of extreme events due to fluvial discharges, strong winds and storm surges. Moreover, the study includes a stability analysis of the lagoon's mouth which indicates the relative stability of the Eastern side of the mouth and the closure tendency of the western side.

Recommendations for further investigations include the study of the morphodynamic response of the lagoon to different forcing and the sediment characterisation within the system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Secuencia de Fotografías de la zona de estudio, Fotografía satelital año 2006.	3
Figura 2-2 Fotografía satelital Laguna de Mecoacán.....	3
Figura 2-3 Precipitación media estado de Tabasco.....	8
Figura 2-4 Rosa de vientos en la región del año 1948 al 2007. Datos Atlas Marítimo (Silva 2008).	9
Figura 2-5 Histograma de vientos máximos en la región.....	12
Figura 2-6 Eventos de ciclones tropicales en la costa de Tabasco (datos de la NOAA).....	12
Figura 2-7 Histograma de altura de ola máxima por año, Costa de Paraíso- Tabasco.....	13
Figura 2-8 Predicción de marea registrados por el CICESE mes de agosto. Paraíso, Tabasco.	14
Figura 2-9 Distribución de estaciones de muestreo (der) y Circulación (izq) de la laguna. Estudio realizado por Galavíz-Solis et al. (1987).....	17
Figura 2-10 Mapa de distribución textural de los sedimentos. Galaviz-Solis et al. (1987).....	17
Figura 3-1 Mapa de distribución de los transectos de medición, laguna de Mecoacán.	22
Figura 3-2 Elevaciones del sistema Mecoacán (DEM).	22
Figura 3-3 Ubicación del Ciclo de mediciones.	23
Figura 3-4 Comparación del Gasto, la velocidad y la Profundidad en un solo transecto.	24
Figura 3-5 Relación total de puntos medidos ciclo mareal boca lagunar.	25
Figura 3-6 Variación del gasto en la Boca de Mecoacán.	26
Figura 3-7 Variación del nivel medio del mar en la Boca de Mecoacán.	26
Figura 3-8 Mediciones Vector, velocidad (panel superior) y presión (panel inferior) Desembocadura del Río Hondo.	27
Figura 3-9 Mediciones realizadas usando por el CTD en la Laguna de Mecoacán. Perfiles tomados para el análisis de condiciones de la columna de agua (salinidad, temperatura y densidad).....	30
Figura 3-10 Numeración general de puntos de medición de CDT.....	30
Figura 3-11 Laguna de Mecoacán, distribución general de salinidades.....	32
Figura 3-12 Comparación de Temperatura, salinidad y densidad a 0.3, 0.5 y 0.7 m del sistema.	34
Figura 3-13 Perfil del transecto 1, desde la parte sur-occidental de la laguna hasta la boca. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.	35
Figura 3-14 Perfiles del transecto 2. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.....	36

Lista de figuras

Figura 3-15 Perfiles del transecto Número 3. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.	37
Figura 3-16 Perfiles del transecto Número 4. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.	38
Figura 3-17 Perfil del Transecto Numero 5. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.	39
Figura 3-18 Mediciones en la columna de agua de los puntos 65, 67 y 142 en la Laguna, para salinidad, temperatura y densidad.	40
Figura 3-19 Mediciones en la columna de agua de los puntos 47,63, y 94 en la Laguna, para salinidad, temperatura y densidad.	41
Figura 4-1 Malla con información de profundidades en la laguna de Mecoacán.	50
Figura 4-2 Malla triangular de cálculo en la boca con los transectos de batimetría. y datos de elevaciones. Ejes en Coordenadas UTM (m).	51
Figura 4-3 Condiciones de fronteras aplicadas al modelo numérico.	52
Figura 4-4 Validación; comparación de gasto en la boca Modelo vs medición.	54
Figura 4-5 Instante de Modelación en Pleamar.	55
Figura 4-6 Comparación de salinidad (UPS) del modelo numérico vs datos de campo.	56
Figura 4-7 de Temperatura modelo numérico vs datos campaña de campo.	57
Figura 4-8 Resultados de densidad Laguna de Mecoacán. Modelo Vs medición.	58
Figura 5-1 Forzamiento de marea astronómica y de tormenta.	59
Figura 5-2 Momentos de modelación. Momentos de modelación inicial (a) y máximos de gasto en la Boca lagunar (b). Para marea de tormenta.	60
Figura 5-3 Velocidad y Gasto para condiciones de marea de tormenta (MT) y condiciones normales (CN).	61
Figura 5-4 Momentos de modelación de Salinidad para condición de marea de tormenta. Inicial (panel izquierdo), máximo de forzamiento (panel derecho) y final (panel inferior) de la salinidad.	63
Figura 5-5 Momentos de modelación. Temperatura marea de tormenta. Momentos de modelación inicial, máximo de forzamiento y final de la temperatura.	64
Figura 5-6 Comparación inicial y final de densidad. Marea de Tormenta.	65
Figura 5-7 Momentos de modelación inicial, máximo de forzamiento (bajamar) y final (pleamar) de la laguna para Gasto Extraordinario.	68
Figura 5-8 Velocidad y Gasto para modelación de Gasto Extraordinario (GE) condiciones normales (CN).	69
Figura 5-9 Momentos de modelación inicial, medio y final de la Salinidad, para forzamiento por Gasto extraordinario.	70
Figura 5-10 Momentos de modelación temperatura, para gasto extraordinario.	72

Lista de figuras

Figura 5-11 Densidad momento inicial y final para gasto Extraordinario.	73
Figura 5-12 Elevaciones finales para gasto extremo (380 m ³ /s).	74
Figura 5-13 Instantes de modelación del flujo con forzamiento de viento extremo. Primeros momentos de modelación, punto medio de tiempo de modelación y final de modelación.	77
Figura 5-14 Velocidad y Gasto modelación Viento Extraordinario.	78
Figura 5-15 Secuencia del transporte salino bajo forzamiento de viento extremo.	79
Figura 5-16 Instantes de modelación de temperatura. Instantes: inicial, medio y final de modelación por viento extremo de la temperatura.	80
Figura 5-17 Densidad inicial y final de la modelación por forzamiento de viento.	81
Figura 5-18 Instantes de modelación del flujo en forzamientos extraordinarios marea y gasto río.	84
Figura 5-19 Velocidad y Gasto modelación Gasto extraordinario y marea de tormenta.	85
Figura 5-20 Modelación de salinidad condiciones extraordinarias de Marea de tormenta y gasto.	87
Figura 5-21 Instantes de modelación de Temperatura, para marea de tormenta y gasto extraordinario.	88
Figura 5-22 Comparación de densidades inicial y final bajo condiciones de gasto extraordinario y marea de tormenta.	89
Figura 5-23 Comparación de gastos en distintos forzamiento en la boca lagunar.	90
Figura 5-24 Comparación de Velocidades en distintos forzamiento en la boca lagunar.	90
Figura 5-25 Canales de la Boca lagunar.	93
Figura 5-26 Secciones transversales de los canales de la Boca.	94
Figura 5-27 Análisis de marea para cálculo de fase (Keulegan 1967). Aplicado a la laguna de Mecoacán, la marea oceánica línea negra y marea en el interior de la laguna.	96
Figura 5-28 Relaciones de Keulegan para definir la hidrodinámica lagunar.	96
Figura 5-29 Puntos analizados en la pleamar de la modelación condiciones normales.	97
Figura 5-30 Amplitudes en puntos de la Laguna de Mecoacán durante la modelación en condiciones normales.	97
Figura 5-31 Relación del K con la V'max.	99
Figura 5-32 Curva de cerrado. Análisis de Escoffier (1940).	105
Figura 5-33 Curva de cierre (Escoffier 1977). Aplicación a Bocas lagunares Laguna de Mecoacán, en Rojo Curva para el canal Oeste y en negro para el canal Este.	105
Figura 5-34 Velocidades calculadas por el modelo en distintos escenarios de forzamiento. .	109
Figura 5-35 Boca lagunar de Mecoacán.	110
Figura 5-36 Secuencia del comportamiento periódico de la boca lagunar de Mecoacán.	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de Modelación.....	53
Tabla 2 Parámetros hidráulicos canales de la boca de Mecocacán.....	100
Tabla 3 Parámetros de cálculo de velocidad del sedimento.....	103
Tabla 4 Los valores de α y K planteados por diferentes autores.....	106

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este escrito está organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción

Se presenta el problema de estudio y la motivación para esta investigación, planteando los objetivos y la metodología para el desarrollo de la presente tesis.

Capítulo 2. Sistema lagunar de Mecoacán

En este capítulo se exponen de manera general algunos factores geológicos, hidrológicos y climáticos relevantes de la zona. Adicionalmente, se incluye una revisión de las investigaciones previas abocadas a este cuerpo lagunar, dividiendo la revisión en tres ramas del conocimiento: investigaciones oceanográficas, investigaciones geológicas/geográficas e investigaciones químico-biológicas.

Capítulo 3. Campaña de campo

Esta sección presenta los datos provenientes de la campaña de campo realizada en Julio-Agosto de 2009. En la cual se realizó un reconocimiento de las condiciones de interacción hidrodinámica más relevantes del sistema, como los gastos en las desembocaduras y la marea astronómica, la medición de flujos en la boca y ríos principales, la batimetría del sistema lagunar, y mediciones de temperatura y salinidad.

Capítulo 4. Modelado numérico del sistema lagunar de Mecoacán, Tabasco

Este capítulo introduce el marco teórico detrás del modelo numérico utilizado en el presente trabajo de investigación (MIKE21FM). Además se presenta la discretización numérica del sistema, por medio de una malla flexible compuesta

Capítulo 1 – Introducción

por elementos finitos triangulares, la determinación de las condiciones de frontera para su forzamiento y la validación con los datos provenientes de la campaña de campo.

Capítulo 5. Diagnóstico del sistema – modelación de escenarios

Como su nombre lo indica, esta sección incorpora los resultados de las simulaciones numéricas que consideran los escenarios extremos de operación. En particular, se presentan resultados de circulación y la dispersión asociada de la salinidad, temperatura y densidad. Esto permite identificar el posible impacto de cada escenario de forzamiento sobre el sistema. Además, se presenta un análisis de la estabilidad morfodinámica de la boca lagunar, para tratar de diagnosticar los efectos de estos escenarios sobre la posible apertura o cierre de la conexión al Golfo de México.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo presenta de forma resumida las conclusiones encontradas durante la realización de este trabajo y las recomendaciones propuestas a partir de los resultados obtenidos.

Capítulo 7 Futuras líneas de trabajo

Por último, esta sección se propone algunas sugerencias para las principales futuras líneas de investigación que se identificaron a partir de esta tesis. Las cuales podrían completar y continuar la investigación iniciada en este trabajo.

1.2. INTRODUCCION

Dentro de las zonas costeras, se encuentran diferentes ecosistemas de relevancia, entre los que destacan los cuerpos lagunares. Estos sistemas costeros tienen un valor económico, ecológico y social muy alto, dado que representan las zonas de interface entre sistemas terrestres y marinos. Como consecuencia de estas características mixtas (combinación de agua salada y dulce) contienen una amplia diversidad en flora y fauna con elementos únicos que no podrían subsistir bajo otras condiciones. Así mismo, como resultado de

Capítulo 1 – Introducción

su gran capacidad de almacenamiento de grandes volúmenes de agua, es posible utilizar a estos sistemas como zonas de amortiguamiento naturales ante la incidencia de eventos extraordinarios (ej. Gastos y mareas de tormenta).

En su mayoría las zonas costeras se encuentran en riesgo por factores climáticos que podrían alterar su configuración natural, dentro de los más importantes se encuentran la frecuencia de ciclones tropicales, tormentas y vientos extraordinarios como los “nortes”. A su vez, es una realidad que la intervención antropogénica ha contribuido en la alteración de los sistemas hidráulicos en repetidas ocasiones. Ejemplo de ello son obras de infraestructura hidráulica aguas arriba, las cuales hacen que disminuya la fuerza de empuje de las aguas en la boca provocando que estas se cierren, impidiendo el intercambio natural de los ambientes marinos y dulces.

Algunos autores afirman que el calentamiento global, registrado a lo largo de las últimas décadas, ha incrementado la intensidad y frecuencia de huracanes y tormentas (Bender et al, 2010; Emmanuel, 2007; Bruun, 1962), ambos identificados como los principales generadores de inundaciones y erosión costera. Estos resultados indicarían que el cambio climático incrementaría el riesgo de inundaciones e intrusión salina en aguas superficiales (Nicholls, 2002).

La evaluación del nivel de amenaza al que se encuentran expuestos los sistemas costeros constituye un paso fundamental en la elaboración de programas de prevención, mitigación y reacción frente a desastres naturales. Herramientas como los modelos numéricos, dan una respuesta a los fenómenos y a sus incidencias sobre las poblaciones y aéreas de influencia.

En consecuencia, este estudio presenta una evaluación integral de la Laguna de Mecoacán ubicada en las costas del Estado de Tabasco, realizando la caracterización de las variables hidrodinámicas presentes en el sistema para entender su funcionamiento. Posteriormente, se contempla la evaluación numérica de la incidencia de eventos extremos (sobre-elevación del nivel del mar, gastos extraordinarios y vientos fuertes) sobre el sistema.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el año 2007, el estado de Tabasco sufrió una de las inundaciones más severas de las últimas décadas, que generaron profundos daños económicos y sociales al Estado Mexicano. De hecho, la inundación de Tabasco es considerada como el más grave desastre natural enfrentado por este Estado en los últimos 50 años. Este fenómeno, fue producido por la coincidencia de fuertes lluvias asociadas a los frentes fríos número 4 y 5 junto con la presencia de la tormenta tropical Noel en el Mar Caribe, lo que generó un considerable incremento en el nivel de precipitación en las cuencas. El desbordamiento del río Grijalva se dio en octubre de 2007, ocasionado inundaciones en el municipio de Centla, donde se encuentra la desembocadura de este río. Esta inundación se debió al incremento extraordinario en la precipitación sobre la cuenca del río Grijalva. En el norte de Chiapas, el sistema de presas compuesto por La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, requirieron aumentar su capacidad de descarga debido a que su capacidad de almacenamiento se encontraba en el límite. Lo cual contribuyó en el aumento del caudal de los ríos, con lo que se disminuyó la capacidad de drenaje del agua pluvial hacia la costa.

Por otro lado, en el municipio costero de Paraíso, como en otras ocasiones, los habitantes fueron evacuados de la isla Andrés García, que se encuentra en la boca de la Laguna de Mecoacán.

Debido a ambos, la magnitud de las consecuencias observadas en el 2007 y las posibles ocurrencias de otros fenómenos hidrometeorológicos extremos (i.e. marea de tormenta), el Gobierno Mexicano, a través de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), dispuso un programa de diagnóstico y evaluación del sistema hidráulico del estado, conocido como Plan Hídrico Integral de Tabasco, (PHIT). Dentro de los objetivos del PHIT, se incluye la evaluación integral de las desembocaduras de los ríos al Golfo de México. En consecuencia, el funcionamiento hidráulico de la laguna de Mecoacán es de gran interés para definir el comportamiento de los drenajes naturales del

Capítulo 1 – Introducción

Estado. En particular, se contempla su utilización como reservorio hidráulico (i.e. zona de amortiguamiento) en futuros eventos extremos incidentes sobre la región. Esta investigación, se encuentra íntimamente ligado a los objetivos de la sección de Procesos Costeros del PHIT.

1.4. OBJETIVO

El objetivo general del presente estudio comprende la evaluación del comportamiento hidrodinámico de la Laguna de Mecoacán en el Estado de Tabasco, para entender su funcionamiento y posteriormente evaluar la incidencia de eventos extremos. Se alcanza este objetivo a través de los siguientes objetivos específicos:

- a. Recopilar información base (i.e. batimetrías, mareas y flujos), para identificar la zona de estudio, realizando una campaña de campo.
- b. Adecuar a través de datos de campo un modelo hidrodinámico en dos dimensiones para evaluar el comportamiento de la laguna de Mecoacán bajo distintos escenarios de forzamiento (marea, viento, gastos).
- c. Realizar conclusiones y recomendaciones referentes al análisis del comportamiento en general de la hidrodinámica lagunar y de las implicaciones de los forzamientos aplicados, con el fin de servir de base para generar alternativas de aprovechamiento y conservación del sistema así como preveer soluciones a problemas que pueden surgir bajo condiciones extremas (i.e. cambios en la salinidad e inundación).

1.5. METODOLOGIA

La metodología seleccionada para cubrir con los objetivos descritos contempla dos partes complementarias que son fundamentales. En primer término se incluye trabajo de campo a fin de recabar información batimétrica e hidrodinámica en la zona de estudio. Por otra parte, se realiza la calibración y puesta a punto de un modelo numérico operacional que comprende escalas

Capítulo 1 – Introducción

temporales y espaciales asociadas a cambios en flujos, gastos, salinidad y temperatura. La combinación de estos dos aspectos permite evaluar el comportamiento del sistema laguna-boca de inundación-costa en condiciones normales de operación y su desempeño durante condiciones futuras o extremas.

Precisamente las condiciones de forzamiento futuras y extremas refieren a sobre-elevación del nivel medio del mar y/o incremento de las avenidas en los ríos que desembocan en la laguna, las cuales se determinan por la incidencia constante de frentes fríos (>40 al año) y a condiciones asociadas a ciclones tropicales (e.j. huracán Janet en el año 1955). En consecuencia, estos fenómenos por su persistencia y/o magnitud pueden exceder su influencia en la zona y provocar inundaciones, cambios de salinidad y cambios en la morfología de la boca.

De esta forma, la metodología ha sido organizada de la siguiente manera:

- a. Procesamiento de la información recabada durante la campaña de campo que se realizó como parte de la sección de procesos costeros del Plan Hídrico Integral de Tabasco a cargo del IIUNAM (batimetrías, flujos, gastos, salinidad y temperatura).
- b. Calibración y puesta a punto del modelo numérico MIKE21 FM (DHI, 2009) a través de la información obtenida en campo.
- c. Generación de escenarios de operación del sistema lagunar a través del modelado de diferentes condiciones ambientales. Esta etapa incluye resultados de salinidad, temperatura y densidad del de agua, y la hidrodinámica de la laguna.
- d. Establecimiento de recomendaciones y conclusiones respecto al comportamiento hidrodinámico de la laguna.

CAPÍTULO 2
SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN

2. SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1. DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN

La laguna Mecoacán está situada en la zona central de la costa de Tabasco, cerca del poblado Puerto Ceiba, comprendiendo la porción Noroeste de la llanura deltaica del Río Mezcalapa. Se localiza entre las coordenadas 18°16'a 18°26' de latitud norte y 93° 04'y 93°14' de longitud oeste (ver Figura 2-1). Cubre un área aproximada de 62 Km², está rodeada de pantanos y vegetación de manglar. Se encuentra separada del Golfo de México por una barrera litoral de origen marino.

La comunicación con el Golfo de México es constante y se realiza a través de una boca natural con dos canales de aproximadamente 300 m de ancho cada uno, la barra arenosa que da lugar a la(s) boca(s) se le denomina Barra de dos Bocas. La laguna cuenta con un canal permanente y otro intermitente el cual se abre durante eventos de oleaje intensos. Ocasionalmente, cuando la boca Oeste se cierra, la comunicación de la laguna con el mar se realiza con el canal de la boca Este. En la figura 2-1 se muestra la ubicación en el golfo de la laguna y la configuración de la boca con sus respectivos canales independientes, se aprecia de igual manera el canal Este en condición cerrada.

En la Laguna vierten sus aguas tres ríos menores, el Cuxcuchapa, el Seco y el Hondo con aportaciones fluviales muy bajas, lo cual contrasta con el hecho de que el sistema pertenezca al complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta, el cual aporta en promedio una descarga de 87 millones de m³/año, volumen que transita y condiciona los ecosistemas de extensos humedales y aguas costeras que representan cerca de 30% del escurrimiento total del país, siendo, de esta manera, el sistema deltaico más importante de Mesoamérica (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 2000). Estas entradas de agua dulce se presentan a través de la entrada directa de agua por los humedales y esorrentía del sistema de inundación del río González al Oriente de la laguna.

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Meacoacán

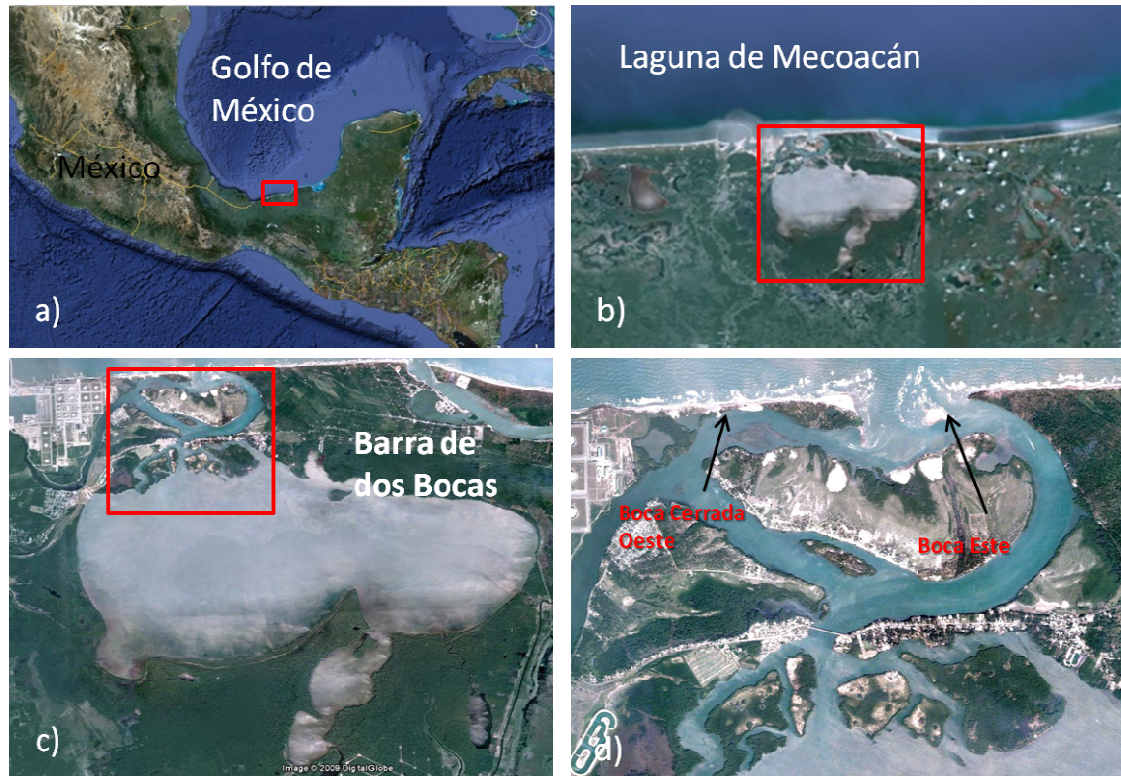


Figura 2-1 Secuencia de Fotografías de la zona de estudio, Fotografía satelital año 2006.



Figura 2-2 Fotografía satelital Laguna de Meacoacán.

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

En el siglo XVI, el Río Seco representaba uno de los principales aportes de agua dulce al sistema lagunar costero, sin embargo como resultado de las obras antropogénicas aguas arriba del mismo (su desviación hacia el río Samaria), su caudal se vio reducido al mínimo (Amaro, 2010). Así, la mayor aportación fluvial que llega al sistema a través del río Hondo o Escarbado al Sureste del cuerpo lagunar.

En su parte norte, próxima a la desembocadura del Río Seco y la Barra de dos Bocas, se localiza la Isla Andrés García; al sur de ella el cuerpo lagunar sufre un estrechamiento llamado Boca Grande, formado por la Barra del Bellote y la boca del mismo nombre, además de un grupo de pequeños islotes que forman parte del sistema lagunar. Asociados a la laguna principal, se localizan dos cuerpos de agua pequeños denominados lagunas Tilapa y la Negrita, los cuales se comunican con la laguna Mecoacán a través de estrechos y canales de comunicación (ver figura 2-2).

2.1.2. GEOMORFOLOGÍA

La laguna de Mecoacán es propiamente una laguna costera que por sus características se comporta como estuario dominando por factores marinos (Galaviz-Solis et al., 1987). Su forma es irregular alargada, paralela a la línea de costa, con el eje mayor orientado de Este a Oeste; con una longitud aproximada de 12 Km, un ancho máximo de 5.5 Km, formada por antiguos cordones de playa. Una de las características de las lagunas a diferencia de los estuarios es que su eje mayor está orientado paralelo a la costa y esta la cumple. Los rasgos morfológicos más notables son en la entrada de la boca, en el que se diferencian muy bien dos canales naturales que convergen en uno que es remanente de la extensión original del cuerpo de la laguna. Esta configuración puede cambiar en el tiempo, es decir tener dos bocas cada una con su canal independiente.

La laguna posee varias áreas protegidas por manglares y vegetación de humedal, las cuales recogen los sedimentos provenientes de tierra y los acumulan generando islas. Las barreras arenosas que limitan a las lagunas

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

hacia el Norte, están formadas por una serie de antiguas líneas de playa constituidas por arenas terrígenas transportadas y depositadas en la porción alta de las playas por el oleaje de tormenta (Galaviz-Solis et al., 1987). La línea costera presenta un predominio morfológico de playas bajas y arenosas; las mareas, el oleaje y las corrientes distribuyen los sedimentos arrojados por las bocas de los ríos para configurar las formas de la costa.

Respecto a la distribución del sedimento, es posible identificar dos sistemas. El primero de ellos corresponde a la boca, donde existe predominancia de arenas acumuladas a lo largo de una barrera natural que divide la boca en dos brazos. El segundo corresponde al cuerpo lagunar en el que predomina la presencia de arcillas aportadas por los sedimentos terrígenos acarreados principalmente por el río Hondo o Escarbado. Estos sedimentos componen una amplia capa (mayor a 1 m) del suelo lagunar. Este último estrato facilita el cultivo de ostión en la mayoría de la extensión de la laguna.

La zona se caracteriza por tener un relieve casi plano, topografía que se ha formado como resultado de la acumulación de grandes depósitos fluviales en diferentes medios sedimentarios como el palustre y litoral. La laguna presenta a su alrededor extensas planicies de inundación y cauces abandonados. A continuación se realiza una descripción de su formación, evolución y composición geológica más detallada.

2.1.2.1. FORMACIÓN DE LA LAGUNA

La zona de Mecoacán es una planicie de composición sedimentaria cuyo origen está relacionado con la regresión del Océano Atlántico iniciado desde el Terciario Inferior y el relleno gradual de la cuenca oceánica donde hasta nuestros días se acumulan grandes volúmenes de material detrítico que proviene del continente. El desarrollo histórico-geológico del territorio tabasqueño, donde se encuentra la laguna, se ha determinado por eventos estratigráficos y estructurales del Mesozoico y Cenozoico (Padilla, 2007).

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

La evolución tectónica y sedimentaria de la zona Sureste del territorio Mexicano, se dio por procesos de subsidencia lenta que comenzó desde el Jurásico Medio y continúa hasta hoy. Algunas estructuras formadas por los movimientos de placas en la zona causaron a su vez que hasta fines del Neógeno, se depositaran varios kilómetros de espesor de sedimentos clásticos. El peso de sedimentos clásticos propició grandes fallas normales regionales, sintéticas y antitéticas, las cuales constituyeron los límites de las cuencas de Comalcalco-Salina del Istmo y de Macuspana. Siendo la primera de ellas donde yace la ciudad de Paraíso (Padilla 2007).

A partir de la distribución y disposición desigual con la que se depositan los sedimentos en la cuenca se inicia el problema de subsidencia, toda vez que el peso y la compactación de la columna de sedimentos de miles de metros de espesor propician el hundimiento paulatino de la superficie de la cuenca. En efecto, en el complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta se encuentran evidencias actuales de hundimiento de la costa por subsidencia (Ortiz 1998), con la particularidad de contar con hundimientos diferenciales debido a las distintas velocidades de descenso, contrastes que son provocados por las estructuras mayores del subsuelo como son las fallas geológicas que originan depresiones y pilares entre los cuales hay desplazamientos activos muy recientes. (Ortiz, 1992). De esta manera se establece una analogía semejante a la de un ascenso del nivel del mar, hecho que se traduce en una mayor erosión de la playa y su consecuente retroceso de la línea de costa hacia el continente. (Ortiz 1992, 1994, 1988; Ortiz, P. y J. Benítez, 1996). Según datos medidos por Hernández *et al.* (2007), el retroceso de la línea costera en Playa El Limón esta entre -73 y -262 m, y en las playas Dos Bocas y Bruja entre -35 a -92 m.

2.1.2.2. EDAFOLOGÍA

El tipo de suelo está determinado por las acumulaciones geológicas de sedimentos depositados desde el Paleozoico hasta el reciente. Dentro de las rocas que se pueden encontrar están las sedimentarias como margas, calizas,

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoaacán

lutitas, areniscas y aluvi3n. (Padilla, 2007). En resumen se pueden caracterizar dos tipos de suelo:

Por un lado se encuentran los Gleysoles, que representan suelos escasamente drenados, desarrollados y poco profundos (menor a 1 m). Los cuales han sido formados por dep3sitos de sedimentos transportados por los r3os m3s caudalosos hacia las partes m3s bajas del estado, este tipo de suelo se encuentra en el cuerpo lagunar, donde los sedimentos del sistema Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta, se han acumulado. En estos suelos el nivel fre3tico se encuentra muy cerca de la superficie, a menos de 50 cm de profundidad, lo que produce inundaciones durante la 3poca de lluvias debido a la sobre-saturaci3n de los suelos.

Por otra parte se encuentran Regosoles, los cuales representan suelos sin desarrollo, con bajo contenido de materia org3nica y compuestos principalmente por dep3sitos recientes de origen marino. Estos suelos constituyen las playas, barras y dunas de la zona litoral, adem3s se encuentran en lomer3os de la porci3n oriental y, al parecer de forma consolidada en la Isla Andr3s Garc3a.

2.1.3. CLIMA

De acuerdo con la carta de clima editada por Comisi3n Nacional del Agua que utiliza el sistema de clasificaci3n clim3tica de Kaopper; la zona tiene clima c3ldo-h3medo con lluvias (a.m.), con una temperatura media anual de 26.4°C; la temperatura m3xima absoluta se presenta en el mes de mayo con 44°C y la m3nima mensual de 12°C en el mes de enero.

La precipitaci3n media anual es de 1751 mm, con un promedio m3ximo mensual de 335 mm en septiembre y un m3nimo de 0 mm en abril. La humedad relativa promedio anual est3 estimada en un 83%, con una m3xima de 86% en enero y febrero y una m3nima de 77% en mayo. En la Figura 2-3 se muestran las precipitaciones medias mensuales para el estado de Tabasco (Servicio Meteorol3gico Nacional, 2010).

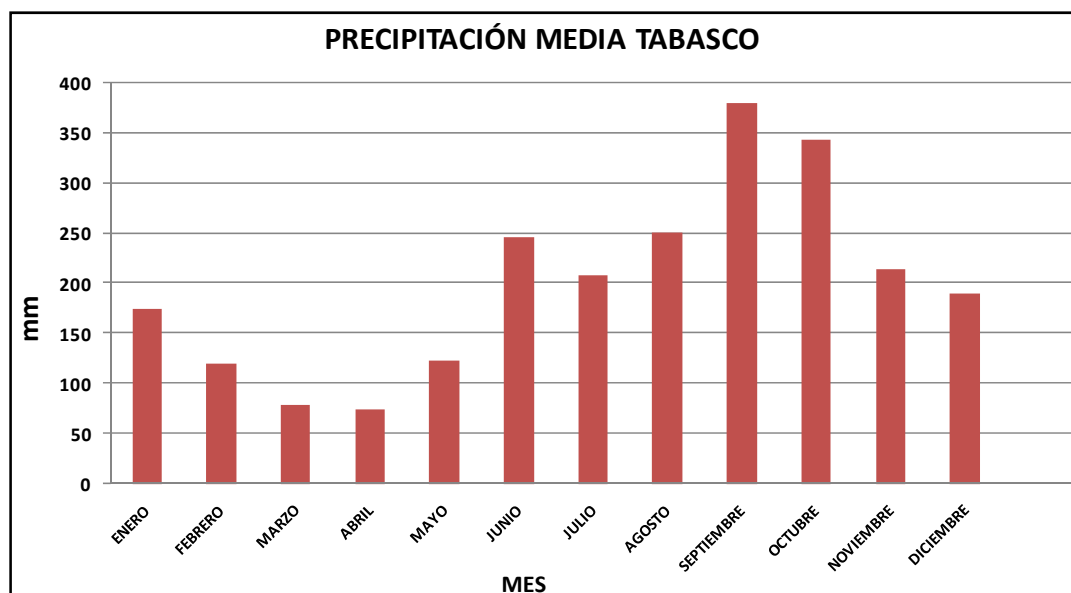


Figura 2-3 Precipitación media estado de Tabasco

La invasión de masas de aire a la llanura Tabasqueña es directa, y ocasiona gran parte de la precipitación total anual. Las épocas del año, pueden clasificarse de acuerdo a su régimen de precipitación en secas (marzo a mayo), temporal (junio a septiembre) y nortes (octubre a febrero), abarcando los dos últimos la temporada más lluviosa.

2.1.3.1. VIENTOS

Las mayores velocidades de viento se presentan en los meses de noviembre y diciembre con valores que alcanzan los 30Km/h, mientras que en junio se registran las menores intensidades cerca de 18 Km/h (INEGI 2010). En la figura 2-3 se muestra la rosa de los vientos para los años 1948 a 2007 (Silva 2008) donde se puede apreciar la predominancia de dirección del viento Sur-Sureste principalmente por nortes.

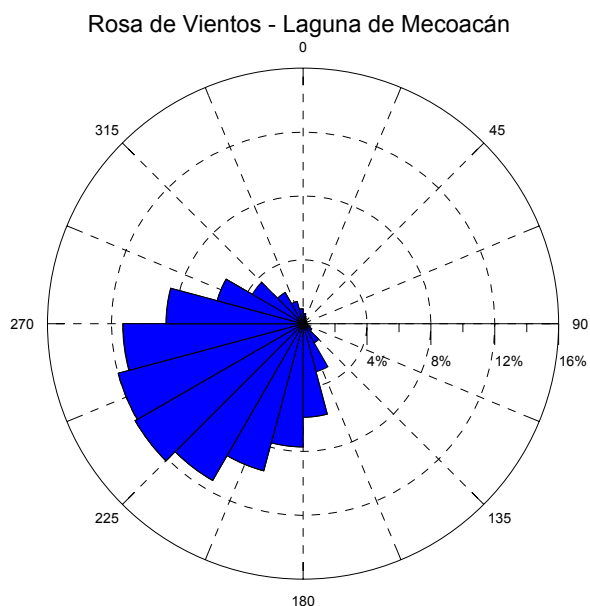


Figura 2-4 Rosa de vientos en la región del año 1948 al 2007. Datos Atlas Marítimo (Silva 2008).

Frentes fríos

Debido a su ubicación, durante el invierno el Golfo es influenciado por las masas de aire frío y seco que provienen del continente (Canadá, Estados Unidos de América y México) las cuales al encontrarse con las masas de aire propias del Golfo, de origen marítimo y tropical, provocan fuerte frontogénesis o frentes fríos principalmente de octubre a abril. La presencia de un frente frío en el Golfo produce vientos que soplan de norte a sur, conocidos localmente como Nortes.

Para Tabasco, los frentes fríos son los factores climáticos más importantes debido a su influencia en la variabilidad de la temperatura y a la persistencia anual en la zona costera, es decir que este fenómeno se repite más de 40 veces al año con intensidades de 25 a 120Km/h y duración de uno a 5 días (Ortiz Pérez y de la Lanza Espino, 2006). Así pues, las perturbaciones dominantes en invierno son los frentes fríos originados en latitudes medias con trayectorias de avance de Noroeste a Sureste, que cruzan frecuentemente sobre el país, provenientes de Norteamérica. Sus efectos son muy peligrosos y pueden causar perturbaciones atmosféricas, tales como tormentas eléctricas, tornados, chubascos y vientos fuertes. La frecuencia de los frentes fríos es muy

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

variable y depende de su origen, la mayoría viene del océano Pacífico (origen marítimo polar), algunos vienen del norte (polar continental) y otros tienen su origen en el ártico continental (Servicio Meteorológico Nacional, 2010). La velocidad de desplazamiento del frente frío es tal, que el efecto de descenso brusco de temperatura se observa en pocas horas. Un ejemplo de ello, además del frente frío intenso del 23 de octubre del 2007 en el que murieron 22 trabajadores de la plataforma Usumacinta; fue en Noviembre de 1992 donde un Norte intenso y onda fría que pasó por Veracruz, Tabasco, e Istmo de Tehuantepec obligó al cierre de 48 puertos del Golfo de México incluido el puerto de Dos Bocas (cercano a la laguna de Mecoacán). Esta onda fría dejó 60 decesos en Chihuahua, Coahuila y Nuevo León (CENAPRED 2010).

Un tipo de frente frío son los nortes. Los nortes ocasionan nublados constantes, disminución de temperatura y lluvias de ligeras a fuertes, pero que a veces duran varios días, e inclusive varias semanas. Las precipitaciones por nortes varían según la zona; cerca del litoral costero, y hacia el oriente del estado tabasqueño las precipitaciones son menores -1500 mm/año- incrementándose hacia la zona central aproximadamente con -2000 mm/año- hasta alcanzar su máximo en la zona sur en donde las masa de aire se condensan al elevarse sobre el declive norte de las montañas chiapanecas-con registros superiores a los 4000 mm/año.

En consecuencia, los frentes fríos, en condiciones especiales pueden favorecer la sobre-elevación del nivel del mar así como la recarga de los sistemas fluviales que llegan a la llanura de Tabasco, de hecho las inundaciones del 2007 en el estado de Tabasco fueron causa entre otros factores de este fenómeno.

2.1.3.2. CICLONES TROPICALES

En el verano el Golfo es influenciado por tormentas tropicales, de las cuales el 60% alcanza intensidad de huracán. En general, septiembre es el mes que presenta el mayor número de tormentas.

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

Los principales generadores de la sobre-elevación del nivel del mar, son los vientos asociados a los ciclones tropicales. Estos son sistemas de baja presión con actividad lluviosa y eléctrica cuyos vientos rotan en dirección antihorario. La gran mayoría de las tormentas tropicales y huracanes en el Océano Atlántico, Mar Caribe o Golfo de México se presenta durante la temporada oficial de huracanes (1 de Junio hasta el 30 de Noviembre), mientras que unas pocas tormentas se presentan en los meses restantes.

En la figura 2-4 se muestra la incidencia de máximos vientos en la zona desde el año 1948 hasta el 2007 (Silva, 2008), en los cuales se resaltan “picos” asociados a ciclones tropicales que pasaron por el Golfo de México y tuvieron afectación en la zona. De igual forma la figura 2-5 muestra el histograma de número de eventos de ciclones tropicales que han azotado a las costas tabasqueñas, se puede observar la incidencia de tormentas tropicales (TT) y huracanes tipo 1 (H1) principalmente. En las costas de Tabasco no es común el impacto directo de grandes huracanes, especialmente clase 4 y 5, por el hecho de que suelen perder fuerza, propiamente los provenientes de Este al pasar por la península de Yucatán. Solo existe un registro reciente de huracán categoría 5, y es Janet el cual se presentó en 1955, aunque exista un promedio de 10 ciclones al año en el Golfo de México. En consecuencia los ciclones tropicales no son tan persistentes como los frentes fríos, pues estos aparecen mayor número de veces al año. Aunque es indudable que la asociación de estos tres fenómenos puede causar daños considerables en las zonas costeras.

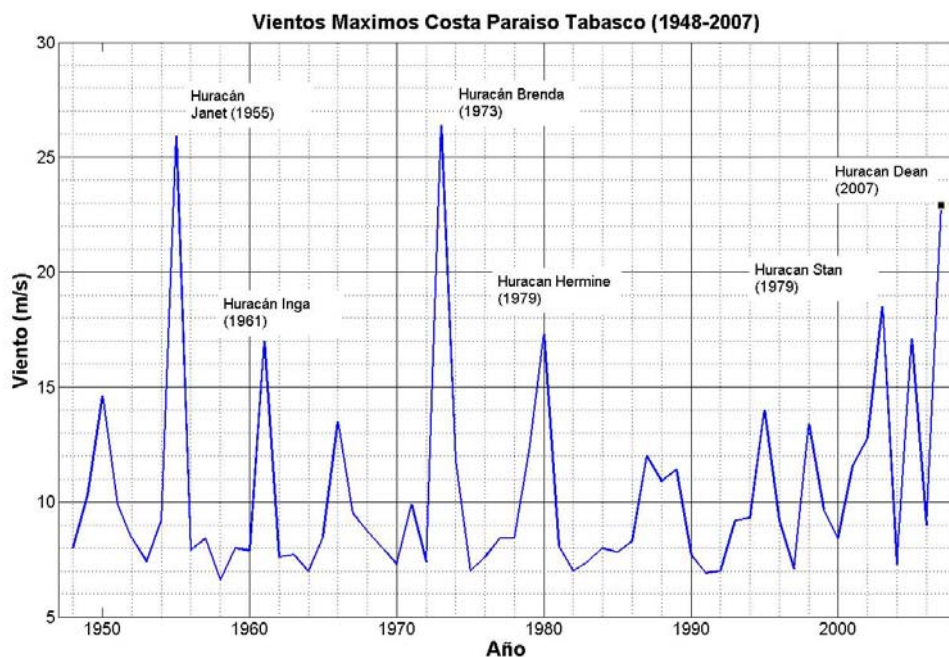


Figura 2-5 Histograma de vientos máximos en la región.

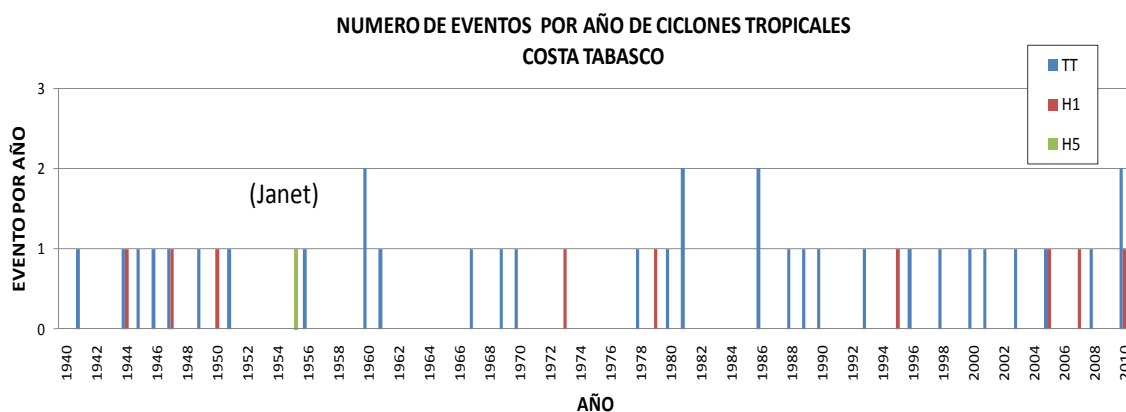


Figura 2-6 Eventos de ciclones tropicales en la costa de Tabasco (datos de la NOAA).

2.1.4. OLEAJE

En el Golfo de México existen varios regímenes de oleaje determinados por la influencia de tormentas tropicales y los frentes fríos. En general han sido reportados valores de olas alrededor de 0.4 y 2.3 m de altura que demuestran una energía baja intermedia, con excepción por las generadas por los huracanes y los frentes fríos cuyas alturas llegaron a alcanzar los 7 m.

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoaacán

La acción de las olas sobre la costa de Tabasco presenta contrastes en cada estación climática, aunque la mayor parte del año, no presenta alturas importantes, las alturas medias registradas en el rango de los años 2000 al 2007 son de promedio de 0.50 m. (Silva 2008). En la figura 2.7 se muestran los máximos de altura de ola significativa de los años 1948 al 2007, según datos obtenidos para la costa de Paraíso, Tabasco. Estas olas de poca energía producen acumulaciones en la playa, y perfiles de playa anchos con pendientes suaves. Según el análisis estadístico del oleaje, (datos obtenidos para la celda: longitud 93.0W – latitud 18.5 N. Costa Paraíso), la mayor parte del año la dirección predominante del oleaje es del Norte y en las estaciones primavera y verano la dirección del oleaje es del Nor-Este.

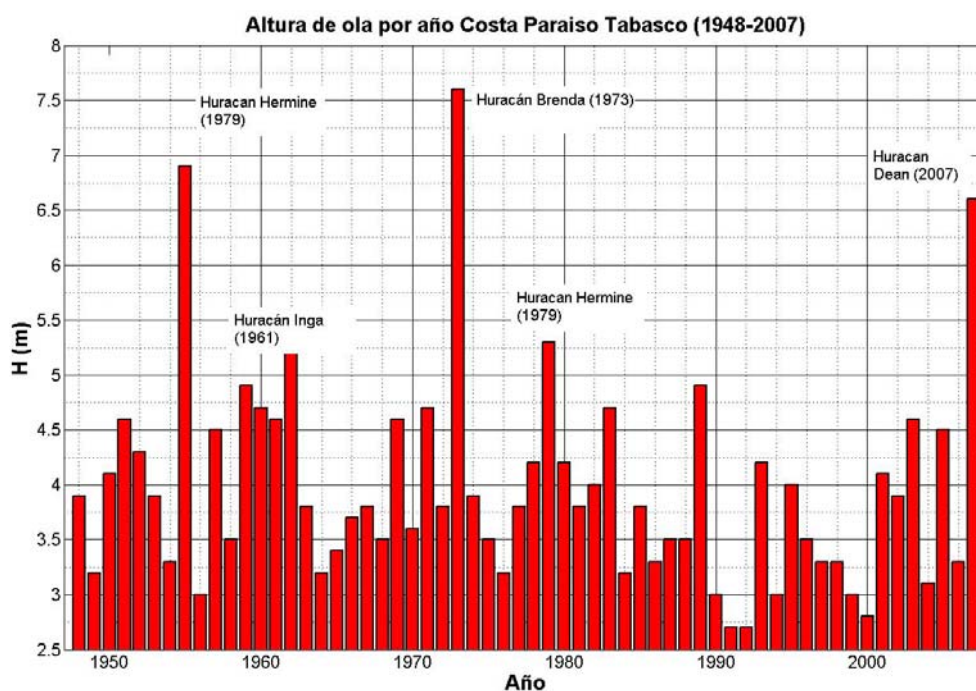


Figura 2-7 Histograma de altura de ola máxima por año, Costa de Paraíso- Tabasco.

2.1.5. MAREA

En condiciones reinantes, la elevación y las corrientes de marea son los forzamientos principales de la circulación del agua dentro de la boca lagunar. El gasto que entra y sale por los canales de comunicación entre el mar y el cuerpo lagunar, depende del área hidráulica de los canales y las características propias de la marea local. La marea, ingresa a la Laguna Mecoaacán a través de

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

Boca Grande y fluye hacia el S y SE según el giro contrario a las manecillas del reloj.

Las variaciones de las mareas a lo largo de la costa son relativamente pequeñas 0.6 m aproximadamente (CICESE), lo que clasifica a la zona con un rango micromareal de acuerdo a la clasificación de Davis (1964). En la Figura 2-8 se observa un patrón diario de la costa tabasqueña, es decir, una pleamar y una bajamar en el transcurso del día lunar.

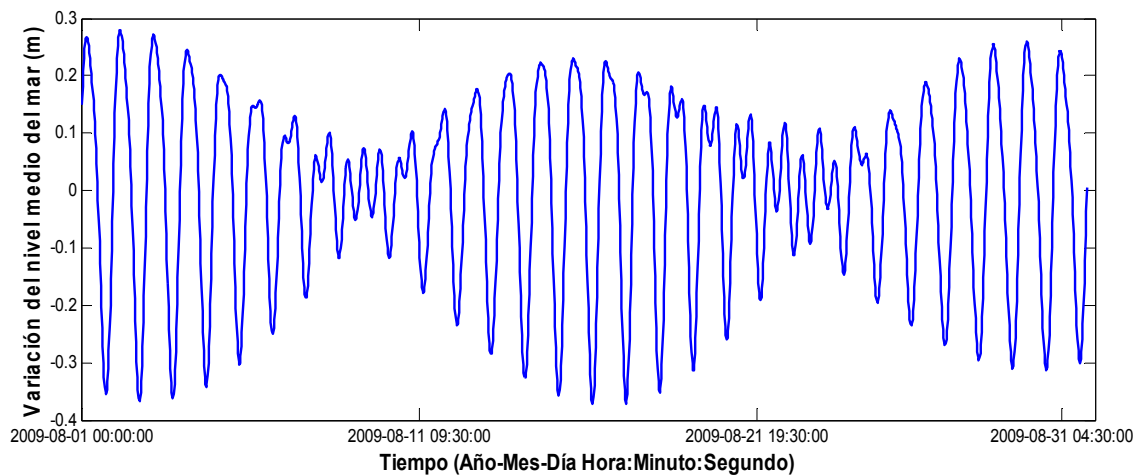


Figura 2-8 Predicción de marea registrados por el CICESE mes de agosto. Paraíso, Tabasco.

Para el efecto de la marea astronómica, cabe mencionar que será necesario considerar el forzamiento adicional que representa la marea de tormenta, la cual es inducida por frentes fríos o tormentas tropicales. La marea de tormenta depende del gradiente de presión, la intensidad y persistencia del viento y de la configuración de la costa y del fondo marino. Este forzamiento produce una sobre-elevación del nivel medio del mar en la costa. Por ejemplo huracanes clase 5 pueden inducir un desnivel de hasta 3m de sobre-elevación en la costa tal y como ocurrió con el huracán Janet en las costas tabasqueñas en 1955, (NOAA, 2010).

2.1.6. IMPORTANCIA DE LA ZONA

El sistema de Mecoaacán se identifica como un área natural con categoría de Parque Estatal 34 según la legislación del estado y comprende 38,496 hectáreas que involucra zonas de los Municipios de Paraíso, Centla, Nacajuca, Centro y Jalpa de Méndez. El sistema lagunar sumado a la desembocadura del Río González conforma una importante área natural que desde el punto de vista geográfico y escénico es uno de los conjuntos litorales de mayor colorido y belleza de cuantos existen en la costa tabasqueña. Para el estado de Tabasco y en general para el gobierno Mexicano es de gran interés el sistema lagunar y el comportamiento hidráulico, pues la vulnerabilidad por incidencia de inundaciones, huracanes y variaciones en la línea de costa es alta y pueden tener repercusiones negativas sobre la flora, fauna y en general en sobre las localidades aledañas y su población. Entre los factores que resaltan la importancia de sistema lagunar de Mecoaacán, se encuentran:

- Protege las costas de inundaciones al retener grandes cantidades de agua por ríos y por marea (zona de amortiguamiento),
- Es una zona donde se encuentra gran cantidad de plantas y animales marinos; donde se refugian especies de aves acuáticas y es esencial para que muchas especies marinas depositen sus huevos como el caso de la tilapia;
- Proporciona servicios de recreación, turismo y deporte.

Por otra parte, la laguna ofrece una opción pesquera importante para las localidades aledañas, dado que la actividad económica más importante dentro de la laguna es el cultivo de ostión, que representa la principal fuente de recurso pesquero del estado de Tabasco (Zamora et al 2003).

2.2. ANTECEDENTES – ESTADO DEL ARTE

Por claridad, se ha dividido la revisión del estado del arte en tres ramas fundamentales del conocimiento, las cuales se presentan a continuación, estas

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

son: Investigaciones Oceanográficas, geológico/geográficas y químico-biológicas.

2.2.1. INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS

2.2.1.1. HIDRODINÁMICA Y MORFOLOGÍA

El trabajo que mejor informa sobre las condiciones hidrodinámicas de la zona lagunar de Mecoacán es aquél elaborado por Galavíz-Solis et al. (1987), en el que se presentan mapas batimétricos de la zona lagunar y su boca. Estos mapas fueron generados a partir del procesamiento de de 31 transectos de ecosonda y fotografías aéreas. Además, se presenta la distribución espacial del sedimento en la laguna, las cuales fueron obtenidas por medio de muestras colectados con dragas tipo Van Veen. Este estudio demostró que las lagunas de dos Bocas y Mecoacán son un solo sistema, originándose por los procesos de sedimentación terrígena del Río Mezcalapa y por el transporte ocasionado por la actividad de frentes marinos, marea, oleaje y corrientes.

Por otra parte, esta investigación presentó resultados de circulación de la laguna por medio del seguimiento de 10 trazadores de corriente. El patrón de circulación encontrado por Galaviz-Solis et al. (1987), es un desplazamiento circular del agua por la influencia de la marea, la descarga de los arroyos del sur de la laguna, la morfología y la fricción del suelo. Además, sus resultados incluyeron mediciones de salinidad, la temperatura y la transparencia del agua lagunar en diversas estaciones de muestreo. En la figura 2-9 muestra los resultados obtenidos por Galavíz-Solis et al. (1987). En el lado izquierdo el mapa base y toponímico de la Laguna de Mecoacán, haciendo referencia a la ubicación de las estaciones de observación y muestreo. En lado derecho la velocidad y dirección general de las corrientes generadas por trazadores.

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoaacán

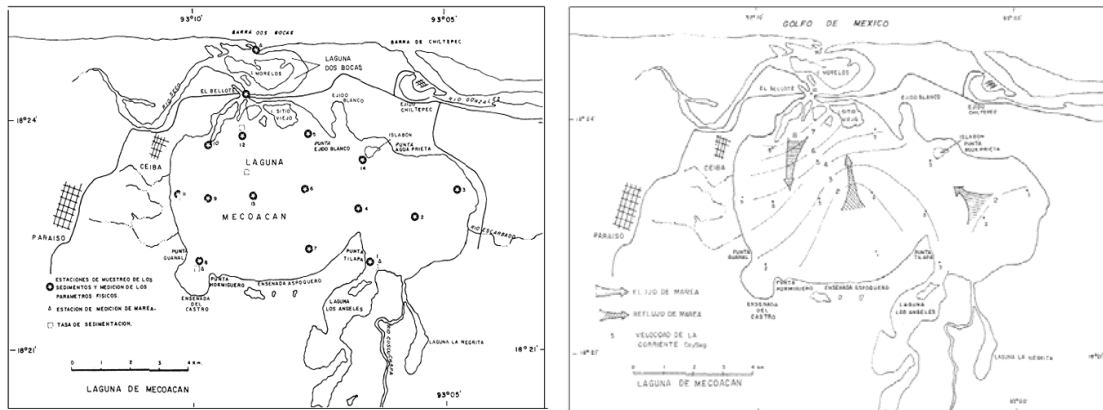


Figura 2-9 Distribución de estaciones de muestreo (der) y Circulación (izq) de la laguna. Estudio realizado por Galavíz-Solis et al. (1987).

Así mismo, dicho estudio también incorporó la distribución textural de los sedimentos en el cuerpo lagunar, a través de la correlación de parámetros estadísticos granulométricos encontrados en un mapa de distribución del sedimento (Figura 2.10). La información obtenida por el trabajo hecho por Galavíz-Solis et al. (1987), provee información importante sobre la velocidad en superficie, aunque no es posible conocer otros patrones de circulación en el fondo.

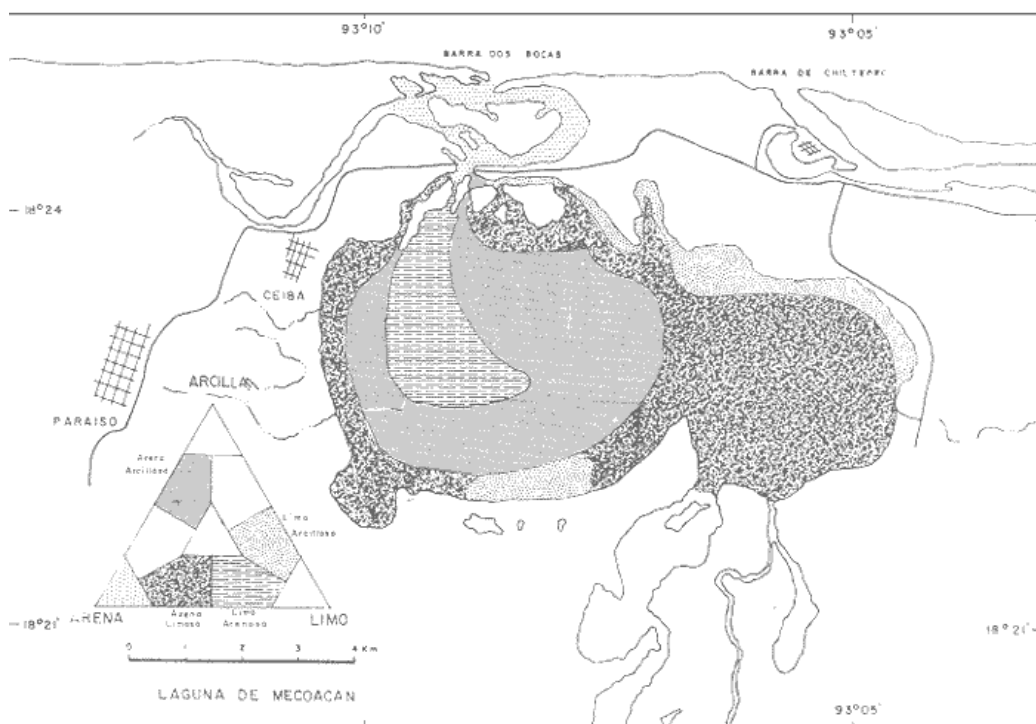


Figura 2-10 Mapa de distribución textural de los sedimentos. Galaviz-Solis et al. (1987)

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

Por otra parte, Gómez (1977) realizó un estudio de determinación de corrientes en la laguna, mediante una medición mensual durante un año. Entre sus conclusiones más significativas se rescata la identificación de la influencia de los vientos en la circulación de la laguna en el largo plazo.

Dentro de los estudios de modelación hidrodinámica, se encontró también el trabajo presentado por Fragoso et al (2008). Quienes utilizaron el software comercial TideWay-2D para conocer la hidrodinámica lagunar. Sin embargo, la resolución utilizada fue muy grande, además de que no se tomó en cuenta la contribución de gasto por parte del Río Hondo, el cual tiene influencia en la dinámica lagunar.

2.2.2. INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS/GEOGRÁFICAS

Diversos estudios geológicos se han realizado en la zona, entre otros Thom (1967) y Raisz (1964), definen la llanura deltaica de los ríos Mezcalapa y Grijalva en Tabasco como zona costera e indican que la forma del ambiente sedimentario que rige en la región ubicando la laguna; con sedimentos aluviales y terrígenos. Investigaciones en el caso del fenómeno de subsidencia en todo el Complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta, documentados por Ortiz y Méndez (1999). Mientras que trabajos como el de Carranza-Edwards (1975) señalan la morfo-tectónica de la zona e informan particularidades de la Laguna de Mecoacán, entre otras su acumulación de arcillas en el fondo, y la interacción de las descargas de los ríos con el acomodamiento de los sedimentos por la marea.

Por último, Barba et al. (2005) incorpora el uso de Sistemas de información Geográfica para la clasificación, extensión y distribución geográfica de los humedales y los asocia al sedimento. Definiendo 4 posibles categorías nombradas como humedales costeros, ribereños, lacustres y palustres o pantanos de agua dulce. En este estudio, se ubicó a la laguna de Mecoacán con características propias de ambos un humedal costero y pantano.

2.2.3. INVESTIGACIONES QUÍMICO-BIOLÓGICAS

Dentro de la revisión del estado del arte realizada, se encuentran también las investigaciones llevadas a cabo dentro del área química y/o biológica. Esto fue considerado importante ya que esta información forma una pieza clave de su caracterización ecológica. Dentro de los parámetros más importantes que han sido revisados destacan la salinidad, la composición química de sedimentos, la turbidez etc.

2.2.3.1. ESTUDIOS BIOLÓGICOS

Existe un gran número de investigaciones biológicas abocadas a la laguna de Mecoacán, entre otros destaca el trabajo de García-Cubas et al. (1990) quien estudió la taxonomía, distribución de origen halino y tipos de nutrición de moluscos, mencionando también algunos aspectos hidrológicos de la región. Por otra parte, Reyes De La Cruz et al. (2002) investigaron el impacto de nivel de inundación en el mangle. Mientras que Domínguez y Domínguez (1991) investigaron el efecto de la tala indiscriminada de mangle y López et al. (1997) presentaron un diagnóstico ambiental sobre las comunidades bióticas de la laguna. Pérez Sánchez, et al. (2002) evaluaron los factores que afectan el desarrollo de la acuacultura en el área de la laguna, tomando como base un esquema de desarrollo sustentable y Pérez-Muir et al. (2003) estudiaron la percepción y análisis pesquero dentro de la laguna. Una descripción detallada de la flora y fauna de la región fue presentado por Bueno et al. (2005).

Una aportación importante es el análisis detallado de la distribución de los manglares en México por la CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad - 2009), la cual hace una especial relevancia por el aporte importante de los manglares tabasqueños para la zona costera del golfo del país.

2.2.3.2. ESTUDIOS QUÍMICOS

Intrusión salina

Un aspecto importante en el estudio de sistemas lagunares, es el que incluye el estudio del intercambio y la mezcla de agua salada con el agua dulce de fuentes pluviales. La cantidad de sal que entra en la laguna se debe principalmente a la entrada de la marea por la boca y ha sido estudiado por Aguilera (1977). En dicho trabajo se presentaron variaciones anuales de salinidad de acuerdo con las variaciones hidrológicas de la laguna, concluyendo que la salinidad tiene una fuerte influencia estacional. Esta fluctuación está asociada a las temporadas de lluvias y estiaje en la cuenca baja, las cuales tienen una incidencia directa en el aumento de caudales de los ríos que descargan en la laguna.

Otras investigaciones, se han centrado en la medición del potencial salino para su posible utilización en el cultivo de ostión, o en general se han aplicado a la conservación de organismos en el agua (Castelum, 1979; De la Lanza y Gómez, 1987; Santoyo, 1971; López-Portillo, 1982; Signoret et al. 1981). Los resultados de estas investigaciones muestran el carácter altamente variable de estos sistemas acuáticos, presentando a la salinidad, como el parámetro que domina dicho dinamismo. Se reportan variaciones extremas en el rango de 0.3 a 36.9 ups (Santoyo, 1981).

Así mismo, otro de los objetivos de investigación respecto a la biota lagunar, corresponde al diagnóstico de la producción de fitoplancton en este cuerpo de agua, tomando como base diversos parámetros hidrológicos.

Contaminación

Motivados por la intensa actividad petrolera en la región, existen un sinnúmero de estudios de contaminación por hidrocarburos. Entre los que destacan los de Díaz González et al. (1994) y García-López et al. (2006), quienes ubicaron 52 derrames de petróleo en la zona de tabasco y caracterizaron sus efectos sobre el ecosistema. Por otra parte, estudios sobre la presencia de metales pesados en la laguna han sido realizados por Villanueva y Botello et al. (1992 y 2005)

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

donde alertan sobre la posible intromisión de este tipo de elementos por desagües antropogénicos en la zona. Así mismo, la concentración de metales traza en la laguna ha sido investigada por Marín-Mezquita et al. (1997) y Adams et al. (1999), quienes se enfocaron en estudiar el potencial de biorremediación de suelos en la zona.

Oxígeno disuelto

Los dos gases disueltos de mayor importancia en los ambientes acuáticos y sus procesos biológicos asociados son el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2). Otros gases que también pueden estar presentes, pero cuya importancia es menor, son el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el metano (CH_4). Los dos son generados en procesos biológicos (descomposición de materia orgánica en condiciones anaerobias).

El oxígeno disuelto es un constituyente no-conservativo (su concentración es variable) en ecosistemas acuáticos. Este es un requisito nutricional esencial para la mayoría de los organismos vivos. Los datos de concentración de oxígeno disuelto proporcionan información sobre 1) reacciones biológicas y bioquímicas en el agua; 2) efectos sobre los nutrientes y el estado de óxido-reducción de varios elementos

En el sistema lagunar de Mecoacán, por ser un cuerpo de agua tropical, la variación diaria del oxígeno disuelto es de gran importancia para la caracterización de la laguna porque esta variación tiene gran influencia sobre numerosos procesos biológicos y bioquímicos. Así, generalmente se presentan fuertes variaciones diarias por la cantidad de plantas acuáticas que generan variación mayor en la zona de la orilla con relación a una variación menor en la parte central. La laguna presenta una marcada variación de oxígeno disuelto por cambios estacionales a consecuencia del comportamiento metabólico de los organismos. Siendo Abril el mes más crítico para los habitantes del medio, debido a condiciones de casi anoxia (1.9 ml/l=42% de saturación), en tanto que en julio, corresponde al mes más favorable (5.0 ml/l=103% de saturación). Esta alta saturación es inducida por los movimientos turbulentos y circulación,

Capítulo 2 – Sistema Lagunar de Mecoacán

generados por los vientos fuertes de la zona en la superficie y la actividad fotosintética de los organismos (De la Lanza, 1999).

CAPÍTULO 3

CAMPAÑA DE CAMPO

3. CAMPAÑA DE CAMPO

Con el objetivo de caracterizar la laguna de Mecoacán y en función de los procesos hidrodinámicos en la boca y la laguna, se realizó una campaña de campo para recabar datos de batimetría, flujos, corrientes, salinidad y temperatura. Dado el tamaño de la región de estudio, se planeó una campaña de campo intensa que debía tener lugar antes del inicio de la temporada de lluvias fuertes (Septiembre). La medición de los parámetros que explican la hidrodinámica se hace importante cuando el forzamiento de los sistemas es de mayor magnitud. Según los estudios en la laguna (Galavíz-Solis et al., 1987), el sistema está gobernado por la marea, por este motivo las fechas escogidas para la campaña de campo deben hacerse en los periodos de mareas vivas. En consecuencia el periodo de realización fue definido para los días entre el 27 de Julio y el 10 de agosto de 2009.

3.1. BATIMETRÍA

Con el objeto de establecer y modelar las condiciones de flujo en el sistema, es necesario contar con una descripción detallada de la forma del fondo lagunar. De tal manera, se realizaron mediciones batimétricas dentro de la laguna y su boca por medio de una ecosonda y un GPS tipo Rover Leika Serie 1200, de alta precisión (mediciones de un radio de 1000m, y 10mm de precisión). Esta medición se hizo en lancha a una velocidad baja, haciendo transectos cada 300 m. aproximadamente, intentando acercarse lo más posible a la costa, pues el umbral de medición del equipo es de 50 cm, con lo que valores menores a este umbral son ignorados. La figura 3-1, muestra los transectos (en azul) donde se llevaron a cabo las mediciones de la profundidad con la ecosonda.

Las laguna es de baja profundidad en su mayoría de extensión, la profundidad media de todo el sistema es 2.28 metros, con valores máximos de 4.7 m en el sur de la boca del Bellote, y de 10.72 metros en el canal de la Boca cerca a la costa. En la figura 3-2, se muestra el resultado de la combinación de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) aplicado a la isla Andrés García, con la

Capítulo 3 – Campaña de Campo

información recabada en campo, referida al nivel medio del mar. Se resalta la uniformidad de la profundidad de la laguna en su interior, la configuración de mayores profundidades de la boca, y las alturas superiores a un metro en la barrera de la boca o Isla Andrés García.

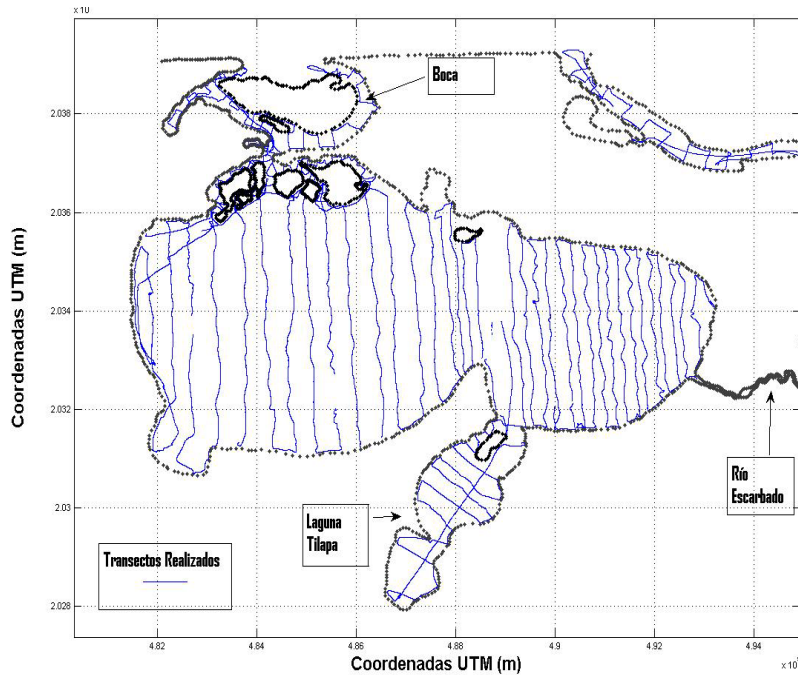


Figura 3-1 Mapa de distribución de los transectos de medición, laguna de Mecoacán.

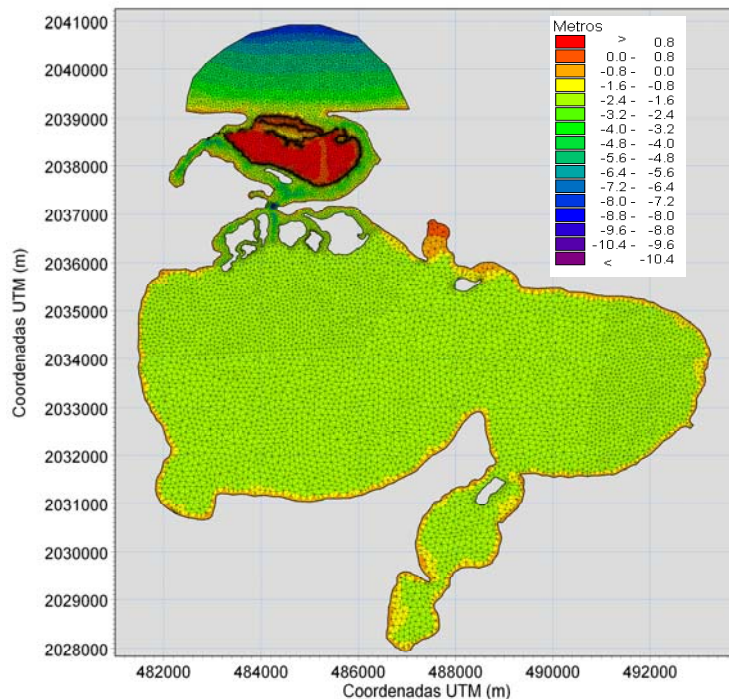


Figura 3-2 Elevaciones del sistema Mecoacán (DEM).

3.2. GASTO Y CORRIENTES EN LA BOCA LAGUNAR

Con objeto de caracterizar la interacción del flujo de marea con los flujos dentro del sistema lagunar, se decidió realizar un ciclo de mediciones durante 24 horas en la boca de la laguna, a fin de tener información en un período de marea completo. Las fechas de realización fueron de julio 31 a las 9 a.m. hasta el 01 de agosto a las 11:42 a.m.

El sitio seleccionado para el ciclo de mediciones es el estrecho del Bellote en la que convergen los dos brazos de comunicación al mar y el cuerpo lagunar se une con la boca (ver figura 3-3). Estos ciclos consisten en tomar mediciones del perfil de corrientes y el fondo cada hora para obtener la medición del perfil de velocidades y el gasto, la cual se hace de forma continua durante media hora a fin de recabar la mayor cantidad de información. Al finalizar esta lectura, se utilizaba un CTD seabird (SBE 19 plus) en distintos puntos del transecto a fin de caracterizar las características termohalinas de la columna de agua. Estos datos son muy útiles para calibrar del modelo numérico.

Figura 3-3 Ubicación del Ciclo de mediciones.

El objetivo de estas mediciones fue encontrar el gasto promedio y la sobre-elevación del nivel del agua. El gasto se promedió con la sumatoria de cada transecto realizado, i.e. para cada hora se realizaron un promedio de 9

Capítulo 3 – Campaña de Campo

transectos, utilizando para ello la adecuación de los equipos en un jet-ski. La dirección del flujo/gasto cambia dependiendo de la dirección del jet ski, alternándose en positivo y negativo. Por lo tanto, hay que separar la información de cada transecto para poder hacer la corrección adecuada de los signos y obtener así el gasto promedio por transecto, por hora (Q). Los resultados ilustrados en la Figura 3-4 muestran un transecto medido 13 veces en un tiempo determinado del ciclo, donde se hace evidente la interacción del flujo con la morfología del canal, al encontrarse un decaimiento del flujo cerca de las orillas y se evidencia el cambio del sentido de las mediciones según la el sentido del aparato.

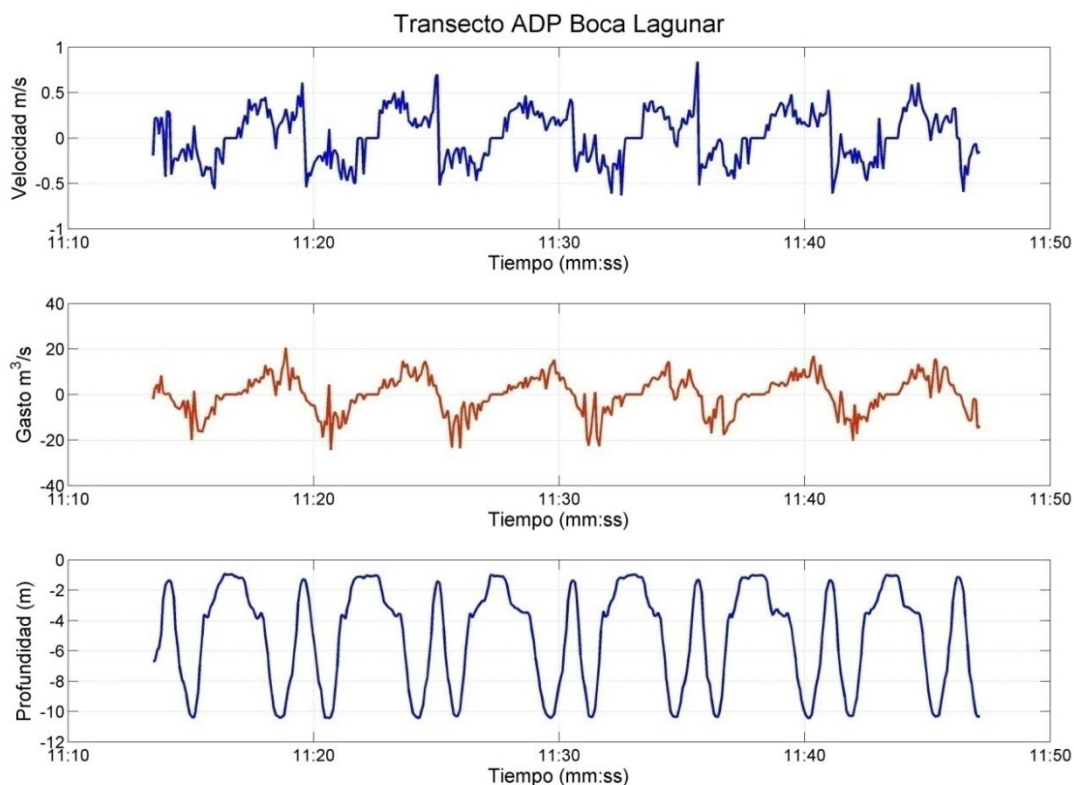


Figura 3-4 Comparación del Gasto, la velocidad y la Profundidad en un solo transecto.

La configuración del gasto y la velocidad de la corriente son completamente dependientes de la marea, específicamente por el flujo y reflujó que produce, esta variación se puede ver más clara en la relación total de mediciones en la figura 3-5. El valor medio registrado de velocidad es de 0.19 m/s los valores

Capítulo 3 – Campaña de Campo

máximos están entre 0.5 y 0.6 m/s. El panel superior muestra los valores asociados a la velocidad del flujo, los cuales disminuyen y vuelven a aumentar según el cambio del forzamiento de marea (pleamar/bajamar). De la misma forma se presenta la variación del gasto ($Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$) con un patrón de comportamiento similar, lo que indica la preponderancia de la marea en el flujo.

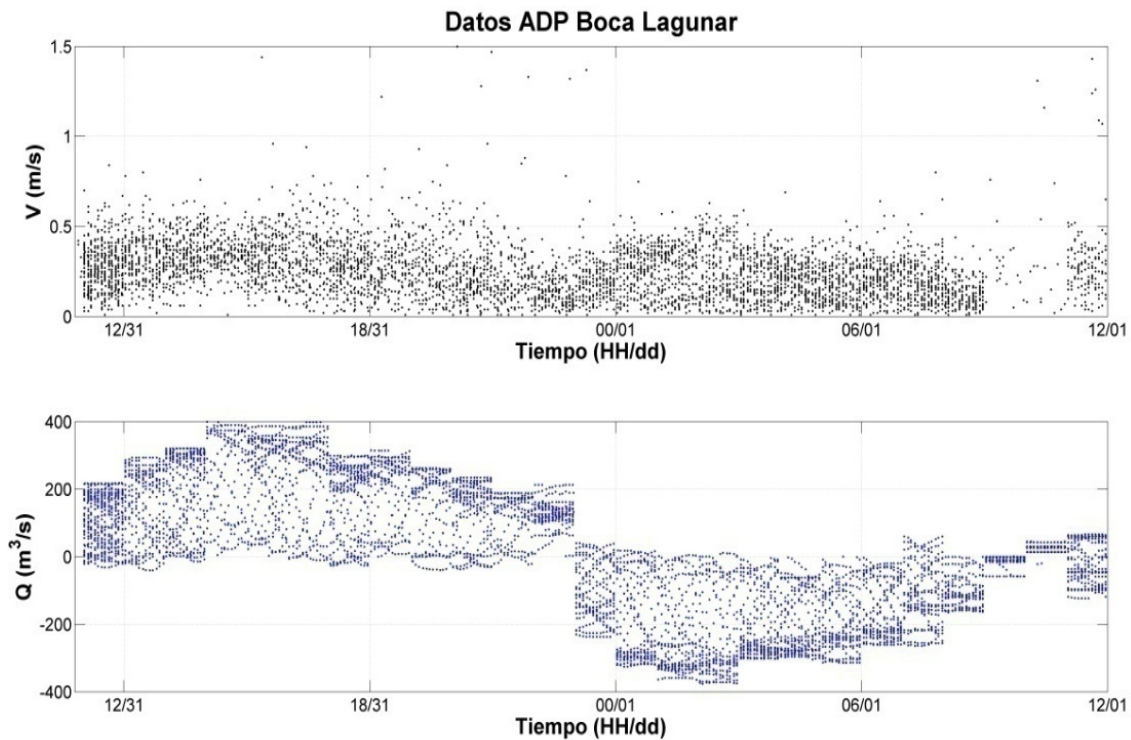


Figura 3-5 Relación total de puntos medidos ciclo mareal boca lagunar.

Con el propósito de cuantificar la incertidumbre asociada a estas mediciones, se calcularon los valores mínimos, medios y máximos de gasto reportados durante el ciclo mareal. Los resultados de este cálculo se presentan en la Figura 3-6, en donde se observan los patrones del gasto a lo largo del ciclo de marea. Los valores positivos de Q indican el reflujó del movimiento del mar y los negativos indican flujo hacia la laguna, con lo que el valor absoluto representa el gasto total en la sección. La magnitud del caudal alcanza un valor mayor hacia el mar de aproximadamente $400 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado a la presencia de la bajamar. En contraste, durante la acción del proceso de llenante se reporta

Capítulo 3 – Campaña de Campo

un gasto hacia la laguna de aproximadamente $370 \text{ m}^3/\text{s}$. La diferencia de gastos de bajante y llenante se debe a los aportes del Río Hondo y al cambio de fondo de la boca a la laguna. En la figura 3-7 se presenta la serie temporal del nivel medio del mar, en el que se aprecia la clara presencia de la marea astronómica en la señal.

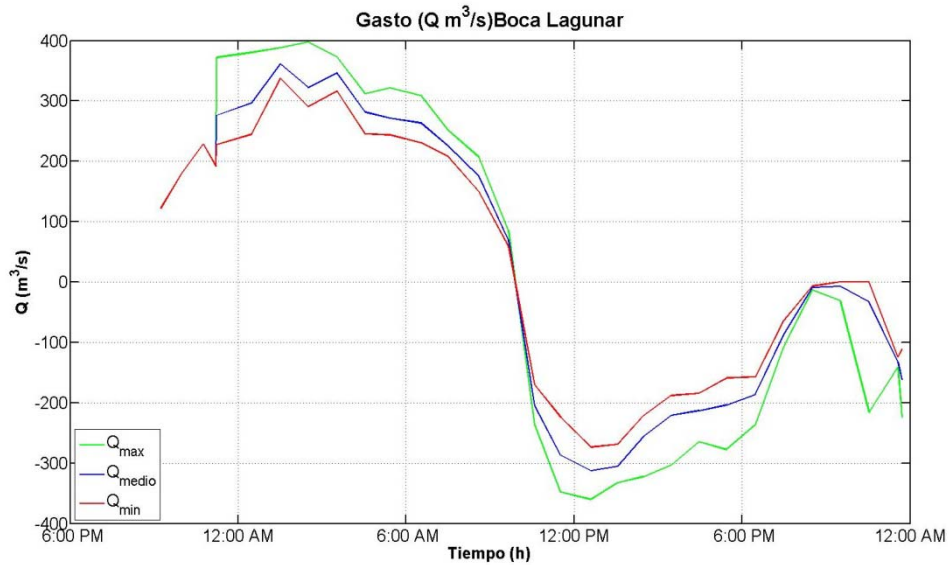


Figura 3-6 Variación del gasto en la Boca de Mecoacán.

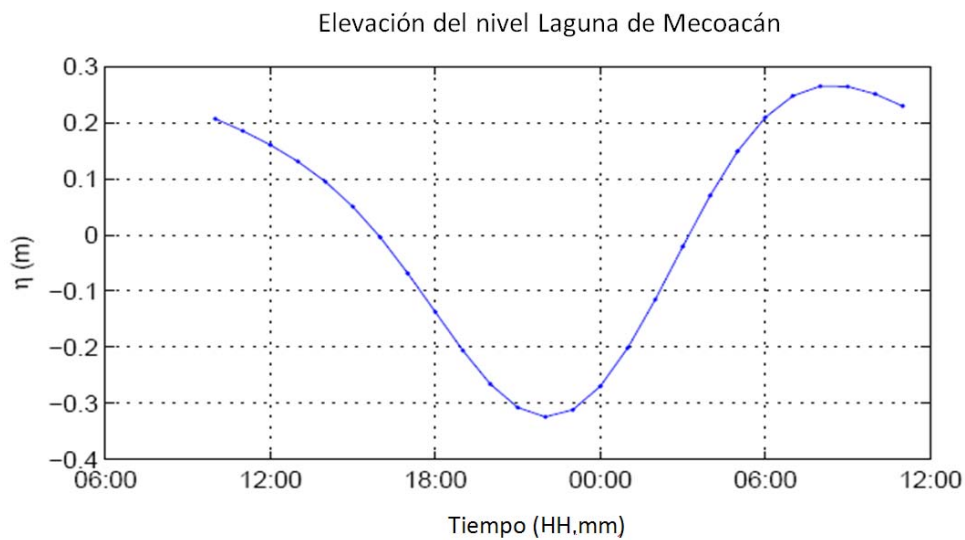


Figura 3-7 Variación del nivel medio del mar en la Boca de Mecoacán.

3.3. GASTO EN EL RÍO HONDO

Las mediciones en este río, ubicado al Este de la laguna, se realizaron a 500m aproximadamente de la desembocadura y a 4.7m de profundidad. Las velocidades medidas en este río se hicieron a través de la instalación de un velocímetro acústico “Vector” (Nortek, AS).

La velocidad del flujo presenta una variación diurna en relación con los cambios de nivel del mar, las velocidades menores ocurren durante el periodo de llenante cuando el nivel comienza a subir, y las velocidades mayores cuando el nivel comienza a bajar en la vaciante. En el primer caso se observan valores negativos, que indican un cambio de sentido del flujo hacia el río González al Este del sistema. En consecuencia, es posible analizar la interacción de las corrientes inducidas por la marea con el gasto (menor) que lleva el río durante el periodo de medición en la desembocadura del río. La Figura 3.8 ilustra las mediciones en este punto con los valores de velocidad en el panel superior y los de presión en el panel inferior.

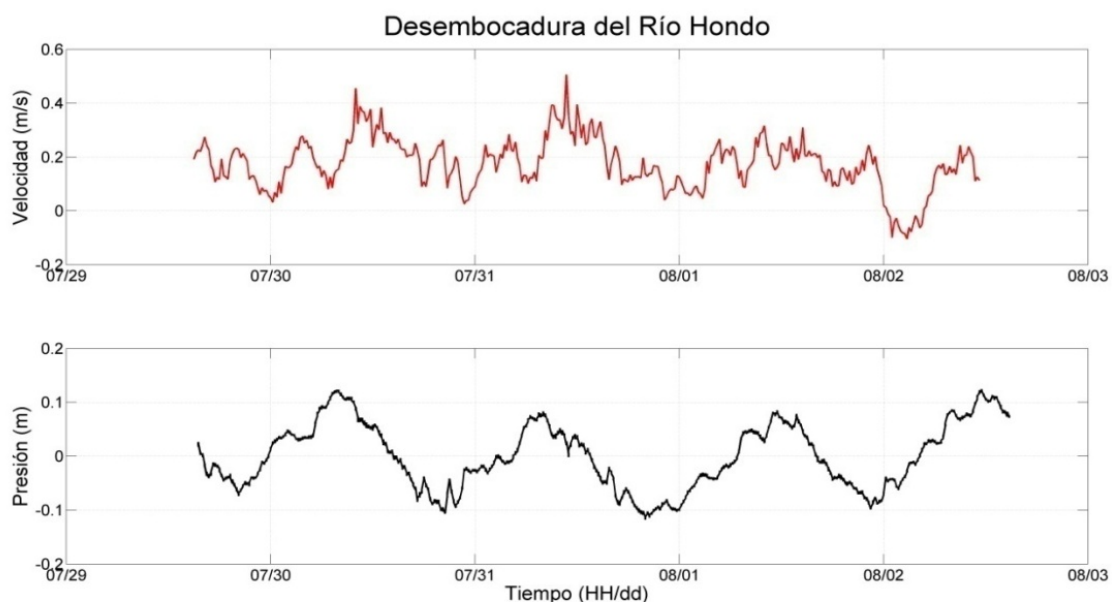


Figura 3-8 Mediciones Vector, velocidad (panel superior) y presión (panel inferior) Desembocadura del Río Hondo.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

El comportamiento de los datos de presión obtenidos con el Vector indica la presencia del forzamiento de la onda de marea en este punto del sistema (bastante alejado de la desembocadura). Esto confirma la regulación de la circulación lagunar por medio de las condiciones de marea en la boca lagunar, para condiciones caudal medidas.

La estimación del caudal en el río Hondo, se realizó a través del uso de los datos de velocidad de flujo y el área de la sección transversal. Generando así una serie temporal del caudal. A partir de estos cálculos, se estimaron valores para los gastos promedio y máximo de 42 m³/s y 65.97 m³/s. Este flujo es persistente y aporta agua dulce de manera constante a la laguna.

3.4. SALINIDAD, TEMPERATURA Y DENSIDAD EN LA LAGUNA

La salinidad y temperatura, son elementos que se utilizan para determinar, entre otras, las características que definen los sistemas costeros como estuarinos y no-estuarinos, esto permite identificarlos y clasificarlos según su estructura salina, y procesos de circulación y estratificación. Dichos factores son importantes para reconocer y abordar adecuadamente problemas de acuicultura, contaminación, navegación, formación de playas, transporte de sedimentos, construcción de obras, etc. Para el caso de la laguna de Mecoacán y en general para casi todas las lagunas costeras como resultado de su carácter somero, la influencia de las variaciones verticales de presión en la densidad son despreciables, con lo que los gradientes más importantes se encuentran asociados a los valores de temperatura y salinidad. En la Laguna de Mecoacán, las descargas de agua dulce del río Hondo producen gradientes de salinidad significativos que modifican la densidad de todo el sistema. La variación de estos parámetros debe estar asociada a la estación del año en el que se realizaron las mediciones pues es probable que se presenten intensos gradientes de temperatura y salinidad asociados a la presencia de la temporada de lluvias.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

Con el propósito de conocer las características de densidad, temperatura y salinidad en la laguna de Mecoacán, en la campaña de campo se consideró la realización de lances CTD en diferentes puntos dentro de la Laguna de Mecoacán. Se realizaron 106 mediciones en los puntos que se señalan en la Figura 3.9. De esta forma se pretende evaluar la penetración de la marea observada, con aquella que se va a modelar en este trabajo. Las mediciones fueron realizadas durante el periodo de tiempo en el que no hubo precipitaciones que pudieran alterar las condiciones reinantes de la laguna.

Adicionalmente, y con el objeto de observar el comportamiento en la vertical de estos parámetros, se definieron diferentes transectos de análisis que nos permitieran identificar su variación en la columna de agua y en secciones transversales a lo largo y ancho del cuerpo lagunar.

A medida que el instrumento CTD es sumergido en el agua, las mediciones de conductividad, temperatura y profundidad fueron registradas continuamente de forma digital y almacenadas en el mismo instrumento. Los datos arrojados por el CTD, son de dos tipos: de subida y bajada; para el análisis se tomaron los datos de subida para eliminar el error que se pueda obtener por los segundos de encendido y el posterior descenso al agua. Estos datos fueron correlacionados e interpolados a distintas profundidades, pudiendo así realizar mapas de salinidad, temperatura y densidad. La Figura 3.10 presenta el orden de las mediciones recabadas con su número consecutivo, y se resaltan seis puntos para análisis de perfiles de salinidad, temperatura y densidad específicos.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

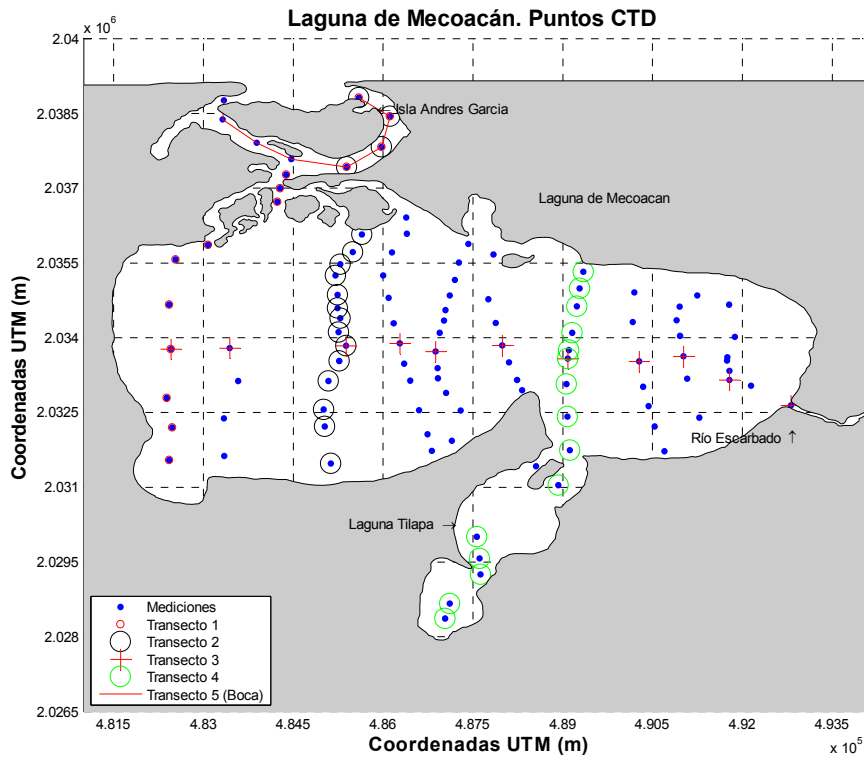


Figura 3-9 Mediciones realizadas usando por el CTD en la Laguna de Mecoaacán. Perfiles tomados para el análisis de condiciones de la columna de agua (salinidad, temperatura y densidad).

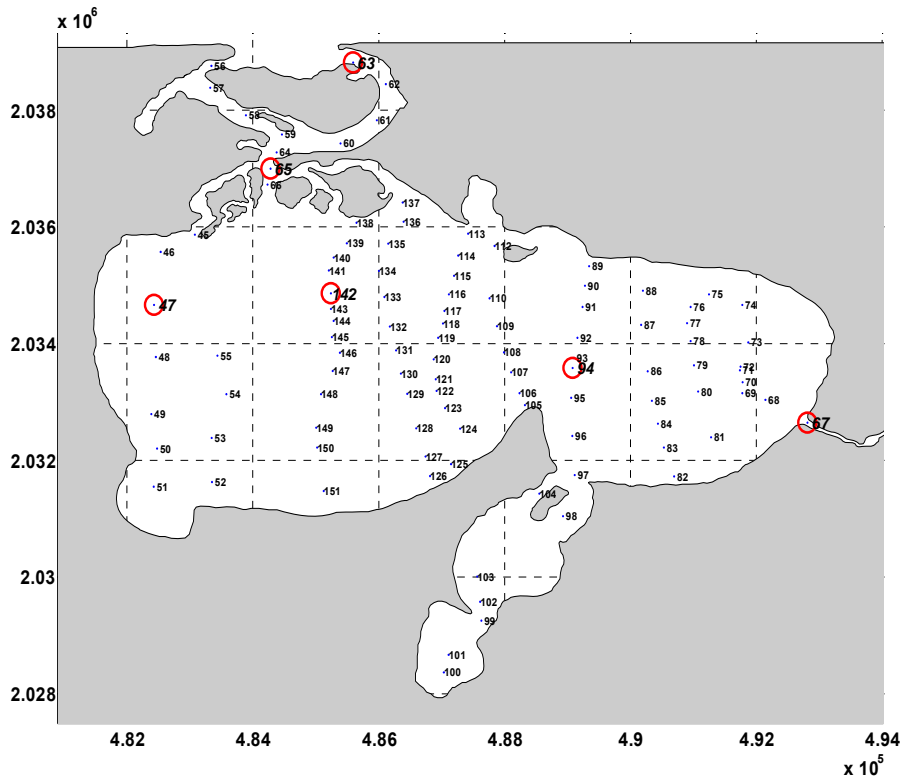


Figura 3-10 Numeración general de puntos de medición de CDT.

3.4.1. SALINIDAD

Los resultados relativos a la estratificación por salinidad observada en el sistema indican que la presencia de agua salada en la laguna está altamente influenciada por la acción de la marea y las contribuciones del Río Hondo en el oriente de la laguna.

En la Figura 3-11 se muestran los resultados de distribución superficial de la salinidad en la laguna a una profundidad de 0.3m, en la cual se identifican cuatro zonas de salinidad bien diferenciadas, destacando salinidades altas en la zona de la boca cerca al mar y muy bajas en el oriente, cerca del río Hondo. De la misma forma, se aprecia la influencia del Río Seco, que realiza un aporte muy pequeño de agua dulce en la zona occidental de la boca. Dicha contribución reduce la salinidad en este sector lo que hace que el brazo oriental sea la zona más alta en sales del sistema con 35.22 [UPS] (punto 62 medido en CTD, ver figura 3-10), en comparación con el brazo occidental que tiene una salinidad, de 26.53 [PSU] a la misma profundidad (punto 57). El mapa de distribución de la salinidad en la laguna presenta una alta variación dentro del cuerpo lagunar. De hecho, se identifican valores de agua salobre (combinación de agua dulce y salada) al centro de la laguna. Esto indica que existe una circulación que favorece los procesos de mezcla al interior del cuerpo lagunar. Incluso es posible revelar una dirección anti-horaria en la circulación al interior de la laguna, dado que el agua dulce del Río Hondo genera una pluma que sugiere una dirección Noroeste, mientras que el agua salada entra por el estrecho del bellote y genera una pluma que aparenta movimiento en dirección Oeste-Sureste. La configuración de las zonas de alta y baja salinidad en la laguna, señalan por otra parte que las velocidades al interior del cuerpo lagunar son bajas. Cabe hacer notar que esta condición de circulación está íntimamente asociada a las condiciones de viento, marea y caudal registrados durante las mediciones, por lo que no sería extraño que la circulación se intensifique bajo la incidencia de vientos asociados a nortes o huracanes, gastos extraordinarios por el Río Hondo o la presencia de marea de tormenta en la desembocadura.

Figura 3-11 Laguna de Mecoacán, distribución general de salinidades.

3.4.2. TEMPERATURA

La variación de la temperatura en la laguna es consecuencia de varios factores externos principalmente, en orden de importancia:

- a) El primero es la interacción forzada del volumen de agua salada que entra y sale por la boca periódicamente por efecto de la marea, esta agua trae consigo temperaturas más bajas que las encontradas en la laguna;
- b) La radiación solar que se acentúa por la extensión de la laguna y su carácter somero,
- c) La entrada de un volumen de agua proveniente de afluentes que descargan agua dulce de forma continua, con temperaturas más bajas (río Hondo y en menor medida el Río Seco) que el agua de la laguna y,
- d) Otros procesos como el agua dulce por precipitación y el viento, que son factores que influyen estacionalmente.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

La variación de la temperatura al interior del cuerpo lagunar, está íntimamente ligada a la dinámica de los procesos de marea. Es decir, zonas de mayor circulación favorecen la mezcla de agua más fría proveniente del mar con el agua más caliente que se encuentra al interior de la laguna. Así, en la zona sur de la laguna en el cuerpo de agua conocido como la Tilapa, (coordenadas UTM 4.88×10^5 hasta el límite Oeste) la temperatura es muy alta, encontrándose valores máximos de 31.63°C (ver figura 3-12). Esto indica que el agua en esta zona de la laguna está sujeta a una menor circulación y a una mayor incidencia de calor por radiación solar. En contraste, las temperaturas más bajas se encuentran en la boca lagunar con valores aproximados a 24°C (ver figura 3-12), siendo evidente que en esta zona, los cambios de temperatura son resultado de la entrada de agua del mar.

Con el propósito de analizar la variación espacial de la salinidad, temperatura y densidad a lo largo de la columna de agua, la Figura 3-12 presenta los mapas de distribución de estas variables al interior del sistema lagunar y a diferentes profundidades dadas por 0.3, 0.7, y 0.9m.

En estos mapas se aprecia una distribución similar entre salinidades y temperatura, lo que indica la influencia de la marea en la distribución de estas cantidades dentro de todo el sistema. Adicionalmente, es posible observar que no hay cambios significativos de los valores de estos parámetros a diferentes profundidades. En esta figura, las zonas de color blanco corresponden a regiones donde no existían datos para la interpolación de la superficie correspondiente (indicando zonas más someras).

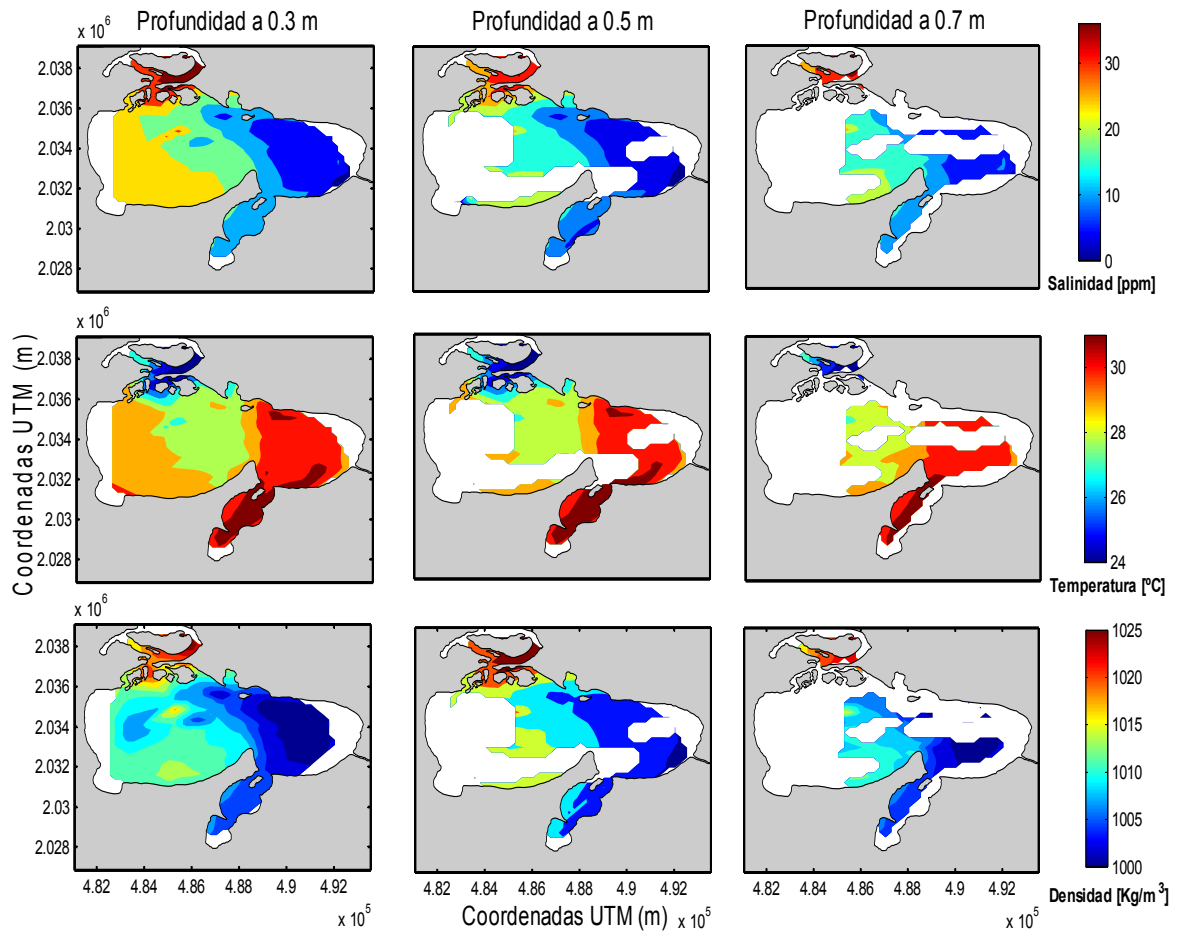


Figura 3-12 Comparación de Temperatura, salinidad y densidad a 0.3, 0.5 y 0.7 m del sistema.

3.4.3. ESTRATIFICACIÓN DE LA LAGUNA

Con el propósito de examinar con más detalle la estratificación de salinidad, temperatura y densidad al interior del cuerpo lagunar, se seleccionaron 5 transectos definidos por los lances de CTD que se realizaron durante la campaña, tal y como se presenta en la Figura 3-9. Los transectos se escogieron de forma tal que la información estuviera en un transecto central que cruza de Oeste a Este la extensión lagunar (transecto 3), tres transectos que recorren en diferentes secciones trayectorias de norte a sur a lo largo de la laguna (transectos 1, 2 y 4) y un último rodeando la isla Andrés García, para determinar condiciones en la boca (transecto 5). Para cada uno de los transectos seleccionados, se presenta la distribución vertical de salinidad (panel superior), temperatura (panel central) y la densidad (panel inferior).

Capítulo 3 – Campaña de Campo

La Figura 3-13 presenta los resultados correspondientes al primer transecto que atraviesa la laguna desde el brazo Este en la boca lagunar hasta el sur de la laguna. En esta sección transversal se identifican tres zonas claras, la primera de ellas homogénea con agua salobre y profundidad somera (< 2 m) ubicada en la parte sur de la laguna, la segunda con profundidades del orden de los 8m ubicada en el canal del Bellote con predominancia de agua salada en la mezcla, y la última correspondiente al brazo Este de la boca lagunar con valores de 34 ups correspondientes al agua de mar.

Los resultados que se presentan en este transecto, indican una zona bien mezclada con poca intrusión salina en forma de cuña. Esto se debe por una parte, a que el transecto se ubica en zonas donde la circulación lagunar (El Bellote) es intensa por lo que se favorece la mezcla de las masas de agua.

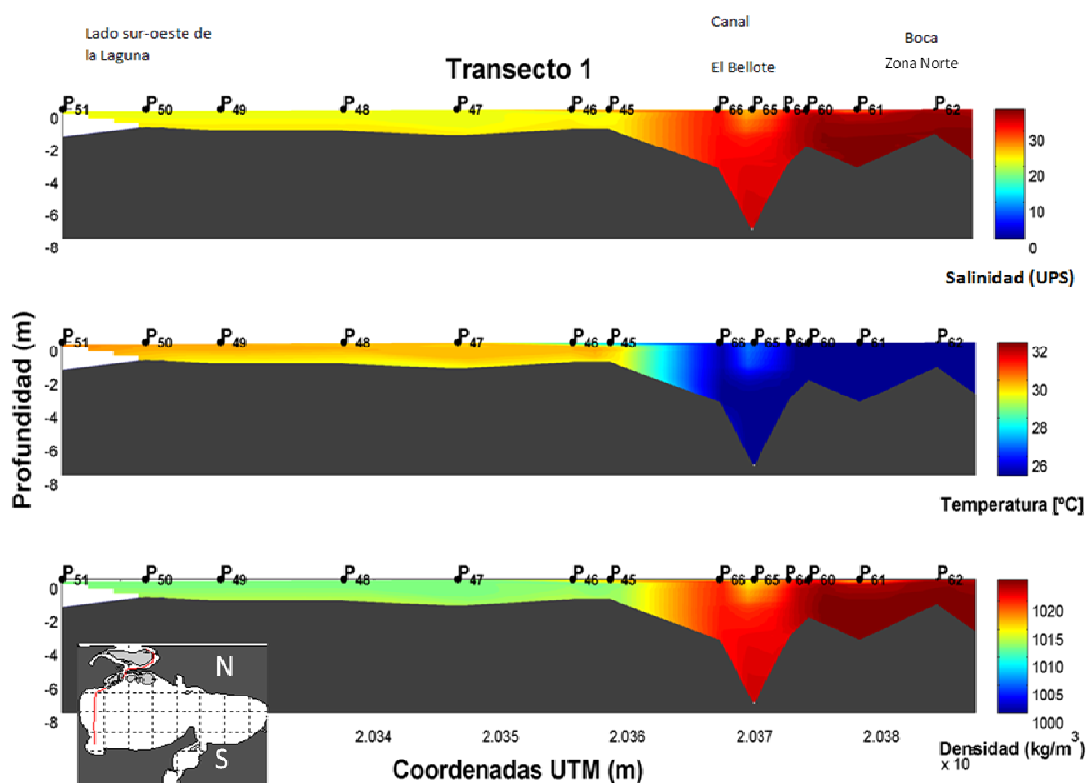


Figura 3-13 Perfil del transecto 1, desde la parte sur-occidental de la laguna hasta la boca. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.

El segundo transecto (Figura 3-14) sigue una trayectoria de Norte a Sur en la parte central de la laguna. En esta figura es posible identificar cuatro zonas de salinidad diferenciadas, una correspondiente a la boca lagunar con salinidades

Capítulo 3 – Campaña de Campo

altas, y tres correspondientes al cuerpo lagunar en las que se aprecian valores de salinidad que indican mezcla de las masas de agua. La división de la parte central en tres regiones (estratificación horizontal), con salinidades diferentes indica una posible circulación del flujo con dirección perpendicular al eje del transecto.

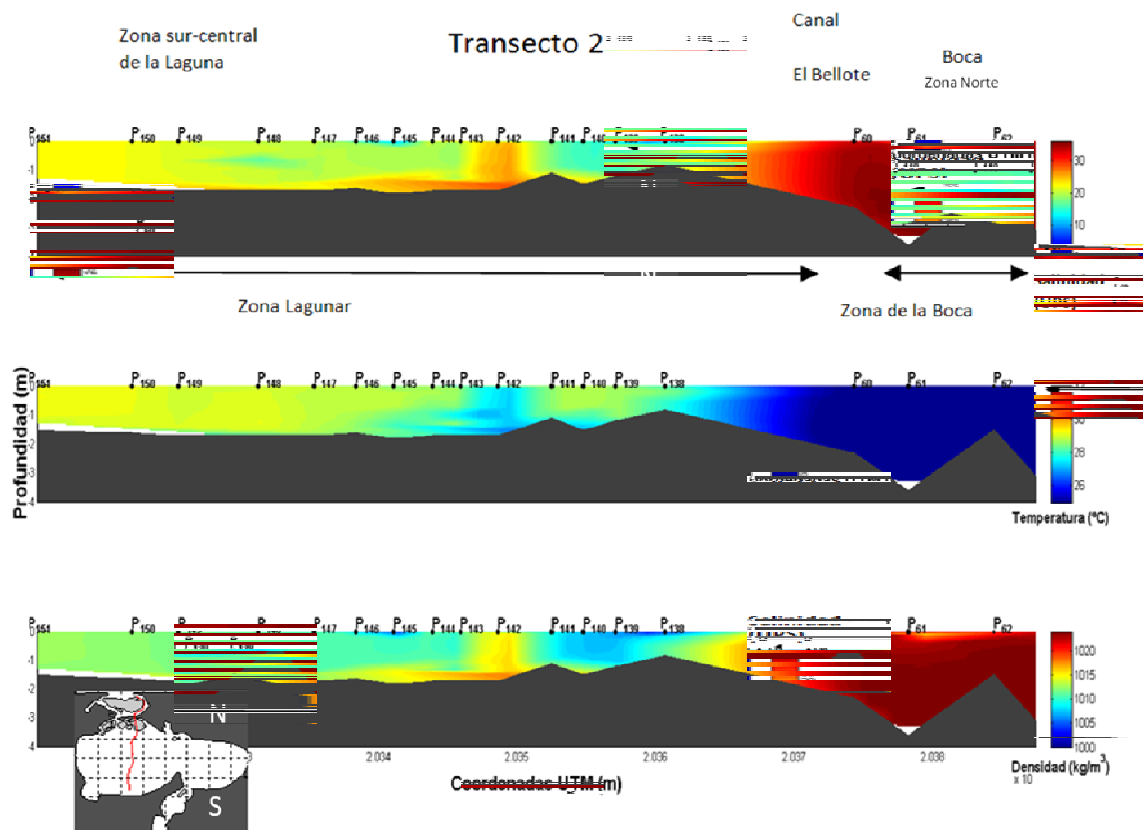


Figura 3-14 Perfiles del transecto 2. Mediciones Laguna de Mecoaacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.

La Figura 3-15 ilustra los resultados del transecto 3 que recorre la laguna de Oeste a Este. De hecho, en este corte transversal, es posible identificar de forma sutil la presencia de una cuña de agua salada. Este fenómeno se da como resultado del encuentro de dos flujos de agua dulce (por la presencia del río Hondo al Este) y salobre al interior del cuerpo lagunar. La mezcla en el encuentro de las masas de agua no fue predominante durante la campaña de campo realizada, es probable que de intensificarse el viento o el gasto en el Río Hondo, la estratificación reportada desaparezca dando lugar al predominio de procesos de mezcla.

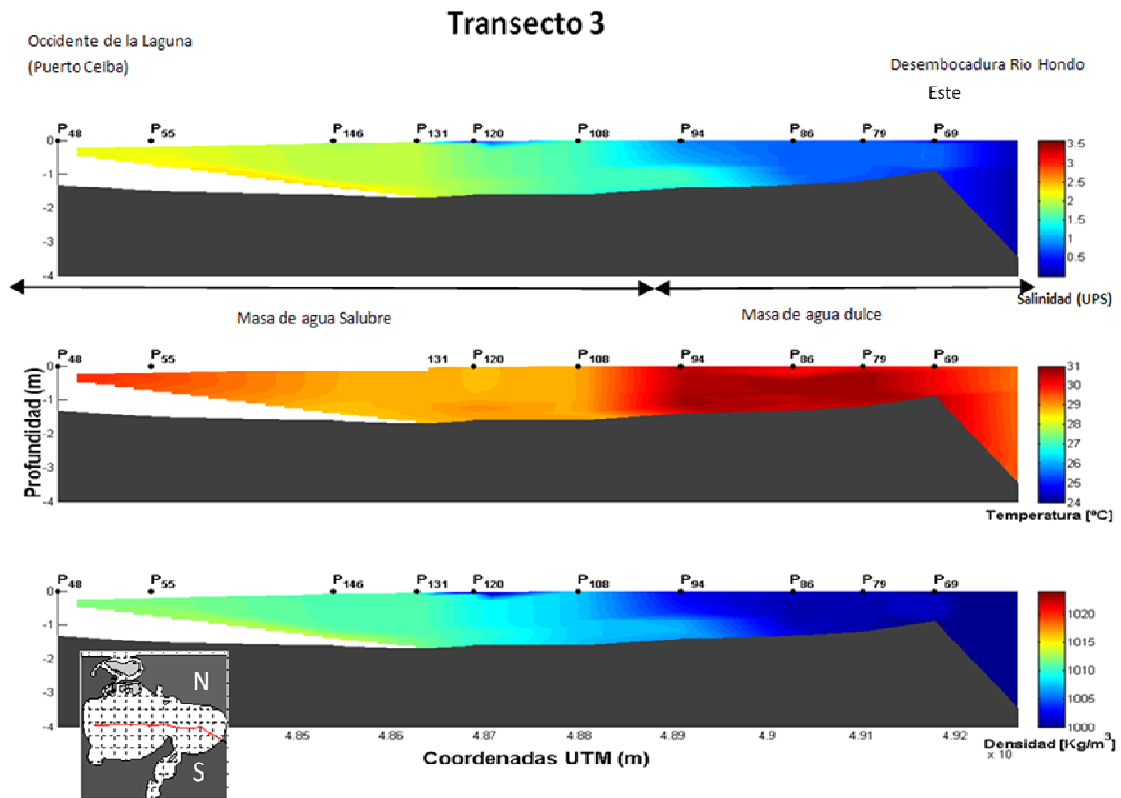


Figura 3-15 Perfiles del transecto Número 3. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.

Por su parte, la Figura 3-16 presenta los resultados asociados al procesamiento de la información del transecto 4, ubicado en la zona oriental de la laguna, incluyendo la laguna de la Tilapa. En este corte, es posible observar una mayor incidencia del agua dulce proveniente del río Hondo, dada la cercanía de esta sección al río. Estas mediciones indican una zona homogénea con predominancia de agua dulce por el aporte del río. La parte sur del transecto, en la laguna de la Tilapa es la que contiene mayor cantidad de sal, lo que probablemente resulta de la circulación lagunar y la radiación solar. De hecho, es posible determinar que dentro de la laguna de la Tilapa el agua permanece más tiempo estancada dadas las altas temperaturas registradas en esta región (~30°C).

Capítulo 3 – Campaña de Campo

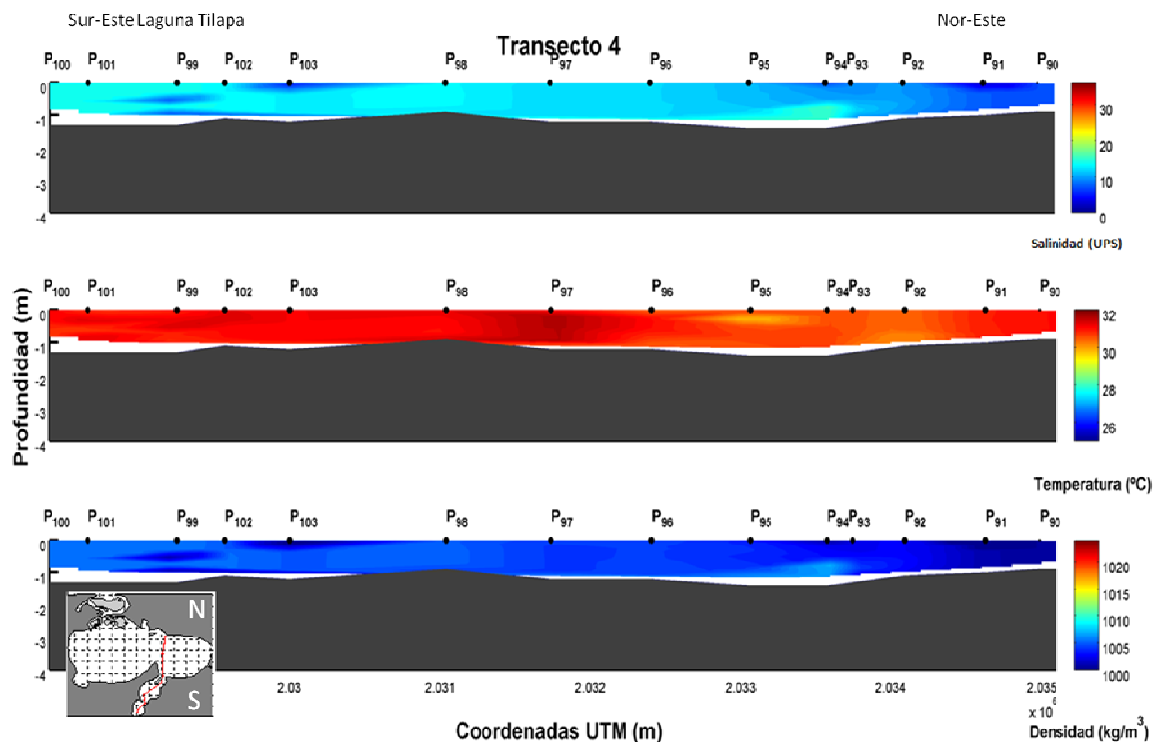


Figura 3-16 Perfiles del transecto Número 4. Mediciones Laguna de Mecoacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.

Por último, en la Figura 3-17 se presentan los resultados asociados al transecto 5, donde es posible observar la variación de los parámetros de salinidad, temperatura y densidad a lo largo de la boca lagunar, en dirección Oeste-Este. Los resultados de salinidad se presentan en una escala diferente de colores, con el propósito de identificar diferencias en los valores registrados.

La influencia del Río Seco y la morfología de la entrada de los dos canales, favorecen los cambios de densidad observados. La influencia de un pequeño aporte de agua dulce a través del brazo Oeste, produce una clara diferencia en las densidades que se observan en ambos brazos de la boca lagunar. Así mismo, se puede concluir que el brazo Este de la boca tiene una dinámica de circulación más intensa, esto se refleja en la homogeneidad registrada para los tres parámetros a lo largo de la columna de agua. En contraste, el brazo Oeste de la boca lagunar, presenta una estratificación por la presencia del pequeño caudal del Río Seco.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

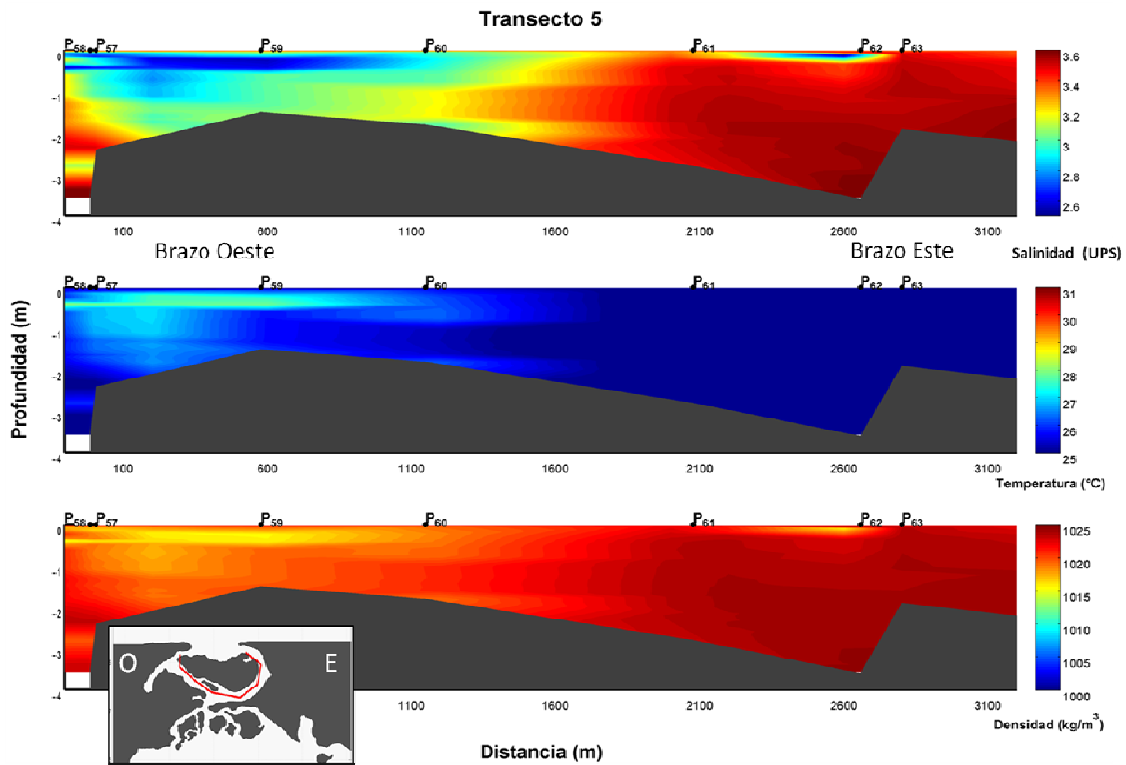


Figura 3-17 Perfil del Transecto Numero 5. Mediciones Laguna de Mecocacán. Se analiza en la parte superior la salinidad, en la parte central la temperatura y en la parte inferior la densidad.

A pesar que en las fechas de medición el caudal del Río Hondo fue muy bajo ($\sim 67 \text{ m}^3/\text{s}$) se identificó su influencia en las características de salinidad al interior de la laguna. Así mismo, la distribución de la densidad indica que para el periodo de medición, el movimiento del agua o el flujo interno de la laguna fue bajo. Se identificó a la parte más dinámica del sistema en la boca lagunar, como resultado del flujo y reflujo de la marea. A pesar que el rango de marea es pequeño, micromareal ($< 2 \text{ m}$), la mayor parte de la laguna esta influenciada por este forzamiento el cual junto con el Río Hondo, define la distribución salina en la laguna.

Con el propósito de presentar los resultados directos de las mediciones, en la Figuras 3-18 y 3-19 se presentan los lances de CTD realizados en puntos característicos de la laguna. Por ejemplo, es posible identificar la haloclina descrita en el transecto 3 en el resultado del punto 94. Mientras que el resto de los puntos se registró una mezcla homogénea de los parámetros medidos.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

La información presentada en este capítulo forma una pieza clave en el desarrollo de esta investigación, ya que permite por un lado definir las condiciones de frontera del modelo numérico y su calibración con datos de campo fiables. La homogeneidad vertical de las condiciones de salinidad y temperatura justifica el uso de un modelo numérico promediado en la vertical, aunque conociendo que los fuertes gradientes horizontales de densidad pueden también contribuir al movimiento y generar incertidumbre en los resultados.

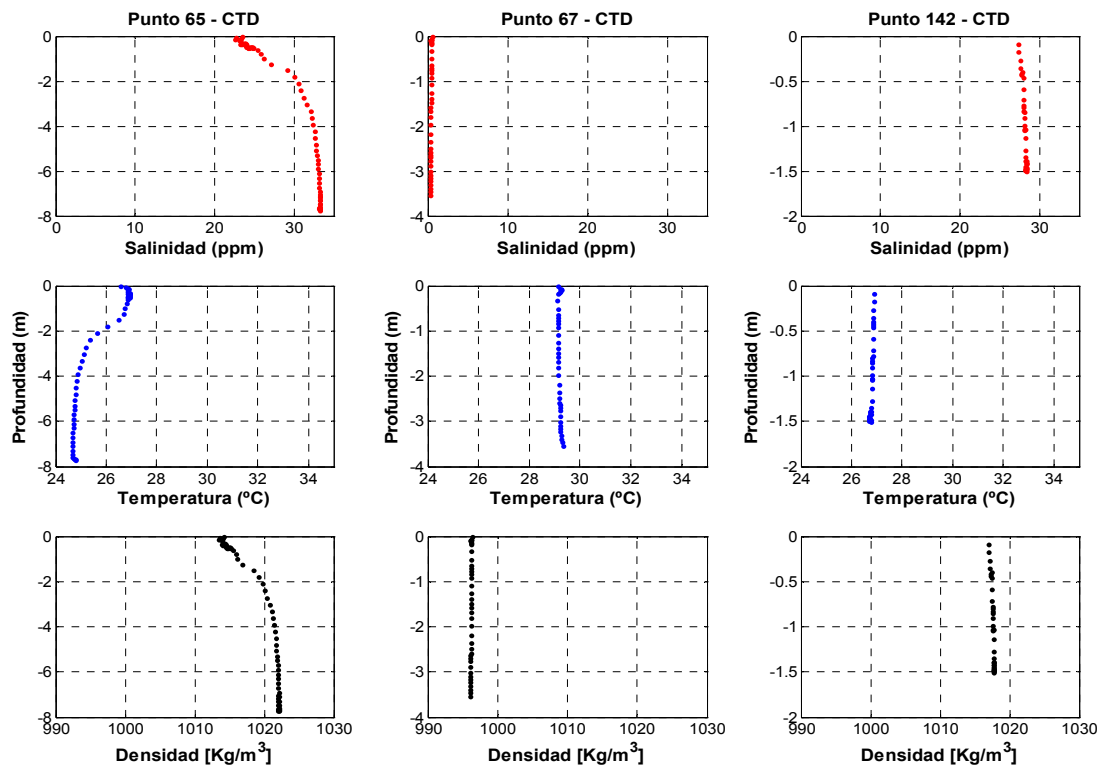


Figura 3-18 Mediciones en la columna de agua de los puntos 65, 67 y 142 en la Laguna, para salinidad, temperatura y densidad.

Capítulo 3 – Campaña de Campo

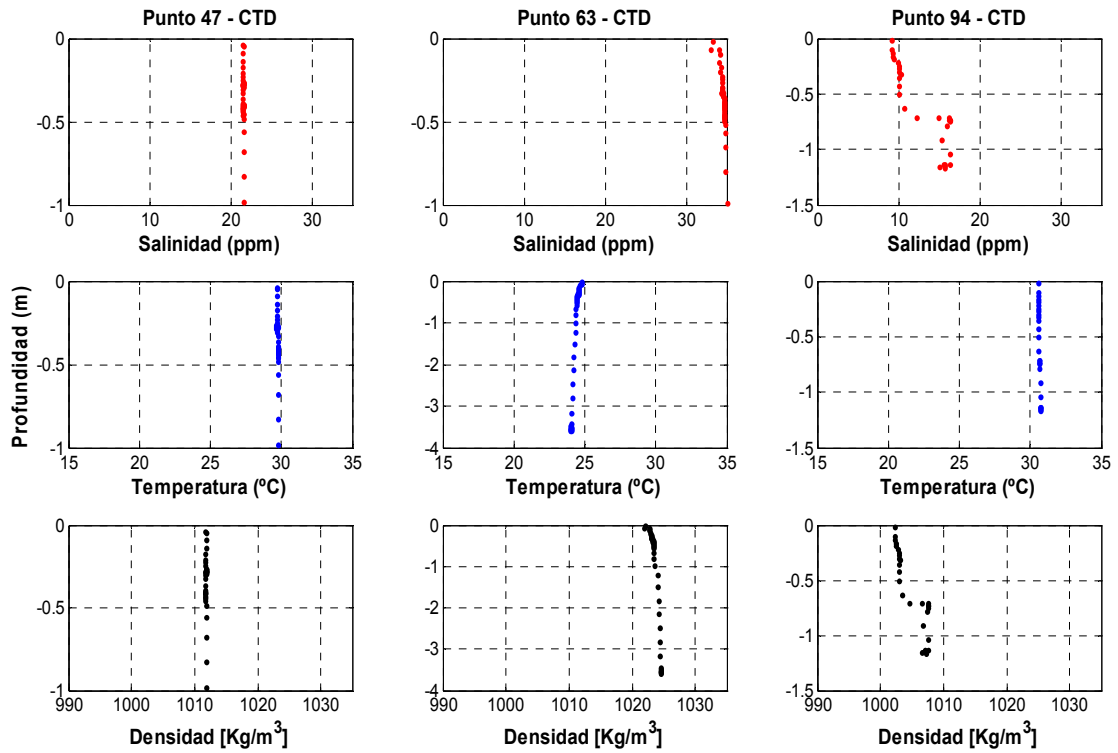


Figura 3-19 Mediciones en la columna de agua de los puntos 47,63, y 94 en la Laguna, para salinidad, temperatura y densidad.

CAPÍTULO 4

MODELADO NUMÉRICO DEL SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN

4. MODELADO NUMÉRICO DEL SISTEMA LAGUNAR DE MECOACÁN, TABASCO.

Para el análisis y caracterización de la hidrodinámica de la laguna de Mecoacán se plantea, siguiendo los objetivos de la presente tesis, la adecuación de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones (promediado en la vertical). Así, se busca la valoración de la hidrodinámica de la laguna y su boca, a fin de obtener la distribución espacio-temporal de la velocidad del flujo y reflujos de agua inducido por la marea, junto con la circulación al interior del cuerpo lagunar.

La modelación se hará a través de un modelo numérico bidimensional (MIKE21FM) que resuelve las ecuaciones de aguas someras y su calibración se llevará a cabo por medio de la comparación de los datos obtenidos en campo con los resultados numéricos obtenidos.

La utilización del MIKE21FM obedece a que este modelo ha sido desarrollado para ambientes costeros y estuarinos. Además, que el sistema de modelado ha sido diseñado también para ser aplicado a estudios de inundación. Así mismo, el modelo ha sido utilizado con éxito en diferentes zonas de estudio en la que las condiciones de los sistemas han sido bien reproducidas, un ejemplo de ello es la utilización del modelo durante la Segunda y Tercera Etapas del PHIT en las que se evaluó los procesos físicos en el Río González y Río Tonalá (Pedrozo-Acuña et al., 2009; Pedrozo-Acuña et al., 2010).

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO (MIKE21FM)

En este trabajo de investigación se utiliza el modelo numérico bidimensional conocido como MIKE21, desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute). Este modelo utiliza un mallado flexible. El MIKE21 se remonta al desarrollo de los años setenta y desde entonces ha sido continuamente mejorado y ampliado con nuevos módulos de proceso y características diferentes. A partir de 1999,

Capítulo 4 – Modelado numérico

DHI desarrolló transformación de un conjunto de códigos de investigación sobre una serie de productos (MIKE 21 y MIKE 3 FM), que fueron liberados como parte del desarrollo de software DHI 2002. En los últimos dos años, nuevos módulos y características se han añadido a la ampliación en el campo de la ingeniería costera, gestión ambiental y las inundaciones tierra adentro (DHI, 2009).

El modelo resuelve las ecuaciones verticalmente integradas para la conservación de masa, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad y densidad. De esta forma el modelo está basado en la solución de las ecuaciones incompresibles promediadas de Reynolds (RANS - Reynolds averaged Navier-Stokes equations), sujetas a aproximaciones de Boussinesq y de presión hidrostática.

Las aproximaciones de Boussinesq (1903) sugieren que se pueden despreciar las variaciones de densidad en el fluido excepto en el término de gravedad donde aparece el producto densidad y la gravedad.

Respecto a la suposición de presión hidrostática, el cálculo en el dominio es predominantemente horizontal lo que supone que las aceleraciones verticales son despreciables frente a la aceleración de la gravedad. Esta hipótesis se ha sido probada incluso en el caso de flujos propagándose sobre fondos con apreciables irregularidades (Koutitas, 1987), caso que se puede dar en un estuario, por ejemplo, al pasar el flujo de la zona de la canal a una zona somera que se está inundando por acción de la marea.

4.1.1. ECUACIONES DE GOBIERNO

4.1.1.1. CONTINUIDAD DE MASA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Si se integran estas ecuaciones en la profundidad ($h = \eta + d$) y se promedian en un período de tiempo en un sistema de coordenadas localizado en el nivel

Capítulo 4 – Modelado numérico

medio del mar, se obtienen las siguientes ecuaciones de continuidad de masa (1) y cantidad de movimiento (2) y (3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = & F\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_x S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} = & F\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} + \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hv_x S \end{aligned} \quad (3)$$

Donde t es el tiempo, x , y y z son las coordenadas cartesianas; η es la elevación de la superficie; h es la profundidad total; u , v y w son las componentes de velocidad en la dirección x , y y z . F , es el parámetro de coriolis; g es la aceleración por la gravedad, ρ_a es la presión atmosférica; ρ_0 es la densidad de referencia del agua S es la magnitud de la descarga. La barra superior indica un valor promediado en la vertical, en efecto, \bar{u} y \bar{v} son las velocidades promediadas en la vertical definidas por:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (4)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (5)$$

Donde A es la viscosidad de remolino horizontal, las variables se determinan:

$$H = \eta + h \quad (6)$$

$$S_{xx} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (7)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (8)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 \rho uv dz dt \quad (9)$$

Capítulo 4 – Modelado numérico

$$\eta = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \eta(x, y, t) dt \quad (10)$$

$$U = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, z, t) dt \quad (11)$$

$$V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, z, t) dt \quad (12)$$

Aplicando la teoría lineal de ondas, se obtiene las expresiones para los tensores de radiación de 2° orden:

$$S_{xx} = E(n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2}) \quad (13)$$

$$S_{yy} = E(n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2}) \quad (14)$$

$$S_{xy} = E \sin \theta \cos \theta \quad (15)$$

donde:

$$E = \frac{\rho g H_1^2}{8}, \quad n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right], \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (16)$$

Con lo cual los tensores de radiación en cada punto del dominio dependen de $(\mathbf{H}_1, \mathbf{T}, \theta, \mathbf{h})$. Las variables dependientes son $\eta, \mathbf{U}, \mathbf{V}$, que representan la elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia y las corrientes promediadas en la vertical en un período de tiempo en las direcciones \mathbf{x} e \mathbf{y} , respectivamente.

Otras variables descritas son: \mathbf{T} período del oleaje, \mathbf{SS}_{xx} tensor de radiación en la dirección \mathbf{x} , \mathbf{SS}_{yy} tensor de radiación en la dirección \mathbf{y} , \mathbf{E} energía del oleaje, \mathbf{k} número de onda, θ es el ángulo del vector de onda con el eje \mathbf{x} , \mathbf{P} presión total, H_1 altura de ola, \mathbf{g} aceleración de la gravedad, y ρ densidad del flujo.

4.1.1.2. TRANSPORTE DE TEMPERATURA Y SALINIDAD

Para describir el flujo se necesita las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad (1,2 y 3), promediadas en vertical, junto con una ecuación de

Capítulo 4 – Modelado numérico

estado que relacione estas ecuaciones con la densidad. Así los transportes de temperatura, T , y salinidad, s , siguen la ecuación general de transporte-difusión (17) y (18), y así:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (17)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (18)$$

donde D_v es el coeficiente de difusión turbulenta en la vertical. \hat{H} es un término fuente debido al intercambio de calor con la atmósfera. T_s y s_s son la temperatura y la salinidad de la fuente. F son los términos de difusión horizontal definidos por:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (19)$$

donde D_h es el coeficiente de difusión horizontal, que se calcula de la relación respectivamente:

$$D_h = \frac{A}{\sigma_k} \text{ y } D_h = \frac{V_r}{\sigma_\varepsilon} \quad (20)$$

donde σ_T es el número de Prandtl. σ_k y σ_ε son constantes empíricas. k es la energía cinética turbulenta por unidad de masa (TKE), y ε es la disipación de TKE. Para el modelo $k - \varepsilon$, las constantes empíricas pueden tomar valores de 1.0 para σ_k y 1.3 para σ_ε . En muchas aplicaciones se puede utilizar un número de Prandtl constante (ver Rodi, 1984). V_r es la viscosidad de remolino en la vertical que se calcula:

$$V_r = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21)$$

Tomando la constante empírica $c_\mu=0.09$, según las apreciaciones del modelo $k - \varepsilon$.

4.1.1.3. ESFUERZO EN EL FONDO

El esfuerzo de fondo está determinado por la ley de fricción cuadrática:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_o} = c_f u_b |\vec{u}_b| \quad \vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (22)$$

Donde c_f es el coeficiente de arrastre y $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ es la velocidad de flujo sobre el fondo. El coeficiente de arrastre puede ser determinado por el coeficiente de Chezy, C :

$$c_f = \frac{g}{C^2}$$

4.1.1.4. ESFUERZO DEL VIENTO

El esfuerzo en la superficie, para áreas no cubiertas por hielo, está determinado por los vientos, determinado por la relación:

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \vec{u}_w \quad \vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, c_d es el coeficiente de arrastre del aire, y $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$ es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie. La fricción de velocidad asociada con el esfuerzo en la superficie está dada por:

$$U_f = \sqrt{\frac{\rho_a c_d |\overline{u_w}|^2}{\rho_o}}$$

El coeficiente de arrastre puede ser un valor constante o depender de la velocidad del viento. La fórmula empírica propuesta por Wu (1980,1994) es utilizada para la parametrización del coeficiente de arrastre así:

$$c_f = \begin{cases} c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_{10} < w_a \\ c_b & w_a \leq w_{10} \leq w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases}$$

donde c_a , c_b , w_a , y w_b son los factores empíricos y w_{10} es la velocidad a 10 m sobre la superficie del agua. Los valores que se utilizan por defecto para los factores empíricos son $c_a = 1.255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2.425 \times 10^{-3}$, $w_a = 5$ m/s, y $w_b = 25$

Capítulo 4 – Modelado numérico

m/s. Estos valores generalmente aportan buenos resultados para mar abierto y son los utilizados por el modelo. Las mediciones de campo del coeficiente de arrastre colectadas sobre lagos indican que el coeficiente de arrastre es mayor para los datos de mar abierto. Para una descripción más detallada sobre el coeficiente de arrastre ver Geernaert y Plant (1990).

Una vez definido el marco teórico correspondiente, nos resta introducir la discretización del problema para su simulación numérica. Esto incluye la generación de la malla de cálculo, las condiciones de frontera definidas y el tamaño del dominio de cálculo. A continuación se realiza una descripción de los factores relevantes para la aplicación del modelo al cuerpo lagunar de Mecoacán.

4.2. MALLA DE MODELACIÓN

El modelo se adaptó al sistema lagunar de Mecoacán, utilizando una malla de elementos triangulares de resolución variable, otorgando el mayor detalle a la zona de la boca lagunar. La discretización espacial de las ecuaciones está basada en el método de volumen finito; y comprende a su vez la discretización numérica de las elevaciones y profundidades en la laguna. La Figura 4-1 presenta la malla de cálculo generada para nuestro caso de estudio, en la que se aprecia una resolución variable, con elementos de mayor resolución en la zona del canal del Bellote. Esta resolución fue definida con un área máxima de los elementos triangulares de 400 m^2 , la zona adyacente ubicada al sur de este estrecho se definió con elementos de área máxima de 625 m^2 , mientras que al interior del cuerpo lagunar se definieron áreas más grandes (de menor resolución) con elementos de máximo 1600 m^2 y 3600 m^2 en el centro de la laguna. La disposición de esta resolución variable en el sistema, fue razonada en el entendido de hacer más eficiente el cómputo de los escenarios para el área en consideración.

Los datos base para la generación de la malla provienen de las mediciones batimétricas realizadas en la zona y las elevaciones obtenidas por medio de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) referido al nivel medio del mar, y

Capítulo 4 – Modelado numérico

corregido con la revisión de fotografías satelitales y puntos de control tomados en la zona (Pedrozo-Acuña, et al. 2011). El MDE corresponde a los datos de radar de la NASA disponibles de forma gratuita conocidos como STRM (Shuttle Topography Radar Mission, ver Farr et al., 2007) con resolución horizontal de 30 m. La Figura 4-1 representa la composición de elevaciones/profundidades para el área de estudio.

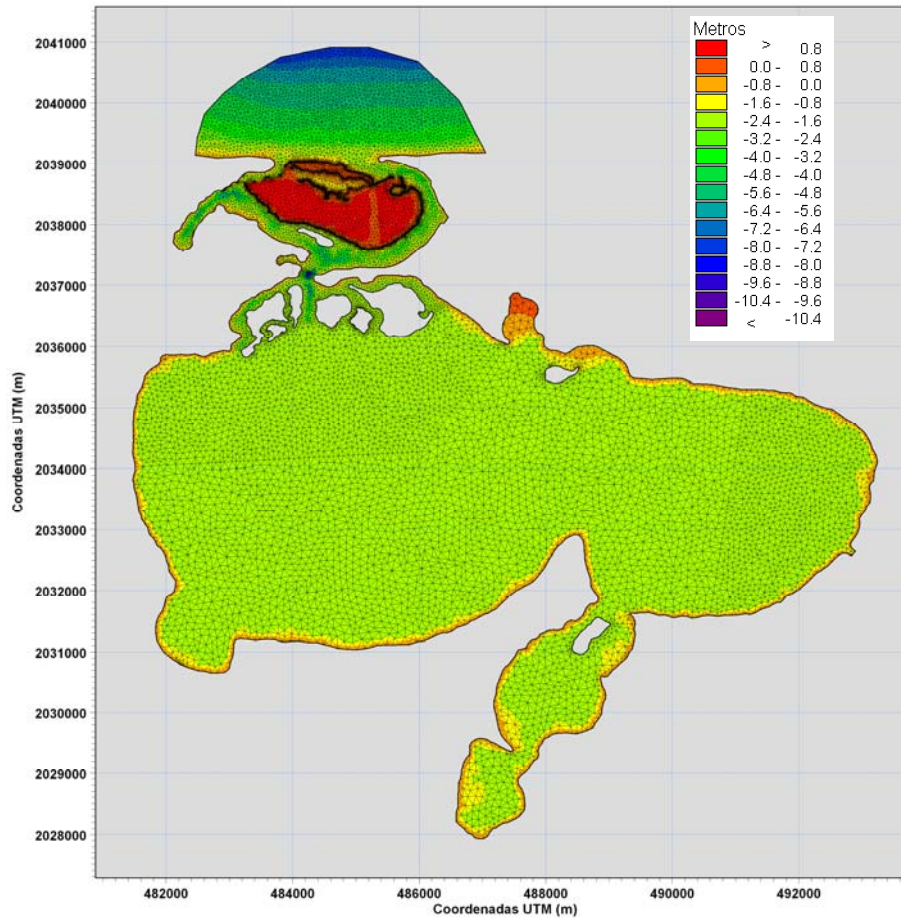


Figura 4-1 Malla con información de profundidades en la laguna de Mecoacán.

La selección de este MDE se dio como resultado de la comparación de diversas fuentes de información (con la misma resolución de 30m), tales como el MDE de INEGI y el de la agencia espacial de Japón, conocido como ASTERDEM, lográndose un mejor detalle con el modelo SRTM. Tal y como se aprecia en la Figura 4-1, en el dominio de cálculo se incluyó la zona correspondiente a la isla Andrés García, la cual es una región altamente

Capítulo 4 – Modelado numérico

vulnerable a inundaciones por marea de tormenta. La Figura 4-2 presenta un acercamiento a la zona de la boca lagunar, en el que se muestra el enmallado generado para cálculo de inundación en la isla y los datos base de batimetría y elevación utilizados en la interpolación de la malla.

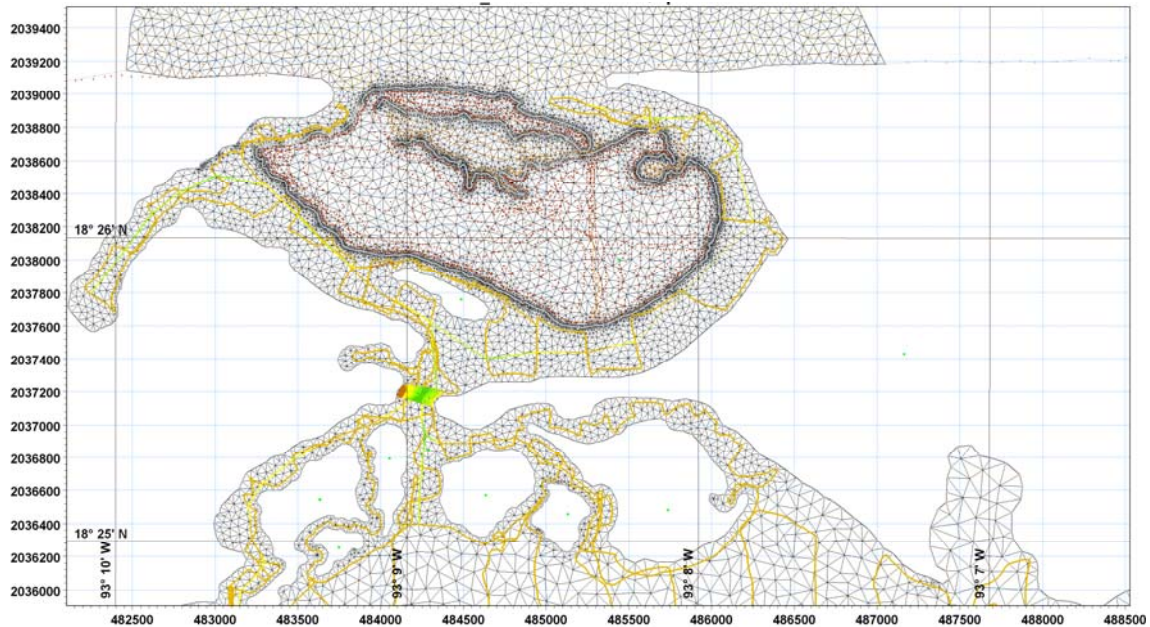


Figura 4-2 Malla triangular de cálculo en la boca con los transectos de batimetría. y datos de elevaciones. Ejes en Coordenadas UTM (m).

4.3. CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera utilizadas se muestran en la Figura 4-3, y representan:

1. Variación del nivel medio del mar frente a la boca lagunar (verde)
2. Gasto asociado al río Hondo al Este de la laguna (rojo)
3. Frontera Tierra (azul)

Las dos primeras están definidas por la marea, y el gasto de entrada en el río Hondo las cuales proporcionan las condiciones físicas que ejercen el forzamiento hidrodinámico de la laguna. A lo largo de las fronteras cerrada (fronteras de tierra) los flujos normales son forzados a cero para todas las

variables. Para las ecuaciones de cantidad de movimiento esto representa un decaimiento total a lo largo de las fronteras cerradas.

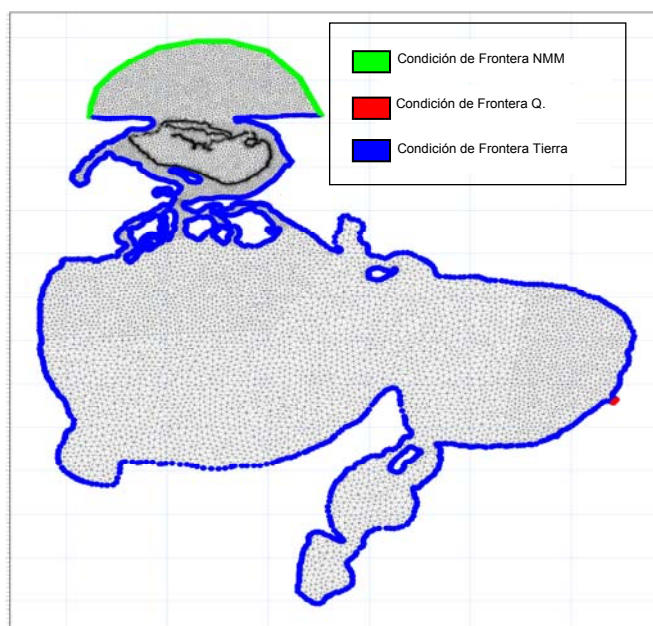


Figura 4-3 Condiciones de fronteras aplicadas al modelo numérico.

Para el caso de la frontera hacia el mar frente a la boca lagunar, se utiliza la variación del nivel medio del mar asociada a la marea astronómica para el mes de agosto, tomadas de las predicciones del CICESE, que corresponden a las fechas cuando se realizaron las mediciones. Respecto a la frontera que define al Río Hondo, ubicado al sureste de la laguna, se utilizó el gasto estimado a través de mediciones realizadas con el velocímetro acústico (ver sección 3.3) lo que definió un valor constante de $65.97 \text{ m}^3/\text{s}$ como condición de descarga.

4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

A continuación se presenta la comparación de los resultados numéricos con las mediciones recabadas durante la campaña de campo realizada en la laguna de Mecoacán. El reproducir las condiciones normales medidas en Agosto de 2009 da confiabilidad a la generación de escenarios y sus posibles consecuencias con la herramienta numérica utilizada.

Capítulo 4 – Modelado numérico

En particular, se comparan las mediciones de gasto medidas en la sección transversal ubicada en el estrecho del Bellote durante un ciclo de marea. Antes de iniciar la simulación de las condiciones medidas se definieron los parámetros empíricos dentro del modelo numérico, proceso conocido como calibración, La Tabla 4-1 presenta los parámetros generales y los valores que se asignaron, cabe mencionar que en la medida de lo posible se intentó que estos parámetros tuvieran una referencia a la realidad, para lo cual se utilizaron ambos, datos de campo e información de la estación climatológica de Paraíso, Tabasco.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIÓN
Viscosidad	0.28 Pa-s	Viscosidad turbulenta
Resistencia al rozamiento	32 (m ^{1/3})/s	Numero de Manning
Velocidad del Viento	5 (m/s)	Reportado
Temperatura	Variable (max 36°C-min 28°C)	Datos de Campo
Temperatura Aire	Variable (max 32°C-min 26°C)	Reportado
Humedad Relativa	90%	Reportado
Coeficiente de nubosidad	50%	Reportado

Tabla 1 Parámetros de Modelación.

La Figura 4-4 presenta la comparación del gasto medido en el estrecho del Bellote (línea discontinua) con el gasto obtenido en la misma sección por medio del modelo numérico (línea continua), en la que se puede apreciar un ajuste adecuado de los resultados del modelo a los datos de campo (Coef. Correlación = 0.90). Este resultado da confianza en los resultados numéricos, dado que las condiciones normales medidas han sido reproducidas a satisfacción. Con esto se abre la puerta a la utilización del modelo numérico para la evaluación de ambos, la incidencia de escenarios extremos sobre el sistema y el riesgo asociado de inundación en la isla Andrés García.

El coeficiente de correlación de los datos del modelo y los medidos en campo se calculó comparando los datos de campo, por intermedio de su ubicación por coordenadas en el modelo, por lo cual se pudo estimar el grado de relación del modelo a las condiciones encontradas. Esta Relación se puede ver para los

Capítulo 4 – Modelado numérico

distintos parámetros analizados en este trabajo (salinidad, temperatura y densidad), los cuales se describen en las secciones siguientes.

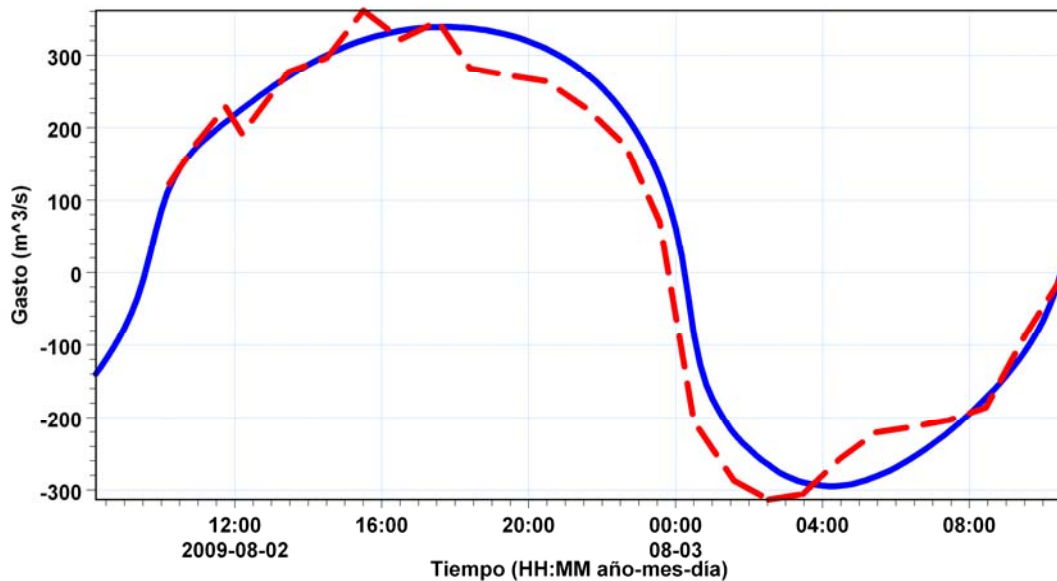


Figura 4-4 Validación; comparación de gasto en la boca Modelo vs medición.

En la secuencia de instantes (Anexo 1) se puede inferir el flujo y reflujo de la marea en la Boca con los vectores de dirección del flujo. Igualmente se detalla la marcada diferencia de vectores del río Hondo y la marea con los vectores mucho más pequeños de la laguna, diferencia que confirma la poca dinámica de la laguna. En la figura 4-5 se muestran un instante de modelación donde se presentan los vectores de velocidad del flujo en la laguna con referencia a la boca lagunar, valores negativos representan flujos de entrada y valores positivos para flujos de salida, mientras que el Anexo 1 de este trabajo incluye todos los instantes de simulación hidrodinámica de la laguna bajo las condiciones de forzamiento medidas en campo.

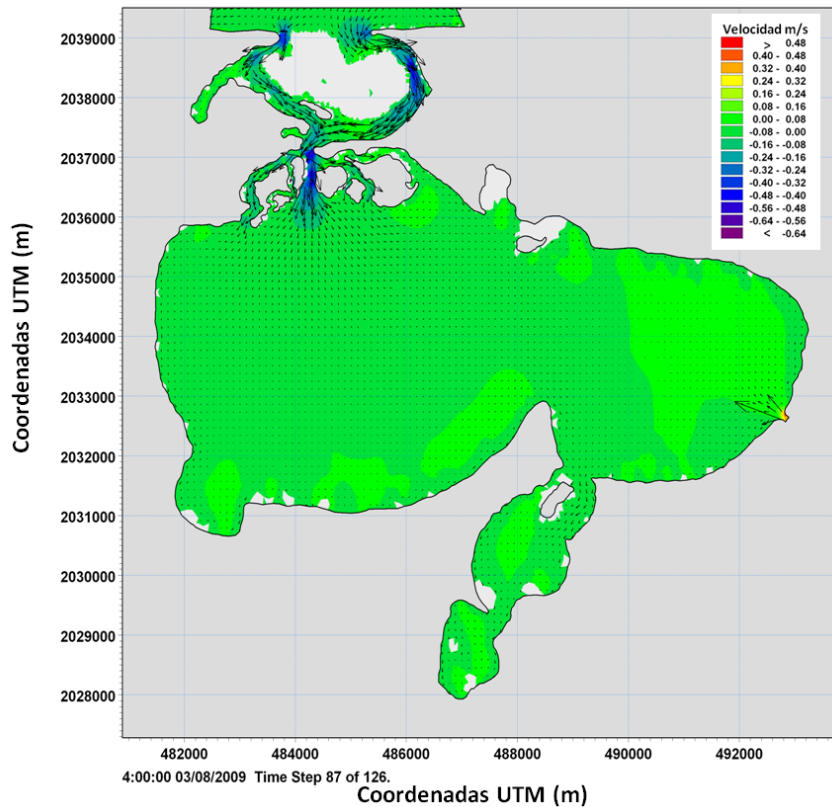


Figura 4-5 Instante de Modelación en Pleamar.

4.4.1. SALINIDAD

Adicionalmente, el proceso de validación en este trabajo incorpora la comparación de los resultados numéricos con las mediciones de campo respecto a los valores medidos de salinidad temperatura y densidad. Para ello se requirió la definición en el modelo numérico de condiciones iniciales y de frontera para estos tres parámetros.

Con base en las mediciones de campo, se definieron valores para la frontera asociada al nivel del mar, tal que la salinidad de entrada fue de 36 ups y la temperatura del agua en la frontera de 24 °C. Así mismo, para la condición de descarga asociada al Río Hondo se definieron valores de 0 ups para la salinidad y 29°C de temperatura. La temperatura y salinidad inicial dentro de la parte central de la laguna, se determinaron con promedios de las condiciones medidas en todo el cuerpo lagunar tal que la temperatura de inicio fue de 26° y la salinidad de 20 ups homogéneas en todo el cuerpo lagunar.

Capítulo 4 – Modelado numérico

La Figura 4-6 presenta resultados de salinidad medidos en la superficie durante la campaña de campo (derecha) y los resultados obtenidos de la simulación numérica (izquierda) después de XX ciclos de marea. En general, se observa que el patrón de distribución de la salinidad ha sido bien reproducido por el modelo numérico (Coef. Correlación = 0.72), aunque se identifican pequeñas diferencias en la parte central de la laguna. Estas diferencias están adscritas a que el modelo es promediado en la vertical, mientras que en la realidad pueden tener cierta influencia la circulación termohalina en la laguna. Sin embargo, la poca profundidad que caracteriza a este cuerpo lagunar, permite la utilización de un modelo de esta naturaleza. En particular, el patrón de salinidad encontrado en la boca lagunar y en la parte Este de la laguna es bien reproducido por el modelo numérico, lo que indica que su dinámica está gobernada principalmente por las mareas y el aporte del río. Otro aspecto que debe considerarse al comparar las Figuras en 4-6, es que las mediciones se realizaron a lo largo de dos días, lo que agrega variabilidad ficticia a los patrones de salinidad.

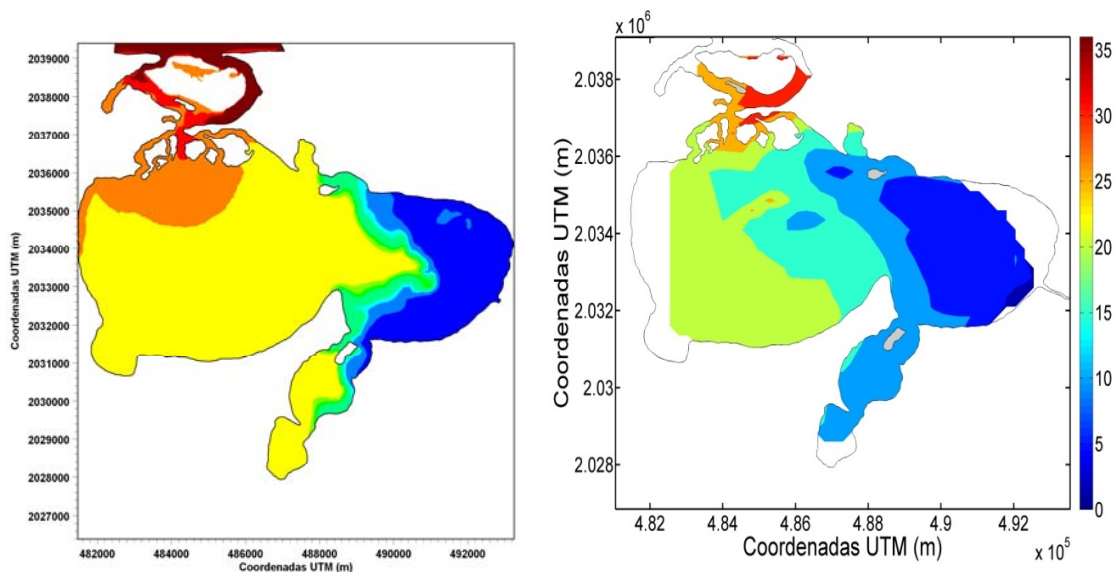


Figura 4-6 Comparación de salinidad (UPS) del modelo numérico vs datos de campo.

4.4.2. TEMPERATURA Y DENSIDAD

En el caso de la comparación de los resultados numéricos con los medidos en campo, se consideraron las variaciones diarias de temperatura debido al día y

Capítulo 4 – Modelado numérico

la noche (radiación solar). Los intervalos de variación diaria de la temperatura fueron definidos entre un rango de 33°C y 27 °C de acuerdo a las condiciones registradas durante la campaña de campo.

La Figura 4-7 ilustra la comparación de los resultados de temperatura en el cuerpo lagunar obtenidos con el modelo numérico (panel derecho) y los datos de campo (panel izquierdo). En este caso, se aprecia un buen ajuste general de los resultados del modelo numérico a las condiciones medidas (Coef. Correlación = 0.77). El ajuste es mejor en aquellas zonas cercanas a las condiciones de entrada y salida del sistema (boca lagunar y Río Hondo). Mientras que las condiciones al interior de la laguna no son tan bien descritas. A pesar de estas diferencias al interior del cuerpo lagunar, se puede decir que éstas son mínimas ya que los valores de temperatura medida en esta región de la laguna es de 28°C medida y la modelada de 29.5°.

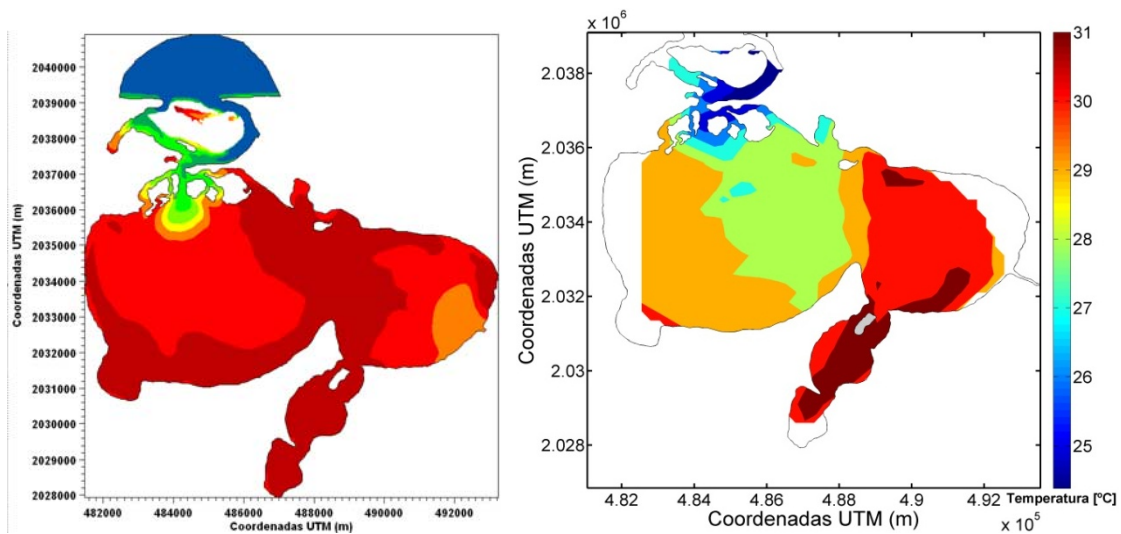


Figura 4-7 de Temperatura modelo numérico vs datos campaña de campo.

Adicionalmente, la Figura 4-8 presenta la comparación de los resultados de la distribución de densidad en la laguna medida y modelada. Nuevamente, se observa un acercamiento del modelo numérico a las condiciones observadas en las regiones cercanas a la boca lagunar y la descarga del Río Hondo (Coef.

Capítulo 4 – Modelado numérico

Correlación = 0.82). Se confirma a su vez que los gradientes de salinidad prevalecen a la temperatura en la densidad del cuerpo lagunar. Estos resultados confirman que cerca de la entrada de agua dulce y agua salada al sistema, el comportamiento de los factores termohalinos es uniforme, lo que permite el uso de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones para la caracterización hidrodinámica del sistema.

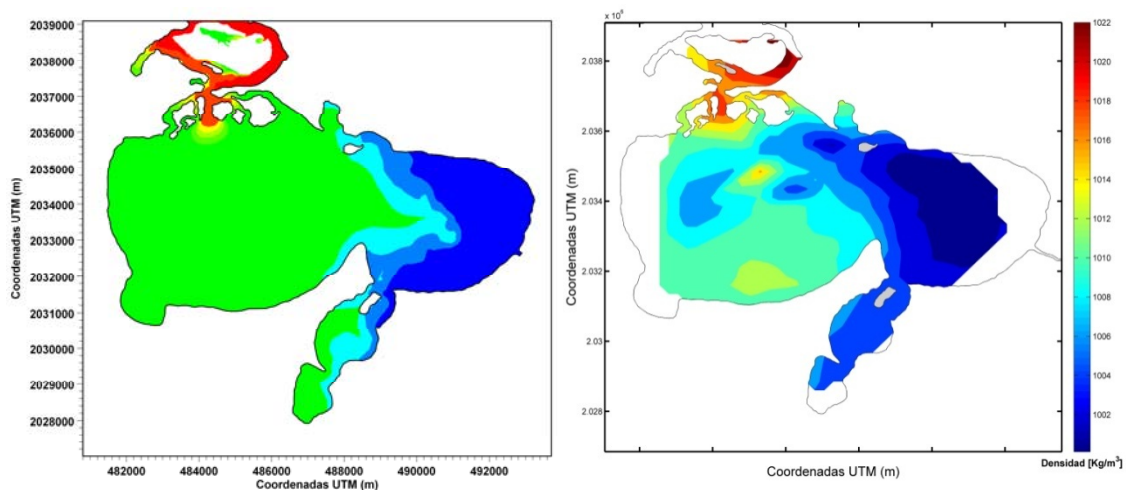


Figura 4-8 Resultados de densidad Laguna de Mecoacán. Modelo Vs medición.

Este modelo desarrolla la hidrodinámica del sistema sin tomar en consideración los cambios en la morfología de la laguna, los cuales podrían variar la configuración normal de los flujos en forzamientos extremos, por ejemplo con los cambios en la profundidad. De cualquier forma el modelo aporta suficiente información para estudios de hidrodinámicos y de intrusión salina en condiciones hipotéticas de forzamiento.

En consecuencia la calibración del modelo numérico que se presentó en este capítulo, permite utilizar la herramienta numérica para evaluar posibles escenarios de operación extrema del sistema lagunar de Mecoacán.

CAPÍTULO 5

**DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA –
MODELACIÓN DE ESCENARIOS**

5. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA – MODELACIÓN DE ESCENARIOS

En este capítulo se presentan las condiciones hidrodinámicas del sistema Lagunar de Mecoacán bajo diferentes condiciones extremas de forzamiento. De acuerdo a las mediciones de campo, el periodo de modelación considerado para todos los casos se define a partir del 1 de Agosto de 2009 a las 00:00 horas hasta el 03 de Agosto a las 11:30 a.m.

Para todos los escenarios modelados, los resultados del impacto de las condiciones de forzamiento simuladas se presentan en tres categorías corrientes y circulación, salinidad, temperatura y densidad en al interior de la laguna. Además se incorpora un análisis del impacto general del evento modelado.

Debido al historial de inundaciones costeras registradas en la isla Andrés García, se hace énfasis en los resultados obtenidos para esta región. Los escenarios estudiados consideran tres condiciones de forzamiento extraordinario: a) marea de tormenta, b) gasto extraordinario en el río Hondo y c) viento extraordinario. Además, con el propósito de completar el diagnóstico, se propone el análisis de una condición simultánea de marea de tormenta y gasto extraordinario en el Río Hondo. Para simplificar la discusión de los efectos de estos escenarios no se incluyen en este capítulo todos los instantes de modelación obtenidos, los cuales pueden ser consultados en el Anexo 1 de esta tesis.

5.1. PREDOMINANCIA DE MAREA DE TORMENTA

La incorporación de un escenario de marea de tormenta se debe a la alta exposición de la vertiente del Golfo de México (donde se encuentra la laguna

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

de Mecoacán) ante la incidencia de ciclones tropicales. Estos fenómenos meteorológicos traen consigo vientos mayores a 62 km/h y en los casos de huracán de más de 118km/h, además de lluvias de gran intensidad que propician el incremento de los caudales en los escurrimientos naturales. La marea de tormenta representa el riesgo natural más común asociado al oleaje, y al viento; esta consiste en la elevación temporal de la superficie libre del mar debido al forzamiento de vientos extremos y al efecto de barómetro inverso que se produce entre el centro de la tormenta y su región externa. El efecto rotatorio de un ciclón causa una componente de viento la cual provoca empuje de masa de agua a la tierra; la baja presión en el centro de un ciclón y la presión atmosférica fuera del mismo sistema, generan un gradiente de presiones que se equilibra con el incremento de la superficie libre del agua.

Además de los efectos de marea de tormenta se debe tomar en cuenta la variación del nivel medio del mar por marea astronómica, y el efecto de la sobre-elevación generada por oleaje rompiente, procesos que se suman al efecto antes mencionado. Para la zona, las condiciones de marea de tormenta asociadas a un huracán clase 1, de acuerdo con la clasificación propuesta por Smith y Ward (1998), es de 1.5m. Este valor se selecciona con base en los antecedentes históricos de incidencia de ciclones tropicales sobre las costas de Tabasco. De acuerdo con el análisis de peligrosidad por marea de tormenta presentado por Duran (2010). Así, por su condición extrema la sobre-elevación de 1.5m considera un forzamiento límite sobre el sistema.

El periodo de modelación comprende tres días de incidencia del forzamiento extraordinario tal y como se observa en la Figura 5-1, en donde se aprecia el forzamiento generado por la marea astronómica normal (línea azul) y suma a este registro de la presencia de una marea de tormenta extraordinaria (línea roja).

En esta simulación, se define la condición de viento y gasto en el Río Hondo a través de los valores reportados bajo condiciones de normales en la región, es decir, con una velocidad constante de 5 m/s proveniente del Norte para el viento y un gasto en el río de 65.97 m³/s.

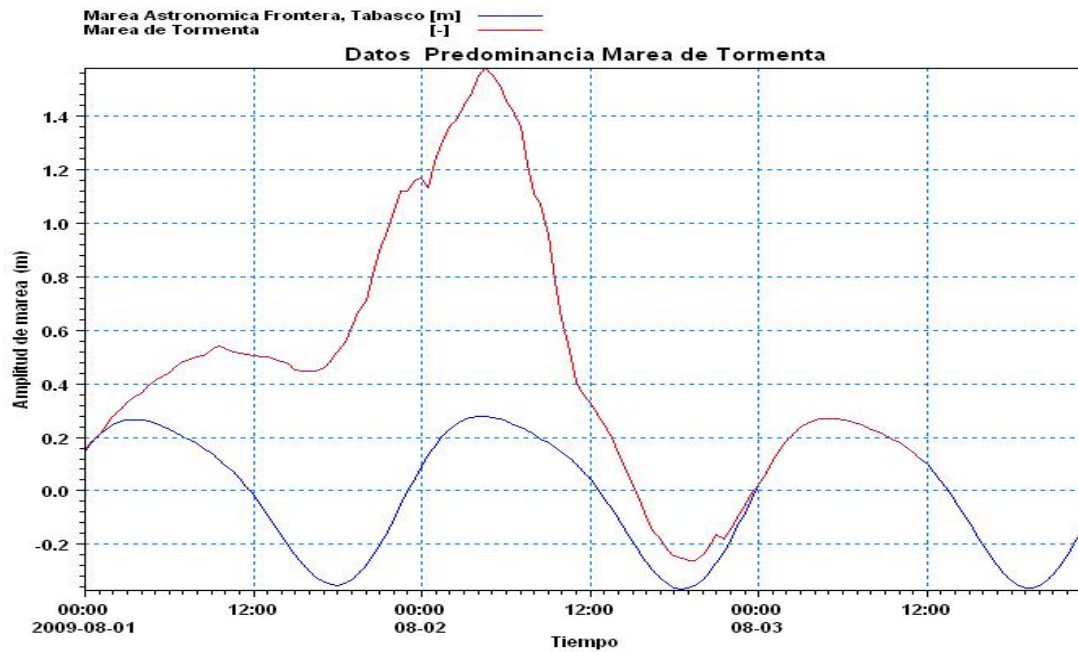


Figura 5-1 Forzamiento de marea astronómica y de tormenta.

5.1.1. CORRIENTES – CIRCULACIÓN

Al incrementar el nivel medio del mar por la presencia de la marea de tormenta sobre la boca lagunar, se induce de forma natural un forzamiento del flujo hacia adentro de la laguna. La Figura 5-2 muestra dos instantes de modelación clave, el panel superior corresponde al inicio del forzamiento y el panel inferior representa el momento de máxima sobre-elevación sobre la boca lagunar, cuando el nivel medio del mar alcanza 1.5 m de elevación. En el panel superior, se aprecia que el brazo Este de la boca es el más eficiente pues se observan velocidades más intensas. Por otra parte, en el panel inferior se identifica muy claramente que bajo estas condiciones se produciría un evento de inundación severo sobre la isla Andrés García. En el resto de instantes de simulación del evento (incluida en el Anexo 1) se observa que rumbo al final de la simulación, el flujo se mantiene con dirección hacia el océano, y la superficie inundada se reduce, indicando que el sistema se recupera después de la incidencia del evento. Sin embargo, los resultados confirman la alta vulnerabilidad de la zona ante estos eventos hidrometeorológicos extremos.

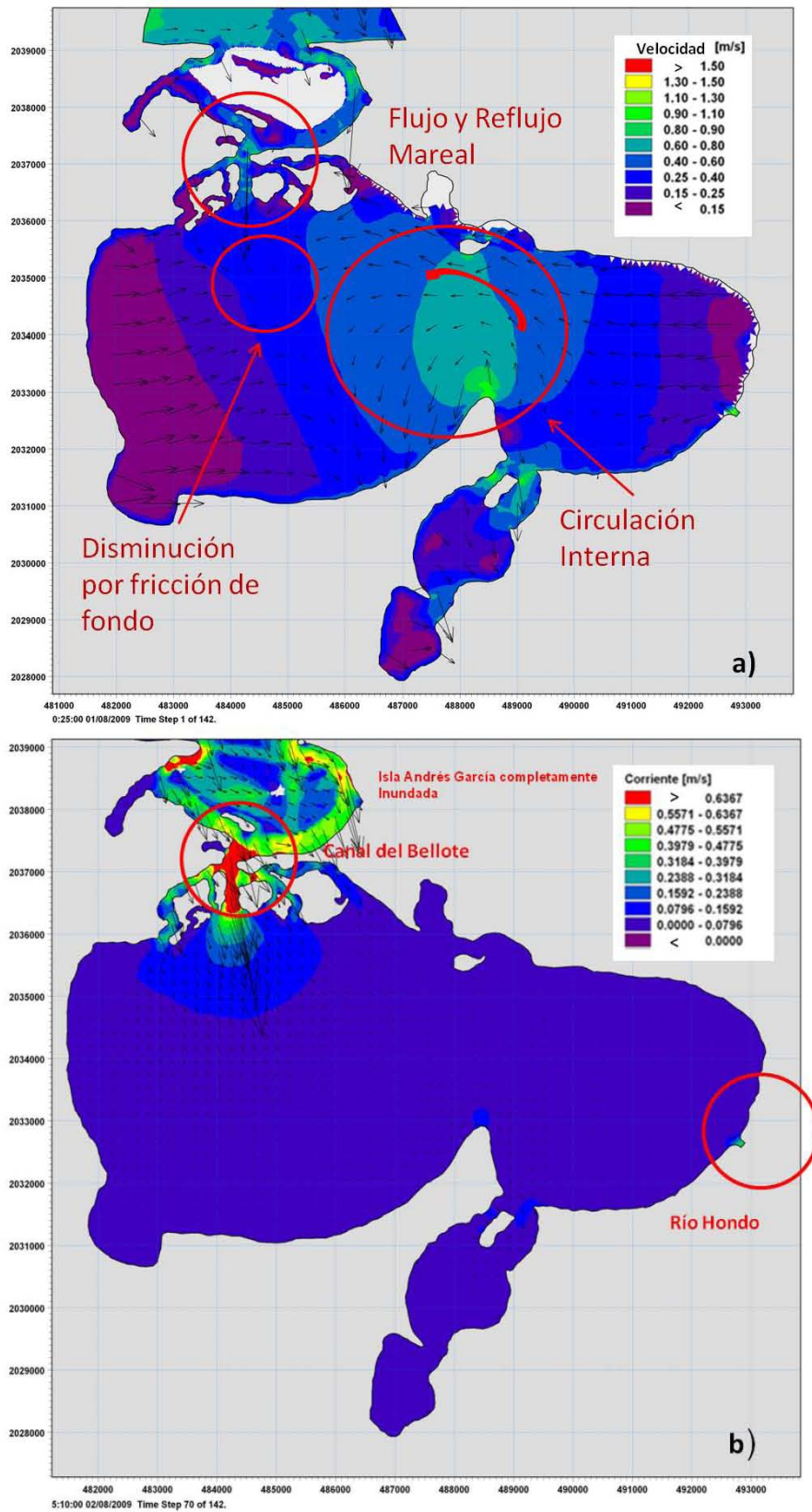


Figura 5-2 Momentos de modelación. Momentos de modelación inicial (a) y máximos de gasto en la Boca lagunar (b). Para marea de tormenta.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

La Figura 5-3 muestra las velocidades y gastos en la boca, comparadas con las mediciones de campo, donde se aprecia velocidades que sobrepasan los 1.2 m/s.

Las velocidades de flujo se incrementan a medida que el tiempo del forzamiento se acerca y se aleja del pico máximo (flujo y reflujo), lo que incurriría en un transporte de sedimento más eficiente que las condiciones normales del sistema, principalmente en la boca (ver figura 5.3). En consecuencia estas velocidades realizarían cambios batimétricos o morfológicos que el modelo no reproduce por ser propiamente un modelo hidrodinámico y por la condición de frontera cerrada planteada.

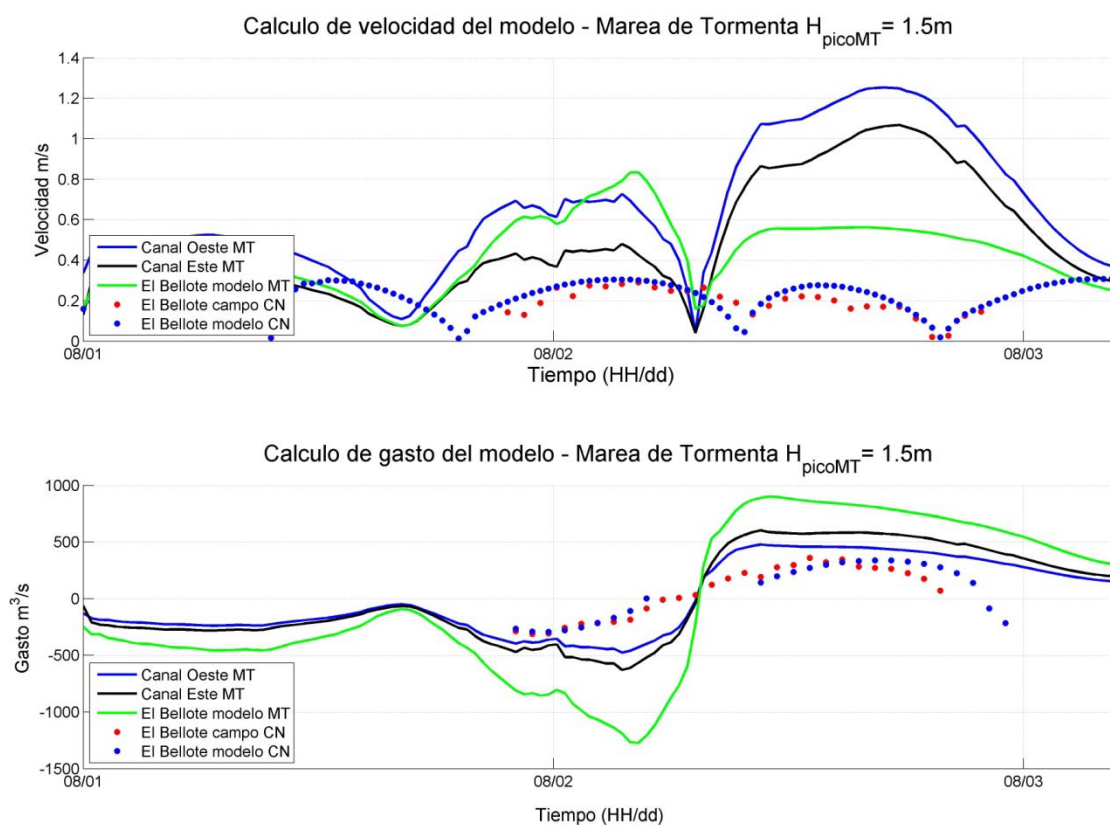


Figura 5-3 Velocidad y Gasto para condiciones de marea de tormenta (MT) y condiciones normales (CN).

5.1.2. SALINIDAD

La evaluación de los escenarios extremos también consideró la distribución de la salinidad al interior de la laguna. Para definir las condiciones iniciales de estos escenarios, se utilizaron las condiciones encontradas por el modelo numérico en condiciones normales de operación.

La Figura 5-4 ilustra los tres momentos más representativos de la modelación. El panel izquierdo muestra las condiciones iniciales del sistema, el panel derecho presenta el momento máximo de sobre-elevación del nivel del mar en la boca y el panel inferior corresponde a la parte final de la incidencia del evento extremo, en el que el sistema sigue su curso normal de funcionamiento.

Desde el primer momento de la modelación, se aprecia un aporte salino importante por parte de la entrada de la marea al cuerpo lagunar, lo que tiene un impacto notable en los niveles de salinidad al interior de la laguna. Cuando la sobre-elevación alcanza su máximo nivel, el agua salina cubre una parte importante de la laguna señalada por los valores de salinidad mayores a 32 ups. Mientras el evento llega a su fin y comienza la fase de bajamar, la masa de agua salada retrocede y el sistema recobra sus condiciones normales de salinidad. Se aprecia una zona de mezclado importante en donde la entrada de agua salada interacciona con el agua dulce del río Hondo, favoreciendo la presencia de agua salobre en la parte este de la laguna.

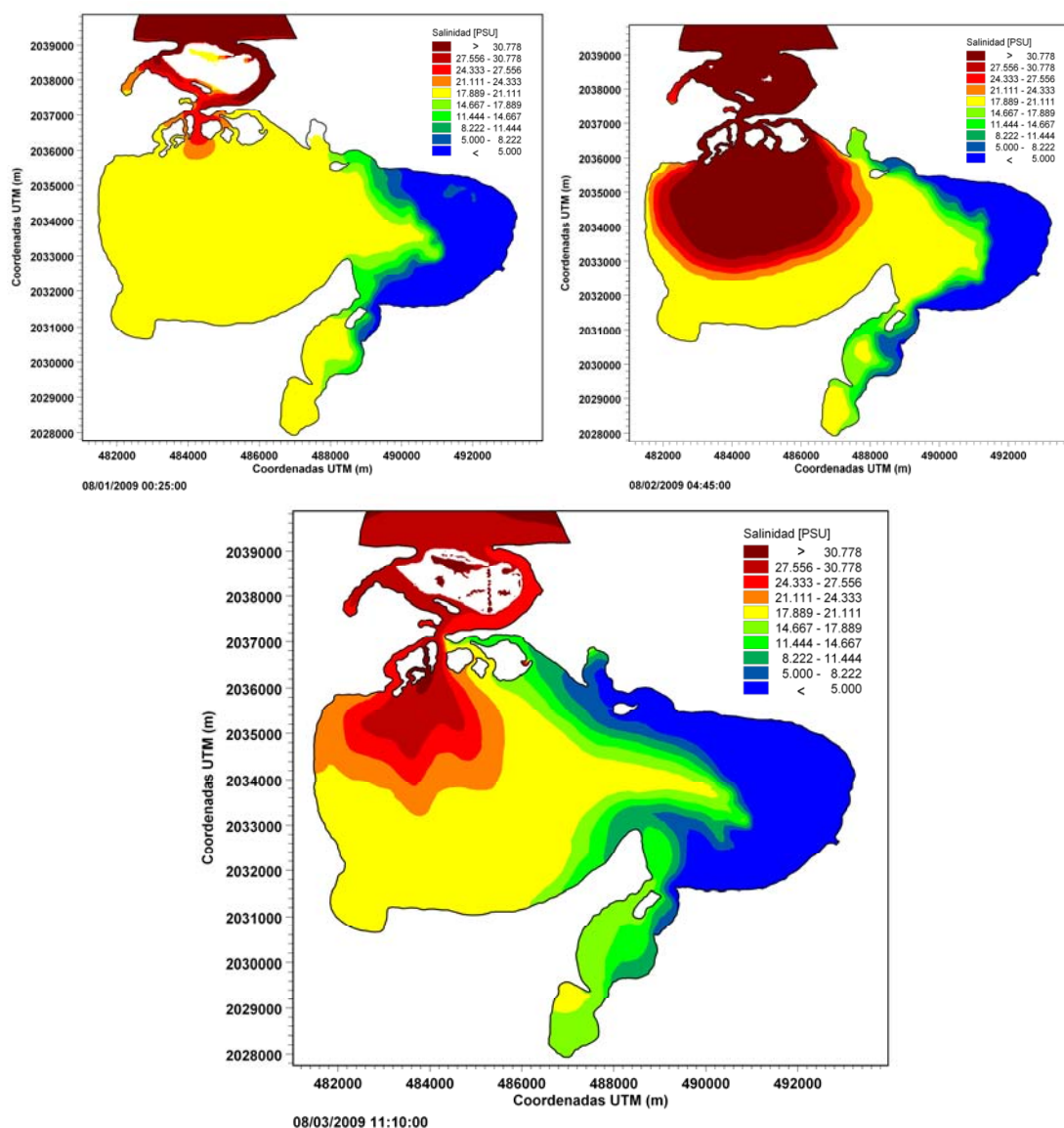


Figura 5-4 Momentos de modelación de Salinidad para condición de marea de tormenta. Inicial (panel izquierdo), máximo de forzamiento (panel derecho) y final (panel inferior) de la salinidad.

5.1.3. TEMPERATURA

Respecto al cambio en la distribución de la temperatura al interior de la laguna bajo la incidencia de una marea de tormenta extrema. Su efecto principal está asociado al predominio de agua más fría proveniente del mar y su interacción con las aguas más templadas al interior de la laguna. La Figura 5-5 muestra los momentos de modelación de tal suerte que el panel izquierdo ilustra las condiciones iniciales del sistema, el panel derecho presenta el momento

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

máximo de sobre-elevación del nivel del mar hacia la laguna y el panel inferior muestra el final del evento con el sistema rumbo a su curso normal de operación. Es evidente que al incrementarse la circulación y velocidades por la presencia de la sobre-elevación del nivel del mar, las temperaturas en la boca y parte del oeste de la laguna llegan a 24 °C. Sin embargo, el sistema se recupera rápidamente, indicando que los efectos en el cambio de la temperatura lagunar no se mantienen al terminar el forzamiento sobre el cuerpo lagunar.

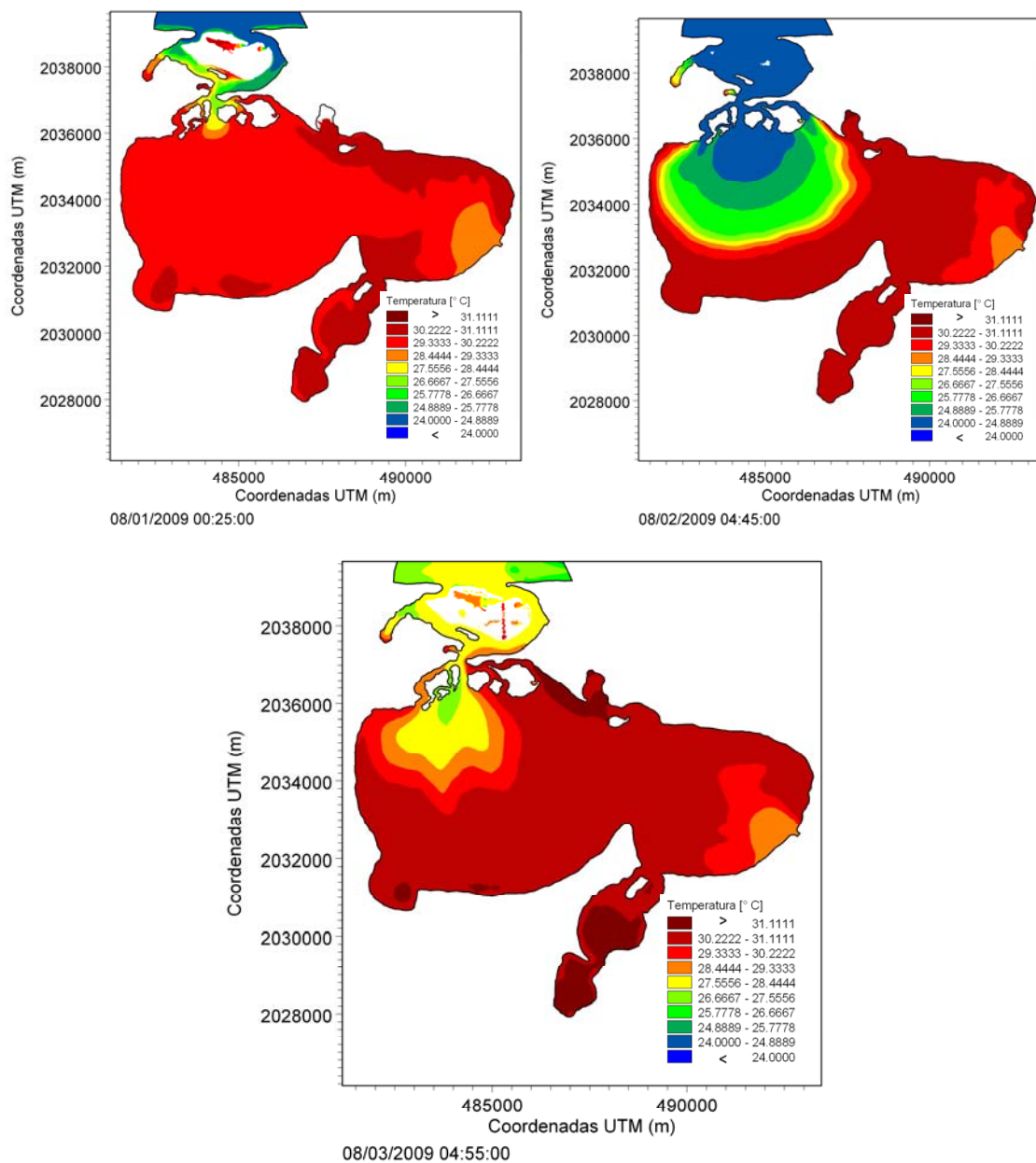


Figura 5-5 Momentos de modelación. Temperatura marea de tormenta. Momentos de modelación inicial, máximo de forzamiento y final de la temperatura.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

La Figura 5-6 presenta los resultados (inicial y final) de distribución de densidad al interior del cuerpo lagunar durante la incidencia de este evento extremo. En concordancia con los resultados de salinidad y temperatura, la densidad al interior del cuerpo lagunar es modificada durante la incidencia de la máxima sobre-elevación del nivel del mar, pero el sistema tiende a recuperarse al pasar el evento.

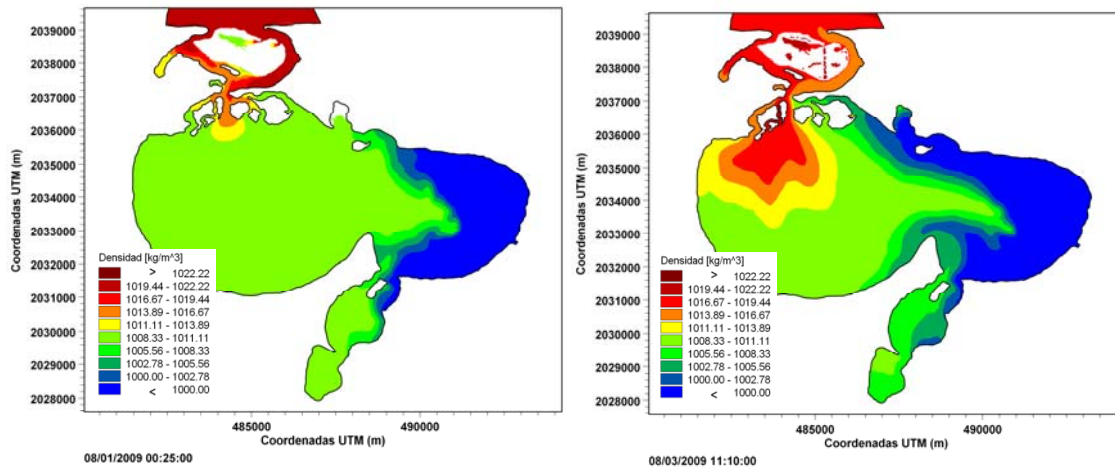


Figura 5-6 Comparación inicial y final de densidad. Marea de Tormenta.

5.1.4. IMPACTO HIDRÁULICO BAJO MAREA DE TORMENTA EXTREMA.

Con base en los resultados anteriores, se puede concluir que el impacto más sobresaliente bajo estas condiciones de operación, se presenta en la Isla Andrés García por la generación de un evento de inundación. En los primeros instantes del evento no se aprecia ningún evento de inundación asociado, la sobre elevación del nivel medio del mar es de ~0.5m (marea astronómica). Sin embargo, en el siguiente instante de simulación cuando la sobre-elevación ha alcanzado una cota de 1m, la inundación en la zona frontal de la isla es evidente. El evento de inundación total de la Isla Andrés García, es claramente ilustrado en el panel del tiempo en el que el nivel del mar ha alcanzado el pico (~1.5m). La Isla Andrés García es una barrera natural que geológicamente se ha formado por la incidencia de los ríos y los factores marinos de la zona, esta configuración puede ser modificada en su forma por un evento como el expuesto en esta investigación.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

De acuerdo a lo observado bajo estas condiciones de forzamiento, es posible que cuando el nivel medio del mar presenta una sobre-elevación significativa, el flujo del río Hondo se detenga o incluso se revierta.

Por otra parte, la significativa intrusión salina que se produce como resultado de la entrada de la marea de tormenta en el sistema tiene un impacto significativo en el cambio de salinidad en la zona oeste de la laguna. Sin embargo, la alteración de la salinidad del cuerpo lagunar se reduce una vez pasado el evento, lo que indica que el sistema se recupera después de la incidencia del forzamiento extraordinario de esta naturaleza.

5.2. PREDOMINANCIA DE CAUDALES FLUVIALES

Las descargas de agua dulce a través de afluentes en lagunas costeras, son frecuentes e importantes por que generan un equilibrio en el contenido de sal existente dentro del cuerpo lagunar. La mayor parte de las veces, el intercambio y mezcla de agua salada y dulce favorece la generación de un hábitat únicos, en los que sólo pueden existir algunas especies capaces de soportar las condiciones generadas dentro de estos ambientes costeros.

Dentro del Plan Hídrico Integral de Tabasco, se considera como una opción de alivio al problema de inundaciones, el uso de las lagunas costeras como zona de amortiguamiento de avenidas extraordinarias. En principio, la idea fundamental estriba en la derivación de los caudales extraordinarios que transitan por los ríos hacia los cuerpos lagunares de tal suerte que gran parte del volumen excedente de agua pueda ser almacenado en estos reservorios naturales.

Con el propósito de evaluar los impactos en los regímenes de salinidad de la derivación de gastos extraordinarios hacia la laguna de Mecoacán, este trabajo de investigación considera la simulación de gastos extraordinarios a través del río Hondo ubicado al sureste de este cuerpo lagunar. Como se presentó en un capítulo anterior, el Río Hondo realiza el aporte más influyente de agua dulce al interior de la laguna de Mecoacán. Además, este río representa la conexión

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

entre el sistema de la desembocadura del río González, su llanura de inundación y el cuerpo lagunar de Mecoacán. Esta conexión tiene una anchura de aproximadamente 40m con profundidades menores a 1.5m (ver sección 3.3).

El caudal seleccionado para la modelación fue determinado a partir de las velocidades posibles que se presentarían en el Río Hondo, considerando las dimensiones del mismo. En consecuencia, se utilizó un gasto de 380 m³/s, 6 veces mayor al encontrado en las mediciones en sitio.

Al igual que en el caso anterior, el periodo de modelación está definido a partir del 1 de Agosto de 2009 a las 00:00 horas hasta el 03 de Agosto a las 11:30 a.m. En este caso, se utilizan las condiciones de marea astronómica para la boca lagunar (sin sobre-elevación por la presencia de marea de tormenta). Adicionalmente, se define la condición de viento por medio de los valores reportados bajo condiciones de normales en la región, con velocidad constante de 5m/s proveniente del Norte.

5.2.1. CORRIENTES – CIRCULACIÓN

La Figura 5-7 presenta tres instantes de modelación asociados al evento de gastos extraordinarios en el Río Hondo, al inicio (panel izquierdo), a la mitad (panel derecho) y al final del evento modelado. A pesar de que el río lleva un caudal considerablemente mayor al normal (6 veces), no se presenta en ninguna zona del sistema, algún cambio considerable en la hidrodinámica. De igual forma, en la zona de la Isla Andrés García no se presenta evento de inundación asociado a este evento. Este hecho, confirma por un lado la capacidad de regulación de gastos de este cuerpo lagunar.

Las velocidades máximas se encuentran en el sitio de descarga del río Hondo y en la zona de la boca lagunar. En la Figura 5-8 se muestran las velocidades y el gasto en la de la boca comparada con las mediciones de campo en condiciones normales, lo que demuestra que el flujo en el sistema aumenta y

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

se mantiene en una sola dirección, cambiando el patrón de corrientes observado en condiciones normales de operación.

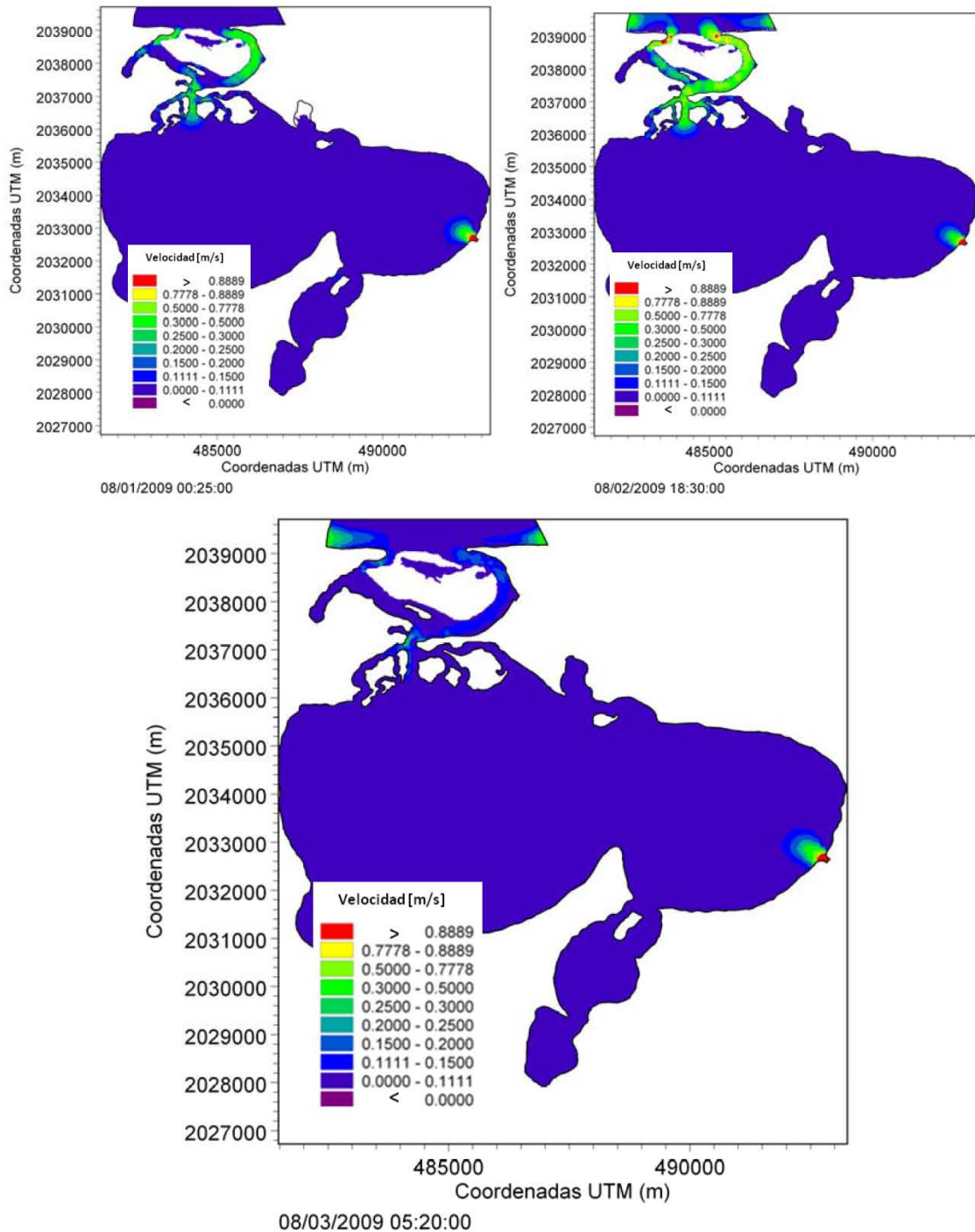


Figura 5-7 Momentos de modelación inicial, máximo de forzamiento (bajamar) y final (pleamar) de la laguna para Gasto Extraordinario.

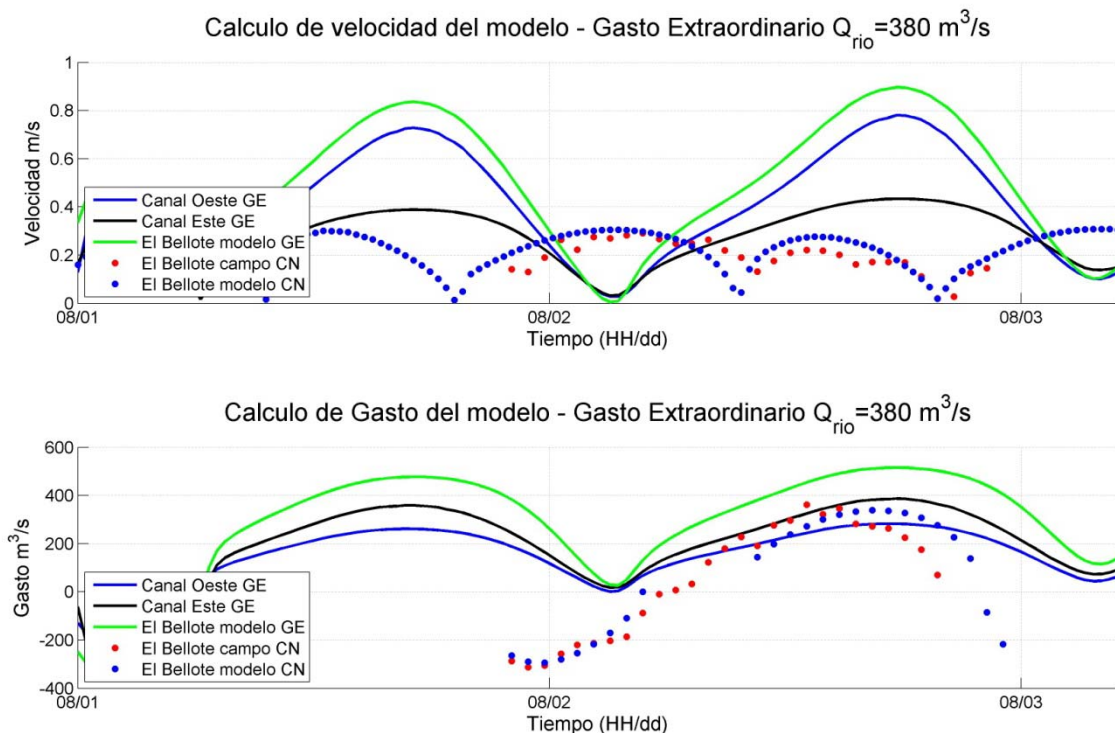


Figura 5-8 Velocidad y Gasto para modelación de Gasto Extraordinario (GE) condiciones normales (CN).

5.2.2. SALINIDAD

Debido al considerable incremento del caudal en el río Hondo, es de esperarse que la salinidad al interior de la laguna se modifique. La Figura 5-9 presenta los resultados de salinidad para los mismos instantes de circulación, en los que efectivamente se aprecia un cambio significativo en la salinidad de la mayor parte del cuerpo lagunar. Inclusive, se observan valores por debajo de 4 ups en gran parte del cuerpo lagunar rumbo al final del evento.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

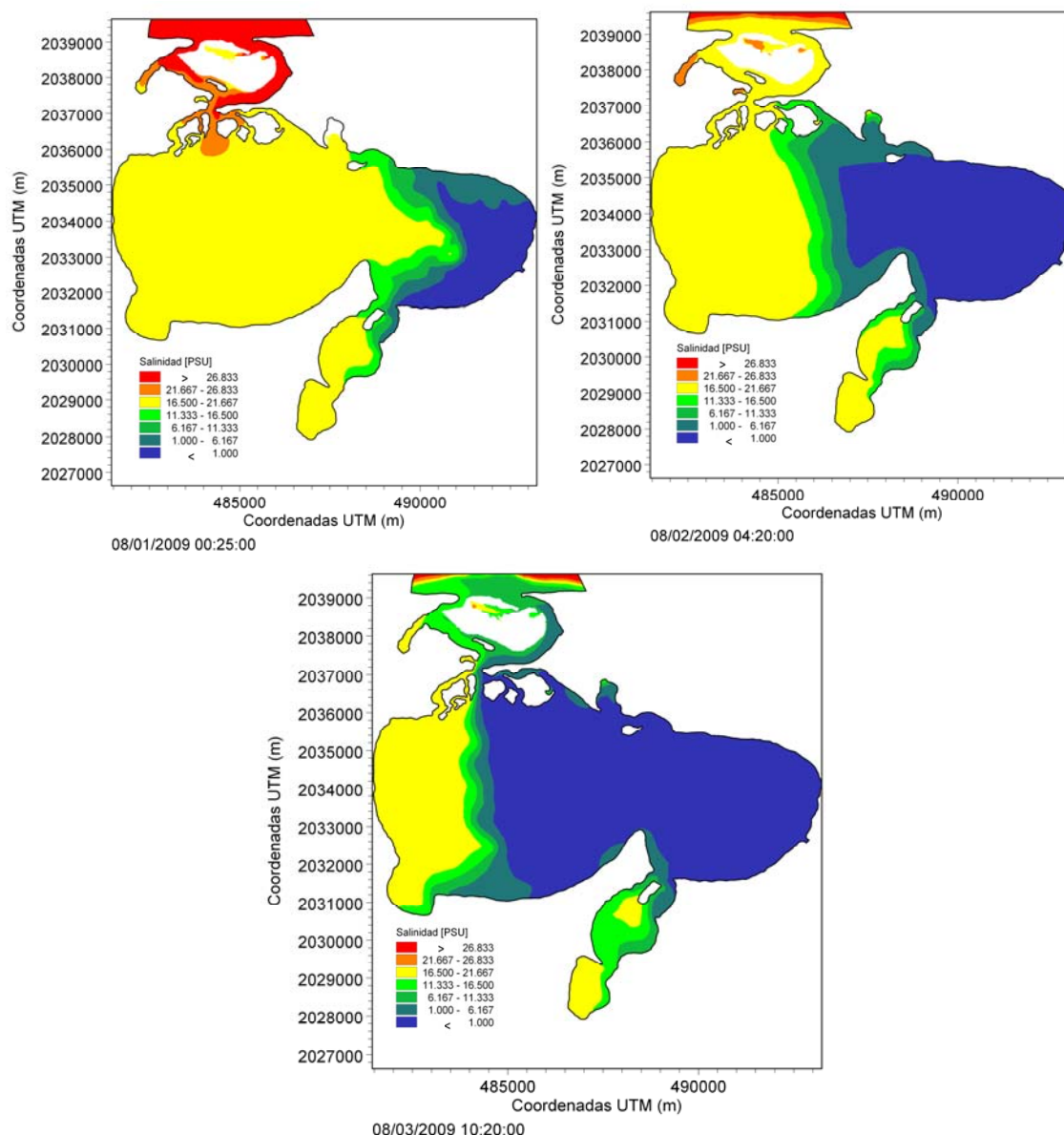


Figura 5-9 Momentos de modelación inicial, medio y final de la Salinidad, para forzamiento por Gasto extraordinario.

Las áreas donde la influencia del río no es notable, con salinidades superiores a 12 ups, se encuentran en la boca lagunar, particularmente en su brazo oeste (con un promedio de salinidades de 19 ups), al oeste del cuerpo lagunar y al sur dentro del cuerpo de agua conocido como Tilapa. Estos resultados indican una posible afectación en el régimen salino al interior de la laguna, lo cual puede representar una amenaza para los cultivos de ostión que existen dentro de la laguna.

5.2.3. TEMPERATURA

Para este caso de modelación, la temperatura dentro del sistema varía de acuerdo a los aportes del Río Hondo, y la variación diurna de la temperatura ambiente (día-noche), la radiación solar y la entrada de agua de menos caliente del Golfo de México.

Se determinan dos zonas principalmente en toda la modelación, la primera es la zona Oeste incluida la Boca lagunar donde la temperatura baja por los aportes mareales, la segunda en la zona pequeña en el este donde los aportes del Río Hondo también refrescan el sistema.

Se pueden dividir en varios estados los cambios de la temperatura en la modelación (ver Figura 5-10). Los primeros momentos cuando existe gasto entrando a la laguna por influencia de la marea astronómica la temperatura baja en el sistema (entre 24 y 25 °C). Seguidamente mientras va bajando el gasto de entrada de la marea se incrementa en la zona central y la zona este la temperatura, con un poco más de gradiente en la zona oeste por radiación solar. Las temperaturas en este momento son más altas que en el proceso de pleamar del inicio del sistema. Por último el sistema se refresca por la acción del río contrastando con el calentamiento por radiación solar en la zona oeste.

En conclusión la modelación de un gasto extremo de Laguna de Mecoacán dividen en dos zonas térmicas el sistema en: la boca con temperaturas entre 24 y 27 C y el cuerpo lagunar con temperaturas entre 27 y 31 °C.

En la Figura 5-10 se muestran cuatro momentos de modelación importantes, los cuales muestran las variaciones de temperatura en la laguna. El primero al inicio de la modelación (panel izquierdo superior), el segundo en la bajamar y temperatura ambiente altas del día (33 °C) (panel derecho superior), el tercero en la pleamar (panel izquierdo inferior) y el cuarto al finalizar el modelado (panel derecho inferior).

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

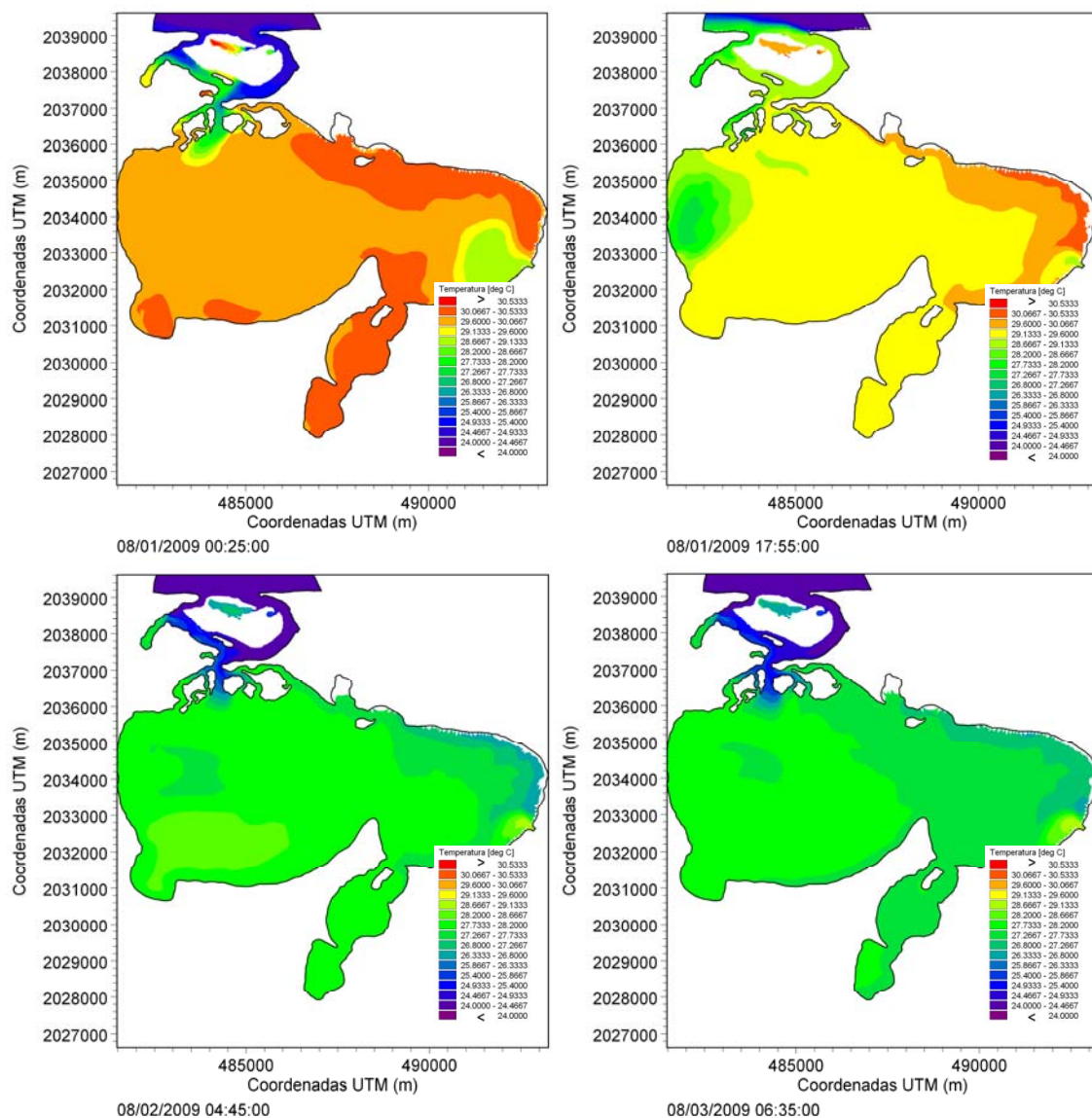


Figura 5-10 Momentos de modelación temperatura, para gasto extraordinario.

De la misma forma que en el caso de marea de tormenta, la densidad en el sistema es determinada por la salinidad. La zona norte, por donde transita el agua menos densa, prevalece y se difunde por todo el norte de la laguna, mezclándose gradualmente con las aguas de la boca. En la figura 5-11 se muestran los momentos inicial (panel izquierdo) y final de la modelación (panel derecho) por gasto extraordinario.

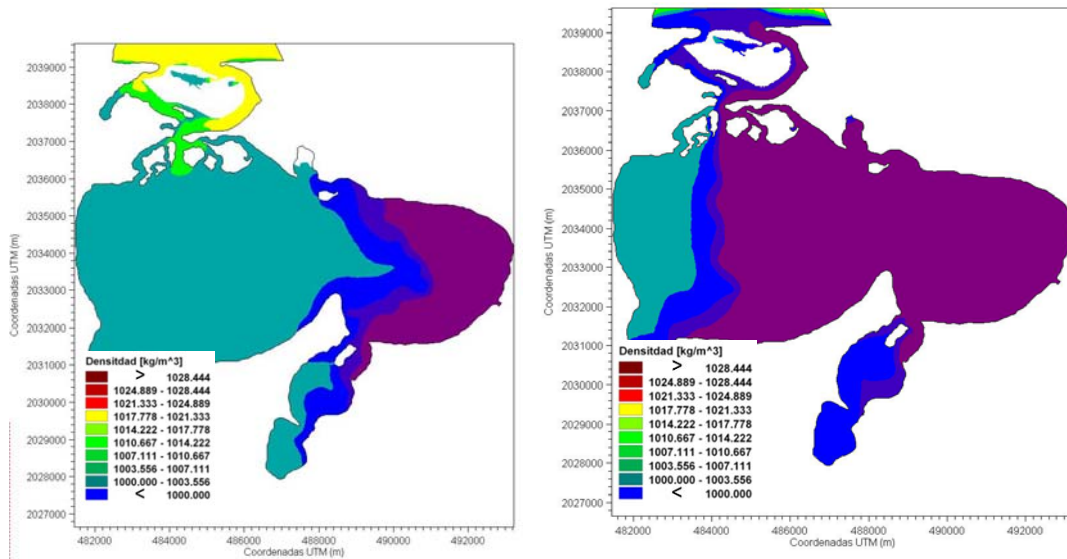


Figura 5-11 Densidad momento inicial y final para gasto Extraordinario.

5.2.4. IMPACTO HIDRÁULICO BAJO CAUDAL EXTREMO

En las secuencias de modelación se observa que a pesar de que el río Hondo descarga 6 veces más cantidad de agua que lleva normalmente, en ninguna zona del sistema se presenta una elevación mayor a 0.70 m. lo que induce que la laguna no presenta una característica de inundación considerable. Por lo que en general, este resultado confirma, la función de amortiguador hidráulico de la laguna de Mecoacán. Es de apreciar que la elevación de la superficie del agua no supera las elevaciones del terreno en la isla Andrés García en ningún momento, en contraste con el caso de marea de tormenta. En la figura 5-12 se aprecia las elevaciones en todo el sistema lagunar en último momento de la modelación para un periodo de tres días de forzamiento.

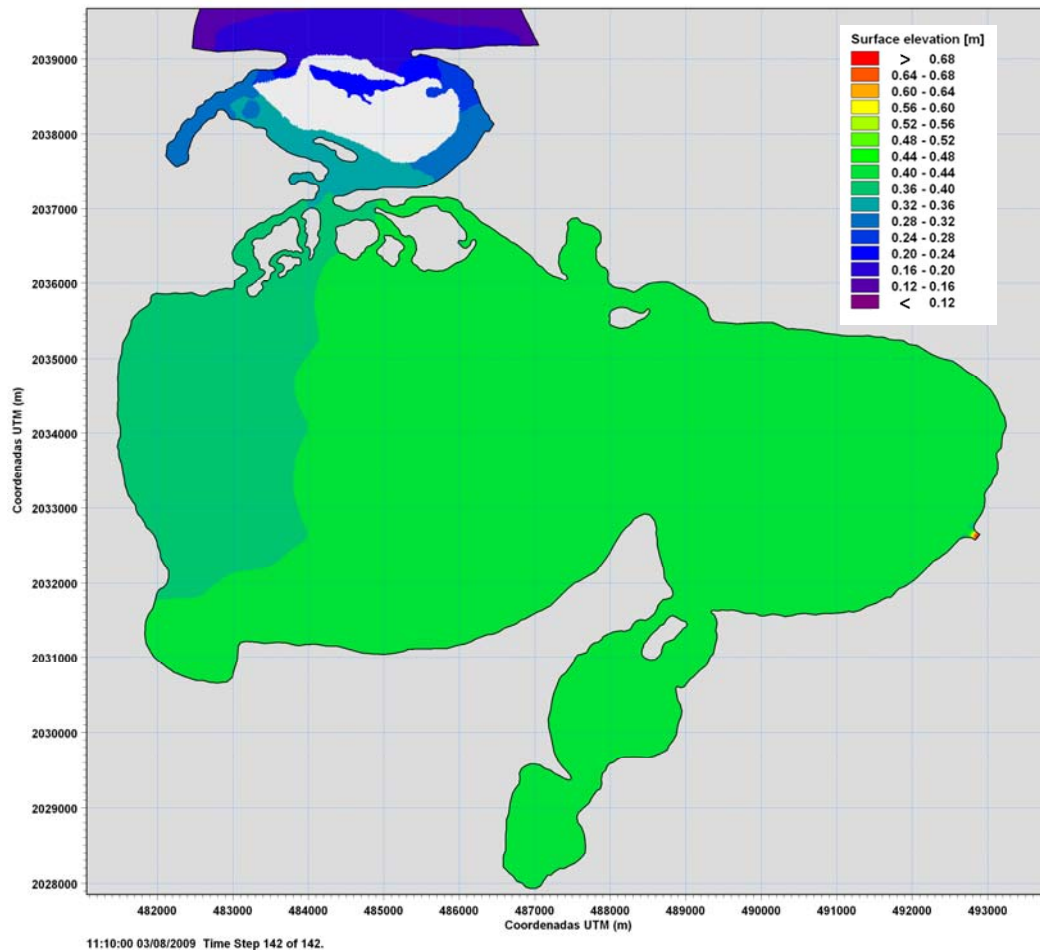


Figura 5-12 Elevaciones finales para gasto extremo (380 m³/s).

Respecto a la salinidad es el factor con más impacto en la Laguna cambiando completamente las condiciones iniciales del sistema. El comportamiento del flujo dulce por la franja este del canal de la boca, es muy deficiente, lo indica que la capacidad de residencia o de renovación del sistema es muy baja, pues las condiciones morfodinámicas de la boca no lo permiten. Además el intercambio de agua salada y dulce, no es eficiente por la baja intensidad de la circulación dentro de la laguna.

El cambio drástico de salinidad es un grave riesgo para las especies que habitan la laguna, lo cual al momento de un evento de gasto extremo puede afectar en gran medida los habitats salino y salubres para especies como el manglar y el ostión. Este último de interés económico de la región. La temporada de crecimiento del ostión (*C. virginica*) se debe al desarrollo de la

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

disponibilidad de alimento en la laguna, la cual depende de salinidades altas (promedio = 30.16 UPS) entre otros factores (Zamora 2003).

5.3. PREDOMINANCIA DE VIENTOS

El esfuerzo del viento produce efectos locales al actuar directamente sobre la laguna y no-locales al actuar sobre el océano adyacente. Los efectos locales más importantes del viento al actuar directamente sobre la superficie del agua son el aumento en la evaporación, el apilamiento del agua en el sentido de la dirección hacia la cual sopla y formación de olas.

En lo que corresponde a la modelación hidrodinámica por viento, en primer lugar se definió la dirección hacia el Suroeste (SW) es decir 225° según lo descrito en la sección 2.1.5. Por lo cual se induce un forzamiento del flujo hacia adentro de la laguna. La condición de viento se define por medio de los valores reportados bajo condiciones de “norte” en la región y sumado a condiciones de temporal huracanado. Estas condiciones son extremas y se utilizan para obtener una situación de forzamiento límite. El valor de condición en el modelo es de una velocidad constante de 35 m/s (126 Km/h) y su dirección de XX.

Los valores de las fronteras de cálculo se inducen en condiciones normales de forzamiento, con una variación del nivel medio del mar por la influencia de la marea astronómica y un gasto constante de $65.9 \text{ m}^3/\text{s}$ del Río Hondo. La marea de tormenta que podría generar un fenómeno de este tipo esta implícitamente desarrollada en las elevaciones calculadas a la entrada de la boca por el modelo.

5.3.1. CORRIENTES – CIRCULACIÓN

Con el modelo se investigan las reacciones hidrodinámicas del sistema, las cuales dan como resultado corrientes internas que podrían modificar las condiciones de la boca y contribuir al mezclado y la recirculación de sedimentos.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

A través de las modelaciones realizadas a lo largo de este trabajo, se encontró una baja intensidad en la circulación interior de la laguna. En estos casos, los únicos forzamientos considerados que podrían movilizar el flujo interno eran la variación en el nivel medio del mar y el gasto del río Hondo. Es de esperarse que fuertes vientos, asociados a la presencia de huracanes y nortes sobre la costa y el cuerpo lagunar, generen un aumento en la intensidad de la circulación lagunar.

Los resultados numéricos indican tres patrones dominantes de flujo, el primero ubicado a la orilla de la laguna, rodeándola de este a oeste en el norte y de este a oeste en el sur de la laguna, el segundo presenta un patrón semi-circular que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj. Mientras que el tercero, amplifica la dinámica del flujo de marea observada en el estrecho del Bellote. La configuración de estos patrones de flujo se presenta en la figura 5-13, en la cual se exponen los vectores de velocidad del flujo de la laguna en tres momentos importantes del forzamiento interno de la laguna. En la Figura 5-14 se aprecian las velocidades y los gastos en la boca debido al forzamiento por viento extraordinario.

El sistema es extremadamente somero y por lo tanto es particularmente sensible a la acción del viento.

En general, como resultado de la intensificación de la circulación al interior de la laguna es posible concluir que bajo estas condiciones de forzamiento, se favorecerá el mezclado de agua salada y dulce al interior de la laguna se vería favorecido.

De esta forma se puede apreciar en esta modelación patrones de circulación, de flujo y reflujos en el Bellote, interactuando con el viento, distinguiéndose en consecuencia posibles zonificaciones con distinto nivel de intensidad de circulación y mezcla.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

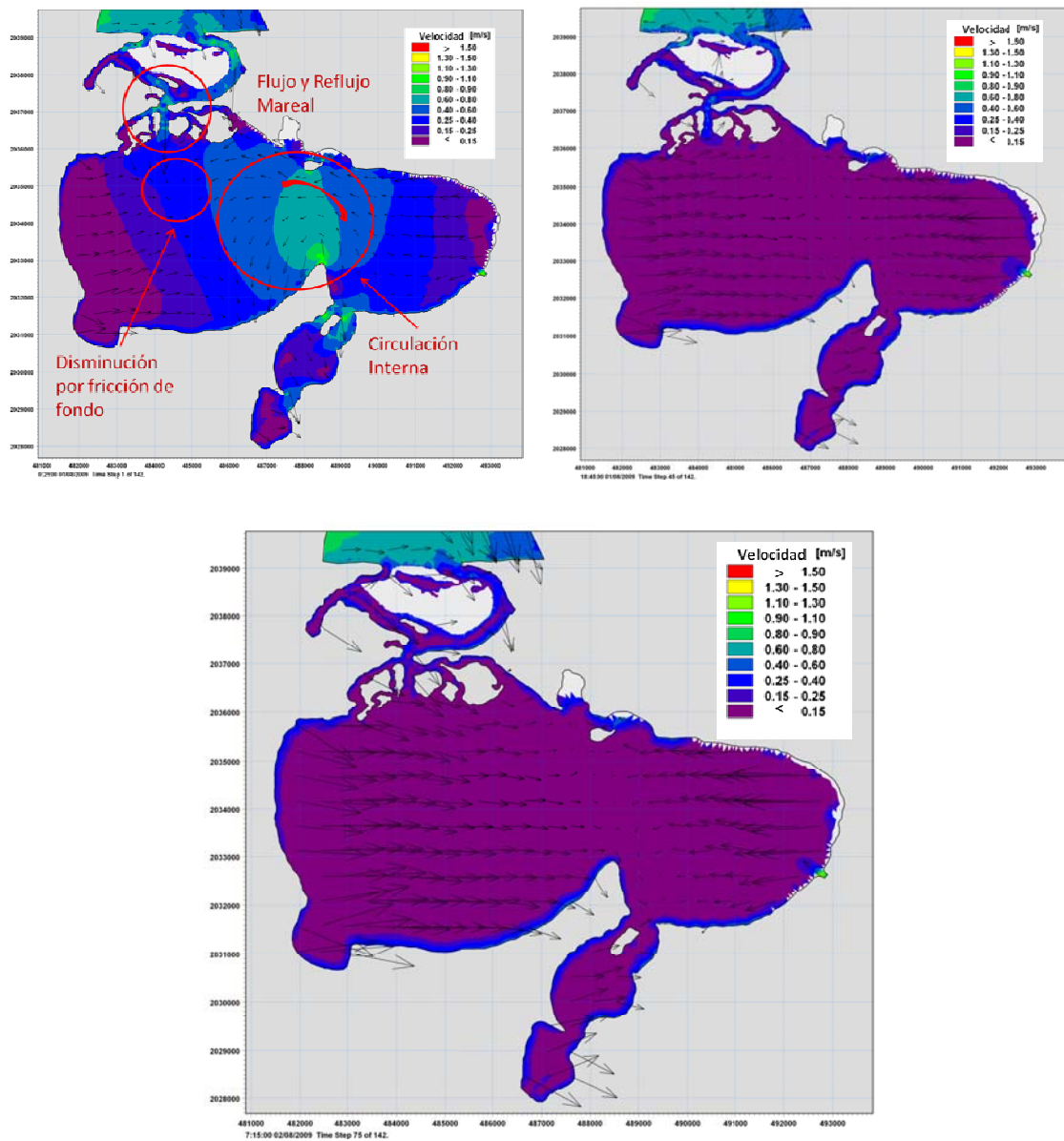


Figura 5-13 Instantes de modelación del flujo con forzamiento de viento extremo. Primeros momentos de modelación, punto medio de tiempo de modelación y final de modelación.

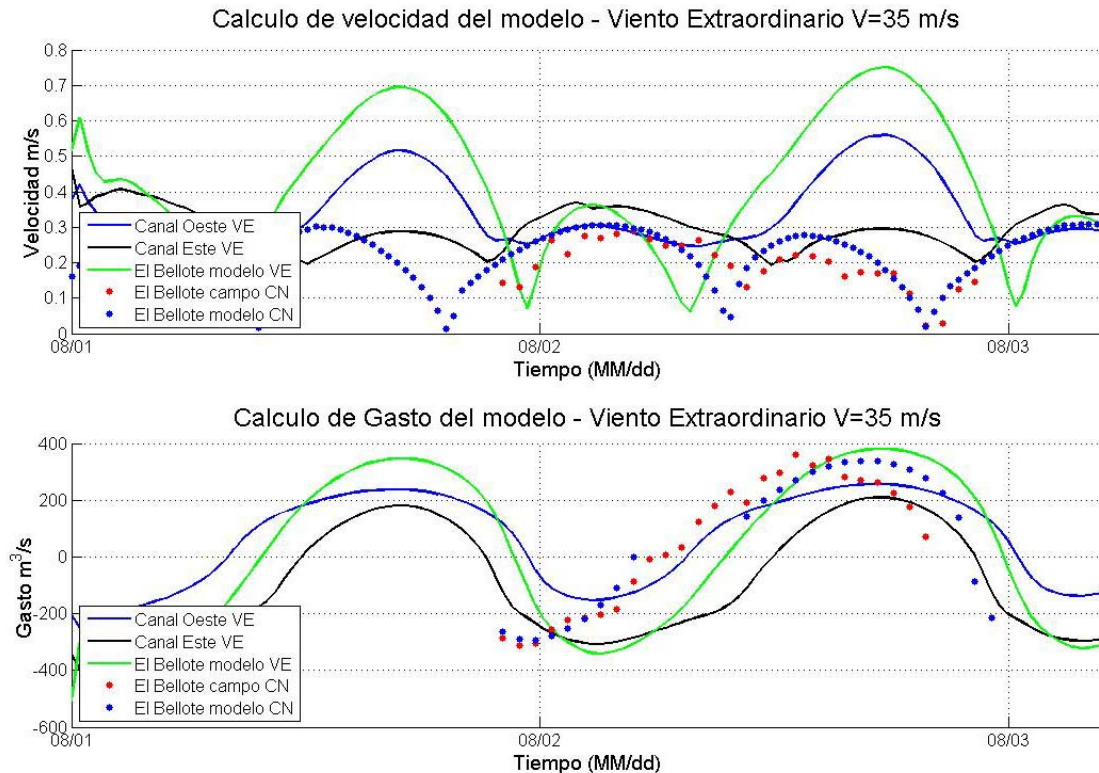


Figura 5-14 Velocidad y Gasto modelación Viento Extraordinario.

5.3.2. SALINIDAD

La influencia del viento en la configuración salina de la laguna es amplia. En las modelaciones por viento, se espera que este forzamiento favorezca una distribución y mezcla más activa entre los flujos de marea y fluvial.

En la Figura 5-15 se muestra la influencia del forzamiento del viento y la movilidad de los gradientes salinos dentro de la laguna a través del tiempo. Incluido a la masa salobre (entre 15 y 22 ups) entrando agua fluvial en el este de la laguna. Es interesante ver como el viento produce circulaciones bien definidas formando masas de agua más salina que viajan por la laguna, las cuales bajan su salinidad cada vez que se acercan al lado este de la laguna, donde los aportes fluviales reducen la salinidad.

A partir de estos resultados, es indudable que la circulación generada por viento es la más importante para generar mezcla al interior de la laguna, sobre

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

todo si se compara este resultado a la luz de los eventos evaluados anteriormente.

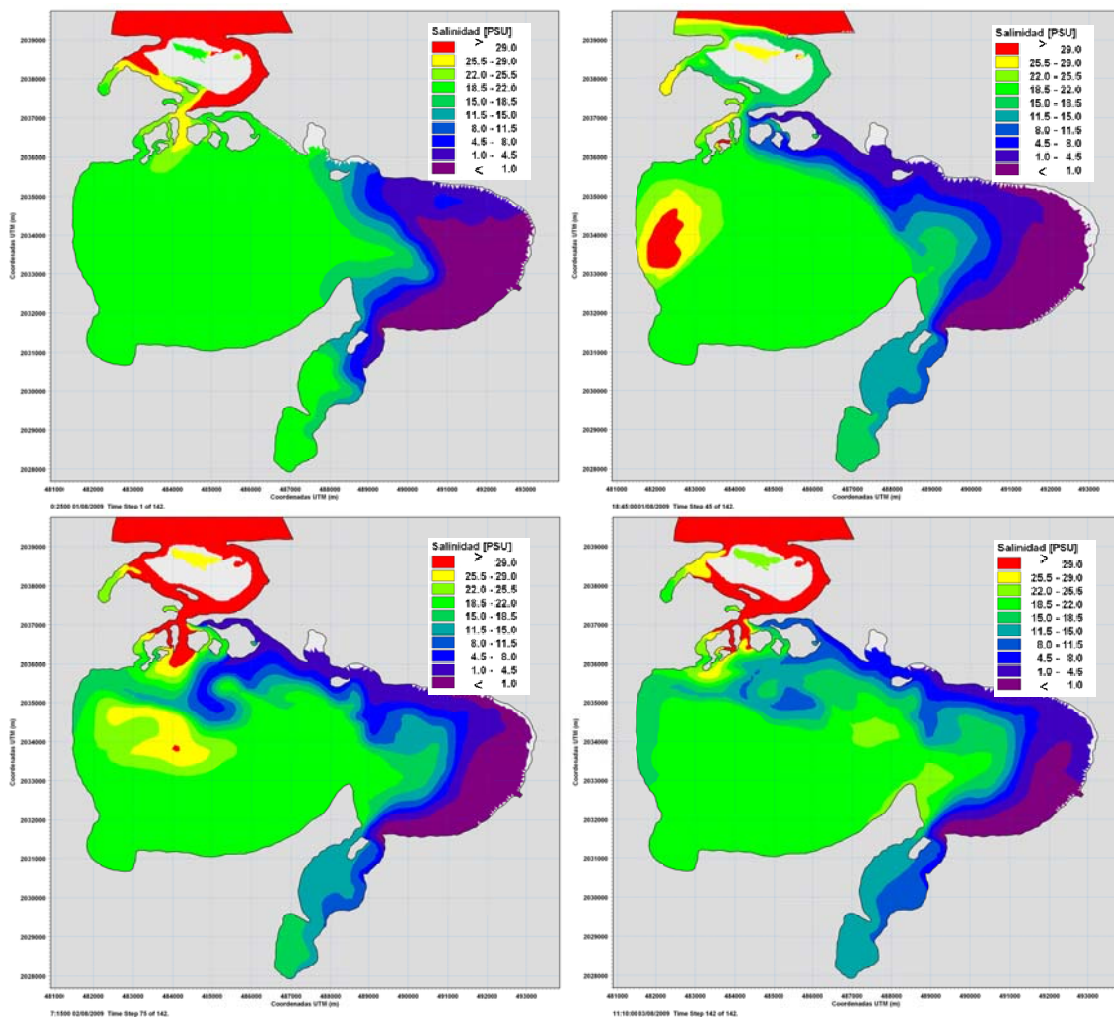


Figura 5-15 Secuencia del transporte salino bajo forzamiento de viento extremo.

5.3.3. TEMPERATURA

La variación de temperatura bajo estas condiciones de forzamiento extraordinario está regida por el roce superficial realizado por el viento en la superficie del agua. La figura 5-16 presenta los tres instantes de modelación importantes, que indican el inicio (panel izquierdo), mitad (panel derecho) y final de la modelación realizada (panel inferior). De acuerdo a estos resultados, se aprecia que el forzamiento de viento extraordinario no tiene una influencia dominante en la variación de la temperatura el interior del cuerpo lagunar. Por el contrario, se observa que el factor determinante es (como en los casos

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

anteriores) el intercambio y mezcla de agua salada por la boca lagunar y agua salobre en el interior de cuerpo de agua. Sin embargo, se rescata el hecho de que el forzamiento asociado al viento extraordinario, genera una distribución uniforme de la temperatura en casi toda la extensión de la laguna, con excepción de las áreas cercanas a la boca y la entrada del río Hondo. Los rangos de temperatura casi no varían (entre 28 y 29.5°C). Una posible explicación a este fenómeno (temperatura uniforme) puede estar asociada a la reducción del impacto de la radiación solar por las condiciones de viento extraordinario, el cual distribuye el calor aportado por las variaciones diarias de la temperatura a lo largo de todo el tiempo de la modelación.

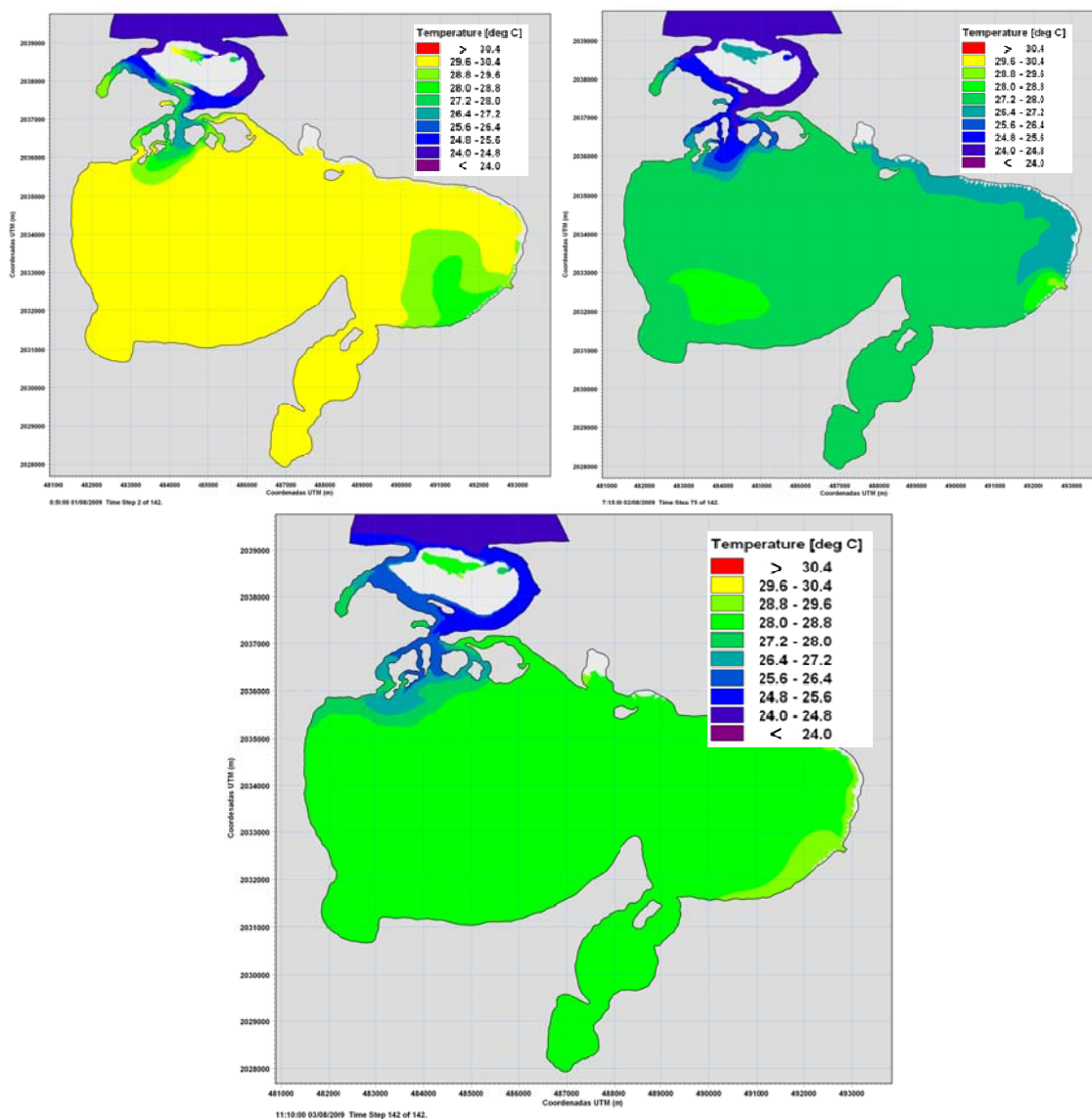


Figura 5-16 Instantes de modelación de temperatura. Instantes: inicial, medio y final de modelación por viento extremo de la temperatura.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Respecto a la variación de la densidad en el cuerpo lagunar bajo este forzamiento, se presentan los resultados obtenidos en la Figura 5-17 donde el panel izquierdo ilustra las condiciones al inicio de la modelación, y el panel derecho presenta la distribución de densidades al final de la misma. Tal y como se reporta en esta figura, la distribución de la densidad no es uniforme al interior de la laguna y presenta una fuerte dependencia de la intrusión de agua salada en la laguna. Además, se observa una fuerte influencia del viento en la distribución de densidades, ya que se revela una mezcla muy activa al interior de la laguna, con valores de densidad entre los 1010 y los 1021 kg/m^3 .

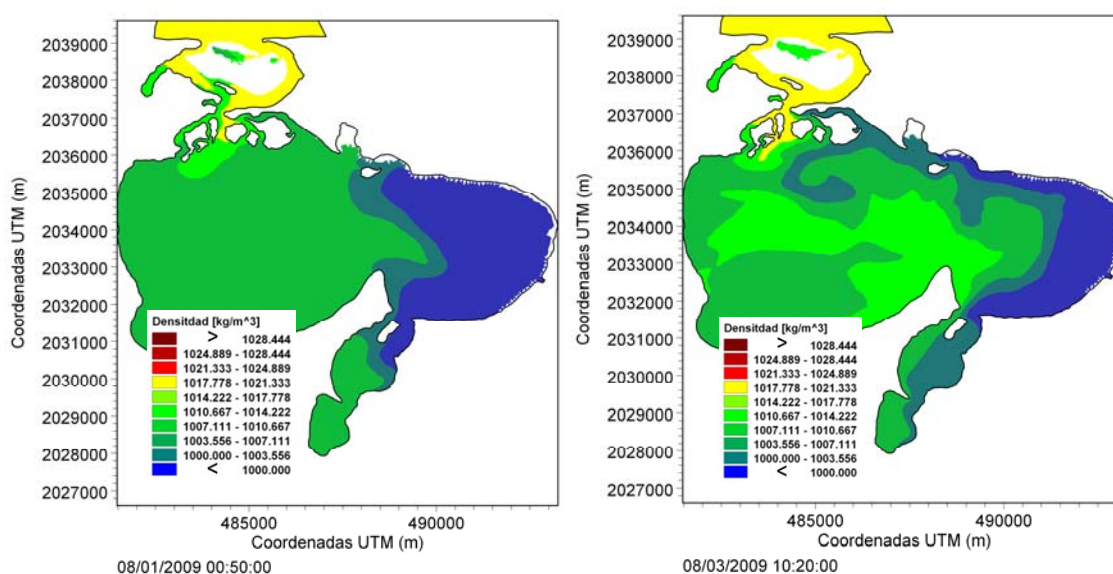


Figura 5-17 Densidad inicial y final de la modelación por forzamiento de viento.

5.3.4. IMPACTO HIDRÁULICO BAJO VIENTO EXTREMO

Los resultados presentados en esta sección, indican que condiciones de viento extraordinario en la zona costera podrían traer cambios significativos en la circulación de la laguna, los cuales a su vez modificarían la distribución de la salinidad y densidad al interior de la laguna. Notablemente, dentro de los forzamientos estudiados en el presente trabajo, el viento extraordinario es el que tiene una mayor influencia en la intensificación de la circulación al interior del cuerpo lagunar.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Otro impacto hidráulico relevante, asociado a la incidencia de fuertes vientos sobre la laguna, es el que representa la intensificación de las velocidades al interior de la laguna. Un incremento en la velocidad del flujo favorece (dependiendo de la intensidad y duración del viento dominante) la redistribución y movimiento de los sedimentos en el cuerpo lagunar. La resuspensión de sedimentos por acción del viento es uno de los principales factores que gobiernan el funcionamiento abiótico y biológico de estos sistemas someros (Sanders, 1958).

Respecto a la elevación de la superficie libre del agua al interior de la laguna, es de suponer que el agua se apilará en la dirección dominante del viento (zona sur-oeste). La elevación del nivel de la laguna en esta zona es de máximo 0.8 m, valor que no representa ningún riesgo sobre las poblaciones aledañas de la laguna (Puerto Ceiba, el Bellote e Isla Andrés García), en virtud de que la elevación del terreno en esta zonas supera el valor registrado.

5.4. ESCENARIO SIMULTÁNEO – MAREA DE TORMENTA Y DESCARGA EN EL RÍO

El trabajo hasta ahora presentado ofrece un panorama del comportamiento hidrodinámico de la laguna de Mecoacán bajo el forzamiento individual de diferentes escenarios extraordinarios, los cuales están asociados a la presencia de condiciones extremas individuales para cada forzamiento sobre el sistema lagunar. Con el propósito de analizar eventos que consideren la simultaneidad de eventos extraordinarios sobre el sistema, se presentan simulaciones del modelo numérico con forzamientos extraordinarios en la boca lagunar y el río Hondo. Es decir, se considera una sobre-elevación del nivel medio del mar de 1.5 m (por la incidencia de una marea de tormenta) en la boca lagunar, con un gasto extraordinario constante de $Q=380\text{m}^3/\text{s}$ sobre el río Hondo.

La justificación de este escenario, tiene su base en las condiciones asociadas a la incidencia de un ciclón tropical y condiciones de nortes intensos.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Circunstancias bajo la cual es posible que los vientos generados se combinen con la presencia de lluvias intensas, que a su vez incrementan los caudales en los ríos del sistema.

La condición de viento para este caso se define a partir de los valores utilizados durante las simulaciones individuales de condiciones de marea de tormenta y gasto extraordinario (ej. $V=5\text{m/s}$ proveniente del Norte).

5.4.1. CORRIENTES – CIRCULACIÓN

La Figura 5-18 presenta los resultados asociados a los flujos durante cuatro instantes a lo largo de la simulación numérica. Estos son: al inicio (panel superior izquierdo), al momento de máxima elevación del nivel del mar (panel superior derecho), al recuperarse el sistema durante el reflujos de la marea (panel inferior izquierdo) y al final de la modelación panel inferior derecho).

De acuerdo a lo presentado para esta condición, se observa que la presencia de ambos forzamientos incrementa de forma sustancial la dinámica interna de la laguna y eleva el nivel de la superficie libre dentro del sistema. Durante la mayor parte del tiempo de simulación se identifica un predominio de las velocidades más intensas, en los canales estrechos como son la zona del Bellote, la entrada del río Hondo y ambos brazos de la boca lagunar, con valores entre 1.5 y 1.6 m/s. Este incremento en la velocidad de corriente está asociado a la morfología del fondo y el área hidráulica registrada en estos puntos (con anchura y profundidades menores).

La situación presentada en esta condición determina tres efectos, el primero de ellos consiste en el encuentro de dos masas de agua con distintas características en el sistema (mareal-fluvial). El segundo representa la inundación de la isla Andrés García por la sobreelevación del nivel del agua en la boca, y el tercero considera un incremento en las velocidades de corriente en áreas como el estrecho del Bellote. Este último podría ser determinante para la generación de erosión o acumulación de sedimentos en algunas zonas de la laguna, particularmente en la boca lagunar, donde un incremento o decremento

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

de la velocidad de corriente tiene efectos directos en la configuración de su morfología. En la Figura 5-19 se observan las velocidades en la boca comparadas con las condiciones normales medidas en campo y calculadas por el modelo, es evidente la alteración en las velocidades por el forzamiento planteado, respecto a los otras modelaciones realizadas.

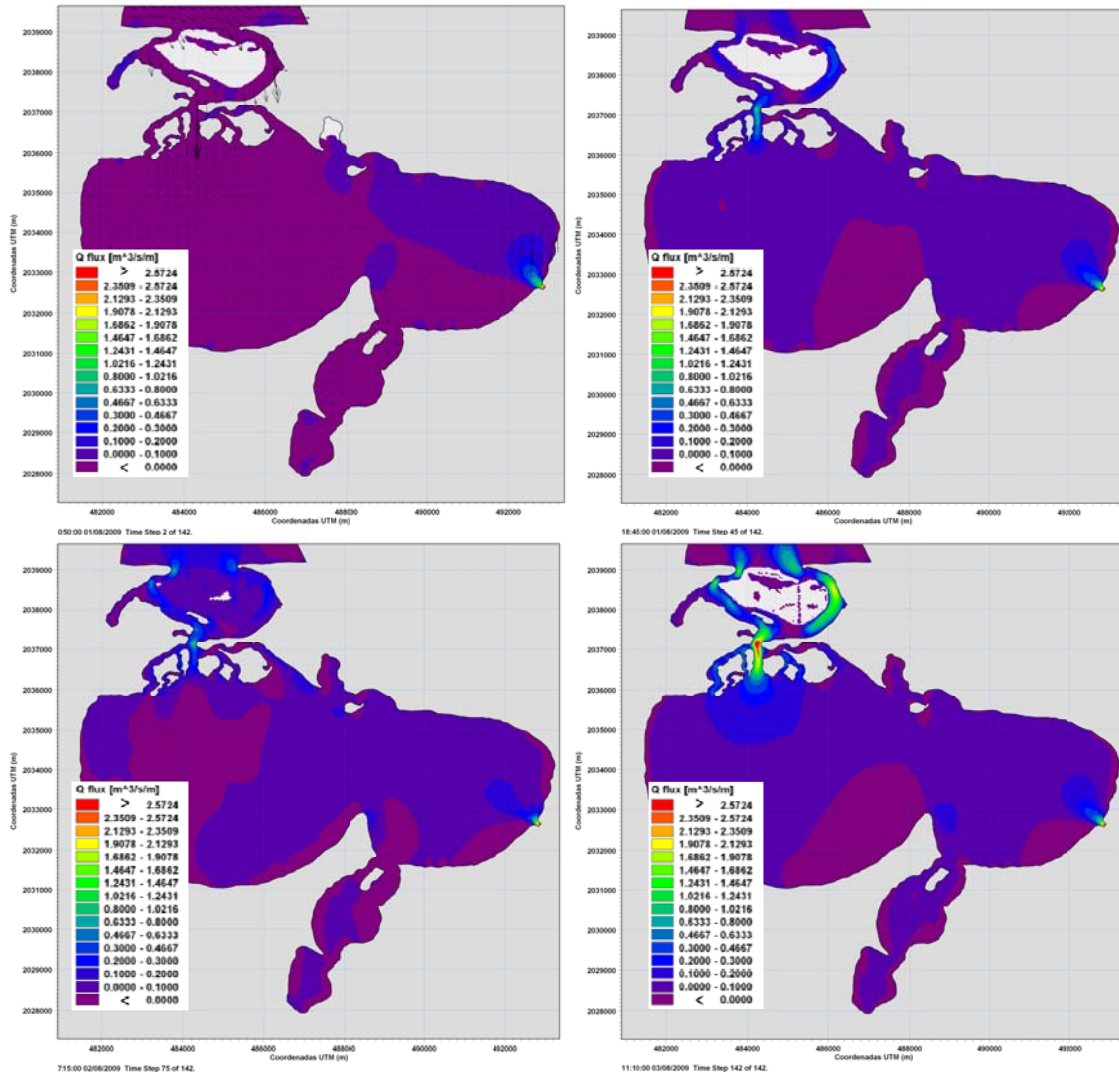


Figura 5-18 Instantes de modelación del flujo en forzamientos extraordinarios marea y gasto río.

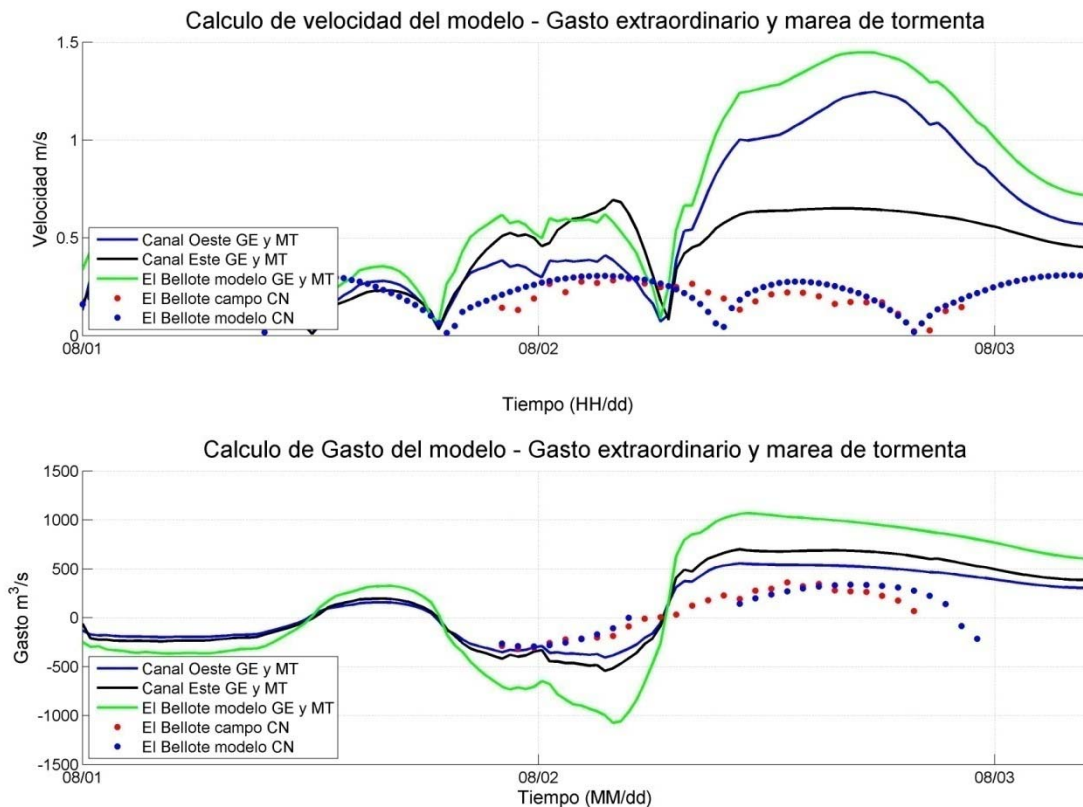


Figura 5-19 Velocidad y Gasto modelación Gasto extraordinario y marea de tormenta.

5.4.2. SALINIDAD

La figura 5-20 presenta los resultados de salinidad al interior del sistema lagunar durante la secuencia de modelación seleccionada. En esta figura, se muestra como el flujo uniforme de agua dulce en el río predomina sobre el flujo de agua salada que se presenta por la presencia de la marea de tormenta en la boca lagunar. Los resultados indican el agua salada logra penetrar en una gran parte al interior de la laguna, sin embargo, la zona de agua salina es rápidamente desplazada fuera del sistema por el flujo uniforme del río, una vez que el pico de la marea de tormenta ha pasado. Notablemente, la laguna la Tilapa no presenta cambios drásticos de salinidad en comparación con el cuerpo lagunar. Esto señala la menor intensidad en circulación asociada a este cuerpo de agua.

Estos resultados señalan que bajo condiciones extraordinarias simultáneas en las fronteras de este sistema, el predominio del flujo en el río (dado por un

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

gasto uniforme) domina la distribución de salinidades para la condición final del sistema. A pesar de que el avance del agua salada, asociado a la incidencia de la marea de tormenta en el sistema, hace retroceder de forma significativa el agua dulce que entra por el río, la duración del evento limita su predominio en las condiciones finales. Esto es evidente al comparar el instante asociado a la máxima sobre-elevación del nivel medio del mar registrada (con 1.5 m) con aquél rumbo al final de la modelación (una vez pasado el pico de sobre-elevación) donde se aprecia una clara reducción en la salinidad del sistema (predominio del agua dulce). Por otra parte, la mayor eficiencia hidrodinámica del brazo Este de la boca lagunar es evidente, ya que durante el refluo de la marea (salida de agua salada) se registran salinidades más altas en el brazo Oeste. Esta eficiencia hidráulica también está representada por la apertura y cierre morfológico que se ha reportado a lo largo del tiempo en el brazo oeste de la laguna.

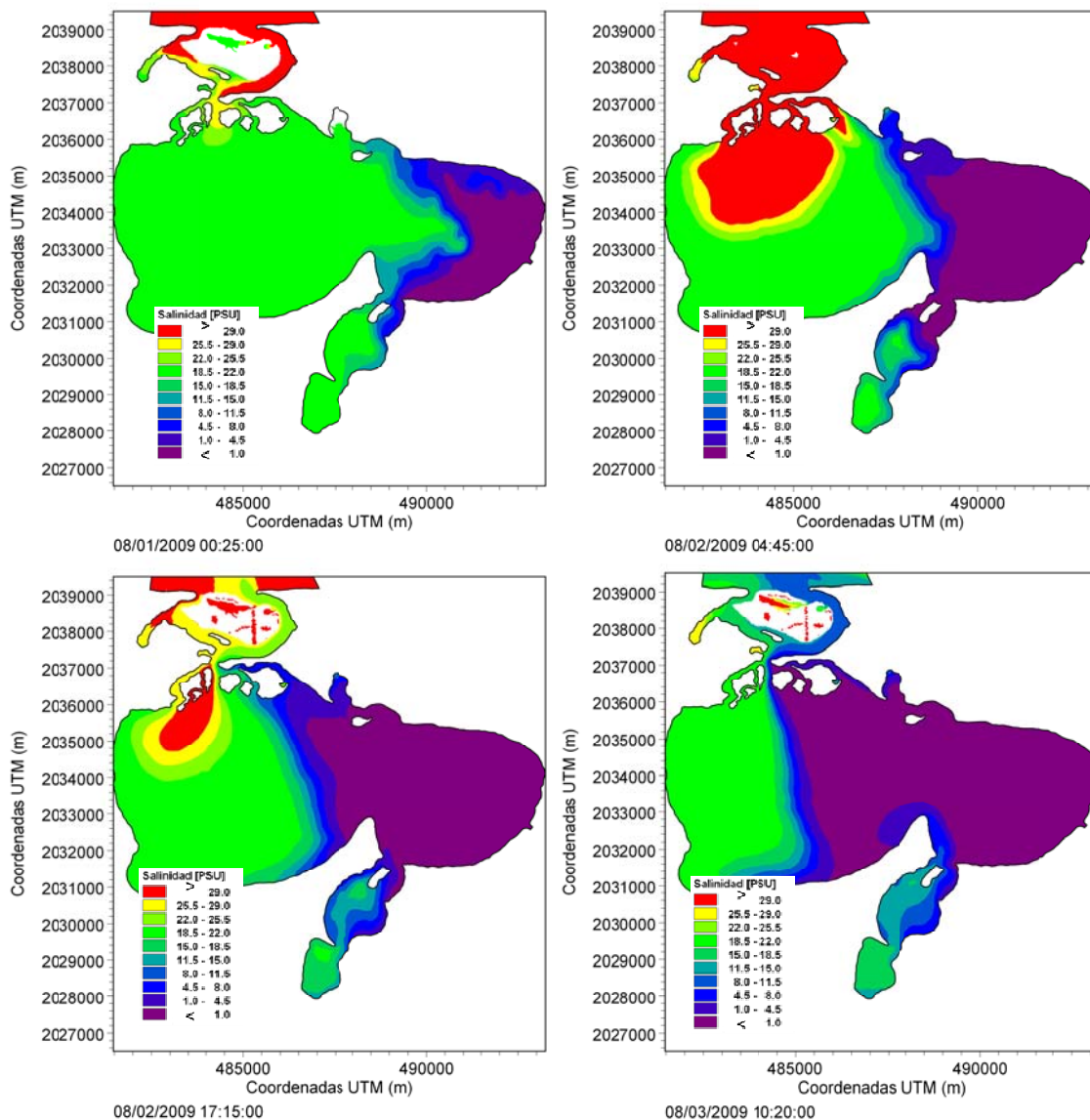


Figura 5-20 Modelación de salinidad condiciones extraordinarias de Marea de tormenta y gasto.

5.4.3. TEMPERATURA

Respecto a los resultados de la distribución de la temperatura bajo estas condiciones de forzamiento, la Figura 5-21 presenta los cuatro mapas de distribución para los mismos instantes descritos con anterioridad. Estos resultados muestran que la distribución de la temperatura bajo estas condiciones está dominada por la entrada de agua fresca de mar por la incidencia de una marea de tormenta extraordinaria. Sin embargo, al igual que en el caso de la salinidad, esta influencia desaparece rápidamente después del

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

paso de la sobre-elevación pico. En particular, el instante final identifica las zonas de menor circulación de forma muy clara, a través de los valores de temperatura reportados, aquellas zonas de menor circulación aparecen más calientes por los efectos de la radiación solar.

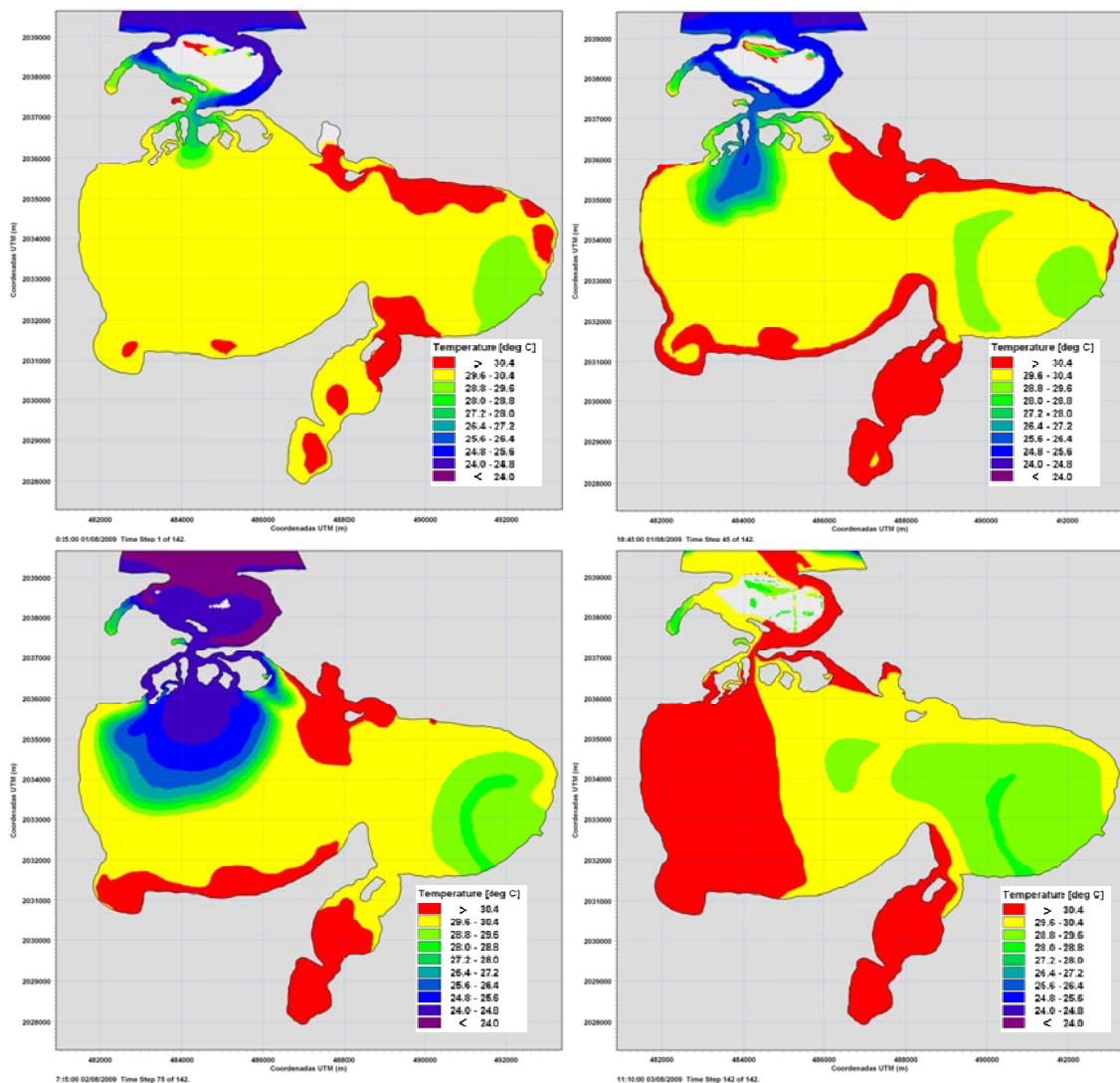


Figura 5-21 Instantes de modelación de Temperatura, para marea de tormenta y gasto extraordinario.

La Figura 5-22 presenta los resultados respecto a la distribución espacial de la densidad al interior de la laguna. Estos resultados reportan imágenes muy similares a aquellas mostradas durante las condiciones de gasto extraordinario,

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

por lo que es posible concluir que el río domina el escenario rumbo al final de la modelación numérica.

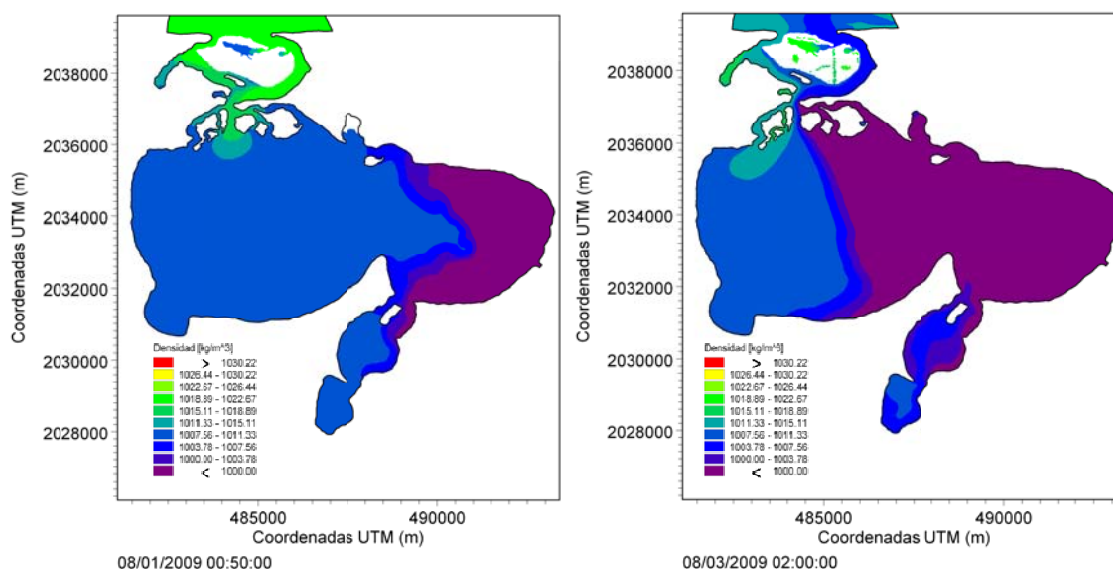


Figura 5-22 Comparación de densidades inicial y final bajo condiciones de gasto extraordinario y marea de tormenta.

5.4.4. IMPACTO HIDRÁULICO BAJO CONDICIONES SIMULTÁNEAS

Con el propósito de evaluar el comportamiento hidráulico en el estrecho del Bellote bajo todos los escenarios evaluados, la Figura 5-23 presenta la curva de variación temporal del gasto registrado en esta sección transversal. Como referencia, se dibuja la línea asociada a la incidencia de condiciones normales (marea astronómica) en el sistema.

A partir de las curvas registradas en esta figura, es posible detectar que la condición de viento extraordinario no modifica en gran medida los resultados observados durante condiciones normales de operación. Sin embargo, los escenarios asociados con forzamientos extraordinarios en el río o la desembocadura sí tienen una fuerte influencia en ambos, la magnitud y el gasto registrado en esta sección. En la figura 5-24 se muestra las velocidades en la boca para distintos escenarios de forzamiento. De acuerdo con los datos registrados, el forzamiento más influyente en la boca del Bellote está dado por

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

la marea de tormenta. Mientras que para el caso de forzamientos simultáneos de marea de tormenta y gasto extraordinario se registra un reflujó más intenso.

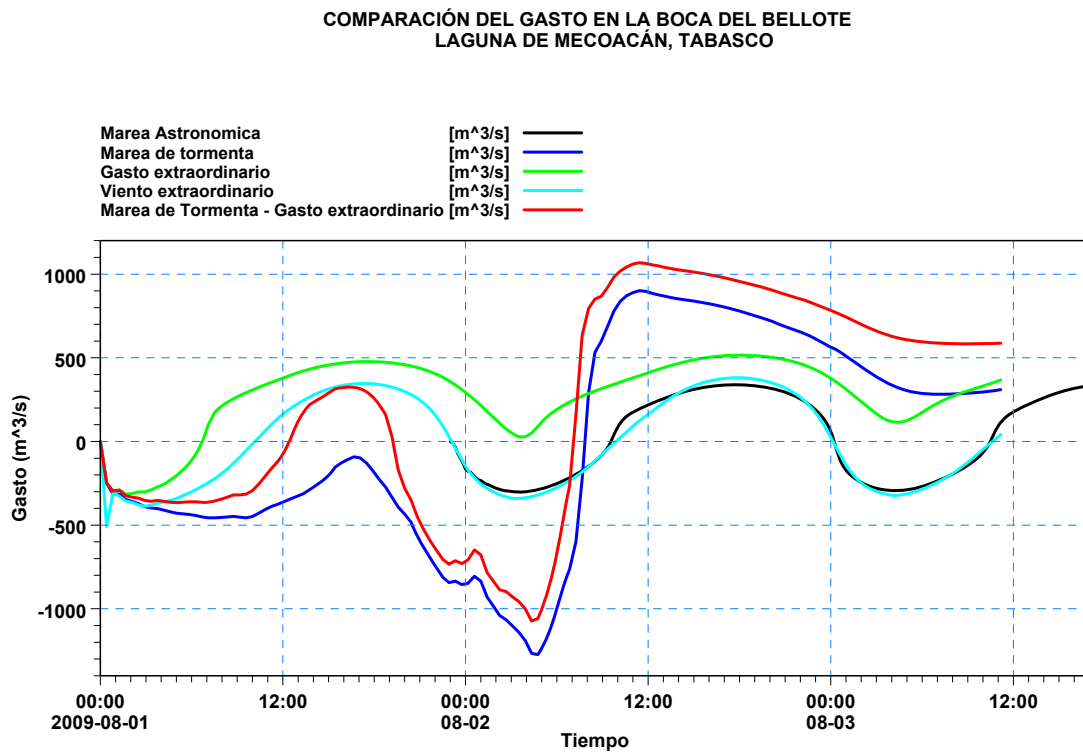


Figura 5-23 Comparación de gastos en distintos forzamiento en la boca lagunar.

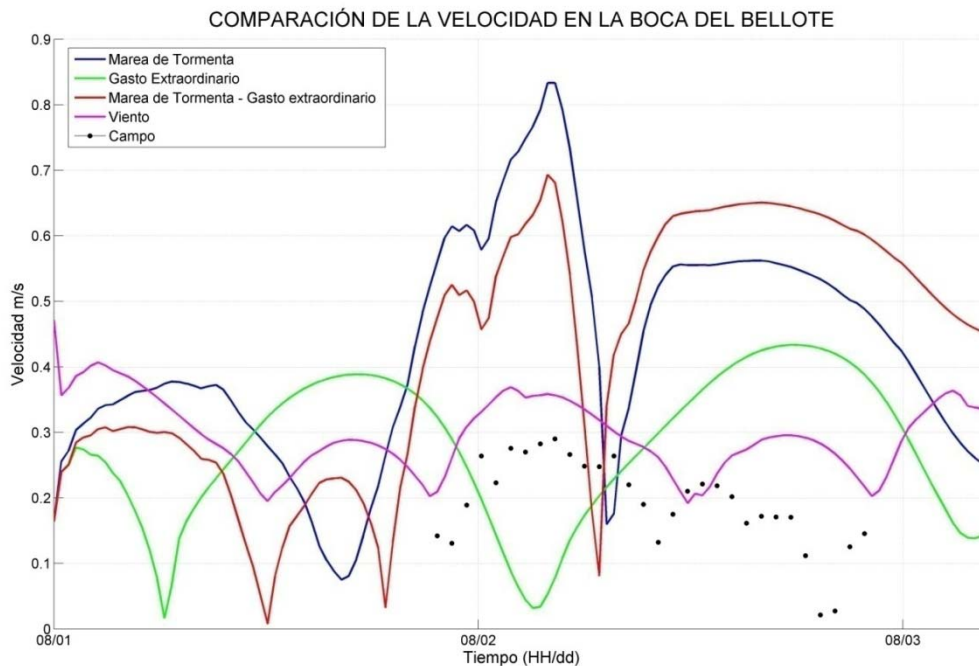


Figura 5-24 Comparación de Velocidades en distintos forzamiento en la boca lagunar.

5.5. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LA BOCA LAGUNAR

Los sistemas lagunares costeros, como el de Mecoacán, son sistemas extremadamente dinámicos, es decir poseen variaciones en sus características hidrodinámicas y morfológicas según a los forzamientos a que están expuestos. En el caso en cuestión, los cambios más visibles desde el punto de vista morfológico se ubican en la boca lagunar, donde históricamente se ha reportado la apertura y cierre del brazo oeste.

La erosión o deposición de sedimentos en esta región es un fenómeno natural que se debe a la interacción de los procesos climáticos, meteorológicos e hidrodinámicos con la morfología existente y la configuración del fondo.

En el caso de lagunas costeras, la apertura y cierre de las entradas o bocas lagunares representa un tema de gran interés para la comunidad científica, esto se debe a que en algunas ocasiones, pequeñas variaciones en las condiciones hidrodinámicas pueden desestabilizar el material de la boca ampliando indefinidamente su extensión hasta encontrar una condición de equilibrio. En el caso de la laguna de Mecoacán, se ha reportado una intensa actividad morfológica por la apertura y cierre cíclico del brazo oeste de la boca.

Con el propósito de proveer un diagnóstico respecto a la estabilidad morfológica de la boca lagunar de Mecoacán, esta sección presenta un análisis de estabilidad que toma como base los datos de campo y los resultados de los escenarios extremos modelados.

Este ejercicio, pretende estimar desequilibrios morfodinámicos potenciales de la boca lagunar de Mecoacán, bajo escenarios de alteraciones en las condiciones de flujo en sus canales.

A fecha, la mayor parte de los estudios realizados se han enfocado en la estabilidad de bocas individuales (una sola entrada en el sistema), sugiriendo relaciones empíricas entre los aspectos morfológicos e hidrodinámicos de la boca y la laguna. Esas relaciones han sido obtenidas a partir de observaciones y mediciones en sistemas en donde se asumió la existencia de condiciones de estabilidad.

5.5.1. HIDRODINÁMICA DE LA BOCA

El primer paso en la determinación de la estabilidad de una boca lagunar consiste en identificar las características hidrodinámicas que la dominan. Muchos enfoques están disponibles para este propósito y se pueden utilizar desde expresiones analíticas, modelos numéricos hasta modelos físicos. Keulegan (1951) introduce una relación de diferencia del sobre-nivel entre la laguna y las mareas oceánicas, y los valores de dimensión de velocidad máxima de entrada de la bahía (o laguna) y amplitud, estos resultados se presentan como funciones del llamado "coeficiente de reposición" o de relleno. El valor Keulegan (K) se utiliza para entender los efectos de las variaciones geométricas del canal por las relaciones hidráulicas en la boca.

Para el análisis que se presenta en esta sección, se utiliza el método de Keulegan (1951) para definir las características hidráulicas en la laguna, en combinación con las apreciaciones de Brown (1928). Así, las hipótesis utilizadas para la definición de la hidrodinámica de la boca son las siguientes:

- La superficie del agua en la laguna se mantiene en posición horizontal durante todo el ciclo de las mareas.
- Las paredes de la laguna son verticales, de manera que la superficie del agua se mantiene uniforme.
- El ingreso tributario y escorrentía a la superficie de la laguna es cero, indica que el análisis no se tomará en cuenta, para nuestro caso, los eventos de gasto extraordinario. Se analizará la boca por su influencia más significativa; la marea.
- No hay corrientes de densidad presentes.
- La marea en el mar está dada por una curva sinusoidal simple.
- La variación de la profundidad en la entrada durante el ciclo de las mareas es pequeño, por lo que el área de la sección transversal y el radio hidráulico se puede suponer que se mantienen constantes.
- La presión debido a la aceleración de la entrada es despreciable.

A pesar de que estas hipótesis no son del todo validas, permiten calcular la estabilidad de la boca, a veces sobreestimándola (e.j. O'Brien and Dean, 1972).

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Si se realiza el análisis hidráulico de la boca lagunar de Mecoacán, considerando los dos brazos de comunicación al mar como sistemas separados, es necesario definir para cada canal la velocidad de flujo máximo, el rango máximo de descarga de las mareas en la laguna, y el prisma de marea (i.e. volumen de agua que fluye dentro y fuera de la laguna en un ciclo de marea). En la Figura 5-25 se presenta la configuración de los dos canales de la boca, mientras que la Figura 5-26 se muestran las secciones transversales medidas en cada canal.

Figura 5-25 Canales de la Boca lagunar.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

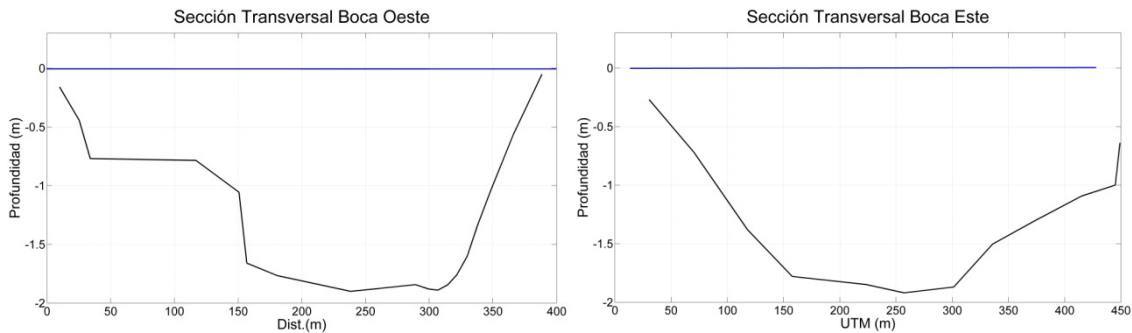


Figura 5-26 Secciones transversales de los canales de la Boca.

Los parámetros hidráulicos para el canal Este y Oeste, se definen con base en la información recabada durante la campaña de campo de 2009, tal que, se pueden definir, primeramente para el canal Oeste

Profundidad media de la entrada del canal	$d = 1.9 \text{ m}$
Ancho del canal	$B = 203.5 \text{ m}$
Área del canal o área de la sección transversal:	$A_c = Bd = 386.65 \text{ m}^2$
Radio Hidráulico:	$R = \frac{A_c}{B+2d} = 1.86 \text{ m}$
Longitud del Canal:	$L = 2881 \text{ m}$
Área de la Laguna o Bahía	$A_b = 62000000 \text{ m}^2$
Periodo de marea	$T = 24.5 \text{ h}$

Factor de Fricción: Para n (Coeficiente de Manning) igual a 0.0275 el factor de fricción es:

$$f = \frac{116n^2}{R^{1/3}} = 0.0713$$

Las suposiciones de Keulegan de sección transversal del canal prismático y paredes verticales del canal simplifican en gran medida las condiciones de cálculo, porque las entradas naturales en general tienen una morfología

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

compleja, por lo que la determinación exacta de los valores de radio hidráulico, la longitud del canal, área de sección transversal, y la zona de la laguna es difícil. El valor del coeficiente de llenado propuesto por Keulegan está definido por medio de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{TA_c}{2\pi a_o A_B} \sqrt{\frac{2ga_o}{F}} \quad (23)$$

Donde, el parámetro F , definido como un parámetro de impedancia, dependiente de la fricción, se determina por medio de la ecuación:

$$F = k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} = 0.05 + 1 + \frac{0.0754 \cdot 2881}{4 \cdot 1.57} = 28.57 \quad (24)$$

Donde g es la gravedad, los factores A_c , A_b , R , L y T están relacionados anteriormente. El valor de k_{en} es el coeficiente de entrada de pérdida de energía y k_{ex} coeficiente de salida de pérdida de energía. Para el flujo de un canal de entrada, k_{en} se toma generalmente entre 0.005 y 0.25. Para las entradas naturales, que redondean o tienen alguna complejidad, $k_{en} \approx 0.05$ o menos. Para las entradas con muelles y el flujo de salida o que el flujo gira bruscamente al entrar en el canal de la boca, $k_{en} = 0.25$ puede ser el apropiado. El coeficiente de salida k_{ex} , se define con un valor igual a uno. Si el flujo de masa es de magnitud importante al interior del canal, k_{ex} podría ser inferior a uno. El cálculo de F para el canal oeste se relaciona en la ecuación 24.

La simple relación de la amplitud de las mareas del mar a_o con la amplitud de la onda de marea en la laguna a_b y la fase de retraso entre estas dos ondas de marea (ϵ) (en la entrada de la boca y en la laguna) son función de K , la figura 5-27 y 5-28 presenta las relaciones encontradas por Keulegan (1967) para amplitudes $\left(\frac{a_b}{a_o}\right)$ y la fase. Los valores de estas amplitudes para la laguna de Mecoacán son los siguientes:

Amplitud de la marea= $a_o = 0.3$ m

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Amplitud en la laguna= $a_b = 0.18$ m

El desplazamiento de fase entre la marea oceánica y la marea en la laguna se determinó igual a $\varepsilon = 86^\circ$.

Por otra parte, la Figura 5-29 indica la ubicación espacial de puntos de análisis en la laguna de Mecoacán durante todo el tiempo de simulación numérica, donde se ilustra la relación de las amplitudes de marea en la laguna de Mecoacán (ver Figura 5-30).

Figura 5-27 Análisis de marea para cálculo de fase (Keulegan 1967). Aplicado a la laguna de Mecoacán, la marea oceánica línea negra y marea en el interior de la laguna.

Figura 5-28 Relaciones de Keulegan para definir la hidrodinámica lagunar.

Figura 5-29 Puntos analizados en la pleamar de la modelación condiciones normales.

Figura 5-30 Amplitudes en puntos de la Laguna de Mecoacán durante la modelación en condiciones normales.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

De acuerdo al trabajo presentado por King (1974), el valor de coeficiente de llenado (K) puede relacionarse con los parámetros K1 y K2 de la siguiente manera:

$$K_1 = \frac{a_o A_b F}{2LA_c} \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{LA_b}{gA_c}} \quad (25)$$

La relación de los dos parámetros,

$$K = \frac{1}{K_2} \sqrt{\frac{1}{K_1}} = 0.1405$$

El valor del coeficiente de llenado (K de Keulegan) se utiliza para evaluar los efectos de grandes variaciones en las condiciones de flujo de la boca lagunar. A un menor valor del coeficiente K o llenado, menor es el rango de mareas en la cuenca y mayor el retraso de fase.

De acuerdo a Keulegan, cuando el $K < 0.6$, es indicativo de un predominio del reflujo en la capacidad de transporte, lo que a su vez implica que el sedimento se acumule en la zona litoral de la boca. Así, para bocas con valores de K pequeños, como es el caso de la laguna de Mecoacán, el flujo de bajamar es más intenso e induce un mayor transporte de sedimentos.

Los valores de K son indicativos del forzamiento mareal sobre el canal de la boca lagunar. Cuando el valor de K se incrementa, la laguna tiende a llenarse completamente. Esto se debe a que el valor de bajamar y las corrientes al interior del canal tienden a ocurrir cerca del mismo nivel de marea. Para valores de K en el intervalo de $0.6 < K < 0.8$, se define una condición de entrada de sedimentos en su máxima capacidad de lavado. Mientras que para valores de $K > 0.8$, se determinan condiciones erosivas con una dominancia del flujo en la capacidad de transporte de sedimentos, principalmente en el transporte laguna adentro (US. Army 2002)

King define con los parámetros a-dimensionales K1 y K2 la máxima velocidad en la sección transversal durante el ciclo mareal, utilizando la siguiente expresión:

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

$$V_m = \frac{V'_m 2\pi a_o A_b}{A_c T} \quad (26)$$

Donde el valor de V'_m es encontrado con el parámetro K , en la figura 5-31 se muestra la relación de estos dos parámetros. Por lo que el valor de Las corrientes de flujo máxima, V_{max} , se define en la ecuación (26). V_{max} se conoce también como la fuerza de la corriente. Para este caso, el valor de la velocidad $V_{max} = 0.52$ m/s, para el canal oeste.

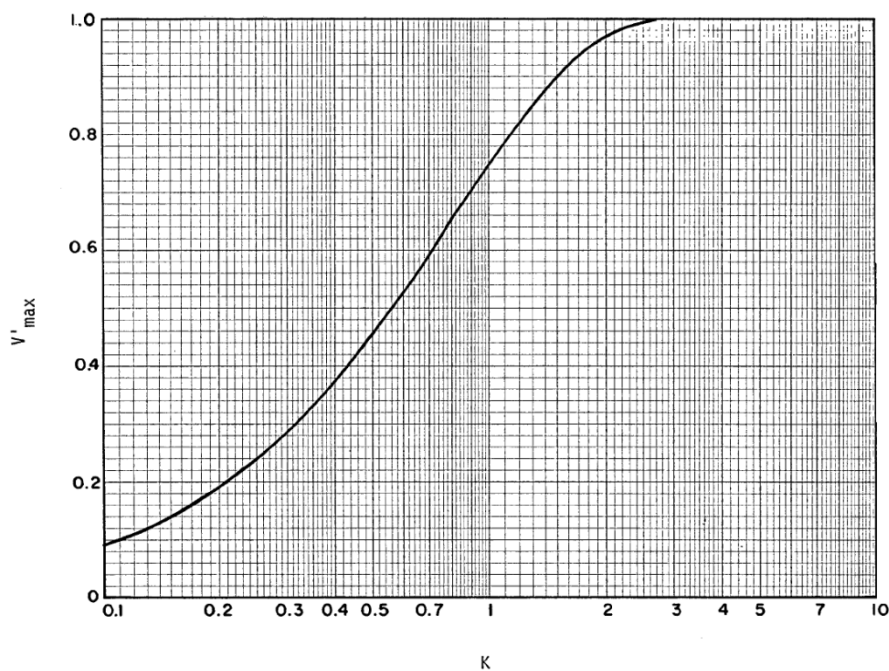


Figura 5-31 Relación del K con la V'_{max} .

El cálculo del prisma de marea nos sirve para encontrar la relación del volumen de agua con la sección transversal de la boca. Este parámetro se define como el volumen de agua que entra a la laguna por el canal de la boca durante el flujo menos el volumen en el refluo de la marea y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P = 2a_o A_b \quad (27)$$

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Otra técnica para la estimación del prisma es utilizar la velocidad observada (o flujo Q) de datos (Dean 1971):

$$P = \frac{TQ_{max}}{\pi} = P = \frac{TV_{max}A_c}{\pi} \quad (28)$$

Para el canal Oeste, el prisma de marea es de $5.6199 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Existe una relación del prisma de marea o el flujo que genera a través de la entrada y el área mínima de sección transversal puede ser mantenida por ese flujo. $A_c = \alpha P^k$ (O'Brien, 1969). Esta área explica cual es el la mínima sección necesaria para que entre un determinado volumen de agua.

En la literatura se encuentra una gama muy amplia de valores y formulaciones para evaluar los coeficientes α y K . Por ejemplo, existe el criterio de (O'Brien, 1969), quien a partir de la caracterización de 28 bocas lagunares en los Estado Unidos, sugiere los valores $\alpha = 4.69 \times 10^{-4}$ y $K = 0.85$. Estos valores se analizaran más adelante.

	Brazo Este	Brazo Oeste	
Profundidad media de la entrada del canal	1.8	1.9	m
Ancho del canal	450	203.5	m
Área del canal o área de la sección transversal	810	386.65	m ²
Radio Hidráulico	1.7857	1.865	m
Longitud del Canal	3485	2881	M
Área de la Laguna o Bahía	62000000	62000000	m ²
Periodo de marea	88200	88200	S
Factor de Fricción: Para n (Parámetro de Manning) = 0.0275	0.0723	0.0713	
Amplitud de la marea	0.249	0.266	M
Amplitud en la laguna	0.181	0.181	M
Fase	82	75	grados
K	0.27	0.145	
Vm	0.52	0.48	m/s
Gasto máximo	263.94	140.98	m ³ /s
Prisma de Marea	7.41E+06	3.96E+06	m ³

Tabla 2 Parámetros hidráulicos canales de la boca de Mecoacán.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Este procedimiento de cálculo de los parámetros hidráulicos para la determinación de la estabilidad de la boca lagunar de Mecocacán, se realizó para ambos canales (Oeste y Este), un resumen de estos valores se presenta en la Tabla 2.

5.5.2. ESTABILIDAD DEL SEDIMENTO

Una vez definidos los parámetros hidrodinámicos de la boca (prisma de marea, velocidad máxima etc.) se relacionarán estos valores con la velocidad de inicio del sedimento para tratar de diagnosticar una posible evolución de la sección transversal del canal.

El área transversal que favorece al equilibrio de la boca lagunar, se determina con el prisma de marea a partir del gasto máximo que entra o sale del sistema por efecto de la marea astronómica. Por medio de la estimación de la velocidad de cortante inducida por la corriente de marea, se puede determinar el esfuerzo cortante inducido por este forzamiento. En caso de que el valor de este parámetro sea mayor al parámetro de Shields, se puede estimar el inicio de movimiento del sedimento, indicando así la capacidad de transporte de material en la boca lagunar.

Para derivar la velocidad de cortante se utiliza la descarga máxima representativa, y su velocidad asociada (velocidad de equilibrio), respectivamente expresada como:

$$V = \frac{2P}{A_c T} \quad (29)$$

Por su parte el parámetro de Shields (ψ) está definido como:

$$\psi = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w) g d_e} \quad (30)$$

Donde:

ρ_w es la densidad del agua

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

ρ_s es la densidad de la arena

g es la aceleración de la gravedad

d_e es el diámetro medio del sedimento

τ_0 es el esfuerzo cortante característico o representativo

Los valores de la densidad y el diámetro del sedimento, para los dos canales son supuestos por criterios definidos en el trabajo realizado por Galavíz-Solís (1985), donde se describe al material de la boca lagunar como arenas finas y muy finas. De acuerdo a la inspección visual durante la campaña de campo, se determina que el material predominante es el cuarzo, con abundante material orgánico.

El cálculo del parámetro de Shields (ψ) se realiza mediante el uso de un diámetro de grano adimensional que se define como:

$$D_* = \left[(\rho_s - \rho_w) / \rho_w \left(\frac{g}{\nu^2} \right) \right]^{-1/3} d_e \quad (31)$$

Donde ν es la viscosidad. Este valor es igual a $0.9 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$ la cual se halla a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una salinidad de 35 ups. La relación de este parámetro (D_*) puede encontrarse por varias funciones de diferentes autores, de los cuales se utilizó el de Chien and Wan (1983), según el valor encontrado de $D_*=3.94$ la relación de D_* con Ψ es:

$$\Psi = \{0.131D_*^{-0.55}\} \quad \text{Para valores de } 1.5 \leq D_* < 10$$

$$\Psi = 0.0616$$

Aplicando la formula de Shields (ecuación 30):

$$\tau_0 = (\rho_s - \rho_w)gd_e\Psi = 0.1961$$

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Utilizando la fórmula del esfuerzo cortante característico o representativo, se encuentra la velocidad asociada al sedimento:

$$\tau_0 = \rho_w g \left(\frac{V}{C}\right)^2 \quad (32)$$

Despejando:

$$V_s = \sqrt{\frac{\tau_0 C^2}{\rho_w g}} = 0.17$$

Donde C es el coeficiente dimensional de Chezy (m^3/s). Para aplicaciones ingenieriles es común que se prefiera utilizar el coeficiente de fricción de Manning en lugar del parámetro de Chezy. Una relación muy utilizada para realizar el cambio de parámetros es con el uso de la siguiente fórmula:

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} = 40 \text{ m}^3/s \quad (33)$$

Donde h es la profundidad característica. El reporte de los parámetros utilizados para determinar la velocidad de movimiento de sedimentos en ambos canales de la boca lagunar se resume en la tabla 3.

	Brazo Este	Brazo Oeste	Unidades
Densidad del agua	1027	1027	kg/m ³
Densidad de la arena	2650	2650	kg/m ³
Diámetro medio del sedimento	0.2	0.2	Mm
Viscosidad (a 25°C, salinidad 35 ppt)	0.00000092	0.00000092	/s
Diámetro adimensional	3.94	3.94	
Parámetro de Shields	0.0616	0.0616	
Esfuerzo cortante característico o representativo	0.1961	0.1961	
Coeficiente dimensional de Chezy	40.1	40.46	m ³ /s
Velocidad de inicio de Movimiento de Sedimento	0.1786	0.177	m/s

Tabla 3 Parámetros de cálculo de velocidad del sedimento.

Al relacionar la velocidad máxima (V_{max}) con la velocidad de arrastre del sedimento (V_s) encontramos que esta última es menor a la velocidad que puede alcanzar el flujo en los canales, lo que considera que debe existir un arrastre

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

constante y abundante de sedimento por el flujo y reflujo a velocidades superiores de 0.17 m/s.

5.5.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EQUILIBRIO

El análisis de estabilidad de la boca lagunar se limita a la sección transversal de la misma (Van de Kreeke, 1990). Así, se considera que una boca está en equilibrio cuando la tasa neta de depósito de sedimento en ella es cero. La estabilidad implica que la sección transversal se adapta continuamente a las condiciones hidrodinámicas y fluctúa alrededor de un valor medio, llamado “sección transversal de equilibrio”.

Entre los primeros trabajos referentes a este concepto se tiene el desarrollado por Escoffier (1940,1977). Él propuso un diagrama en el cual la velocidad máxima del flujo a través de la boca es función de la sección transversal, la cual varía en un amplio rango de valores. Dicha curva, llamada “curva de cerrado” de la boca (“closure curve”) presenta un pico de velocidad, con una correspondiente sección transversal crítica. La curva de cierre de la boca presenta un pico de velocidad para un área crítica correspondiente de A_c . Esta curva se construye relacionando las velocidades máximas con los parámetros de Keulegan y un amplio intervalo de valores de la sección transversal (A_c). Según Escoffier (1940), la entrada es estable (es decir, tiene la capacidad de volver a su configuración inicial después de una perturbación) si el área real de la sección transversal de la entrada es mayor que el área crítica (ver Figura 5-27), $A > A_c$, e inestable cuando $A < A_c$.

Para el caso de Mecoacán el valor de área transversal crítica es 390 y 395 m² para los canales oeste y este respectivamente (pico de la curva, ver figura 5-32 y 5-33). Si se relacionan los valores de área del canal encontrados en campo (386.65 m² canal oeste y 810 m² canal este) y los valores de área crítica, es posible determinar que la boca este se encuentra estable y la oeste inestable (estable cuando $A > A_c$, e inestable cuando $A < A_c$) (ver Figura 5-28).

Figura 5-32 Curva de cerrado. Análisis de Escoffier (1940).

Figura 5-33 Curva de cierre (Escoffier 1977). Aplicación a Bocas lagunares Laguna de Mecoacán, en Rojo Curva para el canal Oeste y en negro para el canal Este.

Este enfoque da un intervalo de superficies para los que la entrada no se cierra, pero no especifica cuál sería el equilibrio real de la sección transversal de los canales. Escoffier sugirió que el equilibrio de la boca requería de una velocidad máxima específica, la “velocidad máxima de equilibrio” (V_E).

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Velocidades mayores a la velocidad de equilibrio causan erosión en la boca (y el consiguiente aumento de la sección transversal), y velocidades menores causan depósito de sedimento en la boca.

Suponiendo que la curva de cerrado intersecta la curva (o línea) de equilibrio en dos puntos, es posible ver que la intersección del lado decreciente de la curva de cerrado representa una condición de equilibrio estable y la intersección del lado creciente representa una condición de equilibrio inestable.

Para trazar la curva de velocidades máximas de equilibrio sobre la curva de cerrado, se utilizó el criterio de estabilidad de O'Brien, (1931). Donde A_c es la mínima área transversal de la garganta del canal relativo al nivel medio del mar, k y α son coeficientes empíricos.

$$A_c = \alpha P^k \quad (34)$$

Los valores de α y K se definen de acuerdo al criterio propuesto por (O'Brien, 1969), como: $\alpha = 4.69 \cdot 10^{-4}$ y $K = 0.85$.

Otros procedimientos generalizan y asocian los parámetros a grupos de bocas con características similares tal y como se reporta en la Tabla 4.

Autor	α	Zona de estudio	Nota
(O'Brien, 1969)	$1.08 \cdot 10^{-4}$	28 bocas en EEUU	Mareas vivas
(Powell et al., 2006)	$6.25 \cdot 10^{-4}$	66 bocas en la Florida EEUU	Mareas vivas
(Eysink, 1990)	$7.00 \cdot 10^{-5}$	Mar de Wadden, Holanda	Marea media
(Stive and Rakhorst, 2008)	$5.65 \cdot 10^{-5}$	Mar de Wadden (oeste), Holanda	Máximo del flujo o reflujos medio
(Stive and Rakhorst, 2008)	$7.75 \cdot 10^{-5}$	Mar de Wadden (este), Holanda	Máximo del flujo o reflujos medio
(Van de Kreeke and Haring, 1979)	$8.02 \cdot 10^{-5}$	Zelanda holandesa	

Tabla 4 Los valores de α y K planteados por diferentes autores.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

Para el cálculo de las curvas de equilibrio aplicadas a Mecoaacán se escogieron los parámetros α y K utilizando las relaciones encontradas por el parámetro del sedimento de Shields y prisma de marea. Así, se desea determinar la ecuación que relaciona el área de la sección transversal y el prisma de marea que fluye a través de las bocas de la laguna así:

$$\tau_0 = \rho_w g \frac{V_{max}}{C} = \rho_w g \left(\frac{2P}{CTA_c} \right) = \Psi(\rho_s - \rho_w) g d_e$$

Despejando el Área mínima de sección trasversal A_c para Boca oeste:

$$A_c = \left[\frac{4\rho_w}{\Psi(\rho_s - \rho_w) d_e C^2 T^2} \right]^{1/2} P = 5.8491 \times 10^{-5} P$$

En la figura 5-34 se muestran las curvas de velocidad crítica aplicadas a cada canal de la boca.

Dean (1971) y O'Brien (1931) determinaron que para un periodo de marea $T=44.640$ horas, la velocidad máxima que se permite para mantener un área de flujo de equilibrio es de 1 m/s.

Por lo tanto, se puede intuir que la acción de las olas provee de arena al canal de la boca tendiendo a reducir el área de sección transversal, mientras que el flujo de la boca erosiona cualquier depósito y reduce la sección transversal del canal por debajo de su valor de equilibrio.

Bruun (1978) propuso una explicación para dicho fenómeno, sugiriendo que para los tamaños de grano promedio encontrados en bocas naturales, la velocidad de 1 m/s es justo la velocidad necesaria para aplanar el fondo móvil de la boca (i.e. para eliminar las formas de fondo) y de esa forma minimizar las pérdidas por fricción y maximizar el transporte de sedimentos. Sin embargo,

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

debido a la compleja interacción entre el oleaje y la corriente reversible de la marea, se ha observado que las formas de fondo son comunes en las bocas, lo cual hace suponer que la velocidad de equilibrio puede ser bastante menor a 1 m/s.

De acuerdo a las velocidades encontradas para todos los escenarios simulados en este trabajo de investigación, para el caso Mecoacán las velocidades críticas asociadas a diferentes áreas transversales son superiores a 1 m/s (1.25 m/s brazo este y brazo oeste 1.07 m/s), lo que supone una diferencia mayor de los valores propuestos por Escoffier (1977), Bruun (1978) y O'Brien (1937).

En la figura (5-29) se presentan para cada canal de acceso a la laguna, dos graficas referente a las velocidades calculadas por el modelo bajo el forzamiento de los distintos escenarios. Las velocidades más altas están asociadas al escenario de marea de tormenta que de acuerdo a lo discutido, indudablemente erosionarían la boca lagunar, encontrando los mayores implicaciones en el refluo (velocidades de flujo < velocidades de refluo). De forma similar, para los valores de velocidad asociados a el resto de los escenarios simulados, las velocidades superan el valor de equilibrio encontrado por la curva de velocidad de equilibrio (V_E) mostrada en la Figura 5-28. Esto indica que en ambos canales se tendría una pérdida de sedimento y en consecuencia, una inestabilidad de la boca lagunar.

Las velocidades asociadas al prisma de marea encontradas por el análisis hidrodinámico de Keulegan (0.52 m/s canal este y 0.48 m/s canal Oeste) no superan los valores de equilibrios definidos en la curva de Escoffier. Esta relación traduce que los canales de la boca, en condiciones normales de forzamiento, están acumulando sedimentos constantemente, lo cual llevaría, según la curva de Escoffier, a cerrar el canal oeste por no encontrarse estable.

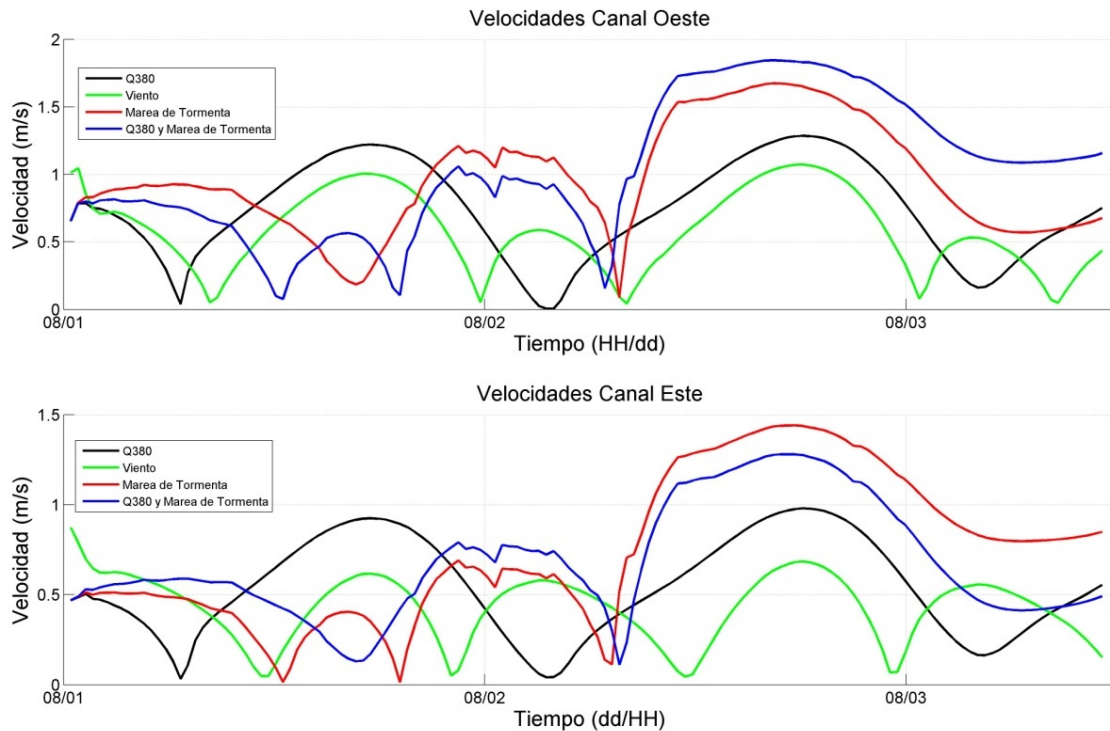


Figura 5-34 Velocidades calculadas por el modelo en distintos escenarios de forzamiento.

Otro factor importante en el análisis de la curva de Escoffier para Mecoacán, es que la curva no intercepta la curva velocidad de equilibrio (o línea de equilibrio) en más de un punto. En consecuencia, no es posible ver la intersección del lado decreciente de la curva de cerrado, que representa una condición de equilibrio estable. Sin embargo, la intersección única en el lado creciente representa una condición de equilibrio inestable. Este último punto de intersección (Figura 5-35) representa un límite de inestabilidad, en la que si el área disminuye, las velocidades decrecen hasta que la boca se cierra.

Si el desplazamiento se da a la derecha de este punto, a medida que aumenta la velocidad el área lo hace proporcionalmente hasta que la velocidad comienza a disminuir. En conclusión, en virtud de que la curva de equilibrio es tangente a la curva de cerrado o por debajo del criterio de estabilidad, las entradas se cierran.

Figura 5-35 Boca lagunar de Mecoacán.

Es posible demostrar el dinamismo de la boca según lo planteado en este análisis de estabilidad, por medio de los cambios a través del tiempo de la entrada lagunar. En la Figura 5-36 se muestran diferentes configuraciones de la boca a lo largo del tiempo, donde se evidencia la apertura de la boca Oeste y la acumulación de sedimento en los dos canales. En la actualidad, el arrastre de material que se observa en el canal Oeste está favoreciendo su cierre.

En caso de presentarse, la configuración con el cierre de uno de sus brazos modificaría la hidrodinámica en la boca lagunar con lo que se produciría una nueva condición morfodinámica, cambiando a su vez la condición de estabilidad de la misma.

Capítulo 5 – Diagnóstico del sistema

La Figura 5-36 presenta una secuencia temporal referente a la configuración periódica de la boca: a) descripción de Galavíz-Solís et al. (1985); b) Fotografía satelital Google Earth 2006; c) Fotografía Satelital multicromática del año 2008 Plan Hídrico de Tabasco 2009, (Pedrozo Acuña-Rodríguez Rincón, 2009) d) Fotografía estéreopar del año 2009 (Pedrozo Acuña-Rodríguez Rincón, 2009).

Figura 5-36 Secuencia del comportamiento periódico de la boca lagunar de Mecoacán.

La Figura 5-36 revela diferencias claras en la configuración de la boca lagunar de Mecoacán a través de un corto periodo de tiempo. Esto implica un gran dinamismo en la configuración morfológica de este sistema.

CAPITULO 6
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado presentó un estudio detallado de la hidrodinámica de la Laguna de Mecoacán, Tabasco. Para este propósito, se utilizaron dos vías de trabajo paralelas, compuestas por una campaña de campo para la caracterización del sistema y la calibración de un modelo numérico bidimensional para la generación de escenarios de operación con forzamientos extraordinarios. El análisis incluyó la descripción de la distribución de la salinidad y de la temperatura al interior del sistema, evaluando el cambio de estos parámetros bajo las condiciones de forzamiento descritas.

Respecto a la evolución de las condiciones morfológicas de la laguna, el modelo no desarrolla cambios de forma a través del tiempo de cálculo, es decir la forma de los canales y la forma de la laguna permanecen constantes, de igual manera los cambios de fondo por fricción no se generan. Estos factores pueden alterar los resultados de las velocidades y gastos en los distintos escenarios establecidos. A pesar de esto el modelo validado se puede utilizar para estimar escenarios críticos de forma adecuada y acertada, además la homogeneidad vertical de las condiciones de salinidad y temperatura de la laguna justifican el uso del cálculo promediado en la vertical de este modelo numérico.

A continuación se presentan las conclusiones finales:

- La hidrodinámica lagunar de Mecoacán, está dominada principalmente por la circulación asociada a las corrientes de marea. Esto permite identificar el comportamiento hidrodinámico de la boca lagunar, como un estuario dominado por factores marinos.
- Respecto a las condiciones de salinidad en la laguna, se identificaron cuatro zonas que describen la interacción mar-río en el sistema.
- Respecto a la variación de la temperatura se identificaron a la radiación solar y la marea como los factores externos principales en su distribución al interior de la laguna.

Capítulo 6 – Conclusiones y recomendaciones

Con base en los resultados del modelo numérico utilizado se tiene lo siguiente:

- El modelo numérico seleccionado describió de forma muy satisfactoria los flujos y la circulación alrededor de la boca lagunar que se midieron durante la campaña de campo.
- Gracias al carácter somero de la laguna, fue posible utilizar el modelo numérico para simular y describir la distribución de la salinidad, temperatura y densidad en su interior de forma satisfactoria.

Adicionalmente, se tienen las siguientes conclusiones específicas:

- Se mostró que el flujo del Río Hondo, en condiciones normales, está modulado por la marea, disminuyendo notablemente su velocidad e incluso logrando a revertir la dirección del flujo en mareas vivas. Para este río se estimó un caudal promedio de 42 m³/s y máximo de 65.97 m³/s.
- Por lo que respecta a la hidrodinámica al interior del cuerpo lagunar, se demostró que a pesar de su carácter somero, existe circulación termohalina inducida por la interacción de las masas de agua provenientes del océano y el río, identificados a la entrada de la boca lagunar y el río Hondo, respectivamente.
- Las velocidades en el interior del cuerpo lagunar tienden a ser muy pequeñas, lo que indica que la hidrodinámica interior es baja y dominada por el forzamiento del viento.
- El brazo este de la boca es hidráulicamente más eficiente, que el brazo oeste tanto para las condiciones normales como para condiciones extremas modeladas.
- Las observaciones de las condiciones termohalinas en sitios cercanos a la boca sugieren que el grado de intrusión de agua marina al interior del sistema se encuentra modulado por la variación del nivel del mar. El aporte los ríos Hondo y Seco es muy bajo lo cual no regulan de forma significativa los valores de salinidad en la boca.

Capítulo 6 – Conclusiones y recomendaciones

- Se identificó que cerca de la entrada de agua dulce y agua salada al sistema, el comportamiento de los factores termohalinos es uniforme, lo que permitió el uso de un modelo hidrodinámico en dos dimensiones.
- Referente al transporte de temperatura al final de la validación del modelo y su comparación con las mediciones realizadas en campo. Se muestra un buen ajuste del modelo numérico cerca de las zonas donde se ubican las condiciones de entrada y salida del sistema (boca lagunar y río Hondo). Sin embargo, se observan pequeñas diferencias en las condiciones al centro de la laguna, estas se adscriben al tipo de modelo utilizado (i.e. promediado en la vertical).
- Los resultados obtenidos para todos los escenarios descritos, indicaron que la laguna de Mecoacán es un excelente amortiguador hidráulico ante eventos de extraordinarios por incremento en el gasto del río y sobre-elevación del nivel de mar.

Respecto a los diferentes escenarios reproducidos se tienen las siguientes conclusiones:

- La Isla Andrés García, tiene una alta vulnerabilidad a desastres por inundación por sobre-elevación del nivel medio del mar (ej. marea de tormenta). Elevaciones superiores a 1.3m inundarían casi en totalidad a la isla.
- El cambio en la salinidad al interior del sistema que resulta de la incidencia de un evento de marea de tormenta no es permanente y el sistema busca volver a su estado inicial o de equilibrio.
- En el caso de un gasto extraordinario en el río Hondo, el régimen de salinidad de la laguna se vería muy afectado cambiando en todo el interior de la laguna por los aportes excedentes de agua dulce.
- La condición de viento extraordinario intensifica la circulación al interior de la laguna. El viento es el factor más importante para favorecer la mezcla al interior de la laguna.
- En el caso de condiciones simultáneas, marea de tormenta y gasto extraordinario se modifican considerablemente los regímenes de salinidad y temperatura al interior de la laguna y se verifica la alta

Capítulo 6 – Conclusiones y recomendaciones

vulnerabilidad de la Isla Andrés García ante inundaciones costeras. Sin embargo, el forzamiento más crítico es el que representa una alteración en el gasto del río Hondo.

- De acuerdo al análisis de estabilidad de la boca lagunar realizado con la curva de Escoffier, se concluye que el brazo Este de la boca lagunar se encuentra estable mientras que el brazo Oeste es inestable.
- Las velocidades registradas bajo los distintos escenarios modelados, indican que las corrientes más altas están asociadas al evento de marea de tormenta, demostrando que estas podrían erosionar la boca, especialmente en condiciones de reflujos.
- Se encontró que los canales de la boca en condiciones normales de forzamiento, están acumulando sedimentos; de acuerdo a la curva de Escoffier, se determinó que el canal oeste tenderá a cerrarse por no encontrarse estable. El temporal cierre del canal Oeste realizaría un incremento de capacidad hidráulica del canal Este, lo cual en un evento de gasto extraordinario del río Hondo podría ensanchar este canal y realizar un transporte más importante hacia la costa permitiendo el cierre definitivo del canal Oeste por la acumulación de sedimentos.

CAPITULO 7
FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

7. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Para esta investigación se busco en la medida de lo posible, caracterizar las condiciones hidrodinámicas de la laguna de Mecoacán. Sin embargo este trabajo abre las puertas para que en el futuro se permita mejorar significativamente el entendimiento de este sistema lagunar. Por este motivo cabe rescatar como futuras líneas de trabajo a las siguientes:

- Realizar un estudio sobre la morfodinámica de la laguna, en especial su boca, bajo ambas condiciones normales y asociadas a eventos extremos.
- Analizar cambios en el río Hondo, como dragados o ensanchamientos hipotéticos y modelarlos para verificar el funcionamiento de la laguna con caudales mayores a $380\text{m}^3/\text{s}$.
- Realizar modelaciones con la condición de frontera abierta en el contorno del interior de la laguna, para analizar otras posibles zonas de inundación en distintos escenarios de forzamiento.
- Encontrar una correlación de parámetros de estabilidad para sistemas lagunares en el golfo y propiamente para el sistema de Mecoacán. Ya que las relaciones hidráulicas utilizadas están establecidas para sistemas lagunares en otras zonas con características diferentes (periodos de mareas mayores, morfologías diferentes, etc.).

CAPITULO 8
BIBLIOGRAFIA

8. BIBLIOGRAFIA

Aguilera G., F.A., 1977. *Contribución al conocimiento hidrológico de la laguna de Mecoacán, Puerto Ceiba, Tabasco*. Tesis 477 Profesional. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California. 83 p.

Amaro L. A., 2010. *Evaluación de escenarios de inundación en el Río González, Tabasco*, Tesis de Licenciatura. Facultad de ingeniería civil. UNAM.

Abott, M.B.; Havnø, K.; Lingberg, S., 1991. *The fourth Generation of numerical modelling in Hydraulics*. IAHR Journal of Hydraulic Research. Vol. 29, N° 5.

Barba, E, A Raz-Guzman and AJ Sánchez, 2005. *Distribution patterns of estuarine caribbean shrimps in the southwestern Gulf of Mexico*. Crustaceana 78(6):709-726.

Berthier E, Arnaud Y, Vincent C, Remy F., 2006. *Biases of SRTM in high mountain areas: implications for the monitoring of glacier volume changes*. Geophys Res Lett, 33: L08502. doi:10.1029/2006GL025862.

Bender, M. A. Thomas R. Knutson, Robert E. Tuleya, Joseph J. Sirutis, Gabriel A. Vecchi, Stephen T. Garner, Isaac M. Held, 2010. *Modeled Impact of Anthropogenic Warming on the Frequency of Intense Atlantic Hurricanes*, Science, Vol. 327, no.5964, pp454-458, doi:10.1126/science.1110568.

Botello,V., A., Ponce, A. Toledo, G. Diaz y S. Villanueva, 1992. *Ecología. recursos costeros y contaminación en el Golfo de México.*, Ciencia y Desarrollo, vol. XVII. (102): 28-48.

Botello V., A., Castro A., S., y De la Torre P., A., 1981. *Niveles actuales de hidrocarburos disueltos en los sistemas lagunares del estado de Tabasco, México*. Informe final. ICMYL, UNAM. México, 20 p.

Brown, E. I. 1928. *Inlets on Sandy Coasts*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 54, Part I, pp 505-523.

Capítulo 8 – Bibliografía

Bruun, P., 1962, *Sea-level Rise as a Cause of Shore Erosion*, Journal of Waterways Harbors Division, American Society of Civil Engineers, 88, 117–130.

Castelum C., J. O., 1979. *Distribución superficial de las variables físico-químicas: T°C, So/oo, O ml/l y pH; en la laguna de Mecoacán del estado de Tabasco, México., durante un ciclo anual*. Tesis profesional. UABC. 67 p.

Carranza-Edwards, A, M Gutiérrez-Estrada y R Rodríguez Torres, 1975. *Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas*. Anales ICMYL, UNAM 2(1):81-88.

CONAGUA, SEMARNAT, 2008. *Plan Hídrico Integral de Tabasco*. Pág. 40.

Cserna, Zoltan, 1972, Essay review of Stratigraphie and stratotypus; Journal science, V 272, nº 2, Pp. 189-194.

Day, W.J.JR., A.C. Hall., M.W. KEMP, y A. Yanez-Arancibia. 1989. *Estuarine Ecology*. John Wiley & Sons, New York

De La Lanza G., Gómez, S., 1999. *Fisicoquímica del agua y cosecha del fitoplancton en una laguna costera tropical*. Ciencia Ergo Sum 6 (2), Universidad Autónoma de México, pp. 143-153.

Díaz González, G.; Vásquez Botello, A. y Ponce Vélez G. 1994. *Contaminación por hidrocarburos aromáticos y policíclicos (HAP'S) disueltos en la Laguna de Mecoacán*. Hidrobiología 4, pp. 21-27

Duran Valdez G. 2010. *Análisis del peligro por marea de tormenta en el golfo de México*. Tesis de maestría. Instituto de ingeniería. UNAM

DHI Water and Environment. 2007. MikeFlood, Modelling of River Flooding. DHI software. Pág. 3-10.

Emmanuel, K., 2007. *Environmental Factors Affecting Tropical Cyclone Power Dissipation*, Journal of Climate, Vol.20, American Meteorological Society, 5497-5508p. doi:10.1175/2007JCLI157.1

Farr, et al. 2007. *The Shuttle Radar Topography Mission*. NASA, the National Geospatial-Intelligence, Agency, and the German and Italian Space Agencies,

Capítulo 8 – Bibliografía

Geophys. 45, p. RG2004 10.1029/2005RG000183. Texto completo <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4072510>. 2007

Fragoso L., Ruiz y Zurvia Flores, R., Juárez León, B.A., Sandoval Castilla, 2006, *Hidrodinámica de lagunas costeras a través del Tide-Way-2D*, Noticias, Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria. Año 2, No 8.

Galavíz Solís A, Gutierrez-Estrada M, Castro del Rio A. 1987. *Morfología, sedimentos e hidrodinámica de las lagunas Dos Bocas y Mecoacán, Tabasco, México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Anales Del Instituto De Ciencias Del Mar y Limnología;14(2):109–24.

Gómez Angulo, H., 1977. *Determinación en la laguna costera Mecoacán de Tabasco, México*. Departamento Autónomo de Pesca. Ensenada. Ciencias Marinas Vol. 4 Núm 1.

Hernández Santana, J.R., Ortiz Pérez M., Méndez Linares A.P. y Gama Campillo L., 2008. *Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente*. Investigaciones geográficas, Boletín Instituto de Geografía Núm. 65, 2008, pp. 7-21. UNAM

INEGI. *Carta de Climas escala 1:1.000.000. México 1980*. (Versión digital 2005). <http://www.inegi.org.mx/>.

IPCC, 2007: *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

Kjerfve, B. 1994. *Coastal Lagoons Processes*. Elsevier. New York. - Apuntes clases Sistemas Litorales – 2010

Keulegan, G. H. 1967. *Tidal Flow in Entrances Water-Level Fluctuations of Basins in Communications with Seas*, Boletín técnico No. 14, Committee on

Capítulo 8 – Bibliografía

Tidal Hydraulics, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

King, D. B. 1974. *The Dynamics of Inlets and Bays*, Reporte técnico No. 2, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, Universidad de Florida. Gainesville.

Lopez-Portillo G. J. A., 1982. *Ecología de manglares y de otras comunidades de halofitas en la costa de la laguna de Mecoaacán, Tabasco*. Tesis profesional. Fac. Ciencias. UNAM. 160 p.

Nicholls, R. J., Frank, M. J., Hoozemans, Marchand M. 1999. *Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses*, Global Environmental Change, Vol. 9, pages 69–87.

Nicholls, R. J. 2002. *Rising sea levels: potential impacts and responses*, Issues in Environmental Science and Technology, Vol. 17, pages 83–107.

O'Brien, M. P. 1931. *Estuary Tidal Prisms Related to Entrance Areas*. Civil Engineering, pp 738-739.

O'Brien, M. P. 1969. *Equilibrium Flow Areas of Inlets on Sandy Coasts*. Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, No. WWI, pp 43-52.

O'Brien, M. L., and Dean, R. G. 1972. *Hydraulics and Sedimentary Stability of Coastal Inlets*. Proceedings of the Thirteenth Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vancouver, Canada.

Ortiz Pérez M., Méndez Linares A., 2000. *Componentes naturales y de uso del suelo vulnerables a las variaciones del nivel del mar en la costa atlántica de México*. Investigaciones Geográficas. Boletín Instituto de Geografía Núm. 39, 1999, pp 68-81. UNAM

Ortiz Pérez, M.A., y de la Lanza Espino, G. 2006. *Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario Regional*. En Geografía para el siglo XXI. Instituto de geografía, México: Textos Universitarios.

Capítulo 8 – Bibliografía

Padilla y Sánchez, R. J 2007. *Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LIX, núm. 1, p. 19-42.

Pedrozo Acuña, A. 2011. *Introducción a la morfodinámica costera*. Serie Docencia, Instituto de Ingeniería, ISBN en trámite.

Pedrozo Acuña, A. Medellín Mayoral, G., Rodríguez Rincón J.P., Hidalgo Garnica, L.E., Osegueda Escorza, A.S., Amaro Loza, A., Mariño Tapia, I., Enríquez Ortiz, C., Sosa Hernández, A. Uc E., 2009; *Anexo 2 - Procesos Costeros y Sistemas Lagunares PHIT – Fase 2*, Informe final de la salida de Campo, Coordinación de Hidráulica, IIUNAM.

Pedrozo-Acuña, A., Mariño-Tapia, Enriquez, C., Medellín-Mayoral, G., González-Villareal, F., 2011, *Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea: A case study in Tabasco Mexico*. Hydrological Processes, en imprenta Wiley and Sons.

Psuty, N. P., *The Geomorphology of beach ridges in Tabasco, México*. Louisiana State Univ. Coastal Studies Inst. Tech., 1966. 1-21.30:
PEMEX (Petróleos Mexicanos), 2005, *Anuario Estadístico*, en: www.pemex.com.

Raisz, E. 1964 *Landforms of Mexico. Geography Branch*. U.S. Office of Naval Research. Cambridge.

Reyes de La Cruz, A, López Ocaña G., y Hernández Trejo, H. 2002. *Evaluación preliminar sobre de los efectos de la inundación en el mangle*. División Académica de Ciencias Biológicas. UJAT, México, pp. 135-139.

Rodi, W. 1984. *Turbulence models and their applications in hydraulics*, IAHR, Delft, the Netherlands.

Rodríguez Rincón, J.P., Pedrozo Acuña, A., Mariño Tapia, I., Enríquez Ortiz, C., Villareal González, F.J., 2010. *Caracterización hidrodinámica de la laguna de Mecoacán en Tabasco, México*. Artículo pendiente de aprobación IMTA

Capítulo 8 – Bibliografía

Rodríguez Rincón, J.P., Pedrozo Acuña, A., Mariño Tapia, I., Enríquez Ortiz, C., Villareal González, F.J., 2010. *Evaluación de los procesos costeros hidrodinámicos en la laguna de Mecoacán tabasco, México*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay 2010.

Rodríguez Rincón, J.P., Pedrozo Acuña, A., 2010. *Modelación de inundación en la boca de la laguna de Mecoacán, Tabasco, México*. XXI congreso nacional de hidráulica Guadalajara, Jalisco, México octubre/2010.

Sanders B.F., 2007, *Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modelling*, Advances in Water Resources, 30, 1831-1843.

Sanders, HL, 1958. *Benthic Studies in Buzzards Bay: animal-sediment relationships*. Limnology and Oceanography 3(3):245-258.

Santoyo H. y Signoret M., 1981. *Producción primaria planctónica de tres lagunas costeras de México*. Res. VII Simposio Latinoamericano de Oceanografía y Biología. 45.

Senado de la República, 2008.- Comisión de Asuntos Hídricos, *Informe de Inundaciones de 2007 en el Estado de Tabasco*. Informe de especialistas para el senado de la república, diferentes autores. México.

Servicio Meteorológico Nacional SMN-CONAGUA, Gobierno Federal Mexicano, 2010, *Temperatura y Precipitación Media mensual*. Temperaturas mensuales por entidad federativa (1971 - a la fecha). En: <http://smn.cna.gob.mx>

Silva, R. et al. 2008. *Atlas de Clima Marítimo para las vertientes mexicanas del Pacífico y Atlántico*, Versión electrónica en CD, Instituto de ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Silva, R., Mendoza, E., Escalante, E., Mariño, I., y Ruiz, F, 2009. *Oleaje inducido por el huracán Wilma en Puerto Morelos, Quintana Roo, México*. Ingeniería Hidráulica de México.

Smith, K., y R. Ward. 1998. *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Chichester: Wiley, 382.

Capítulo 8 – Bibliografía

Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial, Gobernación de Tabasco 2006. *Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Corredor Turístico Puerto Ceiba-Chiltepec, Paraíso, Tabasco*. Pág. 47

Thom, Bruce G., 1967. *Mangrove Ecology and Deltaic Geomorphology: Tabasco, Mexico*. Journal of Ecology, British Ecological Society. Vol. 55, No. 2, pp. 301-343.

USA Army Corps of Engineers. 2002. *Coastal Engineering Manual, Hydrodynamics of tidal inlets (part II)* EM 1110-2-1100, pàg. II-6-2 a II-60.

Van de Kreeke, J., 1992. *Stability of tidal inlets; Escoffier's analysis*. Shore and Beach 60 (1), 9 – 12.

Van de Kreeke, J. 1988. *Hydrodynamics of Tidal Inlets*,. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol 29, Hydrodynamic and Sediment Dynamics of Tidal Inlets, Springer-Verlag, New York, pp 1-23.

Van de Kreeke, J., 1990. *Can multiple inlets be stable? Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 30:261-273.

W. F. Tanner, F. W. Stapor, Jr. 1971, *Tabasco Beach-Ridge Plain: an Eroding Coast*. Assoc. Geol. Socs. 21: 231-232

West R. C., Psuty N.P. y Thom B.G., 1987. *Las Tierras Bajas de Tabasco. Gobierno de Tabasco*. Instituto de Cultura de Tabasco.

Zamora A. G., Sevilla-Hernández Ma. L. y Aldana-Aranda D. 2003. *Ciclo gonádico del ostión americano Crassostrea virginica (Lamellibranchia: Ostreidae) en Mecoacán, Tabasco, México*. Revista. Biología Tropical., 51, Sup. 4: 109-117.

ANEXO A
EQUIPOS DE MEDICIÓN CAMPAÑA
DE CAMPO

ANEXO A. EQUIPOS DE MEDICIÓN CAMPAÑA DE CAMPO

En la presente sección se realiza una descripción de los equipos utilizados en la campaña de campo, para medir batimetrías, flujos, presión, salinidad, temperatura y densidad en el sistema lagunar. Las mediciones se realizaron según la ubicación descrita a lo largo de esta tesis, la cual se resume en la figura A-1.

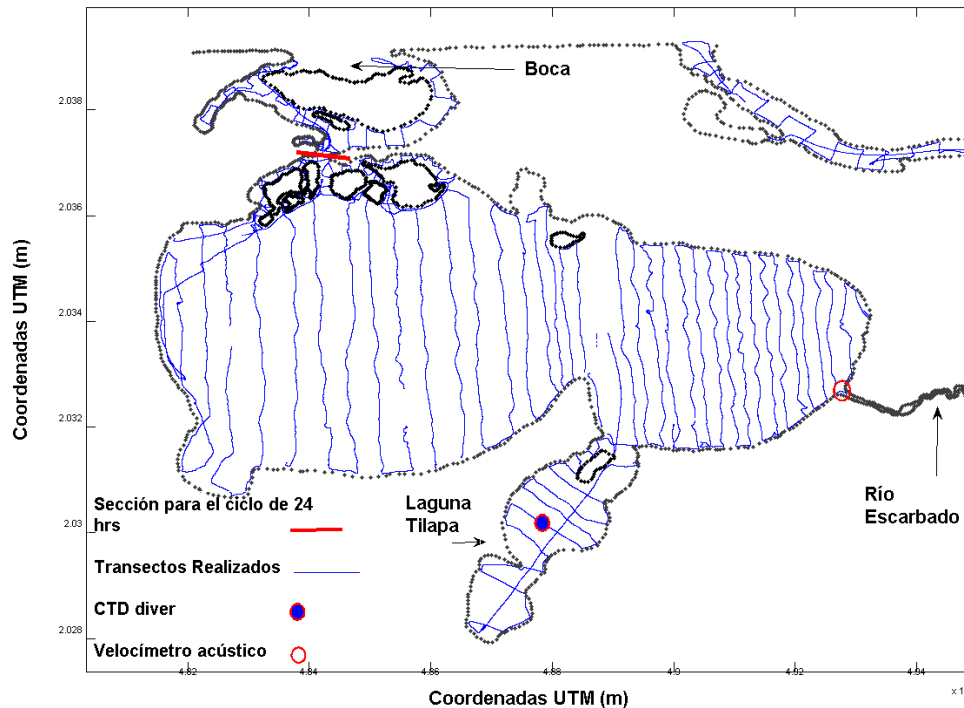


Figura A 1 Mediciones Laguna de Mecoacán,, campaña de campo. Ciclo de mediciones ADCP y CTD, transectos ecosonda, CTD estático y velocímetro acústico.

1. BATIMETRÍA

Ecosonda: El principio de fundamental para la operación de este instrumento es muy similar al del sonar, y consiste en transmitir impulsos sonoros para luego captar y clasificar los ecos que servirán para ubicar la posición del objeto que refleja la señal. Para la operación de este tipo de sistema se requieren una embarcación pequeña, un GPS diferencial para la corrección de datos de elevación respecto a un nivel conocido, y la computadora de campo para el almacenamiento de datos. La utilización de la ecosonda debe hacerse en lancha a una velocidad baja e intentando acercarse lo más posible a la costa, pues la tolerancia de la ecosonda es de 50 cms de profundidad, valores menores no son posibles de medir.

Anexo A. Equipos de medición campaña de campo

GPS diferencial: Se utilizó para la ubicación de las mediciones de la ecosonda, un GPS de alta precisión (Rover Leika Serie 1200), el cual además de ubicar la ruta de medición, realiza una referencia geográfica en la computadora. El GPS diferencial debe ser instalado en la misma coordenada que el sonar, a través de un sistema de fijación a la embarcación, como se muestra en la Figura A-2.



Figura A 2 Sistema de medición del fondo de la laguna - Ecosonda

Además, para todo el trabajo se colocó una base con GPS diferencial para hacer las correcciones por oleaje de la mayoría de actividades; igualmente estas bases nos dan la utilidad para realizar correcciones en los GPS de los demás aparatos, en la figura A-3 se muestra la base del GPS con su respectiva antena.



Figura A 3 Base - GPS diferencial.

2. GASTO Y CORRIENTES EN LA BOCA LAGUNAR

Para caracterizar la interacción del flujo de marea con los flujos dentro del sistema lagunar, se realizó un ciclo de mediciones, por 24 horas. Para todas las mediciones del ciclo se adaptó una moto acuática con un sensor ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) ó ADP (Acoustic Doppler Profiler), un CTD y una computadora de campo para el almacenamiento de la información. En la Figura A-4 se ilustra la disposición de los instrumentos, y a grandes rasgos el montaje realizado.

Figura 2-1 Montaje y equipos para medición de corrientes, salinidad y temperatura.

Figura A 4 Equipos utilizados en ciclo. Trabajo realizado en la Laguna de Mecoaacán. Fotografía a) es el montaje en la moto náutica de la computadora (centro), el ADCP (izquierda), b) el ADCP c) Y d) CTD Seabird.

La descripción de los equipos utilizados es:

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler): Es un El perfilador de corrientes por efecto Doppler. El sistema consta de un transductor que emite ondas acústicas, una unidad electrónica que genera los pulsos y pre-procesa las ondas recibidas, y un PC que adquiere los datos y los procesa. El ADCP que utiliza el efecto Doppler transmitiendo sonido a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos reflectores son pequeñas partículas o plancton que reflejan el sonido hacia el ADCP. Estos reflectores flotan en el agua y se mueven a la misma velocidad horizontal que el agua. Cuando el sonido enviado por el ADCP llega a los reflectores, esta desplazado a una mayor frecuencia debido al efecto Doppler,

Anexo A. Equipos de medición campaña de campo

este desplazamiento frecuencial es proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y los reflectores.

CTD Seabird: El Seabird es un instrumento estándar que se utiliza para medir la temperatura, salinidad y a menudo también el contenido en oxígeno disuelto, es CTD. La referencia del equipo es SBE 19 plus.

El instrumento opera con un termómetro de platino que cambia su resistencia eléctrica con la temperatura. A través de un oscilador eléctrico, se induce un cambio en su resistencia, lo que produce un cambio de la frecuencia del oscilador que puede ser medido. Esto genera lecturas continuas de temperatura y conductividad en función de la profundidad a una razón de hasta 30 lecturas por segundo.

3. GASTO EN EL RÍO HONDO

Vector (Nortek, AS): Este aparato es un correntímetro que proporciona información en las tres dimensiones. El sistema de medición se centra en el uso del efecto Doppler, que proporciona datos de velocidad precisos y no intrusivos. Con una capacidad de muestreo de alta resolución de hasta 60 Hz. Además el instrumento posee una brújula y sensores de altitud, temperatura y presión. El montaje del equipo para ser instalado se presenta en la Figura A-5.



Figura A 5 Vector

Este sensor se colocó en el lecho marino por medio de una barreta, la cual se encaja en el fondo con objeto de fijar el instrumento. Por otra parte, la batería

Anexo A. Equipos de medición campaña de campo

se asegura a la barreta por medio de unas abrazaderas metálicas, mientras que para la colocación del vector se utilizaba una estructura metálica en “L”.

4. SALINIDAD, TEMPERATURA Y DENSIDAD EN LA LAGUNA

Con el propósito de conocer las características de densidad, temperatura y salinidad en la laguna de Mecoacán, en la campaña de campo se consideró la realización de lances en diferentes puntos dentro de la Laguna de Mecoacán, realizados con el CTD Seabird. Complementando las mediciones de este equipo, se utilizó a su vez un CTD Diver, para ver la intrusión salina a través de varios días.

CTD-Diver tiene tres sensores: un sensor de presión para determinar el nivel del agua, un sensor de temperatura y un sensor de cuatro electrodos para determinar la conductividad. La memoria interna puede almacenar hasta 16.000 mediciones por parámetro. Para cada medición, se guardará la fecha, la hora, el nivel del agua, la temperatura y la conectividad.

ANEXO B
RESULTADOS DE MODELACIÓN

ANEXO B. RESULTADOS DE MODELACIÓN

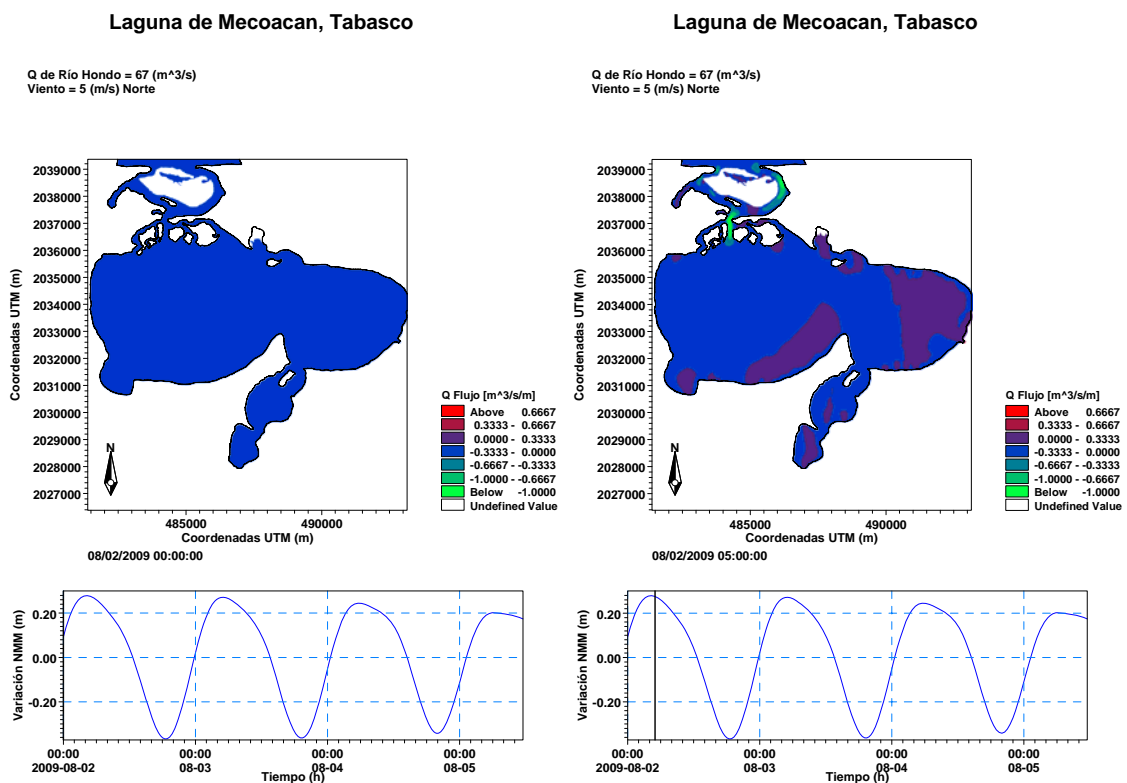
Se presenta a continuación los resultados de las modelaciones realizadas para la validación del modelo como para los eventos de forzamiento propuestos. Este anexo se organiza de la siguiente forma:

1.	HIDRODINAMICA DEL SISTEMA – VALIDACIÓN DEL MODELO	9
1.1.	GASTO	9
1.2.	VECTORES DE FLUJO.....	11
2.	PREDOMINANCIA DE MAREA DE TORMENTA	12
2.1.	GASTO	12
2.2.	SALINIDAD	14
2.3.	TEMPERATURA.....	15
2.4.	DENSIDAD	17
3.	PREDOMINANCIA DE CAUDALES FLUVIALES	18
3.1.	GASTO	19
3.2.	SALINIDAD	20
3.3.	TEMPERATURA.....	22
3.4.	DENSIDAD	23
4.	PREDOMINANCIA DE VIENTO EXTRAORDINARIO	25
4.1.	GASTO	25
4.2.	SALINIDAD	27
4.3.	TEMPERATURA.....	28
4.4.	DENSIDAD	30
5.	ESCENARIO SIMULTÁNEO – MAREA DE TORMENTA Y DESCARGA EN EL RÍO	31
5.1.	GASTO	32
5.2.	SALINIDAD	33
5.3.	TEMPERATURA.....	35
5.4.	DENSIDAD	37

1. HIDRODINAMICA DEL SISTEMA – VALIDACIÓN DEL MODELO

1.1. GASTO

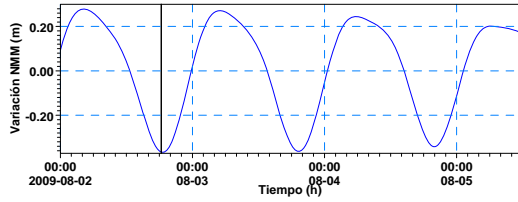
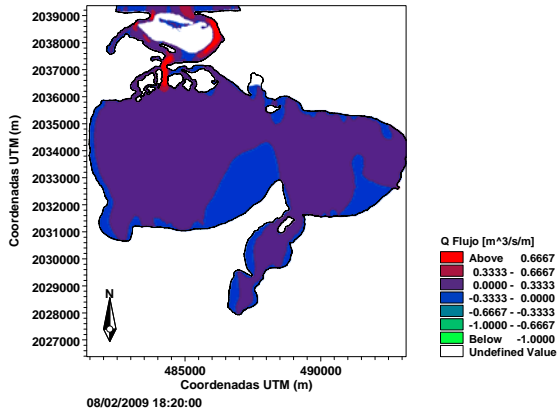
Secuencia de seis momentos de modelación de gasto, Q (m^3/s). Para cada panel se muestra la variación del nivel de medio del mar aplicado en la frontera abierta de marea, incluida en esta gráfica el paso de tiempo modelado (línea vertical).



Anexo B. Resultados de Modelación

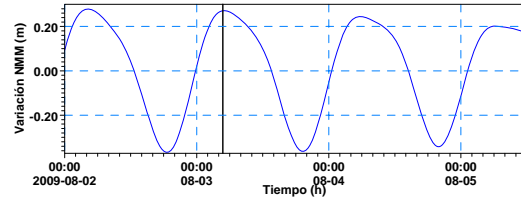
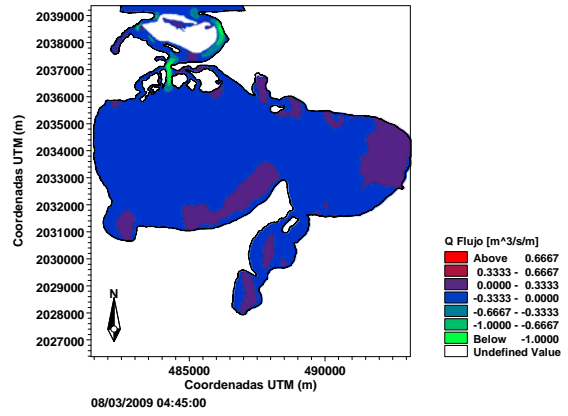
Laguna de Mecoacan, Tabasco

Q de Río Hondo = 67 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) Norte



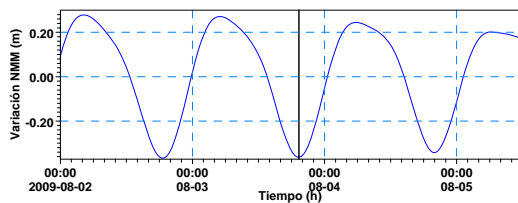
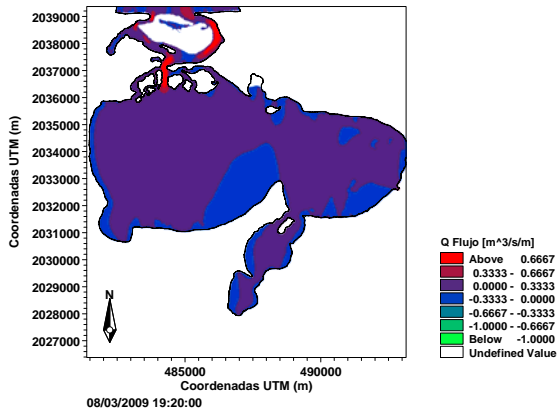
Laguna de Mecoacan, Tabasco

Q de Río Hondo = 67 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) Norte



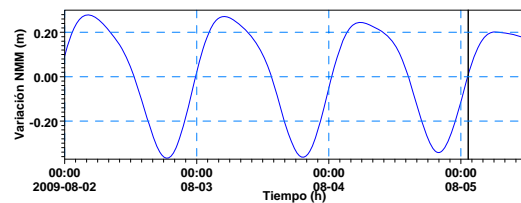
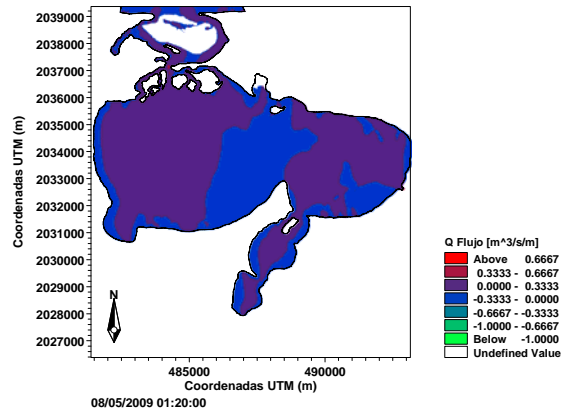
Laguna de Mecoacan, Tabasco

Q de Río Hondo = 67 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) Norte



Laguna de Mecoacan, Tabasco

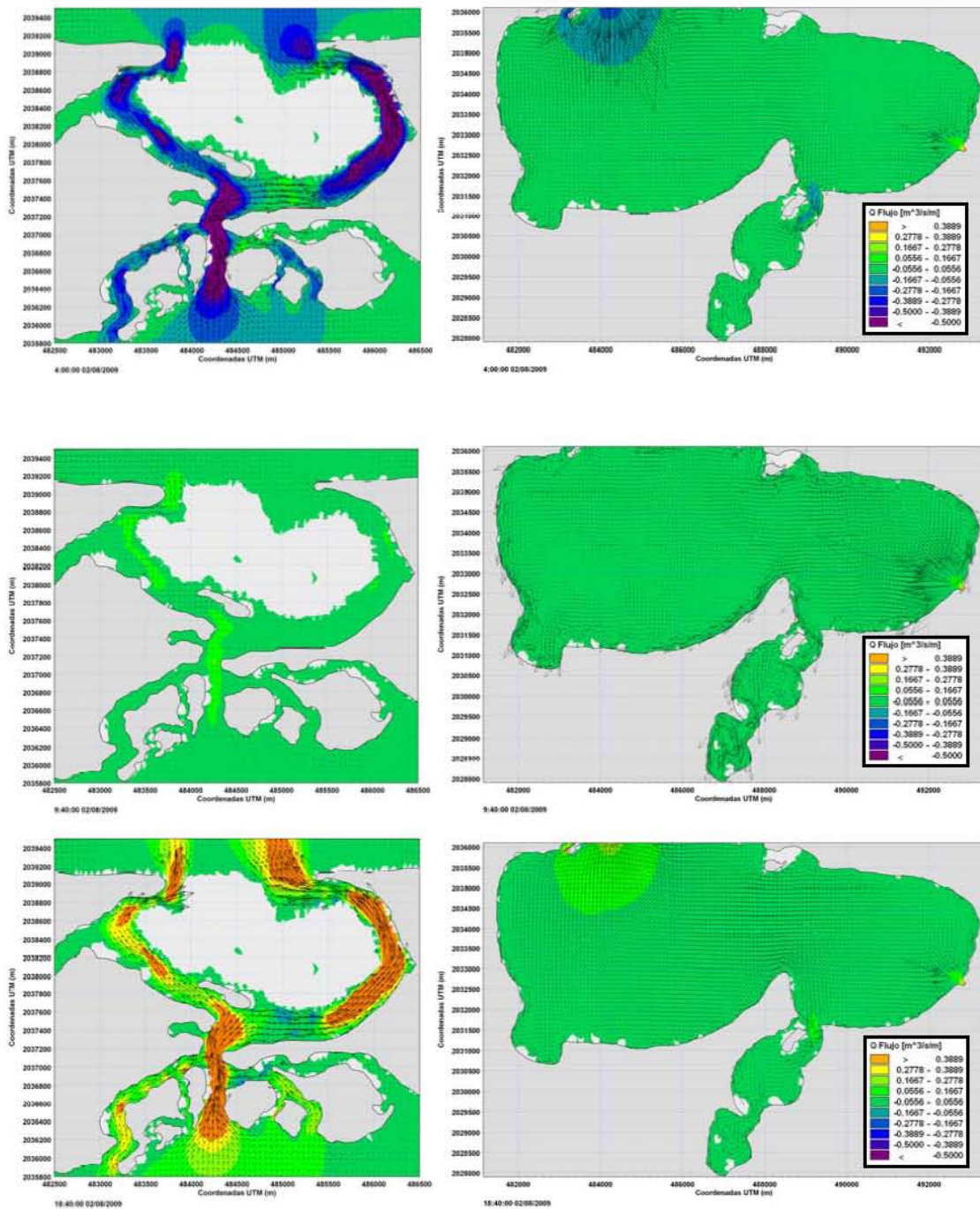
Q de Río Hondo = 67 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) Norte



Anexo B. Resultados de Modelación

1.2. VECTORES DE FLUJO.

Secuencia de gasto con vectores de flujo de modelación funcionamiento normal del sistema. Izquierda boca lagunar, derecha cuerpo de la laguna. Paneles superiores pleamar, paneles medios mitad del periodo de marea y paneles inferiores bajamar.

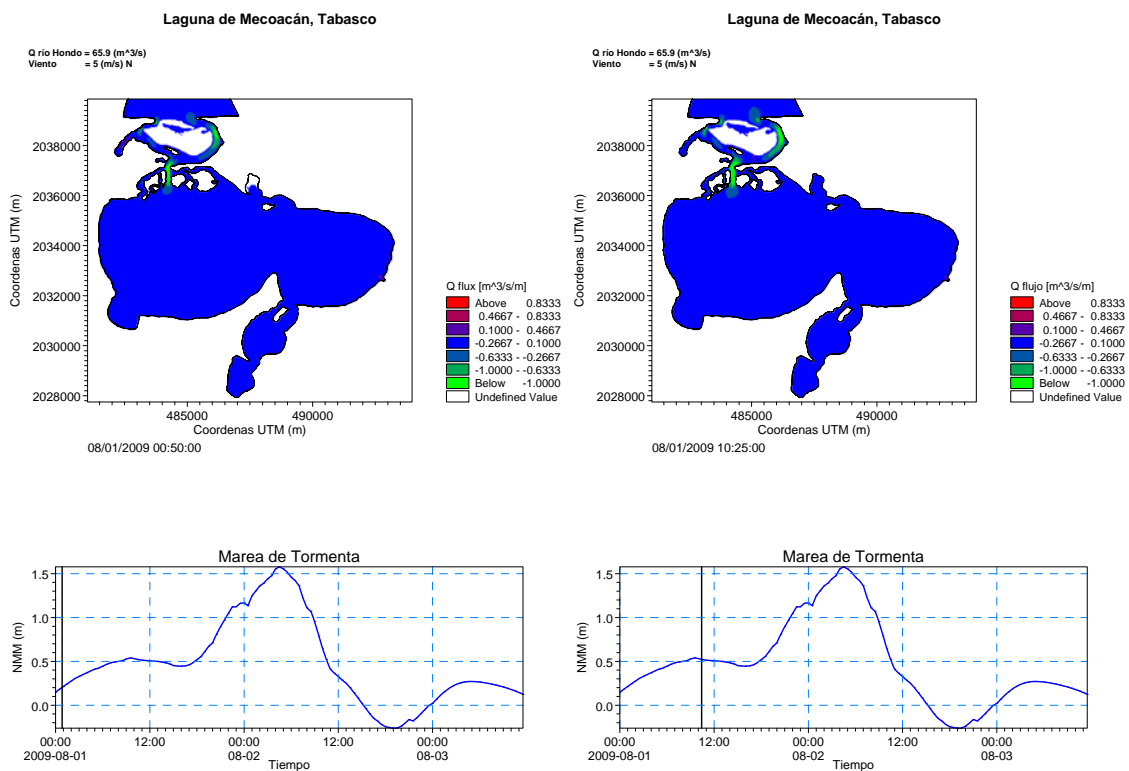


Anexo B. Resultados de Modelación

2. PREDOMINANCIA DE MAREA DE TORMENTA

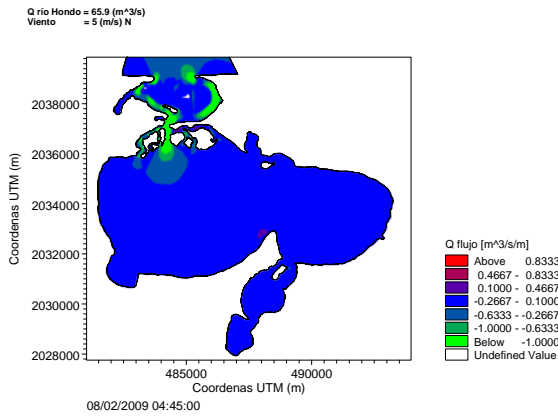
Se presenta una secuencia de seis momentos de modelación para gasto Q (m^3/s), salinidad (UPS), temperatura ($^{\circ}C$) y densidad (Kg/m^3). Para cada panel se muestra la variación del nivel de medio del mar aplicado en la frontera abierta de marea (parte inferior), incluida en esta gráfica el paso de tiempo modelado (línea vertical). Las condiciones de forzamiento son de Gasto del río (Q_r) = 65.9 (m^3/s) y velocidad del viento 5 (m/s). Para los resultados de temperatura se adiciona una grafica de variación diurna con su respectiva línea de tiempo.

2.1. GASTO

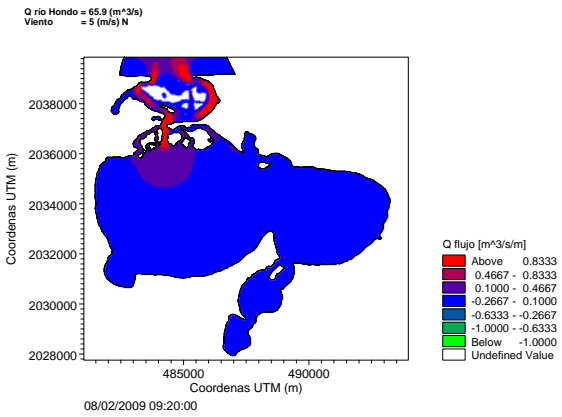


Anexo B. Resultados de Modelación

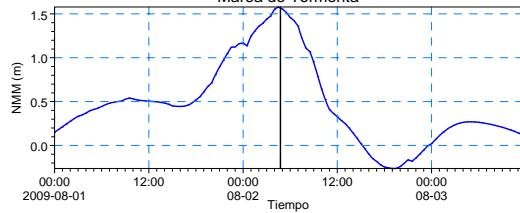
Laguna de Mecoacán, Tabasco



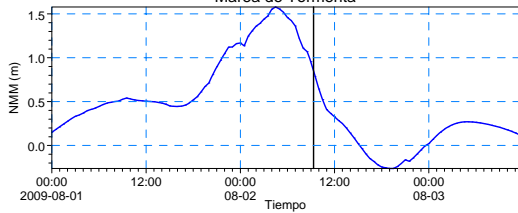
Laguna de Mecoacán, Tabasco



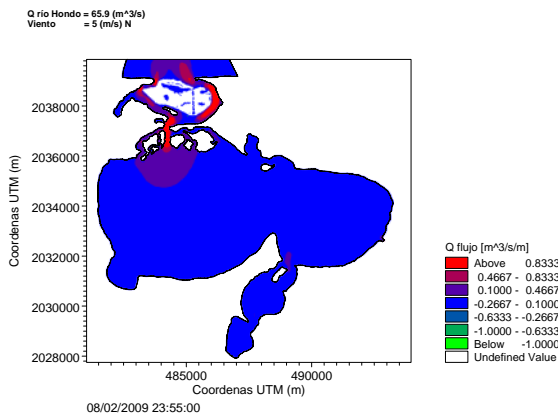
Marea de Tormenta



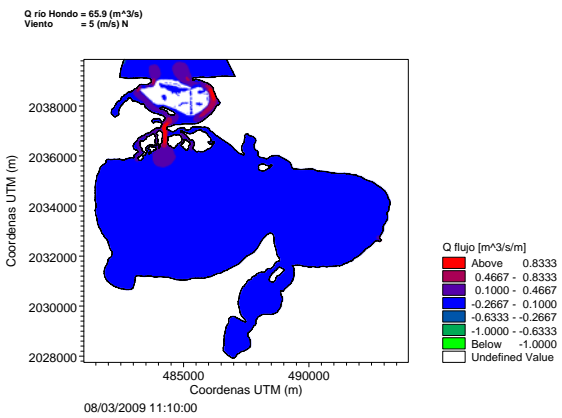
Marea de Tormenta



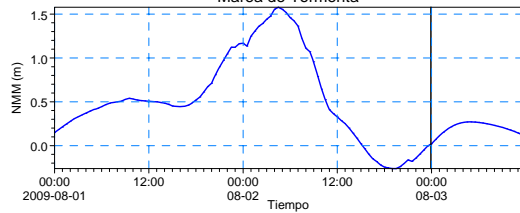
Laguna de Mecoacán, Tabasco



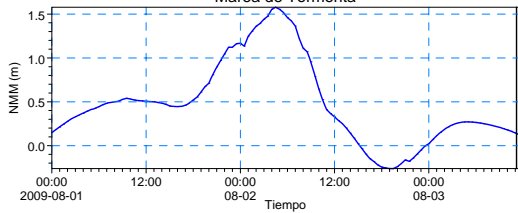
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

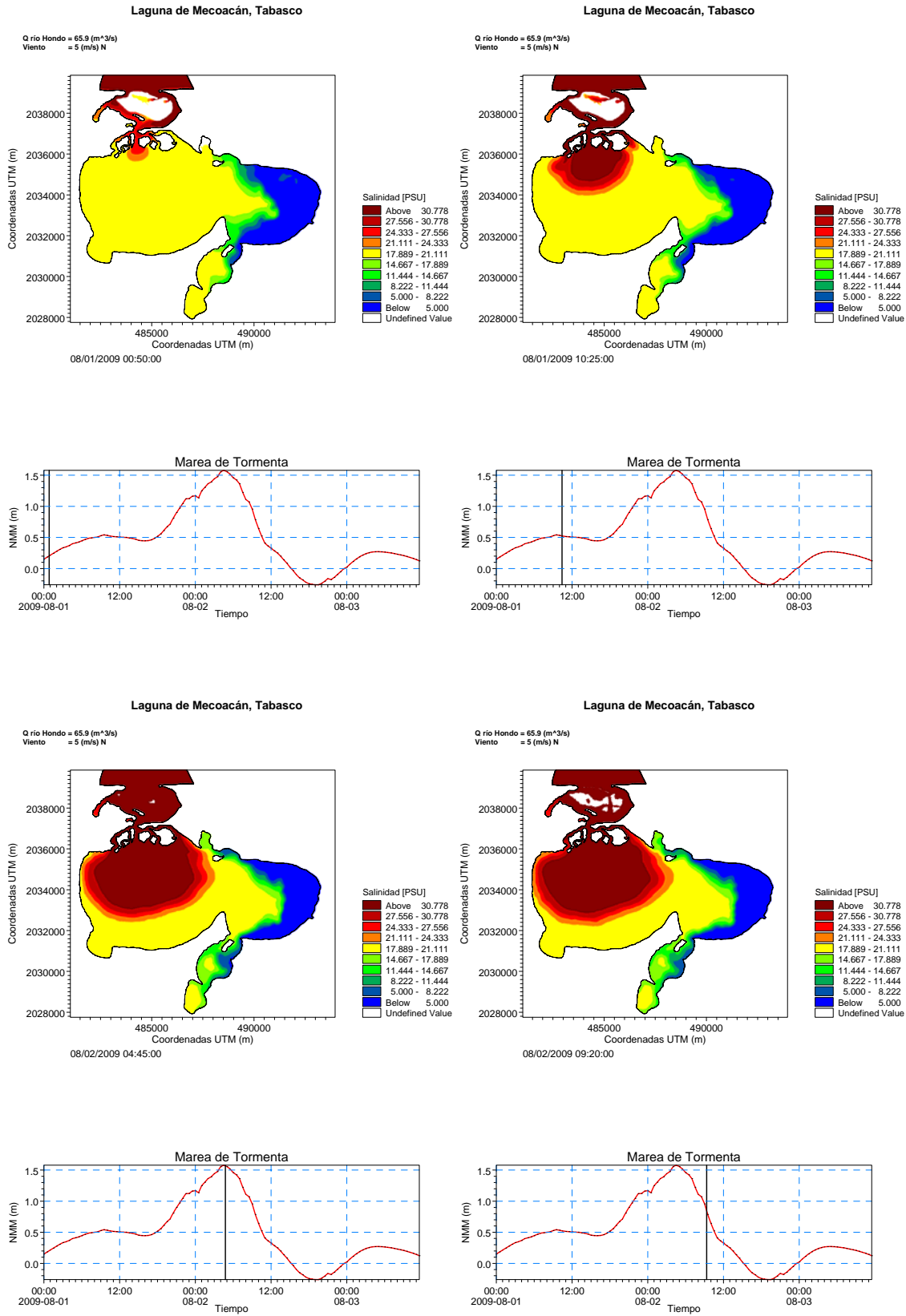


Marea de Tormenta



Anexo B. Resultados de Modelación

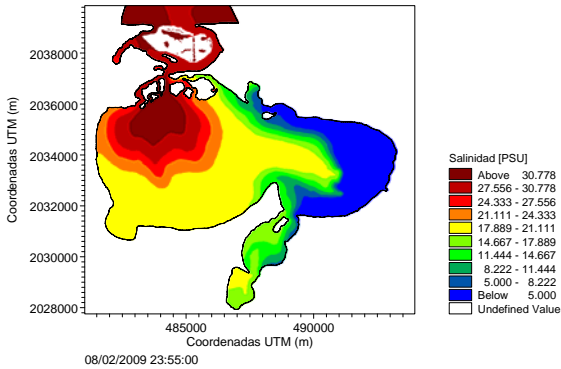
2.2. SALINIDAD



Anexo B. Resultados de Modelación

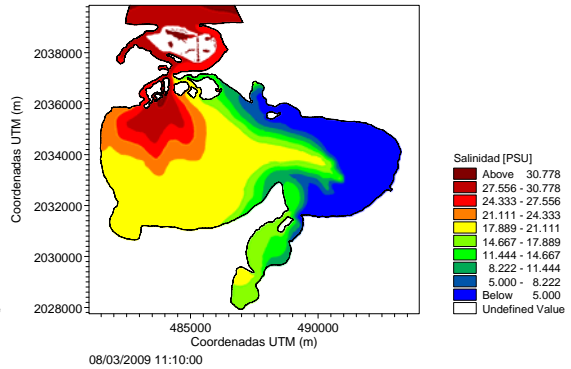
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

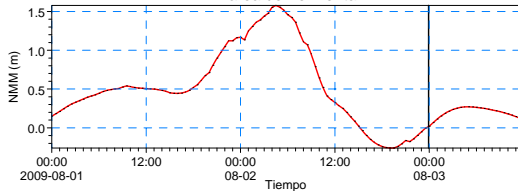


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

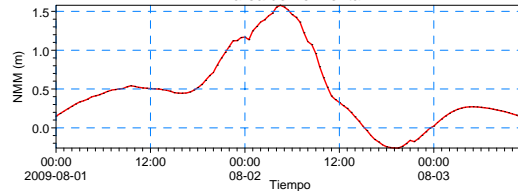
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



Marea de Tormenta



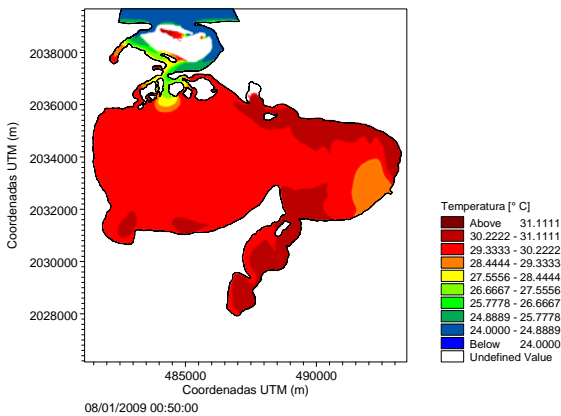
Marea de Tormenta



2.3. TEMPERATURA

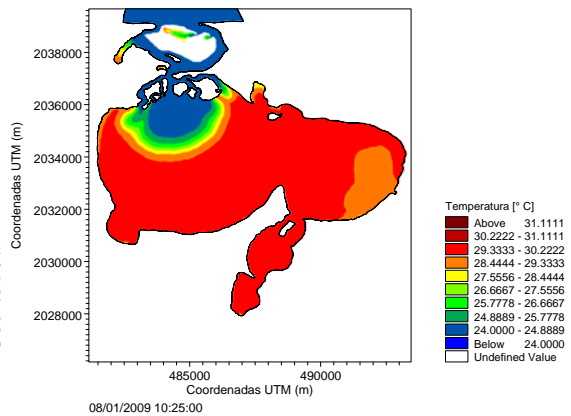
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

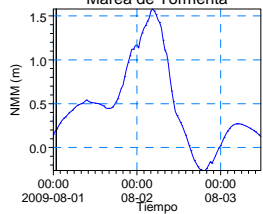


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

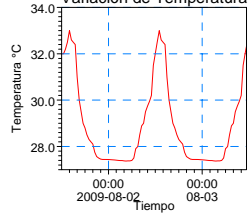
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



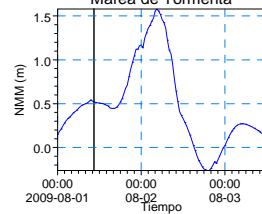
Marea de Tormenta



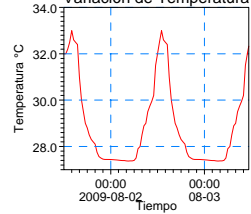
Variación de Temperatura



Marea de Tormenta



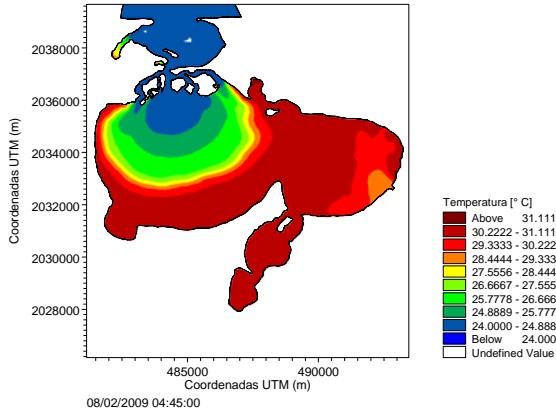
Variación de Temperatura



Anexo B. Resultados de Modelación

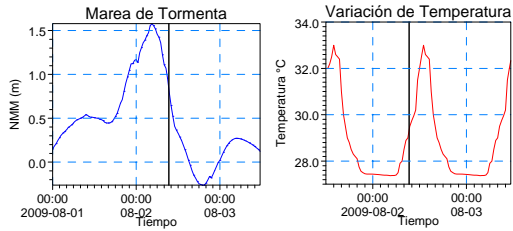
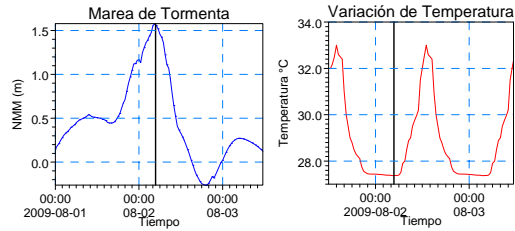
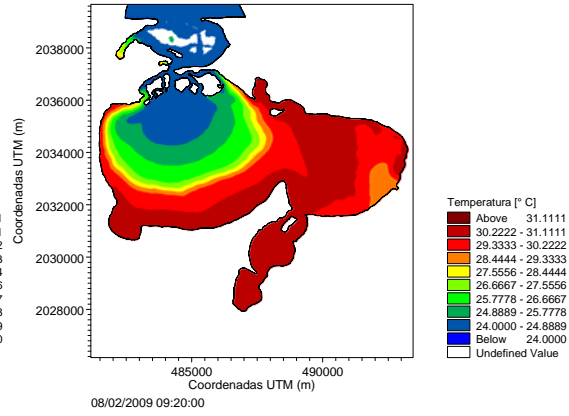
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



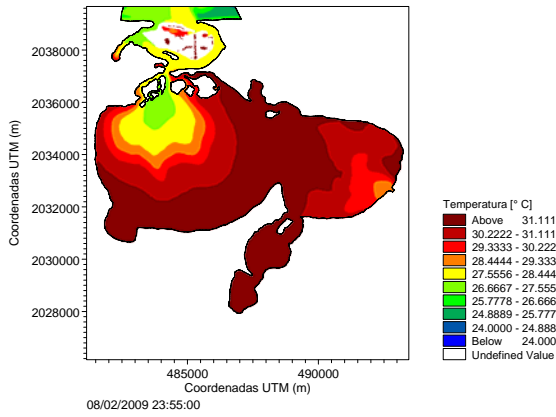
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



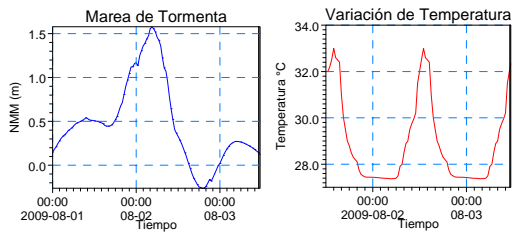
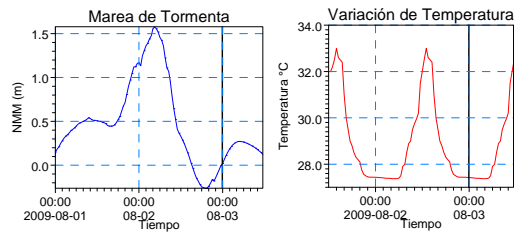
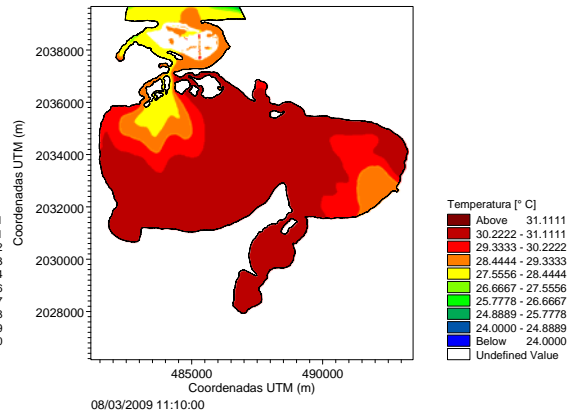
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



Laguna de Mecoaacán, Tabasco

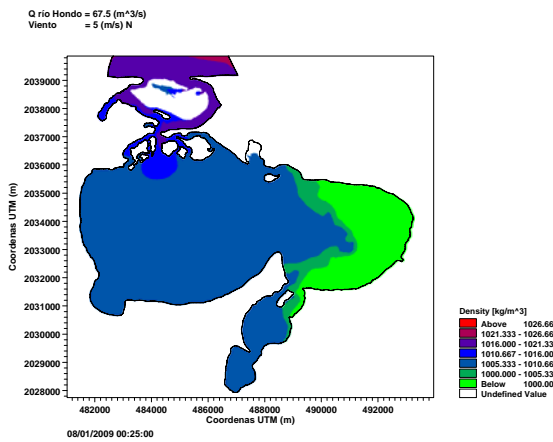
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



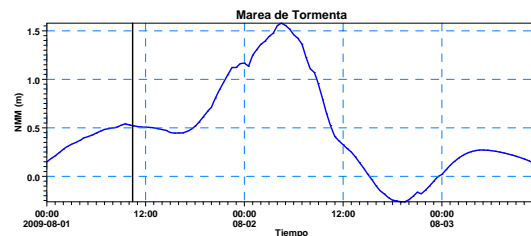
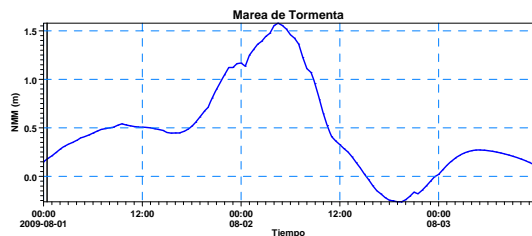
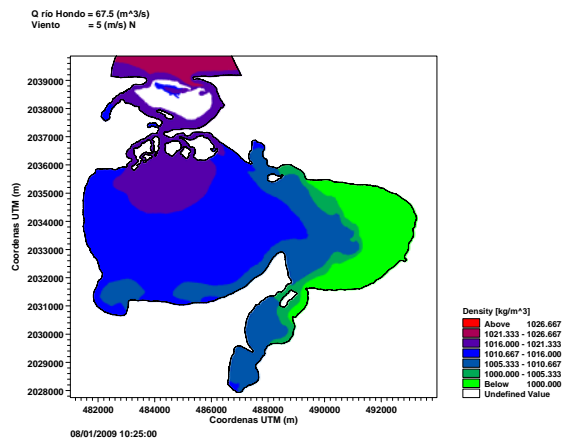
Anexo B. Resultados de Modelación

2.4. DENSIDAD

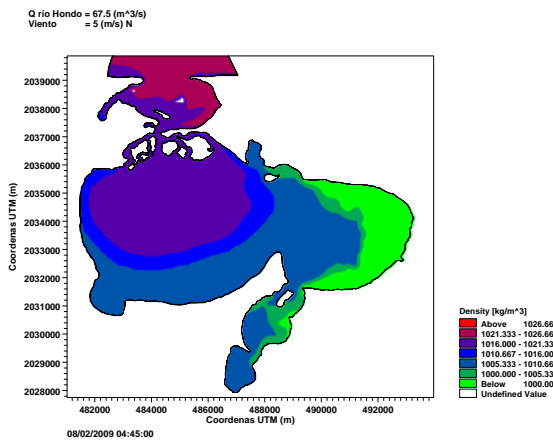
Laguna de Mecoacán, Tabasco



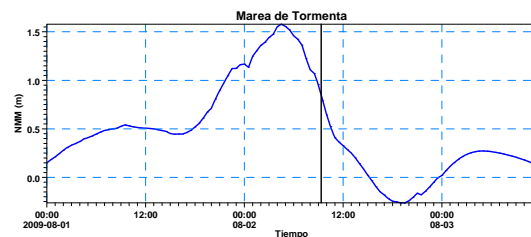
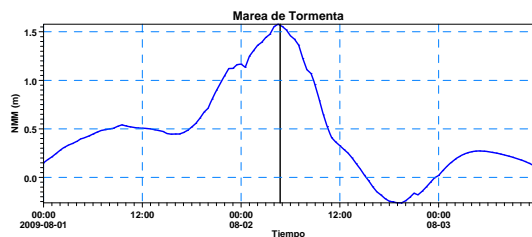
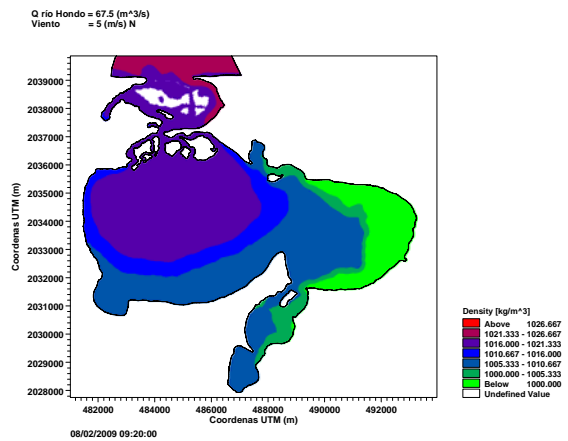
Laguna de Mecoacán, Tabasco



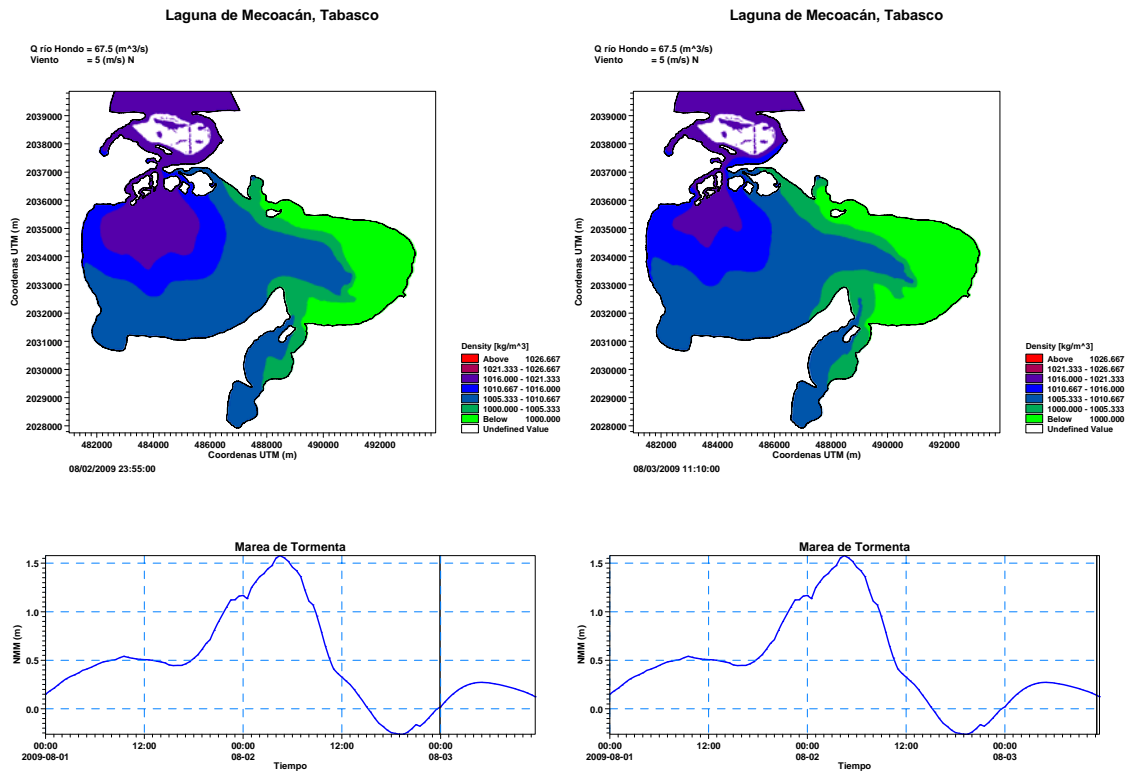
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Laguna de Mecoacán, Tabasco



Anexo B. Resultados de Modelación



3. PREDOMINANCIA DE CAUDALES FLUVIALES

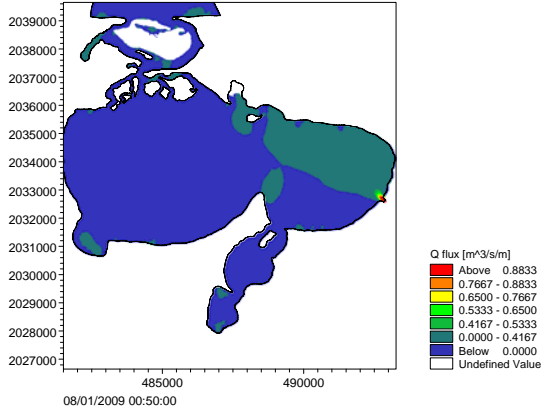
Se presentan una la secuencia de seis momentos de modelación para gasto Q (m³/s), salinidad (UPS), temperatura (°C) y densidad (Kg/m³). Para cada panel se muestra la variación del nivel de medio del mar aplicado en la frontera abierta de marea (parte inferior), incluida en esta gráfica el paso de tiempo modelado (línea vertical). Las condiciones de forzamiento son de Gasto del río (Q_r) = 380 (m³/s). Velocidad del viento 5 (m/s). Para los resultados de temperatura se adiciona una grafica de variación diaria con su respectiva línea de tiempo.

Anexo B. Resultados de Modelación

3.1. GASTO

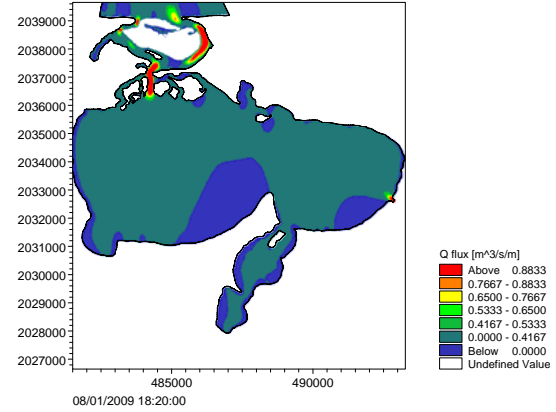
Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

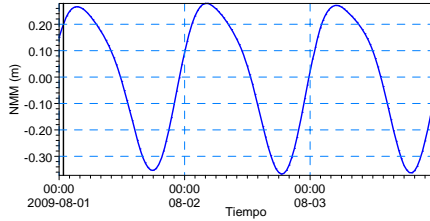


Laguna de Mecoacán, Tabasco

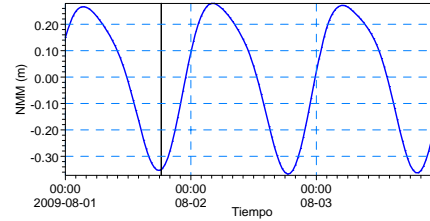
Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



Marea Astronomica

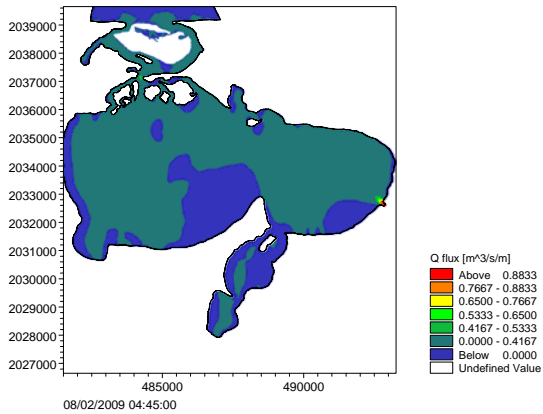


Marea Astronomica



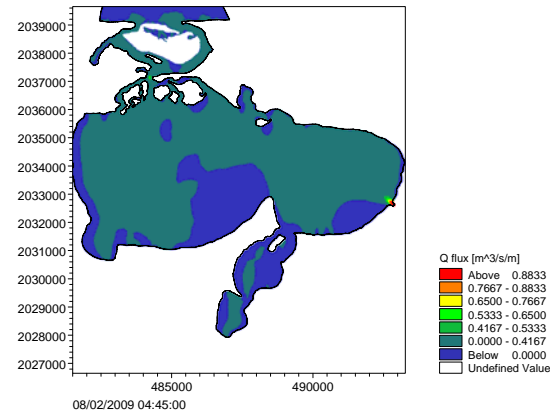
Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

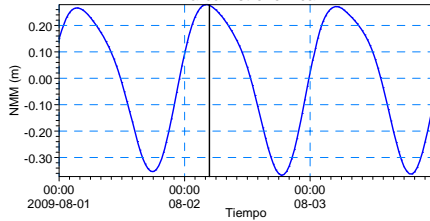


Laguna de Mecoacán, Tabasco

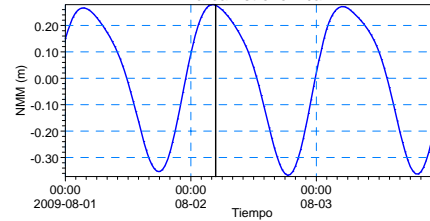
Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



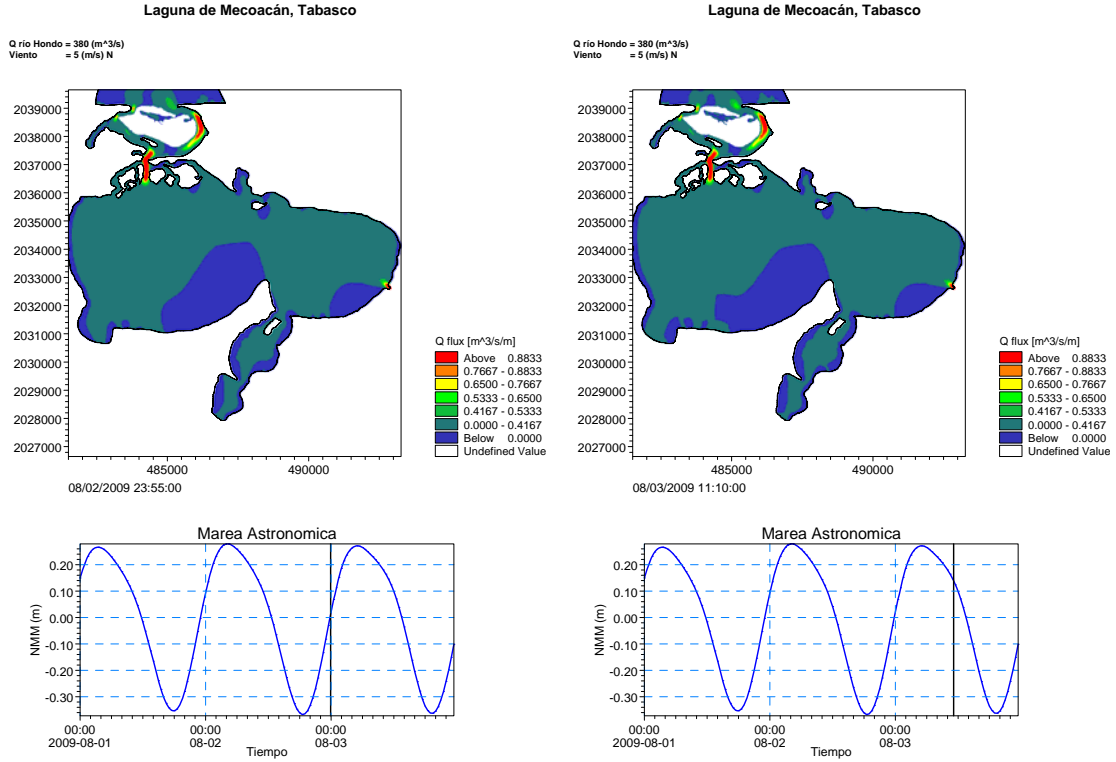
Marea Astronomica



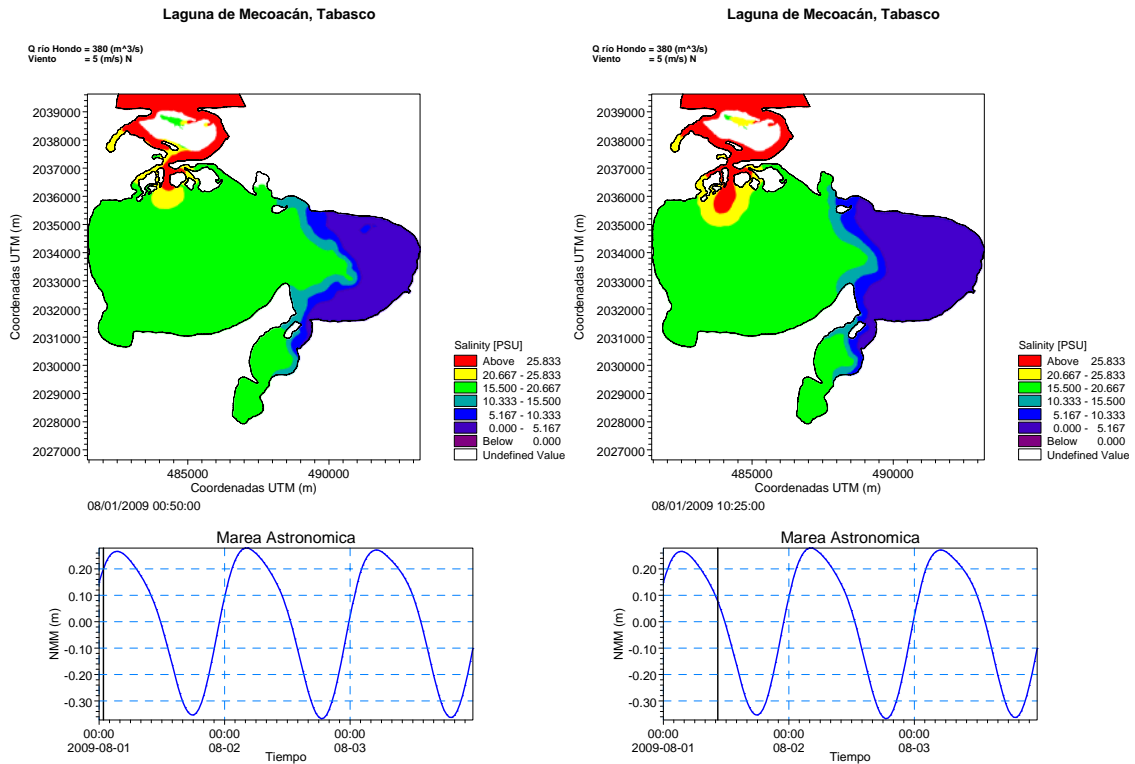
Marea Astronomica



Anexo B. Resultados de Modelación



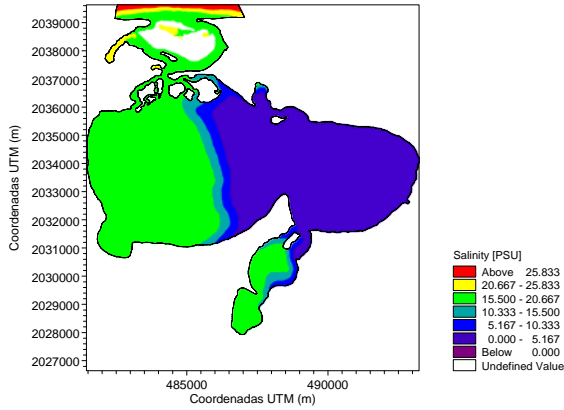
3.2. SALINIDAD



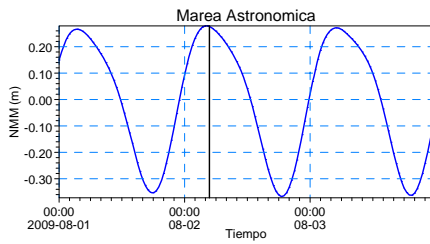
Anexo B. Resultados de Modelación

Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

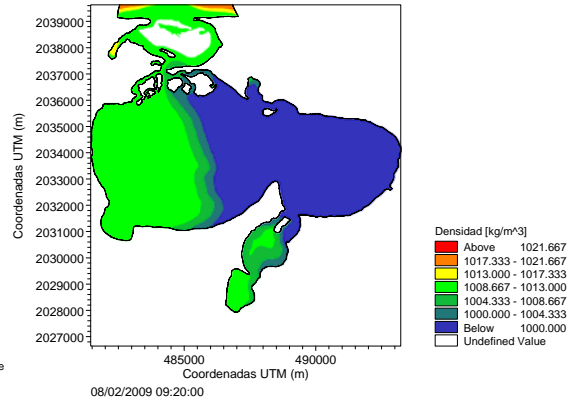


08/02/2009 04:45:00

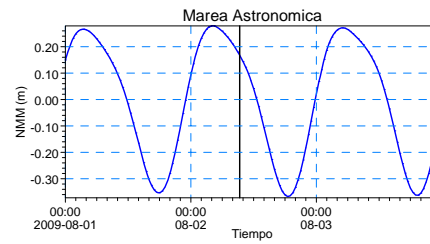


Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

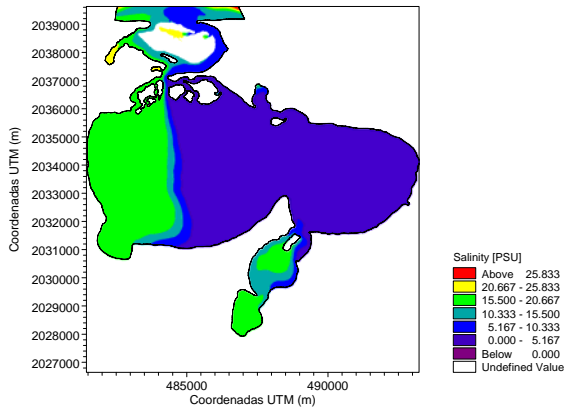


08/02/2009 09:20:00

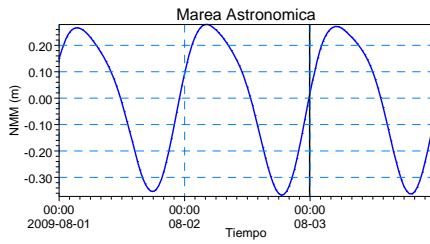


Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

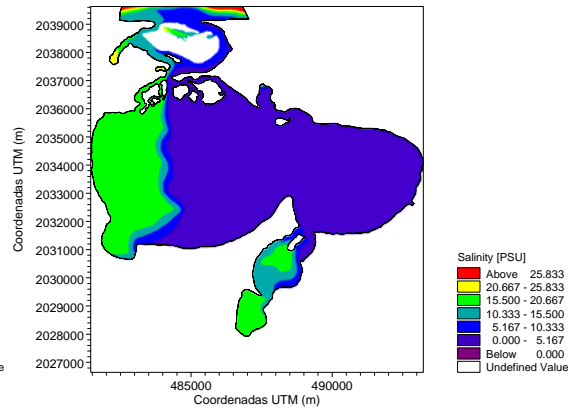


08/02/2009 23:55:00

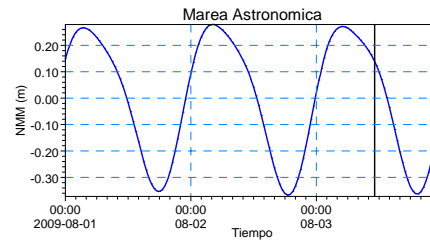


Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

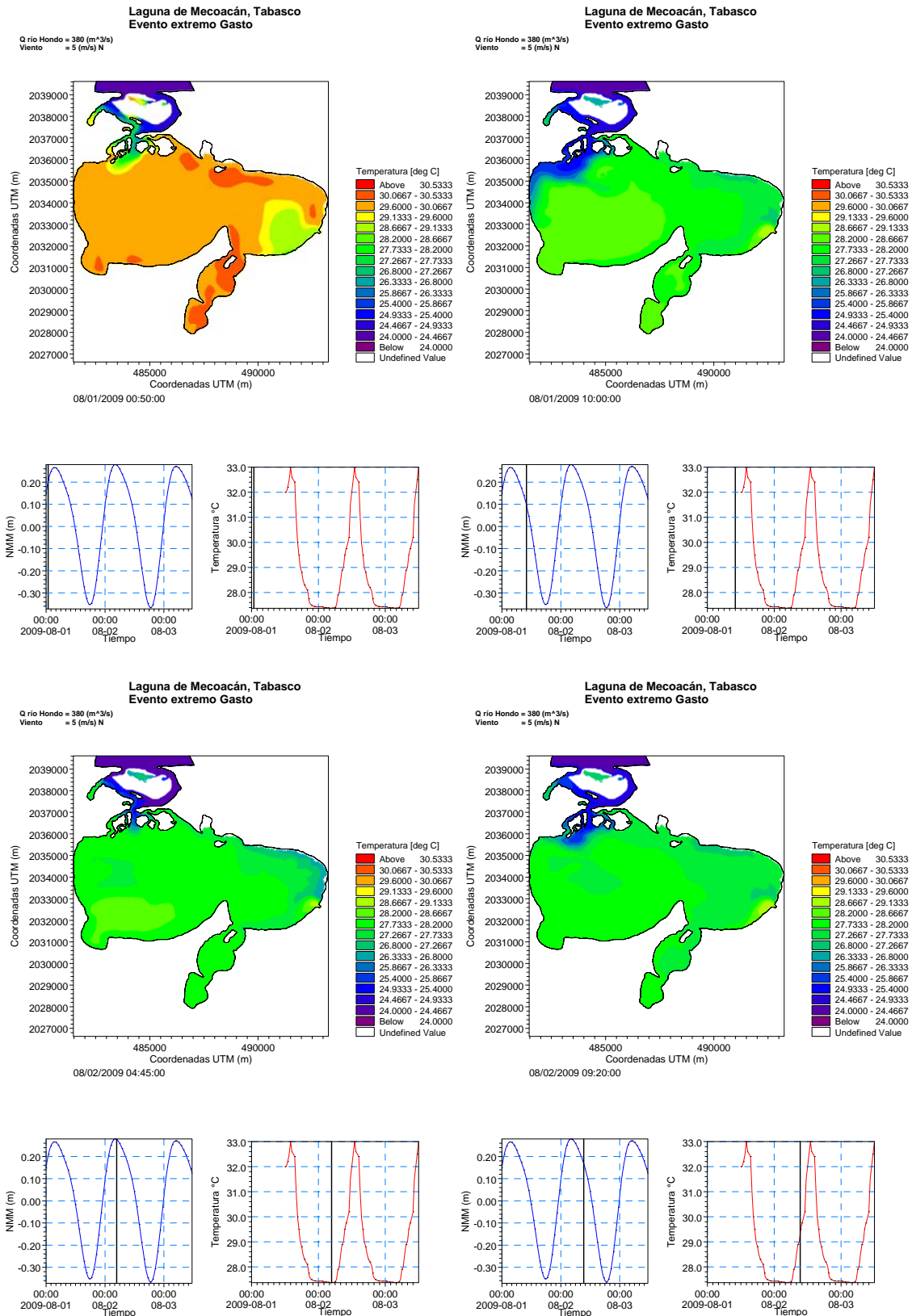


08/03/2009 11:10:00

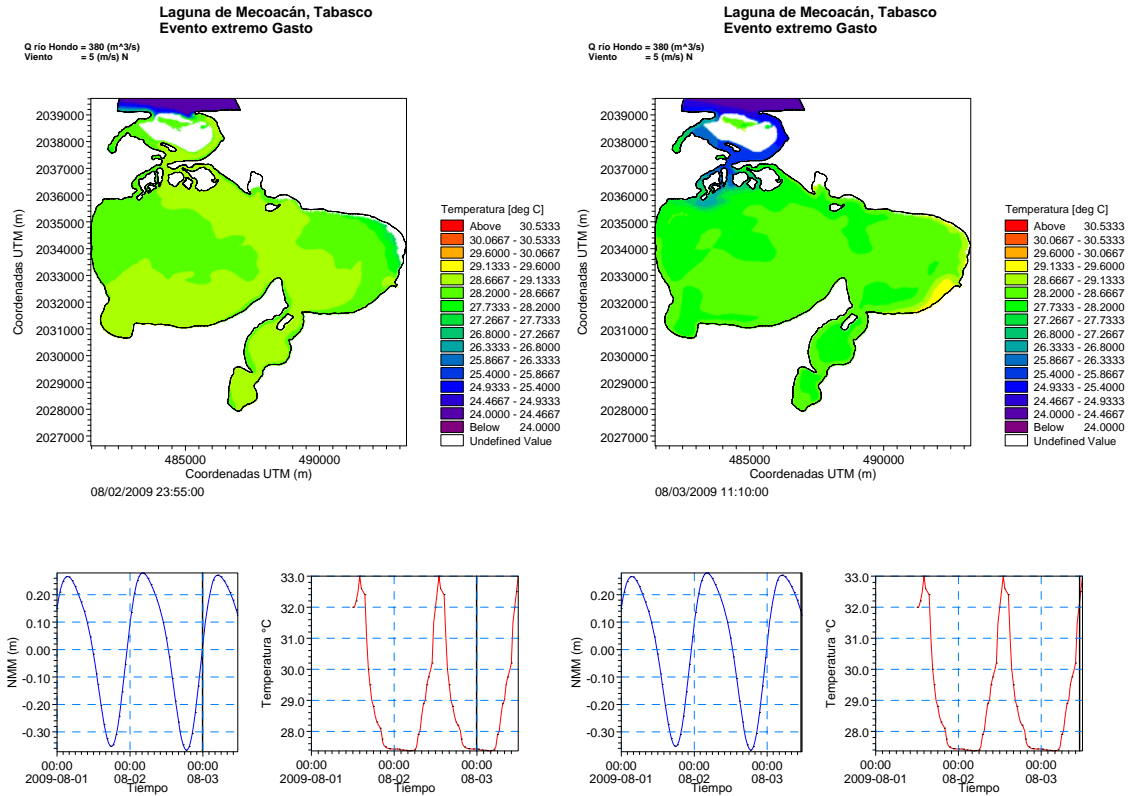


Anexo B. Resultados de Modelación

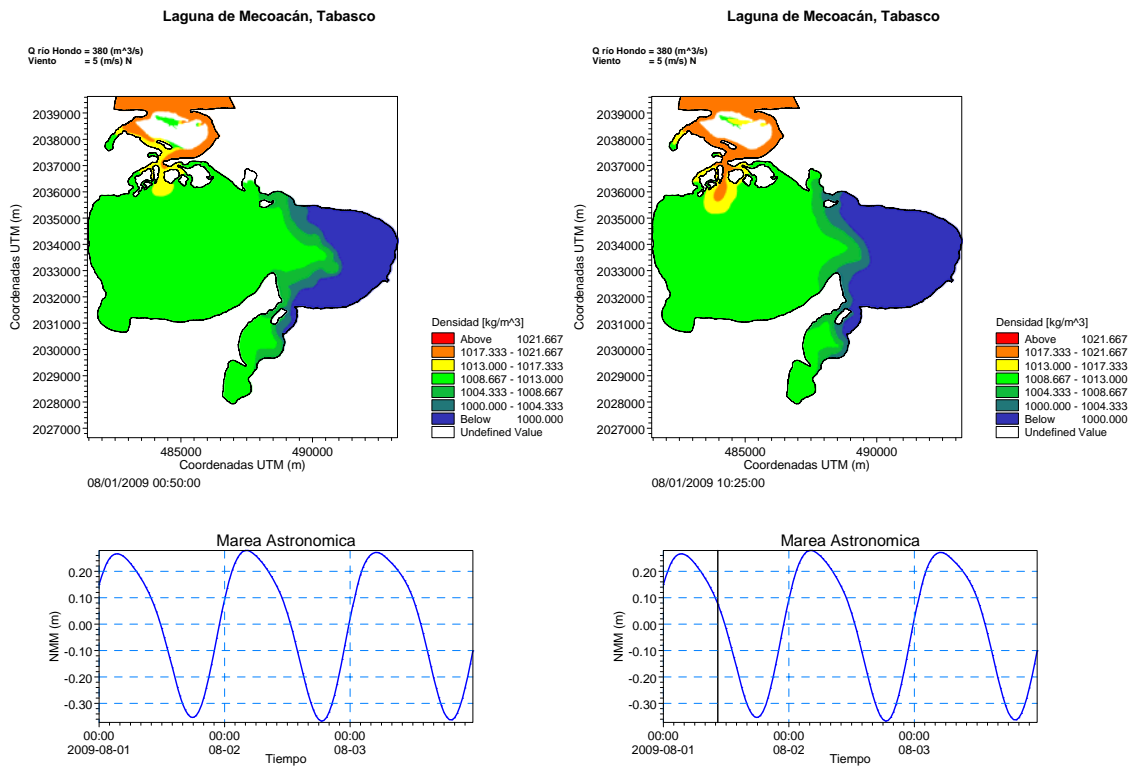
3.3. TEMPERATURA



Anexo B. Resultados de Modelación



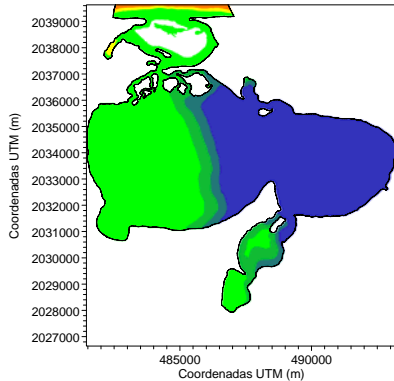
3.4. DENSIDAD



Anexo B. Resultados de Modelación

Laguna de Mecoacán, Tabasco

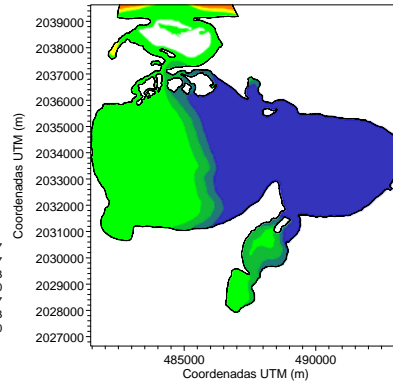
Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



08/02/2009 04:45:00

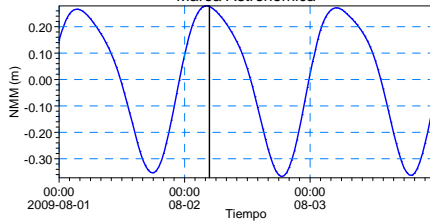
Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

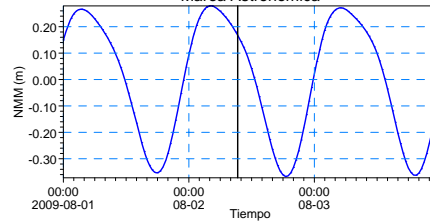


08/02/2009 09:20:00

Marea Astronomica

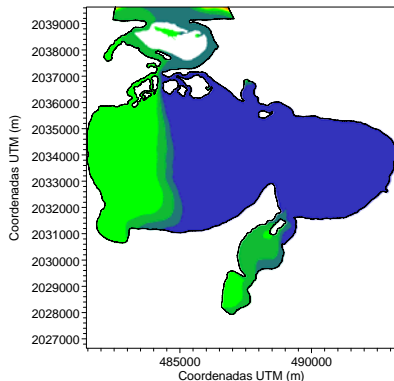


Marea Astronomica



Laguna de Mecoacán, Tabasco

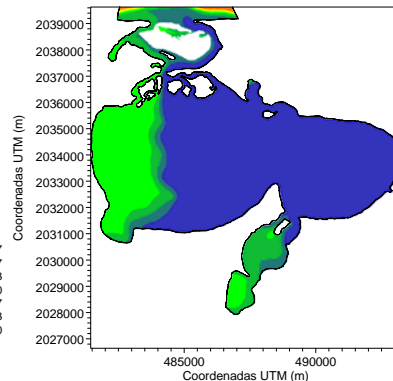
Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N



08/02/2009 23:55:00

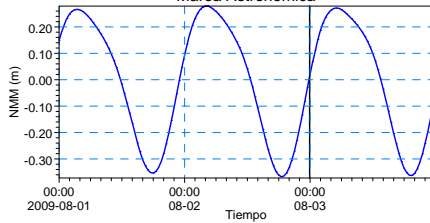
Laguna de Mecoacán, Tabasco

Q río Hondo = 380 (m³/s)
Viento = 5 (m/s) N

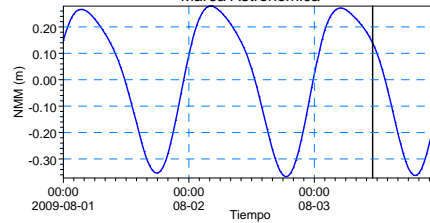


08/03/2009 11:10:00

Marea Astronomica



Marea Astronomica

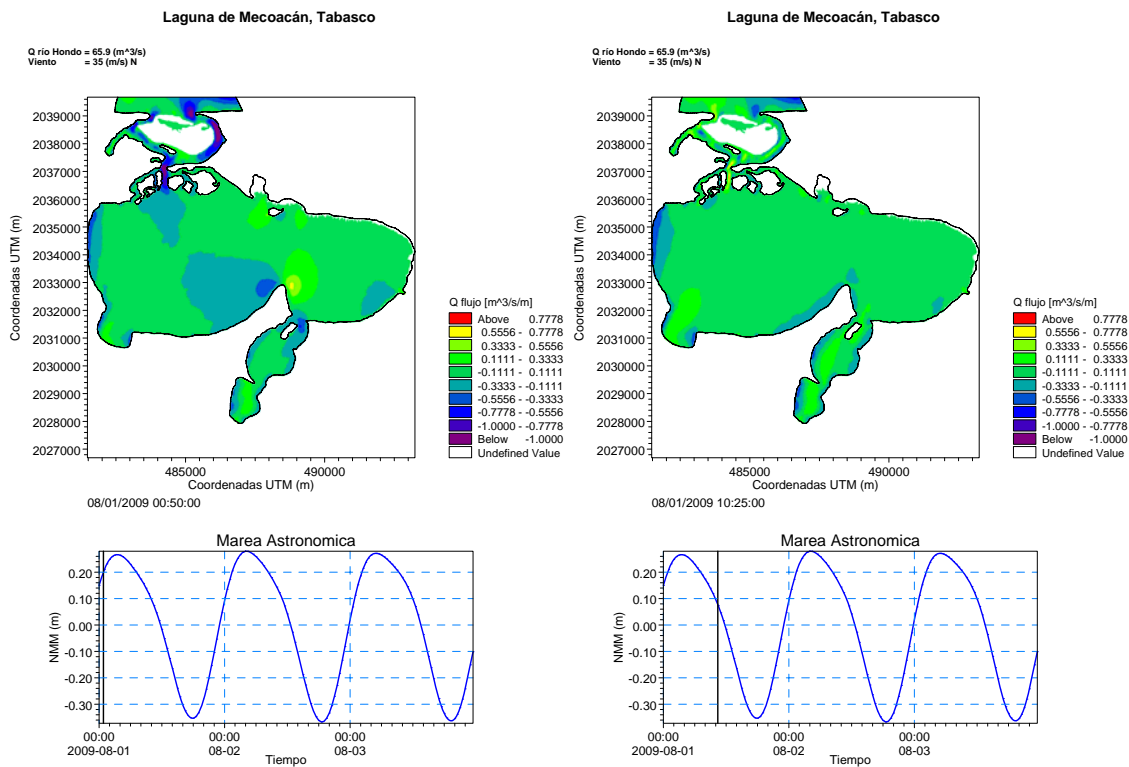


Anexo B. Resultados de Modelación

4. PREDOMINANCIA DE VIENTO EXTRAORDINARIO

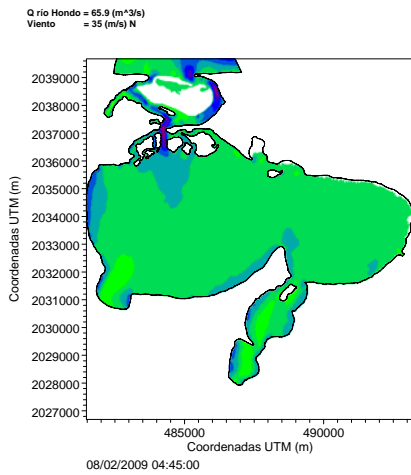
Se presentan una la secuencia de seis momentos de modelación para gasto Q (m^3/s), salinidad (UPS), temperatura ($^{\circ}C$) y densidad (kg/m^3). Para cada panel se muestra la variación del nivel de medio del mar aplicado en la frontera abierta de marea (parte inferior), incluida en esta gráfica el paso de tiempo modelado (línea vertical). Las condiciones de forzamiento son de Gasto del río (Q_r) = 65.97 (m^3/s). Velocidad del viento 5 (m/s). Para los resultados de temperatura se adiciona una grafica de variación diurna con su respectiva línea de tiempo.

4.1. GASTO

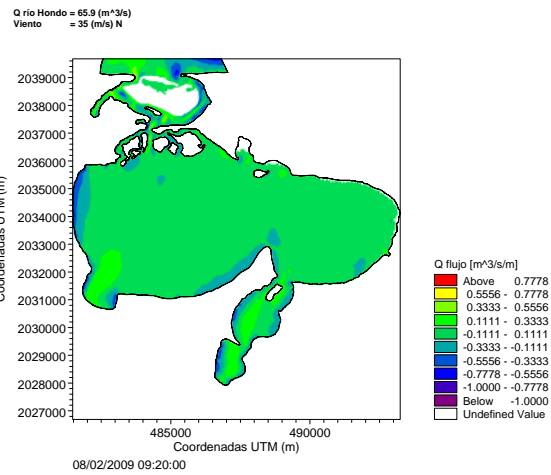


Anexo B. Resultados de Modelación

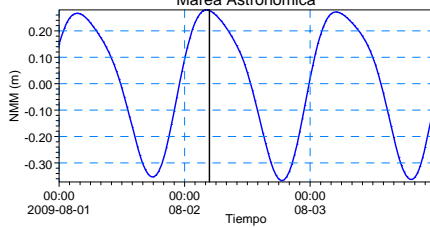
Laguna de Mecoacán, Tabasco



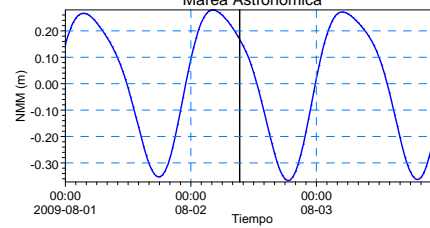
Laguna de Mecoacán, Tabasco



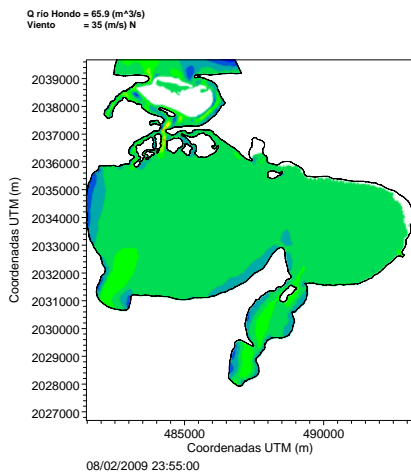
Marea Astronómica



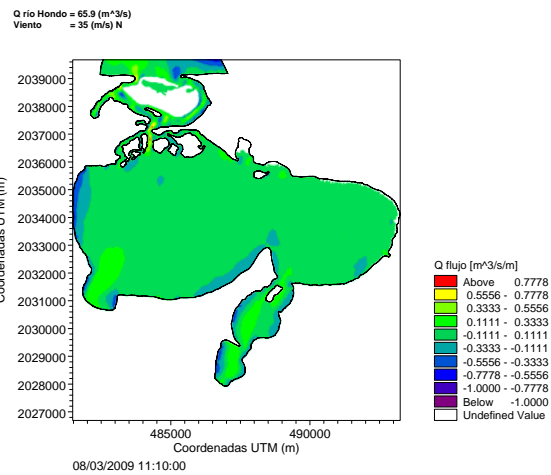
Marea Astronómica



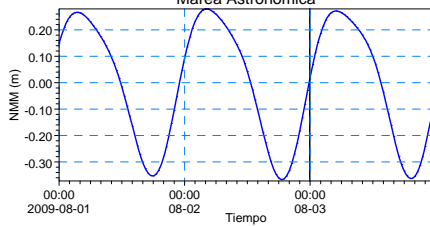
Laguna de Mecoacán, Tabasco



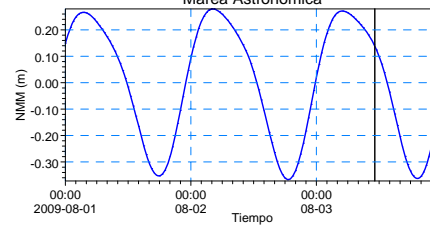
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea Astronómica



Marea Astronómica

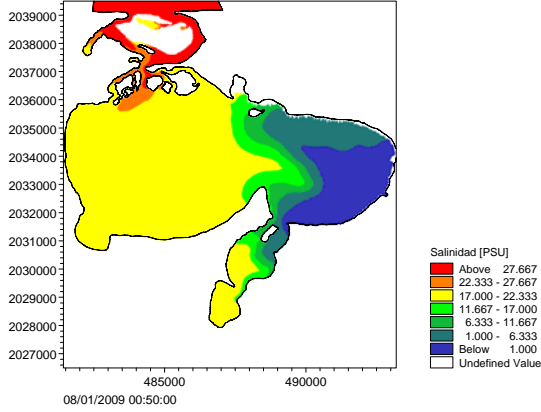


Anexo B. Resultados de Modelación

4.2. SALINIDAD

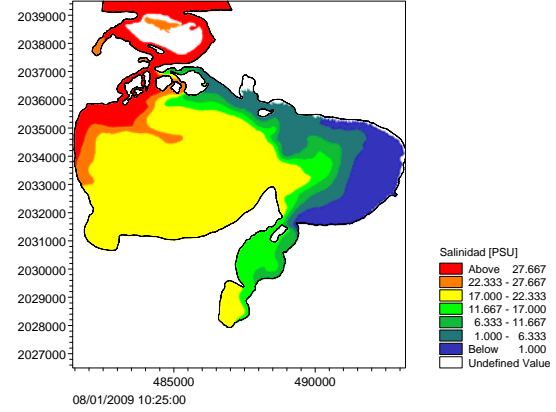
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N

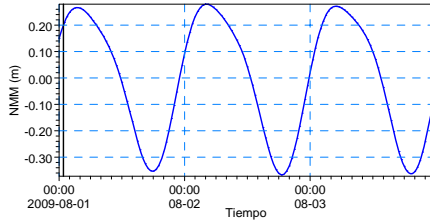


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

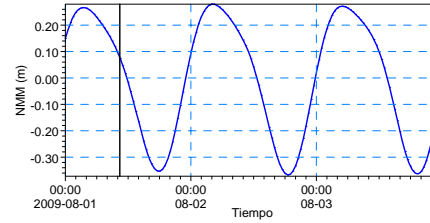
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



Marea Astronomica

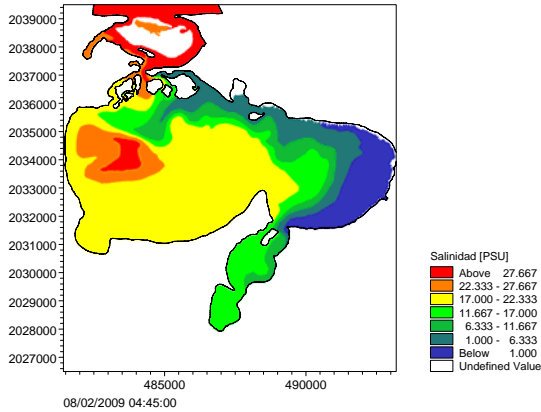


Marea Astronomica



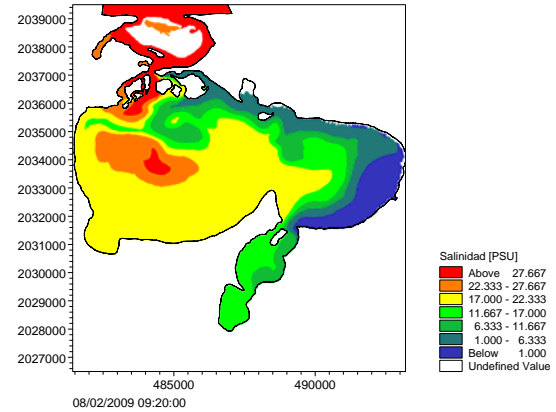
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N

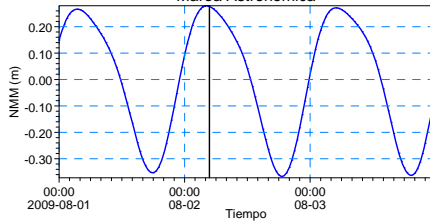


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

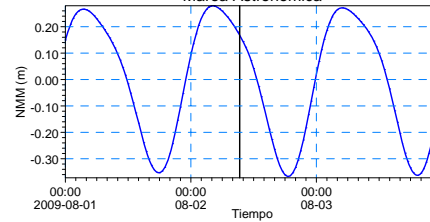
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



Marea Astronomica



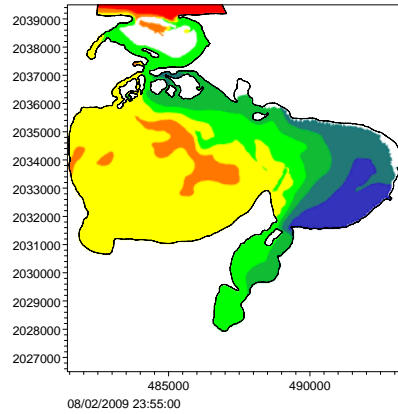
Marea Astronomica



Anexo B. Resultados de Modelación

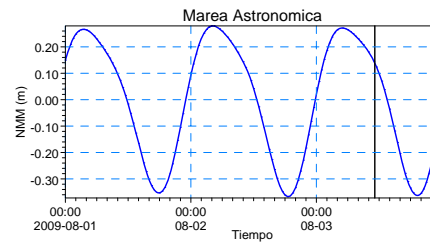
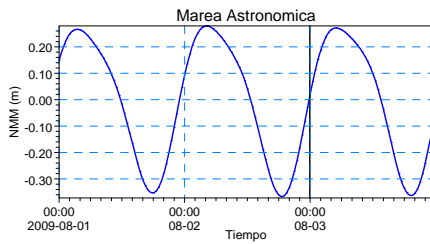
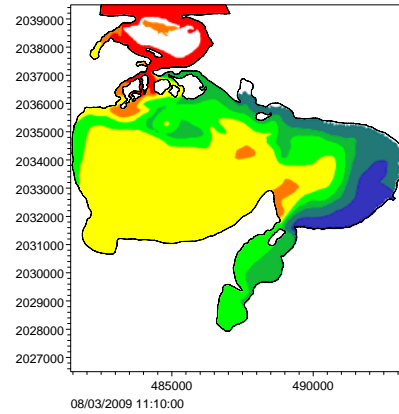
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



Laguna de Mecoaacán, Tabasco

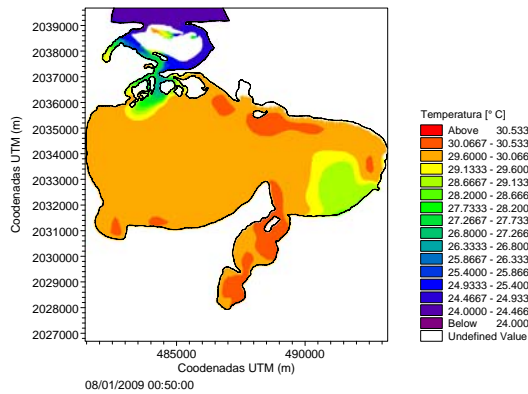
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



4.3. TEMPERATURA

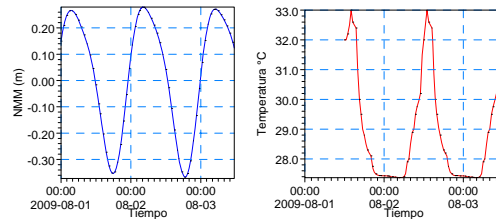
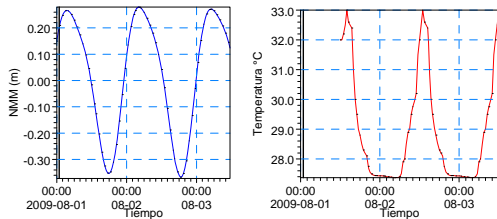
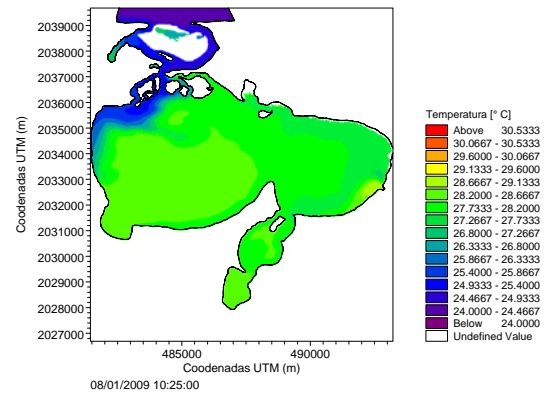
Laguna de Mecoaacán, Tabasco
Evento extremo Viento

Q río Hondo = 67.5 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N

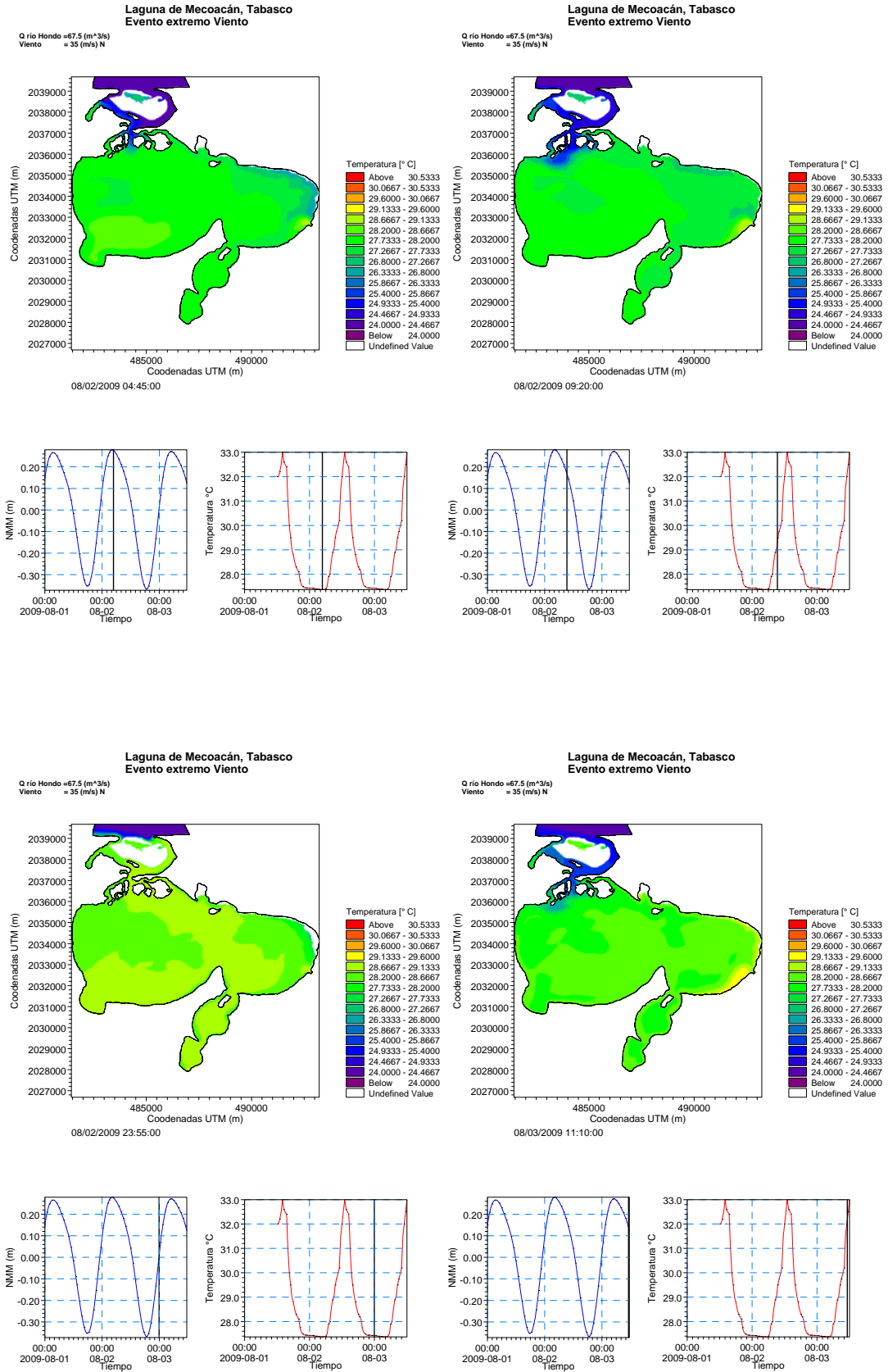


Laguna de Mecoaacán, Tabasco
Evento extremo Viento

Q río Hondo = 67.5 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



Anexo B. Resultados de Modelación

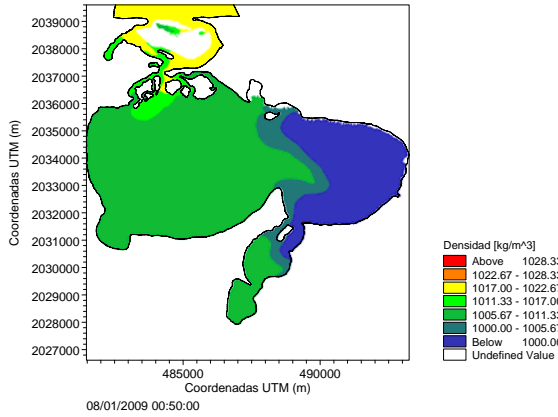


Anexo B. Resultados de Modelación

4.4. DENSIDAD

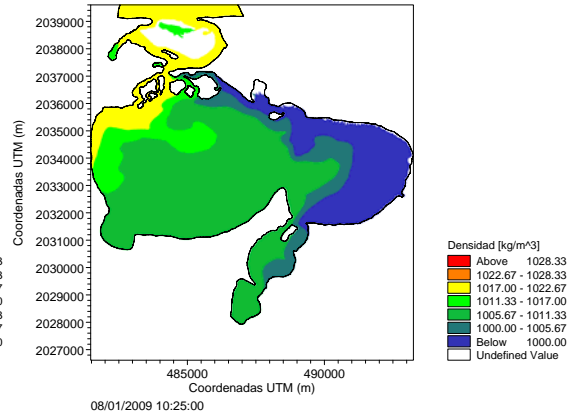
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N

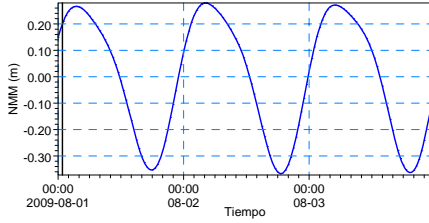


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

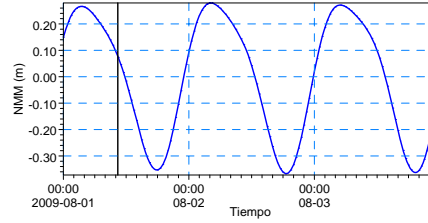
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



Marea Astronomica

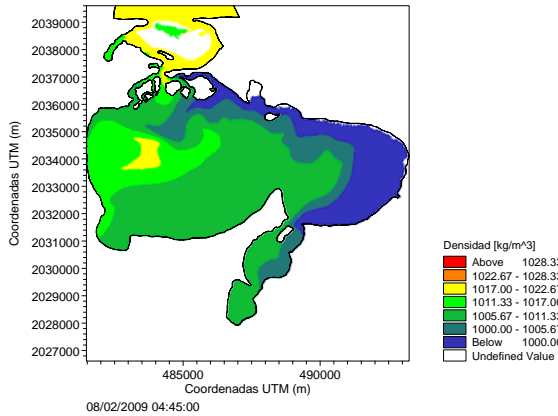


Marea Astronomica



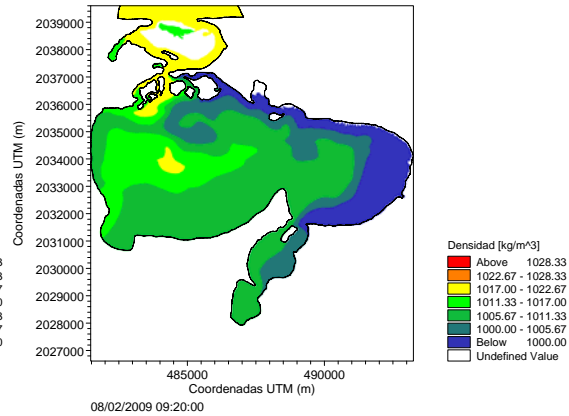
Laguna de Mecoaacán, Tabasco

Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N

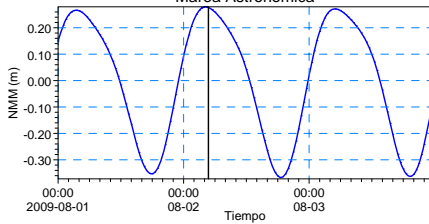


Laguna de Mecoaacán, Tabasco

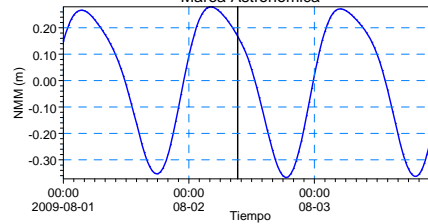
Q río Hondo = 65.9 (m³/s)
Viento = 35 (m/s) N



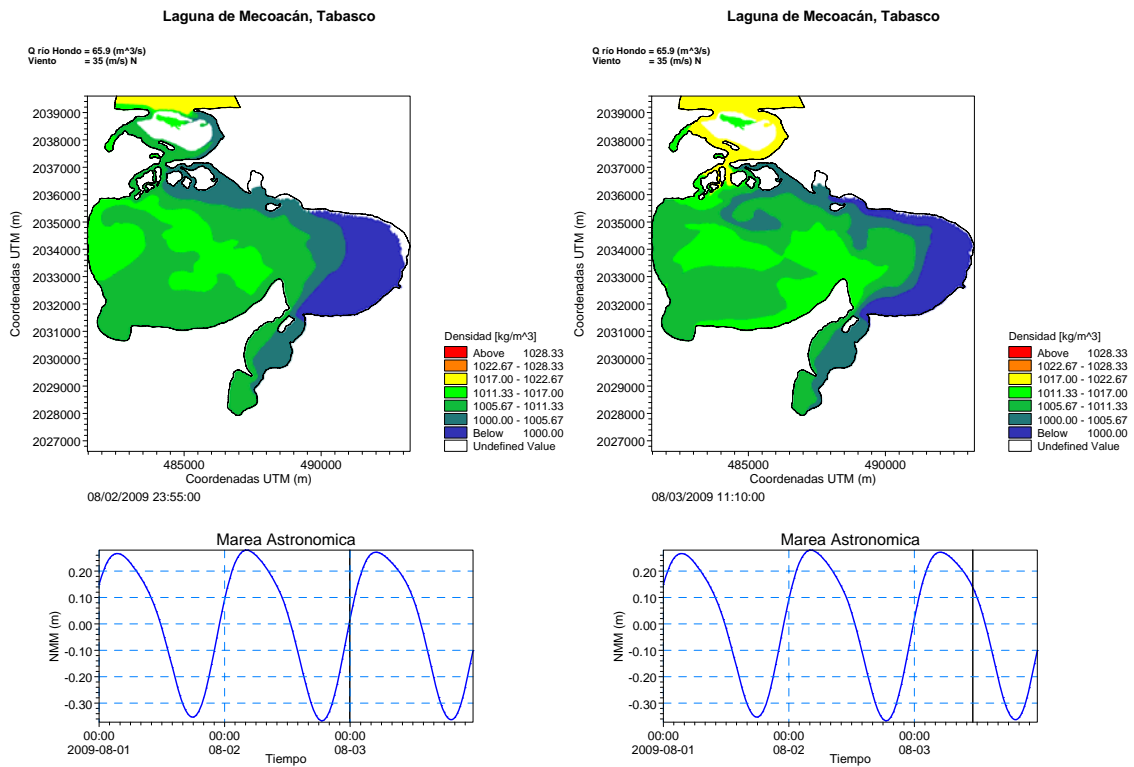
Marea Astronomica



Marea Astronomica



Anexo B. Resultados de Modelación



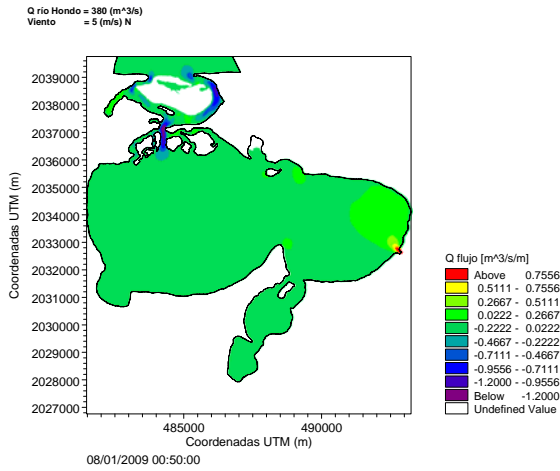
5. ESCENARIO SIMULTÁNEO – MAREA DE TORMENTA Y DESCARGA EN EL RÍO

Se presentan una la secuencia de seis momentos de modelación para gasto Q (m^3/s), salinidad (UPS), temperatura ($^{\circ}C$) y densidad (kg/m^3). Para cada panel se muestra la variación del nivel de medio del mar aplicado en la frontera abierta de marea (parte inferior), incluida en esta gráfica el paso de tiempo modelado (línea vertical). Las condiciones de forzamiento son de Gasto del río (Q_r) = 380 (m^3/s). Velocidad del viento 5 (m/s). Para los resultados de temperatura se adiciona una grafica de variación diurna con su respectiva línea de tiempo.

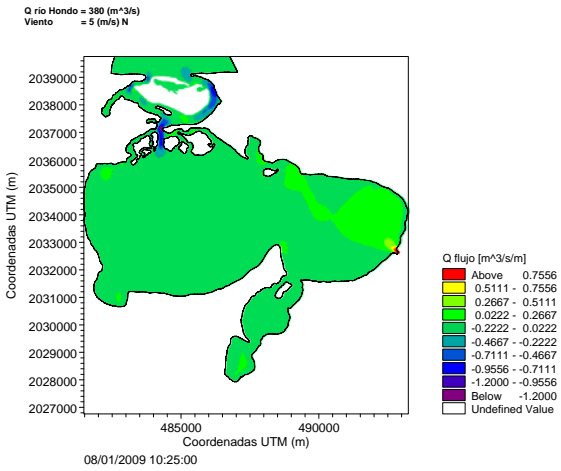
Anexo B. Resultados de Modelación

5.1. GASTO

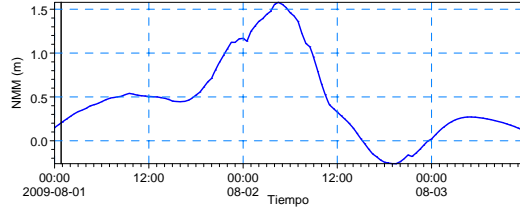
Laguna de Mecoacán, Tabasco



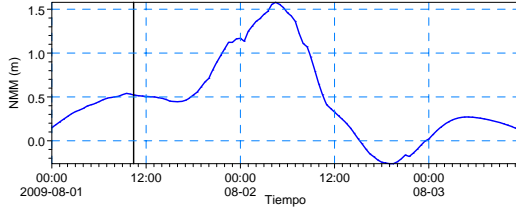
Laguna de Mecoacán, Tabasco



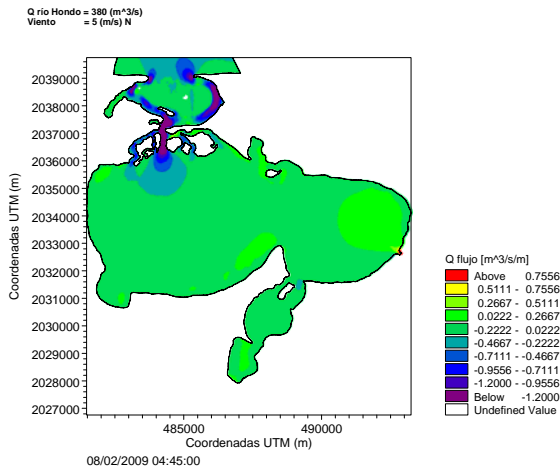
Marea de Tormenta



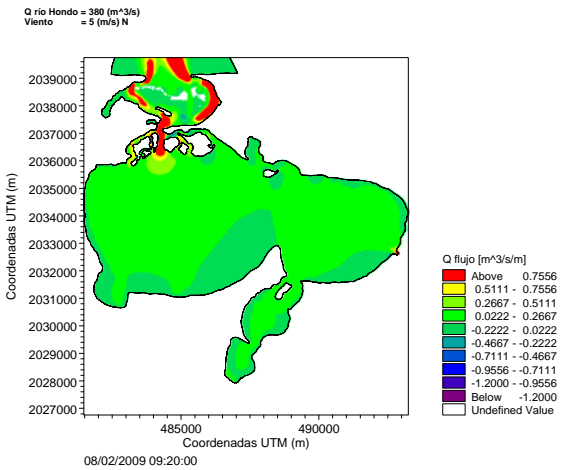
Marea de Tormenta



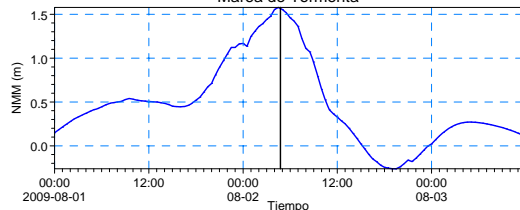
Laguna de Mecoacán, Tabasco



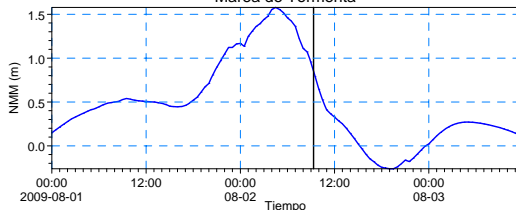
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

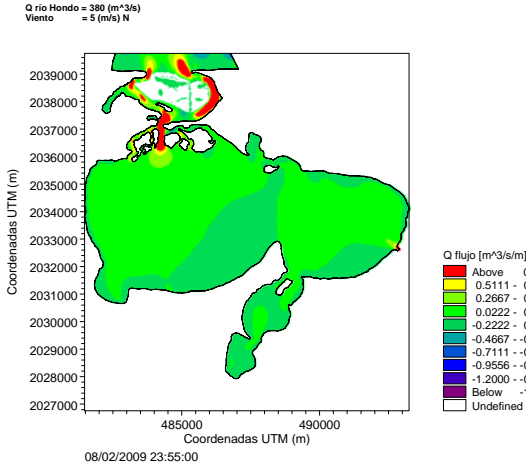


Marea de Tormenta

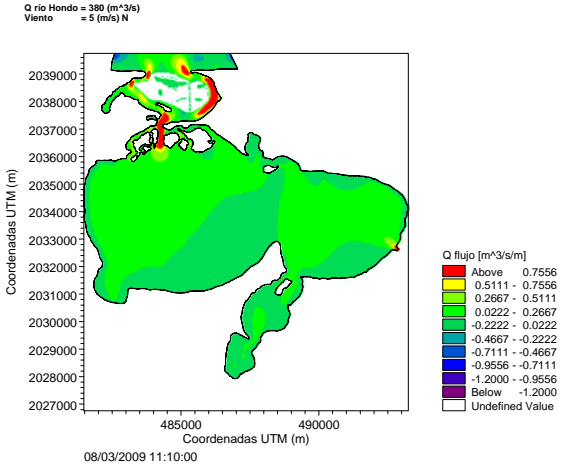


Anexo B. Resultados de Modelación

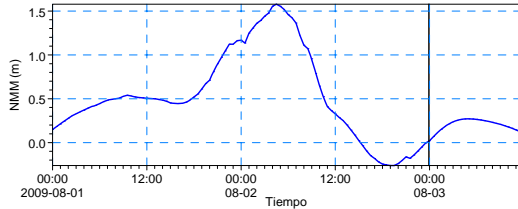
Laguna de Mecoacán, Tabasco



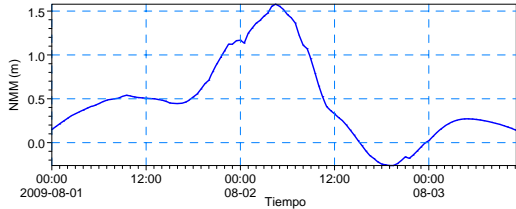
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

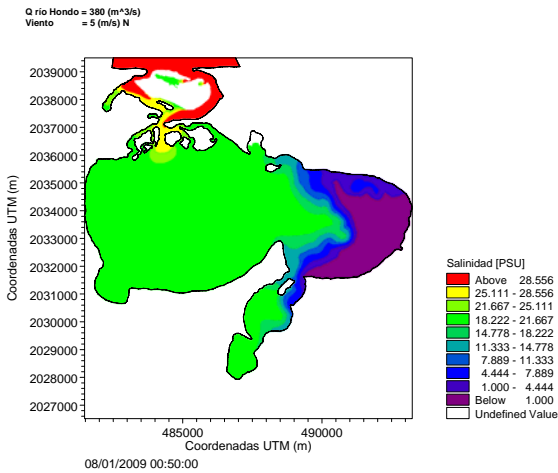


Marea de Tormenta

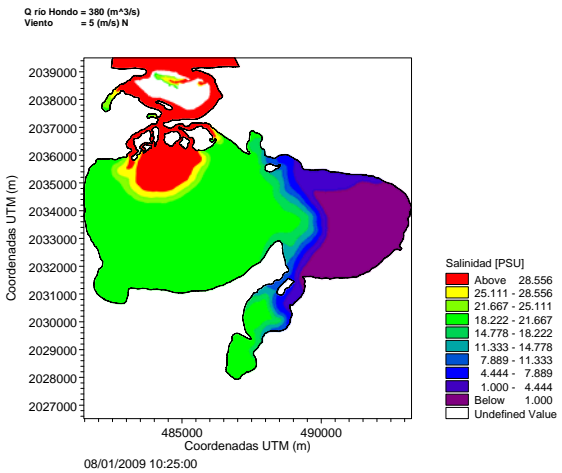


5.2. SALINIDAD

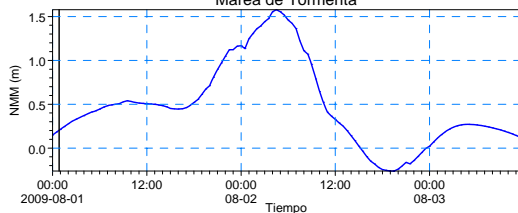
Laguna de Mecoacán, Tabasco



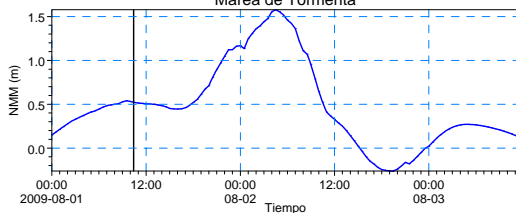
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

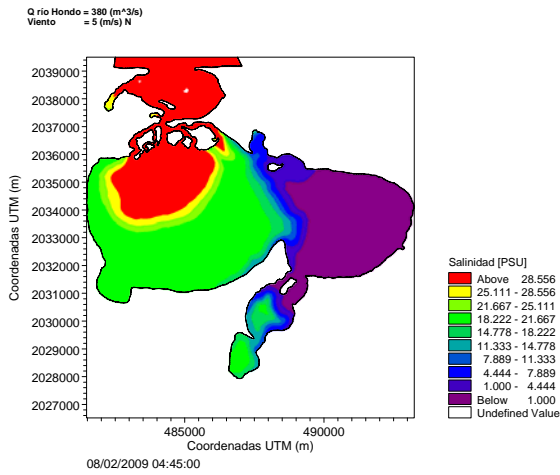


Marea de Tormenta

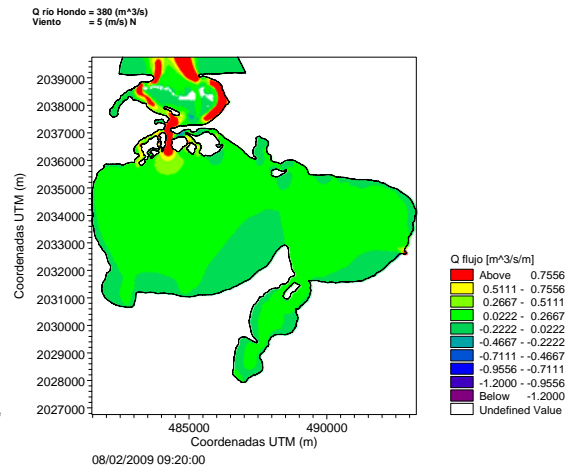


Anexo B. Resultados de Modelación

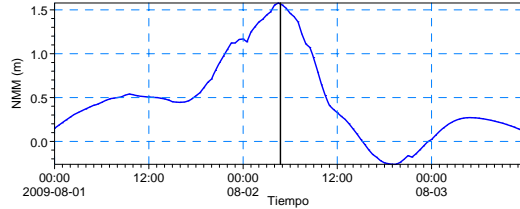
Laguna de Mecoaacán, Tabasco



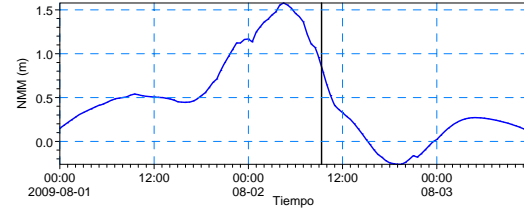
Laguna de Mecoaacán, Tabasco



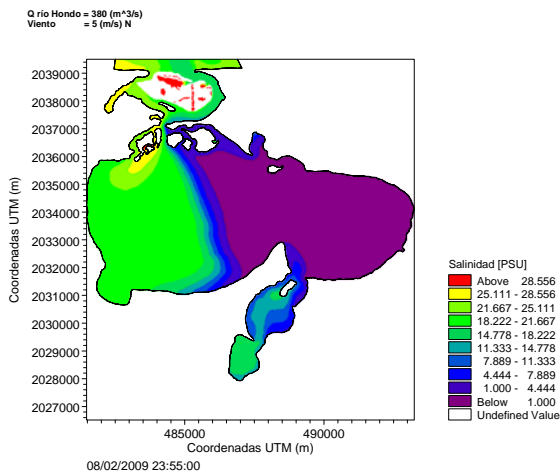
Marea de Tormenta



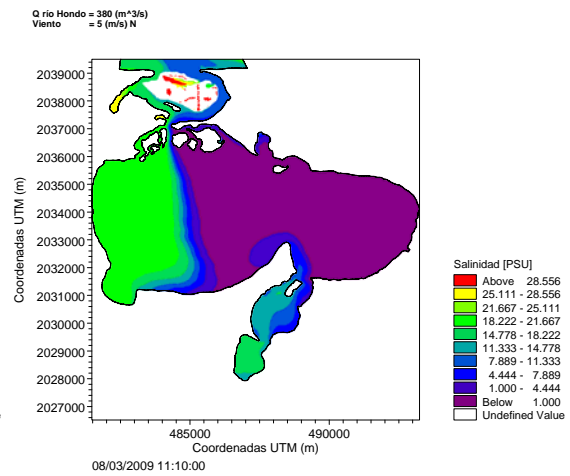
Marea de Tormenta



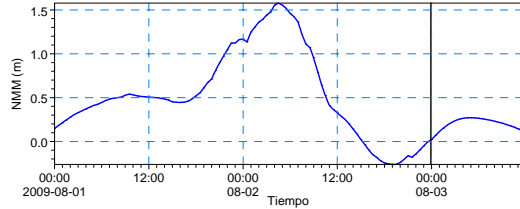
Laguna de Mecoaacán, Tabasco



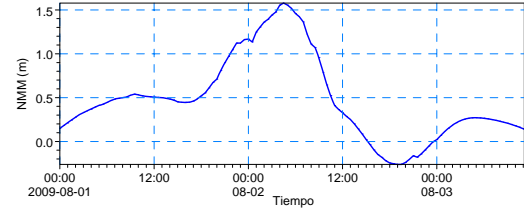
Laguna de Mecoaacán, Tabasco



Marea de Tormenta



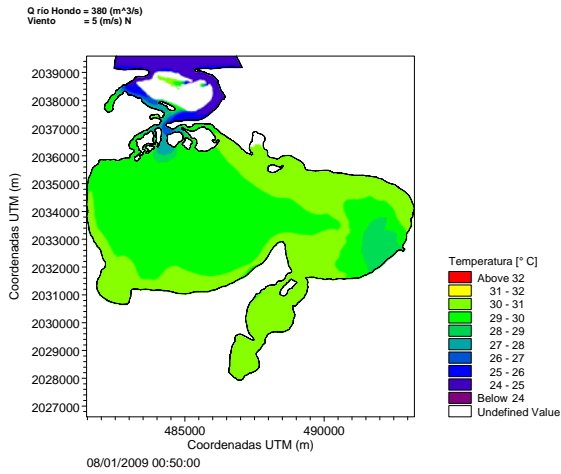
Marea de Tormenta



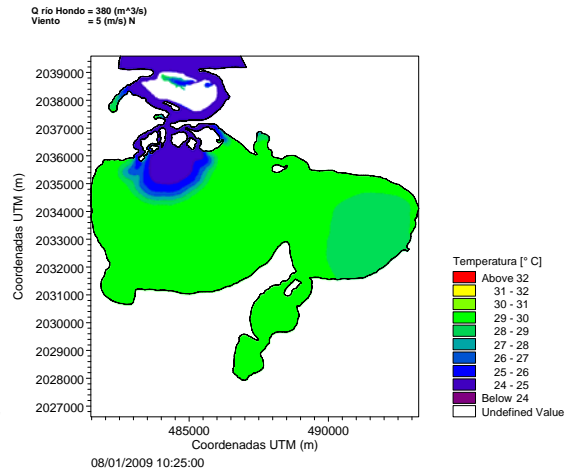
Anexo B. Resultados de Modelación

5.3. TEMPERATURA

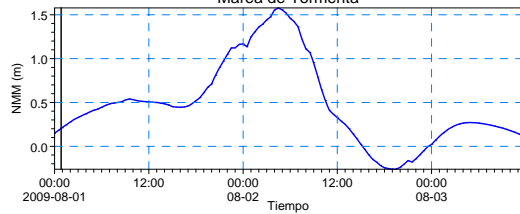
Laguna de Mecoacán, Tabasco



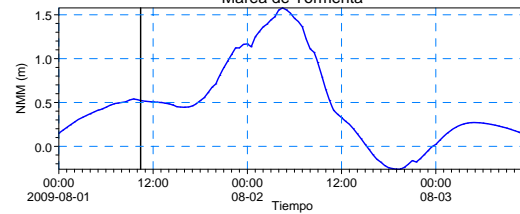
Laguna de Mecoacán, Tabasco



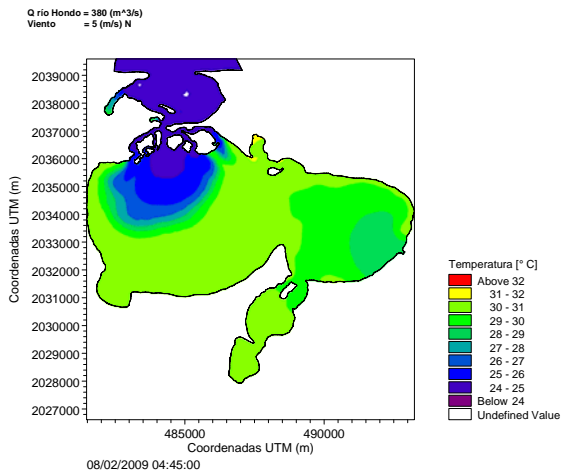
Marea de Tormenta



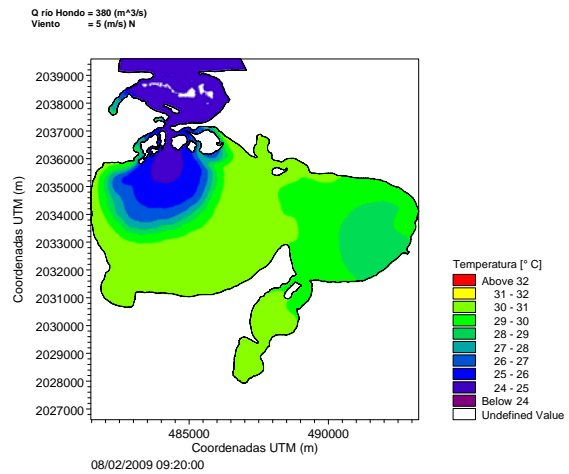
Marea de Tormenta



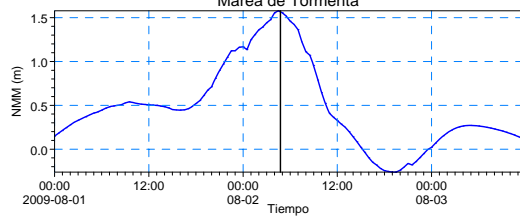
Laguna de Mecoacán, Tabasco



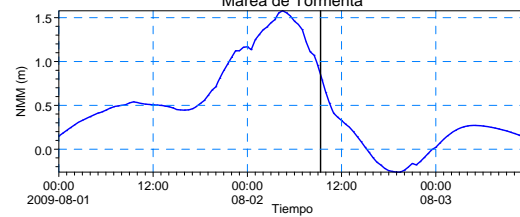
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

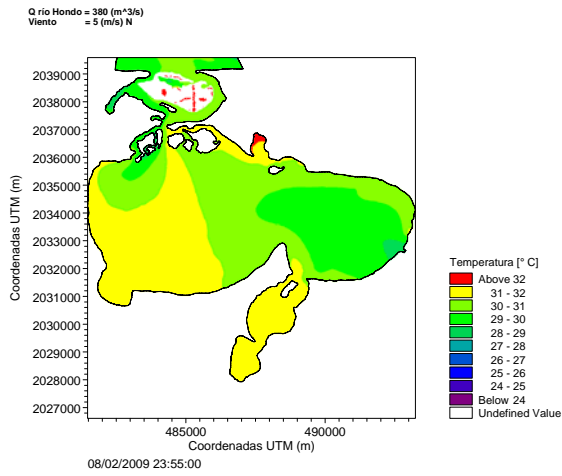


Marea de Tormenta

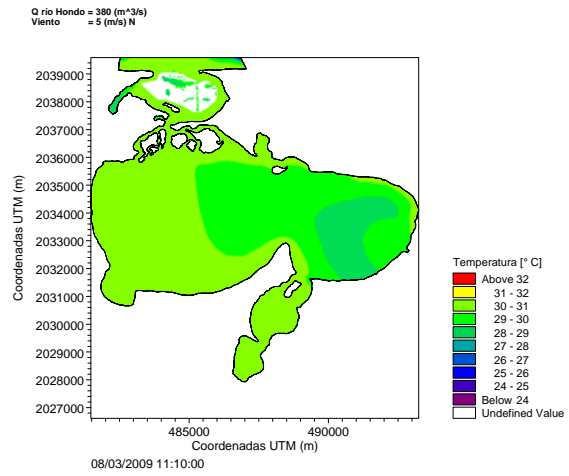


Anexo B. Resultados de Modelación

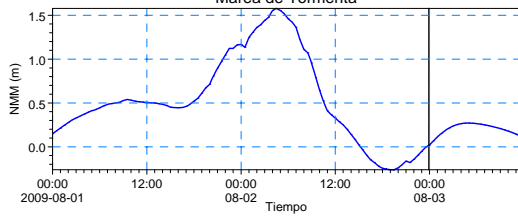
Laguna de Mecoacán, Tabasco



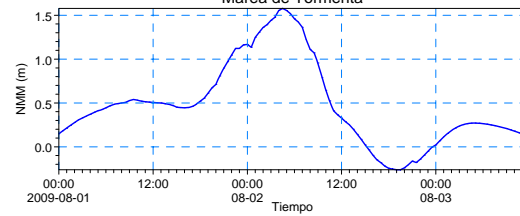
Laguna de Mecoacán, Tabasco



Marea de Tormenta

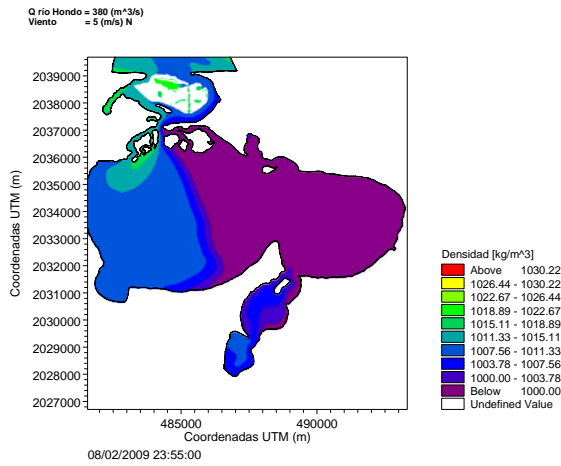


Marea de Tormenta

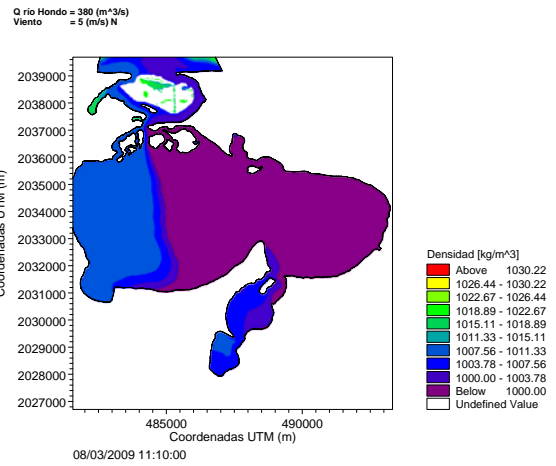


Anexo B. Resultados de Modelación

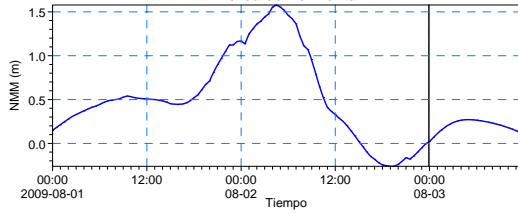
Laguna de Mecoaacán, Tabasco



Laguna de Mecoaacán, Tabasco



Marea de Tormenta



Marea de Tormenta

