

01162



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

**“Estimación de los tiempos de
residencia en la Laguna de
Términos, Campeche”**

Como requisito para obtener el grado de:

**Maestro en Ingeniería Civil
(Hidráulica)**

Presenta:

DIANA KARINA MORÁN GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA

México, D. F.

Abril de 2005



m343190



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Las lagunas costeras, dependiendo de su uso llegan a formar parte de los principales recursos de las regiones en donde se ubican, ya sea por la producción pesquera, por la ubicación de sistemas de transporte (puertos y marinas) o como sitios de desarrollo y expansión industrial, turística o urbana. Generando con estos usos una alternativa de desarrollo económico y social lo que conlleva a su vez a diversos grados de afectación o modificación del medio.

Motivo por el cual es importante y necesario conocer el comportamiento de estos sistemas, no sólo desde el punto de vista ecológico sino que también es indispensable conocer la hidrodinámica de las lagunas, ya que cualquier cambio o alteración en ellas tendrá un efecto ya sea positivo o negativo en el entorno. Sin embargo a pesar de la gran importancia que tienen estos sistemas lagunares hasta el momento son pocos los estudios que se han hecho con carácter hidrodinámico ya que la mayor parte de los trabajos que se realiza de estos son enfocados principalmente a aspectos biológicos. Por esta razón en este trabajo se aborda el tema de la calidad del agua tomando como base el análisis de los diferentes estados de corrientes de los cuerpos de agua de un sistema lagunar.

El sistema estudiado en este trabajo es la Laguna de Términos ubicada en el estado de Campeche, la cual es una de las más importantes lagunas costeras en México por su biodiversidad, actividades económicas y sociales, así como por su cercanía con la zona petrolera más importante de México (Sonda de Campeche). La Laguna de Términos se comunica con el mar por medio de sus dos bocas naturales y de una boca artificial, la cual fue abierta con la finalidad de contar con un acceso más al mar (para la mejora de actividades pesqueras, es decir optimizar tiempos). Además esta laguna forma parte del delta del sistema Grijalva-Usumacinta, por lo que descargan en ella cuatro ríos. El cuerpo de agua principal esta comunicado a su vez con un sistema de lagunas localizadas al Oeste comunicadas por medio de canales, con las que interactúa de forma directa.

La primera parte del estudio consistió en caracterizar hidrodinámicamente el sistema lagunar (por medio de un modelo numérico en dos dimensiones, promediado en la vertical), incorporando las características físicas del lugar, por medio de la implementación de cuatro distintos escenarios característicos y representativos. De esta caracterización se observó que el principal intercambio de agua entre el mar y la laguna se da por sus dos bocas naturales, que la apertura de la boca artificial favorece el patrón de circulación de la zona en donde esta ubicada. Particularmente, la Boca de Puerto Real es una boca que esta sensiblemente ligada a cualquier cambio en el patrón hidrodinámico en la Laguna.

Una vez realizada la caracterización hidrodinámica se implementó un modelo de transporte de masa, con la finalidad de representar la mezcla de dos fluidos no homogéneos (agua dulce y agua de mar) con valores de densidad distintos. Obteniendo de esta mezcla la dilución media de un fluido (agua de mar), al descargar en el otro (agua dulce); determinando de esta forma la cantidad relativa de la sustancia descargada, en cualquier punto del sistema para cualquier tiempo, es decir la concentración. Con este análisis se obtuvo que la capacidad de dilución entre ambos fluidos esta restringida al área de intercambio entre el mar y la laguna (bocas oceánicas). Además, la Boca de Puerto Real favorece en mayor medida la dilución en el cuerpo lagunar.

Finalmente, con la caracterización hidrodinámica y la determinación de la variación en las concentraciones en el sistema lagunar, se implementaron dos metodologías empíricas con las que se determinaron los tiempos de residencia en la Laguna de Términos. Recordando que los tiempos de residencia son un parámetro que permite analizar la capacidad de renovación del agua en sistemas semi-cerrados como el que nos atañe.

Con relación a los resultados obtenidos para los tiempos de residencia en la Laguna de Términos se puede decir que, existen tres distintas escalas de tiempo de residencia en el cuerpo lagunar, mismas que están en función de la posición de la sección o punto observado, del patrón hidrodinámico y de la relación dilución-dispersión, dilución-advección o la combinación de ambas.

INDICE

RESUMEN	I
INDICE	III
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE SIMBOLOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
1. IMPORTANCIA.....	3
2. ANTECEDENTES.....	4
3. OBJETIVOS.....	5
4. METODOLOGÍA.....	6
1. LIMITACIONES Y ALCANCES.....	6
1. LAGUNAS COSTERAS.....	I
1.1. DEFINICIÓN.....	11
1.2. ORIGEN DE LAS LAGUNAS COSTERAS.....	11
1.3. LAGUNAS COSTERAS MEXICANAS.....	12
1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS LAGUNAS COSTERAS MEXICANAS, SEGÚN LANKFORD.....	13
TIPO I. Erosión diferencial.....	13
a) Valle inundado abierto.....	13
b) Boca de Valle inundado abierto.....	13
c) Valle inundado con barrera.....	14
d) Boca de Valle inundado con barrera.....	14
e) Cañón rocoso inundado.....	14
f) Depresión Kárstica inundada.....	14
TIPO II. Sedimentación terrígena diferencial.....	14
a) Depresión intradeltaica marginal.....	14
b) Depresión deltaica con barrera.....	14
c) Playas deltaicas.....	15
TIPO III. Plataforma de barrera interna.....	15
a) Barrera de Gilbert Beaumont.....	15
b) Lagunas culpadas.....	15
c) Depresión de laguna costera.....	15
TIPO IV. Orgánicas.....	16
a) Laguna con barrera coralina-alga.....	16
b) Laguna de barrera con manglar.....	16
TIPO V. Tectónicas.....	16
a) Laguna estructural.....	16
b) Laguna volcánica.....	16
2. MODELOS.....	19
2.1. MODELOS MATEMÁTICOS.....	19
2.1.1. Ecuación de continuidad.....	19
2.1.1.2. Ecuación de cantidad de movimiento.....	20
2.1.2.1. Ecuación de advección-dispersión.....	25
2.2. CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA.....	28
2.2.2.1. Condiciones de fondo.....	29

2.2.2.2.	Fronteras cerradas	29
2.2.2.3.	Fronteras internas.....	29
2.2.2.4.	Fronteras abiertas.....	31
2.3.	MODELO NUMÉRICO.....	31
3.	APLICACIÓN DE LOS MODELOS	35
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	35
3.1.1.	Clima	37
3.1.2.	Temperatura.....	38
3.1.3.	Salinidad.....	38
3.1.4.	Vegetación	38
3.1.5.	Hidrología.....	39
3.1.6.	Mareas	40
3.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	44
3.2.1.	Actualización de la malla de estudio.....	44
3.2.2.	Actualización de la Batimetría.....	48
3.2.3.	Determinación de los coeficientes de rugosidad y fondo, viscosidad de remolino y porosidad de manglar	48
3.2.3.1.	Determinación de los coeficientes de rugosidad y fondo.....	48
3.2.3.2.	Determinación del coeficiente de viscosidad de remolino.....	49
3.2.3.3.	Determinación del coeficiente de porosidad de manglar.....	49
3.3.	CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA.....	50
3.3.1.	Tiempo de estabilización del modelo.....	50
3.3.2.	Conservación de masa.....	52
3.4.	FORMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	54
3.4.1.	Condiciones de forzado.....	55
3.4.1.1.	Ríos.....	55
3.4.1.2.	Mareas	55
3.4.2.	Determinación de escenarios	59
3.4.2.1.	Caso 1.....	59
3.4.2.2.	Caso 2.....	59
3.4.2.3.	Caso 3.....	59
3.4.2.4.	Caso 4.....	59
4.	RESULTADOS HIDRODINÁMICOS.....	63
4.1.	CASO 1. Marea monocromática y gastos de estiaje.....	63
4.1.1.	Velocidades y elevación de superficie libre.....	63
4.1.1.1.	Boca de Sabancuy.....	63
4.1.1.2.	Boca de Puerto Real.....	64
4.1.1.3.	Boca del Carmen.....	64
4.1.2.	Variación de la señal de marea, Caso 1	67
4.2.	CASO 2. Marea reconstituida con los efectos de la distorsión	81
4.2.1.	Velocidades y elevación de superficie libre.....	81
4.2.1.1.	Boca de Sabancuy.....	81
4.2.1.2.	Boca de Puerto Real.....	85
4.2.1.3.	Boca del Carmen.....	86
4.2.2.	Variación de la señal de marea, Caso 2	87
4.3.	CASO 3. Marea generada del análisis armónico y gastos medios.....	93
4.3.1.	Velocidades y elevación de superficie libre.....	93
4.3.1.1.	Boca de Sabancuy.....	93
4.3.1.2.	Boca de Puerto Real.....	94

4.3.1.3.	Boca del Carmen.....	96
4.3.2.	Variación de los gastos residuales en el periodo simulado.....	97
4.4.	CASO 4. Marea con la influencia del Huracán Isidore.....	99
4.4.1.	Velocidades y elevación de superficie libre.....	99
4.4.1.1.	Boca de Sabancuy.....	99
4.4.1.2.	Boca de Puerto Real.....	100
4.4.1.3.	Boca del Carmen.....	101
4.4.2.	Variación de los gastos residuales en el periodo simulado.....	102
4.5.	CONCLUSIONES HIDRODINÁMICAS.....	105
5.	ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	109
5.1.	DEFINICIÓN.....	109
5.2.	MODELO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN.....	109
5.2.1.	Implementación del modelo.....	109
5.2.2.	Resultados del modelo de advección-dispersión.....	110
5.2.2.1.	Análisis de la evolución espacial de las concentraciones medias.....	110
5.2.2.2.	Análisis de la evolución espacial de las concentraciones mínimas.....	114
5.2.3.	Conclusiones del modelo de advección-dispersión.....	117
5.3.	METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	118
5.3.1.	Metodología propuesta por Thomann y Mueller, 1987.....	118
5.3.2.	Metodología propuesta por Van de Kreeke, 1988.....	119
5.4.	RESULTADOS DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	121
5.4.1.	Caso 1. Marea monocromática y gastos de estiaje.....	124
5.4.1.1.	Metodología de Thomann y Mueller (1987).....	124
5.4.1.2.	Metodología de Van de Kreeke, 1988.....	126
5.4.2.	Caso 2. Marea reconstituida con distorsión en la fase y amplitud con gastos de estiaje.....	128
5.4.2.1.	Metodología de Thomann y Mueller (1987).....	128
5.4.2.2.	Metodología de Van de Kreeke, 1988.....	130
5.4.3.	Caso 3. Marea reconstituida del análisis armónico y gastos medios.....	132
5.4.3.1.	Metodología de Thomann y Mueller (1987).....	132
5.4.3.2.	Metodología de Van de Kreeke, 1988.....	134
5.4.4.	Caso 4. Marea medida en campo y gastos de avenidas.....	136
5.4.4.1.	Metodología de Thomann y Mueller (1987).....	136
5.4.4.2.	Metodología de Van de Kreeke, 1988.....	138
5.4.5.	Resumen de resultados y conclusiones.....	141
COCLUSIONES	145
BIBLIOGRAFIA	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Siete regiones de estudio de las lagunas costeras mexicanas (Lankford).....	13
Figura 2. 1 Cubo infinitesimal	19
Figura 2. 2 Fuerzas externas que actúan sobre el volumen de control	21
Figura 2. 3 Modelación del parámetro de porosidad de manglar.....	30
Figura 2. 4 Esquema numérico del método de Newon-Rhapson	32
Figura 3. 1 Localización de la Laguna de Términos.....	35
Figura 3. 2 Localización de las bocas naturales y de la isla del Carmen.....	36
Figura 3. 3 Cuerpo principal de la Laguna de Términos y sistemas adyacentes.....	37
Figura 3. 4 Ubicación de las estaciones de mediciones de Temperatura y salinidad (EPOMEX, 1993)	39
Figura 3. 5 Localización del equipo de medición colocado en la boca de Puerto Real.....	41
Figura 3. 6 Localización del equipo de medición en la boca del Carmen.	41
Figura 3. 7 Señales de marea medidas en las bocas del Carmen y Puerto Real, Septiembre de 2002.....	42
Figura 3. 8 Malla de estudio y calculo generada por Espinal, (Espinal, 2002).....	45
Figura 3. 9 Malla de cálculo final.....	47
Figura 3. 10 Batimetría actualizada de la zona de estudio.....	48
Figura 3. 11 Diferencia de superficie libre entre el tercero y cuarto ciclo de marea.....	51
Figura 3. 12 Diferencia de velocidades entre el tercero y cuarto ciclo de marea.....	52
Figura 3. 13 Secciones de control en (a) Boca del Carmen, (b) Boca de Puerto Real y (c) Boca de Sabancuy.....	53
Figura 3. 14 Gasto total a través de las bocas oceánicas, (marea monocromática).....	54
Figura 3. 15 Señal de marea monocromática en las bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen.....	55
Figura 3. 16 Señal de marea generada en las bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy tomando en cuenta la distorsión de la señal.....	57
Figura 3. 17 Señales de marea generadas a partir del análisis armónico en las bocas de Carmen, Puerto Real y Sabancuy, Septiembre 2002.	58
Figura 3. 18 Trayectoria del huracán Isidore y ubicación de la Laguna de Términos.	60
Figura 4. 1 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para un ciclo de marea, Caso 1.....	65
Figura 4. 2 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para un ciclo de marea, Caso 1.....	66
Figura 4. 3 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para un ciclo de marea, Caso 1.....	66
Figura 4. 4 Variación de la elevación de superficie libre en las Bocas del carmen, Puerto Real y Sabancuy.....	67
Figura 4. 5 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos, para el caso1, hora 0.....	68
Figura 4. 6 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 3.....	69
Figura 4. 7 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 10.5.....	69

Figura 4. 8 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 12.....	70
Figura 4. 9 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 15.....	70
Figura 4. 10 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 20.25.....	71
Figura 4. 11 Formación de la divergencia de los prismas de marea al oeste del Estero de Sabancuy, hora 0, Caso 1.....	72
Figura 4. 12 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea cerca de la entrada oeste del Estero de Sabancuy, hora 3, Caso 1.....	73
Figura 4. 13 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea, localizada cerca de la parte media del estero, hora 5.25, Caso1.....	73
Figura 4. 14 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea localizada en la parte media del Estero de Sabancuy, hora 7.5, Caso 1.....	74
Figura 4. 15 Desplazamiento de la divergencia entre los prismas de marea, localizada en la parte Este del Estero de Sabancuy, hora 9, caso1.....	74
Figura 4. 16 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy (reflujo a flujo) y desvanecimiento de la divergencia entre los prismas de marea, hora 10.5, caso 1.....	75
Figura 4. 17 Cambio de régimen en la Boca de Puerto Real (reflujo a flujo), hora 12, Caso 1.....	75
Figura 4. 18 Formación de la convergencia entre los prismas de marea localizada al Oeste del Estero de Sabancuy, hora 15, caso 1.....	76
Figura 4. 19 Desplazamiento de la convergencia entre los prismas de marea, localizada cerca de la parte media del Estero de Sabancuy, hora 17.25, caso 1.....	76
Figura 4. 20 Desplazamiento de la convergencia generada entre los prismas de marea, localizada en la parte Este del Estero de Sabancuy, hora 20.25, caso 1.....	77
Figura 4. 21 Desplazamiento de la convergencia generada entre los prismas de marea localizada cerca de la Boca de Sabancuy, hora 21, caso 1.....	77
Figura 4. 22 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy (flujo a reflujo) causada por la influencia del prisma de marea de Puerto Real sobre el de Sabancuy, hora 24, caso 1.....	78
Figura 4. 23 Secciones de control en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy con el océano.....	79
Figura 4. 24 Variación en la elevación de superficie libre en las secciones de control alojadas en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy (Figura 4. 23).....	80
Figura 4. 25 Gasto que pasa a través de las secciones de control alojadas en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy.....	80
Figura 4. 26 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para un ciclo de marea, Caso 2.....	82
Figura 4. 27 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en el Estero de Sabancuy, hora 0, caso 2.....	82
Figura 4. 28 Formación de la divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy al Oeste del Estero de Sabancuy, hora 1.5, caso 2.....	83
Figura 4. 29 Desplazamiento de la divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 2.25, caso 2.....	83
Figura 4. 30 Desplazamiento de la divergencia formada entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy en el Estero de Sabancuy, hora 3, caso 2.....	84

Figura 4. 31 Desplazamiento de la divergencia formada por los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 3.75, caso 2.....	84
Figura 4. 32 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy y desvanecimiento de la divergencia formada entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 4.5, caso 2.....	85
Figura 4. 33 Velocidades y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para un ciclo de marea, Caso 2.....	86
Figura 4. 34 Velocidades y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para un ciclo de marea, Caso 2.....	87
Figura 4. 35 Variación en la elevación de superficie libre en las Bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy, Caso 2.....	88
Figura 4. 36 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 3.75.....	89
Figura 4. 37 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 4.5.....	89
Figura 4. 38 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 6.75.....	90
Figura 4. 39 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 8.25.....	90
Figura 4. 40 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 12.....	91
Figura 4. 41 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 12.75.....	91
Figura 4. 42 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 15.75.....	92
Figura 4. 43 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 17.25.....	92
Figura 4. 44 Variación de la velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy, Caso 3.....	94
Figura 4. 45 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real, Caso 3.....	95
Figura 4. 46 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real del 2 al 7 de Septiembre de 2002.....	96
Figura 4. 47 Variación de velocidades y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen, Caso 3.....	97
Figura 4. 48 Variación de los gastos que pasan a través de las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen, Caso 3.....	98
Figura 4. 49 Variación de los gastos residuales en las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen, Caso 3.....	99
Figura 4. 50 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.....	100
Figura 4. 51 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.....	101
Figura 4. 52 Variación de Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.....	102
Figura 4. 53 Variación de los gastos que pasan a través de las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.....	103
Figura 4. 54 Variación de los gastos residuales en las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.....	104

Figura 5. 1 Variación espacial de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 1.....	112
Figura 5. 2 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 2.	112
Figura 5. 3 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 3.	113
Figura 5. 4 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 4.	113
Figura 5. 5 Variación de concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 1 ..	115
Figura 5. 6 Variación de concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 2. .	115
Figura 5. 7 Variación de las concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 3.....	116
Figura 5. 8 Variación de las concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 4.....	116
Figura 5. 9 Localización de los puntos de control en la Laguna de Términos para la determinación de los tiempos de residencia.....	122
Figura 5. 10 Localización de las secciones de control propuestas para la determinación de los tiempos de residencia en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos.	123
Figura 5. 11 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 1.	125
Figura 5. 12 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 1.....	125
Figura 5. 13 Variación espacial de la concentración media en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.	126
Figura 5. 14 Gasto que pasa a través de las secciones de control distribuidas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.	127
Figura 5. 15 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 2.	129
Figura 5. 16 Variación de la concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 2.....	130
Figura 5. 17 Variación espacial de la concentración en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2.	131
Figura 5. 18 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2.....	131
Figura 5. 19 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 3.	133
Figura 5. 20 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 3.....	134
Figura 5. 21 Variación de concentraciones medias en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.	135
Figura 5. 22 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.	135
Figura 5. 23 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 4.....	137

Figura 5. 24 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 4.....	138
Figura 5. 25 Variación de concentración en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.	139
Figura 5. 26 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 3. 1 Aporte de gastos de los principales ríos que descargan a la Laguna de Términos.....	40
Tabla 3. 2 Principales componentes armónicas obtenidas en las bocas del Carmen y Puerto Real.....	43
Tabla 3. 3 Constantes armónicas utilizadas para la reconstitución de la señal de marea	56
Tabla 5. 1 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.	23
Tabla 5. 2 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2.	23
Tabla 5. 3 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.	23
Tabla 5. 4 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.	23
Tabla 5. 5 Resumen de los tiempos de residencia obtenidos en los puntos y secciones de control propuestos en la Laguna de Términos.	23

LISTA DE SIMBOLOS

x	coordenada horizontal
y	coordenada horizontal
z	coordenada vertical
dx	incremento en x
dy	incremento en y
dz	incremento en z
h	profundidad
dt	incremento en el tiempo
q	gasto
u	componente del vector velocidad en dirección x
v	componente del vector velocidad en dirección y
w	componente del vector velocidad en dirección z
ΔV	incremento de volumen
t	tiempo
F	vector de fuerzas externas
m	masa
ρ	densidad del fluido
τ	esfuerzo cortante
σ	esfuerzos normales
σ_{xx}	esfuerzos normales en dirección x
τ_{yx}	esfuerzo cortante en el fondo en dirección y
τ_{zy}	esfuerzo cortante en el fondo en dirección z
p	presión
μ	viscosidad dinámica del agua
X, Y, Z	ejes coordenados
$\bar{\rho}$	densidad promedio en el tiempo
ρ'	desviación instantánea de la densidad con respecto a la densidad promedio
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	componentes de velocidad promedio en el tiempo
u', v', w'	desviaciones instantáneas de las componentes de velocidad con respecto a las componentes de velocidad promedio
\bar{p}	presión promedio
p'	desviación instantánea de presión con respecto a la presión promedio
ε_{zz}	viscosidad de remolino vertical
ε_h	viscosidad de remolino horizontal
g	aceleración debida a la fuerza de gravedad
a	elevación del fondo
E_{xx}, E_{yy}	coeficientes de viscosidad de remolino
n	coeficiente de fricción de Manning
R	radio hidráulico

S	pendiente de la superficie libre del agua
V	velocidad de flujo promediada en la vertical
C	concentración de flujo promediada en la vertical
D	coeficiente de difusión molecular de Fick
$c(x, y)$	concentración en las direcciones x y y
ε	coeficiente de difusión turbulenta
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	coeficiente de difusión turbulenta en dirección x, y, z
D_x, D_y	coeficientes de dispersión en dirección x y y
λ	fuelle o sumidero
k	coeficiente de decaimiento
$R(c)$	efectos de lluvia
$W_{z=0}$	componente normal de velocidad en el fondo
τ_{fondo}	componente tangencial del fondo
V_i	velocidad media
$ V_i $	magnitud de la velocidad media
\vec{n}	vector normal a la superficie lateral
\vec{v}	velocidad tangencial en las paredes
∂	derivada variacional
tr	tiempo de residencia
C_0	concentración inicial
T	tiempo
V	volumen

Introducción

INTRODUCCIÓN

1. IMPORTANCIA.

"México cuenta con 11,122.5 kilómetros de costas. Su mar territorial es una franja de 12 millas náuticas de amplitud, medidas a partir de la línea de costa, y su zona económica exclusiva tiene una amplitud de 200 millas náuticas, abarcando una superficie de 3,149,920 km², incluyendo cerca de 358 km² de plataforma continental y 1.5 millones de km² de lagunas litorales" (CONAPO, 1999)

El litoral mexicano es de suma importancia debido a su gran extensión, su estratégica ubicación a nivel mundial y la riqueza y diversidad de sus recursos naturales. Con más de 11 mil kilómetros de línea de costa, México se encuentra delimitado por dos de los principales océanos, el Pacífico y el Atlántico, a lo largo de los que se distribuyen la gran variedad de ecosistemas y especies que habitan la zona costera mexicana, lo que hace que forme parte de los 15 países con mayor biodiversidad a nivel mundial.

En las zonas costeras se realizan una gran variedad de actividades que van desde la explotación de yacimientos petrolíferos, establecimiento de puertos (comerciales, industriales, turísticos y recreativos) hasta el desarrollo de pesca y cultivos marinos. Estas actividades son las que hacen que las costas mexicanas sean un potencial económico y además una opción de poblamiento. Situación que se refleja en las estadísticas del INEGI, el crecimiento de población en las zonas costeras es relativamente reciente y ha evolucionado de 2.55 millones de habitantes en 1950 a 13.67 millones de habitantes en el año de 1995, (INEGI, 1995).

Sin embargo, la proliferación de recursos generados por estas distintas actividades y el establecimiento de población a lo largo de la línea de costa genera además de una opción de desarrollo una modificación en el ambiente, lo que en ocasiones se traduce en un deterioro del ecosistema. Es por esta razón que no únicamente se debe hacer una explotación de dicho potencial, sino que además deben de conocerse y estudiarse las ventajas y limitaciones ambientales a las que se encuentra expuesto dicho ecosistema.

Por otro lado, debido a la gran cantidad de ecosistemas marinos que se encuentran alojados en los litorales mexicanos (playas arenosas y dunas, costas rocosas y acantilados, planicies de mar, pantanos salados y manglares, lagunas costeras, estuarios, deltas y bahías cerradas) no puede tratarse en conjunto la problemática de las costas mexicanas, ya que cada ecosistema que reside en éstas se encuentra afectado por agentes y procesos particulares. Este trabajo está enfocado a uno de estos ecosistemas, las lagunas costeras mexicanas, las cuales por su importancia y características tan peculiares, ubicación y distribución a lo largo del litoral requieren de estudios especializados para caracterizarlos desde el punto de vista de la hidrodinámica y de la calidad de agua.

2. ANTECEDENTES

A través del tiempo diversos investigadores se han enfocado al estudio de lagunas costeras con el fin particular de poder cuantificar la capacidad de renovación de las mismas, es decir, la determinación del tiempo que tardaría el sistema lagunar en alcanzar el nivel medio o inicial de calidad de agua a partir de un tiempo t_0 , debiendo considerar la influencia de parámetros como corrientes generadas por marea, oleaje y viento, niveles de superficie libre, aporte de los ríos, etc.

Sin embargo hasta el momento son pocos los trabajos que se han realizado teniendo como finalidad modelar numéricamente los tiempos de residencia, ya que la mayor parte de las investigaciones se han realizado en forma experimental, a partir de mediciones en campo de parámetros como oxígeno disuelto, salinidad, nitratos, o algún tipo de sustancia contaminante.

A continuación se muestra una breve recopilación de trabajos relevantes que se han avocado al estudio de los tiempos de residencia:

- En 1965 Hansen y Rattray realizaron un estudio que tenía como fin el poder relacionar el tiempo de residencia medio con el flujo del río (al que consideraron descargaba en forma constante), y la velocidad de corriente por marea, del cual proponen el diagrama de circulación de estuarios. La principal limitante de este diagrama es que por un lado no considera el mezclado natural generado por la entrada del flujo del río al sistema estuarino, y por otro asume que las mayores variaciones en los tiempos de residencia de los sistemas estuarinos están regidas por la descarga del río, despreciando los efectos generados por las corrientes de marea.

Dadas las restricciones que presenta el estudio de Hansen y Rattay se observa que éste puede ser utilizado en estuarios en donde el patrón de corrientes dominante sea el del río.

- Estudios realizados por Jay et al. 1977 proponen que son dos los procesos físicos que tienen influencia directa en la determinación de los tiempos de residencia, el primero denominado mezclado y arrastre de sedimentos y el segundo corrientes de entrada y salida del sistema. Ellos definen el mezclado y arrastre de sedimento como la variación espacial y temporal de concentración que un volumen de agua experimenta, el cual puede ser causado tanto por las corrientes de entrada y salida del flujo en el sistema estuarino como por la velocidad con la cual el sedimento se encuentra en suspensión y es depositado en el fondo, conocida como velocidad de caída de la partícula. Los autores consideran que el mezclado puede ser visto como: el mezclado de fondo, influenciado por los efectos de fricción (turbulencia), el mezclado asociado a procesos inducidos por viento (superficial), y por último el mezclado interno asociado a los efectos de oleaje y marea principalmente. Finalmente las corrientes de entrada y salida de flujo son causadas por el oleaje y la marea.

- Recientemente, Rasmunssen y Josefson (2000) realizaron el análisis en 31 estuarios daneses con similares características y dimensiones para los que estudiaron la variación espacial en los procesos bioquímicos y las propiedades de los mismos con el fin de poder cuantificar los tiempos de residencia en éstos de forma individual.

En cada uno de los estuarios obtuvieron datos como el ancho de la sección de control, el área y volumen, así como los registros de aporte de agua dulce. Con respecto a las sustancias midieron valores de concentración de nitrógeno y nitrato para un periodo de un mes, de donde obtuvieron los valores de concentración inicial y la variación de la concentración a lo largo del tiempo calculando de esta manera el tiempo de residencia de las sustancias en forma experimental.

Por otro lado, los autores aplicaron un modelo hidrodinámico en dos dimensiones con el fin de simular las condiciones dinámicas del sistema, solo que despreciaron los posibles efectos de marea argumentando que los rangos de variación de la misma eran muy bajos (0.1 m a 0.2 m). Además asumen que la dilución está regida por las velocidades de viento (7.4 m.s-1, velocidades de viento promedio) por lo que el forzado del modelo se realiza incorporando el valor de dichas velocidades (velocidades reportadas en el estrato superior en el estudio de campo).

Los autores parten de suponer que el porcentaje de flujo de agua salada que se incorpora al sistema es igual al balance de sal del mismo. Definiendo al balance de sal como la relación de la concentración de sal en todo el sistema y la concentración de sal a través del ancho de la entrada (sección de control). Aplican la ecuación de Advección-Dispersión para obtener la variación de la concentración para finalmente calcular el tiempo de permanencia de las partículas por medio de la teoría de migración de partículas.

Tomando como base estos estudios se observa que un factor importante en la determinación de los tiempos de residencia es la adecuada incorporación y determinación de las corrientes generadas por marea.

Considerando lo anterior, en este trabajo se pretende realizar la adecuada asociación de los principales parámetros que intervienen en la estimación de los tiempos de residencia por medio de la aplicación de un modelo numérico el cual por un lado calcule el patrón de corrientes en el sistema y por otro la evolución temporal y espacial de un trazador conservativo para con esto aplicar una metodología que permita valuar la calidad de agua en un sistema lagunar por medio de la obtención de dicho parámetro.

3. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es obtener los tiempos de residencia en la Laguna de Términos, Campeche.

Objetivos particulares

- Establecer los rangos de marea en las bocas oceánicas de la Laguna de Términos, tomando como base datos medidos en campo.

- Estudiar el comportamiento de las corrientes generadas por marea y aporte de los ríos al interior de la laguna.
- A partir de la información hidrodinámica, estudiar la variación espacial y temporal de concentración de un trazador conservativo en el cuerpo lagunar. Con estos resultados, establecer las bases que permitan estimar los tiempos de residencia en la misma.
- Identificar las zonas de circulación, estancamiento y recirculación en la Laguna de Términos, además de evidenciar el nivel de comunicación entre el cuerpo principal y las lagunas adyacentes (Pom y Atasta principalmente).

4. METODOLOGÍA

Este trabajo se dividió en tres partes, la primera corresponde a un compendio de información. Por un lado, se realizó una investigación de los trabajos previos (con respecto a Tiempos de residencia), de los cuales se hace mención en este trabajo, por otro lado se realizó una breve descripción de las lagunas costeras en general, a continuación se analizaron las lagunas costeras mexicanas. Una vez identificadas las lagunas costeras mexicanas se realizó una búsqueda de información referente a la laguna que en este trabajo se analizó (Laguna de Términos, Campeche) su ubicación, localización, descripción de la región, etc.

La segunda parte del trabajo consistió en el desarrollo e implementación de los modelos. Esta etapa abarca desde el análisis del planteamiento de las ecuaciones utilizadas y resueltas por cada uno de los modelos utilizados (Hidrodinámico, Advección-Dispersión) hasta la implementación de los mismos en la región de estudio, incorporando dentro de estos modelos las principales características de dicha región.

Finalmente, el tercer punto implica la aplicación de la metodología para la obtención de los tiempos de residencia en laguna de Términos en función de las condiciones hidrodinámicas y de la variación de concentración de un trazador conservativo al interior de la laguna.

5. LIMITACIONES Y ALCANCES DEL ESTUDIO

Debido a la complejidad del trabajo, es importante delimitar adecuadamente el objeto de estudio del mismo, para ello a continuación se presentan los principales alcances:

- Generar distintos escenarios los cuales puedan considerarse representativos del comportamiento hidrodinámico en la región de estudio, por medio de la incorporación de los principales parámetros en condiciones típicas y extremas.
- Tomando como base dicha caracterización, obtener la variación en la concentración de un trazador al interior del cuerpo de agua para con esto poder aplicar la metodología adecuada para evaluar los tiempos de residencia.

Por otro lado, una de las principales limitantes es que no existen datos medidos de los principales parámetros como son el viento, la descarga de los ríos, etc. por lo que en su mayoría estos deben ser inferidos.

6. ORGANIZACIÓN

La organización de este trabajo se encuentra dividida en la introducción, cinco capítulos que a continuación se describen y las conclusiones y futuras líneas de investigación.

Capítulo 1. Lagunas costeras.

Se describe lo que son las lagunas costeras en general, el origen y formación de las mismas. Enfoque a las lagunas costeras mexicanas así como su clasificación según su origen en base al criterio propuesto por Lankford (1977)

Capítulo 2. Modelos.

En este capítulo se describen los modelos matemáticos utilizados, las ecuaciones de gobierno que resuelven cada uno de ellos, así como el modelo numérico aplicado a la solución de las ecuaciones. Por otro lado se presentan las consideraciones necesarias bajo las que trabaja cada modelo.

Capítulo 3. Aplicación de los modelos, Laguna de Términos

Se detallan las principales características de la zona de estudio (Laguna de Términos, Campeche), además de describirse como se llevo a cabo la implementación de los modelos. Se proponen los escenarios a simular y las consideraciones que se tomaron para la determinación de los mismos.

Capítulo 4. Resultados hidrodinámicos.

Se analizan los resultados obtenidos para cada caso propuesto con el fin de caracterizar adecuadamente la hidrodinámica de la Laguna de Términos, principalmente en sus bocas oceánicas.

Capítulo 5. Estimación de los tiempos de residencia.

Tomando como base los resultados hidrodinámicos, se utiliza el modelo de calidad de agua para la determinación de las zonas de estancamiento y circulación al interior de la Laguna de Términos, además de identificar el grado de comunicación que existe entre el cuerpo principal de ésta y las lagunas más alejadas del sistema (Pom y Atasta).

Capítulo 1

Lagunas Costeras

1. LAGUNAS COSTERAS

1.1. DEFINICIÓN.

Las lagunas costeras son cuerpos acuáticos que se comunican con el mar, ya sea en forma perenne o efímera, representan la colisión de dos masas de agua de distintas características (densidades), lo que genera un comportamiento físico-químico y biológico completamente distinto a otros cuerpos marinos o agua dulce.

Un estuario se define como un área cerrada donde el agua de mar que penetra se encuentra diluida con el agua proveniente de los ríos (Printchard, 1967) o escurrimientos sub-superficiales. Las lagunas costeras presentan la misma particularidad que un estuario por lo que se reconoce que una laguna costera tiene características estuarinas. Topográficamente existe una diferencia entre un estuario y una laguna y es que: en un estuario el eje principal de su cuerpo es perpendicular a la línea de costa mientras que en una laguna costera el eje principal es paralelo a ésta.

Como se mencionó, las zonas estuarinas lagunares son un fenómeno hidrológico formado por el encuentro de agua dulce proveniente de escurrimientos locales y de agua de mar transportada por la marea, principalmente.

Desde el punto de vista biológico, una laguna costera representa una zona de transición entre dos ecosistemas definidos, lo que la convierte en un complejo biológico importante debido a las variaciones que estos cuerpos presentan, por lo que permiten la formación o establecimiento de distintas especies características exclusivas de dichas regiones.

1.2. ORIGEN DE LAS LAGUNAS COSTERAS

Las lagunas costeras tienen su origen en la última glaciación (18 mil años aproximadamente). La sobre-elevación del nivel del mar inundó depresiones costeras, valles y deltas de ríos, dando origen a la actual línea de costa. Los estuarios y lagunas costeras se formaron en las áreas en donde ha existido agua proveniente del escurrimiento continental.

La tectónica de placas generó la geología regional y la fisiografía de alto relieve característico de México, dicho fenómeno ha afectado los márgenes costeros de todo el mundo. En México, el Pacífico se considera como costa de colisión, por los movimientos de la Placa Americana y la Placa de Cocos; mientras que el Golfo de México se conoce como costa de mareas marginales, a excepción de la Península de Yucatán, ya que esta se origina en la deposición de carbonatos para posteriormente emerger a la superficie.

El surgimiento de las lagunas costeras puede resumirse en cuatro puntos: (1) las características geomorfológicas originales, es decir, la evolución del nivel del mar a través del tiempo, (2) la historia geográfica de la región, relacionado con la geología y fisiografía

general, (3) la oceanografía costera, la influencia del oleaje, la marea y las corrientes generadas, (4) el clima de la región, es decir, lluvias, vientos y aportes de ríos. Este trabajo enfoca su estudio principalmente al punto 3.

Por otro lado la variación y evolución de las lagunas costeras está fuertemente influenciado por el origen de la misma, por los procesos físicos como la marea, el aporte de río, las lluvias y los vientos, además del medio ambiente como puede ser la presencia de manglares, pastos marinos, pantanos, marismas, etc..., la edad de la laguna y finalmente aspectos antropogénicos.

1.3. LAGUNAS COSTERAS MEXICANAS

A lo largo de los más de 11 000 kilómetros de línea de costa con que cuenta México, 1 600 000 hectáreas de superficies son ocupados por estuarios y de las cuales 1 250 000 hectáreas corresponden a lagunas costeras, es decir poco más del 78 %. Esta cifra muestra la importancia de caracterizar dichas regiones y llevar a cabo estudios desde el punto de vista hidrodinámico, de calidad de agua y demás estudios encaminados a la conservación y desarrollo de estos espacios, tan importantes en diferentes aspectos.

México cuenta con aproximadamente 130 lagunas costeras distribuidas a lo largo del litoral, las cuales exhiben diferentes tamaños, formas, regiones hidrológicas, ecosistemas y hábitat, estas lagunas fueron objeto de una regionalización y clasificación por Lankford en el año de 1977 (Lankford, 1977). De la agrupación que Lankford propone para las lagunas costeras se desprenden siete distintas regiones, que a continuación se presentan, (Figura 1. 1).

- La región A abarca la costa del Pacífico de Baja California, desde la frontera con Estados Unidos hasta Cabo San Lucas. Existen 18 lagunas costeras.
- La región B comprende el litoral interior de la península de Baja California, desde el paralelo 32° hasta Cabo San Lucas. La región B cuenta con 6 sistemas estuarinos.
- La región C corresponde a las costas del mar de Cortes y abarca las costas continentales del Golfo de California, desde Río Colorado hasta Mazatlán, cuenta con 40 lagunas costeras.
- La región D, costa del Pacífico, va desde Mazatlán hasta la frontera con América central; cuenta con 32 lagunas costeras.
- La región E, correspondiente al Golfo de México, desde la frontera con Estados Unidos hasta la plataforma de Yucatán; tiene 23 lagunas costeras.
- La región F, conocida como costa del Golfo de México, va desde la plataforma de Yucatán hasta Cabo Catoche y se encuentra constituida por ocho lagunas costeras.
- La región G, conocida como costa del Caribe, abarca desde la Península de Yucatán y Cabo Catoche hasta América Central, cuenta con 6 lagunas costeras.

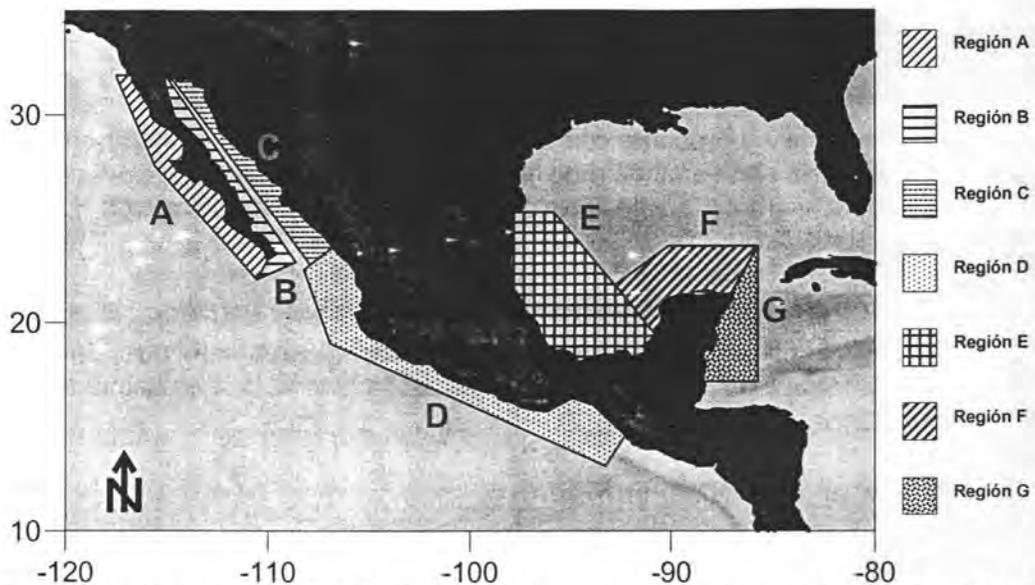


Figura 1. 1 Siete regiones de estudio de las lagunas costeras mexicanas (Lankford)

1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS LAGUNAS COSTERAS MEXICANAS, SEGÚN LANKFORD.

Como se mencionó anteriormente Lankford, no solo agrupó las lagunas costeras mexicanas, también las clasificó basándose en el tipo de formación y las características físicas de cada una de ellas (Forma, batimetría, tipo de escurrimiento, presencia de barrera, etc.). Apoyándose en estos parámetros principales propone cinco tipos de lagunas costeras a lo largo del litoral mexicano:

TIPO I. Erosión diferencial.

Estos sistemas están formados por procesos no marinos durante el descenso del nivel del mar. Fueron inundados por la trasgresión del Holoceno. Fueron modificados a partir de la estabilización del nivel del mar durante los últimos 5 mil años. Su batimetría y formas son variables, geomorfológicamente son valles inundados que están presentes planicies costeras anchas y de bajo relieve.

a) Valle inundado abierto.

Sin barrera física; con escurrimiento fluvial ausente, la forma y batimetría son poco modificadas por efectos de procesos costeros recientes; presenta efectos de modificación por refracción del oleaje y salinidad normal.

b) Boca de Valle inundado abierto

Sin barrera física, presenta escurrimiento fluvial continuo o estacional, la forma y batimetría son modificadas por procesos costeros y fluviales, presenta efectos de refracción del oleaje, puede llegar a tener

profundidades mayores debido al efecto de marea. La salinidad es variable.

c) **Valle inundado con barrera.**

Barrera física presente con escurrimiento ausente, tanto su forma como su batimetría son variadas modificadas por procesos costeros por la acción de marea, viento y oleaje, presenta fuertes corrientes de marea y salinidad normal.

d) **Boca de Valle inundado con barrera.**

Barrera física presente, manifiesta escurrimiento continuo, la forma y batimetría son modificadas por deltas lagunares y formaciones de sublagunas.

e) **Cañón rocoso inundado.**

Sin barrera física generalmente, puede presentar islas rocosas; el tipo de escurrimiento es ausente o estacional, la forma y batimetría son poco modificadas, pueden producirse en éste pequeños deltas de granos y pequeñas playas. La salinidad es normal.

f) **Depresión Kárstica inundada.**

Barrera física presente como bajos de arena o crecimientos arrecifales, no presenta escurrimiento superficial, tiene manantiales de agua continental al fondo de la misma; su forma y batimetría se encuentran modificadas cerca de las bocas por procesos costeros. Presenta efectos de marea y huracanes, con salinidad normal.

TIPO II. Sedimentación terrígena diferencial.

Las lagunas costeras se encuentran asociadas a sistemas deltaicos fluviales producidos por sedimentación irregular o superficie que causa la compactación de los efectos de carga. Desde su formación varios de estos sistemas han sido modificados (a través de 5 mil años), al igual que otros que son más recientes (cientos de años). En estos se forman rápidamente barreras arenosas, con depresiones marginales o intradeltaicas muy someras. Lagunas alargadas entre montículos de playa son frecuentemente a lo largo de los planos de las regiones C y E.

a) **Depresión intradeltaica marginal.**

Presenta barreras arenosas; el escurrimiento es directo o entrar a través de ensenadas, las modificaciones en la forma y batimetría son rápidamente apreciables, la salinidad es típicamente baja pero puede mostrar estacionalidad y variaciones en el tiempo. Como laguna de Términos y bahía de Topolobampo.

b) **Depresión deltaica con barrera.**

Existen barreras de varios tipos; lodos, arenas, manglares, etc.; los escurrimientos son directos de ríos y tributarios. Las modificaciones de

forma y batimetría son lentas; a excepción de los canales la salinidad en la zona es baja, sin embargo llega a variar con las descargas de los ríos como laguna de Pueblo Viejo y laguna Tlalixcoyan.

c) **Playas deltaicas.**

Cuentan con múltiples barreras arenosas; los escurrimientos por río o marea penetran a través de canales de circulación mareal. Tanto su forma como su batimetría son rápidamente modificadas, son lagunas intermitentes, es decir, ocasionalmente pueden llegar a secarse. La salinidad es altamente variable. Un ejemplo de esto es la laguna Chijol.

TIPO III. Plataforma de barrera interna.

Depresiones inundadas en los márgenes internos del borde continental rodeado por superficie terrígenas en sus márgenes internos y al que protegen del mar barreras arenosas producidas por corrientes y oleaje. La barrera se formó al establecerse el nivel del mar actual, es decir, dentro de los últimos 5 mil años. Los ejes de orientación son paralelos a la línea de costa. Son lagunas muy someras, a excepción de los canales por haber sido erosionados; las modificaciones en estas lagunas son debidas a efectos de huracanes o vientos. Puede decirse que es la laguna costera típica aparece a lo largo de planicies costeras de bajo relieve.

a) **Barrera de Gilbert Beaumont.**

Presenta barreras arenosas, ocasionalmente pueden ser múltiples, el tipo de escurrimiento que presentan es ausente o muy local. Tanto la forma como la batimetría son modificadas por la acción de la marea, oleaje, arena acarreada por viento y corriente locales lo que segmenta las lagunas. Presenta salinidad variable, según las zonas climáticas, tal es el caso de laguna Madre y laguna Superior.

b) **Lagunas culpadas.**

Presenta barras arenosas con orientación triangular, ejes orientados hacia fuera de la playa con relación a la difracción del oleaje (islas, arrecifes y bancos) o promontorios rocosos; los escurrimientos son ausentes o muy locales; la forma y batimetría se encuentran sujetas a las mismas condiciones del caso anterior al igual que la salinidad. Laguna Potosí y laguna Tamiahua entran dentro de esta clasificación.

c) **Depresión de laguna costera.**

Cuenta con múltiples barreras arenosas separadas linealmente; los escurrimientos son ausentes o estacionales. La forma y batimetría son suavemente modificadas por la marea y procesos no costeros, la salinidad es altamente variable, pueden llegar a secarse estacionalmente, como laguna de Agua Brava.

TIPO IV. Orgánicas.

Las depresiones son producto del crecimiento de barreras orgánicas sobre plataformas continentales internas, a partir de que se estabilizó el nivel del mar. Las formas suelen ser variables, desde paralelas y ovals hasta altamente irregulares; la batimetría es somera e irregular. Dentro de este grupo se incluyen los sistemas coral-algas, mismos que se observan a lo largo de la costa de Yucatán, así como comunidades de manglares en áreas subtropicales protegidas.

a) Laguna con barrera coralina-alga.

La barrera es rígida de carbonatos, incluye lagunas irregulares con escurrimientos ausentes o muy localizados; tanto la forma como la batimetría son modificadas por el crecimiento de organismos así como por la marea y huracanes, con condiciones normales de salinidad. Un ejemplo es la laguna Nichupté.

b) Laguna de barrera con manglar.

Tiene barrera con densos manglares, normalmente con sedimentos clásticos atrapados; presenta escurrimientos. Su forma y batimetría son sensiblemente modificadas por el crecimiento de organismos y mareas, su rango de salinidad es de normal a hipersalina. Nuevamente la laguna de Nichupté entra dentro de esta clasificación, al igual que la laguna de Atasta.

TIPO V. Tectónicas.

Cuenta con depresiones y barreras producto de fallas, levantamientos o vulcanismos en áreas costeras en el pasado geológico, es independiente de la historia del nivel del mar. Son de formas variables, van desde alargadas ovals hasta altamente irregulares; la variación en la batimetría es notable y va desde muy somera hasta profunda, generalmente muy irregular. Presente en costas de alto relieve.

a) Laguna estructural.

Generalmente es una barrera de levantamientos rocosos, irregular o discontinua; presenta escurrimientos intermitentes (presentes/ausentes). La forma y batimetría son poco modificadas, a excepción de las zonas con escurrimientos localizados. Son lagunas frecuentemente muy profundas en donde algunos procesos costeros pueden formar barreras rocosas a causa de asentamientos de playas. Generalmente la salinidad es normal, como la Bahía Magdalena.

b) Laguna volcánica.

Depresión y barrera formada por flujos de lava, independiente de la evolución del nivel del mar, por lo que pueden ser muy jóvenes en comparación con las influenciadas por la variación del nivel del mar. Con escurrimientos intermitentes; la forma y batimetría (somera) son altamente variables y son modificadas por escurrimientos, marea o vulcanismos subsecuentes. La salinidad varía según condiciones climáticas. Ejemplo de este es la laguna de Sontecomapan.

Capítulo 2

Modelos

2. MODELOS

2.1. MODELOS MATEMÁTICOS.

2.1.1. Ecuaciones fundamentales del modelo hidrodinámico

En este apartado se presentan las ecuaciones de gobierno que satisfacen el modelo hidrodinámico en dos dimensiones promediado en la vertical, así como las consideraciones que se hicieron para llegar al planteamiento de las mismas.

El modelo hidrodinámico se basa en la solución de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para flujo turbulento. La ecuación de continuidad se plantea a partir del cambio de un volumen durante un intervalo de tiempo definido entre dos secciones de control, separadas a una distancia. Asumiendo válida la hipótesis de aguas poco profundas, la ecuación de cantidad de movimiento se obtiene a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, ya que la relación entre la profundidad del sistema y la longitud de las ondas a estudiar es muy pequeña. Esto permite considerar las aceleraciones verticales despreciables por lo que se puede suponer la aproximación hidrostática. Bajo estas consideraciones y el desarrollo que a continuación se presenta se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la vertical; con lo que se establece el modelo hidrodinámico para la evaluación de los valores de velocidad y dirección en todo el sistema.

2.1.1.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de gobierno utilizada para establecer la condición dinámica de superficie libre es la ecuación de continuidad. Para ello se define un volumen de control por los puntos (x, y) y $(x + dx, y + dy)$ y la elevación de superficie libre h como se muestra en la Figura 2.1

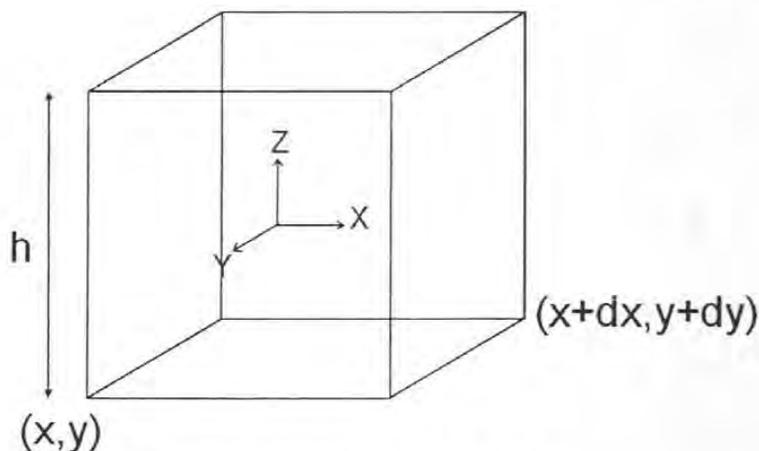


Figura 2.1 Cubo infinitesimal

Se proponen dos secciones de control: entrada y salida. El volumen de entrada durante un tiempo dt se expresa como qdt . Formulando esta misma ecuación en términos de las componentes de velocidad u y v en x y y se tiene que el volumen de entrada puede expresarse con la Ecuación 2.1.

$$(hu + hv)dxdydt \quad (2.1)$$

mientras que el volumen de salida en la sección $(x + dx, y + dy)$ para un tiempo dt está definido por la Ecuación 2.2.

$$\left(hu + \frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)dxdydt + \left(hv + \frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)dxdydt \quad (2.2)$$

De donde el incremento en el volumen ΔV entre las secciones está dado por la Ecuación 2.3.

$$\Delta V = -\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)dxdydt \quad (2.3)$$

Por otro lado, el cambio de volumen para la superficie libre del agua puede ser representado por la diferencia entre el volumen en $(t, h, dxdy)$ y el volumen en $(t + dt, h + \partial h/\partial t dt, dxdy)$, Ecuación 2.4.

$$\Delta V = \frac{\partial h}{\partial t} dxdydt \quad (2.4)$$

Igualando las ecuaciones 2.3 y 2.4 resulta que el incremento de volumen esta dado por la Ecuación 2.5.

$$\frac{\partial h}{\partial t} dxdydt = -\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)dxdydt \quad (2.5)$$

Simplificando la Ecuación 2.5, se llega a la representación de la ecuación de continuidad en dos dimensiones; Ecuación 2.6.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + u\frac{\partial h}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

2.1.1.2. Ecuación de cantidad de movimiento

Para establecer la condición dinámica de velocidad es necesario resolver la ecuación de cantidad de movimiento a partir de la segunda ley de Newton, Ecuación 2.7:

$$\sum F = m \frac{du}{dt} \quad (2.7)$$

en donde m es la masa, u es la velocidad y F es la suma de fuerzas externas actuando por unidad de masa. Las fuerzas externas que actúan sobre el fluido son las de presión y fricción.

Haciendo el análisis únicamente en la dirección X , y recordando que la masa puede escribirse como $\rho dx dy dz$, entonces el segundo término de la Ecuación 2.7 se puede representar como la Ecuación 2.8.

$$\rho dx dy dz \frac{du}{dt} \quad (2.8)$$

Mientras que para obtener las fuerzas externas, que son el primer término de la Ecuación 2.7, con la ayuda de un volumen de control se puede observar la forma en la que se incorporan dichas fuerzas al modelo. Si se caracteriza el volumen de control con un cubo infinitesimal y teniendo en cuenta que en cada una de las caras del volumen de control se presentan tres fuerzas de tensión conocidas como esfuerzos tangenciales τ , mismos que se observan en la Figura 2. 2. De esta figura se observa que existen dos esfuerzos tangenciales que son paralelos a la cara sobre la que son aplicados, los cuales se van a identificar con ayuda de un subíndice compuesto de dos elementos, el primero está indicando el plano perpendicular a este y el segundo la dirección sobre la que se está ejerciendo dicho esfuerzo. Con respecto al tercer esfuerzo, este es perpendicular a la cara sobre la que está actuando. A este esfuerzo se le debe sumar el efecto de la fuerza de presión al estar aplicados en la misma dirección, dando origen a los esfuerzos normales σ .

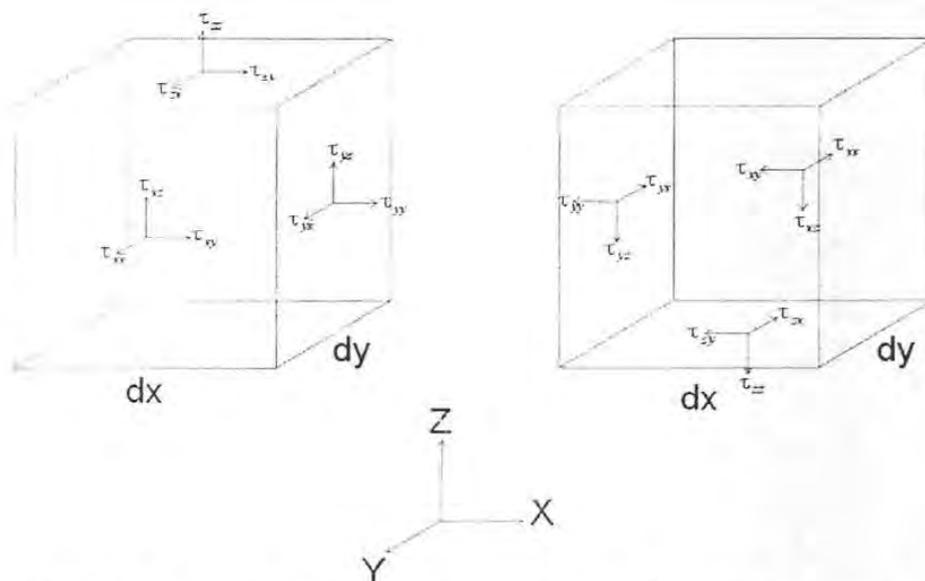


Figura 2. 2 Fuerzas externas que actúan sobre el volumen de control

Bajo las consideraciones anteriores, las fuerzas externas quedan representadas por medio de la Ecuación 2.9:

$$\rho dx dy dz + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz \quad (2.9)$$

Igualando las ecuaciones 2.8 y 2.9, asumiendo un volumen de control constante se obtiene la ecuación de cantidad de movimiento en dirección X , Ecuación 2.10.

$$\rho dx dy dz \frac{du}{dt} = \rho dx dy dz + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz \quad (2.10)$$

El esfuerzo normal está compuesto por dos términos, el esfuerzo tangencial y el debido a la presión, mismos que se deben incorporar en la Ecuación 2.10. Adicionalmente se considera que el flujo es laminar con lo cual se incorporan los términos de los esfuerzos tangenciales en función de la viscosidad dinámica por lo tanto la Ecuación 2.11 se puede expresar como:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right] \quad (2.11)$$

Asumiendo que el fluido es agua y que ésta es incompresible, se pueden despreciar los términos que incorporan la condición de compresibilidad; por otro lado la variación de la velocidad con respecto al tiempo puede expresarse en términos de las aceleraciones locales y convectivas, resultando así la ecuación de Navier-Stokes para flujo laminar (Ecuación 2.12):

$$\frac{du}{dt} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.12)$$

Para poder incorporar los términos turbulentos en la ecuación anterior, y dado que tanto las velocidades, densidades y presiones en la Ecuación 2.12 son magnitudes instantáneas, es necesario realizar la descomposición de Reynolds la cual consiste en considerar a dichas magnitudes como compuestas, por una parte sus valores promedio en el tiempo y por otra las desviaciones instantáneas de donde se incorporarán los términos turbulentos.

De donde se tendrá:

$$\begin{aligned} \rho &= \bar{\rho} + \rho' \\ u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (2.13)$$

Al realizar la sustitución de estos términos en la ecuación de Navier-Stokes para flujo turbulento se tiene la Ecuación 2.14:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')^2}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(\bar{v} + v')}{\partial y} + \\ \frac{\partial(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(\bar{w} + w')}{\partial z} = -\frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Al realizar la simplificación de la Ecuación 2.14 se toma en cuenta que las variaciones en las densidades y presiones son muy pequeñas comparadas con los valores medios, mientras que para las velocidades las fluctuaciones pueden llegar a ser del orden de los valores medios por lo que no pueden despreciarse. De esta simplificación, los términos que contengan combinaciones de las fluctuaciones de velocidad y densidad van a ser mucho menores que los términos que contengan correlaciones entre velocidades. Bajo esta hipótesis se llega a la ecuación de Navier-Stokes en función de los valores medios e instantáneos, para flujo turbulento.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} u v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} u w}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right] \\ - \left[\frac{\partial \bar{\rho} u' u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} u' v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} u' w'}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Comparando la Ecuación 2.15 con la obtenida para flujo laminar (Ecuación 2.12), se puede observar que a la Ecuación 2.15 se le añaden los términos que incorporan el transporte de cantidad de movimiento debido al movimiento turbulento, conocido como esfuerzos de Reynolds.

$$\begin{aligned} -\bar{\rho} u' u' \\ -\bar{\rho} u' v' \\ -\bar{\rho} u' w' \end{aligned} \quad (2.16)$$

Con la incorporación de este tensor de esfuerzos de Reynolds, aparecen nuevas variables (las que deben ser halladas a partir de nuevas ecuaciones) lo que hace que el sistema de ecuaciones de gobierno no sea un sistema cerrado, este problema es lo que se conoce como cierre de la turbulencia y se resuelve a través de analogías de los flujos turbulentos con el término de viscosidad.

Los modelos de cierre se pueden considerar de dos formas, los que incorporan el concepto de viscosidad de remolino y los que no lo consideran (Castanedo B, 2000).

El concepto de viscosidad de remolino asume que las tensiones turbulentas son proporcionales al gradiente de la velocidad media; mientras que los modelos de cierre que no incorporan el concepto de viscosidad de remolino resuelven directamente el sistema de ecuaciones.

Al comparar los términos viscosos con los valores para los esfuerzos de Reynolds en la Ecuación 2.15 se desprecian los términos viscosos y aplicando las aproximaciones de Boussinesq, que supone que las velocidades verticales son mucho más pequeñas que las horizontales se llega a que el intercambio de momento a través de una superficie horizontal es mucho menor que a través de una vertical, con lo que se pretende que la viscosidad de remolino vertical ε_{xx} es mucho menor que la horizontal ε_h , y se puede despreciar, llegando a la Ecuación 2.17:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{\tau_{xz}}{\rho} \quad (2.17)$$

Otra de las consideraciones de las aproximaciones de Boussinesq consiste en asumir que las aceleraciones del flujo son menores que las de la gravedad, por tanto, las variaciones de la densidad solo son importantes cuando afectan los términos gravitatorios y los inerciales. De donde se llega a la hipótesis de trabajar con una distribución hidrostática de presiones, con lo que se puede decir:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.18)$$

Asumiendo que el flujo es hidrostático e incorporando la descomposición del valor de la densidad en los valores promedio y la desviación; se podrá obtener el valor de las presiones que hasta ahora también es una incógnita. Integrando la Ecuación 2.17 desde una profundidad z y hasta la superficie libre, e incorporándola en la Ecuación 2.16 de cantidad de movimiento, se obtiene la siguiente ecuación:

$$h \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} \right] + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{xz}}{\rho} = 0 \quad (2.19)$$

en donde h es la profundidad, g es la aceleración de la gravedad, a es la elevación del fondo, ε_{xx} y ε_{yy} son los coeficientes de viscosidad de remolino, τ_{xz} es el esfuerzo cortante, todos promediados en la vertical.

Para representar la tensión tangencial en el fondo (fricción de fondo) se incorpora el esfuerzo cortante en función del coeficiente n , de Manning. Bajo la asunción de un estado de flujo uniforme, despreciando la pendiente de fondo y considerando la fricción de fondo bajo la teoría de canales abiertos como se presenta la Ecuación 2.20.

$$\tau = \rho g R S \quad (2.20)$$

Con R igual al radio hidráulico del canal (área transversal entre el perímetro mojado) y S la pendiente de la superficie libre.

Considerando la ecuación de Manning $V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$, tomando a V como $(u^2 + v^2)^{1/2}$.

Asumiendo que R es aproximadamente igual a h , despejando S de la ecuación de

Manning y sustituyendo el valor de V en la Ecuación 2.20 se llega a que el esfuerzo cortante en el fondo está dado por la Ecuación 2.21:

$$\tau_{xz} = \rho g n^2 \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (2.21)$$

Incorporando estos términos en la ecuación de Navier-Stokes para flujo incompresible, estacionario y turbulento, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$h \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{g u n^2}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2.22)$$

De igual manera se obtiene la ecuación de Navier-Stokes en flujo turbulento para la dirección Y.

2.1.2. Ecuaciones fundamentales del modelo advección-dispersión

A continuación se presentan algunas ecuaciones y conceptos relacionados con los procesos de transporte de masa, partiendo de un fluido en movimiento con las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad antes mencionados. Se aborda el problema de la mezcla de diferentes fluidos con el fin de determinar la cantidad relativa de una sustancia en un punto a lo largo del tiempo. Para la modelación de este proceso deberá de tomarse en cuenta lo que se conoce como concentración, con lo que se introduce una variable más a la solución del sistema de ecuaciones. Al igual que en las ecuaciones anteriores se aplica el tensor de Reynolds y las aproximaciones de Boussinesq para obtener lo que se conoce como ecuación general de Advección-Dispersión.

2.1.2.1. Ecuación de advección-dispersión

Con el objeto de poder comprender el proceso de advección dispersión, aquí se desarrollan los conceptos básicos de las ecuaciones de la conservación y transporte de masa. El punto de partida del análisis de los procesos advectivo-difusivos es la ecuación de conservación de masa misma que se expresa a continuación (Ecuación 2.23):

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

Dicha ecuación, incorpora la variación de la concentración C de una sustancia en un volumen de control a lo largo del tiempo y la variación espacial del transporte de masa q .

Por otro lado, el transporte total de masa (q) en un fluido esta determinado por la suma de dos procesos; el advectivo y el difusivo, y se pueden representar con la Ecuación 2.24:

$$q = C(u + v + w) + \left[-D \left(\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \quad (2.24)$$

El primer término de la ecuación es el transporte de masa por advección, generado por el movimiento del fluido con una velocidad v de componentes (u, v, w) para cada dirección (x, y, z) , respectivamente.

El segundo término representa el transporte de masa por difusión, es decir la forma en que la concentración se distribuye a través del fluido, dependiendo de sus propiedades moleculares (conservativas o no conservativas). Este proceso puede ser descrito por la ley de Fick que relaciona el flujo de masa por difusión y el gradiente de concentración de una sustancia en un fluido.

El coeficiente D es un coeficiente de proporcionalidad con dimensiones $(L^2.T^{-1})$ y se conoce como coeficiente de difusión molecular de Fick.

Al sustituir la ecuación de transporte de masa en la ecuación de conservación masa se llega a la Ecuación 2.25:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

La Ecuación 2.25 representa la ecuación de advección dispersión en función de las velocidades y concentraciones instantáneas con aportes de masa procedentes del exterior del dominio del modelo.

Para obtener la Ecuación 2.25 en función de los términos turbulentos se hace una analogía entre la difusión turbulenta y la molecular aplicando la descomposición de Reynolds a las componentes de velocidad y concentración, tal como se observa en las Ecuaciones 2.26.

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ C &= \bar{c} + c' \end{aligned} \quad (2.26)$$

Al sustituir estos términos en función de sus valores promedio y desviaciones instantáneas en la Ecuación 2.25 se llega a la Ecuación 2.27.

$$\begin{aligned} (\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{c} + c')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial (\bar{c} + c')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial (\bar{c} + c')}{\partial z} + \frac{\partial (\bar{c} + c')}{\partial t} = \\ D \left(\frac{\partial^2 (\bar{c} + c')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\bar{c} + c')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (\bar{c} + c')}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Asumiendo las mismas consideraciones que se aplicaron en la Ecuación 2.14, la simplificación de la Ecuación 2.27 queda de la siguiente manera (Ecuación 2.28):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial(\overline{u'c'})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v'c'})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (2.28)$$

Los términos $u'c', v'c', w'c'$ de la Ecuación 2.28 representan los flujos de volumen por unidad de área (de la sustancia), debido a la turbulencia del fluido.

Como se observa en la Ecuación 2.28, la ecuación modificada queda en función de los valores medios de velocidad y concentración y de las desviaciones instantáneas de las mismas. Con el fin de sustituir los valores instantáneos en función de valores medios se describe la ecuación anterior quedando tal como se observa en la Ecuación 2.29.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial c}{\partial x} - u'c' \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial c}{\partial y} - v'c' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial c}{\partial z} - w'c' \right] \quad (2.29)$$

La forma en la que los términos de las desviaciones instantáneas se expresan en función de valores medios es aplicando las aproximaciones de Boussinesq quedando dichos valores en función del gradiente de la concentración media (por analogía con la primera ley de Fick), Ecuación 2.30:

$$u'c' = \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x}, \quad v'c' = \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y}, \quad w'c' = \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2.30)$$

Incorporando de esta manera los coeficientes de difusión turbulenta ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$) los cuales expresan el grado de difusión turbulenta de la concentración media debida a las fluctuaciones turbulentas. Lo que lleva a la Ecuación 2.31:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial c}{\partial x} + \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial c}{\partial y} + \varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial c}{\partial z} + \varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (2.31)$$

Al comparar la constante de difusión molecular (D) con los coeficientes de difusión turbulenta (ε) resulta que este es varios ordenes de magnitud menor que cualquiera de los coeficientes de difusión turbulenta (ε), eliminando así este término de la Ecuación 2.31, con lo que se convierte ésta en la Ecuación 2.32.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \quad (2.32)$$

Los coeficientes de difusión toman en cuenta el cortante debido a que la distribución de la velocidad en la vertical no es uniforme, lo cual genera que en las zonas de mayor velocidad la sustancia diluida en el fluido se mueva más rápidamente que en las zonas de menor velocidad, de manera que se presenta una importante dispersión de las sustancias que no se toma en cuenta al promediar. Por lo tanto, con el fin de tomar en cuenta dicho

efecto (cortante), es necesario introducir los coeficientes de dispersión, los cuales suelen ser mucho mayores que los de difusión turbulenta.

El modelo toma en cuenta que los coeficientes de dispersión son en la dirección del flujo y perpendiculares a éste por lo que ambos coeficientes se proyectan en las direcciones x y y . El coeficiente de dispersión en la dirección del flujo es función de la velocidad de fricción y de la pendiente de la superficie libre, y el coeficiente de dispersión perpendicular al flujo puede considerarse un orden de magnitud menor al de dispersión en dirección al flujo.

Tomando en cuenta lo anterior, desarrollando la Ecuación 2.32, realizando un promedio en la vertical para la ecuación anterior y suponiendo que existe mezcla completa en vertical, entonces la ecuación de transporte de masa tiene la siguiente forma:

$$h \left[\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] \quad (2.33)$$

De forma más general la ecuación que el modelo resuelve es:

$$h \left[\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right] = 0 \quad (2.34)$$

En donde h es la profundidad del agua, c la concentración del material en suspensión, t el tiempo, u y v las velocidades en dirección x y y respectivamente, D_x , D_y coeficientes de dispersión, k es la constante de decaimiento y σ es la fuente o sumidero del constituyente. El primer término de la Ecuación 2.34 representa el almacenamiento local, el segundo y tercer términos se refieren a la advección, el cuarto y quinto términos están asociados a la dispersión en dirección x y y respectivamente, el sexto se refiere a las fuentes locales de la sustancia, el séptimo hace referencia a la constante de decaimiento, mientras que el octavo término considera los efectos generados por la lluvia y/o evaporación en el sistema.

2.2. CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

Para la solución del sistema de ecuaciones de gobierno será necesario especificar las condiciones iniciales y de frontera bajo las que se realizará el forzado del modelo. Lo primero que debe hacerse es dotarse de las condiciones iniciales para después tratar lo que son los límites geográficos que incluyen a las fronteras cerradas e interiores y por último las fronteras abiertas en donde se deberán implementar ciertas condiciones como se verá posteriormente.

2.2.1. Condiciones iniciales

La condición inicial de velocidad se considera nula (cero) y la elevación inicial de superficie libre constante para todo el dominio. Como esta condición de forzado es arbitraria es conveniente que al empezar la simulación se le de un tiempo de

estabilización al modelo para que tanto los valores de velocidad como de superficie libre y concentración adquieran un régimen normal e independiente de dichas condiciones, este tiempo depende del fenómeno a estudiar y de la complejidad del sistema.

2.2.2. Condiciones de frontera

2.2.2.1. Condiciones de fondo

La condición normal de velocidad en el fondo se considera nula:

$$w_{z=0} = 0 \quad (2.35)$$

Para el caso de la componente tangencial, este valor se calculará muy cerca del fondo, suponiendo un valor de fricción para flujo turbulento (por la configuración de fondo), quedando el tensor de esfuerzos determinado por la Ecuación 2.36:

$$\tau_{fondo} = \rho_0 \cdot r \cdot |\vec{V}_t| \vec{V}_t \quad (2.36)$$

En donde, considerando que se estudian profundidades pequeñas, V_t representa la velocidad media, y r el coeficiente de rozamiento obtenido por medio del coeficiente de rugosidad de Manning n .

2.2.2.2. Fronteras cerradas

Una frontera cerrada se considera como una pared lateral sólida por la cual no puede fluir ni penetrar el agua. Aplicando esta definición, la velocidad normal en esta es nula (cero) lo que lleva a cumplir con la condición de no deslizamiento. La velocidad tangencial, no necesariamente cumple la condición de no deslizamiento sin embargo se aproxima a cero, esto se logra sustituyendo la condición de no deslizamiento por la condición de flujo difusivo. Finalmente las condiciones de frontera cerradas laterales quedan expresadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0 \quad (2.37)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.38)$$

En donde n es el vector normal a la superficie lateral.

2.2.2.3. Fronteras internas

Las fronteras internas pueden ser móviles y lo que hacen es que modelan numéricamente el proceso físico de "secado y mojado" en zonas intermareales y de bajas profundidades. Este proceso físico puede ser simulado bajo dos formas:

- Eliminando elementos. Esta técnica consiste en deshabilitar los nodos que no participan en la simulación. Aquellos nodos que se encuentren secos se reactivan cuando vuelven a inundarse, es decir cuando el nivel del agua a lo largo del ciclo de marea aumenta nuevamente. El inconveniente de este método es que presenta problemas de estabilidad al reactivar en un paso de tiempo determinado varios elementos, provocando grandes volúmenes de agua que se reflejan en una distorsión numérica en los flujos y niveles.
- Porosidad de manglar. Para cada elemento de la malla la porosidad de manglar considera una transición gradual entre el secado y mojado cuando el elemento no tiene la capacidad suficiente de retener agua y llegar ha secarse. Con esta transición la técnica de porosidad de manglar mantiene todos los elementos activos, evitando inestabilidades numéricas o pérdidas/ganancia de flujo considerables.

Esta técnica admite que todos los elementos de la malla se encuentren parcialmente mojados durante toda la simulación. El volumen residual del elemento mojado es calculado integrando en la vertical la curva del área mojada con cada uno de los nodos del elemento. Esta curva del área de mojado es función de la superficie libre y se determina en forma empírica con ayuda de la curva hipotética del área inundada, por medio de una aproximación de dicha curva a una expresión fácilmente integrable como las observadas en la Figura 2. 3. La gráfica de la izquierda representa la curva hipotética del área inundada y la de la derecha la expresión integrable.

Para poder construir la curva integrable es necesario conocer los parámetros AC_1 , AC_2 y AC_3 . El parámetro A_0 representa la elevación del nodo, como se observa en la Figura 2. 3. Se puede ver que el parámetro AC_2 hace que la distribución se comporte como una función escalón, resultando un repentino cambio en el elemento (secado/mojado). El valor del parámetro AC_3 , es siempre mayor a cero y se recomienda utilizar el valor de 0.01. Es importante mencionar que la capacidad de cada nodo de contener agua se reduce de forma gradual de $(A_0+AC_2/2)$ a $(A_0-AC_2/2)$. Debajo de esta elevación el nodo permanece con una pequeña fracción del volumen total AC_3 .

Al utilizar este método debe tenerse cierto cuidado en la selección de los parámetros A_0 , $AC_{1,2,3}$ ya que los resultados arrojados por el modelo son sensibles ante dichos parámetros.

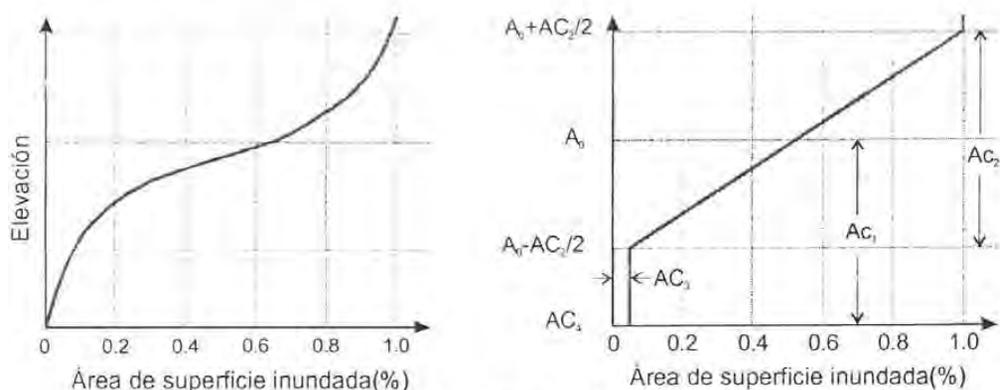


Figura 2. 3 Modelación del parámetro de porosidad de manglar

2.2.2.4. Fronteras abiertas

Una frontera abierta es aquella frontera artificial que tiene por objeto restringir el dominio del área a estudiar, en este caso es aquel límite que separa la zona de estudio de lo que queda fuera del modelo. Esta frontera debe de ser capaz de permitir la salida de las ondas generadas dentro del dominio de cálculo con la mínima reflexión, permitiendo que esta se propague a través de la frontera y el fluido pase libremente, lo que se conoce como condición de radiación.

Para esta condición de frontera, se extendió el dominio de estudio incorporando áreas adicionales en las bocas oceánicas, con la intención de amortiguar las perturbaciones e impedir que se reflejen las ondas en la frontera, de tal manera que los resultados en la zona de interés no se encuentren afectados por dicha condición.

El modelo implementa la condición de frontera abierta de radiación con el objeto de:

- Dejar salir las perturbaciones generadas en el dominio por medio de una frontera artificial.
- Imponer valores de elevación de superficie libre en la frontera.

2.3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico utilizado para las simulaciones hidrodinámicas es RMA2 y para el modelo advección dispersión se utilizó RMA4, ambos creados en su primera versión por Norton en el año de 1973 (Norton et. Al 1973) los cuales han sido modificados en varias ocasiones, la más reciente modificación fue realizada por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. Ambos modelos son resueltos en elemento finito, integrados en la vertical. RMA2 resuelve las ecuaciones de Reynolds y Navier-Stokes, y RMA4 la ecuación de conservación de masa, los dos para flujo turbulento.

Los modelos resuelven las ecuaciones, por subzonas interconectadas con nodos que generan elementos finitos, luego con un arreglo matricial, se relacionan las variables nodales de cada elemento por medio del método de los residuos ponderados y la aproximación de Galerkin generándose así la matriz de elementos.

La matriz de elementos contiene las ecuaciones diferenciales obtenidas para cada uno de los elementos que forman el sistema, con lo que se tiene una matriz de elementos para cada nodo. Estas matrices de elementos se ensamblan; con lo que se tiene un conjunto de ecuaciones algebraicas del sistema global, conocida como matriz de coeficientes, para finalmente incorporar las condiciones de borde (frontera).

La solución y arreglo de las ecuaciones no lineales, es resuelto por iteraciones tipo Newton-Raphson, que consiste en: iteraciones, que resuelven la raíz de una ecuación cuadrática, con el fin de obtener la solución de la misma, tan aproximada como sea posible.

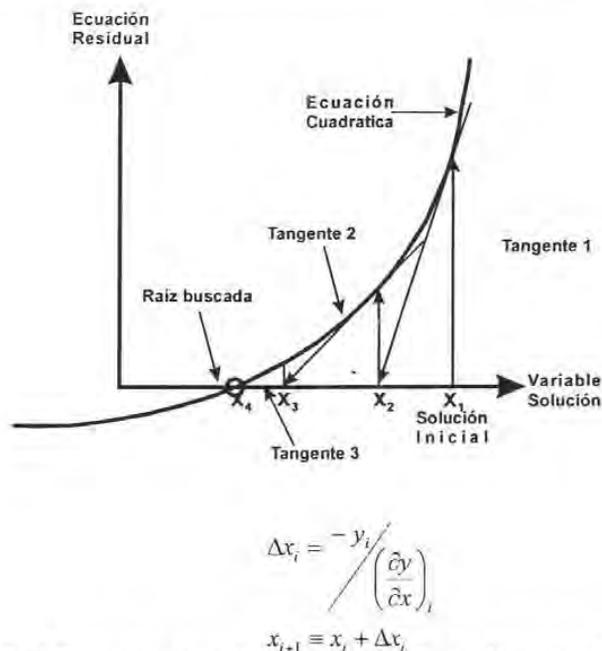


Figura 2. 4 Esquema numérico del método de Newton-Raphson

Este método requiere de una condición inicial, la cual es propuesta de acuerdo al sistema a modelar. En la Figura 2. 4, x_1 representa el valor de condición inicial, (propuesto), en este punto se traza una recta tangente a la curva y se prolonga hasta que corte el eje de las abscisas, justo en donde esta corta es en donde se encuentra el nuevo valor para la siguiente iteración, siendo este x_2 , se sigue este método hasta que la diferencia entre el valor a lo largo del eje x sea menor a un criterio de convergencia previamente establecido.

Las tangentes a la curva representan el cambio en el error residual (en las ecuaciones de gobierno) para un cambio de unidad en el eje x.

De esta manera se obtiene la solución por medio del método de elemento finito, con lo que se obtienen tantos los valores de elevación de superficie libre, velocidad en magnitud y dirección y concentraciones para cada uno de los nodos del sistema modelado.

Capítulo 3

Aplicación

de los modelos

3. APLICACIÓN DE LOS MODELOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Laguna de Términos es una de las lagunas costeras más importantes del país, en términos de su extensión y diversidad de hábitat, además que está situada estratégicamente frente a la zona petrolera productiva más importante del Golfo de México, la Sonda de Campeche, su configuración física e hidrodinámica, es de gran valor y presenta un gran potencial.

Laguna de Términos se encuentra ubicada en el sureste del Golfo de México (Figura 3. 1), en el estado de Campeche, en la parte occidental de la Península de Yucatán. Se comunica al Golfo por medio de dos Bocas naturales, las cuales se encuentran en los extremos de la isla del Carmen, y por una Boca artificial. Además forma parte del delta del sistema Grijalva-Usumacinta; se encuentra conformada por un cuerpo principal que se comunica con pequeñas lagunas satelitales por medio de canales, así como de pequeñas bocas y un sistema de ríos que desembocan en ésta.



Figura 3. 1 Localización de la Laguna de Términos.

La isla del Carmen cuenta con 36 Km de longitud aproximadamente y representa el 0.2% del total del área del Estado. Sirve como barra de protección natural, lo que genera una zona de calma al interior de la Laguna; dentro de esta isla se encuentra el estero el Pargo al cual se ubica al suroeste de la misma.

Las bocas naturales tienen una importancia significativa dentro del sistema ya que por medio de estas bocas se lleva a cabo la comunicación entre el mar y la Laguna. Toda vez

que es en ellas por donde se produce el mayor movimiento del prisma de marea generado principalmente por las corrientes generadas por marea y oleaje, siendo estas las que gobiernan la hidrodinámica y el transporte de sedimentos del sistema (Espinal, 2002).

La Boca del Carmen se encuentra ubicada al Oeste de la Isla del Carmen, tiene una longitud aproximada de 3.8 Km. en su sección transversal mínima, una profundidad promedio de 6.5 m, una mínima de 2 m y una máxima de 11 m. Esta boca interactúa directamente con el sistema de lagunas adyacentes (Pom, Atasta, Corte, Puerto Rico, etc.). De hecho, según estudios previos (Espinal, 2002) esta boca es la que mayor gasto conduce, por lo que es la que en buena medida rige la hidrodinámica del sistema.

La Boca de Puerto Real está en el extremo Este de la Isla del Carmen, cuenta con una profundidad media aproximada de 6 m, la profundidad mínima medida es de 2 m y la máxima es de 10 m, su longitud aproximada es de 3.2 Km. Según estudios previos, es por esta boca por donde entra la mayor parte del sedimento marino al sistema.

Finalmente, la Boca de Sabancuy es una boca abierta y estabilizada artificialmente, localizada a 43 Km. de la Boca de Puerto Real, posee una profundidad de entre 4.5 m y 5 m y una longitud de 30.35 m en su sección mínima.

En la Figura 3. 2 se presenta una fotografía aérea del sistema lagunar, aquí se observan Boca del Carmen, Boca de Puerto Real, la Isla del Carmen y lo que se considera el cuerpo principal de la laguna.



Figura 3. 2 Localización de las bocas naturales y de la isla del Carmen.

Las Lagunas de Pom, Atasta, Los ríos El Muerto, el Palancares, y las Coloradas conforman parte del sistema de lagunas al Oeste y se comunica con el cuerpo principal de la Laguna de Términos por las Lagunas de Corte y Puerto Rico. Las lagunas de Pom y Atasta se comunican entre si por un pequeño canal, (generado por la acreción de los pantanos de manglar), conocido como Boca de Pom. Se presume que la formación de este sistema en particular es debido a los movimientos laterales de los ríos Usumacinta y San Pedro conjuntamente con la barrera litoral (Gutiérrez et. al. Martínez, 1981).

Al este del sistema se encuentra un estero conocido como Estero de Sabancuy, de aproximadamente 40 Km. de longitud. Inicia en Chenkán y se incorpora a la Laguna en la región de Isla Aguada, al sur de la Boca de Puerto Real.

El Río Usumacinta se abre en dos ramas, el Río San Antonio y el Río del Este, que a su vez se comunican con el sistema de lagunas satelitales y desemboca en lo que se conoce como Boca de Atasta.

Los ríos Chumpán, Candelaria y Mamantel forman parte de un sistema de ríos perennes que descargan al cuerpo de la Laguna principal. El río Palizada que es el que mayor aporte de agua dulce realiza en la Laguna, da lugar a la formación de Boca Chica y Boca de San Francisco. El río Chumpán se genera con la unión de los ríos San Joaquín y Salsipuedes que al desembocar en la Laguna de Términos forma la Boca de Balchacah.

La cuenca del río Candelaria se encuentra dentro de la península de Yucatán, dicho río da origen a la laguna de Panlao. Entre la desembocadura del río Candelaria y el río Champotón se ubica la desembocadura del río Mamantel.

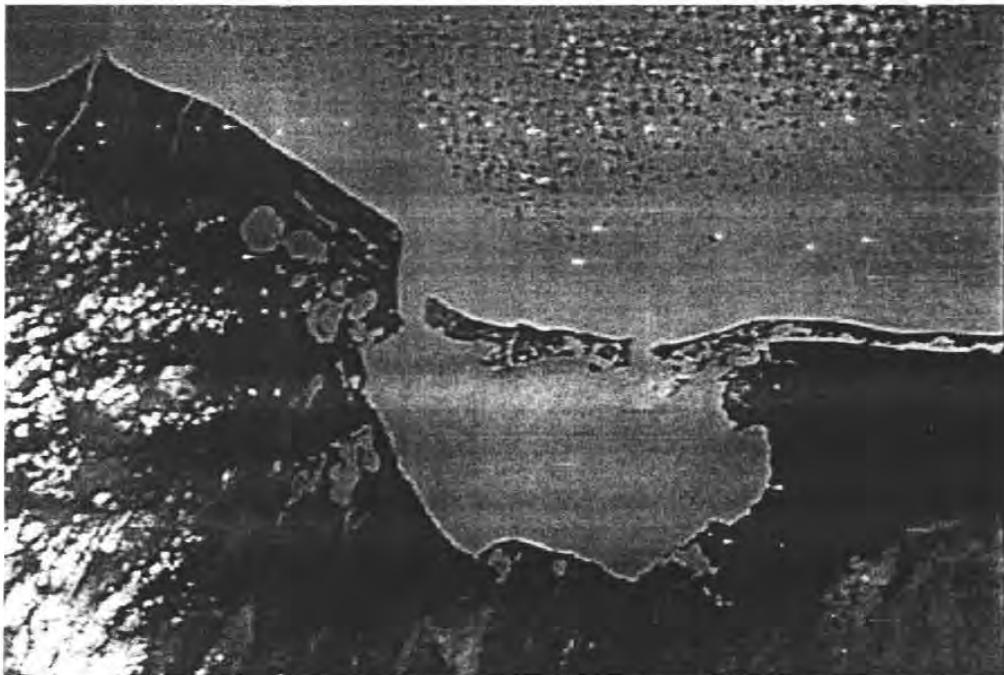


Figura 3. 3 Cuerpo principal de la Laguna de Términos y sistemas adyacentes.

3.1.1. Clima

La región cuenta con tres tipos de climas, regulados por la magnitud de las lluvias (EPOMEX, 1993):

- Cálido húmedo. Desde el límite con el estado de Tabasco y hasta la desembocadura del río Palizada, al occidente de la Laguna.
- Cálido subhúmedo. A partir de la desembocadura del río Palizada y hasta la Boca de Puerto Real, incluyendo la isla del Carmen.

- Cálido subhúmedo intermedio. Abarca desde Isla Aguada y llega hasta donde termina el estero de Sabancuy al este.

Existen tres estaciones climáticas: el periodo de estiaje de marzo a mayo, el periodo de lluvias (las cuales generalmente vienen acompañados de fuertes vientos) de mayo a septiembre, y por último el periodo de octubre a febrero lo que se conoce como estación de "nortes" con lluvias moderadas y fuertes vientos.

3.1.2. Temperatura.

Según estudios reportados (EPOMEX, 1993), por medio de 22 estaciones distribuidas en todo el sistema lagunar (Figura 3. 4), las temperaturas superficiales mas altas registradas (30 °C) se presentan en el mes de junio, conservándose hasta el mes de agosto. Estos valores fueron registrados en la parte sur de la Laguna de Términos y la parte central de la misma. Las temperaturas mas bajas (23 °C) se alcanzan a finales del mes de octubre y se presentan en la parte nororiental, en la región del Estero de Sabancuy. Con respecto a las temperaturas de fondo se tiene que la más alta fue de 30 °C, la cual se registro en agosto en la porción oriental de la Laguna de Términos. Las temperaturas más bajas llegaron a los 25.5 °C en los meses de octubre y diciembre, distribuidas en forma homogénea a través de la Laguna.

3.1.3. Salinidad

Desde el punto de vista hidrodinámico el contenido de salinidad es uno de los principales parámetros ya que esta es la variable que refleja la dinámica de intercambio y mezcla entre el agua dulce y el agua de mar en la laguna.

De igual manera que para la temperatura, los registros de salinidad se obtuvieron del reporte de EPOMEX (EPOMEX, 1993). Los valores de salinidad superficial oscilan de 34 psu (máximo valor registrado) a 0 psu (mínimo valor registrado), siendo que el máximo valor se registro en el mes de febrero en la Boca de Puerto Real, mientras que el mínimo valor se presentó en el mes de diciembre en las desembocaduras de los ríos Palizada y Candelaria. Las mediciones de fondo alcanzaron valores que van desde 34 psu (máximo valor) hasta 2 psu (mínimo valor). El máximo registrado se presento en el mes de agosto, en la Isla del Carmen y Boca de Puerto Real (Interior de la Laguna), y el menor valor registrado se obtuvo en el mes de junio en la región de Boca de Atasta y Boca Chica.

3.1.4. Vegetación

La alta diversidad de ambientes y expresiones costeras de este sistema lagunar hace que la vegetación acuática y terrestre esté formada por: manglares, vegetación de pantano, selva baja inundable, matorral inerme inundable, vegetación riparia, selva alta-mediana y vegetación secundaria, además de los pastos marinos.

El intercambio de agua dulce y salada beneficia el desarrollo de halófitos, esto sumado a la casi nula pendiente en la zona lo cual genera el estancamiento del agua, formándose la

vegetación pantanosa. En lo que concierne a la vegetación sumergida, predominan los ceibadales.

La caracterización del tipo de vegetación es de gran importancia, ya que esta servirá para la asignación de los coeficientes de fricción y viscosidad cinemática para todas las zonas, las permanentemente inundadas o sumergidas, como son las zonas intermareales altamente vegetadas, los cuales se inundan únicamente durante ciertos períodos de marea.



Figura 3. 4 Ubicación de las estaciones de mediciones de Temperatura y salinidad (EPOMEX, 1993)

3.1.5. Hidrología

Los ríos que descargan en la laguna, ya sea en su cuerpo principal o lagunas secundarias son cinco, de los cuales tres se encuentran dentro del delta del sistema Usumancinta:

- El río Las Coloradas que se comunica con la Laguna de Pom, presenta una profundidad que varía entre los 4.0 m y 5.0 m de profundidad con una sección alrededor de 800 m.
- El río Palizada, tiene una profundidad de 3.0 m en su sección transversal, mientras que en las Bocas de San Francisco y Boca Chica que es por medio de las que se comunica con el cuerpo principal alcanza profundidades de hasta 6.0 m.
- El río Chumpán, para el que la profundidad varía entre 2.0 m y 3.0 m a lo largo de su sección mínima transversal, y en la laguna de Balchacah que es por medio de la cual interactúa con la laguna presenta profundidades de 2.5 m.

Los otros dos ríos que forman parte del sistema lagunar tienen su origen en Guatemala y Chiapas y son: el río Candelaria y el río Mamantel que registran profundidades de 3.5 m,

ambos se unen y dan origen a la Laguna de Panlao que presenta la misma profundidad que estos.

En la Tabla 3. 1 se presentan los gastos reportados para los principales ríos que descargan en la laguna para la época de avenidas y estiajes, además del gasto medio anual reportado. Para el caso del río las Coloradas únicamente se tiene registro del gasto medio (Enciso, 2002)

Tabla 3. 1 Aporte de gastos de los principales ríos que descargan a la Laguna de Términos.

Aporte m ³ .s ⁻¹	Palizada	Chumpan	Candelaria/Mamentel	Las Coloradas
Avenidas	510.00	50.00	197.00	NR
Estiaje	115.00	0.32	23.00	NR
Medio	228.00	18.06	72.00	35.00

3.1.6. Mareas.

La marea en la zona es mixta diurna siendo las componentes diurnas las dominantes. La amplitud media registrada en la región es de 0.424 m, la pleamar máxima es de 0.923 m y la bajamar mínima de -0.662 m, con respecto al nivel medio del mar (cota 0.00m) (Marina, 2001). Sin embargo, y dado que se tienen registros de elevación de superficie libre del agua en las bocas oceánicas naturales (bocas del Carmen y Puerto Real), para el mes de Septiembre de 2002, se realizó un análisis de dichas señales con el objeto de identificar y verificar el tipo de señal que se presenta en la laguna.

Estos datos fueron proporcionados por la Secretaría de Marina, (SEMAR), para la señal registrada en la Boca del Carmen y por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos (GICP) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para la señal medida en la Boca de Puerto Real.

El periodo de medición de la señal de marea en las dos bocas comprendió del 1 de septiembre de 2002 al 5 de octubre del 2002. Dado que el periodo seleccionado para las mediciones se encuentra dentro de la época denominada de "Huracanes" en México, y que durante esa época se presentó el huracán Isidore en las costas cercanas a la zona de estudio, los aparatos localizados en ambas bocas, cuentan con registros de la influencia de tal evento en la Laguna de Términos.

Las mediciones de la señal de marea en la boca de Puerto Real se efectuaron como parte de una campaña de campo, en la que se incluyó además del registro de la señal de marea mediciones de magnitud y dirección de corrientes, así como de oleaje direccional. El equipo colocado en esta boca es un perfilador de corriente acústico Doppler (RDI - ADCP) el cual por medio de un sensor de presión registró la elevación de superficie libre del agua.

La ubicación del equipo colocado en la boca de Puerto Real se realizó tomando en cuenta los objetivos principales de la campaña de campo (Mantilla, 2003) y tiene coordenadas (2,077,350.32 N, 657,420.69 E), situado a una profundidad de 7.2 metros. En la Figura 3. 5 se observa la localización del equipo en la sección mínima transversal de la boca. La

frecuencia de muestreo del ADCP fue a cada 90 minutos, recolectando un total de 540 datos.

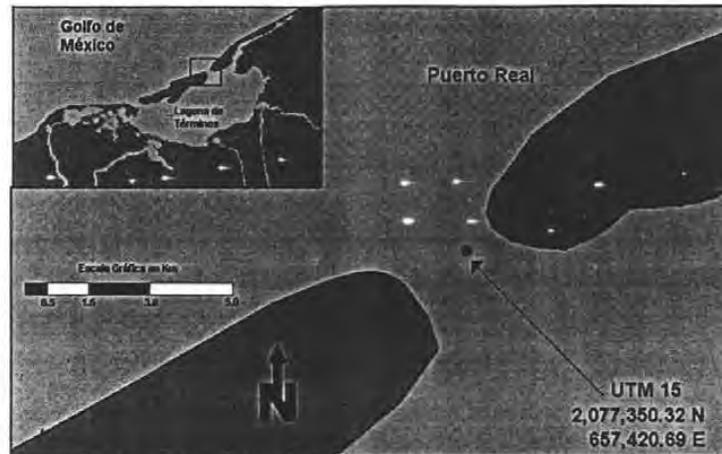


Figura 3. 5 Localización del equipo de medición colocado en la boca de Puerto Real.

En el caso de la señal de marea registrada en la boca del Carmen, las mediciones fueron realizadas con un mareógrafo que se encuentra instalado cerca de la Base naval numero 5 de la SEMAR, con coordenadas (6,061.392.41 N, 621,993.20 E). La frecuencia de muestreo de este equipo fue a cada 6 minutos. En la Figura 3. 6 se aprecia la ubicación del mareógrafo colocado por la SEMAR en la boca del Carmen.

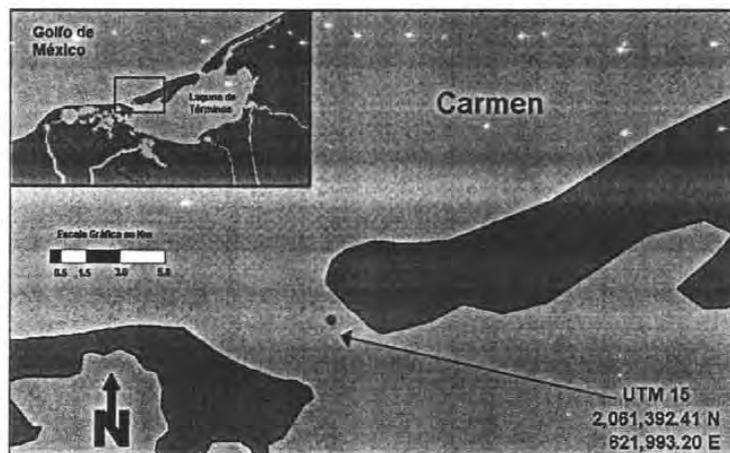


Figura 3. 6 Localización del equipo de medición en la boca del Carmen.

En la Figura 3. 7 se observan las señales de elevación de superficie libre registradas en las bocas de Puerto Real y Carmen. En esta señal se observa la variación entre la marea viva y muerta para los primeros días de registro (del 1 al 21 de Septiembre de 2002), ya que a partir del día 21 y hasta el 5 de Octubre la señal registrada se encuentra influenciada por los efectos de la presencia del Huracán Isidore cerca de esta región. Del 21 al 26 de septiembre, en la Figura 3, se tiene una sobreelevación en la superficie libre ocasionada por las fuertes lluvias, las descargas extraordinarias de los ríos y los escurrimientos en la zona. A partir del 26 de septiembre se observa cómo la señal de marea sigue estando afectada por los efectos de dicho fenómeno meteorológico, pero sin embargo muestra una tendencia a regresar a su comportamiento habitual.

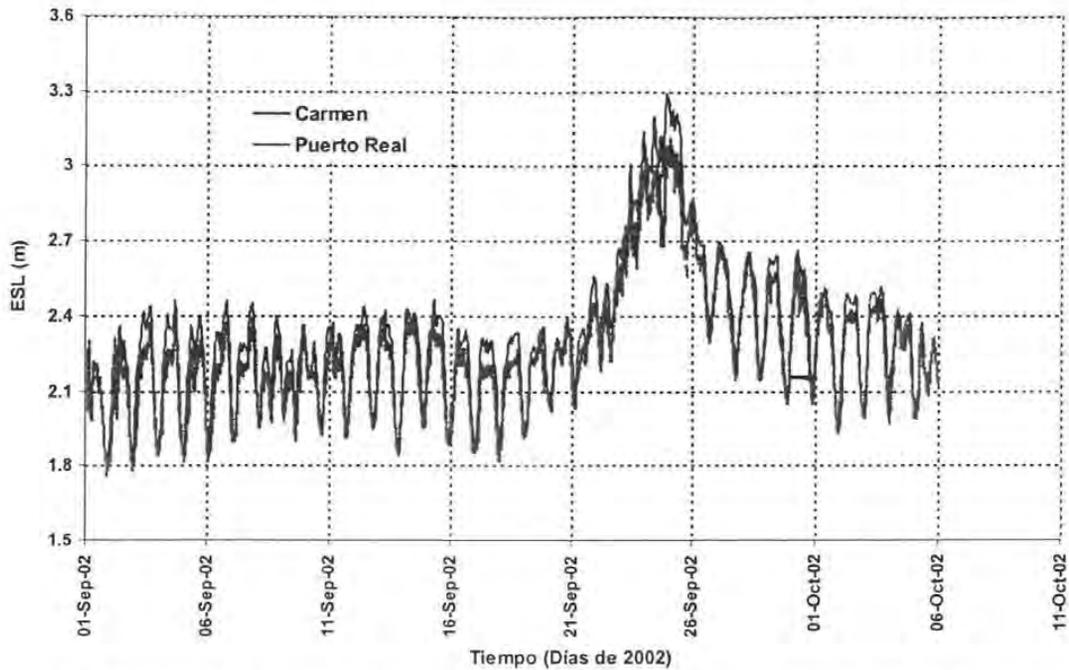


Figura 3. 7 Señales de marea medidas en las bocas del Carmen y Puerto Real, Septiembre de 2002.

A cada una de las señales registradas en las bocas, se le realizó un análisis armónico para obtener las principales componentes armónicas de estas señales (Uribe, 2003). El análisis se realizó a partir del 1 de Septiembre de 2002 y hasta el 20 de Septiembre, esto con la finalidad de no incorporar los efectos del huracán Isidore, ya que al incluirlo, éste incrementaría la energía de cada una de las componentes. El resultado del análisis armónico se resumió en la Tabla 3. 2 en donde se muestran las 36 componentes obtenidas del análisis.

En la Tabla 3. 2 se observa que efectivamente, como se reporta en la literatura, la marea en la zona es mixta diurna, predominando las componentes diurnas. Particularmente la componente O1, es la que presenta mayor energía en ambas bocas.

Tabla 3. 2 Principales componentes armónicas obtenidas en las bocas del Carmen y Puerto Real

Puerto Real			Carmen		
Nombre	amplitud	fase	Nombre	amplitud	fase
ZO	2.3542	0	ZO	2.1582	0
MM	0.2356	190.1	MM	0.1292	42.1
MSF	0.1613	212.98	MSF	0.0627	59.47
ALP1	0.0155	262.75	ALP1	0.0056	333.1
2Q1	0.0027	56.49	2Q1	0.0110	180.53
Q1	0.0360	103.98	Q1	0.0360	14.22
O1	0.1212	88.01	O1	0.1046	180.95
NO1	0.0219	210.95	NO1	0.0329	52.17
K1	0.0929	182.93	K1	0.0672	253.3
J1	0.0079	92.21	J1	0.0081	218.55
OO1	0.0020	285.59	OO1	0.0068	291.83
UPS1	0.0025	282.64	UPS1	0.0012	173.62
EPS2	0.0067	183.6	EPS2	0.0035	8.47
MU2	0.0086	206.38	MU2	0.0157	204.13
N2	0.0319	79.59	N2	0.0300	80.39
M2	0.0843	79.46	M2	0.0579	245.28
L2	0.0076	115.84	L2	0.0079	42.49
S2	0.0248	181.72	S2	0.0127	219.36
ETA2	0.0014	144.33	ETA2	0.0018	204.09
MO3	0.0024	302.46	MO3	0.0003	228.65
M3	0.0017	314.1	M3	0.0014	8.68
MK3	0.0036	323.57	MK3	0.0023	315.89
SK3	0.0019	51.25	SK3	0.0071	75.9
MN4	0.0038	281.13	MN4	0.0056	75
M4	0.0024	91.1	M4	0.0030	212.93
SN4	0.0039	122.23	SN4	0.0022	186.78
MS4	0.0005	78.04	MS4	0.0039	344.63
S4	0.0054	133.55	S4	0.0035	85.37
2MK5	0.0013	187.99	2MK5	0.0028	247.73
2SK5	0.0016	119.1	2SK5	0.0022	350.97
2MN6	0.0010	82.13	2MN6	0.0020	74.45
M6	0.0014	288	M6	0.0009	97.12
2MS6	0.0003	67.21	2MS6	0.0022	265.67
2SM6	0.0012	135.95	2SM6	0.0010	160.31
3MK7	0.0005	212.31	3MK7	0.0006	340
M8	0.0020	59.2	M8	0.0025	78.89

3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.

Para la aplicación del modelo a un área determinada se requiere la creación de una malla de cálculo que contenga todas las características físicas necesarias, además debe dotarse a éste de una serie de datos o condiciones iniciales y de frontera particulares del área que se pretende simular. Un aspecto importante es la incorporación de los datos de profundidad en cada nodo de la malla.

3.2.1. Actualización de la malla de estudio.

La malla de estudio debe cumplir con ciertas características como son la adecuada representación de la geometría y batimetría, es decir, la incorporación de las características físicas del lugar. Espinal (Espinal 2002) propone en su trabajo una malla de cálculo, la cual es tomada como base para la realización de la malla de estudio para este trabajo, con las siguientes características:

- La malla creada es una malla irregular en elemento finito, que describe e incorpora las características del sistema como línea de costa, bocas, canales, lagunas adyacentes, ríos y áreas intermareales.
- Incorpora valores de fricción, viscosidad turbulenta, parámetros de porosidad de manglar.
- Delimita la zona de estudio, incluyendo cuerpos de agua y zonas susceptibles de inundación. Dentro de los cuerpos de agua incorpora la interacción que tiene la laguna con el mar por medio de las tres bocas a través de un abanico de aproximadamente 5 km de radio para las bocas naturales y 400 m para la boca artificial. Dado que la pleamar máxima registrada ha sido de 0.92 m, propone que el área de estudio este por debajo de la cota +1.0 m.
- Por medio de un refinamiento en la malla se reproducen los aspectos físicos en las zonas de mayor interés que abarcan las bocas y los canales principales, simplificando las zonas altas y de manglar con una malla más gruesa en estas áreas.
- La malla final se muestra en la Figura 3. 8, la cual quedo constituida por 10,555 elementos y 23,096 nodos abarcando un área de aproximadamente 4,100 km². Con un total de 2,106.51 km² que abarcan los cuerpos de agua y 1,833.28 km² de zonas altas como manglar, pantanos y marismas.

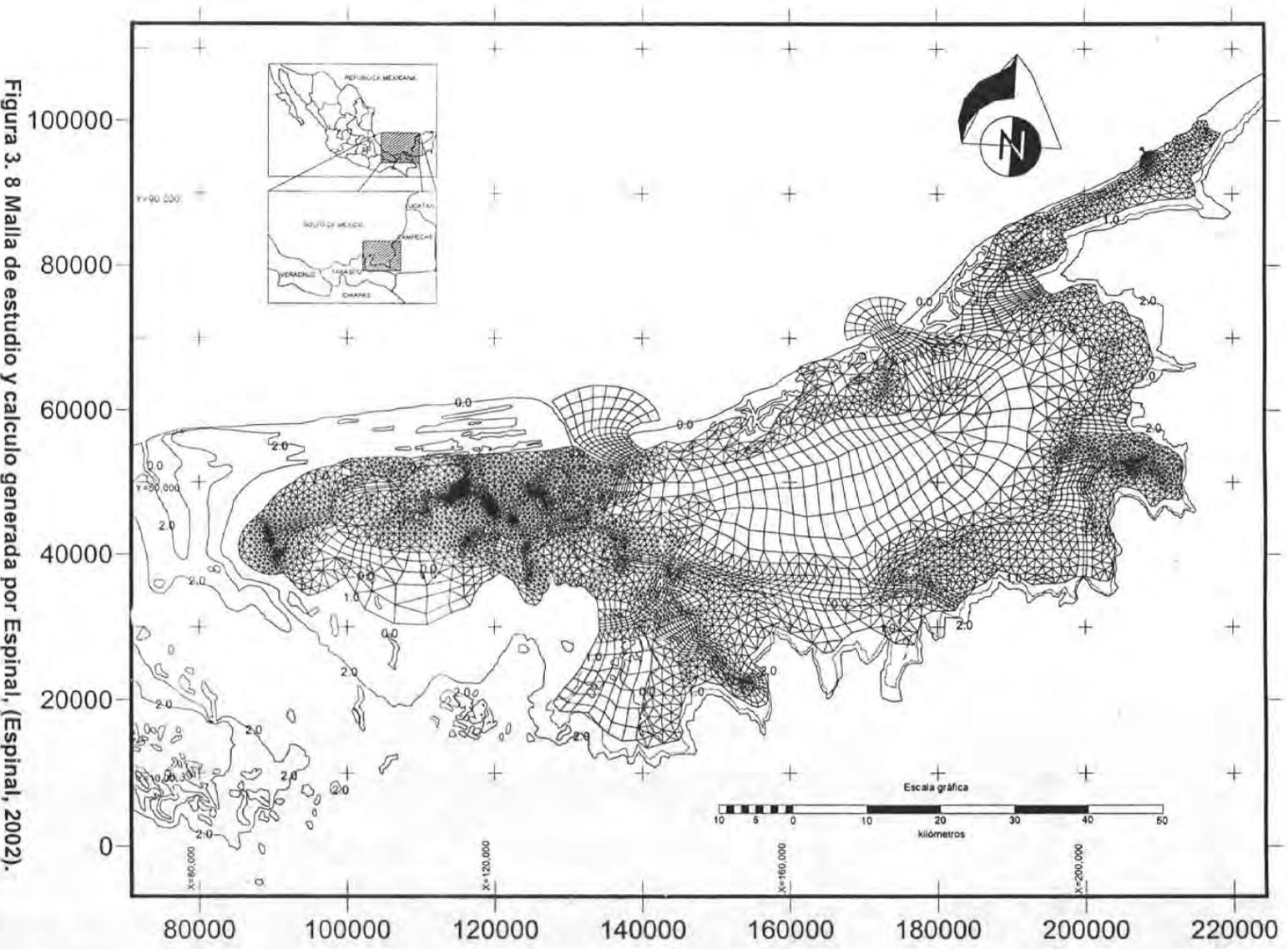


Figura 3. 8 Malla de estudio y calculo generada por Espinal, (Espinal, 2002).

Tomando la malla propuesta (Espinal, 2002) y realizando algunas actualizaciones de batimetría e incorporación de canales se generó la malla de cálculo utilizada para este trabajo.

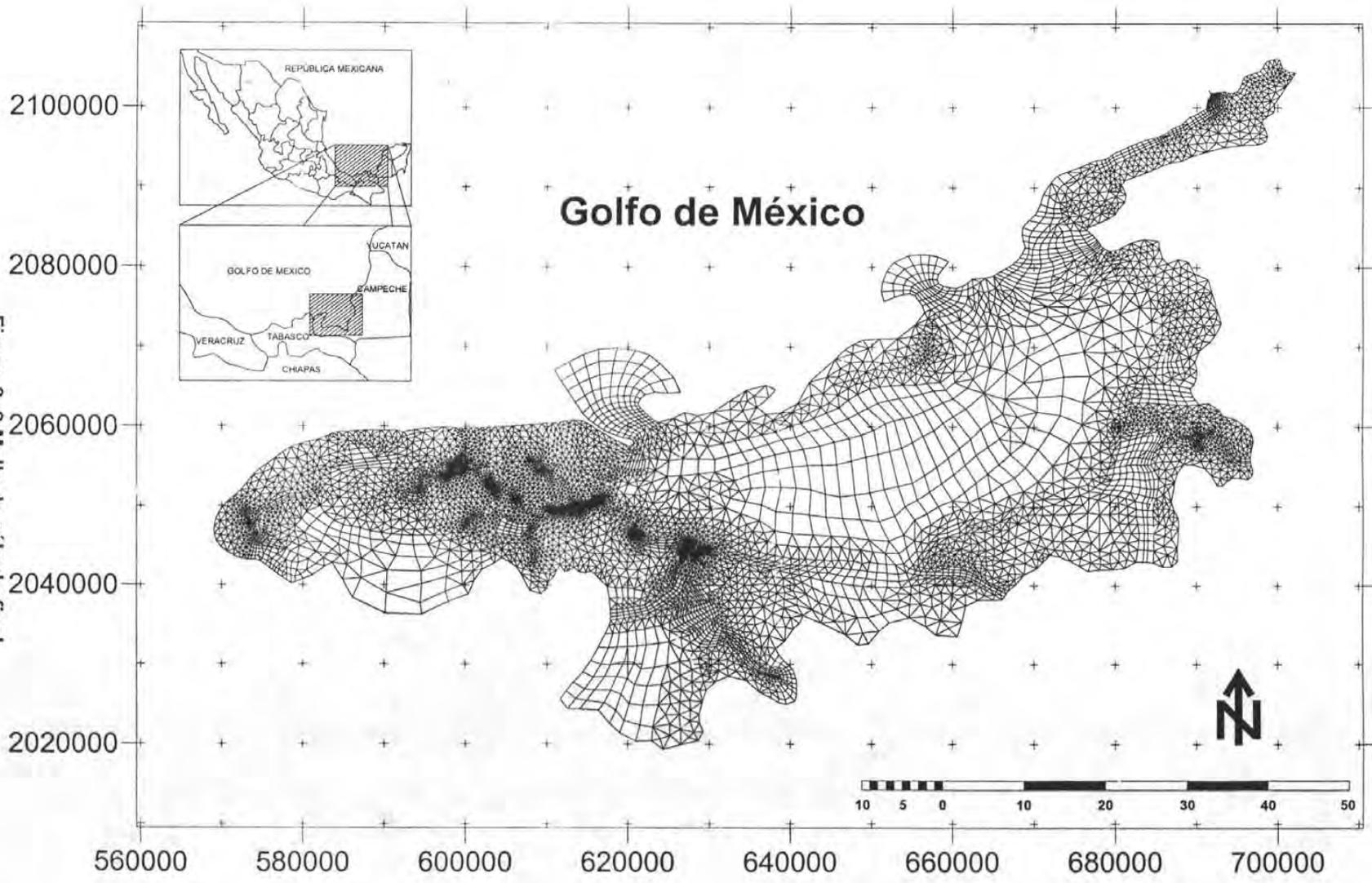
La malla propuesta (Espinal, 2002) se encontraba en un sistema arbitrario por lo que fue necesario hacer la conversión de coordenadas del sistema arbitrario a coordenadas UTM 15 con lo que se logró ubicar el área de estudio en la posición geográfica adecuada. Una vez que se ubicó la malla de cálculo, se realizó la actualización de la batimetría al incorporar datos batimétricos proporcionados por CFE (CFE, 2002), para las regiones de mayor interés como son Boca del Carmen, Boca de Puerto Real, Boca de Sabancuy, Boca de Atastilla, Boca Vieja, Boca de San Francisco y el interior del cuerpo de la Laguna.

Con respecto a las lagunas de Pom y Atasta, así como el canal conocido como "Las Coloradas", ubicado al suroeste de la región, el cual comunica con la Laguna de Pom; la actualización se realizó tomando datos del trabajo publicado por Enciso Sánchez (Enciso, 2000). De esta manera se obtuvo la nueva configuración batimétrica de la región.

Por otro lado, la CFE (CFE, 2002) reportó las nuevas dimensiones del canal de la Boca de Atastilla, Boca de Palizada Vieja, Boca de San Francisco, Boca de Pargos y por último Boca de Sabancuy. Al realizar estos ajustes se tuvo que todas estas secciones sufrieron reducciones considerables con respecto a las reportadas anteriormente, (Espinal, 2002). El canal de la Boca de Atastilla modificó el ancho de su sección a un 6% del ancho reportado anteriormente, de igual manera la Boca de Palizada Vieja se redujo al 24%, Boca de San Francisco al 6%, la Boca de Pargos al 84% y la Boca de Sabancuy al 18%, y por último el canal que comunica la Boca de Sabancuy con el mar al 57%.

Una vez realizadas las modificaciones la malla de cálculo quedó conformada de la siguiente manera: 13,411 elementos y 29,276 nodos, con respecto al área ocupada por los cuerpos de agua el área que estos abarcan es de 2,184.64 km² mientras que las zonas efectivas de inundación son de 1,882.88 km². Después de realizados estos cambios la malla de cálculo resultante se muestra en la Figura 3. 9.

Figura 3. 9 Malla de cálculo final.



3.2.2. Actualización de la Batimetría

La batimetría actualizada se observa en la Figura 3. 10

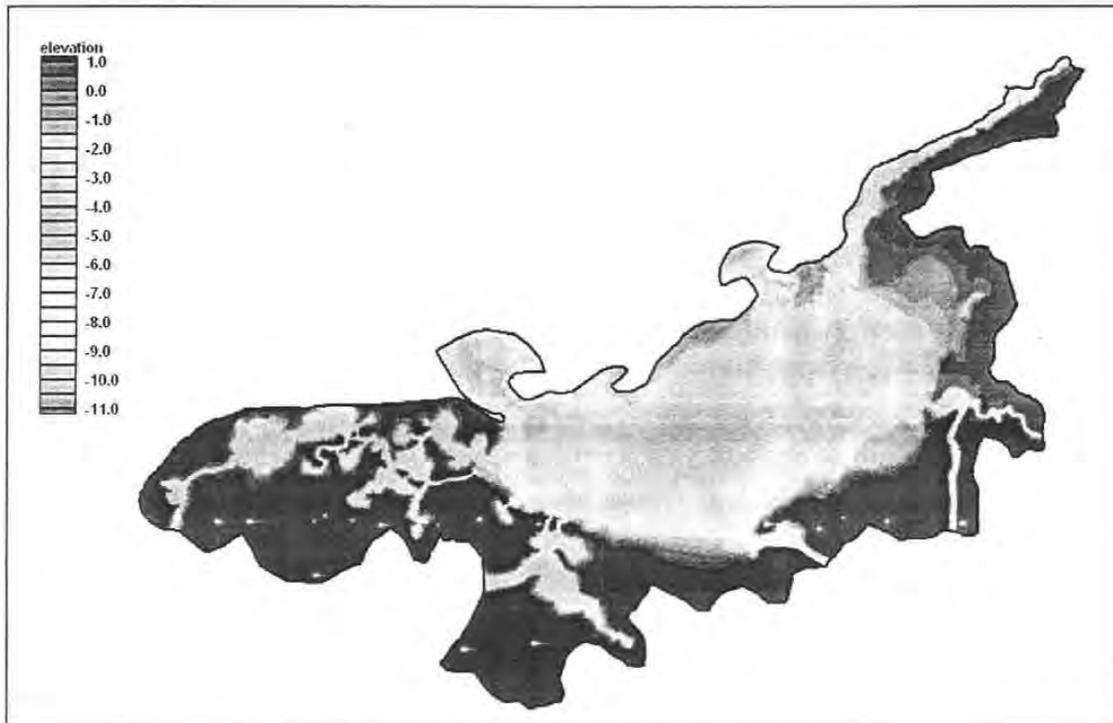


Figura 3. 10 Batimetría actualizada de la zona de estudio.

3.2.3. Determinación de los coeficientes de rugosidad y fondo, viscosidad de remolino y porosidad de manglar

Con el fin de simplificar este estudio tanto los coeficientes de rugosidad y fondo como viscosidad de remolino y porosidad de manglar fueron tomados de trabajos previos, (Espinal, 2002).

3.2.3.1. Determinación de los coeficientes de rugosidad y fondo.

Como se ha visto anteriormente, el sistema de Laguna de Términos está formado por un cuerpo de agua principal, el cual se comunica al mar por medio de tres bocas, cinco ríos que desembocan indirectamente en él, lagunas adyacentes, además de zonas intermareales y de manglar, las cuales dada su formación permanecen parcialmente inundadas en función de la amplitud de marea y las descargas de los ríos.

Tomando en cuenta la configuración del sistema, debe considerarse que en las zonas intermareales vegetadas, la resistencia al flujo no sólo está dominada por el esfuerzo cortante de fondo como sucede con los canales abiertos, sino también por la forma y la densidad de la vegetación.

Dada la magnitud y complejidad del sistema, se propone dividir la malla de estudio en únicamente tres diferentes unidades morfológicas (Espinal, 2002):

- Cuerpos de agua si vegetación submarina
- Cuerpos de agua con vegetación submarina
- Zonas de transición y zonas intermareales descubiertas.

Apoyado por estudios previos en bocas (Escoffier 1977, Bruun 1978), flujo en canales abiertos (Chow, 1959, Henderson 1966), flujo sobre planicies de inundación y campos de agricultura (Henderson 1966, Ree y Crow 1977), (Espinal, 2002) propone los siguientes rangos de valores del factor de fricción n de Manning:

- Para los cuerpos de agua no vegetados (incluyendo las Bocas), 0.020 a 0.030
- Para los cuerpos de agua vegetados, 0.035 a 0.055
- Para las zonas de manglar, 0.080 a 0.120.

3.2.3.2. Determinación del coeficiente de viscosidad de remolino.

El coeficiente de viscosidad de remolino es la forma en la que se normaliza la fluctuación en la turbulencia del flujo. Se representa por las letras E o K , es un coeficiente empírico y no tiene un valor exacto para aguas poco profundas.

El modelo utilizado presenta una gran sensibilidad a este parámetro (Espinal, 2002) por lo que se trabajó con el coeficiente propuesto por dicho autor, $5.0 \cdot 10^3$ Pa.s., el cual es asignado en forma uniforme en todo el sistema.

3.2.3.3. Determinación del coeficiente de porosidad de manglar.

Considerando la poca profundidad de la Laguna de Términos y la existencia de zonas de manglar e intermareales que la conforman, el modelo debe tener la capacidad de incorporar eficiente y establemente esas zonas, representadas por celdas que se "mojan y secan" durante el ciclo de marea. Para tal efecto, se pueden eliminar e incorporar dichas celdas, dependiendo del nivel de la superficie libre del agua, o se puede incorporar el método de Porosidad de Manglar con la finalidad de mantener activos todos los elementos que forman la malla de estudio para todo el ciclo de marea. Con este método se garantiza que el sistema no sufra inestabilidades numéricas al activar y desactivar elementos para poder simular secados y mojados.

Este parámetro se consideró tomando en cuenta la amplitud de la marea viva en la zona que es de 0.6 m y suponiendo que la máxima elevación que se tiene en la malla es de 1.0 m, el valor del parámetro $A1$ es de 2.0 m para el cual tomaron las siguientes consideraciones (Espinal, 2002):

- La zona de manglar está formada por las regiones intermareales y altas
- La mayor densidad de vegetación sobresale 50-100 cm sobre el nivel del terreno

El valor del parámetro A2 propuesto (Espinal, 2002) es de 1.0 m para las zonas de manglar, para las zonas de transición de 0.8 m y de 0.5 m para los cuerpos de agua.

Para el parámetro A3 se optó por el valor de 0.01 (Espinal, 2002).

3.3. CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA.

Para comenzar las simulaciones es necesario dotar al modelo de dos tipos de condiciones, las condiciones iniciales y las de frontera.

La condición de frontera se divide en frontera abierta y frontera cerrada. Por un lado, la frontera abierta es aplicada en las bocas oceánicas, las cuales fueron dotadas de un registro de marea, y las descargas de los ríos, por otro lado la frontera cerrada es aplicada para los nodos que definen los límites de la malla. Con respecto a los nodos en el perímetro y límites de la malla se tienen valores de velocidad cero perpendicular a la frontera y con una condición de deslizamiento en la dirección paralela a la frontera.

En lo que respecta a las condiciones iniciales, se le asignaron condiciones arbitrarias de velocidad y superficie libre. El sistema comienza la modelación con un valor de velocidad igual a cero, mientras que para la condición de superficie libre, se considero un nivel uniforme de 1 metro sobre la cota cero, con la finalidad de que todos los elementos se encuentren inundados al comenzar la simulación.

3.3.1. Tiempo de estabilización del modelo.

Dado que el modelo fue forzado bajo ciertas condiciones de superficie libre y velocidad, la solución debe ser analizada para poder determinar a partir de qué paso de tiempo ésta deja de ser influenciada por dichas condiciones, para entonces reproducir los resultados adecuadamente. Es por esta razón y por los efectos transitorios que se presentan en la simulación que la solución en los primeros pasos de tiempo no puede o no debe ser considerada como adecuada o representativa de la hidrodinámica del sistema.

El tiempo de estabilización se define como el tiempo que el modelo requiere para que los resultados obtenidos sean independientes tanto de las condiciones de forzado inicial como de los efectos transitorios.

Para determinar el tiempo de estabilización del modelo se utilizó una marea monocromática con 8 ciclos y aporte de los ríos con gastos mínimos. Se analizaron las diferencias de valores de velocidad y elevación de superficie libre para dos ciclos de marea consecutivos.

$$\varepsilon(t) = \left| \chi(t) - \chi(t + T_{S_2}) \right|$$

donde $\chi(t)$ es el valor de velocidad o superficie libre del agua para un tiempo t y $\chi(t + T_{S_2})$ es el valor de velocidad y superficie libre para el siguiente ciclo de marea, T_{S_2} en el período de la componente S_2 (24h).

Cuando la solución tanto en velocidad como en elevación de superficie libre del agua se repite entre dos ciclos de marea o la diferencia entre éstos es despreciable, entonces se tiene el tiempo de estabilización del modelo y a partir de este se puede garantizar que la solución obtenida es independiente del forzado inicial y de los efectos transitorios.

Una vez que se analizó la variación de velocidades y superficie libre entre un ciclo y otro se obtuvo que el tiempo de estabilización del modelo fue de tres ciclos de marea, como se observa en las Figura 3. 11 y Figura 3. 12, por lo que la simulación considera los resultados a partir del tercer ciclo de marea.

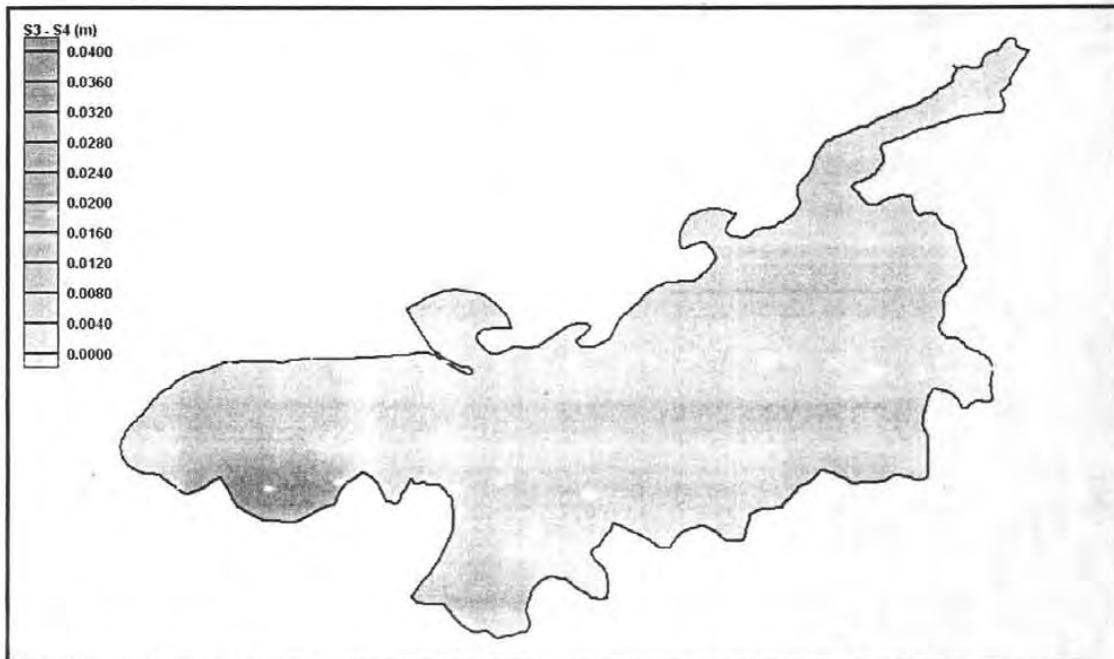


Figura 3. 11 Diferencia de superficie libre entre el tercero y cuarto ciclo de marea

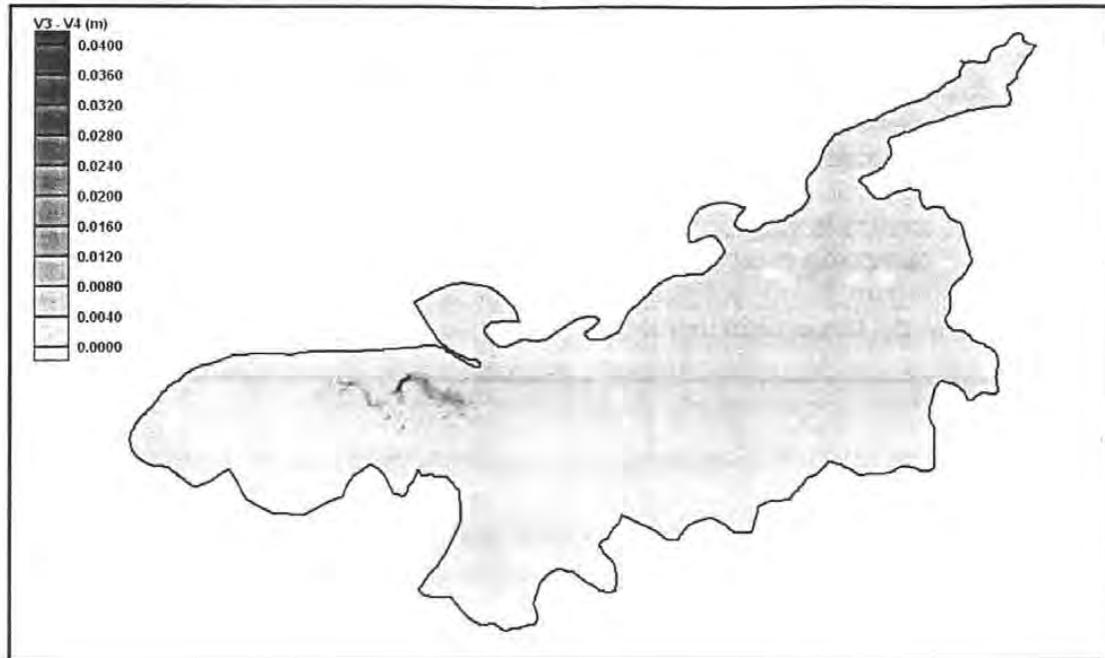
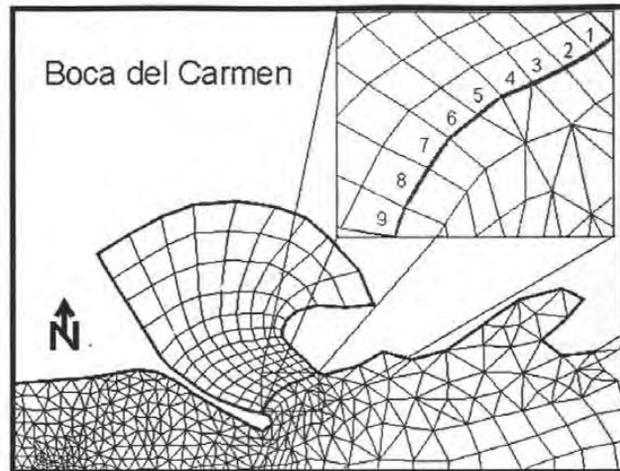


Figura 3. 12 Diferencia de velocidades entre el tercero y cuarto ciclo de marea.

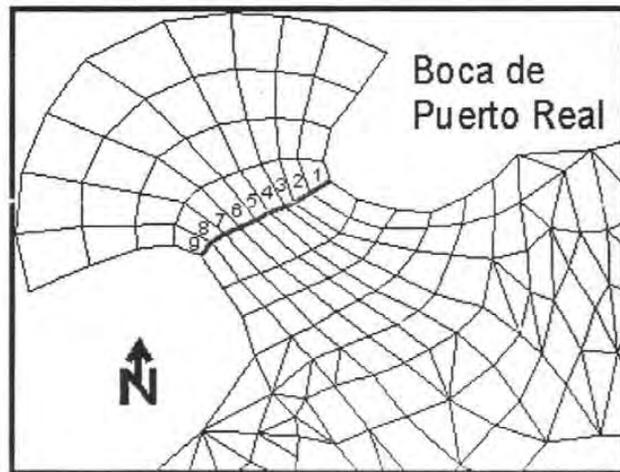
3.3.2. Conservación de masa.

Los modelos numéricos que resuelven por medio del elemento finito pueden tener problemas al momento de verificar la conservación de masa, esto es, debido a las aproximaciones numéricas en la solución de las ecuaciones de gobierno. Una forma de verificar que el modelo cumpla esta condición es aplicando la ecuación de continuidad en las fronteras abiertas (bocas oceánicas), calculando el gasto de entrada y salida a través de las bocas para un ciclo de marea (monocromática).

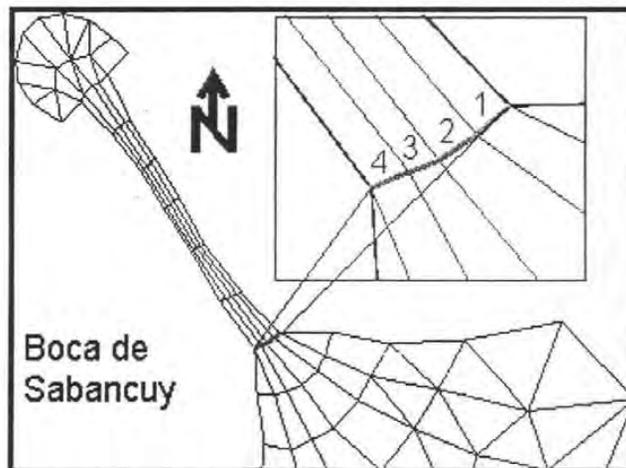
En cada una de las tres bocas se tomó una sección transversal de control, como se observa en las Figura 3. 13 (a), (b), (c), y se propusieron ciertos puntos de observación de los que se conoce la batimetría, ubicación geográfica y las distancias entre un punto y otro. Así mismo, se obtuvieron del modelo hidrodinámico los valores de velocidad, tanto magnitud como dirección y los valores de elevación de superficie libre del agua. Con estos datos, se calculó el área de la sección de control, y con el registro de velocidades y el área, el gasto que pasa por cada una de bocas para el tiempo simulado (un ciclo de marea).



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 13 Secciones de control en (a) Boca del Carmen, (b) Boca de Puerto Real y (c) Boca de Sabancuy

Una vez calculados los gastos que pasan a través de cada una de las bocas, se obtuvo que el volumen de entrada: $4.95 \cdot 10^8$ y el de salida de $4.78 \cdot 10^8$, durante un ciclo de marea (24 horas), el gasto total tanto de entrada como salida se puede observar en la Figura 3. 14. De ésta se puede apreciar que tanto el volumen de flujo como el reflujos son muy similares, teniendo un porcentaje de error entre ambos de aproximadamente 3.2% lo que nos lleva a considerar que el sistema cumple con la conservación de masa de una manera aceptable.

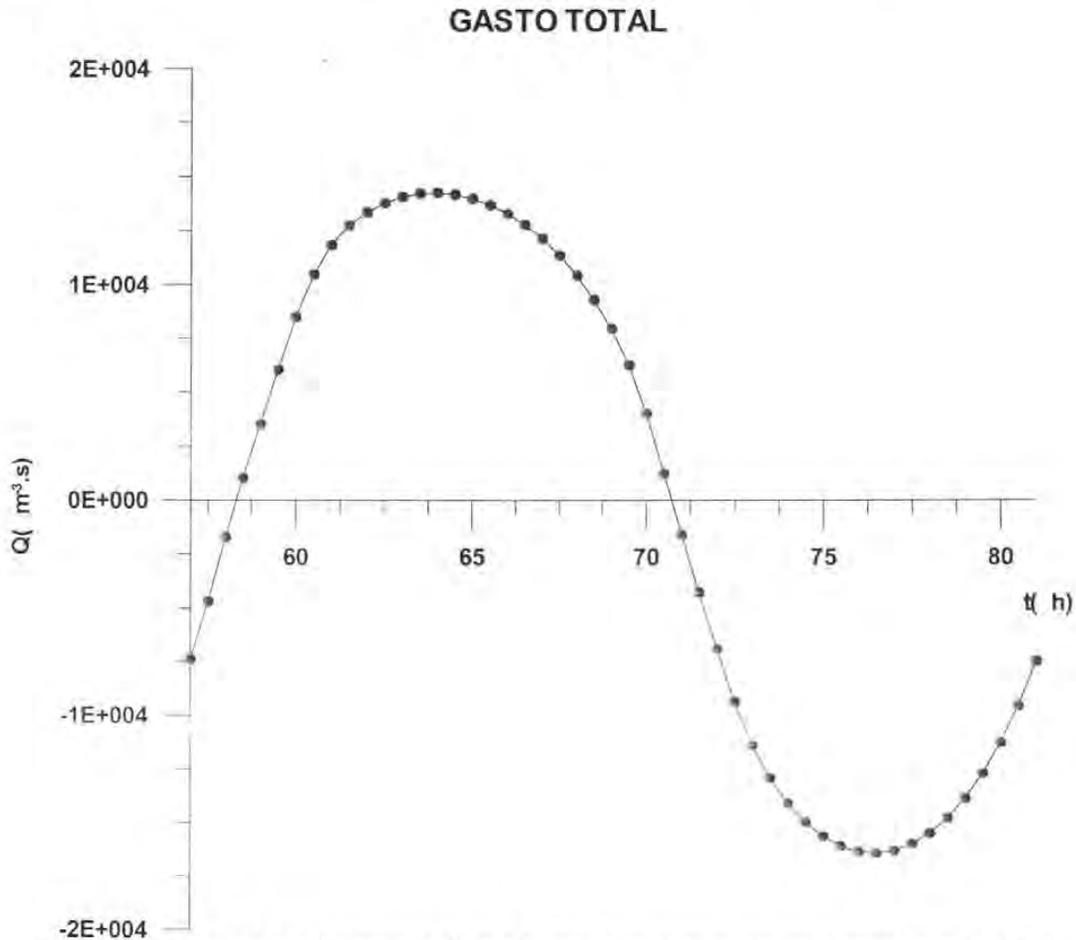


Figura 3. 14 Gasto total a través de las bocas oceánicas, (marea monocromática)

3.4. FORMULACIÓN DE ESCENARIOS.

El planteamiento de los casos simulados se realizó tratando de englobar los principales escenarios presentes en la zona de estudio, es decir, una condición para un escenario idealizado, incluyendo por un lado la señal de marea monocromática y por otro una señal reconstituida, la cual incluya el efecto de la distorsión de marea ocasionado por los cambios que experimenta la señal de marea al propagarse; un escenario bajo condiciones normales y finalmente un escenario que incluya condiciones extremas (evento climatológico extremo.) Estos casos son las condiciones bajo las que se forzará al modelo en las fronteras abiertas, combinados con las condiciones de descarga de los ríos (gastos mínimos, medios y máximos).

3.4.1. Condiciones de forzado.

3.4.1.1. Ríos

Para el caso del aporte de los ríos, las condiciones bajo las que se realiza el forzado son las que se presentan en la Tabla 3. 1, en donde se observan los gastos reportados para las distintas condiciones de descarga.

3.4.1.2. Mareas

En el caso de las mareas, se propone utilizar cuatro distintas señales, la primera corresponde a una señal de marea monocromática, la segunda es una señal reconstituida la cual incorpora los efectos de distorsión (amplitud y fase) que experimenta la señal de marea al propagarse, la tercera es la señal reconstituida del análisis armónico para el mismo periodo de medición, incluyendo las cinco componentes de mayor energía obtenidas y la cuarta corresponde a la elevación de superficie libre medida, la cual incorpora los efectos del huracán Isidore.

- Señal de marea monocromática.

La señal de marea monocromática se generó a partir de datos reportados en la literatura (Espinal, 2002), creando de esta manera una señal con 0.30 m de amplitud y periodo de 24 horas. El desfase entre las señales es de 2 horas (Espinal, 2002) y éste toma en cuenta la dirección de propagación de marea. En la Figura 3. 15 se muestra la señal de marea generada a partir de los datos reportados por Espinal.

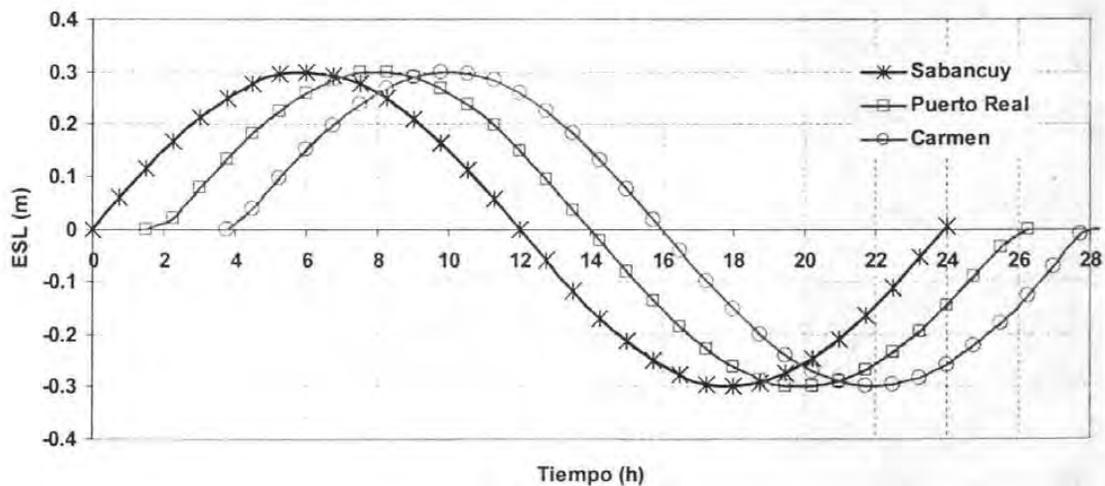


Figura 3. 15 Señal de marea monocromática en las bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen.

- Señal de marea reconstituida con los efectos de la distorsión.

La segunda señal de marea se generó a partir de los datos mostrados en la Tabla 3. 2, que corresponden a las constantes armónicas calculadas del análisis de las señales medidas en campo. De la Tabla 3. 2 se tomaron las 5 componentes de mayor energía, (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1), para cada boca, las cuales se presentan en la Tabla 3. 3.

Tabla 3. 3 Constantes armónicas utilizadas para la reconstitución de la señal de marea

Puerto Real					
Componente	M_2	S_2	N_2	K_1	O_1
H(m)	0.084	0.025	0.032	0.093	0.121
Fase(°)	79.460	181.720	79.590	182.930	88.010

Carmen					
Componente	M_2	S_2	N_2	K_1	O_1
H(m)	0.058	0.013	0.030	0.067	0.105
Fase(°)	245.280	219.360	80.390	253.300	180.950

Tomando como base las principales constantes armónicas registradas en las bocas del Carmen y Puerto Real, (Tabla 3. 3), así como la distancia entre ambas, se obtuvo la relación entre la diferencia de amplitudes y fases para cada componente, entre la boca de Carmen y Puerto Real, esta relación se refirió a la distancia que existe entre ambas bocas, con la finalidad de poder inferir las posibles amplitudes y fases presentes en la boca de Sabancuy, ya que en esta boca no se cuenta con registro de datos medidos.

Dado que se conoce, por un lado la distancia que existe entre la boca de Sabancuy y la de Puerto Real, y por otro la relación entre las componentes registradas entre boca del Carmen y Puerto Real se afectaron estas relaciones por la distancia que existe entre las bocas de Puerto Real y Sabancuy, obteniendo de esta manera una posible señal de marea en la boca de Sabancuy, considerando la dirección de propagación de la señal de marea.

La reconstitución de la señal de marea incorpora la distorsión que tiene la señal al propagarse desde aguas profundas hasta aguas someras, adicionalmente la que se genera al entrar en contacto dicha señal con la laguna, por medio de sus bocas oceánicas ya que mientras parte de esta señal seguirá propagándose por fuera del cuerpo semicerrado, otra parte de ésta se propagará por dentro de dicha laguna. Además se toma en cuenta el desfase que existe entre las componentes diurnas y semidiurnas de la señal.

En la Figura 3. 16 se observan las señales de marea generadas, en las bocas de Carmen, Puerto Real y Sabancuy. De esta figura se observa que el desfase calculado entre las señales de Carmen y Puerto Real es de 3.75 horas, mientras que el desfase inferido entre Puerto Real y Sabancuy es de 4.5 horas. Por otro lado, de la misma Figura 3. 16, se aprecia que las amplitudes máximas son de 0.38, 0.34 y 0.28 m en las bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen.

Como se mencionó anteriormente, la señal de marea se va distorsionando a medida que se propaga al interior de la laguna, dicha distorsión esta influenciada por los efectos de fondo, viento, cambio de dirección, etc., y dependiendo de la posición en la que se encuentre el punto o lugar de medición, por esta razón existe una divergencia entre el desfase de la señal reportado en la literatura (2 horas) y el calculado en este trabajo.

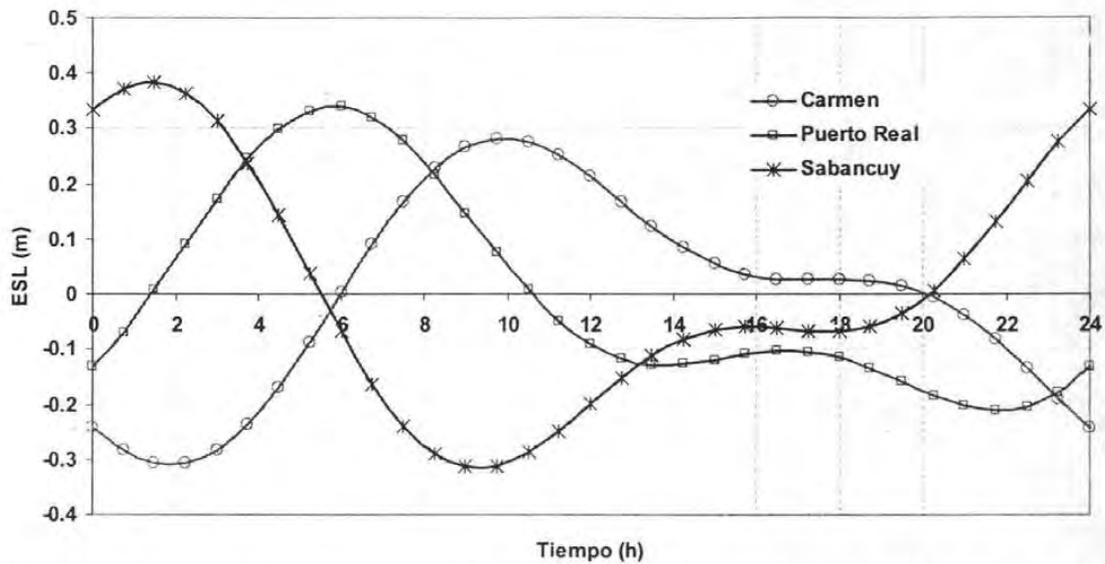


Figura 3. 16 Señal de marea generada en las bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy tomando en cuenta la distorsión de la señal.

- Señal de marea generada del análisis armónico.

En este caso, para la reconstitución de la señal de marea se utilizaron las 36 componentes obtenidas en el análisis. En la Figura 3. 17 se observan las señales de marea generadas a partir de las componentes armónicas para el mismo periodo de medición (1 de septiembre de 2002 al 10 de octubre de 2002). En esta figura se aprecia la existencia de la marea viva y muerta, las cuales tienen un periodo aproximado de 14 días.

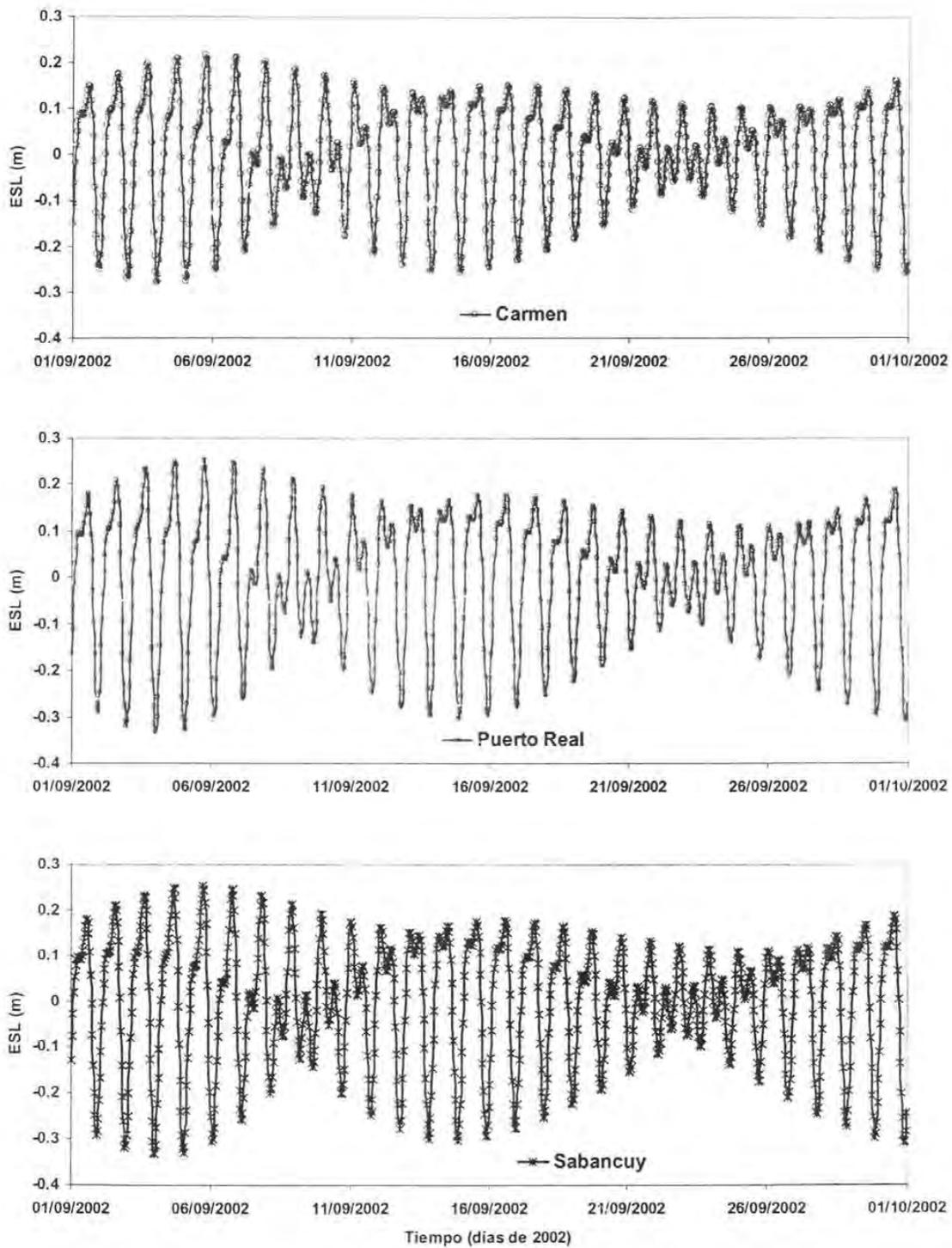


Figura 3. 17 Señales de marea generadas a partir del análisis armónico en las bocas de Carmen, Puerto Real y Sabancuy, Septiembre 2002.

- Señal de marea con la influencia del Huracán Isidore.

La última señal corresponde a la elevación de superficie libre del agua medida en las bocas de Carmen y Puerto Real, mostradas en la Figura 3. 7. Con respecto a la señal utilizada para la boca de Sabancuy se tomó la misma señal registrada en Puerto Real y únicamente se desfasó tomando el mismo desfase que se presentó entre las señales medidas en Carmen y Puerto Real.

3.4.2. Determinación de escenarios

3.4.2.1. Caso 1.

El caso 1 incluye la condición de descarga de gasto mínimo y señal de marea monocromática, este escenario se formuló con el propósito de realizar el análisis de tiempos de estabilización y conservación de masa, para verificar el cumplimiento de las condiciones de estabilización del modelo.

3.4.2.2. Caso 2.

Para el escenario 2 se tiene la descarga de los ríos en época de estiaje y la señal de marea con los efectos de distorsión tanto en la amplitud como en la fase entre las bocas oceánicas.

3.4.2.3. Caso 3.

Este escenario incorpora la descarga de los ríos en condiciones medias (Figura 3. 17) y la señal de marea reconstituida para el mismo periodo de medición, el objetivo de este escenario es el de poder representar las condiciones medias o habituales en la región.

3.4.2.4. Caso 4.

El cuarto caso incorpora por un lado la señal de marea presente en la zona y por otro los efectos generados por un huracán. Específicamente el huracán Isidore, el cual se presentó en el mes de Septiembre de 2002 en el Sureste del Golfo de México, se formó como una onda Tropical en el Mar Caribe, antes de llegar a las costas mexicanas, pasando de Depresión Tropical a Tormenta Tropical hasta convertirse en Huracán Clase I, según la escala Saffir – Simpon. Finalmente dejó sentir su influencia en las costas de la República Mexicana al atravesar el canal de Yucatán, siendo para este momento Huracán Clase III. Se desplazó paralelo a la costa norte de Yucatán, generando bandas nubosas que afectaron la región sureste del Golfo de México. Isidore finalmente tocó tierra y siguió desplazándose, causando severos daños no solo en el Estado de Yucatán, sino también en los estados de Quintana Roo, Campeche y el mismo Tabasco.

Particularmente, en la Laguna de Términos se observó una sobrelevación, específicamente en sus bocas, generada por los efectos de dicho Huracán, a pesar de que la laguna se encuentra a una distancia aproximada de 350 km de distancia del estado de Yucatán.

En la Figura 3. 18 se presenta la trayectoria del Huracán Isidore frente a costas mexicanas, además de apreciarse la distancia que existe entre la Laguna de Términos y el punto más cercano a la misma de acuerdo a dicha trayectoria.

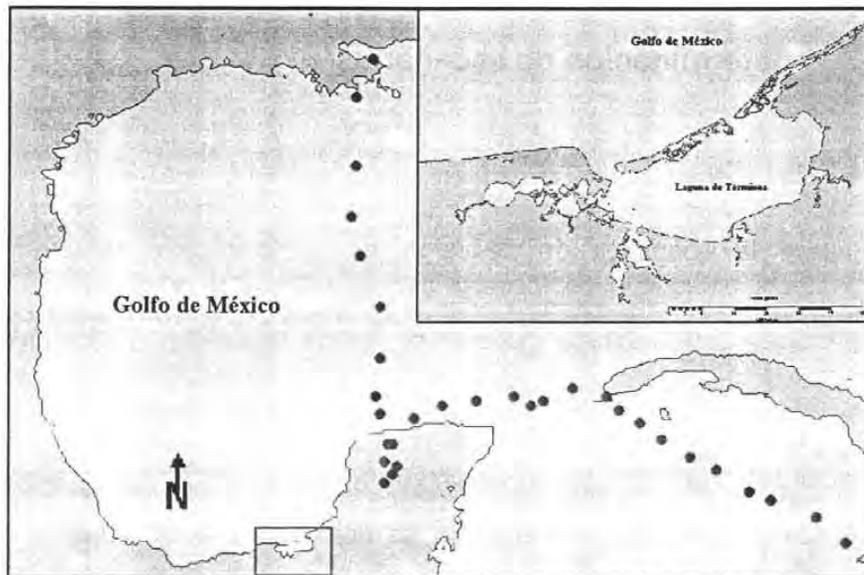


Figura 3. 18 Trayectoria del huracán Isidore y ubicación de la Laguna de Términos.

Finalmente, y dado que el huracán generó modificaciones en el patrón de vientos, fuertes precipitaciones, inundaciones, etc., la incorporación de los ríos para este caso se realizó considerando los gastos de avenidas.

Capítulo 4

Resultados

Hidrodinámicos

4. RESULTADOS HIDRODINÁMICOS

En este capítulo se presentan, por un lado, los resultados obtenidos para cada escenario planteado en el capítulo 3 y, por otro, un análisis de los mismos. Estos resultados permiten la determinación del patrón hidrodinámico en las bocas oceánicas y al interior de la laguna. Con este análisis lo que se busca es evaluar el comportamiento que tienen cada una de las tres bocas oceánicas y la influencia que tienen factores importantes sobre éstas, como son: la interacción de las propias bocas entre ellas, cómo es que afecta la distorsión de la marea al propagarse dentro y fuera de la laguna, la geometría de cada una de las secciones de las bocas, la fricción de fondo, y el aporte de los ríos.

De los escenarios modelados, se presentan son las variaciones de velocidad y superficie libre en los primeros dos casos y en los últimos dos se incorpora además el gasto. En el caso de los primeros dos escenarios el análisis que se presenta corresponde a un ciclo de marea (24 horas), ya que por el tipo de señal utilizada en ambos casos la solución es la misma para cada ciclo y únicamente se repite según el número de ciclos modelados.

Para los escenarios 3 y 4, el análisis se realizó en forma integral para todo el tiempo simulado, dado que las señales de marea implementadas en estos casos no son uniformes durante períodos definidos (mareas reales), y para los cuales el análisis incorpora el estudio del residual de gastos.

La serie de figuras de velocidad, gasto y gasto residual presentadas en este capítulo corresponden a los valores obtenidos del modelo hidrodinámico en las secciones de control propuestas en las bocas oceánicas, (Capítulo 3, Figura 3.13). En esta serie de figuras los valores positivos en el eje transversal corresponden a valores de salida o reflujos, mientras que los valores negativos conciernen a condiciones de flujo o entrada.

4.1. CASO 1. Marea monocromática y gastos de estiaje.

El primer caso corresponde a la modelación de una señal de marea monocromática con período de 24 horas y amplitud de 0.3 m, y el aporte de los ríos en época de estiaje. El análisis de resultados, como ya se mencionó, es para un ciclo de marea y corresponde al último ciclo simulado el cual va de la hora 723 a la 747. Con este caso se pretende determinar el comportamiento del sistema modelado en forma cualitativa con una marea simétrica, aunque en la realidad no se presenta una señal de marea como la propuesta. Además de la importancia de la interacción que existe entre las tres bocas y el sistema lagunar, por esta razón se buscó tener la mínima influencia de la descarga de los ríos.

4.1.1. Velocidades y elevación de superficie libre

4.1.1.1. Boca de Sabancuy.

En la Figura 4. 1 se presenta la variación en el patrón de corrientes y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para un periodo de 24 horas que corresponde a un ciclo de marea. Con respecto al patrón de corrientes, la condición de reflujos perduró

por 12.6 horas con una velocidad máxima de $1.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la cual es menor a la velocidad de flujo máximo ($1.31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). El flujo se mantuvo sólo 11.4 horas. Adicionalmente del prisma de marea el volumen neto de salida es de $5.63\cdot 10^6 \text{ m}^3$, en tanto que el de entrada es aproximadamente 14% mayor que éste con un volumen de $6.42\cdot 10^6 \text{ m}^3$, por lo que dicha boca es netamente "importadora" de agua y con dominancia al flujo.

Por otro lado, en la misma Figura 4. 1 se muestra la variación en la elevación de superficie libre del agua en la Boca de Sabancuy. En esta figura se observa una distorsión en la señal de marea, principalmente después de que se presenta la máxima velocidad en reflujos y hasta la máxima velocidad de flujo (de la hora 10 a la 21). La pleamar máxima registrada es de 0.052 m y se presenta al mismo tiempo que la máxima velocidad de flujo (hora 21), la Bajamar mínima es de 0.069 m.

Tal como se nota en la Figura 4. 1 existe una modificación en el comportamiento de la elevación de superficie libre, la cual se debe fundamentalmente a la capacidad de respuesta que presenta el canal de comunicación entre el Estero de Sabancuy y el océano. Por esta situación, es necesario recordar que la Boca de Sabancuy es un canal artificial, el cual fue abierto con el objeto de mejorar las actividades económicas de la región (pesca), por lo que en principio el ancho del canal responde a esta necesidad (canal angosto con 30 metros de ancho y 300 metros de largo aproximadamente). Posteriormente se abordará y se explicará el comportamiento antes mencionado.

4.1.1.2. Boca de Puerto Real.

Las velocidades en la boca de Puerto Real son menores a las reportadas en la boca de Sabancuy. Para la condición de flujo, la máxima velocidad reportada es de $0.56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que la máxima velocidad de reflujos es $0.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4. 2). Los volúmenes netos de flujo y reflujos son de $2.72\cdot 10^9 \text{ m}^3$ y $2.27\cdot 10^9 \text{ m}^3$ respectivamente con una duración de 11.7 horas el flujo y 12.3 horas el reflujos. De los datos antes mencionados se puede decir que en la Boca de Puerto Real existe un predominio al flujo ya que con menores tiempos de permanencia y magnitudes de velocidad el volumen de entrada es mayor que el de salida.

En la variación de superficie libre del agua de la Boca de Puerto Real, mostrada en la Figura 4. 2, no se aprecia una distorsión como ocurre en el caso de la señal en la Boca de Sabancuy, sin embargo si se presenta una desviación en la pendiente de la curva a partir de las 12 horas de registro, es importante mencionar que esta situación se da justo en el momento en que en la Boca del Carmen se tiene un cambio de régimen (reflujos a flujo), condición que pone en evidencia la dependencia que ostenta esta boca con respecto a la del Carmen. De esta misma figura se tiene que la pleamar máxima corresponde al valor de 0.175 m y la bajamar mínima es de 0.156 m.

4.1.1.3. Boca del Carmen.

En la Figura 4. 3 se aprecia que el orden de corrientes en la boca del Carmen es de $0.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ tanto en flujo como en reflujos. De igual forma, tanto la pleamar y bajamar máxima y mínima son de 0.21 m. A pesar de este comportamiento en el prisma de marea si se presenta una diferencia de 6% entre los volúmenes de entrada y salida, registrando

$2.65 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ de entrada y $2.81 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ de salida, adicionalmente en el tiempo de permanencia de éstos fue de 11.6 horas en flujo y 12.4 horas en reflujo.

Esta situación refleja que el patrón de corrientes en la Boca del Carmen tiene la misma tendencia tanto en flujo como reflujo, lo que confirma que es esta boca la que rige en gran parte el patrón hidrodinámico y la interacción con la Boca de Puerto Real y en consecuencia de Sabancuy. A pesar del comportamiento antes mencionado, el régimen dominante en la Boca del Carmen es el reflujo, como se observa de los resultados obtenidos del prisma de marea, por lo que dicha boca es "exportadora" de agua con dominancia al reflujo.

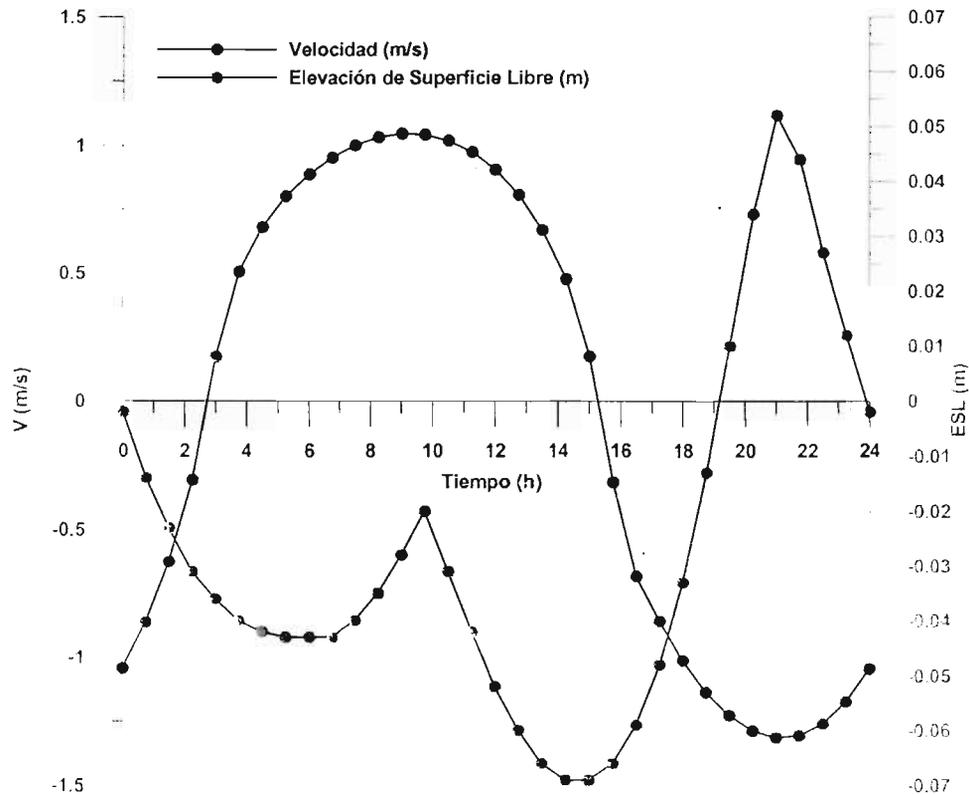


Figura 4. 1 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para un ciclo de marea, Caso 1.

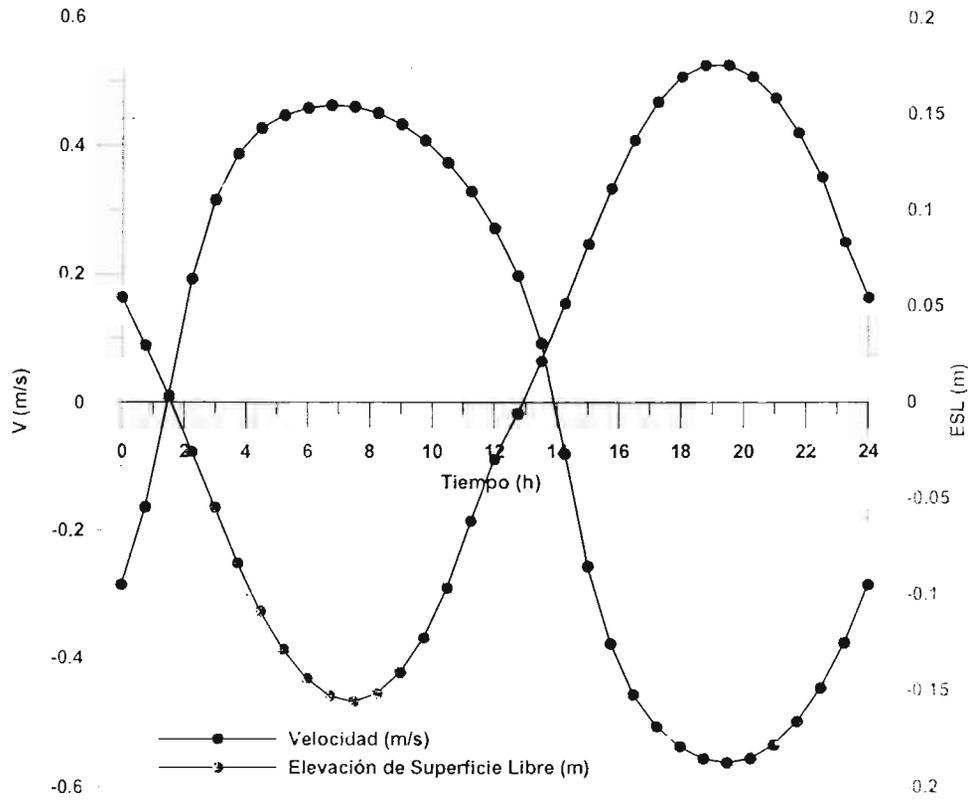


Figura 4. 2 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para un ciclo de marea, Caso 1.

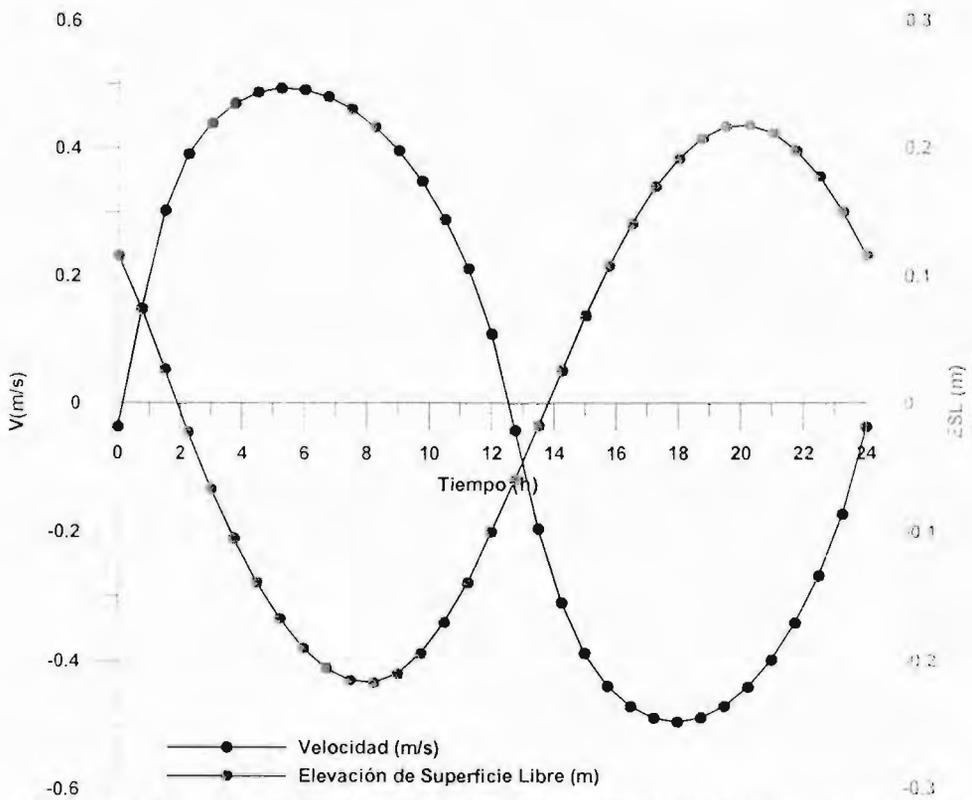


Figura 4. 3 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para un ciclo de marea, Caso 1.

4.1.2. Variación de la señal de marea, Caso 1

La Figura 4. 4 presenta las señales de marea en las bocas oceánicas. En esta figura se observa que la mayor modificación en la elevación de superficie libre se da en la Boca de Sabancuy, así como un cambio notable en la pendiente en la señal de la Boca de Puerto Real.

Con la finalidad de comprender e identificar la transformación que muestran las señales de marea, a continuación se presenta un análisis de la variación en la elevación de superficie libre y velocidades de corriente en las bocas oceánicas, el cuerpo principal de la laguna y el estero de Sabancuy. Los vectores de corriente mostrados en las figuras únicamente representan la dirección del flujo y no la escala del mismo, debido a la constante variación de la magnitud y dirección en la malla de cálculo, por lo que en el sistema modelado no se apreciarían los vectores de velocidad, aparentando zonas sin movimiento de flujo, donde si las hay, ya que las magnitudes en el cuerpo principal oscilan entre el 5 y 10% del valor de velocidad en las bocas.

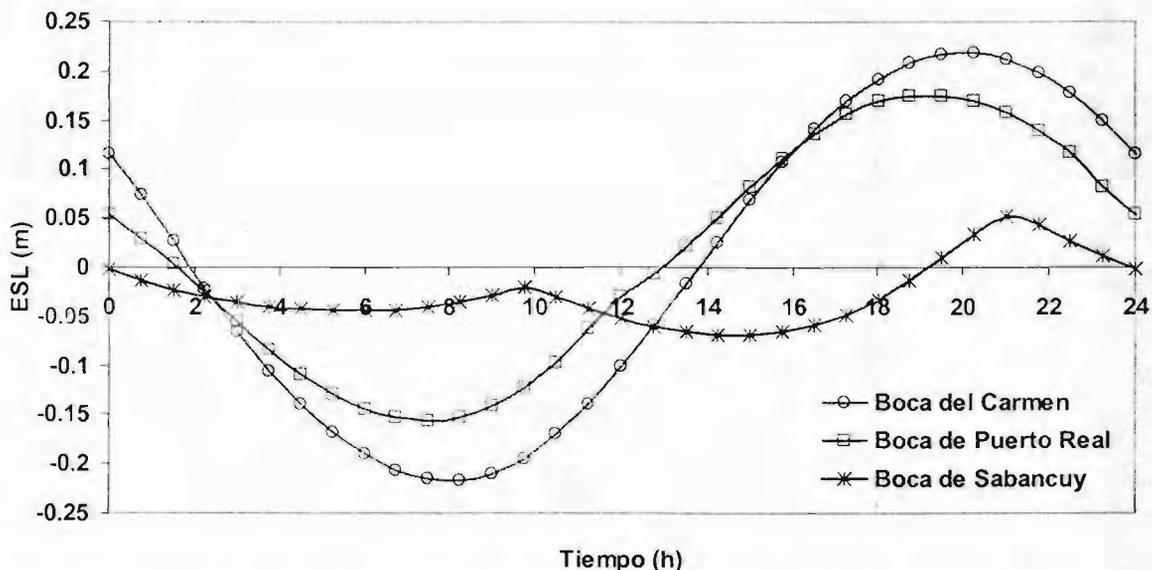


Figura 4. 4 Variación de la elevación de superficie libre en las Bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy.

En lo que concierne al estudio de la hidrodinámica general de la laguna, en la Figura 4. 5 se presenta la condición de marea saliente en las tres bocas. En esta figura se observa que el prisma de marea de Puerto Real es de mucho mayor importancia que el prisma de Carmen. Con respecto al estero y Boca de Sabancuy se muestra la formación de una divergencia entre los prismas de Puerto Real y Sabancuy, tal como se observa en la Figura 4. 11.

Después de tres horas, las señales de marea continúan en la fase de saliente, pero el volumen desalojado por la Boca del Carmen para este tiempo es mayor que el que expulsa Puerto Real, por lo que el prisma de marea de Carmen confina y disminuye el dominio del prisma generado por Puerto Real, como se muestra en la Figura 4. 6. La

divergencia generada entre los prismas de marea al interior del Estero de Sabancuy persiste (Figura 4. 12)

Hasta la hora 10.5 (Figura 4. 7) el dominio del prisma de marea de Carmen permanece, sin embargo el nivel en el cuerpo principal de la Laguna baja mientras que el volumen de salida en Puerto Real y Carmen aumenta. El cambio de régimen en Sabancuy se da porque la divergencia entre los prismas de marea (Puerto Real-Sabancuy) desaparece al dominar el prisma de Puerto Real sobre el estero y la boca de Sabancuy (Figura 4. 16).

Los resultados del modelo sugieren que el reflujo de Carmen es tal que su influencia, desde el punto de vista hidrodinámico, induce a que Puerto Real experimente un régimen de flujo para compensar la extracción de agua por Carmen (Figura 4. 8). Tres horas después tanto Carmen como Puerto Real y Sabancuy se encuentra en la fase de entrante. Al interior del cuerpo principal de la laguna y en la parte Oeste del Estero de Sabancuy se genera una convergencia entre uno y otro prisma de marea (Carmen-Puerto Real y Puerto Real-Sabancuy respectivamente).

Para la hora 20.25 (Figura 4. 10) en la Boca del Carmen se tiene la condición de pleamar máxima además de observarse la mayor área de perturbación en el cuerpo principal adjudicadle a la variación del flujo en dicha boca.

De este modo se tiene que las modificaciones en el patrón hidrodinámico de Puerto Real están ligadas directamente al patrón de Carmen. Con respecto a la Boca de Sabancuy, a pesar de que en menor medida que Puerto Real responde a las variaciones de la Boca del Carmen, se encuentra gobernada por otros factores, tal como a continuación se mencionará.

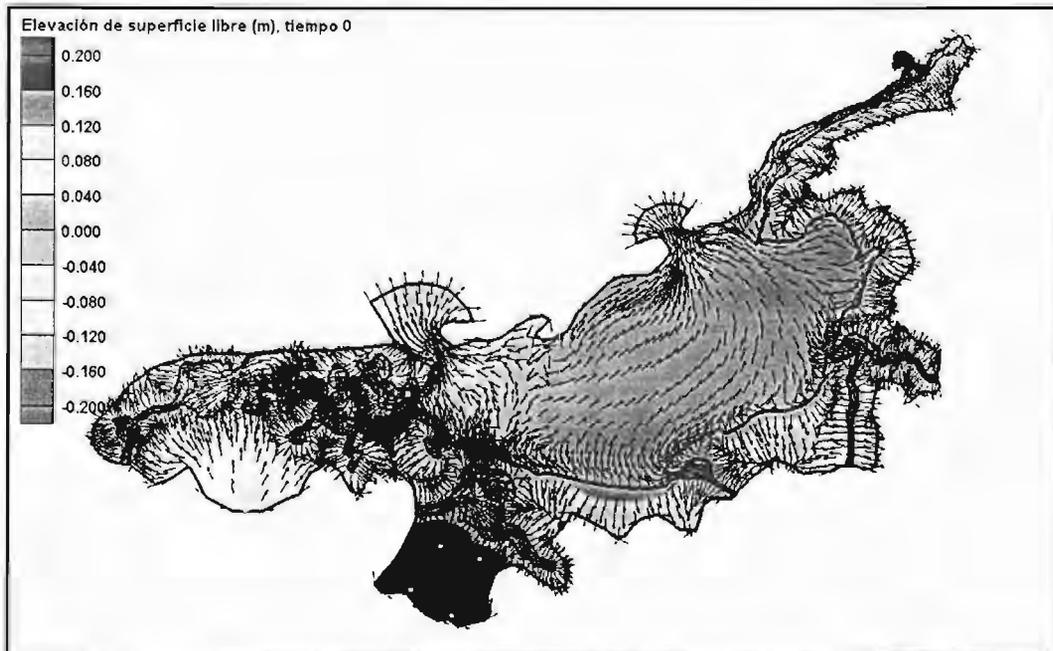


Figura 4. 5 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos, para el caso1, hora 0.

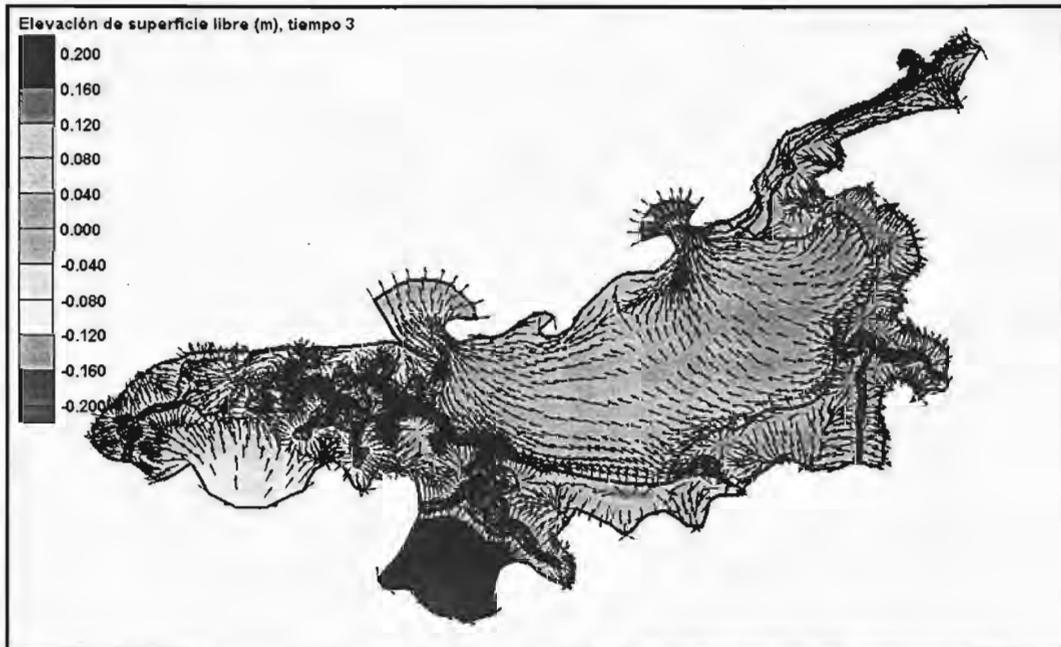


Figura 4. 6 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 3.

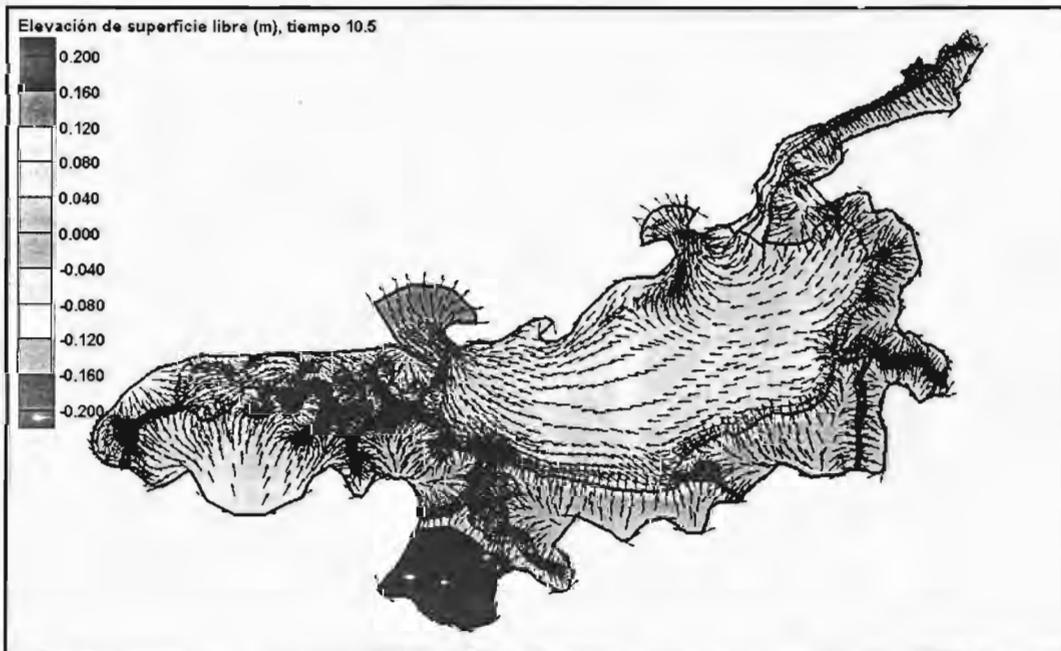


Figura 4. 7 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 10.5

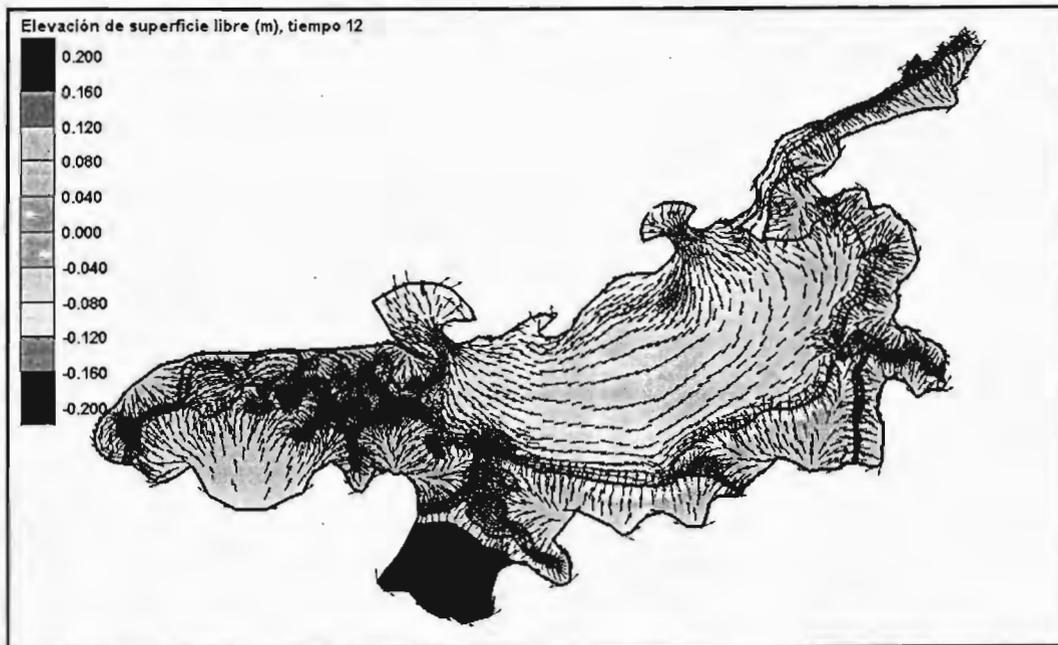


Figura 4. 8 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 12.

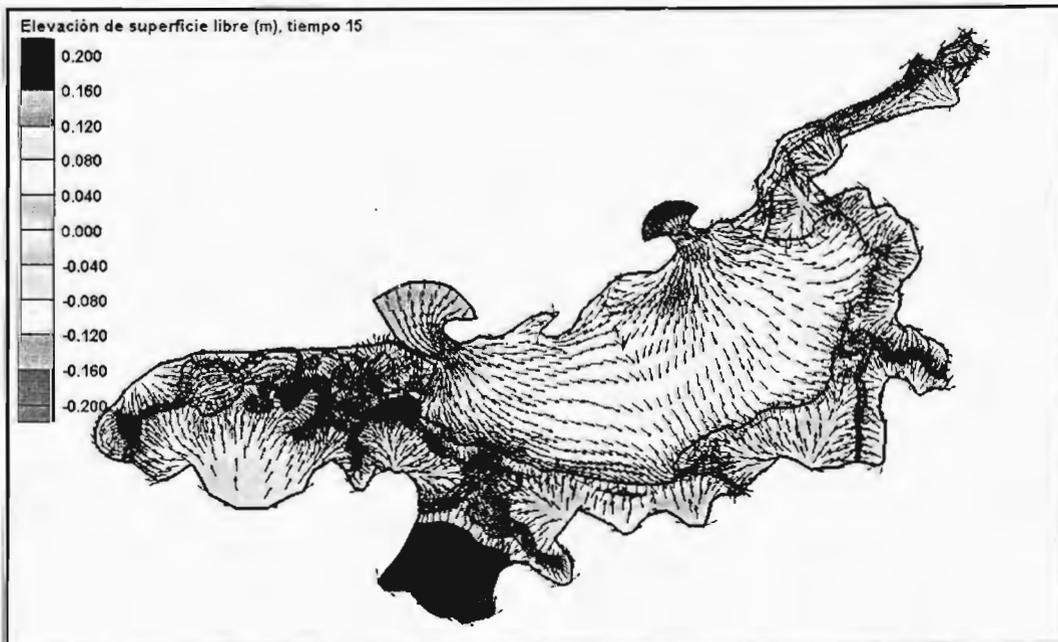


Figura 4. 9 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 15.

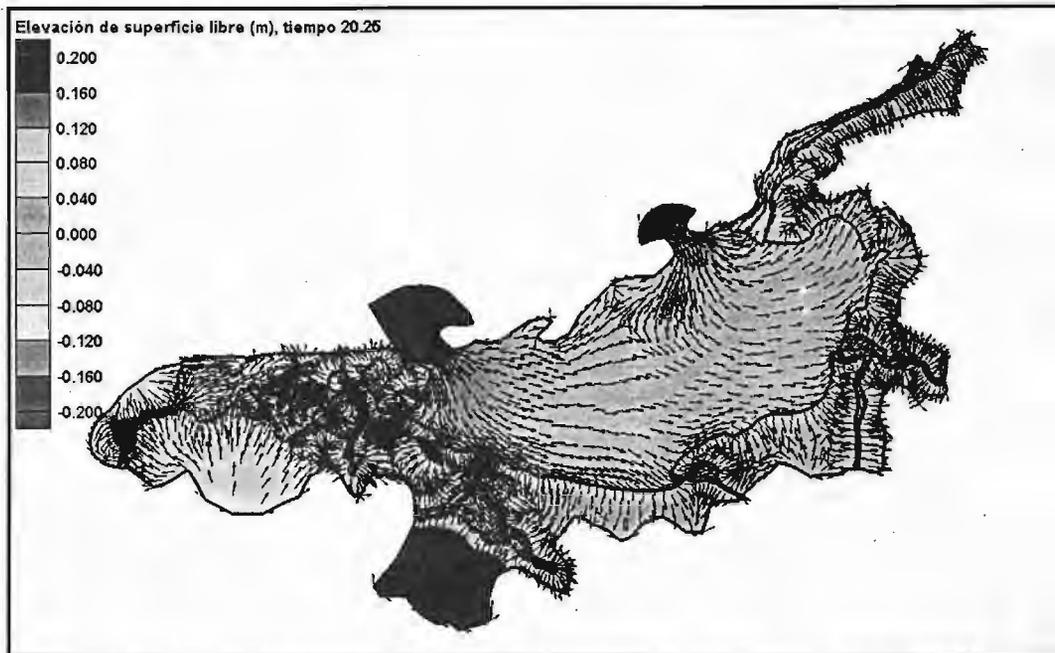


Figura 4. 10 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 1, hora 20.25.

Con respecto a la modificación de la superficie libre en la Boca de Sabancuy se presentan dos procesos que generan esta deformación de la señal (Figura 4. 4). El primero, como se mencionó, es la interacción entre los prismas de marea de las bocas de Puerto Real y Sabancuy (Morán, 2003), el segundo proceso está ligado al tipo de flujo que se presenta en la Boca o canal artificial de Sabancuy (flujo no permanente variado espacialmente).

Con relación al primer proceso, la hidrodinámica del estero se rige principalmente por el patrón de corrientes en la boca de Puerto Real, situación que alcanza a modificar el patrón de corrientes en la propia boca de Sabancuy, tal como se puede observar en la serie de figuras que a continuación se muestran (Figura 4. 11 a la Figura 4. 22).

Para el tiempo en el que ambas bocas están exportando agua, en la parte Oeste del estero se forma una divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy (Figura 4. 11), misma que se va recorriendo hacia el Este, tal como se aprecia en la Figura 4. 12, Figura 4. 13, Figura 4. 14 y Figura 4. 15, hasta desvanecerse cerca de la boca de Sabancuy. La divergencia entre los prismas de marea desaparece al llegar a la boca de Sabancuy porque la influencia del prisma de marea de Puerto Real domina al prisma de marea de Sabancuy ocasionando un cambio de régimen en esta boca (Figura 4. 16). A partir de este momento, la Boca de Sabancuy comienza a importar agua al sistema y la Boca de Puerto Real continúa sacando.

Al momento que Puerto Real cambia de régimen y comienza a importar agua (Figura 4. 17), con lo que ambas bocas están metiendo agua al estero, este comportamiento favorece la formación de una convergencia entre los prismas de marea, situación que se aprecia en la Figura 4. 18, la cual se forma en el mismo punto que la divergencia (al Oeste del estero) y de igual manera recorre el estero de Oeste a Este (Figura 4. 19, Figura 4. 20 y Figura 4. 21) hasta desaparecer en la boca de Sabancuy cambiando nuevamente la

dirección en el patrón de corrientes de la misma (Figura 4. 22). Con este comportamiento se ratifica el dominio que muestra la boca de Puerto Real sobre el estero y boca de Sabancuy, al observar que básicamente la convergencia/divergencia de los prismas de marea está gobernada por la hidrodinámica de dicha boca, además de tener la suficiente influencia como para dominar el propio patrón de corrientes en la boca de Sabancuy, la cual se encuentra aproximadamente a 43 km de distancia.

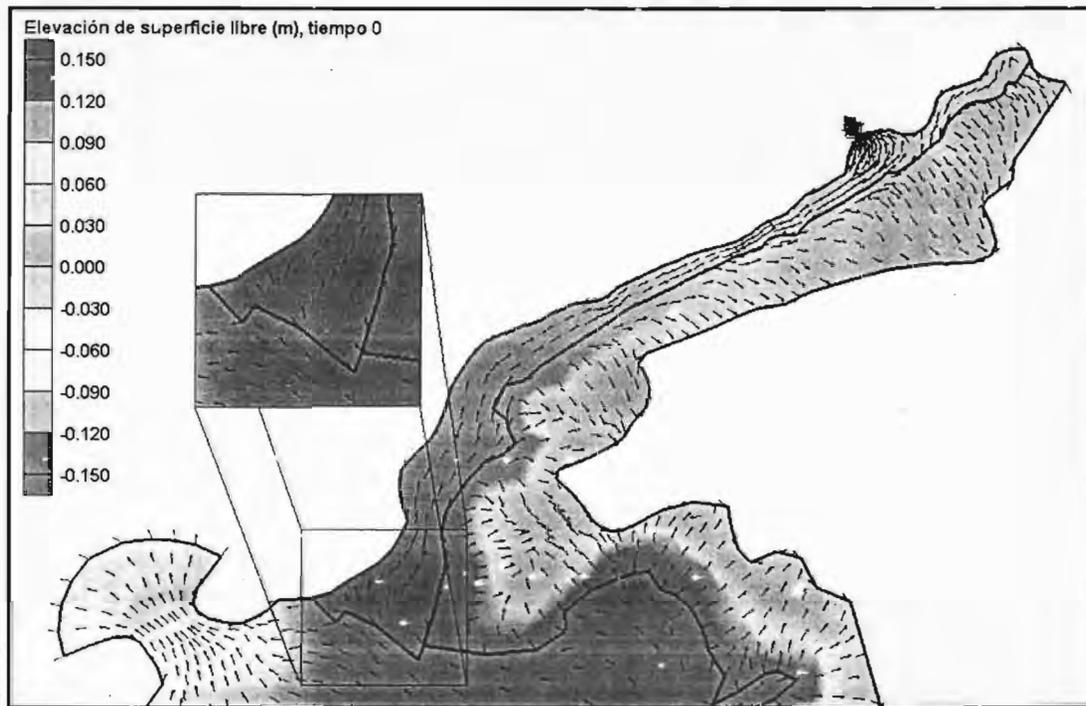


Figura 4. 11 Formación de la divergencia de los prismas de marea al oeste del Estero de Sabancuy, hora 0, Caso 1.

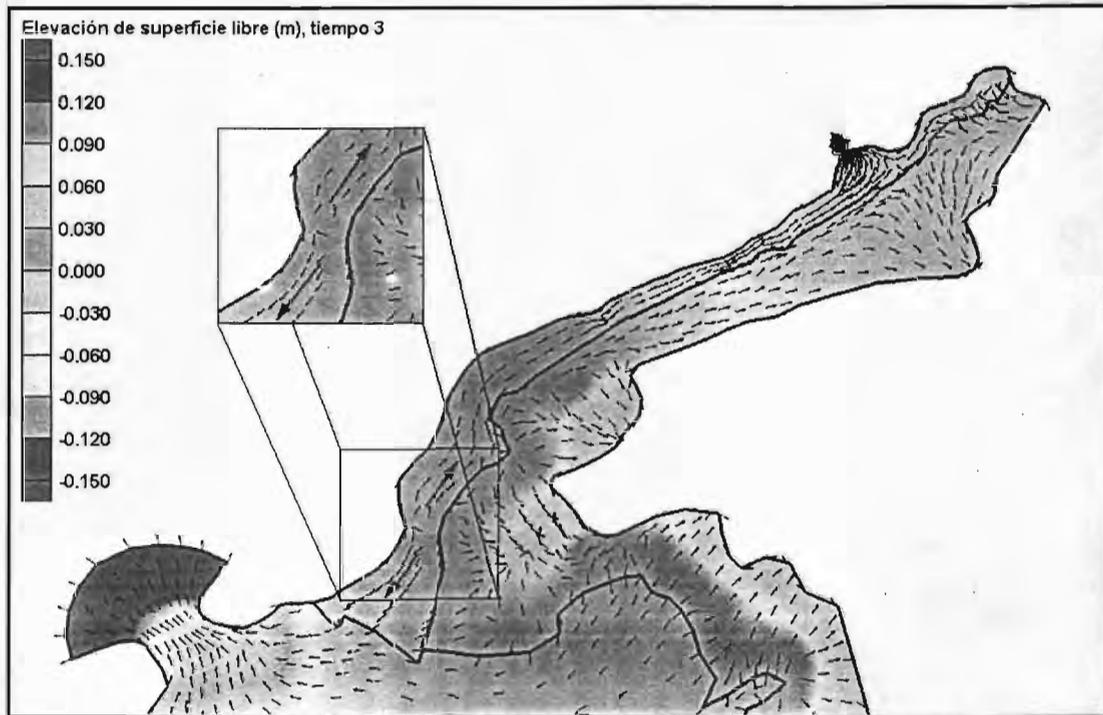


Figura 4. 12 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea cerca de la entrada oeste del Estero de Sabancuy, hora 3, Caso 1.

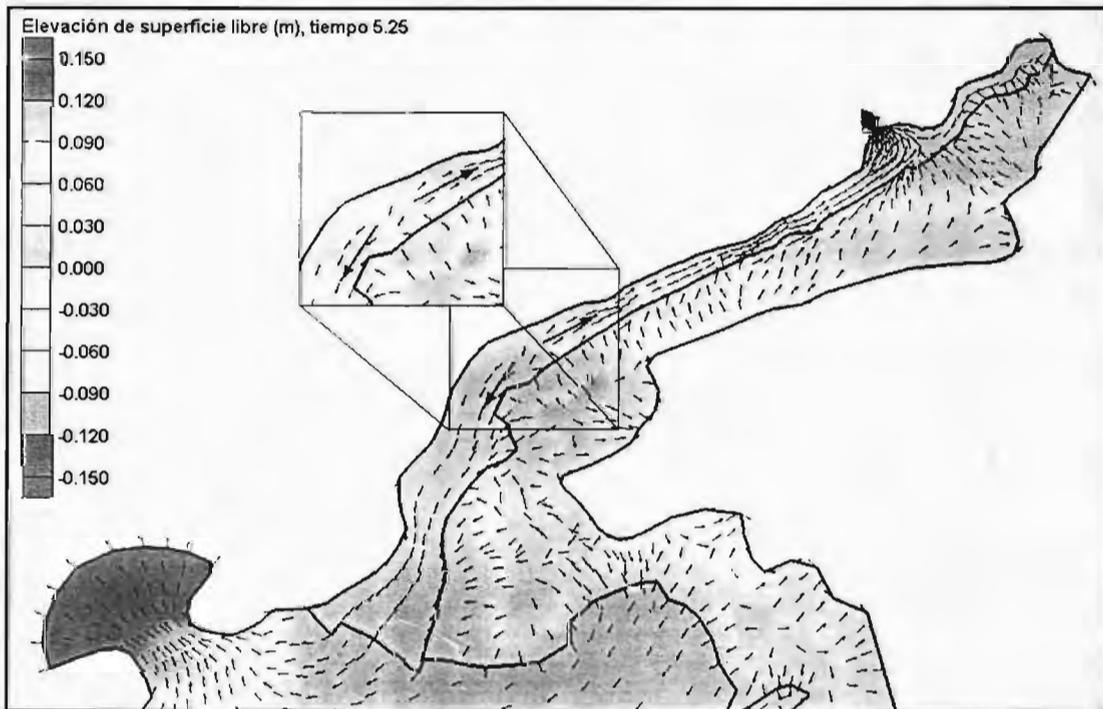


Figura 4. 13 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea, localizada cerca de la parte media del estero, hora 5.25, Caso1.

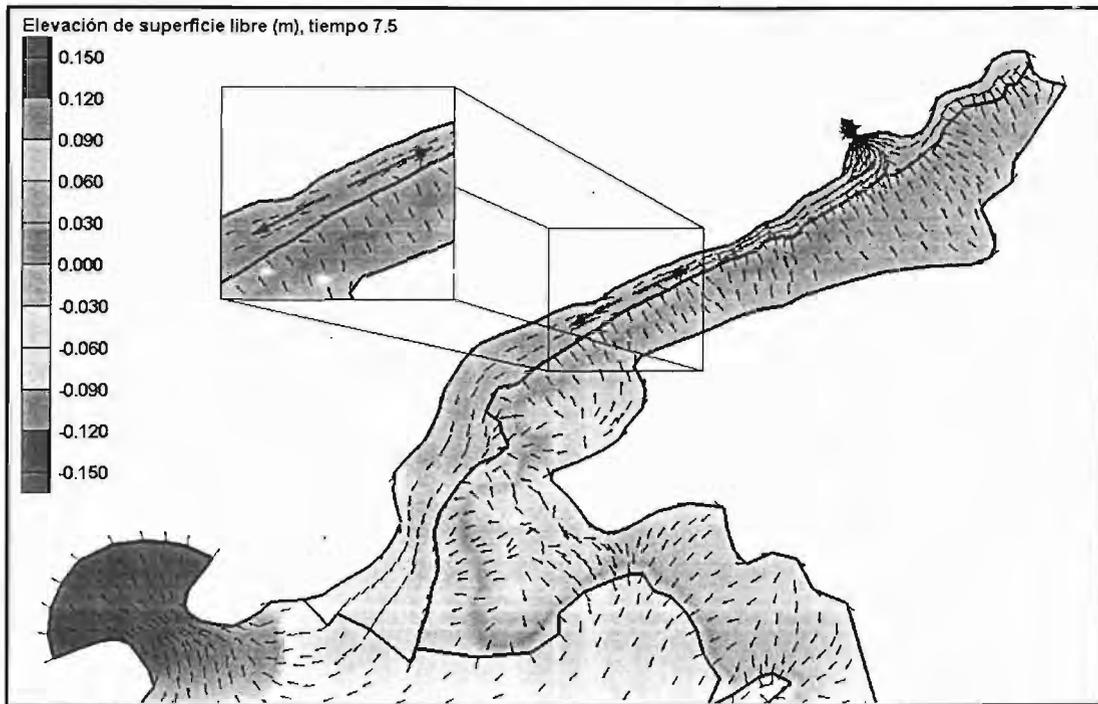


Figura 4. 14 Desplazamiento de la divergencia generada entre los prismas de marea localizada en la parte media del Estero de Sabancuy, hora 7.5, Caso 1.

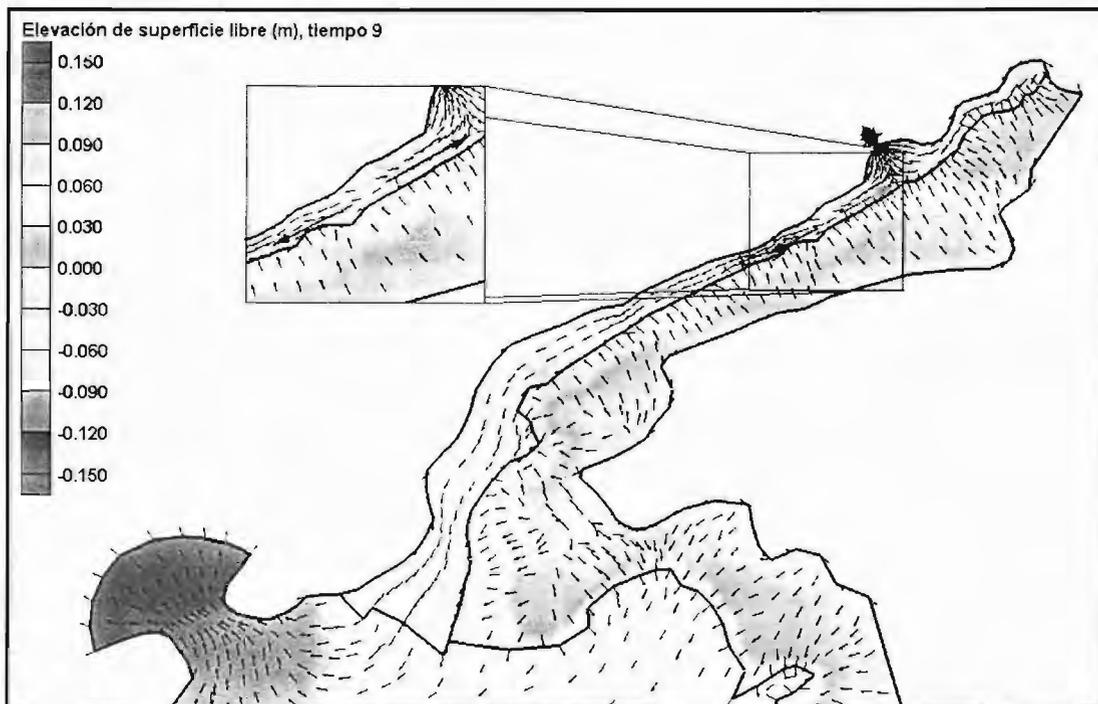


Figura 4. 15 Desplazamiento de la divergencia entre los prismas de marea, localizada en la parte Este del Estero de Sabancuy, hora 9, caso1.

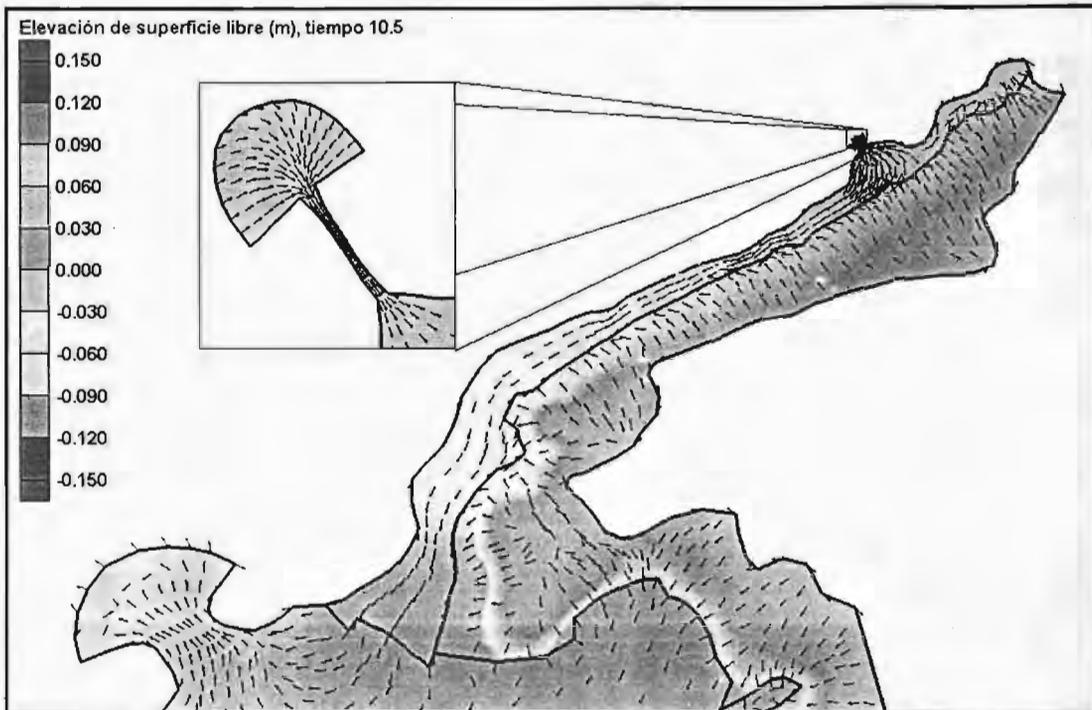


Figura 4. 16 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy (reflujo a flujo) y desvanecimiento de la divergencia entre los prismas de marea, hora 10.5, caso 1.

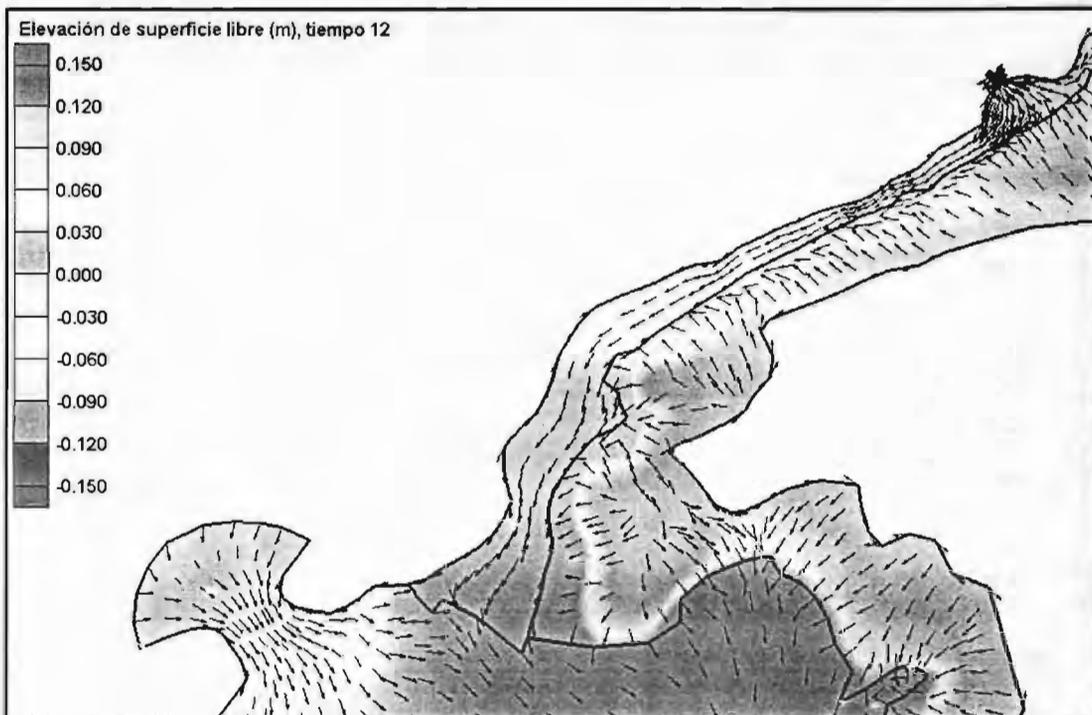


Figura 4. 17 Cambio de régimen en la Boca de Puerto Real (reflujo a flujo), hora 12, Caso 1.

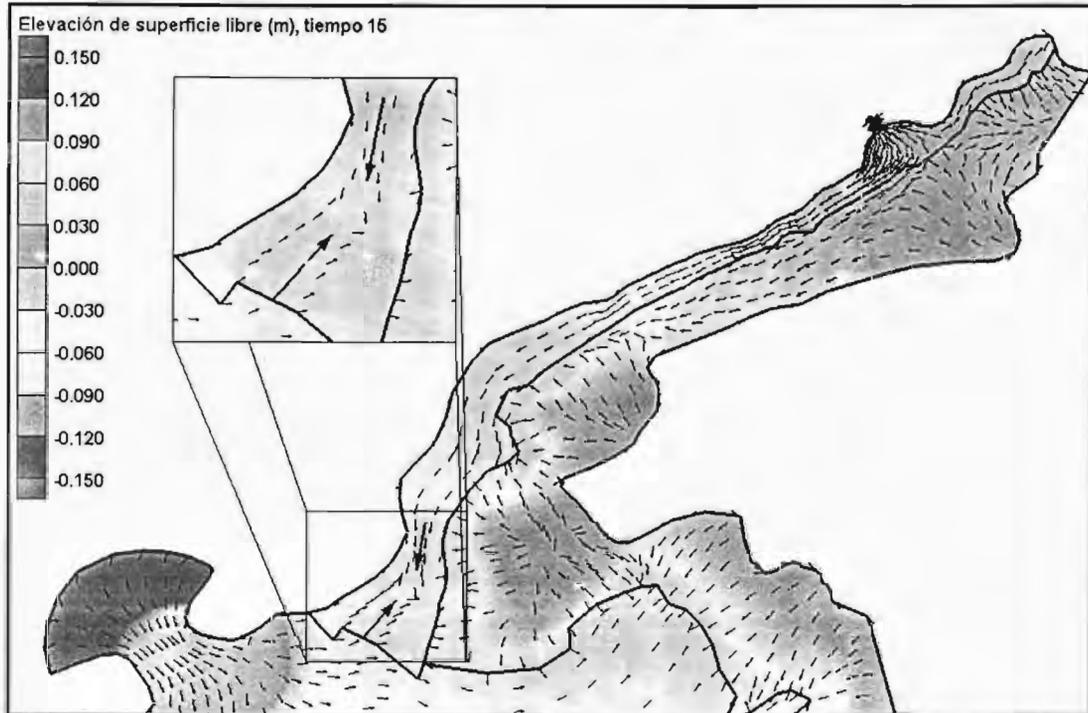


Figura 4. 13 Formación de la convergencia entre los prismas de marea localizado al Oeste del Estero de Sabancuy, hora 15, caso 1.

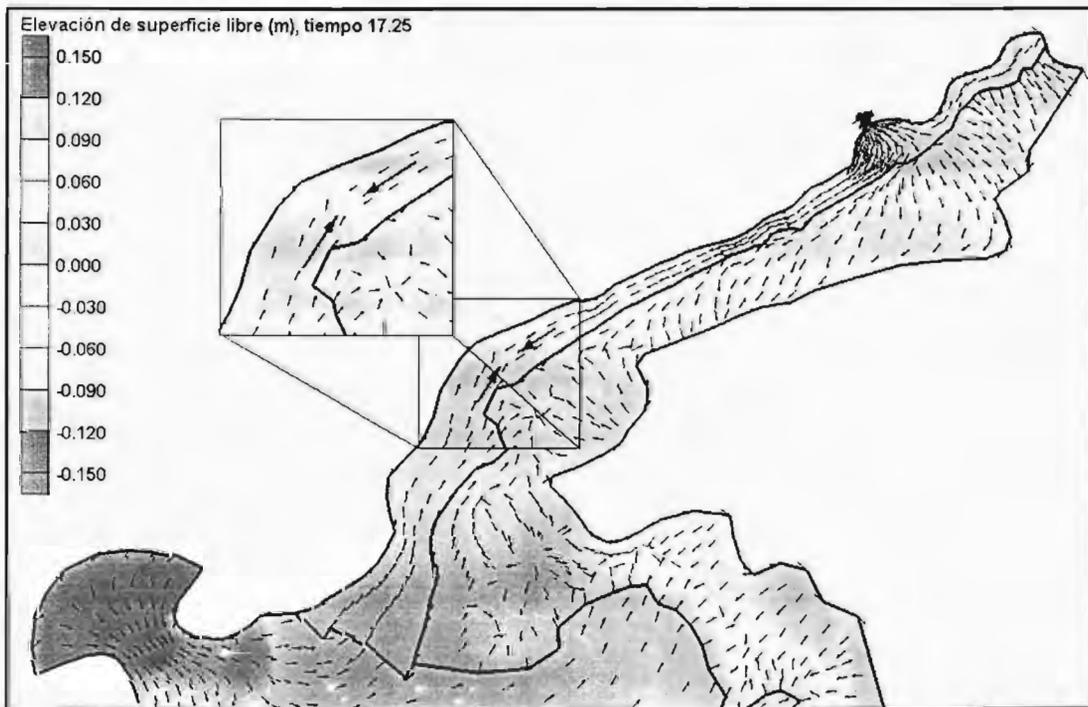


Figura 4. 19 Desplazamiento de la convergencia entre los prismas de marea, localizada cerca de la parte media del Estero de Sabancuy, hora 17.25, caso 1.

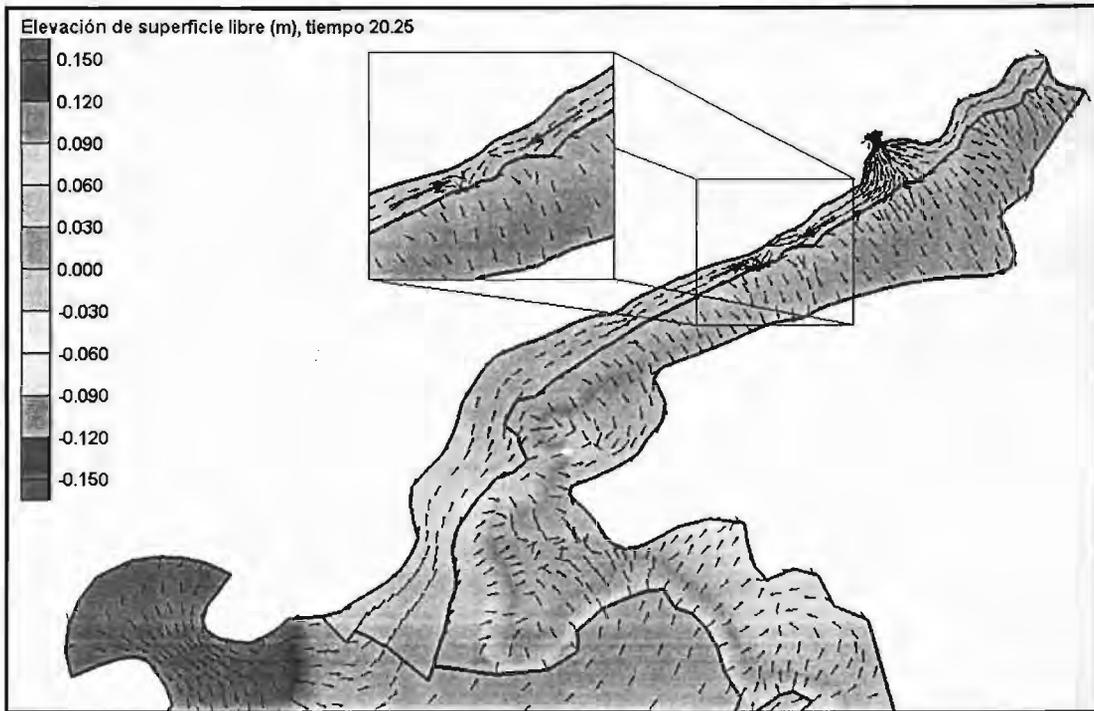


Figura 4. 20 Desplazamiento de la convergencia generada entre los prismas de marea, localizada en la parte Este del Estero de Sabancuy, hora 20.25, caso 1.

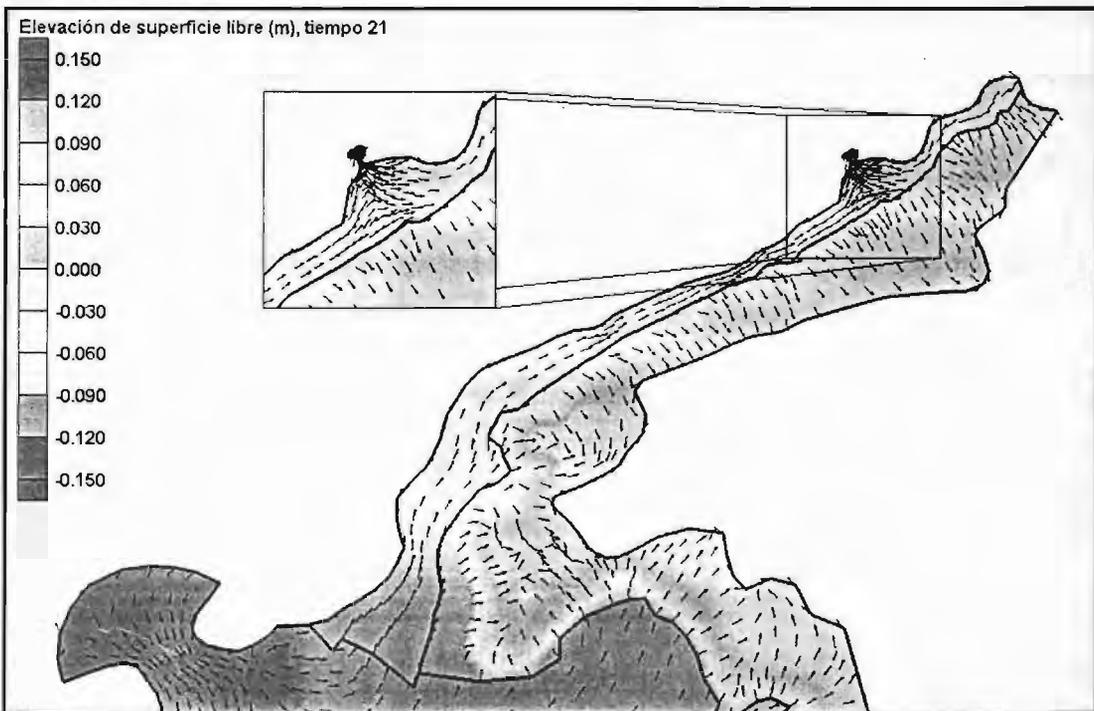


Figura 4. 21 Desplazamiento de la convergencia generada entre los prismas de marea localizada cerca de la Boca de Sabancuy, hora 21, caso 1.

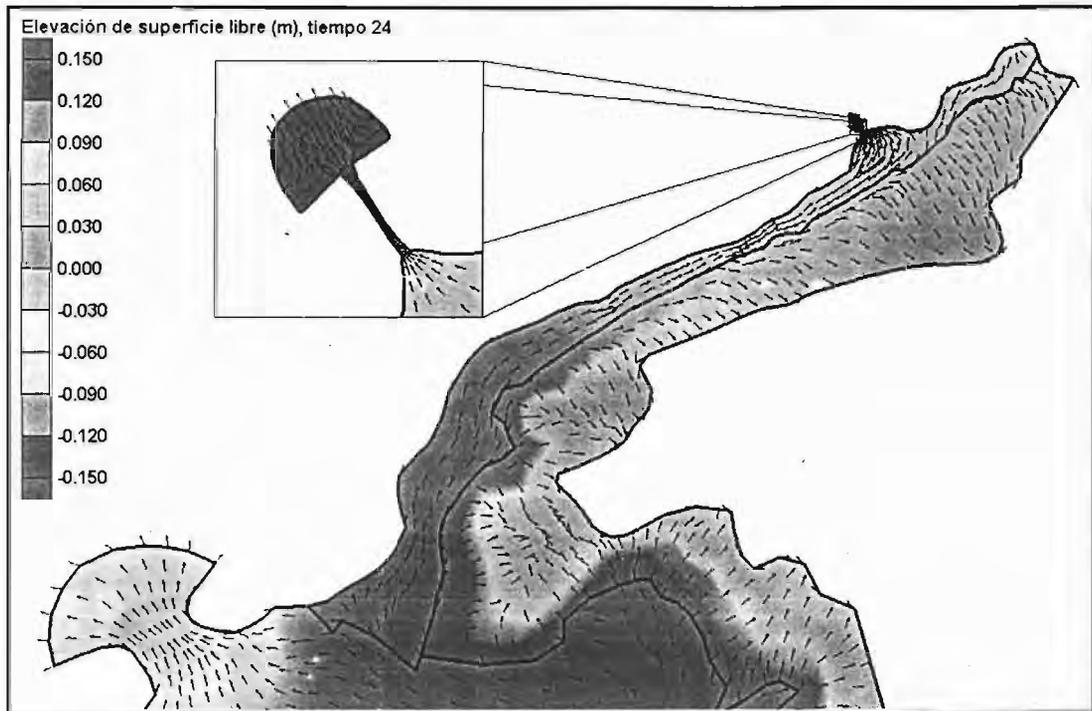


Figura 4. 22 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy (flujo a refluj) causada por la influencia del prisma de marea de Puerto Real sobre el de Sabancuy, hora 24, caso 1.

El segundo factor que favorece la modificación en la elevación de superficie libre es el comportamiento hidrodinámico del canal artificial (Boca de Sabancuy). El comportamiento del flujo en esta sección se ve afectado por las condiciones hidrodinámicas en las fronteras del mismo (océano, estero) debido al drástico cambio en las secciones. Para la mejor observación de este proceso, se seleccionaron cinco secciones a lo largo del mismo (Figura 4. 23) y la sección propuesta en el capítulo anterior (Figura 3.13), denominada Boca de Sabancuy. En cada sección se observó, de los resultados del modelo, el comportamiento de parámetros como velocidad, gasto y elevación de superficie libre para el mismo ciclo de marea analizado en la Figura 4. 1.

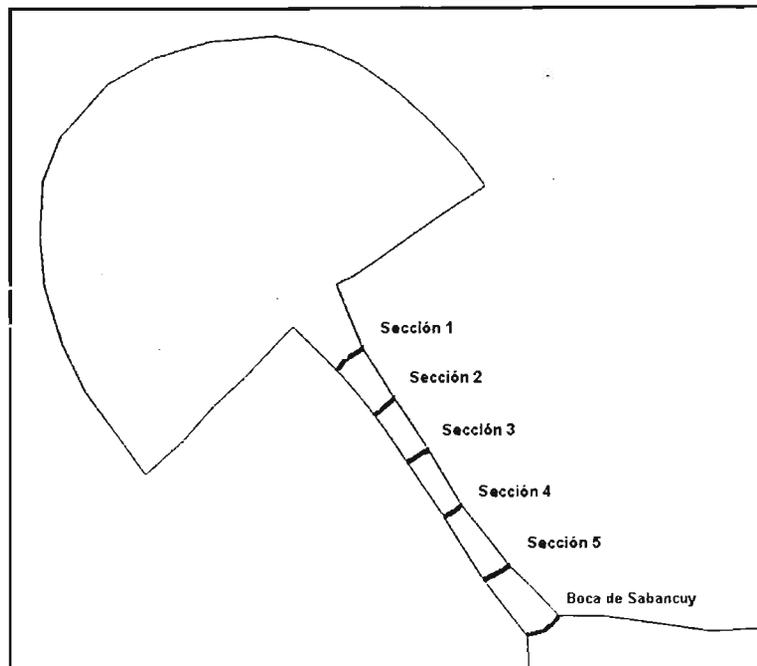


Figura 4. 23 Secciones de control en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy con el océano.

Analizando la Figura 4. 25, para las condiciones de flujo y refluo se aprecia que existe variación en el gasío que pasa a través de las secciones alojadas en el canal de comunicación. Mientras que las primeras cuatro secciones transportan un gasto máximo de salida muy similar (aproximadamente $240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), el gasto máximo de salida en la sección 5 y en la boca de Sabancuy es menor (160 y $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente) al que está pasando por las secciones anteriores. Cuando se presenta la condición de flujo, los gastos máximos de entrada en las secciones observadas sufren una pequeña modificación: el gasto máximo de entrada en la sección 1 es de $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en las secciones 2, 3 y 4 el gasto es de $240 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, en la sección 5 es de $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y en la boca de Sabancuy el gasto de entrada es de $210 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Esta variación en la capacidad de transporte en las distintas secciones se refleja como una modificación de la elevación de la superficie libre del agua, tal como se observa en la Figura 4. 24. En algunas secciones, existen momentos para los cuales el gasto de entrada y de salida no es suficiente para que alcance a cubrir el gasto demandado por la interacción de los sistemas (estero - océano). Finalmente, este comportamiento refleja la existencia de un déficit en la capacidad de respuesta hidrodinámica del canal artificial con respecto a la interacción entre los volúmenes de flujo del mar y el Estero.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

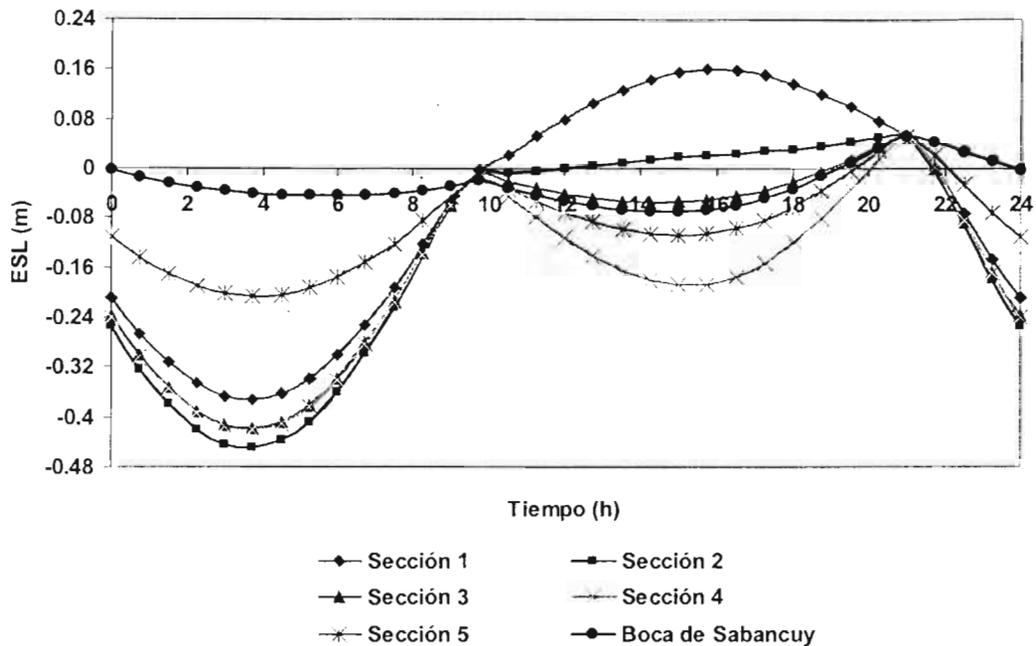


Figura 4. 24 Variación en la elevación de superficie libre en las secciones de control alojadas en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy (Figura 4. 23)

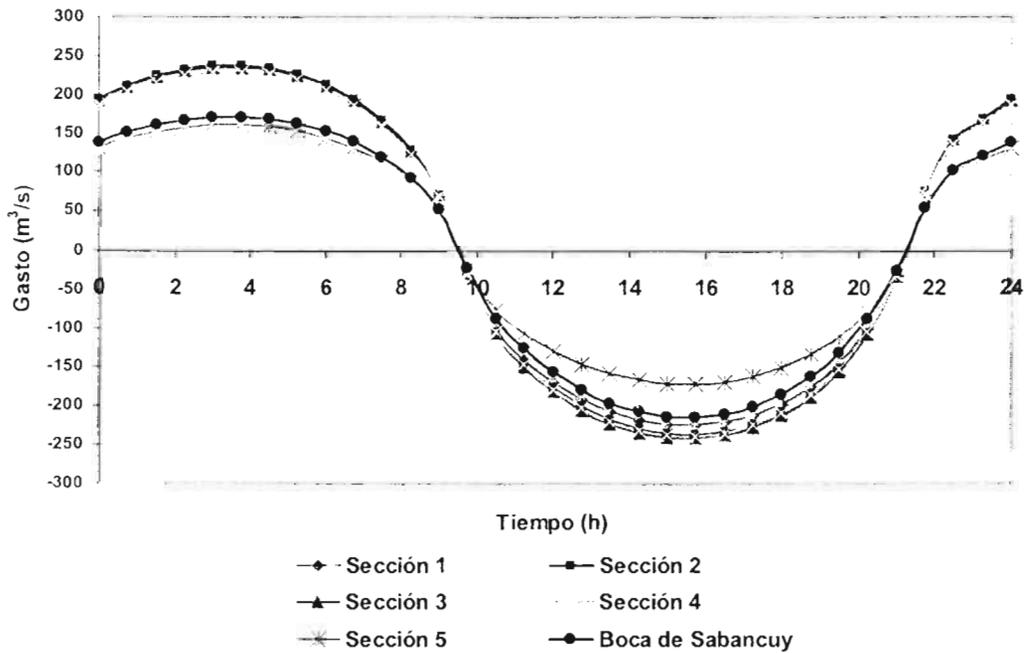


Figura 4. 25 Gasto que pasa a través de las secciones de control alojadas en el canal de comunicación de la Boca de Sabancuy.

4.2. CASO 2. Marea reconstituida con los efectos de la distorsión

Como segundo caso de estudio, la marea es una señal reconstituida la cual exhibe una distorsión tanto en amplitud como en la fase en cada boca, además de considerarse el gasto de los ríos para las condiciones de estiaje. Al igual que para el caso anterior el análisis mostrado es para un ciclo de marea de 24 horas, el cual va de la hora 704.25 a la 728.25 de la simulación. La intención de realizar esta simulación es la de observar la modificación en el comportamiento hidrodinámico del cuerpo de agua cuando existe un retraso de la señal de marea para cada componente calculada del análisis armónico, tanto en su propagación por el mar, como en su propagación por la laguna, así como por la pérdida de fricción y la transferencia de energía entre componentes.

4.2.1. Velocidades y elevación de superficie libre

4.2.1.1. Boca de Sabancuy.

Al evaluar el prisma de marea en la Boca de Sabancuy, se tiene que el volumen de reflujos es de $1.13 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ contra $1.46 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ en flujo, por lo que nuevamente se muestra la tendencia de esta boca a exportar agua.

Por otro lado la condición de flujo persiste durante aproximadamente 8 horas, con velocidades máximas de $1.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, las 16 horas restantes se mantiene el reflujos con velocidades de $0.76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tal como se observa en la Figura 4. 26. En esta misma figura se muestra la variación en la elevación de superficie libre, en la que al igual que el caso anterior (marea monocromática), se tiene una distorsión de la señal, la que se atribuye en gran parte a la interacción que existe con la boca de Puerto Real, tal como se verá posteriormente.

Del mismo modo que para el caso anterior (marea monocromática), en el Estero de Sabancuy se crea una divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy la cual, en menor escala, contribuye a la distorsión de la señal de marea. El tiempo de permanencia de ésta es de aproximadamente 4.5 horas comenzando en el tiempo $t=0$ horas y desapareciendo en el tiempo $t= 4.5$ horas (Figura 4. 26). A continuación se muestra una serie de seis mapas hidrodinámicos que ilustran el comportamiento antes mencionado en donde se presenta la variación en la elevación de superficie libre del agua y la dirección de los vectores de corriente al interior del Estero de Sabancuy en diferentes tiempos.

En la Figura 4. 27 se observa la variación en la elevación de superficie libre en el estero de Sabancuy, para el tiempo $t=0$ horas de la Figura 4. 26, en donde tanto la Boca de Puerto Real como la de Sabancuy se encuentran exportando agua hacia el océano. En la Figura 4. 28 que corresponde a la hora 1.5, se aprecia la formación de la divergencia entre ambos prismas. En la Figura 4. 29, Figura 4. 30 y Figura 4. 31 se muestra el desplazamiento de la divergencia generada entre uno y otro prisma de marea. Finalmente en la Figura 4. 32 se tiene el cambio en el patrón de corrientes en la boca de Sabancuy.

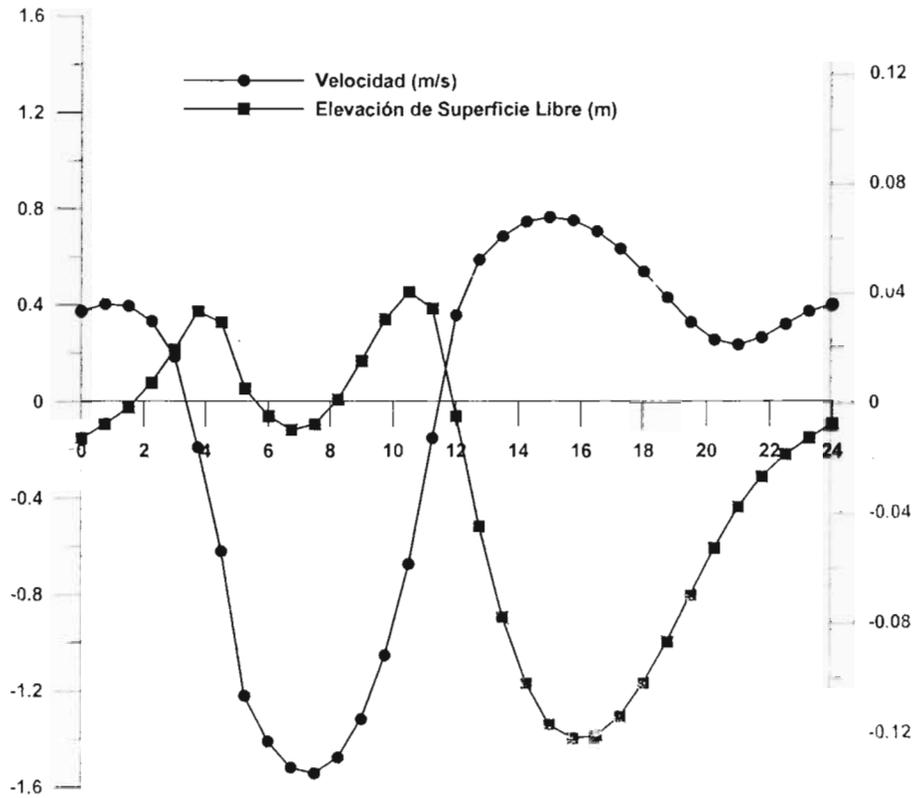


Figura 4. 26 Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para un ciclo de marea, Caso 2.

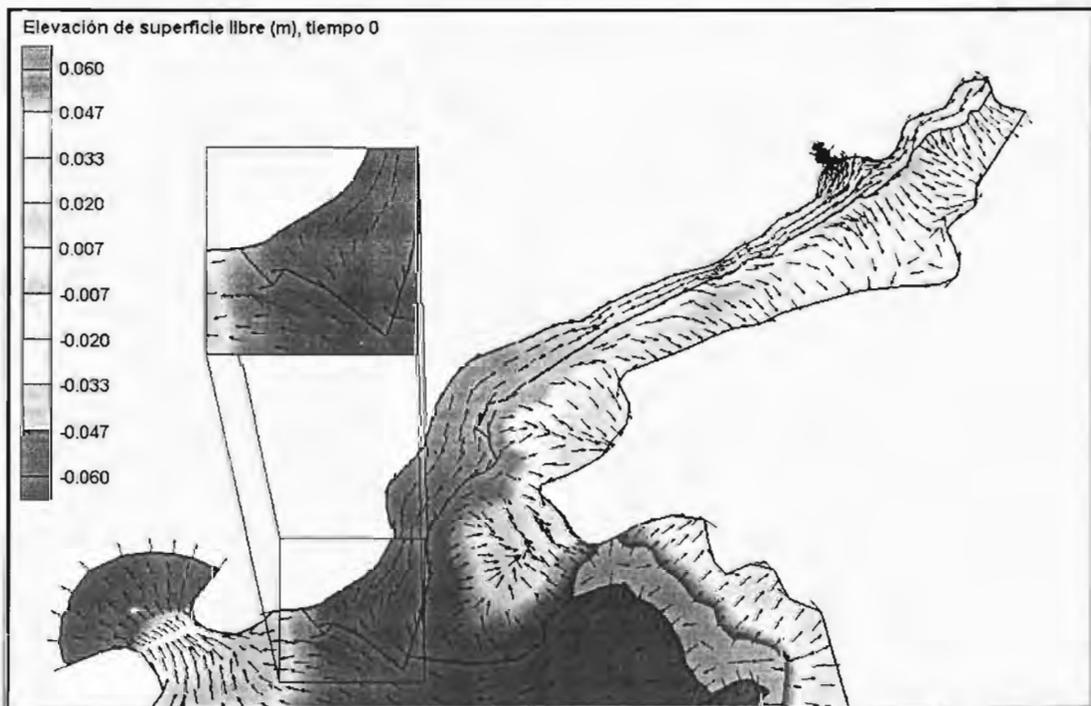


Figura 4. 27 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en el Estero de Sabancuy, hora 0, caso 2.

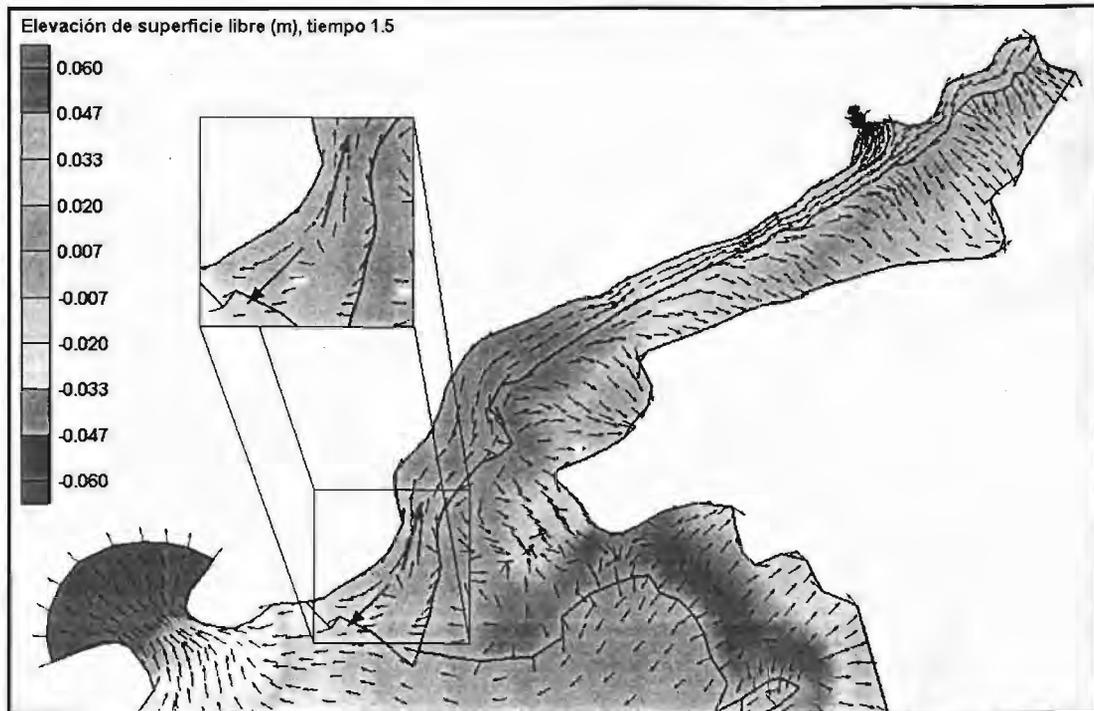


Figura 4. 28 Formación de la divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy al Oeste del Estero de Sabancuy, hora 1.5, caso 2.

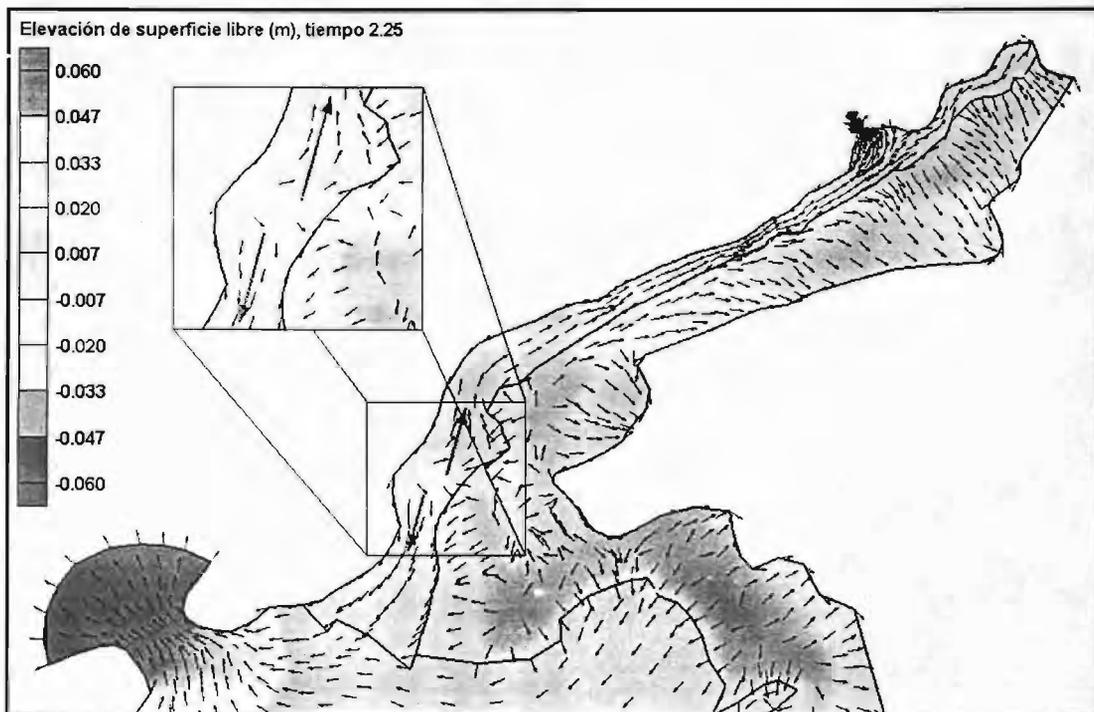


Figura 4. 29 Desplazamiento de la divergencia entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 2.25, caso 2.

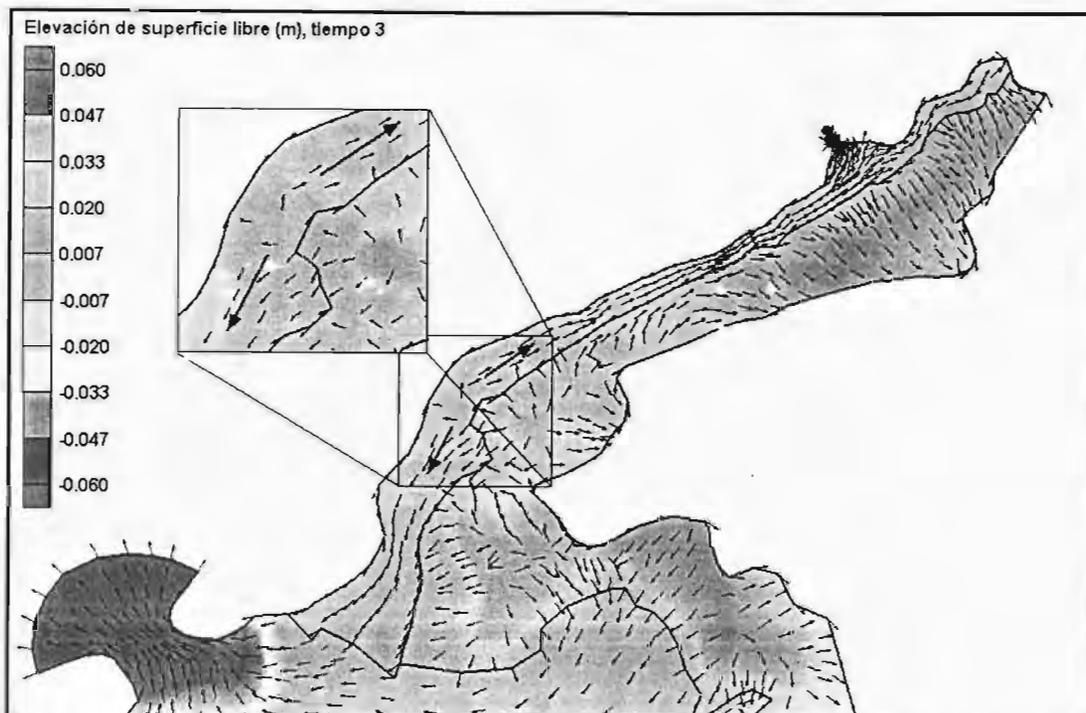


Figura 4. 30 Desplazamiento de la divergencia formada entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy en el Estero de Sabancuy, hora 3, caso 2.

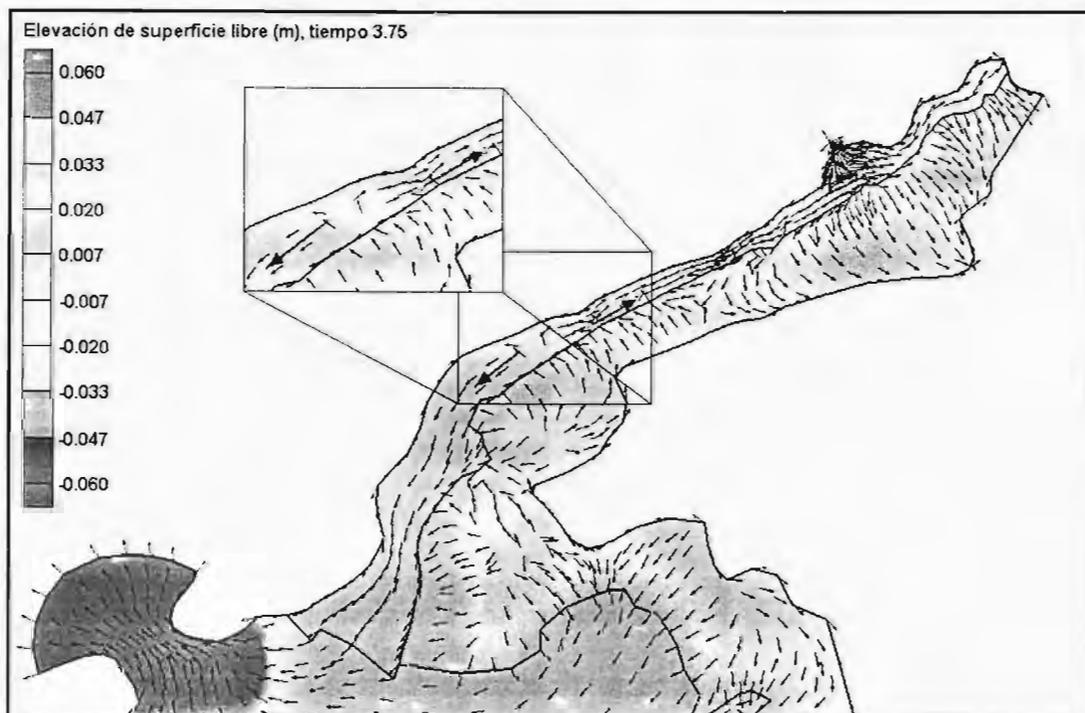


Figura 4. 31 Desplazamiento de la divergencia formada por los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 3.75, caso 2.

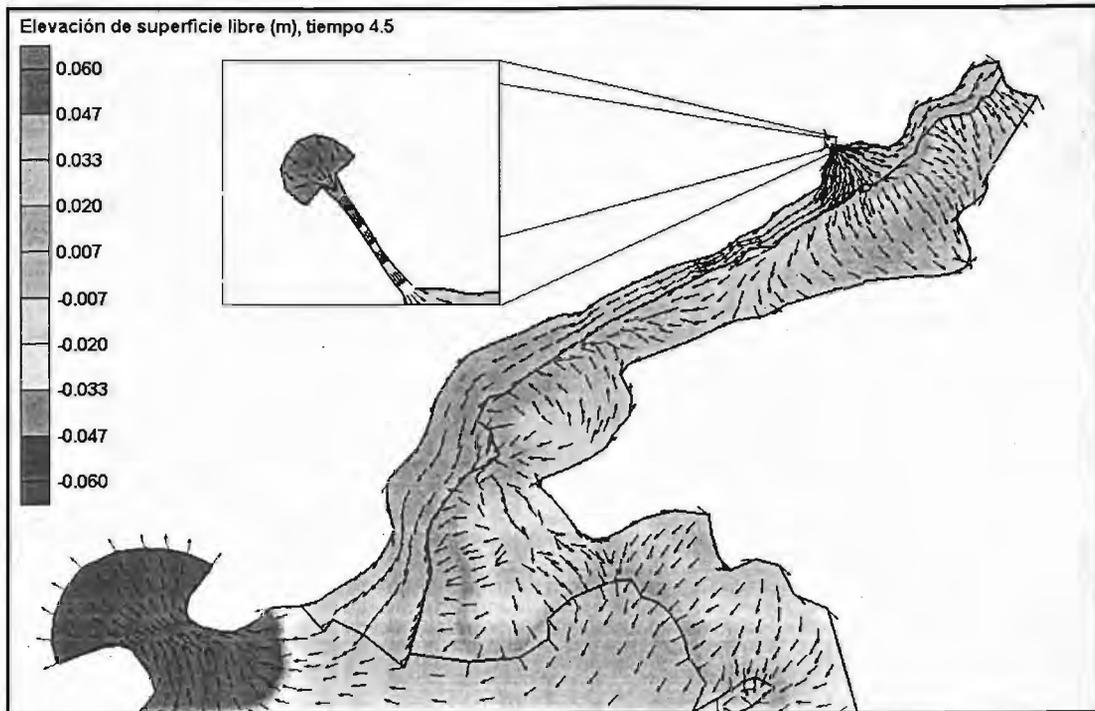


Figura 4. 32 Cambio de régimen en la Boca de Sabancuy y desvanecimiento de la divergencia formada entre los prismas de marea de Puerto Real y Sabancuy, hora 4.5, caso 2

4.2.1.2. Boca de Puerto Real.

Como se vio para el caso 1 (monocromático), el patrón hidrodinámico en la Boca de Puerto Real muestra la tendencia a importar agua. Sin embargo, cuando la señal de la marea cambia (amplitud y fase), dicho patrón se modifica drásticamente en esta boca. Este cambio en el patrón hidrodinámico se puede notar comparando los volúmenes de flujo y refluo extraídos del prisma de marea, $7.30 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ en refluo y $7.22 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ en flujo, por lo que la Boca de Puerto Real manifiesta una disposición al refluo bajo estas condiciones particulares.

En la Figura 4. 33 se exhiben la variación en las velocidades y superficie libre del agua en la Boca de Puerto Real en un ciclo de marea, (24 horas). Las corrientes de entrada en esta boca son del orden de $0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, en tanto que las corrientes de salida son de $0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, por otro lado pese a que las corrientes de flujo son mayores que las de refluo éstas sólo duran 9.5 horas mientras que las de refluo perduran 14.5 horas. En esta situación se estima que aproximadamente el 60% del tiempo la Boca de Puerto Real mantiene una tendencia a expulsar agua, aunque sea a menor velocidad.

La modificación en la superficie libre del agua responde principalmente al comportamiento de la variación de superficie libre del agua en la Boca del Carmen.

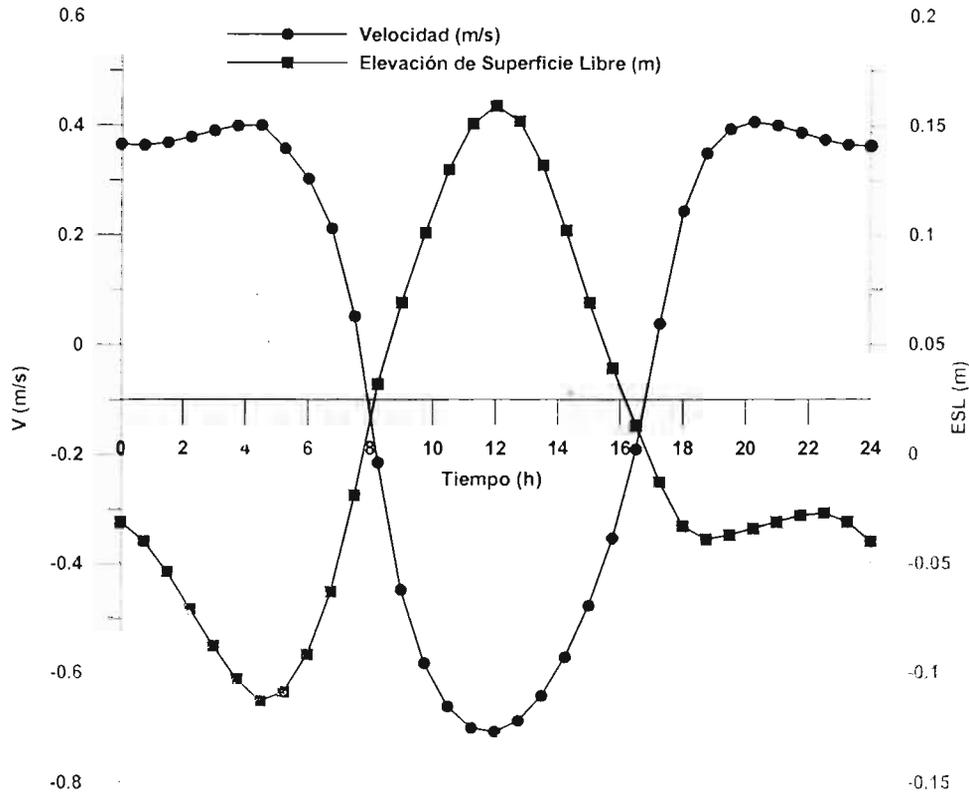


Figura 4. 33 Velocidades y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para un ciclo de marea, Caso 2

4.2.1.3. Boca del Carmen.

A diferencia de la Boca de Puerto Real la Boca del Carmen no mostró un cambio en su comportamiento hidrodinámico, ya que ésta sigue manifestando el predominio del reflujo. Del prisma de marea se estimó que $5.84 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pertenecen a la condición de reflujo misma que se sostuvo por un periodo de 13 hora aproximadamente y $5.78 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ al flujo con una duración de 11 horas.

El orden de las corrientes de flujo y reflujo es de $0.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente, como se observa en la Figura 4. 34. Estudiando en conjunto el orden de las corrientes, el volumen neto de flujo y reflujo y la duración de cada uno se puede ver que este caso la Boca del Carmen también funciona como una boca exportadora, ya que a pesar de que presenta velocidades de salida menores a las de entrada, la mayor duración del reflujo hace que el prisma de reflujo sea mayor.

Con respecto a la variación en la elevación de superficie libre mostrada en la Figura 4. 34, se puede decir que la señal está afectada sólo por la distorsión propia de la propagación y no por la interacción con el cuerpo de la laguna y las bocas de Puerto Real y Sabancuy.

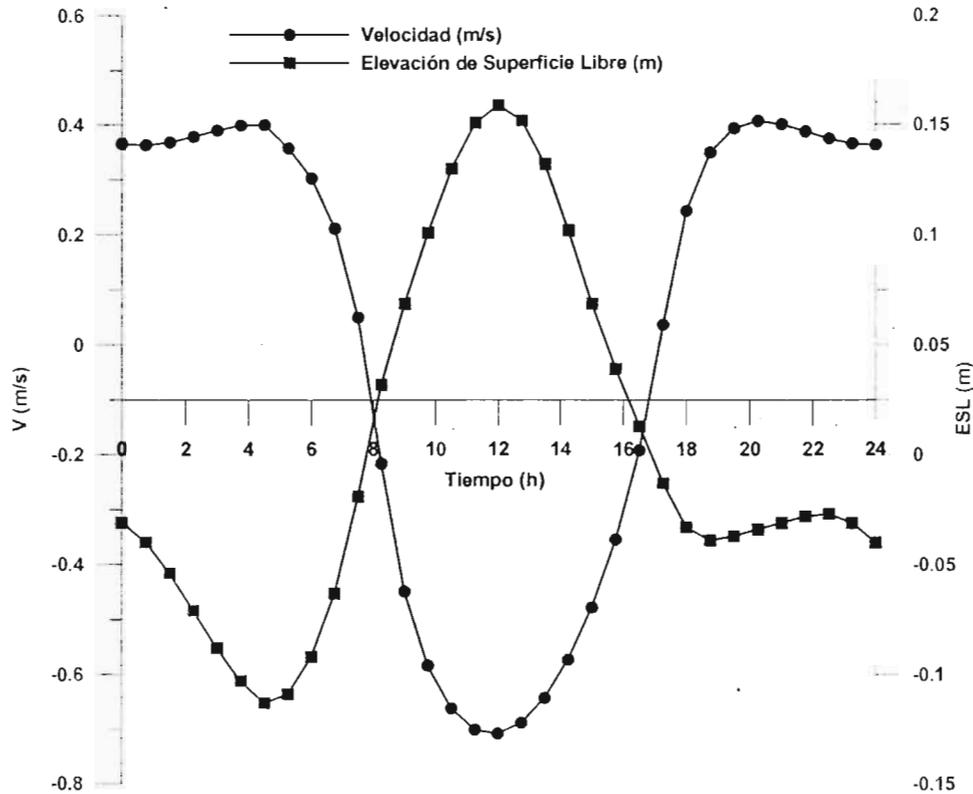


Figura 4. 34 Velocidades y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para un ciclo de marea, Caso 2

4.2.2. Variación de la señal de marea, Caso 2

En la Figura 4. 35 se muestra el registro de superficie libre del agua en las Bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy. En esta figura se advierte que en las primeras horas de registro (3.75 horas), en las tres bocas las señales de marea están en la condición de saliente, pero como se muestra en la Figura 4. 36 el predominio del prisma de marea de Puerto Real acota la influencia del prisma de la Boca del Carmen por lo que para este tiempo el prisma de marea de Puerto Real domina la mayor parte del cuerpo de la laguna.

Para el tiempo 4.5 hora la Boca del Carmen continua en la fase de saliente, en Puerto Real se tiene la bajamar mínima y en Sabancuy se presenta la pleamar, aunque distorsionada. En la boca de Puerto Real se presenta la bajamar mínima a consecuencia del aumento en el volumen de agua que Carmen saca, lo que a su vez genera la modificación en el régimen de la Boca de Sabancuy. En la Figura 4. 37 se observa la disminución en el área de influencia del prisma de marea de Puerto Real a medida que el volumen de agua que Carmen esta desalojando del cuerpo principal aumenta.

En el tiempo 6.75 hora el prisma de la señal de marea de la Boca del Carmen disminuye considerablemente la influencia del prisma de Puerto Real, situación que se observa en la Figura 4. 38. Hora y media después (hora 8.25) en la Boca del Carmen se presenta la condición de bajamar mínima, siendo tal su influencia (hidrodinámica) que provoca una modificación en el patrón de corrientes en la Boca de Puerto Real, Figura 4. 39. A partir de este momento la Boca de Puerto Real esta metiendo agua al sistema para de esta

manera regular el volumen de salida en Carmen con el volumen de entrada de Puerto Real.

Como se observa en la Figura 4. 40 para la hora 12, la señal de marea en la Boca del Carmen permanece en su fase de saliente en tanto que en la Boca de Puerto Real se presenta la condición de pleamar máxima (Figura 4. 35). Además la señal de marea en la boca de Sabancuy cambia de entrante a saliente, porque en Puerto Real se están presentando grandes volúmenes de entrada que para este tiempo están saliendo aunque en pequeña escala por Sabancuy.

En la Figura 4. 41 se muestra la variación en la elevación de superficie libre del agua y los vectores de velocidad para el tiempo 12.75. En esta figura se distingue el cambio en el patrón de corrientes de la Boca del Carmen, presentándose en ésta la condición de entrante. De esta misma figura se aprecia que al cambiar el patrón de corrientes en Carmen (reflujo a flujo) provoca una disminución en el área de influencia del prisma de Puerto Real y con esto una disminución en el volumen de entrada de Puerto Real, situación que continua a medida que el volumen de entrada en Carmen aumenta (Figura 4. 42).

En la Figura 4. 35 para el tiempo 16.5 se observa la condición de pleamar máxima en la Boca del Carmen, esta circunstancia coincide que en la boca de Sabancuy se tenga la bajamar mínima y Puerto Real cambie el patrón de entrante a saliente para el siguiente tiempo (hora 17.25). En la Figura 4. 43, en la hora 17.25 la Boca del Carmen está bajo la condición de flujo y la de Puerto Real en reflujo.

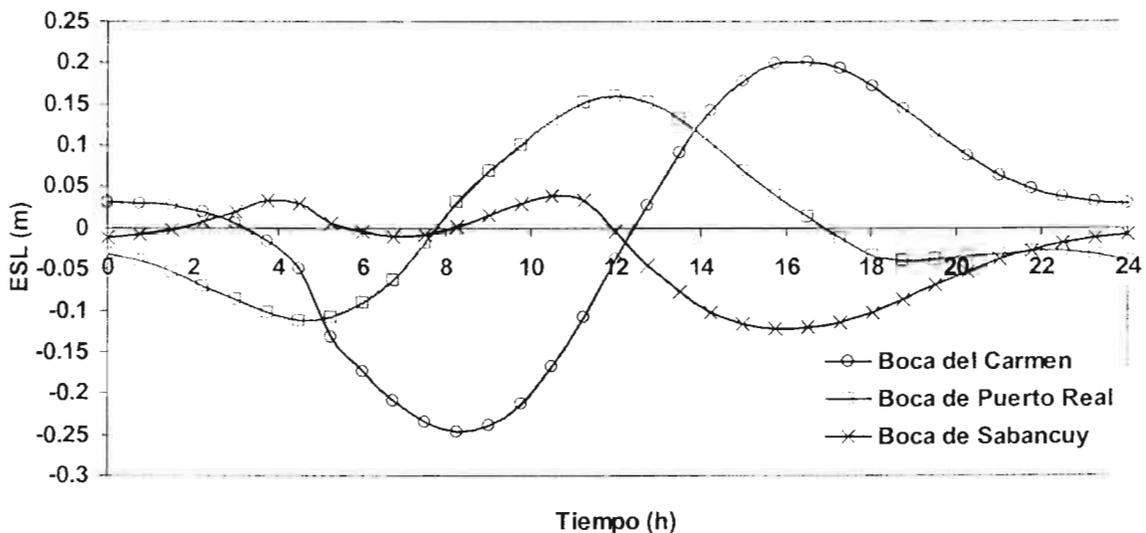


Figura 4. 35 Variación en la elevación de superficie libre en las Bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy, Caso 2.

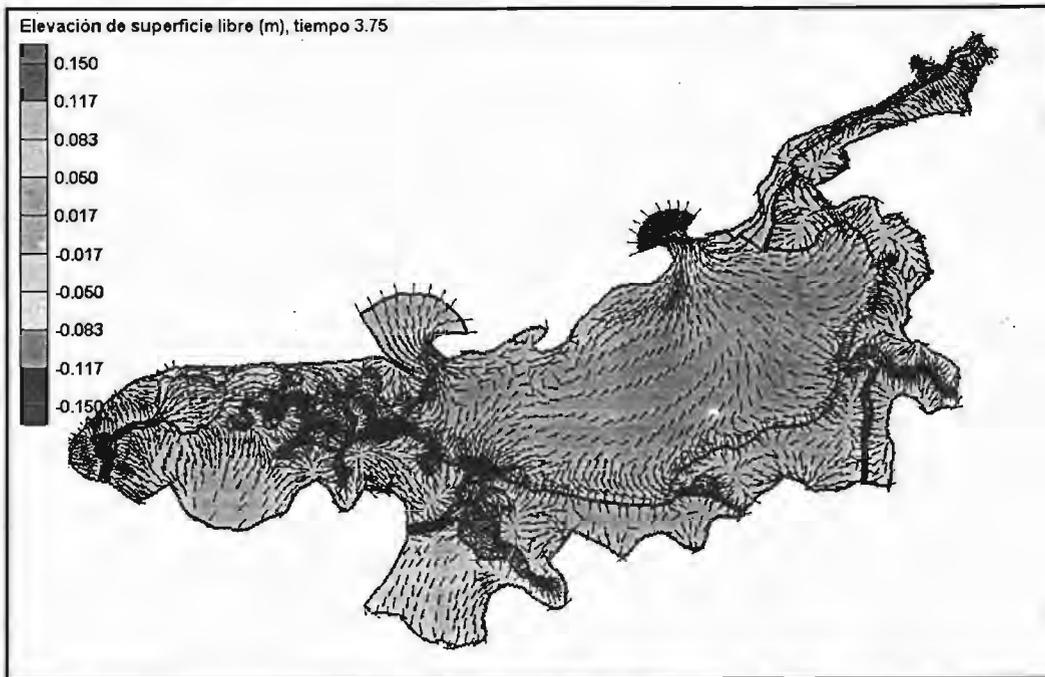


Figura 4. 36 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 3.75.

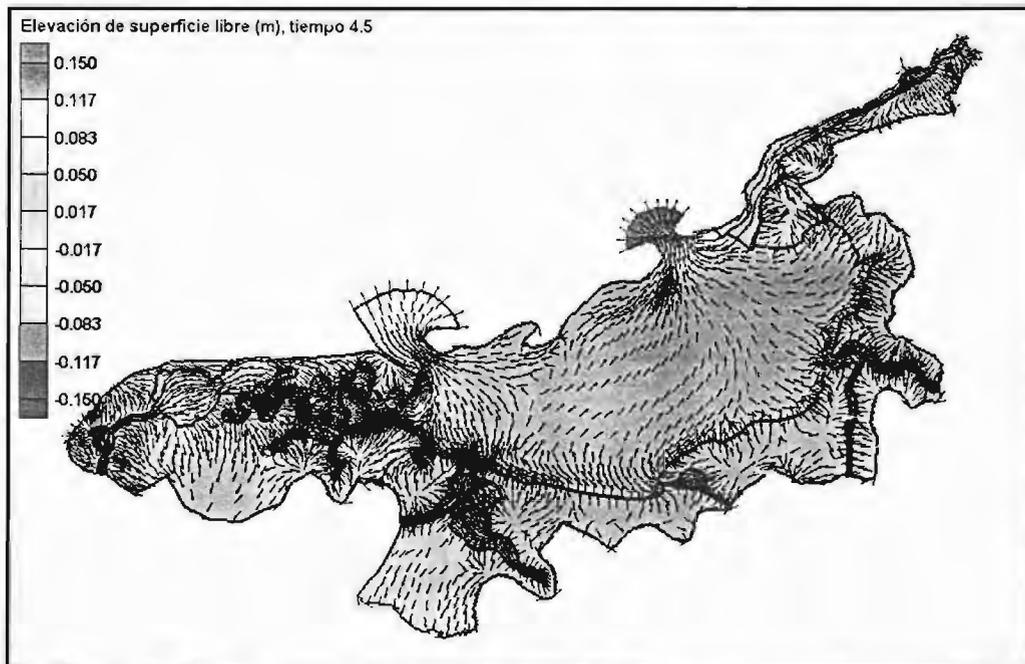


Figura 4. 37 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 4.5

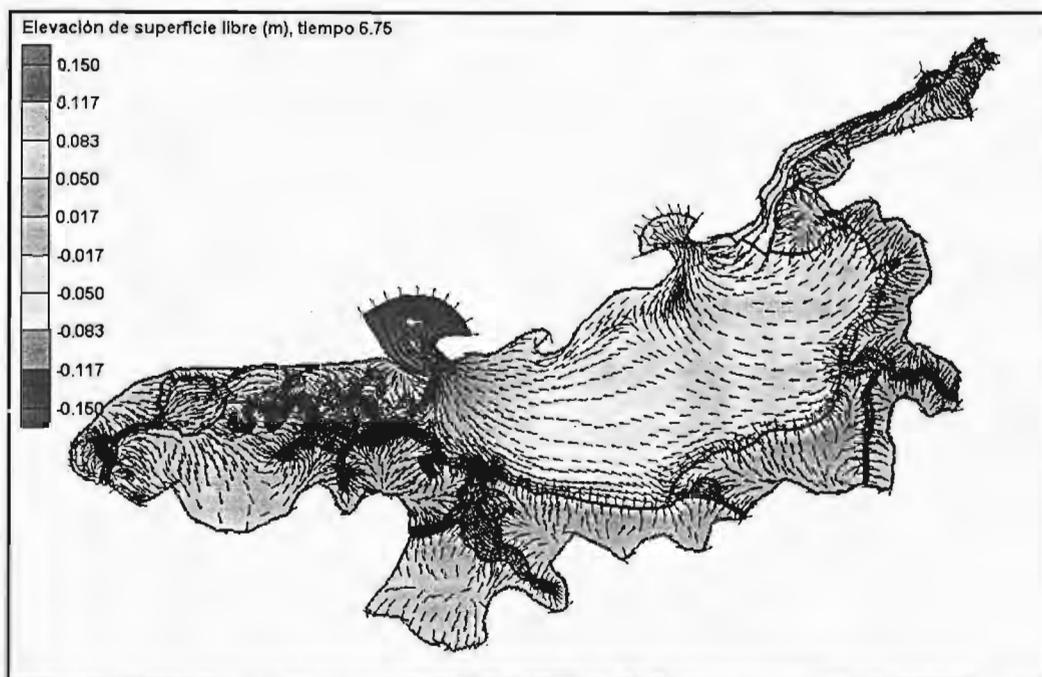


Figura 4. 38 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 6.75

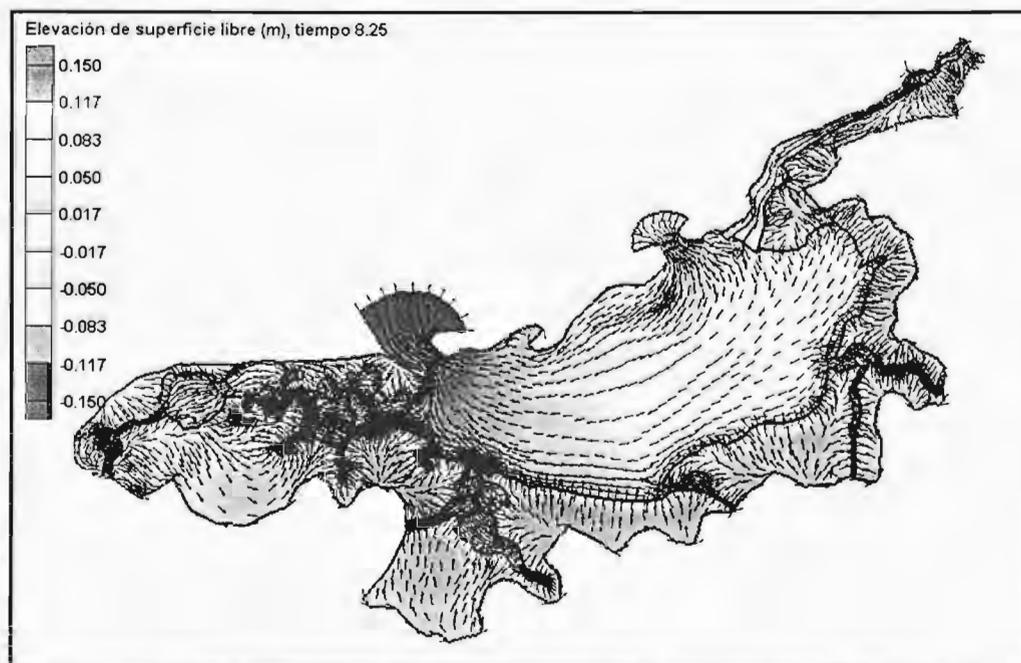


Figura 4. 39 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 8.25

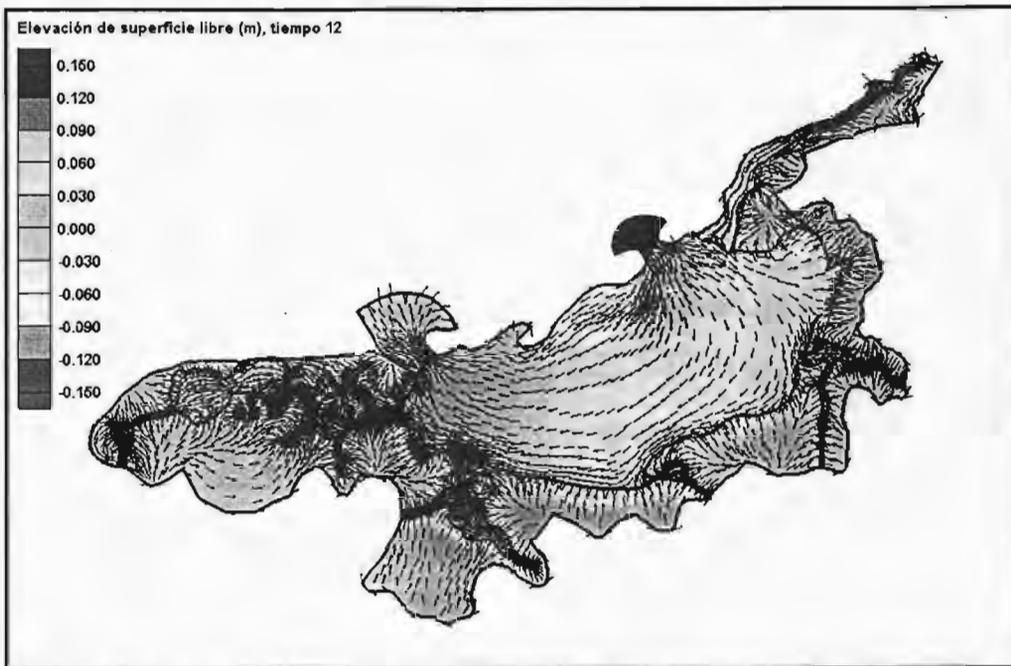


Figura 4. 40 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso2, hora 12

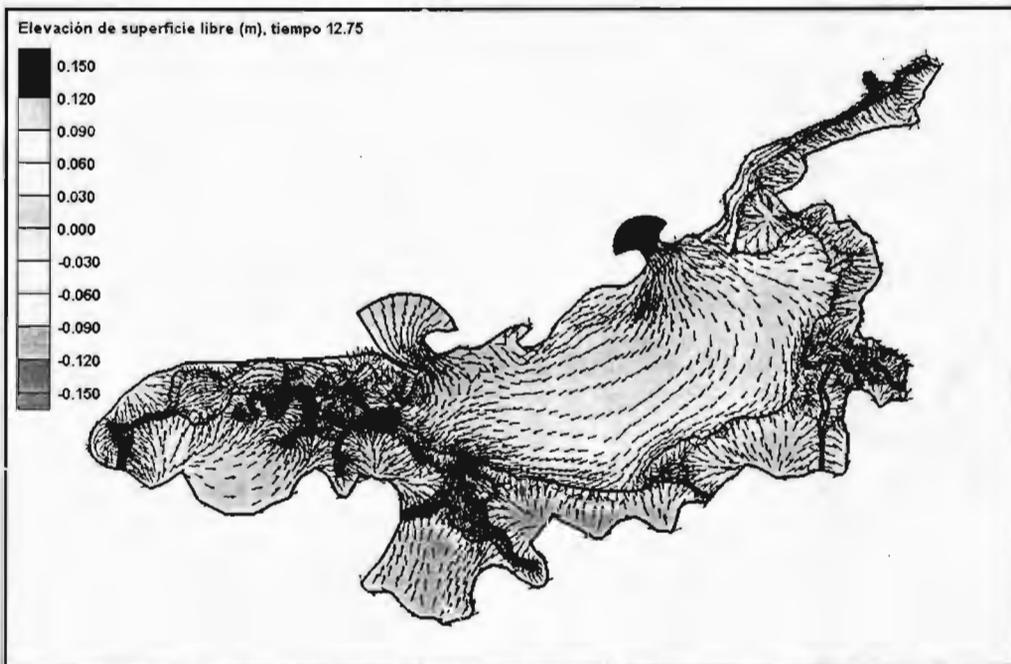


Figura 4. 41 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 12.75

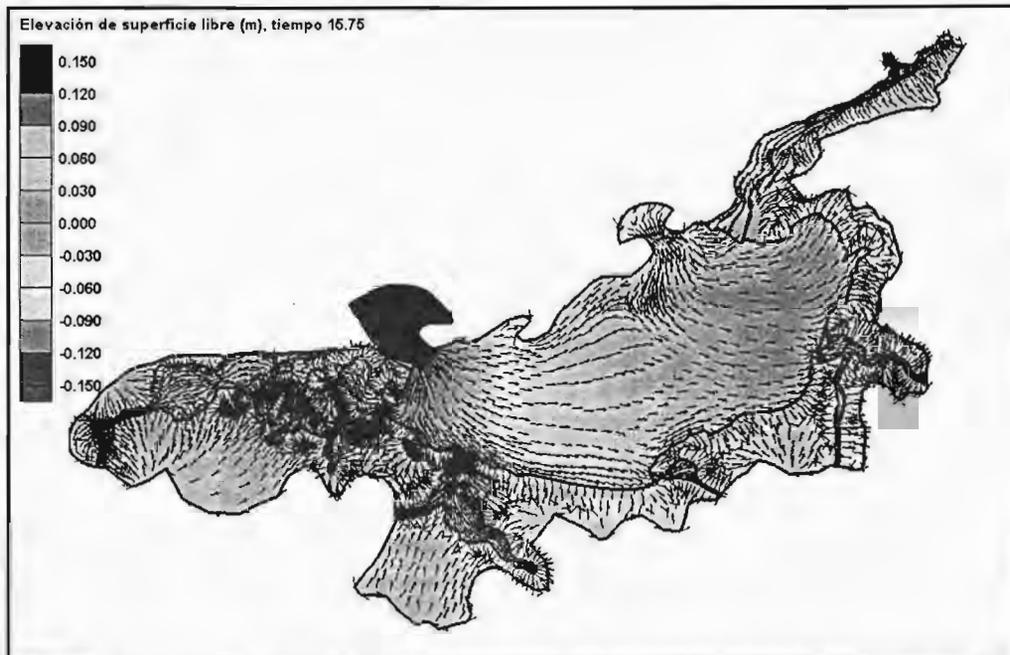


Figura 4. 42 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 15.75

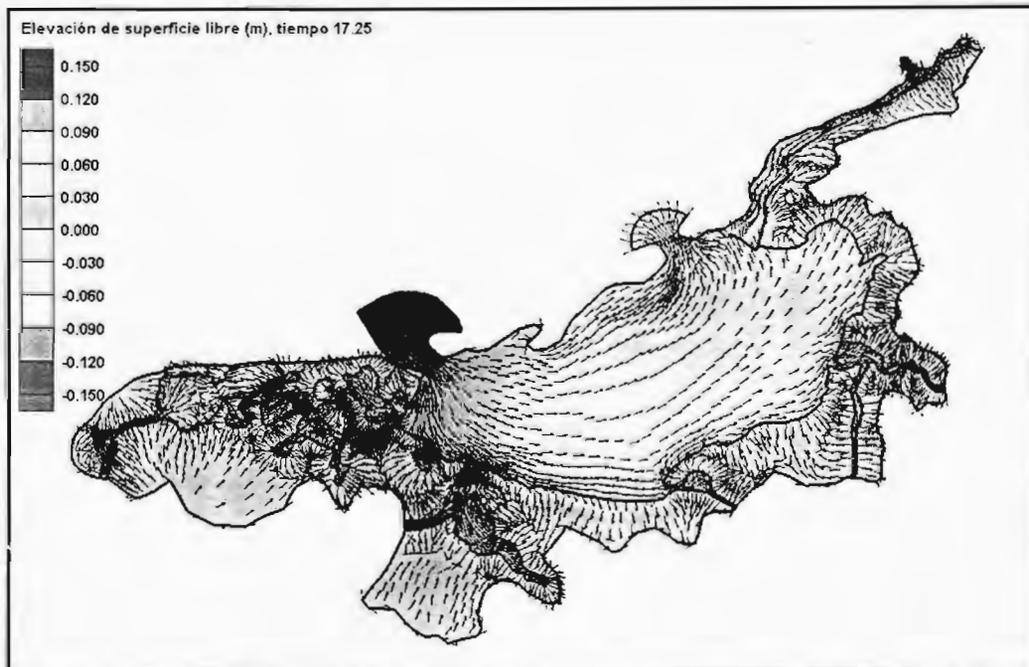


Figura 4. 43 Elevación de superficie libre y vectores de velocidad en la Laguna de Términos para el caso 2, hora 17.25

Del análisis anterior se concluye que para este caso en particular el patrón de corrientes en la Boca del Carmen es dominante en mayor grado que en el caso anterior (Caso1, marea monocromática), no solo al interior del cuerpo principal, sino también en el estero y la Boca de Sabancuy. Al mismo tiempo se observó que bajo estas condiciones el dominio del prisma de marea de Puerto Real alcanza a confinar, en ciertos momentos, al prisma generado por Carmen.

4.3. CASO 3. Marea generada del análisis armónico y gastos medios

El caso 3 reúne las señales de marea reconstituidas con las principales componentes armónicas calculadas y los gastos medios en los ríos. Tomando en cuenta que las señales de marea en la realidad y bajo condiciones normales muestran una variabilidad entre los ciclos de marea viva y marea muerta y que al mismo tiempo los ríos que descargan al sistema lagunar lo hacen en condiciones medias la mayor parte del tiempo el objetivo de esta simulación es el de analizar el patrón hidrodinámico típico representativo del sistema lagunar.

En el caso 3 como se observó en las señales de forzado de marea del capítulo 3 (Figura 3.17), la amplitud registrada para la pleamar máxima en marea muerta (primera marea muerta de la señal) es del orden de la marea viva, porque la señal reconstituida se encuentra dentro de una componente quincenal, tal como se observa en la Tabla 3.2.

4.3.1. Velocidades y elevación de superficie libre

4.3.1.1. Boca de Sabancuy.

La Figura 4. 44 representa la variación de velocidades y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy. En esta figura se observa que ambas curvas presentan un comportamiento similar.

De la misma Figura 4. 44 se tiene que las velocidades máximas de reflujos se presentan durante la condición de marea saliente y oscilan entre los 1.25 y 1.16 m.s^{-1} en marea viva, mientras que para marea muerta son de 0.45 y 0.55 m.s^{-1} . De igual manera las máximas velocidades de flujo se tienen cuando la marea está en la fase de entrante, pero como se muestra en la Figura 4. 44 las velocidades máximas y mínimas de flujo se presentan para la condición de marea muerta (1.16 m.s^{-1} y 0.60 m.s^{-1}), lo cual indudablemente se debe a la fuerte influencia que tiene la boca de Puerto Real.

Con respecto a la señal de marea registrada en la Boca de Sabancuy, mostrada en la Figura 4. 44, las amplitudes máximas registradas en marea viva son de 0.14 m , mientras que para las dos condiciones de marea muerta se registran amplitudes de 0.11 m y $.065 \text{ m}$.

El nivel de superficie libre en la condición de marea entrante aumenta considerablemente (0.09 m) aun cuando la variación en las velocidades de flujo disminuye sólo en 0.1 m.s^{-1} , caso contrario para la condición de marea saliente en donde para las máximas

velocidades de refluo, la variación en el nivel de superficie libre es pequeña. De este análisis y considerando estos dos parámetros (velocidad y superficie libre), se estima que el patrón hidrodinámico en esta Boca favorece el ingreso de masa al sistema, es decir, es una boca con tendencia al flujo (importar agua al sistema).

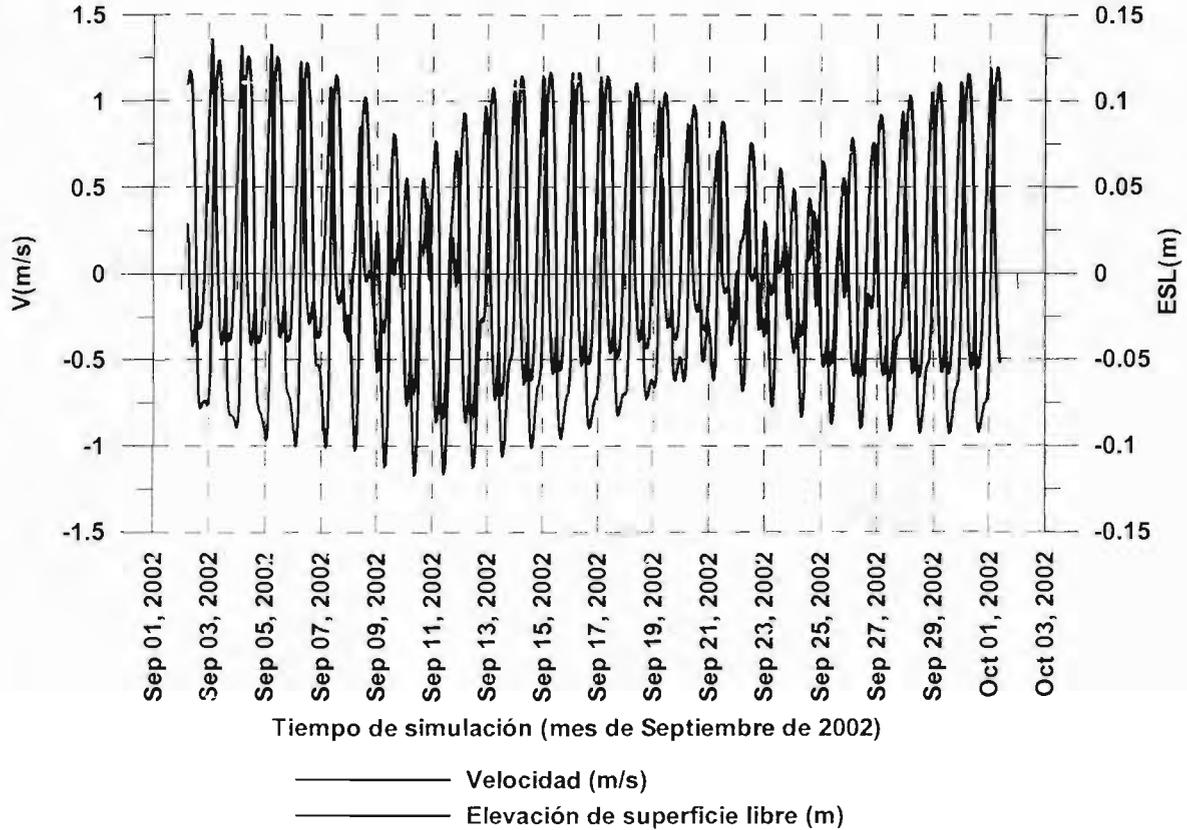


Figura 4. 44 Variación de la velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy, Caso 3.

4.3.1.2. Boca de Puerto Real.

En el caso de la Boca de Puerto Real las mayores velocidades se registraron para la condición de refluo en marea viva. En la Figura 4. 45 se muestra la variación de la velocidad y elevación de superficie libre en esta boca. Las velocidades máximas de refluo en marea viva son de $0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en marea muerta. En relación a las velocidades máximas de flujo (entrante) nuevamente se presentan durante la condición de marea muerta $0.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ al igual que las mínimas ($0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Las amplitudes máximas para la condición de marea viva son de 0.29 m y las de marea muerta de 0.09 m. Para la condición de marea viva la pleamar máxima es de aproximadamente 0.19 m, mientras que la bajamar mínima es de 0.14 m, en tanto para la marea muerta la pleamar máxima es de 0.06 m y la bajamar mínima de 0.03 m. Este comportamiento de la señal de marea en la Boca de Puerto Real, se debe a que al propagarse al interior de la laguna y cruzar la zona de bajos (zonas en donde el tirante de agua disminuye sustancialmente), el agua se apila incrementándose el nivel de agua y volumen en esta sección; al cambiar el patrón de corrientes en esta boca (flujo a refluo) el

volumen desalojado disminuye, al frenarse el flujo por efecto de la zona de bajos, como consecuencia se presenta una la disminución del nivel de superficie libre en la zona.

Como se observa en la Figura 4. 46, en la curva de elevación de superficie libre para la condición de marea saliente no se aprecian cambios significativos en la pendiente, pero en la condición de marea entrante existe un cambio de dirección en la pendiente para el tiempo en el cual se presenta un cambio de régimen (flujo a reflujo). Para este tiempo la pendiente disminuye en la fase de reflujo, lo que genera una disminución en las velocidades de entrada. En consecuencia este cambio en la pendiente de la curva en la condición de entrante provoca que el tiempo que dura la condición de flujo o entrada sea mayor que (56% del tiempo total) que el tiempo que se mantiene el reflujo (44 % del tiempo total).

Del análisis de velocidades y el comportamiento antes mencionado en la variación de superficie libre se puede decir que en la Boca de Puerto Real predomina el régimen de flujo lo que implica que morfológicamente en esta boca la circulación de agua se ve impedida a salir y descargar libremente.

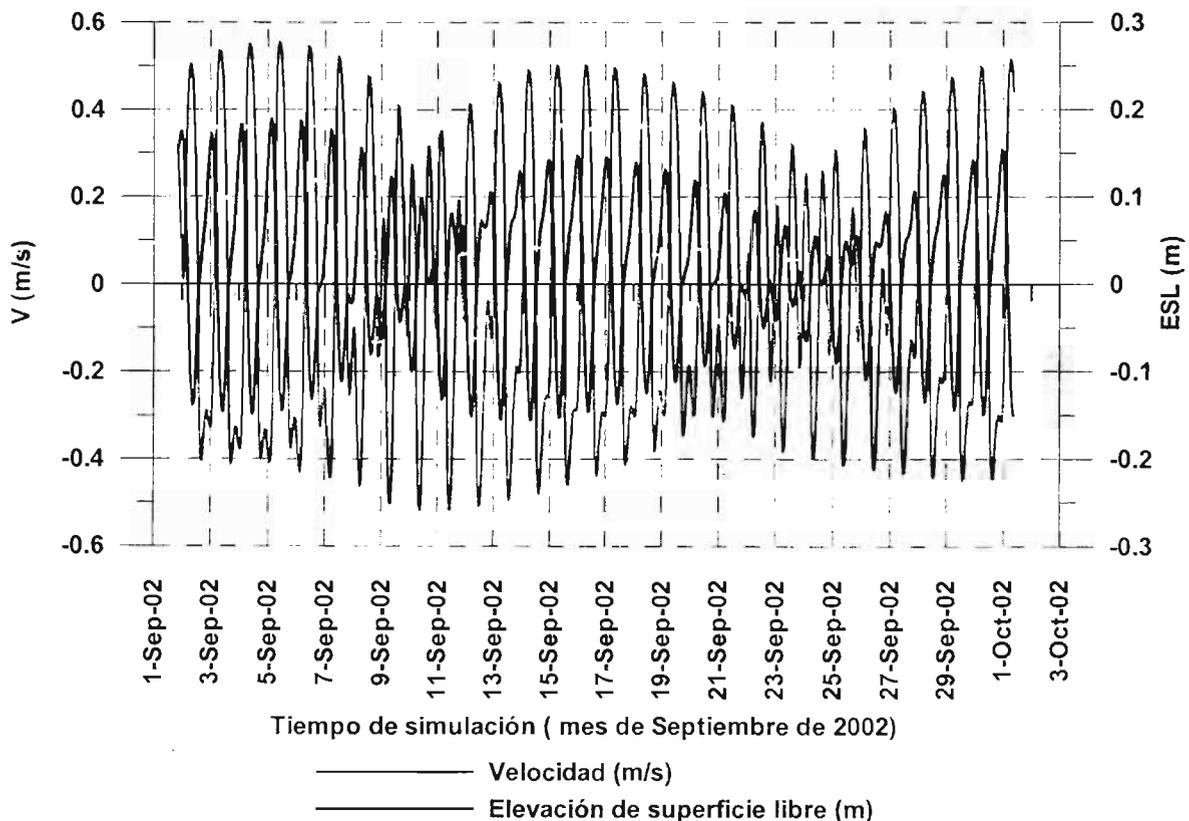


Figura 4. 45 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real, Caso 3.

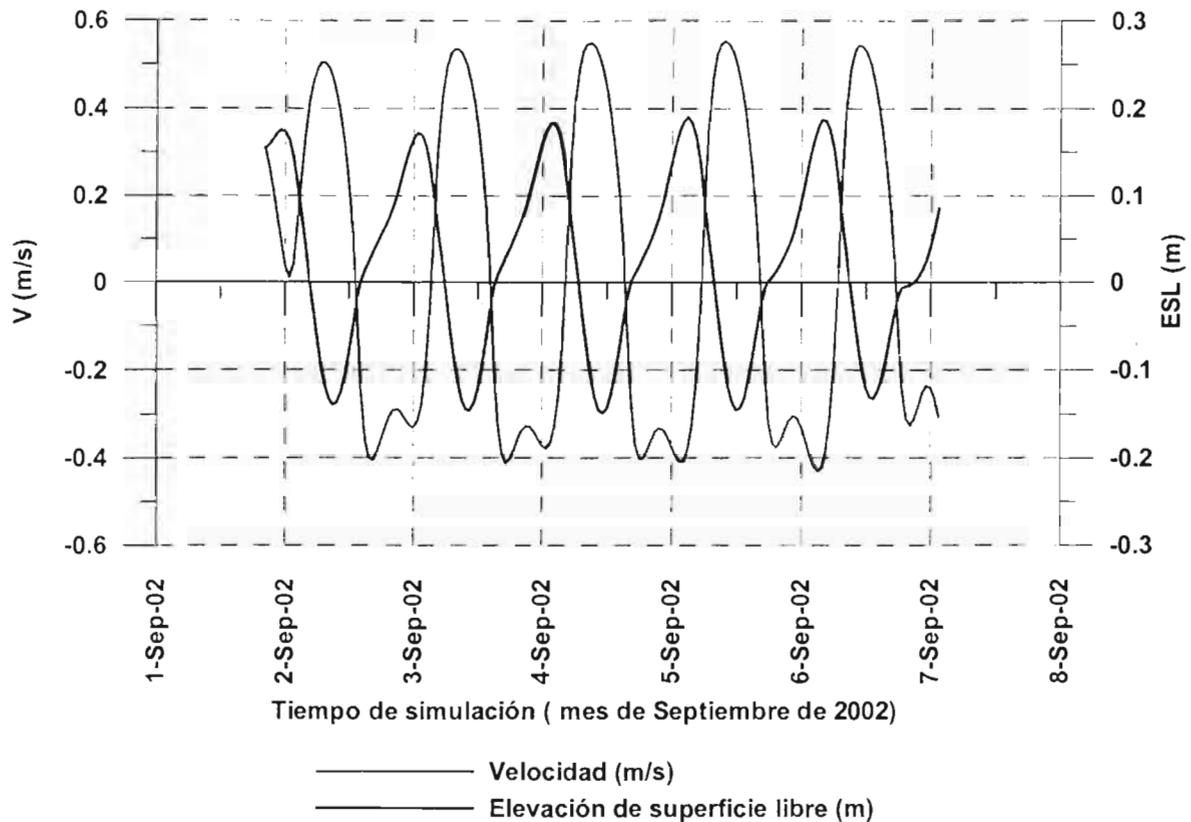


Figura 4. 46 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real del 2 al 7 de Septiembre de 2002.

4.3.1.3. Boca del Carmen.

En la Boca del Carmen las máximas magnitudes de velocidad se presentan para la condición de refluo, ver Figura 4. 47, y varían entre 0.48 y 0.44 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en marea viva, para la condición de marea muerta las velocidades máximas de refluo oscilan entre 0.17 y 0.23 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. En la condición de flujo tanto las máximas como las mínimas velocidades se presentan en marea muerta (0.36 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y 0.08 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

De la señal de marea registrada en la Boca del Carmen (Figura 4. 47) se observa que la pleamar máxima y bajamar mínima tienen un valor de 0.18 m en la fase de marea viva, con respecto a la variación en la elevación para la marea muerta, la pleamar máxima es de 0.08 m contra 0.03 m en bajar mínima. En esta misma curva se observa que, al igual que en la señal de marea en la Boca de Puerto Real, en la Boca del Carmen la variación en la señal para la condición de marea saliente no presenta cambio de dirección en la pendiente de la curva, sin embargo para la condición de marea entrante sí, lo que provoca una disminución en la variación de velocidades de flujo y con esto menor entrada de agua al sistema. Esta situación provoca que la capacidad de esta boca de importar masa al sistema sea menor que la capacidad de exportar.

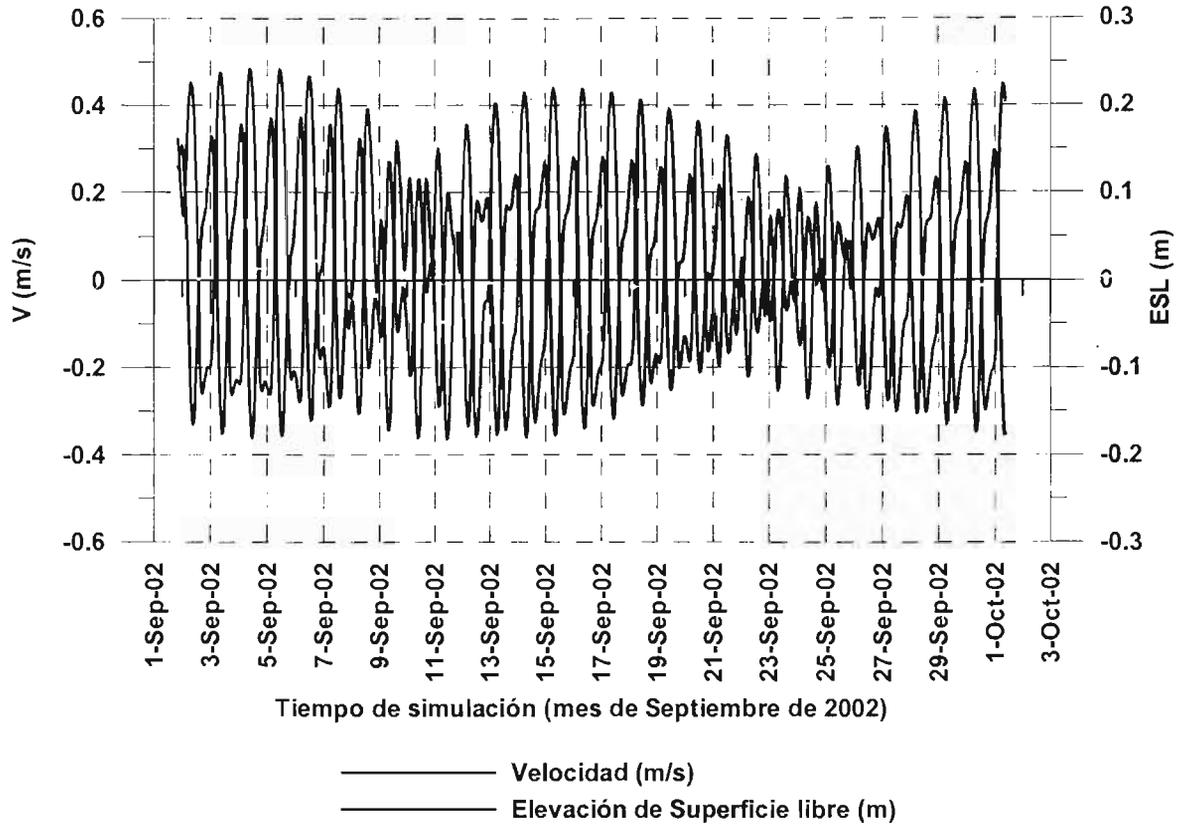


Figura 4. 47 Variación de velocidades y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen, Caso 3.

4.3.2. Variación de los gastos residuales en el periodo simulado

Un parámetro importante en la determinación del patrón de corrientes dominante en las bocas es la variación del gasto en el periodo simulado por lo que en la Figura 4. 48 se presentan los gastos registrados en el tiempo para las tres bocas.

En la Figura 4. 48 se muestran los gastos en las Bocas del Carmen, Puerto Real y Sabancuy. En el caso de la Boca de Sabancuy la variación del gasto es un orden de magnitud menor que el que se presenta en la figura ya que si se incorporara con el valor real no se apreciaría la variación de esta.

De las tres bocas, por la Boca del Carmen es por donde pasa el mayor volumen neto, tal como se observa en la Figura 4. 48, así mismo en la Boca del Carmen se tienen los gastos mayores de refluo, en tanto que los mayores de flujo se manifiestan en la Boca de Puerto Real. La Boca de Sabancuy muestra que los gastos de refluo son mayores que los de flujo.

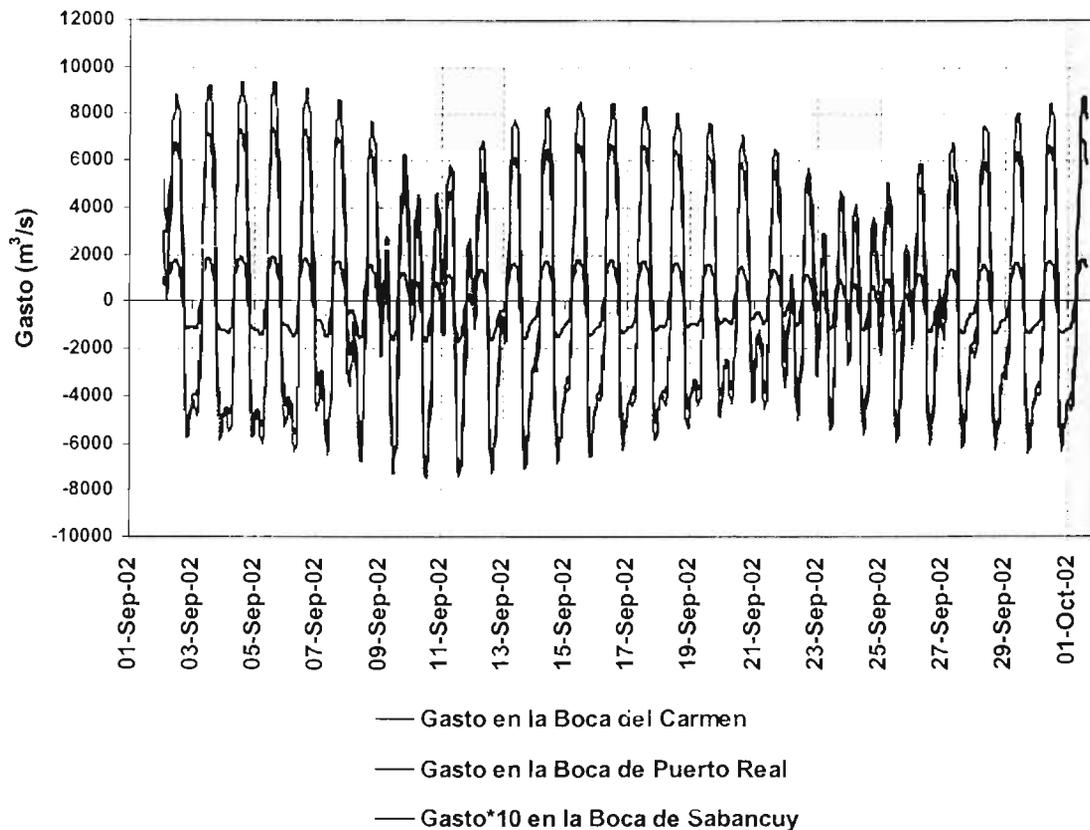


Figura 4. 48 Variación de los gastos que pasan a través de las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen, Caso 3.

Por medio del análisis residual en los gastos se observa el predominio en el patrón de corrientes en cada boca. La Figura 4. 49 muestra la variación de los gastos residuales en el tiempo simulado. De igual forma que para la Figura 4. 48 el gasto residual en la Boca de Sabancuy es un orden de magnitud menor que el presentado en la Figura 4. 49. En esta figura se ratifica la tendencia de la Boca del Carmen a exportar, y de las Bocas de Puerto Real y Sabancuy a importar. En las curvas de gasto residual en las bocas se observan fluctuaciones, sobre todo en la transición entre la marea viva y marea muerta, esta fluctuación es mayor para la primera señal de marea muerta debido a que para la condición de flujo en esta las amplitudes son mayores que en la segunda marea muerta del registro por estar dentro de la fase de una componente quincenal.

En la condición de marea viva la fluctuación es menor ya que la variación en el rango para este periodo no es tan amplia como en el caso de marea muerta.

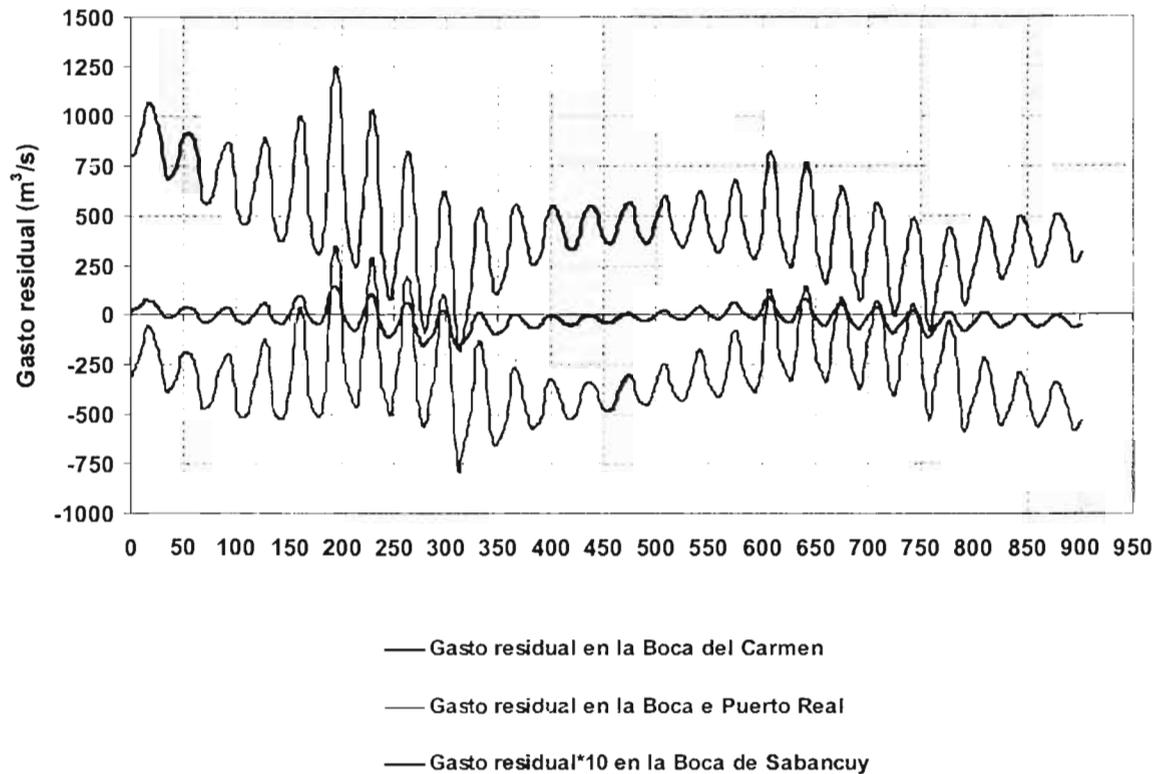


Figura 4. 49 Variación de los gastos residuales en las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen, Caso 3.

4.4. CASO 4. Marea con la influencia del Huracán Isidore.

Este último escenario se realizó con las señales de marea medidas y dado el periodo de medición (septiembre de 2002), los registros de elevación de superficie libre contienen la sobreelevación generada por los efectos del Huracán Isidore. Por esta razón, el objetivo de este escenario es el de identificar la modificación en la variación del patrón de circulación ante la presencia de un evento extremo como es el caso de un huracán.

Debido a que los efectos del Huracán Isidore se registraron a partir del 20 de septiembre de 2002, en los primeros días de registro se observan ciclos de marea viva y marea muerta en la señal. Por esta razón el análisis de resultados para esta simulación incluirá ambos casos, es decir, el estudio para las condiciones de marea viva y marea muerta además del estudio para las condiciones hidrodinámicas generadas por el huracán.

4.4.1. Velocidades y elevación de superficie libre

4.4.1.1. Boca de Sabancuy.

En la Figura 4. 50 se presenta el patrón de corrientes y la variación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para el mes de septiembre de 2002. En esta figura se observa que

para el registro que incluye los ciclos de marea viva y marea muerta las máximas velocidades de corriente se presentan para la condición de reflujo. Las velocidades máximas de reflujo para este periodo son de 1.28 m.s^{-1} en marea viva y 0.36 m.s^{-1} en marea muerta. Para la situación de flujo las velocidades máximas son de 1.07 m.s^{-1} en marea viva y 0.66 m.s^{-1} en marea muerta. Nuevamente las velocidades de flujo son mayores que la velocidad de equilibrio ($v_{eq} \approx 1 \text{ m/s}$) propuesta por Escoffier (Escoffier, 1940) lo que implica que esta boca puede considerarse como una boca importadora de sedimento la cual a su vez se asocia con un estado de poca estabilidad a largo plazo.

Los efectos del Huracán Isidore se observan a partir del día 20 de septiembre de 2002, (Figura 4. 50), en donde el patrón de corrientes se ve modificado incrementándose primero las velocidades de flujo hasta 1.85 m.s^{-1} para el tiempo en el que la elevación de superficie libre aumenta de 0.05 m hasta 0.35 m en aproximadamente 48 horas. Este incremento en la elevación de superficie libre continua por 32 horas más, alcanzando un nivel de 0.897 m , mientras que las velocidades de flujo disminuyen hasta 0.2 m.s^{-1} . A partir de este tiempo el nivel de superficie libre en la Boca de Sabancuy comienza a bajar, situación que se refleja en el incremento de las velocidades de reflujo, con una velocidad máxima de 1.23 m.s^{-1} . El tiempo que la Boca de Sabancuy se encuentra importando agua es de cuatro días, y el tiempo de exportación de agua es de aproximadamente dos días.

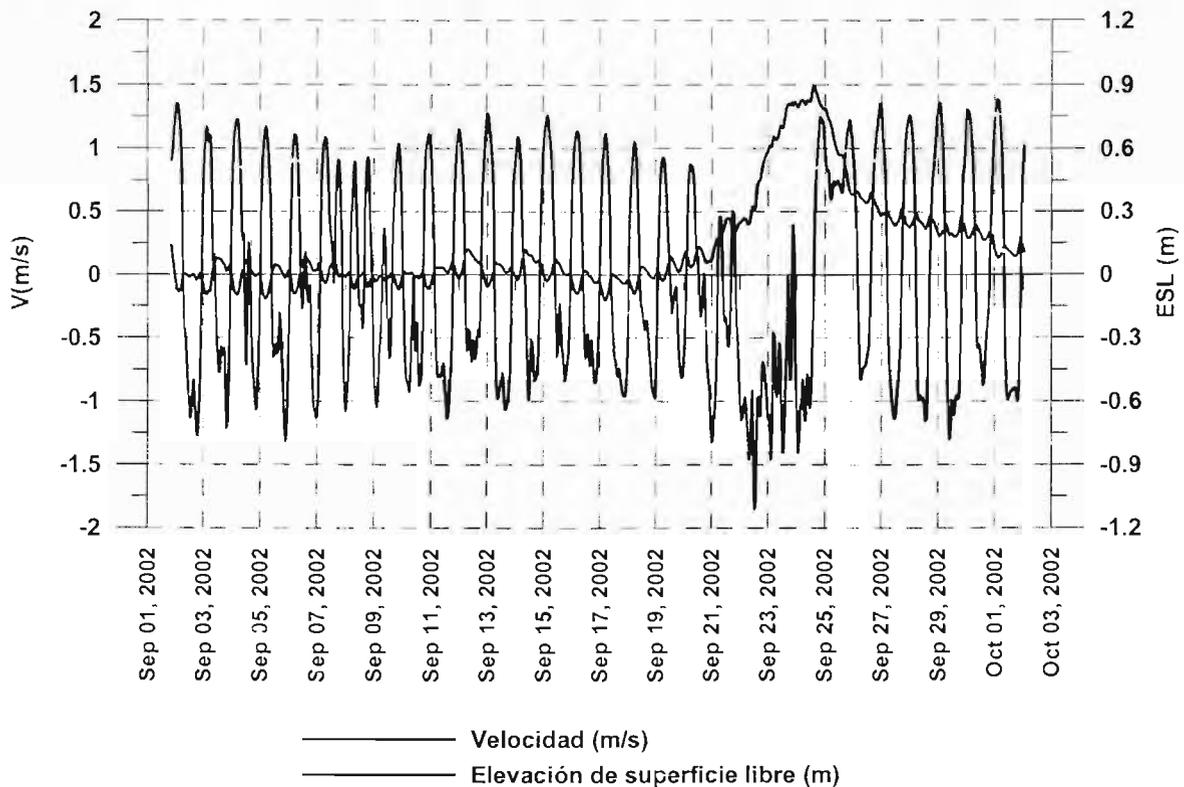


Figura 4. 50 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Sabancuy para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.

4.4.1.2. Boca de Puerto Real.

El comportamiento hidrodinámico de la Boca de Puerto Real se presenta en la Figura 4. 51, en donde se observa la variación en el patrón de corrientes y elevación de superficie

libre en dicha boca. Las máximas velocidades de flujo y refluo para la condición de marea viva son de 0.58 y 0.57 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Con respecto al orden de corrientes para la condición de marea muerta, varía de 0.14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en refluo y 0.17 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en flujo.

El patrón hidrodinámico en la Boca de Puerto Real, para el tiempo en el que se presentó el Huracán Isidore exhibe variaciones importantes, a partir del 20 de septiembre y hasta el 24 de septiembre la tendencia de la boca fue al flujo con velocidades máximas de 0.78 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sin embargo como se observa en la Figura 4. 51 para esta condición (flujo) se presentaron fluctuaciones en la elevación de superficie libre causando una modificación en el patrón de velocidades. Para la condición de refluo la máxima magnitud de velocidad registrada es de 0.56 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Adicionalmente, en la Figura 4. 51 se muestra que la Boca de Puerto Real mantuvo la condición de refluo por dos días aproximadamente.

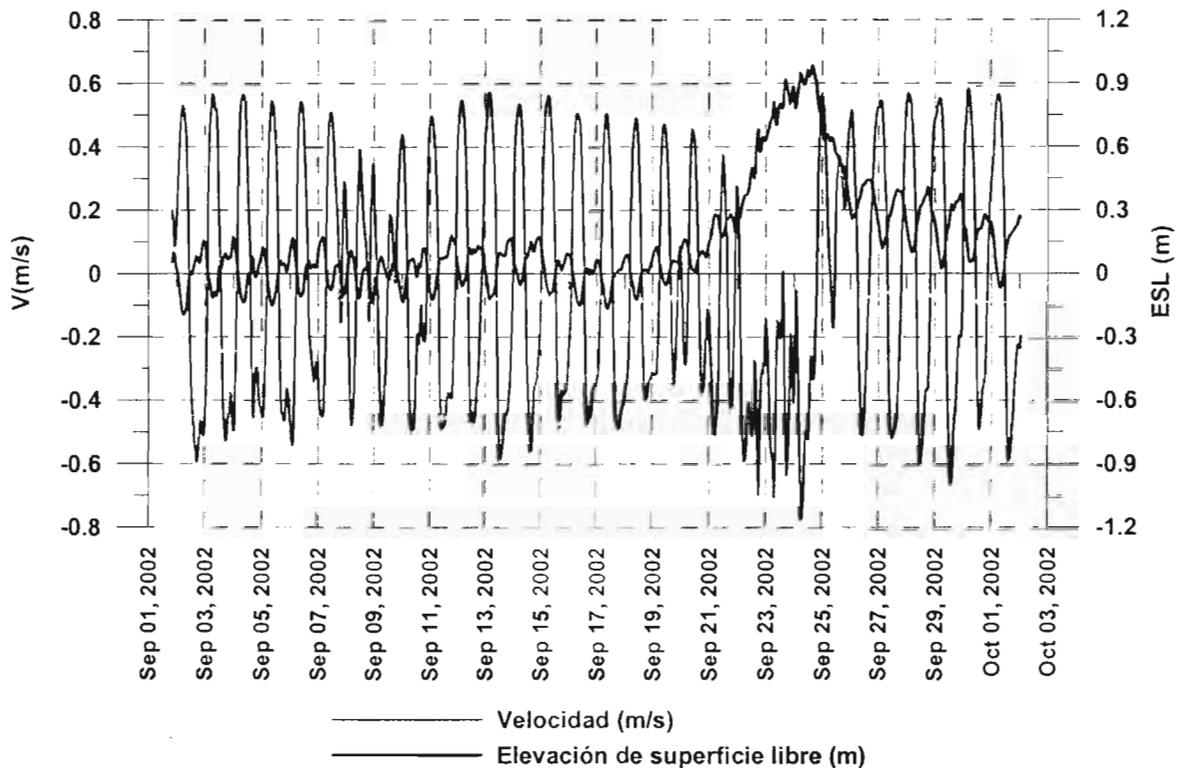


Figura 4. 51 Variación de velocidad y elevación de superficie libre en la Boca de Puerto Real para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.

4.4.1.3. Boca del Carmen.

La Figura 4. 52 muestra la variación de velocidades y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen ante la presencia del Huracán Isidore. En esta figura se observa que las velocidades de refluo son mayores que las de flujo tanto en marea viva como marea muerta. Las velocidades máximas de refluo son de 0.42 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en marea viva y 0.22 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ en marea muerta, para la situación de flujo las máximas velocidades son de 0.36 y 0.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente.

Durante el tiempo que perduro el efecto del Huracán Isidore en la Laguna de Términos, la Boca del Carmen mantuvo el régimen a exportar a pesar de que como se observa en la

Figura 4. 52 el patrón de corrientes manifestó fluctuaciones entre el flujo y reflujo. Las máximas velocidades son de $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en reflujo y $0.33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en flujo.

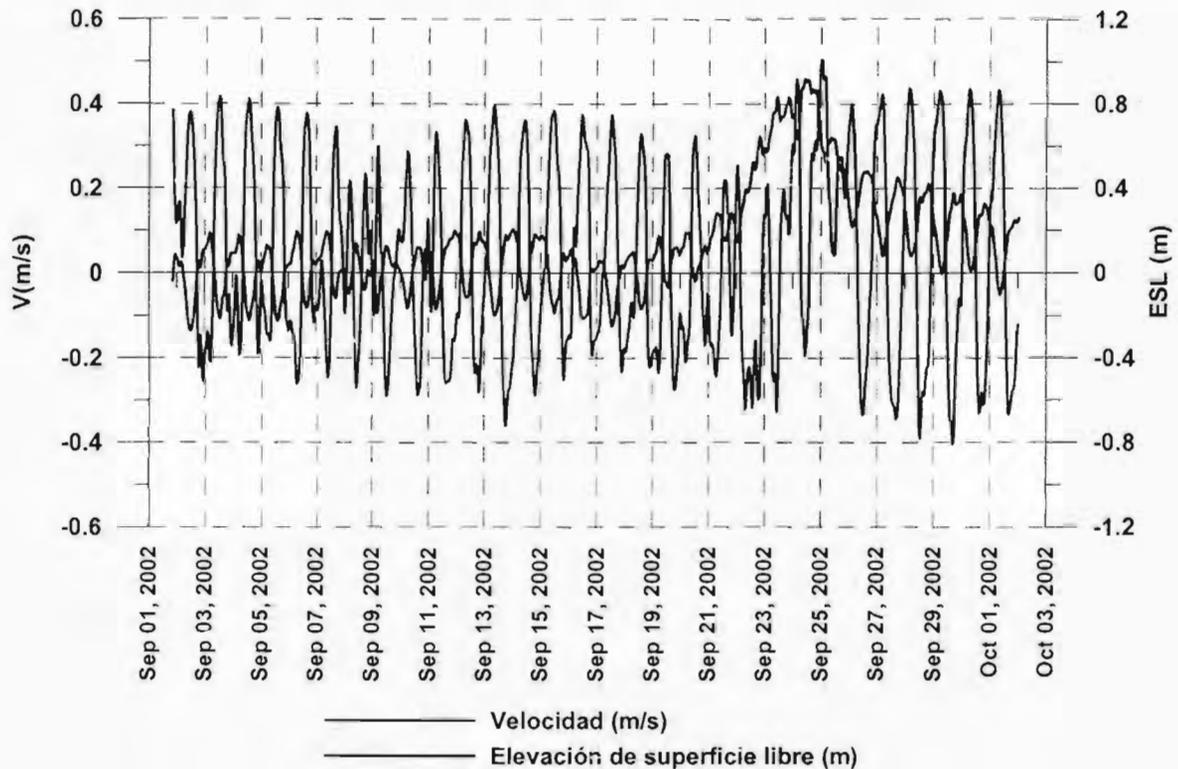


Figura 4. 52 Variación de Velocidad y elevación de superficie libre en la Boca del Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.

4.4.2. Variación de los gastos residuales en el periodo simulado

La Figura 4. 53 muestra los gastos que pasan a través de las secciones mínimas de las bocas. Como se puede observar, los gastos máximos de reflujo o salida se presentan en la Boca del Carmen, mientras que los máximos de flujo se tienen en la Boca de Puerto Real. Para el caso de la Boca de Sabancuy, los gastos son aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que los de Carmen y Puerto Real por lo que en la Figura 4. 53 los gastos presentados para la Boca de Sabancuy son un orden de magnitud mayor a los registrados, esto con la finalidad de apreciar la variación y tendencia de estos.

Para condiciones habituales, los gastos máximos de reflujo en las bocas son de $8132 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $7372 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ y $181 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en Carmen, Puerto Real y Sabancuy respectivamente. Para el caso de los gastos de flujo se obtuvo $8035 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en Boca del Carmen, $7726 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en Boca de Puerto Real y $150 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en Boca de Sabancuy.

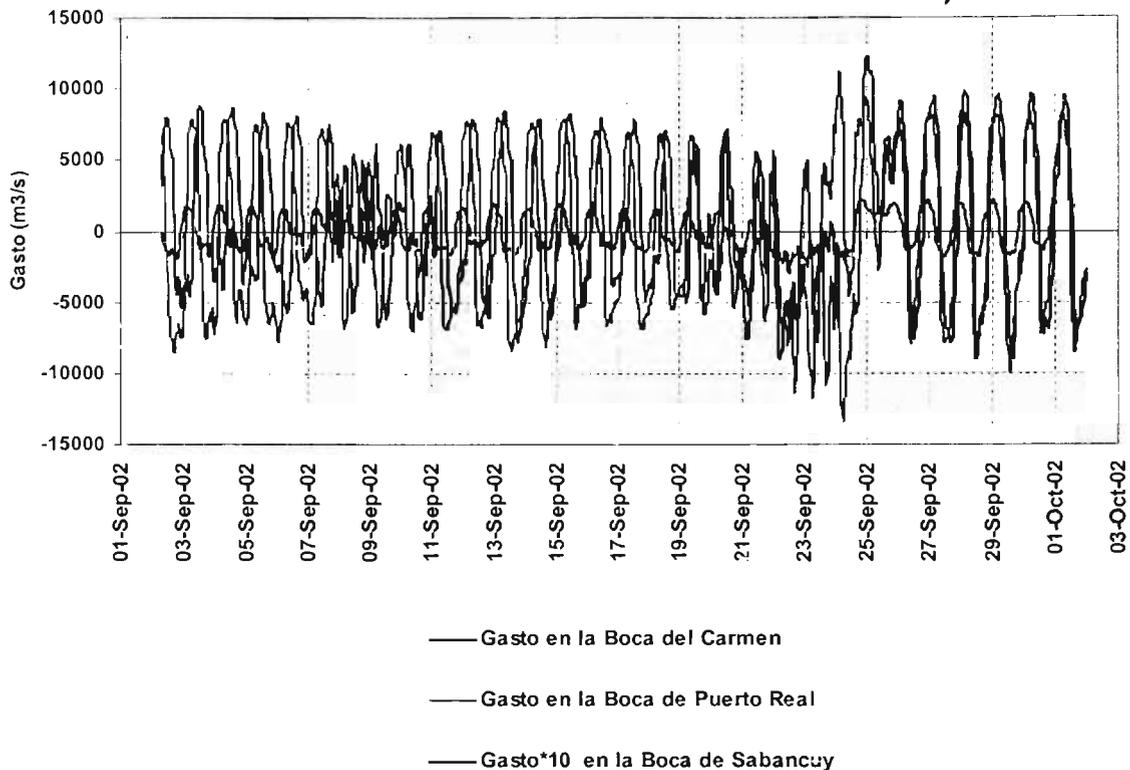


Figura 4. 53 Variación de los gastos que pasan a través de las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.

Con el objeto de estudiar y verificar el régimen que se presenta en cada boca para la simulación realizada, a continuación se presenta la variación en los gastos residuales en cada una de las bocas, considerando que un ciclo de marea es de 24 horas. Definiendo a los gastos residuales como el promedio de gastos en un ciclo de marea.

La Figura 4. 54 muestra la variación de los gastos residuales, para el periodo de registro (septiembre de 2002), en las bocas oceánicas. De igual forma que para la Figura 4. 53, los datos presentados para la Boca de Sabancuy son un orden de magnitud mayores a los obtenidos.

De la Figura 4. 54, hasta el ciclo 480 el patrón de variación residual en los gastos corresponde al comportamiento habitual en la Laguna, este patrón sugiere el régimen predominante en cada boca. Con respecto a la Boca del Carmen se observa que en la mayor parte de los registros, el gasto residual corresponde a condiciones de reflujó, situación que se ratifica con el valor medio de este intervalo el cual es de $581 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Para la Boca de Puerto Real, dominan las condiciones de reflujó con un valor medio de $-391 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, al igual que para la Boca de Sabancuy ($-4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

A partir del ciclo 481 y hasta el final del periodo simulado, la variación en los gastos residuales esta influenciada por los efectos del Huracán Isidore. En la Boca del Carmen el gasto residual de entrada y salida se incrementa en un 450% y 380% respectivamente. En la Boca de Puerto Real este incremento en el gasto residual de entrada fue de 680%, contra el 270% en el gasto residual de salida. Finalmente en la Boca de Sabancuy el

gasto residual de entrada fue 550% mayor que el registrado en condiciones medias, contra 350% de incremento en el gasto residual de salidas.

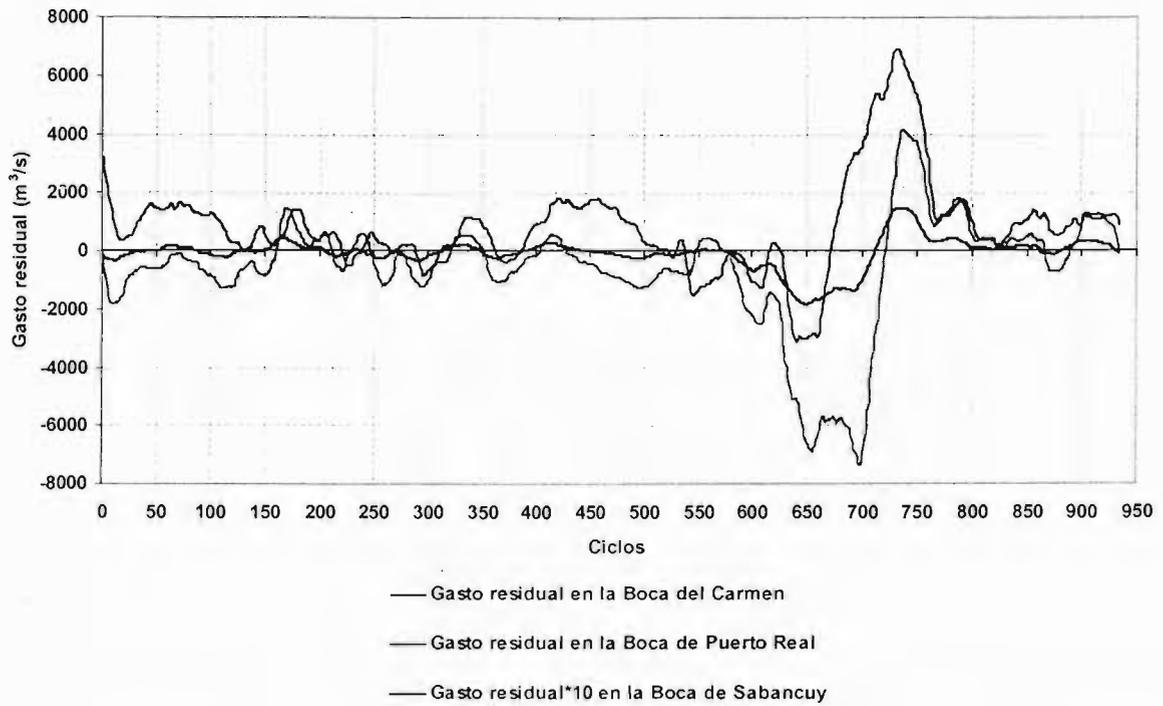


Figura 4. 54 Variación de los gastos residuales en las Bocas de Sabancuy, Puerto Real y Carmen para el mes de Septiembre de 2002, Caso 4.

4.5. CONCLUSIONES HIDRODINÁMICAS.

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos para los casos simulados se puede concluir lo siguiente:

Dadas las dimensiones de las bocas naturales, el patrón de corrientes al interior de la Laguna de Términos está regido principalmente por la interacción que existe entre los prismas de marea de las Bocas del Carmen y Puerto Real. No obstante, la influencia del prisma de marea de la Boca del Carmen predomina e incluso confina y determina el dominio (área del cuerpo de agua que presenta alteración en su comportamiento por el efecto de los cambios hidrodinámicos en la boca oceánica) del prisma de marea de Puerto Real. Con respecto a la Boca artificial de Sabancuy, el patrón hidrodinámico de ésta se encuentra fuertemente afectado por el patrón de corrientes en la Boca de Puerto Real, al mismo tiempo y en menor escala por la capacidad de respuesta del canal artificial que comunica el océano con el Estero de Sabancuy.

En general para condiciones de circulación habituales en la Boca del Carmen predomina el reflujó en tanto que en Puerto Real y Sabancuy domina el flujo. Pero al momento que se presentan modificaciones en el patrón de circulación de la laguna, el régimen hidrodinámico imperante en la Boca del Carmen se mantiene (reflujó), contrario a lo que sucede con la Boca de Puerto Real y por ende Sabancuy. Particularmente, sí el desfase natural de la señal de marea existente entre las bocas varía entre una y otra, la morfología de las Bocas de Puerto Real y Sabancuy se altera.

Ante la presencia del Huracán Isidore el comportamiento de la Boca del Carmen continuó siendo el mismo, es decir, las magnitudes de velocidad en dicha boca se vieron afectadas por este evento pero la tendencia al reflujó se mantuvo. Las Bocas de Puerto Real y Sabancuy en un principio favorecieron la entrada de agua al sistema sin embargo a pesar de esto ambas mantuvieron el régimen de reflujó el tiempo suficiente para que el sistema lagunar regresara a su patrón de circulación habitual.

De lo anterior se presume que la Boca de Carmen presenta mayor resistencia ante un evento como Isidore y que la fluctuación en el comportamiento de las Bocas de Puerto Real y Sabancuy está directamente relacionada con la modificación del comportamiento del sistema lagunar.

De la Boca de Puerto Real se puede decir que está sensiblemente ligada al comportamiento del sistema lagunar, en mayor medida que la Boca del Carmen, al responder en forma distinta ante diferentes condiciones hidrodinámicas. Finalmente la Boca de Sabancuy responde rápidamente ante cualquier alteración en Puerto Real.

Capítulo 5

Estimación de los Tiempos de Residencia

5. ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA

5.1. DEFINICIÓN.

Términos como tiempo de tránsito, tiempo de lanzamiento (inicio de movimiento) o tiempo de residencia son utilizados para describir en una escala de tiempo el transporte o renovación de masa en un estuario o laguna costera.

El tiempo de tránsito (Van de Kreeke, 1983) es el tiempo que permanece una partícula en su posición original (x, y) antes de ser lanzada o removida a un nuevo punto (x', y') , como consecuencia del patrón hidrodinámico generado por la interacción entre la laguna costera y el océano. Al promedio del tiempo de tránsito se le conoce como tiempo de residencia, mientras que el tiempo de lanzamiento es el instante de tiempo en el que cada partícula localizada en el sistema es cambiada de posición.

Los tiempos de residencia se definen entonces como el tiempo promedio que un volumen de agua permanece en su posición hasta ser modificado por los efectos de circulación del propio cuerpo. En general los tiempos de residencia permiten identificar la tasa de renovación de agua como producto del intercambio de marea, corrientes inducidas, la densidad y la circulación residual asociada a la batimetría de la región principalmente.

Una aplicación directa para el estudio de calidad del agua, es la determinación de los tiempos de residencia. Si se trata de observar los índices de contaminación en un cuerpo de agua se deberá asegurar que la concentración de cualquier sustancia o contaminante analizado permanezca por debajo de los valores permitidos, es decir, ésta concentración deberá ser siempre menor a la tasa de renovación de agua del propio sistema.

Debido a que un factor importante en la determinación de los tiempos de residencia es la variación espacial de la concentración dentro de un sistema lagunar, a continuación se presenta primero el modelo de calidad de agua (implementación, resultados y conclusiones), seguido de las metodologías propuestas para la determinación de los tiempos de residencia y finalmente los tiempos de residencia obtenidos para cada caso simulado.

5.2. MODELO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN.

5.2.1. Implementación del modelo

La implementación del modelo de calidad del agua (RMA4) se llevó a cabo considerando que se trata de la mezcla de dos fluidos no homogéneos con valores de densidad distintos. De esta mezcla se obtiene la dilución media de un fluido al descargar en el otro, determinando de esta forma la cantidad relativa de la sustancia descargada en cualquier punto del sistema para cualquier tiempo, es decir la concentración.

Tomando en consideración que el sistema modelado es una laguna costera la cual se comunica con el mar por medio de tres bocas oceánicas (Carmen, Puerto Real y Sabancuy), se asume una condición inicial tal que el fluido que descarga al sistema lagunar es el agua de mar ($1,035 \text{ kg/m}^3$), mientras que el fluido del sistema es agua dulce ($1,000 \text{ kg/m}^3$) proveniente de las descargas de los ríos y escurrimientos.

Para llevar a cabo la implementación del modelo es necesario contar con una adecuada caracterización hidrodinámica (Capítulo 4), ya que este modelo toma como datos de entrada los valores de magnitud y dirección de velocidad así como la variación en la elevación de superficie libre en cada nodo de la malla de cálculo, generada para el modelo hidrodinámico (Figura 3.9). Adicional a estos valores, el modelo de calidad de agua debe de ser dotado de condiciones de concentración iniciales y de frontera.

Tanto las condiciones iniciales como de frontera se determinaron considerando que el objetivo de este trabajo es el de poder estimar los tiempos de residencia en la Laguna de Términos a partir de la modificación y variación en la concentración en diferentes regiones y puntos al interior del cuerpo de agua. Por esta razón al comenzar la simulación se supone que la concentración del agua en todo el cuerpo lagunar corresponde a la concentración de agua dulce mientras que por las bocas oceánicas comienza a entrar agua de mar al sistema.

El valor arbitrario de concentración inicial propuesto en la laguna es de 1 y representa la condición de saturación de agua dulce, mientras que la condición de frontera aplicada en las bocas oceánicas es la concentración de agua de mar y tiene un valor de 0 unidades para todos los escenarios hidrodinámicos simulados.

5.2.2. Resultados del modelo de advección-dispersión.

Con los resultados obtenidos del modelo de calidad de agua se observa la intrusión del agua de mar al interior de la Laguna de Términos así como el área de influencia de la misma dependiendo de las condiciones hidrodinámicas modeladas. A continuación se presenta una breve descripción de los resultados obtenidos para la variación de concentración en la Laguna de Términos.

Dado que un parámetro importante en el cálculo de los tiempos de residencia del agua en sistemas lagunares es la variación de concentración, el análisis de resultados que a continuación se presenta contempla la observación en la variación espacial de las concentraciones medias y mínimas. Al estar afectado este parámetro (concentración) por el patrón hidrodinámico, presenta fluctuaciones en la superficie libre (por efecto de propagación de la onda de marea), por esta razón en este trabajo se analiza espacialmente el valor promedio de concentración para el tiempo simulado. En el caso de los valores mínimos se asume que estos corresponden a la máxima intrusión de agua de mar o máxima capacidad de dilución en la laguna.

5.2.2.1. Análisis de la evolución espacial de las concentraciones medias.

La serie de figuras que a continuación se presenta, constituyen las condiciones de concentración media alcanzadas en el sistema para el periodo de tiempo simulado en las distintas condiciones hidrodinámicas planteadas en el capítulo 4.

La Figura 5. 1 muestra la concentración media registrada para las condiciones hidrodinámicas del caso 1 (marea monocromática y gastos de estiaje). En esta figura se observa que el alcance del agua de mar al interior de la laguna se limita al área de influencia de las bocas oceánicas. La máxima intrusión de agua de mar en el sistema lagunar se presenta en la Boca de Sabancuy, a su vez en esta zona (parte alta del estero) se observa la mayor dilución entre el agua de mar y el agua del sistema lagunar por efecto de los procesos de dispersión principalmente. A pesar de que el mezclado de ambos fluidos en la parte alta del Estero (Noreste) se da en un tiempo relativamente rápido (días), en la parte media de este la dilución se da de forma lenta, al mostrar valores de concentración media de 0.90 unidades. En el caso del cuerpo principal, se observa que la concentración media disminuyó en aproximadamente 20% con respecto a la concentración inicial (1.0 unidades). Un aspecto importante que se observa en la Figura 5. 1 es el hecho de que en la zona Oeste de la laguna, correspondiente a las lagunas adyacentes (Pom, Atasta, Puerto Rico, etc.), la variación en la concentración media es mínima y tiende al valor de concentración inicial (1.0).

Para el caso 2, la variación espacial de concentraciones medias en la Laguna de Términos se presenta en la Figura 5. 2. A diferencia del caso anterior la mayor variación de concentración media se da en la Boca del Carmen, sin embargo como se presenta en la Figura 5. 2 la concentración media en las tres bocas oceánicas es del orden de 0.20 unidades. A su vez en el cuerpo principal de la laguna la dilución de los fluidos se incrementa con respecto a la concentración media del caso 1, observándose variaciones de 0.70 a 80 unidades de concentración. En la Parte alta del Estero de Sabancuy (Noreste) la dilución aumentó, al igual que en la mayor parte de la laguna, con respecto a las concentraciones mostradas en el caso 1, (Figura 5. 1). Para el sistema de pequeñas lagunas (Oeste), se observa la misma situación que en el caso 1, es decir variación prácticamente nula.

Al incluir una señal de marea no uniforme como es el caso de una señal de marea reconstituida, la cual incorpora señales de marea tanto viva como muerta así como la transición entre estas la variación en la concentración media se reduce significativamente, tal como se observa en la Figura 5. 3 en donde la variación en las concentraciones medias al interior del cuerpo principal es poco perceptible (0.85 a 0.90 unidades). Nuevamente las áreas de mayor variación de concentración se ubican en la zona Este del estero de Sabancuy. En las Bocas de Puerto Real y Sabancuy la dilución entre los fluidos es de aproximadamente el 50% en tanto que en la Boca del Carmen esta dilución solo fue del 30%. De igual forma que para los casos anteriores, en las lagunas adyacentes la concentración media se mantiene con valores cercanos a los de la concentración inicial.

Al modificarse el patrón de circulación en la laguna por efecto de la presencia de un fenómeno meteorológico extraordinario como el Huracán Isidore el intercambio de agua entre el mar y la laguna se incrementa y en consecuencia la dilución entre ambos fluidos, tal como se observa en la Figura 5. 4. En esta figura se aprecia que la concentración media en la mayor parte del cuerpo principal de la laguna disminuyó en 30% con respecto a la concentración inicial. En las bocas se observan concentraciones de aproximadamente 0.50 unidades. En el estero, al igual que en el resto del sistema las concentraciones

medias varían entre 0.80 y 0.50 unidades. Finalmente la zona de las lagunas adyacentes mantiene el mismo comportamiento en la variación de concentraciones.

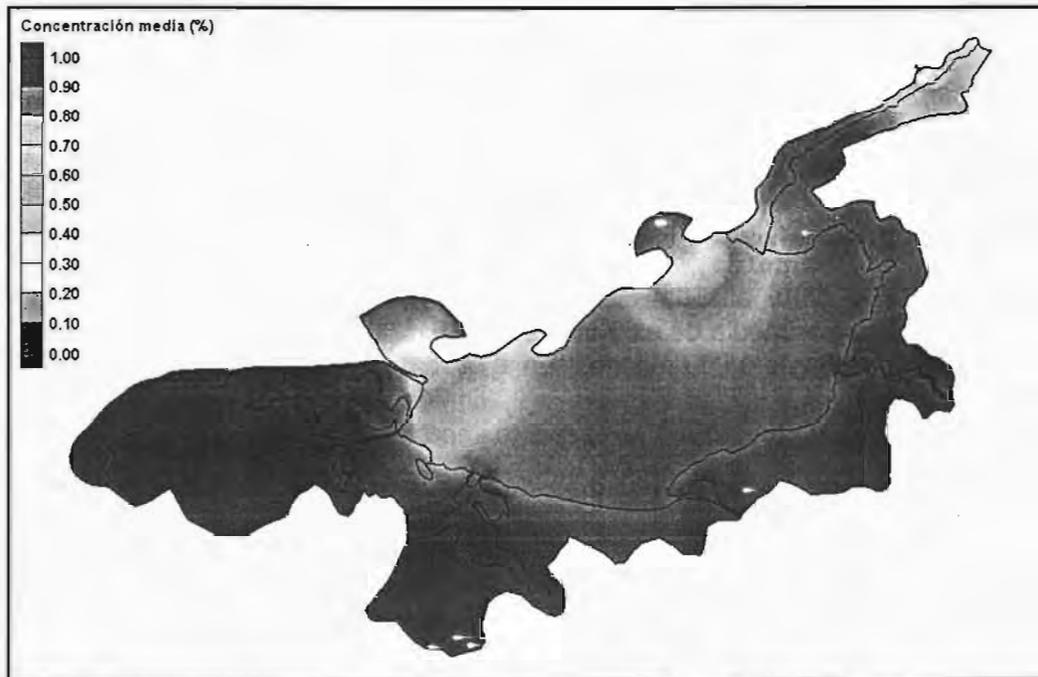


Figura 5. 1 Variación espacial de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 1.

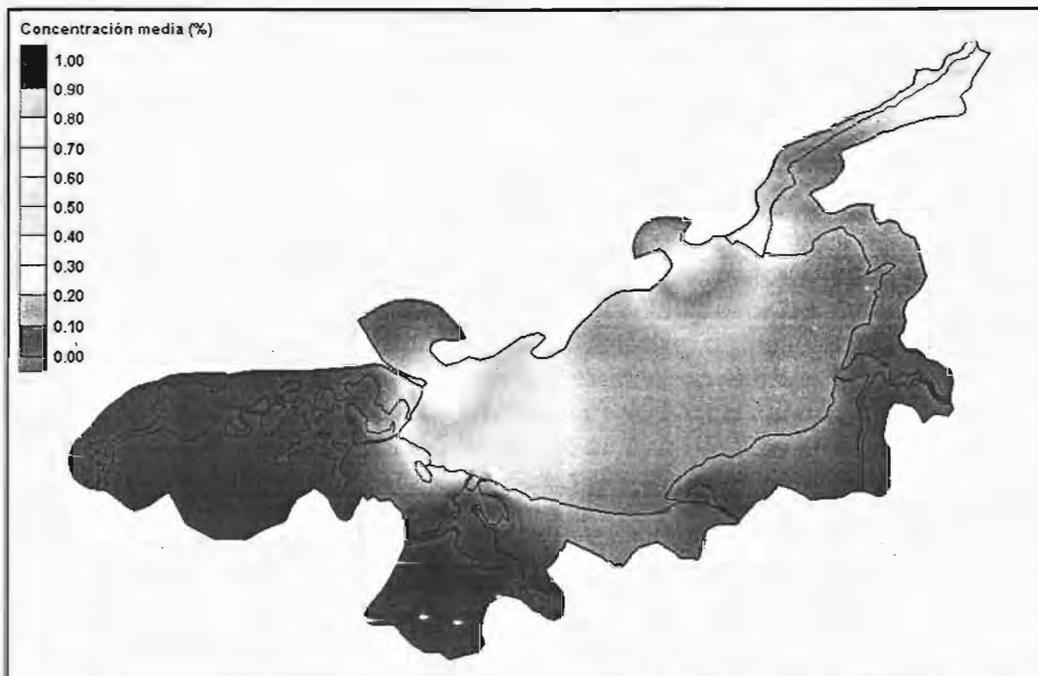


Figura 5. 2 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 2.

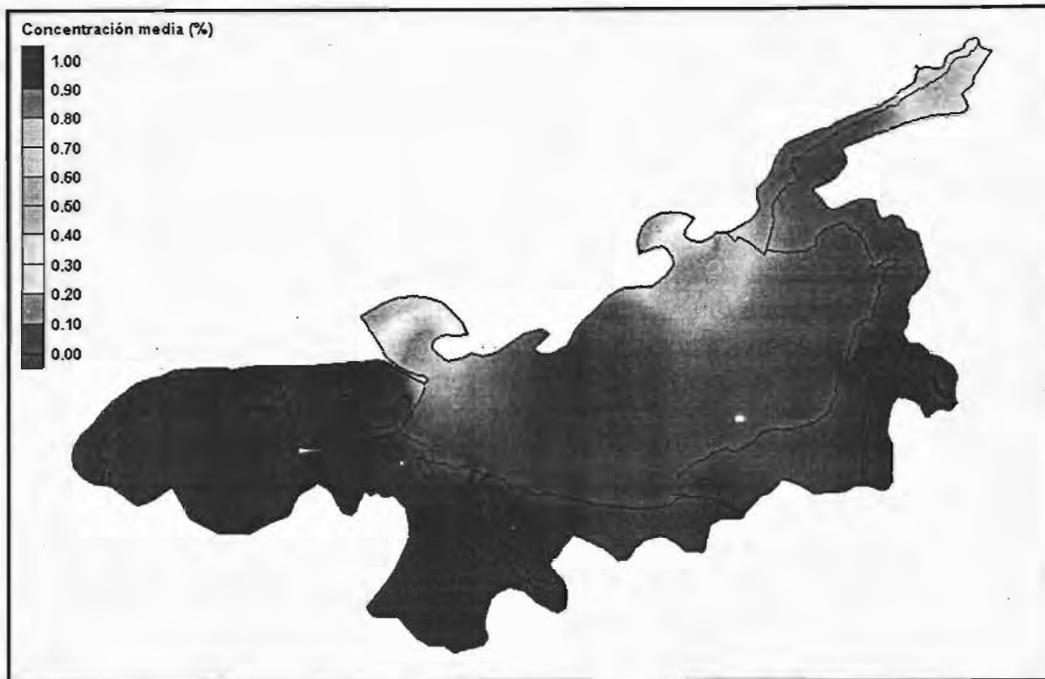


Figura 5. 3 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 3.

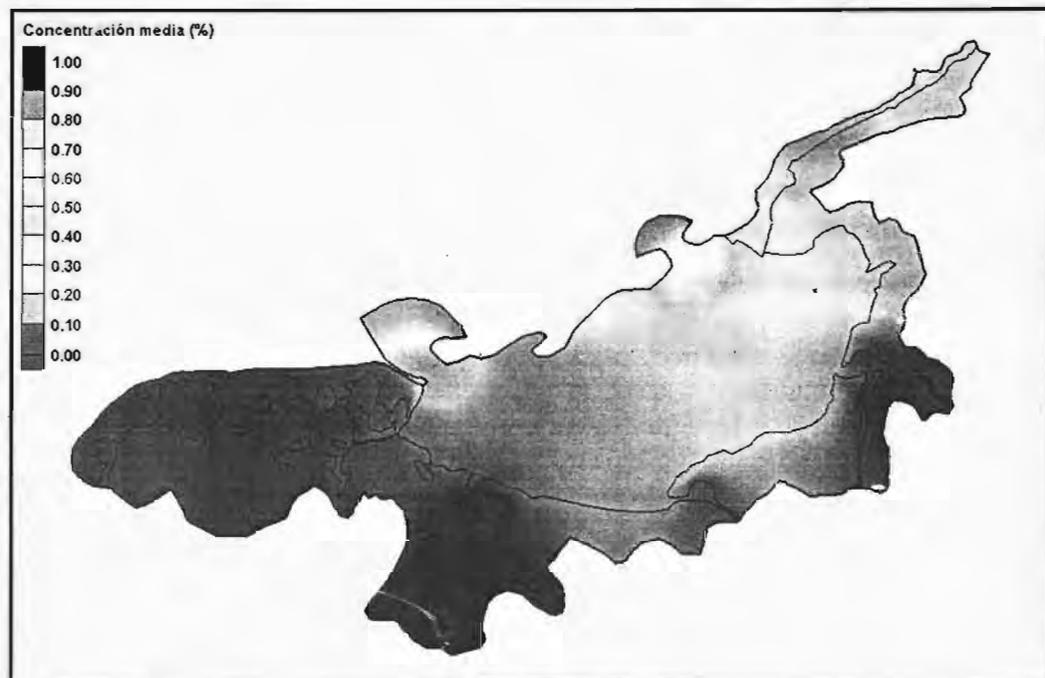


Figura 5. 4 Variación de la concentración media en la Laguna de Términos, caso 4.

5.2.2.2. Análisis de la evolución espacial de las concentraciones mínimas.

Los mapas de variación de concentración mínima que a continuación se presentan corresponden a cada caso simulado y representan el máximo alcance que presentó la concentración "salina" al interior del cuerpo lagunar.

En la Figura 5. 5 se presenta el caso de la evolución de concentraciones mínimas, para la condición de marea monocromática en donde se observa que la dilución por efecto de los procesos de advección-dispersión se da en prácticamente todo el cuerpo (concentraciones mínimas de hasta 0.60 unidades). Con relación a las bocas oceánicas se observa que en Puerto Real y Sabancuy la concentración mínima registrada corresponde a la concentración del agua de mar, mientras que en Carmen la concentración únicamente alcanzó a disminuir 60% con respecto a la concentración inicial. Por otro lado, en el cuerpo principal se tiene que la variación en las concentraciones esta fuertemente influenciada por la variación en Puerto Real. En general, en el estero de Sabancuy la concentración mínima registrada es del 70% de la inicial, a excepción de la parte media de este en donde la concentración mínima es únicamente 20% menor a la inicial. En las lagunas adyacentes la concentración mínima permanece en el rango de 0.9 y 1.0 unidad de concentración.

En la Figura 5. 6 se muestra la variación espacial de concentraciones mínimas para el caso 2. De igual manera que para el caso anterior, la variación de concentraciones mínimas abarca el cuerpo principal de la laguna, sin embargo es la Boca del Carmen la que rige la variación de concentraciones en el cuerpo principal, tal como se observa en la Figura 5. 6. En el estero las concentraciones mínimas registradas oscilan entre 0 y 0.75 unidades, registrando este último valor en la parte media. La región de las pequeñas lagunas permanece en las mismas condiciones del caso anterior.

La Figura 5. 7 representa el caso de la variación de concentraciones mínimas para las condiciones de señal de marea reconstituida del análisis armónico (Caso 3). En esta figura se observa que la capacidad de dilución máxima es muy local, reduciendo el área de mezclado a la zona de las bocas oceánicas. Principalmente la zona de las lagunas adyacentes es la que muestra menores variaciones de concentración, seguida de la parte sur del cuerpo principal de la laguna y la parte media del estero. Bajo este patrón se observa que al menos para el periodo simulado (un mes) el intercambio de masa entre un fluido y otro es limitado a pesar de que la circulación en el cuerpo de agua sea favorable.

En la Figura 5. 8 se muestra la modificación en las concentraciones mínimas generada por el Huracán Isidore. De esta figura se observa que la capacidad de dilución del sistema se incrementó hasta el 70% en las zonas influenciadas por la Boca de Puerto Real. En las tres bocas la concentración mínima corresponde a la de agua de mar. En el estero la respuesta ante este fenómeno se observa sobre todo en los valores de concentración para la parte media de este (0.70 unidades). Sin embargo, en la zona de las lagunas adyacentes la modificación en las concentraciones mínimas se aprecia únicamente en la parte que comunica a estas con el cuerpo principal de la laguna.

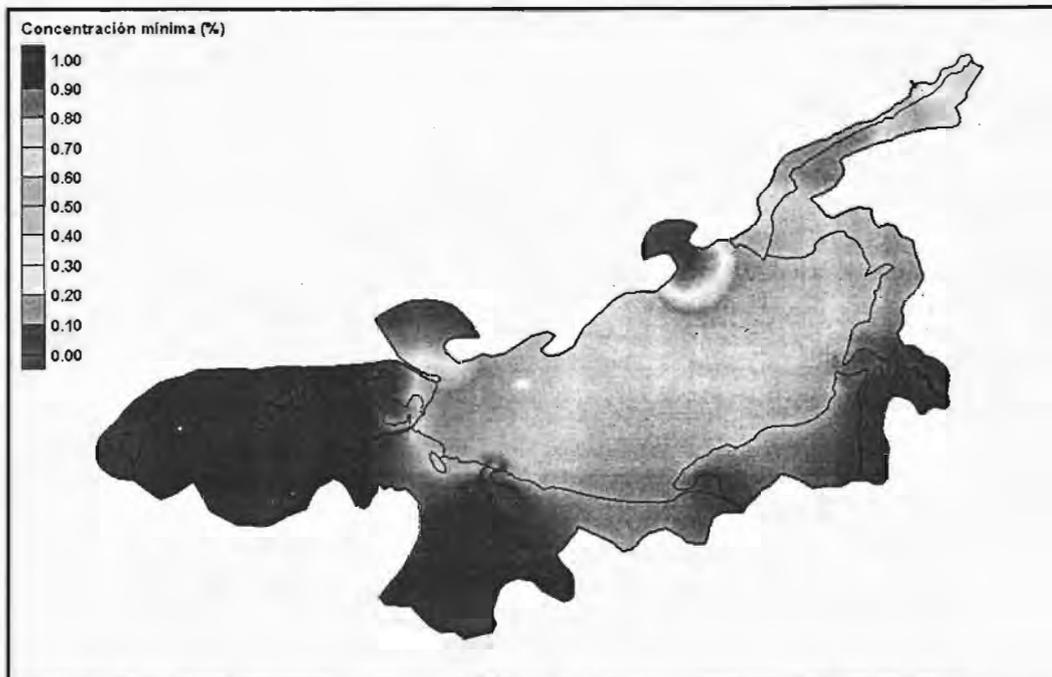


Figura 5. 5 Variación de concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 1

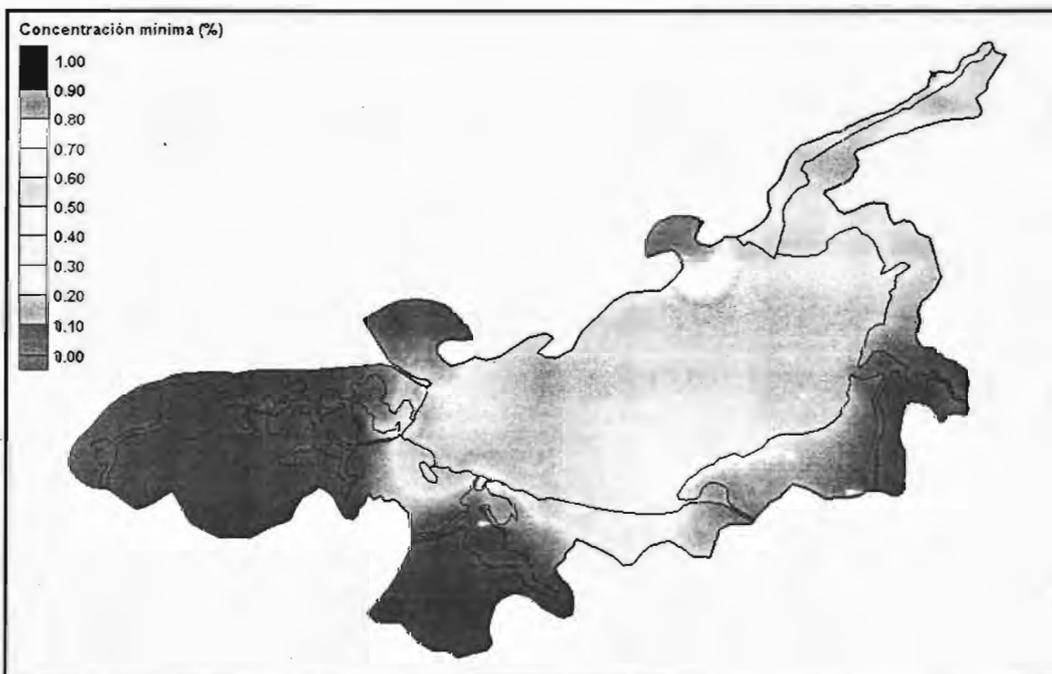


Figura 5. 6 Variación de concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 2.

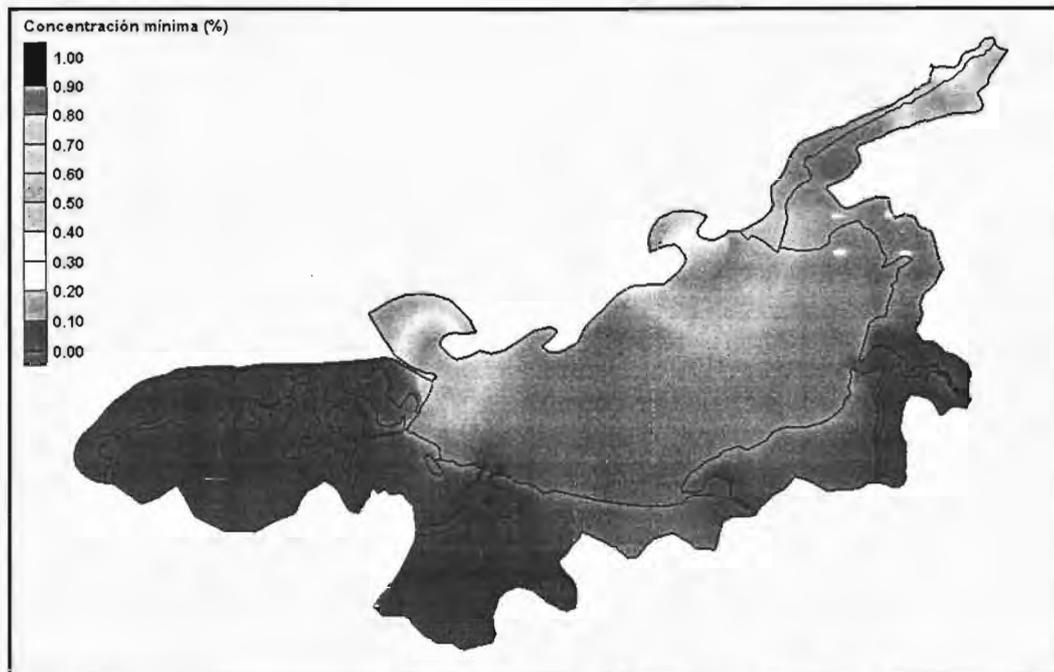


Figura 5. 7 Variación de las concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 3.

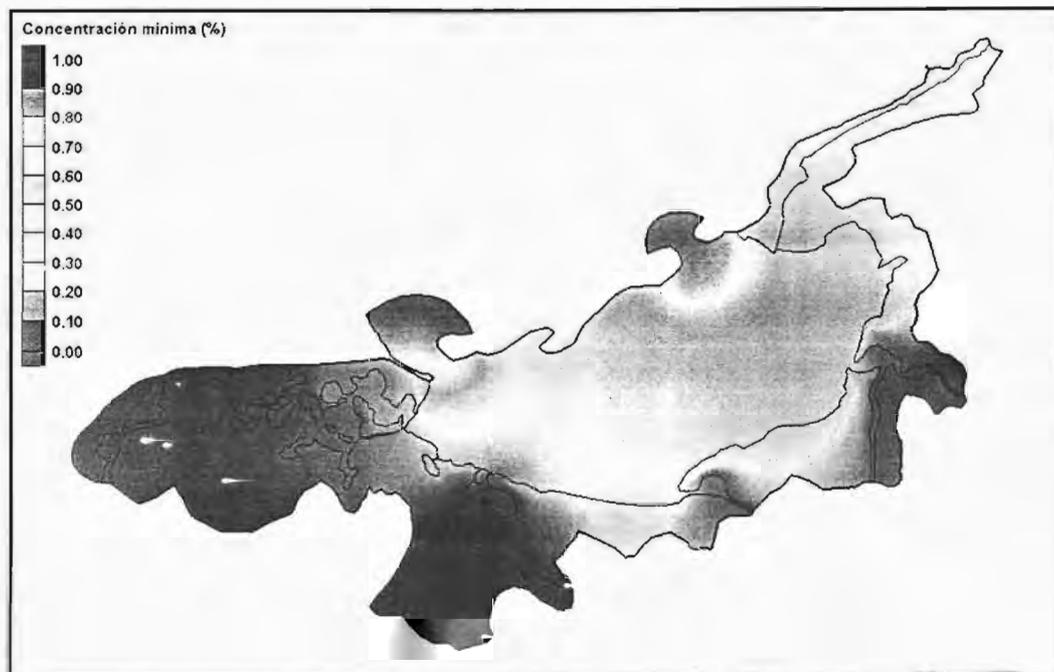


Figura 5. 8 Variación de las concentraciones mínimas en la Laguna de Términos, caso 4.

5.2.3. Conclusiones del modelo de advección-dispersión

De la observación del comportamiento en la evolución de la concentración al interior de laguna para condiciones medias y mínimas se tiene que, la capacidad de dilución entre un fluido y otro esta reducida al área de interacción directa entre las bocas oceánicas y el cuerpo principal de la laguna, al ser las zonas de intercambio y renovación más alta.

Para condiciones normales y extraordinarias de circulación, la modificación en la concentración en el cuerpo principal esta fuertemente ligada con la variación en la Boca de Puerto Real. Si se presentara un patrón de corrientes como el mostrado en el caso 2, el cual incorpora la variación de fases y amplitudes entre cada boca, entonces la dilución de los fluidos se vería favorecida al aumentar considerablemente con respecto a los casos restantes. En esta misma situación, es la Boca del Carmen la que rige el patrón de variación de concentraciones.

Particularmente, para el caso en el que se tienen los efectos de un evento meteorológico, la capacidad de dilución entre el agua de mar y la laguna aumenta considerablemente, sin embargo el área de afectación generada por este fenómeno permanece similar al área registrada en condiciones normales de circulación (caso 3).

Es notable el comportamiento que muestra la variación en la evolución de las concentraciones en la parte Este del estero, ya que independientemente de cual sea el patrón de corrientes en esta zona es en donde se observa la mayor capacidad de dilución. Por lo tanto, dado que las velocidades en esa zona son muy bajas, del orden de 0.001 m.s^{-1} , es probable que el proceso dominante para el mezclado sea la dispersión/difusión y no la advección.

A diferencia del estero, la región de las lagunas adyacentes (Pom y Atasta entre otras), no muestra modificación aparente en las concentraciones para cualquier escenario simulado, a pesar de que como adelante se observará la circulación en esta zona esta ligada con el patrón de circulación del cuerpo principal.

5.3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA.

Para la obtención de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos se implementaron dos metodologías, la primera se basa fundamentalmente en el análisis de la variación de concentraciones, mientras que la segunda incorpora además el gasto que pasa a través de la sección y el prisma de marea. La implementación de una u otra depende de los resultados obtenidos del modelo de advección-dispersión.

5.3.1. Metodología propuesta por Thomann y Mueller, 1987.

Una forma de estimar los tiempos de residencia en estuarios y lagunas costeras puede ser por medio del análisis del comportamiento de la variación de concentración en el tiempo, tal como proponen Thomann y Mueller, (1987). Suponiendo que para el tiempo $t = 0$ se introduce en el sistema una cantidad de masa, con un mezclado uniforme en todo el dominio y que la concentración de masa que sale o entrada del sistema debe ser igual a la concentración de masa en cualquier punto localizado en el interior del cuerpo estudiado.

Adicionalmente se tiene que:

- La cantidad de masa que se inyecta al sistema en el tiempo $t = 0$ tiene una concentración conocida, denominada concentración inicial, C_0
- Después del tiempo $t = 0$, no se incorpora masa al interior del sistema
- El flujo y volumen permanecen constantes en el tiempo

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la concentración en el cuerpo analizado es:

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad (5.1)$$

Con $k = \frac{Q}{V}$, en donde Q es la cantidad de agua que entra al sistema en un periodo de tiempo y V es el volumen del cuerpo de agua.

Atendiendo la definición propuesta por Fischer (Fischer, et al., 1979) en donde dice que el tiempo de residencia es el tiempo que un volumen de agua permanece dentro del sistema hasta ser remplazado por agua proveniente del exterior a consecuencia de los efectos de circulación se tiene que:

$$tr = \frac{V}{Q} \quad (5.2)$$

entonces,

$$k = \frac{1}{tr} \quad (5.3)$$

Al sustituir la Ecuación 5.3 en la Ecuación 5.1, se obtiene la variación de la concentración en función del tiempo y de los tiempos de residencia en cada punto ubicado dentro del cuerpo de agua (Ecuación 5.4).

$$C(t) = C_0 e^{-t/tr} \quad (5.4)$$

A partir de esta Ecuación 5.4 puede ser obtenido el valor de los tiempos de residencia por medio de una regresión lineal en el tiempo para las concentraciones, por lo que esta ecuación se rescribe de la siguiente manera:

$$\ln C(t) = \left(-\frac{t}{tr} \right) + \ln C_0 \quad (5.5)$$

De esta forma se conocen los tiempos de residencia (tr) en cualquier punto del sistema analizado. A pesar de que la definición de tiempos de residencia implica una renovación completa del volumen de agua en el sistema, la solución del modelo es una curva exponencial que refleja el tiempo medio que la concentración de masa inicial permanece dentro del sistema para el tiempo $t = tr$.

Como la metodología propuesta por Thomann y Mueller (Thomann and Mueller, 1987) para la estimación de los tiempos de residencia se basa en la variación de las concentraciones en el tiempo, en zonas en donde la variación sea imperceptible, ésta no puede ser aplicada.

5.3.2. Metodología propuesta por Van de Kreeke, 1988.

La metodología propuesta por Van de Kreeke (1988), al igual que la de Thomann y Mueller (1987) toma como base la definición de tiempo de residencia que presentan Fischer et. al., (1979).

Van de Kreeke (1988) supone que los tiempos de residencia están directamente relacionados con el volumen de concentración media e inversamente proporcionales a la cantidad de masa que entra al sistema en un periodo de tiempo (ciclo de marea). El valor de tiempo de residencia propuesto por Van de Kreeke (1988) toma en cuenta además los efectos de circulación generados por la influencia de la señal de marea y la capacidad de dilución entre ambos fluidos.

$$tr = \frac{V}{Q} \frac{C_0 - \bar{C}}{C_0} \quad (5.6)$$

donde V corresponde al prisma de marea, Q es el gasto que pasa a través de la sección analizada, C_0 la concentración inicial, \bar{C} la concentración media, T el tiempo.

Debido a que los tiempos de residencia son inversamente proporcionales al gasto de flujo y que este a su vez esta en función del orden de velocidades, esta metodología sólo es aplicable a secciones en donde el orden de magnitudes de corrientes sea mayor o igual a

0.01 m.s⁻¹, para valores menores a esta velocidad, los tiempos de residencia no pueden ser calculados aplicando esta metodología.

Una vez aplicada la metodología correspondiente se obtendrán los tiempos de residencia (*tr*) identificando con esto, las zonas de baja y alta renovación.

5.4. RESULTADOS DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.

Del análisis de resultados en la variación de la concentración en la Laguna de Términos se observó que existen zonas en las que la evolución de la concentración está regida por procesos de dispersión como es el caso del Estero de Sabancuy. Adicionalmente, existen zonas como las lagunas adyacentes (Puerto Rico, Pom, Atasta, etc) en donde ésta variación es mínima a pesar de existir en ellas un patrón de corrientes favorable a la circulación en los cuerpos de agua. Por estas razones, la determinación de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos se realizó aplicando las dos diferentes metodologías propuestas en la sección anterior, respondiendo a las condiciones antes planteadas dependiendo del comportamiento en la variación de la concentración o en la diferencia de velocidades.

Para las zonas en las que la variación de concentración es notable (cuerpo principal y estero), se aplicó la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), ya que como se observó esta metodología está en función de la variación de dicho parámetro. En el caso de las zonas que muestran poca variación en la concentración (zona occidental, lagunas adyacentes), se utilizó la metodología propuesta por Van de Kreeke (1988), ya que ésta incorpora parámetros como el prisma de marea, gasto medio y variación en la concentración.

En la aplicación de la metodología de Thomann y Mueller, (1987), se seleccionaron siete puntos distribuidos en el cuerpo principal de la laguna y cuatro a lo largo del estero. En el caso de la metodología de Van de Kreeke, dado que involucra el gasto de entrada se propusieron cinco secciones alojadas a lo largo del sistema de lagunas.

En la Figura 5. 9 se muestran los puntos de control propuestos para la determinación de los tiempos de residencia en el cuerpo principal y estero. Los puntos P-1, P-2 y P-9 corresponden a puntos localizados en las bocas oceánicas. Los puntos P-3, P-4, P-5, P-6 y P-7 se encuentran ubicados en el cuerpo principal de la Laguna de Términos. En el Estero de Sabancuy se colocaron los puntos P-8, P-10 y P-11.

La ubicación de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas occidentales se presenta en la Figura 5. 10, en esta figura se observa que la sección de control S-1 se encuentra en la zona que comunica al sistema de lagunas con el cuerpo principal (Boca de Atasta), la sección S-2 forma parte de la Laguna de Puerto Rico. Las secciones S-3 y S-4 están ubicadas en los canales que comunican la Laguna de Puerto Rico con la Laguna de Atasta. La última sección se ubica entre las lagunas de Pom y Atasta, S-5.

En el caso del análisis de los tiempos de residencia en donde se aplica la metodología propuesta por Thomann y Mueller, (1987), para cada escenario simulado se presenta una gráfica en donde se muestran las curvas de variación de concentración en cada punto. Adicionalmente en cada gráfica se incluye la curva $C(tr)$, la cual representa el valor de la concentración cuando el tiempo t es igual al tiempo de residencia tr , de donde el tiempo de residencia en cada punto observado corresponde al tiempo para el que las curvas de

concentración interceptan dicha curva. Adicionalmente se presentan los mapas de tiempo de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy.

Como la metodología propuesta por Van de Kreeke supone que los tiempos de residencia están afectados por el gasto que pasa a través de la sección de control, el prisma de marea y la concentración media en este punto, el análisis de resultados aplicando esta metodología se realizó presentando los mapas de concentración media en las lagunas adyacentes así como la variación de los gastos en el periodo de tiempo simulado.

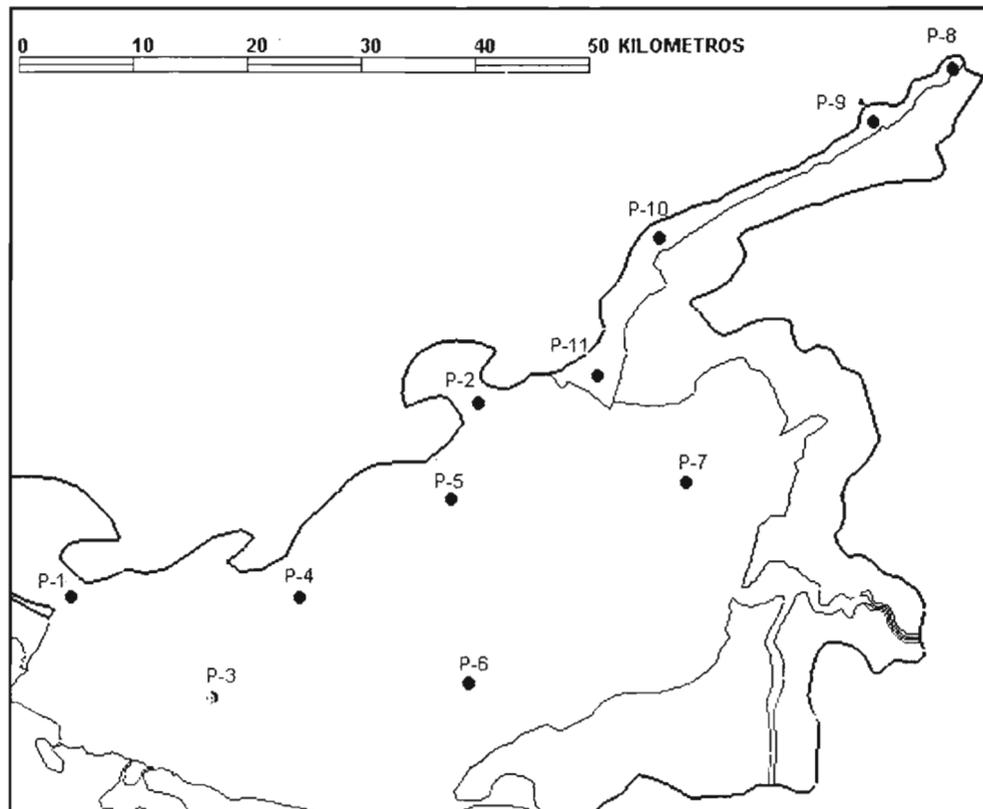


Figura 5. 9 Localización de los puntos de control en la Laguna de Términos para la determinación de los tiempos de residencia.

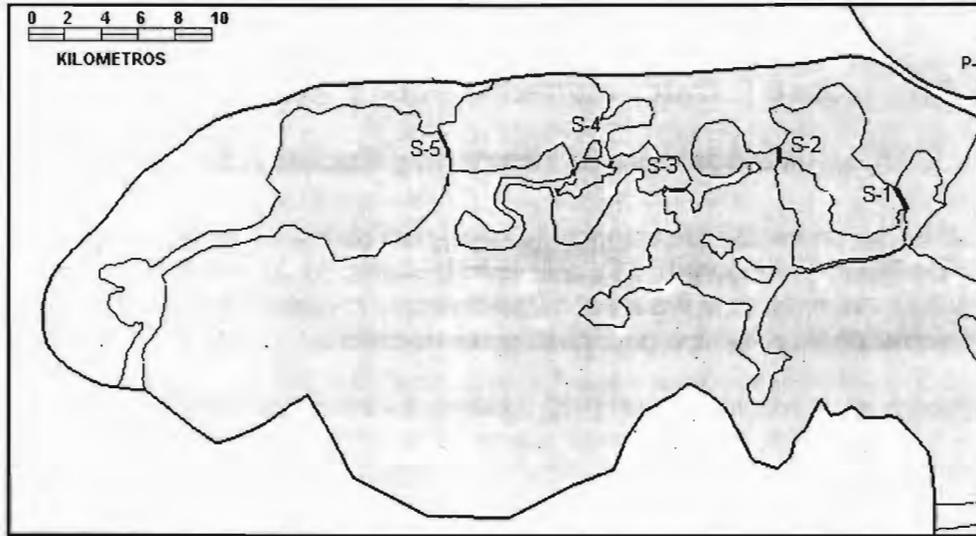


Figura 5. 10 Localización de las secciones de control propuestas para la determinación de los tiempos de residencia en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos.

5.4.1. Caso 1. Marea monocromática y gastos de estiaje.

5.4.1.1. Metodología de Thomann y Mueller (1987).

A continuación se presentan los tiempos de residencia obtenidos en el cuerpo principal de la Laguna de Términos (Figura 5. 11), aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987). Además en la Figura 5. 12 se presenta la curva de tendencia de variación de la concentración en el tiempo para cada punto de control.

Adicionalmente en la misma Figura 5. 12, la línea horizontal representa la concentración registrada para el tiempo $t = tr$, misma que se obtiene de sustituir $t = tr$ en la Ecuación 5.4, es decir $C(tr) = C_0 e^{-1}$.

De la Figura 5. 11 se observa que la variación de los tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos está determinada por las bocas oceánicas. Los menores tr se presentan en las bocas oceánicas, mientras que los mayores se presentan en las zonas más alejadas de estas en el caso del cuerpo principal y en las áreas de escasa circulación en el caso del Estero de Sabancuy.

La distribución de los tr está en función de la capacidad de renovación de las bocas oceánicas, por esta razón los tiempos de residencia del área de dominio de Puerto Real son menores que los tr registrados en el área de influencia de Carmen.

Al analizar el comportamiento de los tiempos de residencia en los puntos de control localizados en el cuerpo principal y estero, en la Figura 5. 12 se observa la existencia de cuatro diferentes intervalos de tiempo de residencia o grupos de curvas, los que dependen de la posición del punto observado, tal como se mencionó anteriormente. Como se aprecia en la Figura 5. 12, el primer intervalo corresponde a los tiempos de residencia en las bocas (P-9, P-2, P-1), además del punto de control P-5, en donde estos tiempos son menores a un mes (720 horas). El segundo intervalo de tiempos de residencia (1 a 2 meses) se presenta en los extremos del Estero de Sabancuy, (puntos de control P-8 y P-11) y la zona de interacción entre el cuerpo principal y las bocas oceánicas. El tercer intervalo de tiempos de residencia se presenta en el cuerpo principal de la Laguna de Términos, oscila entre 2.5 y 5.5 meses (1800 a 3900 horas). En último lugar, los tiempos de residencia más altos se presentan en la parte media del Estero de Sabancuy y la zona de la desembocadura del río Chumpán, y son de 8 meses (5800 horas).

Los menores tiempos de residencia (como se esperaba), se registraron en las bocas oceánicas ya que en estas regiones en donde se tiene el mayor intercambio entre el mar y la laguna. El valor del parámetro tr , obtenido en los puntos P-5 y P-11 es resultado de la cercanía de estos con la Boca de Puerto Real (8 km y 11 km), además debe recordarse que en la Boca de Puerto Real es donde se presenta el mayor cambio de concentración. En el caso de los puntos de control P-8 y P-10, los tr están asociados al volumen de dilución por efectos de la dispersión principalmente. Los valores de tr en los puntos alojados en el cuerpo principal de la laguna (P-3, P-4, P-6, P-7) están determinados por los procesos de advección-dispersión así como por la dilución en el cuerpo de agua.

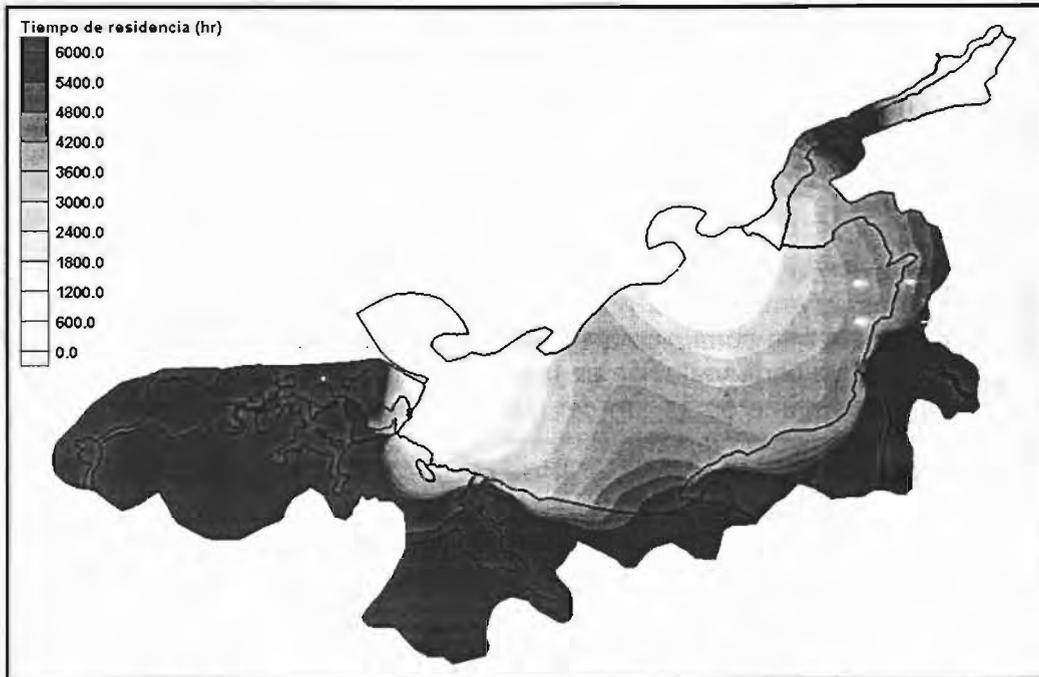


Figura 5. 11 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 1.

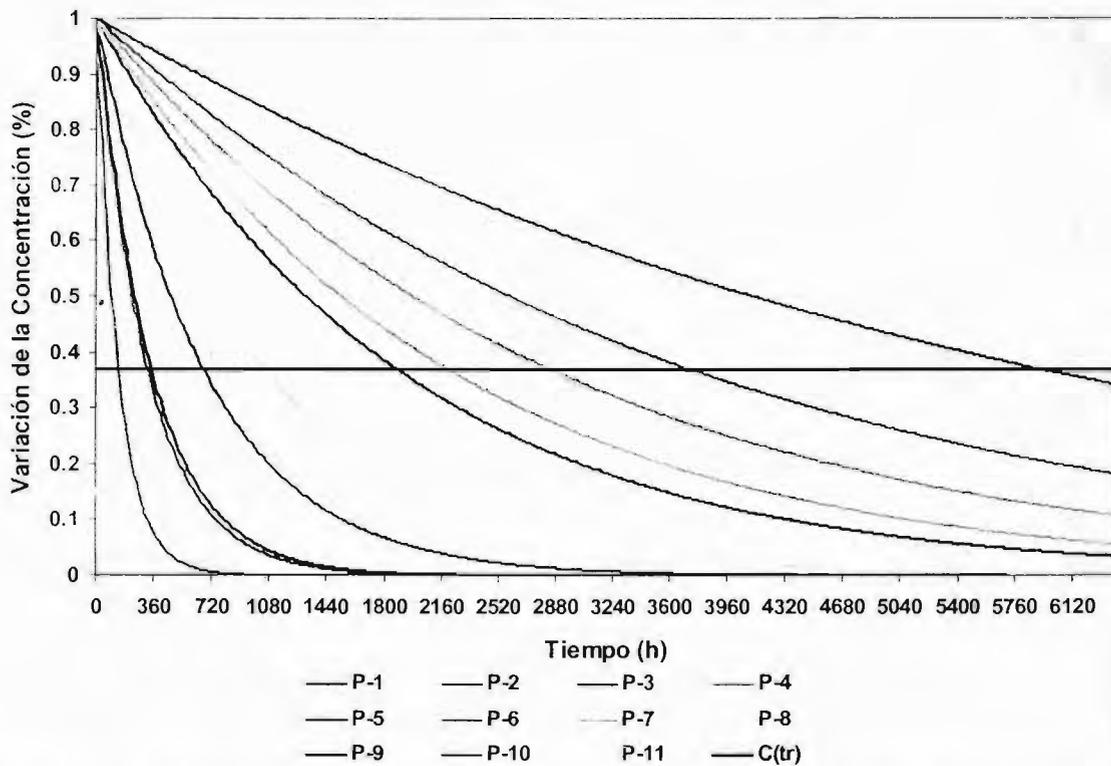


Figura 5. 12 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 1.

5.4.1.2. Metodología de Van de Kreeke, 1988.

El volumen de flujo en la Boca del Carmen, es de $4.86 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ para el periodo de tiempo simulado (19 días).

Como se muestra en la Figura 5. 13, la variación de concentraciones medias en el sistema de lagunas adyacentes es prácticamente nula. En esta figura se aprecia que únicamente en la zona que comunica al sistema de lagunas con el cuerpo principal de la Laguna de Términos se tiene variación en la concentración media, oscilando entre 0.85 y 0.99 unidades, en los primeros 11 km del sistema lagunar. En el resto del sistema (40 kilómetros aproximadamente), la variación espacial de las concentraciones medias oscila entre 0.99 y 1.0 unidades, por lo que en la mayor parte del sistema de lagunas la modificación de concentración es imperceptible, al menos para este periodo de tiempo y condiciones de simulación.

Otro parámetro importante en la determinación de los tiempos de residencia es el gasto medio que pasa a través de las secciones de control analizadas, por lo que en la Figura 5. 14 se presenta la variación de los gastos en las secciones de control distribuidas en las lagunas adyacentes. De la Figura 5. 14 se observa que los gastos de flujo que pasan a través de las secciones oscilan entre $50 \text{ y } 250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mientras que los de reflujos van de $100 \text{ a } 320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

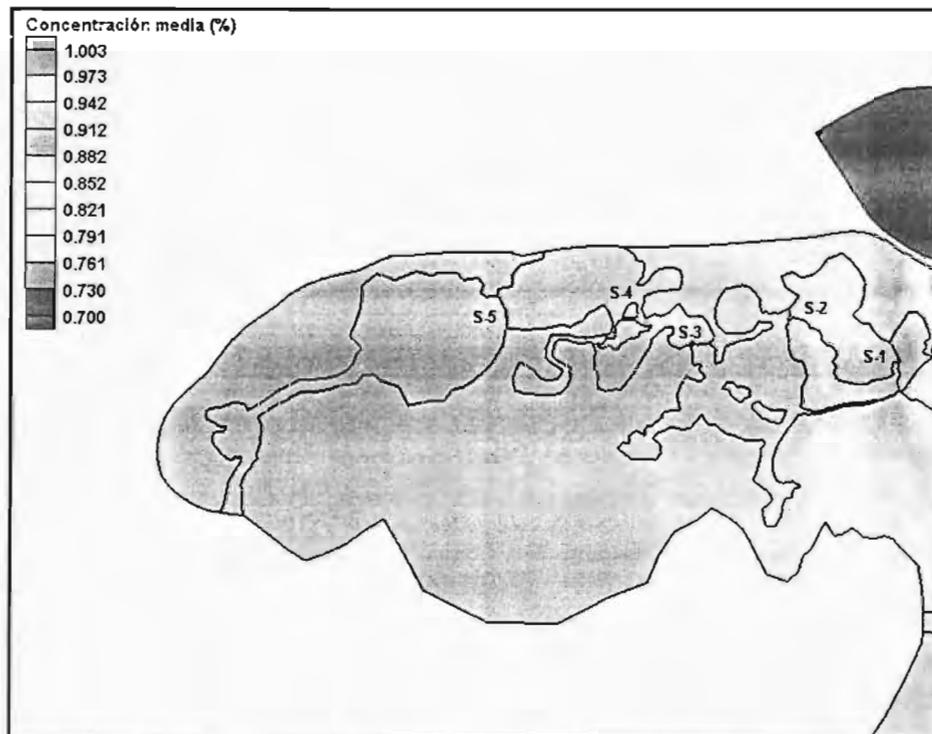


Figura 5. 13 Variación espacial de la concentración media en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.

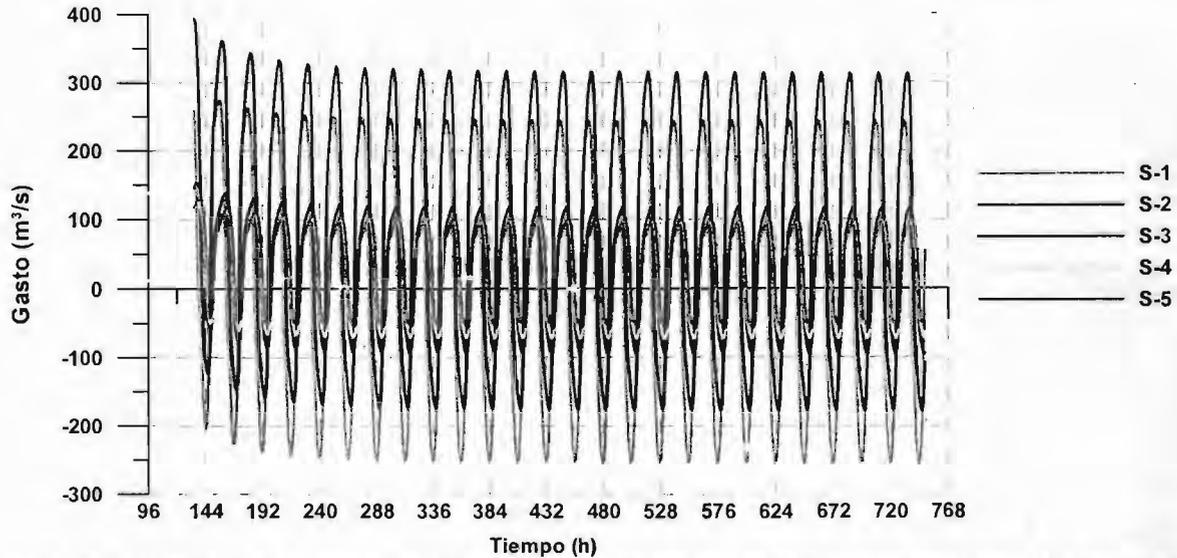


Figura 5. 14 Gasto que pasa a través de las secciones de control distribuidas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.

La Tabla 5. 1 presenta los valores de gasto y concentración media en cada sección de control, así como los tiempos de residencia obtenidos a partir de estos parámetros aplicando la metodología propuesta por Van de Kreeke en 1988.

Tabla 5. 1 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 1.

Sección de control	Q_m $m^3 \cdot s^{-1}$	$C(t)_m$ (%)	tr		
			(s)	(días)	(meses)
S-1	170.24	0.85838	24516256	284	9
S-2	124.54	0.99117	38696500	448	15
S-3	66.57	0.99982	73025447	845	28
S-4	51.64	0.99998	94162075	1090	36
S-5	43.43	1.00000	111961943	1296	43

Q_m Gasto medio

$C(t)_m$ Concentración media

De los gastos medios que pasan a través de las secciones de control distribuidas a lo largo del sistema de lagunas adyacentes se observa que tanto el mayor como el menor gasto transportado corresponde únicamente al 2.5% y 0.65% del gasto que pasa por la Boca del Carmen. Estos valores pertenecen a las secciones de control S-1 y S-5.

Con respecto a las concentraciones medias en las secciones de control se aprecia que efectivamente la modificación de estas con respecto al valor inicial es prácticamente nula, con excepción de la sección de control S-1 ya que esta sección es la más cercana al cuerpo principal por lo que el comportamiento de esta sección está ligado al del cuerpo principal.

En la Tabla 5. 1 se presentan los tiempos de residencia obtenidos en cada sección de control, en esta tabla se observa que en la sección más cercana al cuerpo principal (S-1), los tr son del orden de meses mientras que en el resto de las secciones observadas, la variación en los tr es de años.

De la observación de los t_r se tiene que existen dos escalas de tiempos de residencia claramente definidas en el sistema de lagunas adyacentes. Estas escalas de tiempo determinan o muestran en cierta medida el área de interacción o influencia directa del cuerpo principal con el sistema de lagunas. La distancia que existe entre la sección de control S-1 y el cuerpo principal es de aproximadamente 2 kilómetros, (9 kilómetros de distancia entre S-1 y P-1), a pesar de esta distancia, la hidrodinámica en esta sección está relacionada con el patrón de circulación de la laguna principal, por esta razón, en esta sección se presentan mayores modificaciones en las concentraciones con respecto al resto de las secciones. A su vez esta situación se refleja en el valor de los t_r (9 meses).

A diferencia de la sección de control S-1, en el resto de las secciones analizadas los t_r son de años. Por un lado la influencia del patrón de circulación del cuerpo principal en esta zona es reducida, de acuerdo al valor de gastos medios mostrados en la Tabla 5. 1 el orden de velocidades en las 5 secciones de control varía desde 0.20 hasta 0.02 m.s⁻¹ desde la sección S-1 a la S-5. Si además se considera que la distancia que existe entre estas secciones es de aproximadamente 40 km, se llega a la conclusión de que la escasa variación en las concentraciones es atribuida a este patrón de circulación, situación que se traduce en un aumento en los t_r a medida que aumenta la distancia entre la entrada al sistema de lagunas y la sección analizada.

Finalmente, de la Tabla 5. 1 se tiene que el tiempo de permanencia del fluido antes de ser modificado debido al patrón de circulación de la Laguna de Términos, fluctúa de nueve meses en la sección de control S-1 (Boca de Atasta) hasta tres años y medio en la sección S-5 localizada entre las Lagunas de Pom y Atasta.

5.4.2. Caso 2. Marea reconstituida con distorsión en la fase y amplitud con gastos de estiaje.

5.4.2.1. Metodología de Thomann y Mueller (1987).

Al cambiar las condiciones hidrodinámicas en la laguna, el dominio de la Boca del Carmen se incremento a tal grado que el patrón de variación de concentración, al menos en las zonas cercanas o con influencia de esta boca se acelera, generando con esto una disminución importante en los tiempos de residencia en prácticamente todo el sistema lagunar, tal como se observa en la Figura 5. 15.

La capacidad de dilución en la Boca del Carmen aumentó al acelerarse los procesos advectivos en esta región, esta circunstancia generó a su vez una disminución en la capacidad de dilución en la Boca de Puerto Real, situación que se refleja en el aumento en los t_r en el área de dominio de esta boca.

A pesar de la disminución de los t_r en la Boca del Carmen, los t_r en Puerto Real siguen siendo menores, (234 y 212 horas, es decir 10 y 9 días en Carmen y Puerto Real, respectivamente), el comportamiento en la Boca de Sabancuy no presentó mayores modificaciones, en esta región los t_r registrados son de 488 horas que corresponden a 20 días.

La zona de transición e intercambio entre las bocas y el cuerpo principal aumentó en el caso de la Boca del Carmen, por lo que como se observa en la Figura 5. 16, en el punto de control P-3 disminuyeron los tr y al igual que en los puntos P-5, P-8 y P-11 los tr son del orden de mes y medio.

En los puntos restantes los tr aumentaron, en caso del punto P-4 el valor es de 2.5 meses, en el P-7 de 3.5 meses y en P-6 de 4.5 meses. Si únicamente se observan los puntos de control P-3, P-4, P-5, P-6 y P-7, se tiene que los tr oscilan entre 1.5 y 4.5 meses en el cuerpo principal de la laguna.

En el caso de la parte central del Estero de Sabancuy, se observa que en el punto de control P-10 los tr permanecen del mismo orden que para el caso anterior (247 días).

A diferencia del caso anterior, los tr en la desembocadura del río Chumpán son del orden de 3600 horas (5 meses) por el incremento en la influencia de la Boca del Carmen.

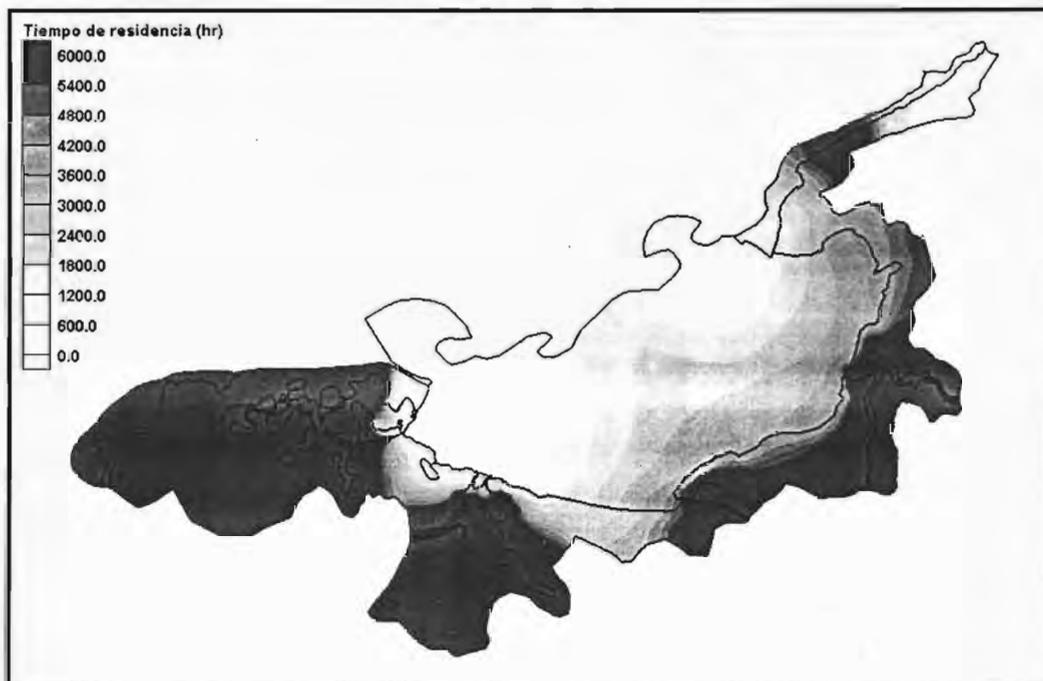


Figura 5. 15 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 2.

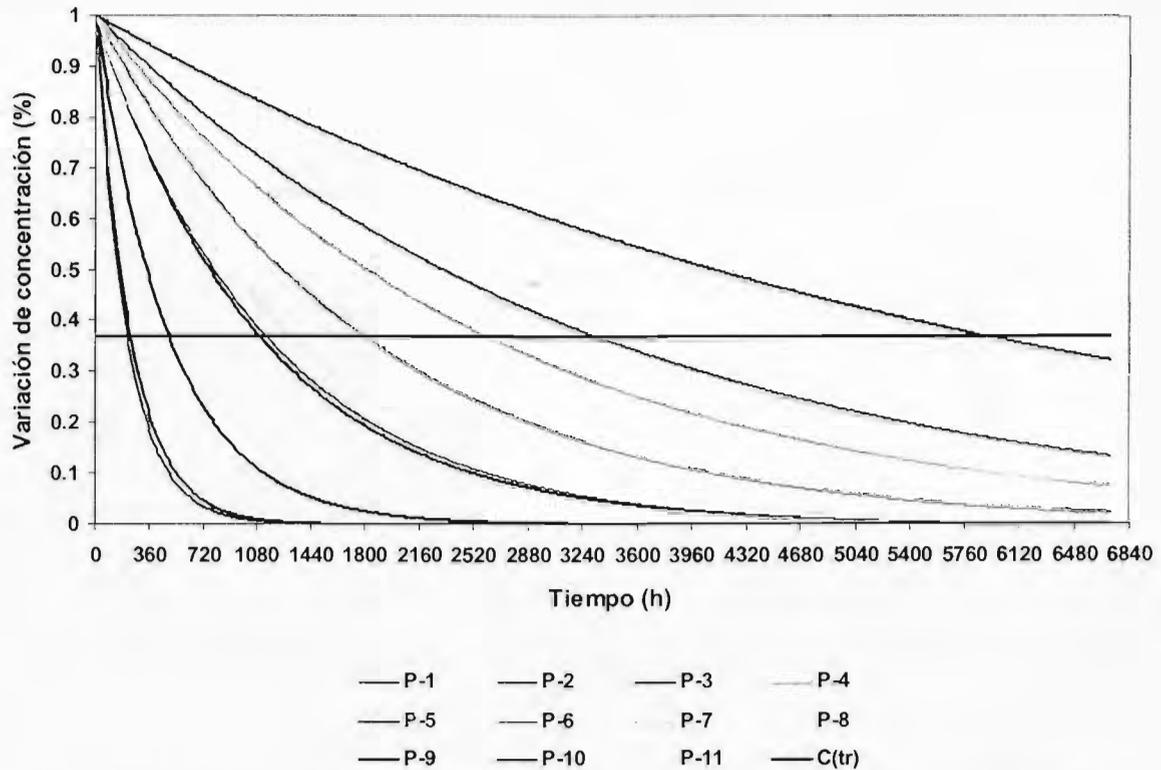


Figura 5. 16 Variación de la concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 2.

5.4.2.2. Metodología de Van de Kreeke, 1988.

Para este caso el tiempo de simulación corresponde a 23 días y durante este periodo de tiempo el volumen de flujo en la Boca del Carmen es de $4.36 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

La variación en las concentraciones se muestra en la Figura 5. 17, en donde se observa una mayor modificación espacial en las concentraciones con respecto al caso anterior (Caso 1). Esta modificación influye hasta la región la Laguna de Puerto Rico, sección de control S-2, pero a partir de esta región y hasta la parte más alejada el comportamiento en variación se mantiene como en el caso anterior (cercano al valor inicial).

Los gastos que pasan a través de las secciones de control se presentan en la Figura 5. 18. En las secciones de control analizadas se observa que los gastos de refluo son mayores que los de flujo a excepción de la sección S-1 en donde son del mismo orden. Al igual que para el caso anterior, las magnitudes de velocidad en el sistema disminuyen en un orden de magnitud, de la sección S-1 ($0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a la sección S-5 ($0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Los gastos de flujo en este caso se mantienen del mismo orden que para el caso 1, con respecto a los gastos de refluo estos disminuyeron en las primeras dos secciones de control, pero en las tres restantes permanecieron constantes.

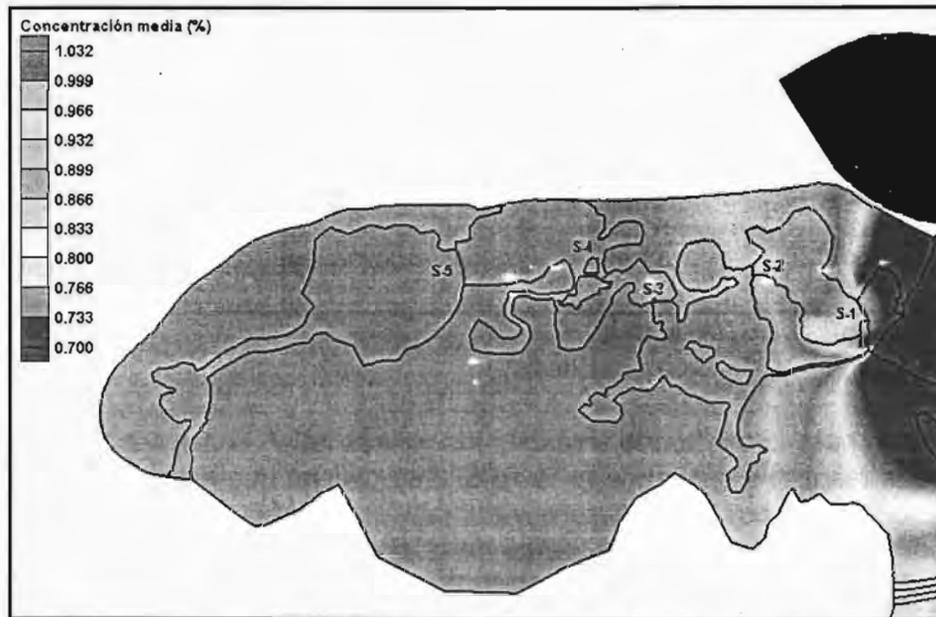


Figura 5. 17 Variación espacial de la concentración en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2.

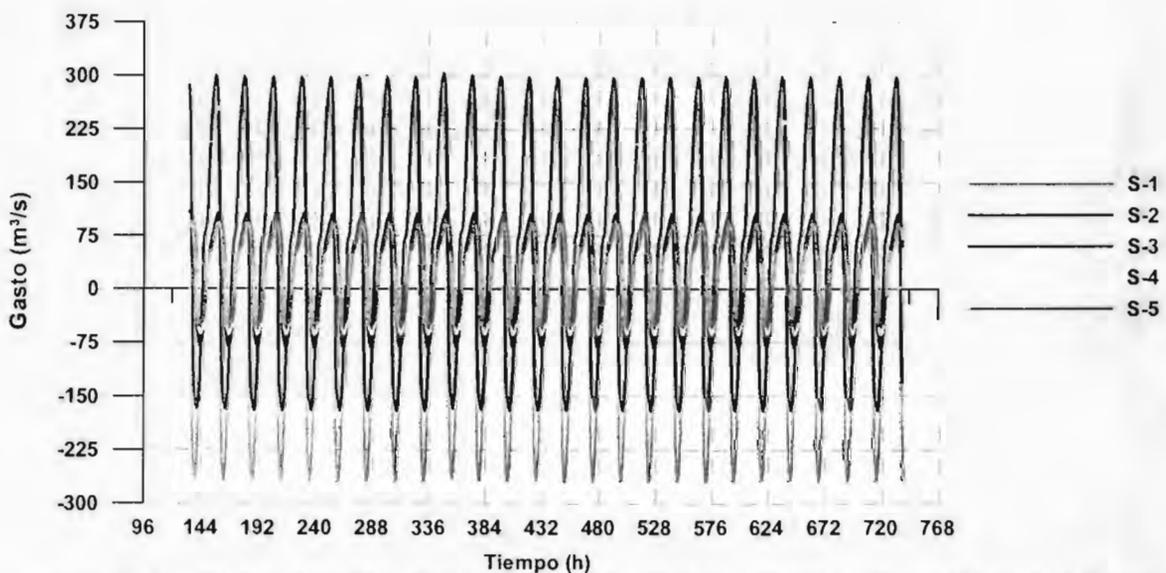


Figura 5. 18 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2

A continuación se presenta la Tabla 5. 2, en donde se muestran los resultados obtenidos (gastos y concentraciones medias, tiempos de residencia) en las secciones de control. Es importante mencionar que de acuerdo a las simulaciones hidrodinámicas y los resultados de concentración obtenidos, en este caso se presenta la mayor influencia del patrón de corrientes de la Boca del Carmen sobre el cuerpo principal de la Laguna de Términos, y por lo tanto en el sistema de lagunas adyacentes.

Tabla 5. 2 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 2.

Sección de control	Q_m $m^3 \cdot s^{-1}$	$C(t)_m$ (%)	tr		
			(s)	(días)	(meses)
S-1	167.72	0.79503	20683029	239	8
S-2	122.92	0.98371	34917439	404	13
S-3	55.99	0.99960	77891396	902	30
S-4	43.53	0.99995	100236429	1160	39
S-5	39.82	1.00000	109585570	1268	42

Q_m Gasto medio
 $C(t)_m$ Concentración media

Tomando como base la afirmación anterior y los valores de tr en las secciones S-1 y S-2 (8 y 13 meses respectivamente) de la Tabla 5. 2 se obtiene que estos valores de tr son menores a los reportados en el caso anterior (caso 1), Tabla 5. 1, por lo que de esta observación se puede suponer que el área de influencia directa del patrón de corrientes de la Boca del Carmen llega hasta la sección de control S-2. A partir de la sección S-2 y hasta la sección S-5, el patrón de circulación, la variación de concentración y los tiempos de residencia están influenciados por esta misma (Boca del Carmen) y por las condiciones de circulación propias del sistema de canales y lagunas adyacentes.

En general, los tr en el sistema de lagunas varía de 8 meses a 3.5 años. Sin embargo como se observa en la Tabla 5. 2 entre las secciones de control S-2 y S-3, existe un incremento sustancial en los tr , esto debido a que como se observa en la Figura 5. 17 el área que existe entre ambas secciones, es lo suficientemente grande como para disminuir el gasto que pasa a través de la sección S-2 debido a los efectos de fricción y la distorsión de la señal al propagarse en esta región.

5.4.3. Caso 3. Marea reconstituida del análisis armónico y gastos medios

5.4.3.1. Metodología de Thomann y Mueller (1987).

Particularmente, en este caso es en donde se presentan los mayores tiempos de residencia en el área estudiada de la Laguna de Términos. En la Figura 5. 19 se observa la distribución espacial de los tiempos de residencia en el cuerpo principal y estero. En esta figura se observa un incremento en la escala de tiempo de aproximadamente el 40% en comparación con los casos anteriores.

En este caso se observa el área de influencia de la Boca del Carmen se redujo significativamente con respecto a los casos anteriores, esto se refleja en un sustancial aumento en los tr en la boca y su zona de dominio, tal como se observa en la Figura 5. 19. Existe una zona en el cuerpo principal de la Laguna de Términos en donde no se presenta influencia alguna de las bocas, siendo esta región en donde se presentan los mayores tr (7200 a 8400 horas).

Nuevamente, como en los dos casos anteriores los menores tr se tienen en la Boca de Puerto Real, punto P-2 y son de 204 horas (9 días), en el punto ubicado en la Boca de

Sabancuy (P-9), los t_r son de aproximadamente el doble que en Puerto Real (20 días). Del análisis de resultados hidrodinámicos en el capítulo 4, se observó que el mayor volumen neto y el menor orden de velocidades se presentaron en la Boca del Carmen, esta situación se traduce en una disminución en la capacidad de dilución y en los procesos advectivos por lo que los t_r en esta zona (punto de control P-1) son mayores que para las Bocas de Puerto Real y Sabancuy. Los tiempos de residencia en la Boca del Carmen son de 712 horas.

Los tiempos de residencia en los puntos de control P-5 y P-8 son de mes y medio, en el caso del punto P-5 se debe a que responde rápidamente ante los procesos advección – dispersión, para el punto P-8 estos t_r responden a la capacidad de dilución.

Los tiempos de residencia en el punto P-8 están directamente relacionados con las variación en la Boca de Puerto Real, por esta razón éstos tiempos son menores a los registrados en los puntos de control P-3 y P-4. En el punto P-10, por un lado, las condiciones de circulación no favorecen la variación en la concentración y por otro la capacidad de dilución es reducida por lo que los t_r son del orden de años. En la Figura 5. 20 se observa que la capacidad de renovación en el sistema lagunar (sin considerar las bocas oceánicas), oscila entre mes y medio y un año dependiendo de la zona de la laguna.

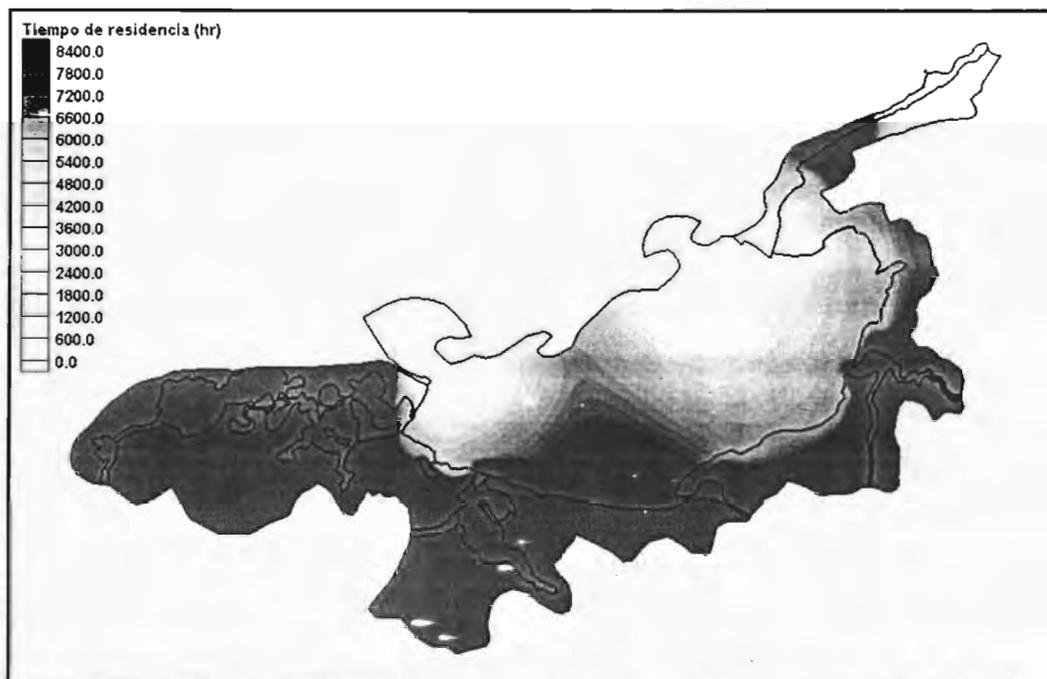


Figura 5. 19 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 3.

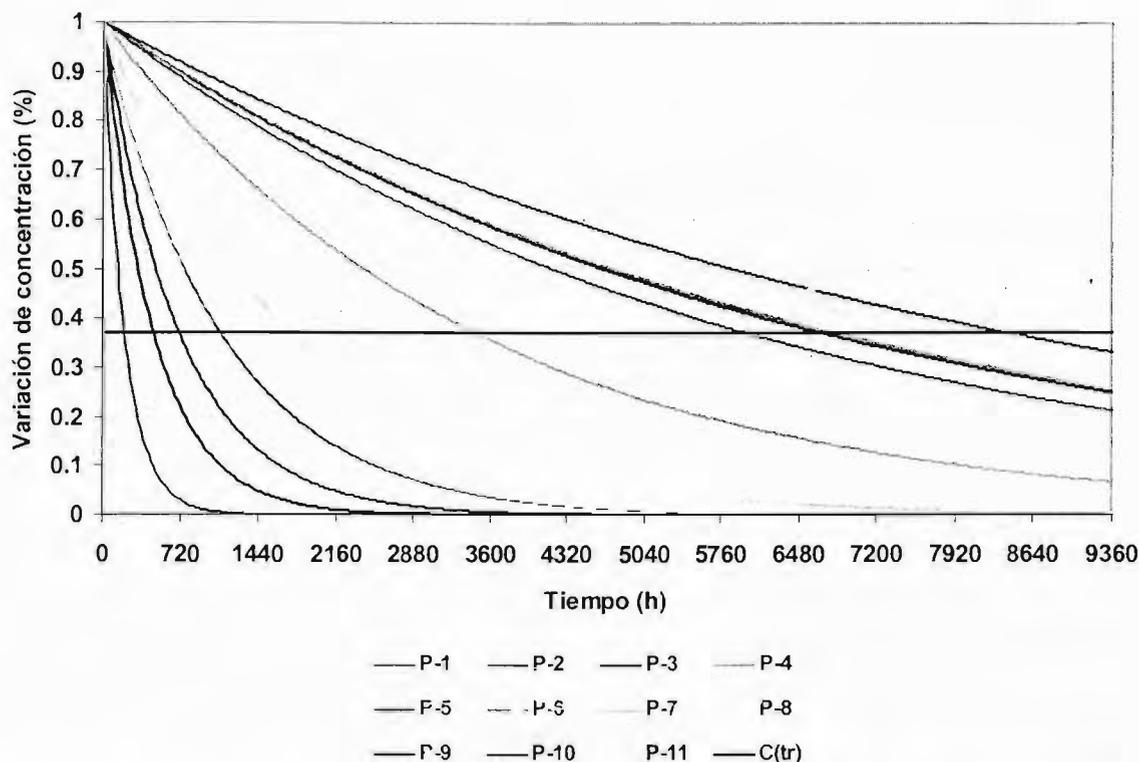


Figura 5. 20 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = t_r$ (línea horizontal), Caso 3.

5.4.3.2. Metodología de Van de Kreeke, 1988.

Para la estimación de los tiempos de residencia aplicando la metodología propuesta por Van de Kreeke, se tiene que el prisma de marea de la Boca del Carmen es de $2.06 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ para el periodo de tiempo simulado (23 días).

Con referencia al valor de concentraciones medias se presenta la Figura 5. 21, en la que se registran las menores variaciones de concentración. En la mayor parte del sistema de lagunas adyacentes la concentración media es mayor a 0.997 unidades, únicamente en la región donde se ubica la sección de control S-1 se observa modificación en el valor de concentración (0.95 unidades).

El patrón de circulación que presenta la Figura 5. 22 muestra la variación de los gastos en cada sección de control. De la Figura 5. 22 se observa que sólo en las tres últimas secciones de control no se aprecia la variación por efecto de las señales de marea viva y muerta, situación que confirma que el comportamiento de las secciones S-1 y S-2 se debe únicamente a la influencia del patrón hidrodinámico provocado en Carmen.

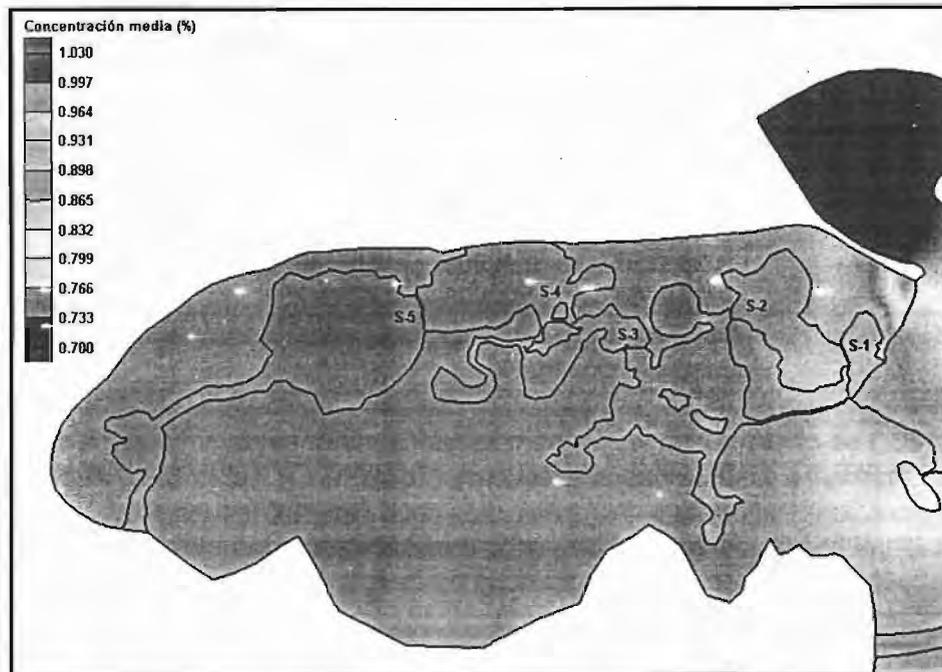


Figura 5. 21 Variación de concentraciones medias en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.

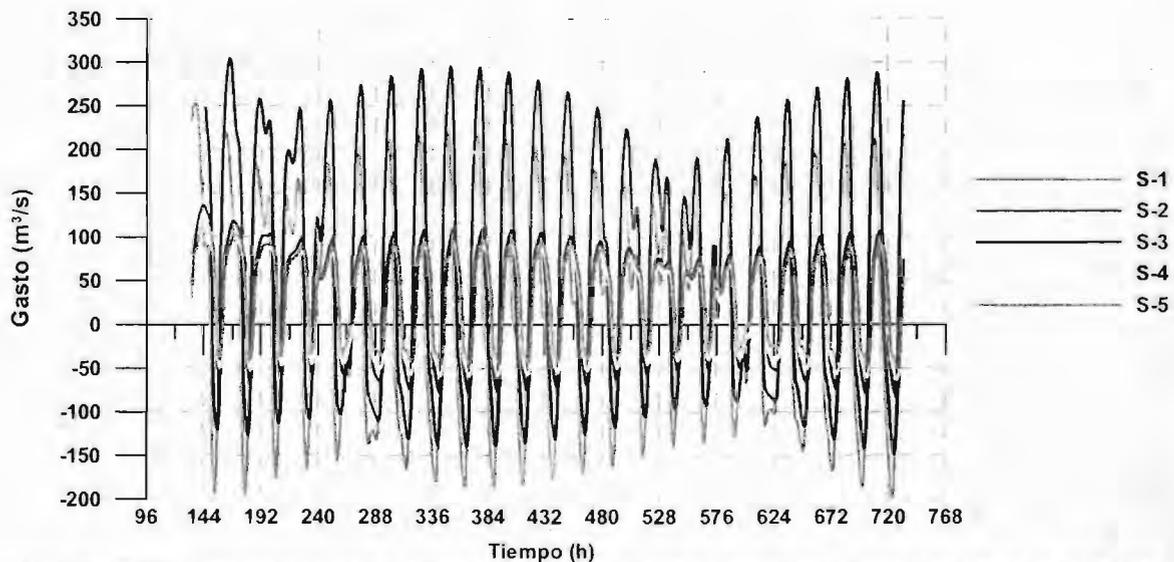


Figura 5. 22 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.

A continuación en la Tabla 5. 3 se presentan los valores de gasto, concentración media y tiempo de residencia del agua en cada sección de control localizada en el sistema de lagunas adyacentes. Vale la pena mencionar que los resultados de tiempo de residencia obtenidos en este escenario son valores posiblemente cercanos a los que se pueden presentar en la realidad, debido a las condiciones de forzado.

Tabla 5. 3 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 3.

Sección de control	Q_m $m^3 \cdot s^{-1}$	$C(t)_m$ (%)	t_r		
			(s)	(días)	(meses)
S-1	104.4017	0.95167	18740849	217	7
S-2	82.9075	0.99721	24728912	286	10
S-3	46.7849	0.99995	43942534	509	17
S-4	36.4957	0.99999	56333620	652	22
S-5	28.2055	1.00000	72891754	844	28

Q_m Gasto medio
 $C(t)_m$ Concentración media

De la Tabla 5. 3 se observa que los t_r para estas condiciones de circulación son menores que los registrados en los dos casos anteriores (Tabla 5. 1 y Tabla 5. 2). A pesar de que los gastos medios registrados son menores que en las situaciones anteriores, la variabilidad en el patrón de circulación por la transición entre las señales de marea viva y muerta favorece la disminución en los tiempos de residencia.

Los t_r varían de 7 meses en la sección de control S-1 a 2.3 años en la sección S-5. En el caso de las secciones de control S-1 y S-2 la escala de tiempo para los t_r es menor que para el resto de las secciones, pero el patrón hidrodinámico en ambas (S-1 y S-2) propicia que los t_r en las secciones siguientes no incremente considerablemente como en los escenarios anteriores.

5.4.4. Caso 4. Marea medida en campo y gastos de avenidas

5.4.4.1. Metodología de Thomann y Mueller (1987).

Como era esperado, la interacción entre la laguna y el océano incrementa por la influencia del Huracán Isidore, situación que a su vez favorece la circulación y por ende disminuye los tiempos de residencia aún en zonas en donde normalmente la capacidad de circulación es reducida. En la Figura 5. 23 se observa la disminución en los tiempos de residencia por efecto del Huracán Isidore. En la Figura 5. 24 se muestran los resultados obtenidos para la variación de concentración en cada punto de control.

Parte de los resultados hidrodinámicos obtenidos señala que la Boca de Puerto Real muestra una mayor capacidad de respuesta ante la presencia del Huracán Isidore, esto se confirma del análisis de Figura 5. 24 en donde se aprecia que no sólo los menores tiempos de residencia se tienen en esta parte (128 horas en el punto P-2), sino que además la capacidad de renovación de agua en la zona de influencia de Puerto Real aumenta considerablemente (Figura 5. 23). Al observar los t_r en los puntos P-1 y P-5 se aprecia que existe una diferencia de seis horas entre ambos, siendo menores los t_r del punto P-5 a pesar de que este punto se encuentra 8 km adentro del cuerpo de agua y el punto P-1 esta colocado en la sección mínima de la Boca del Carmen.

Para los puntos de control P-8 y P-11 se observa que a diferencia de los tres casos anteriores en donde los t_r en el punto P-8 eran menores a los del P-11, en este caso la situación cambia, registrando t_r de 1.3 meses en el punto P-8 y 1.2 meses en el P-11.

Esta variación en el comportamiento se da porque el punto P-11 esta gobernado por la variación en el punto P-2, que a su vez en este caso responde a las modificaciones generadas por el Huracán Isidore, mientras que el punto P-8 como se aprecia no mostró influencia directa por este fenómeno (Isidore). La diferencia de los t_r entre uno y otro punto localizado en el cuerpo principal indica el orden en el que la influencia de Isidore se hizo latente en el sistema lagunar y sus alrededores.

Los t_r en el punto de control P-10 disminuyeron con respecto a los obtenidos en los casos anteriores. En este caso el valor de t_r registrado en esta zona se debe a la circulación que se generó como parte del mecanismo de respuesta y estabilización del sistema. El valor de los t_r en este punto corresponde a 6.1 meses, (es decir aproximadamente la mitad del tiempo de residencia obtenido en este punto en el caso anterior).

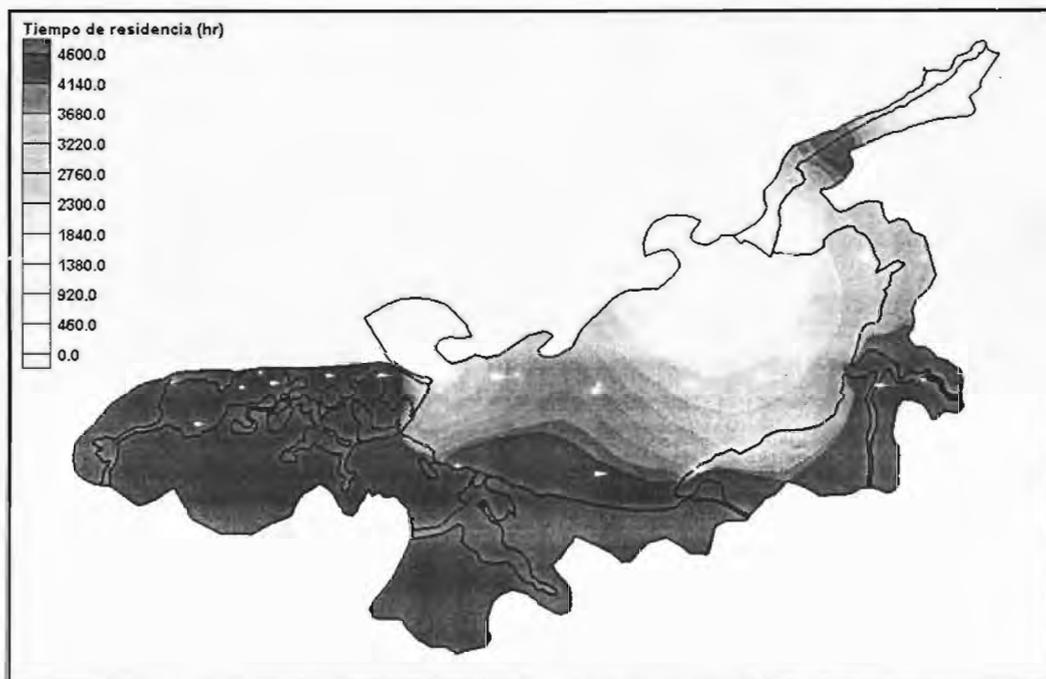


Figura 5. 23 Mapa de tiempos de residencia en el cuerpo principal de la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy, aplicando la metodología propuesta por Thomann y Mueller (1987), Caso 4

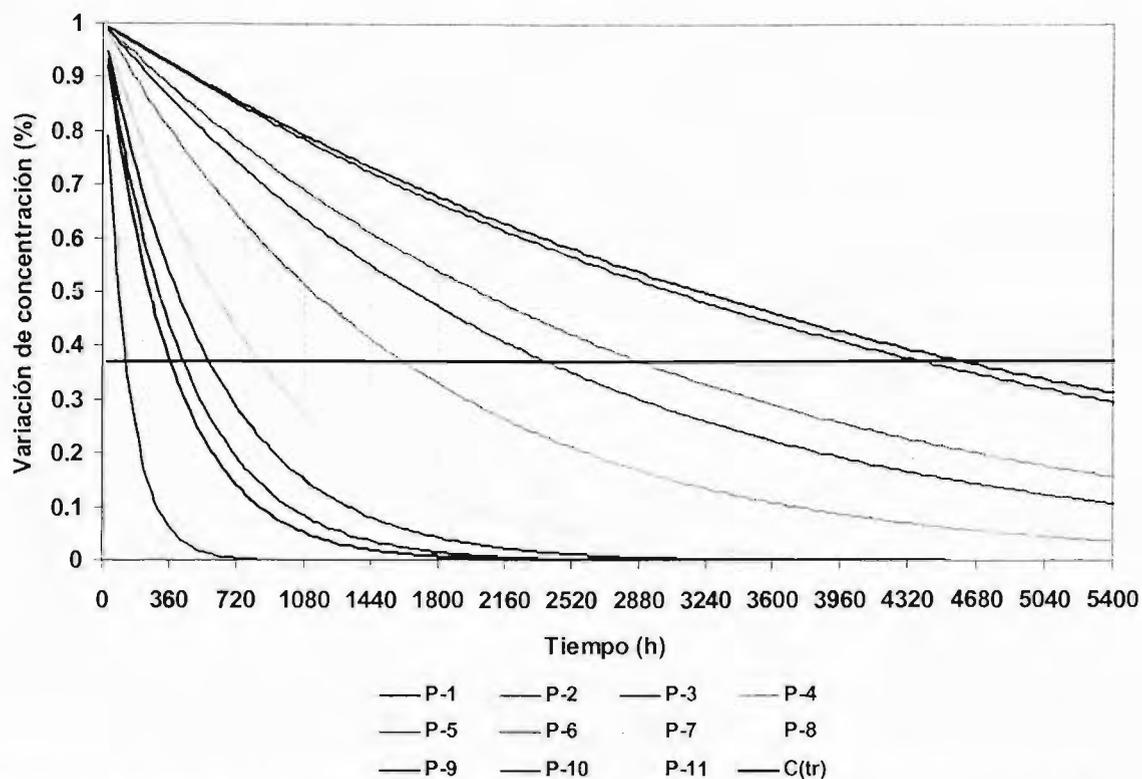


Figura 5. 24 Variación de concentración (%) en los puntos de control alojados en la Laguna de Términos y Estero de Sabancuy. Concentración para el tiempo $t = tr$ (línea horizontal), Caso 4.

5.4.4.2. Metodología de Van de Kreeke, 1988.

De los resultados hidrodinámicos obtenidos se observa que para el periodo de simulación (23 días) volumen de entrada registrado en la Boca del Carmen es de $3.84 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

Para el análisis de las concentraciones y gastos medios se presentan las Figura 5. 25 y Figura 5. 26 respectivamente. En la Figura 5. 26 se observa la modificación en el patrón hidrodinámico ocasionado por los efectos del Huracán Isidore, misma que se manifiesta en el incremento del 100% en el gasto transportado para el periodo de influencia de dicho fenómeno. A su vez este incremento en los gastos se reflejó en un aumento en el patrón de corrientes y por ende una mayor capacidad de dilución en el sistema de lagunas adyacentes y menores tiempos de residencia. Como se muestra en la Figura 5. 25, en este caso se presentó una mayor modificación en el patrón de concentraciones con respecto al valor inicial, el área de modificación perceptible aumentó por lo que los valores de concentración media disminuyeron con respecto a los casos anteriores. Esta situación refleja el aumento en la capacidad de renovación de agua en este sistema bajo estas condiciones particulares.

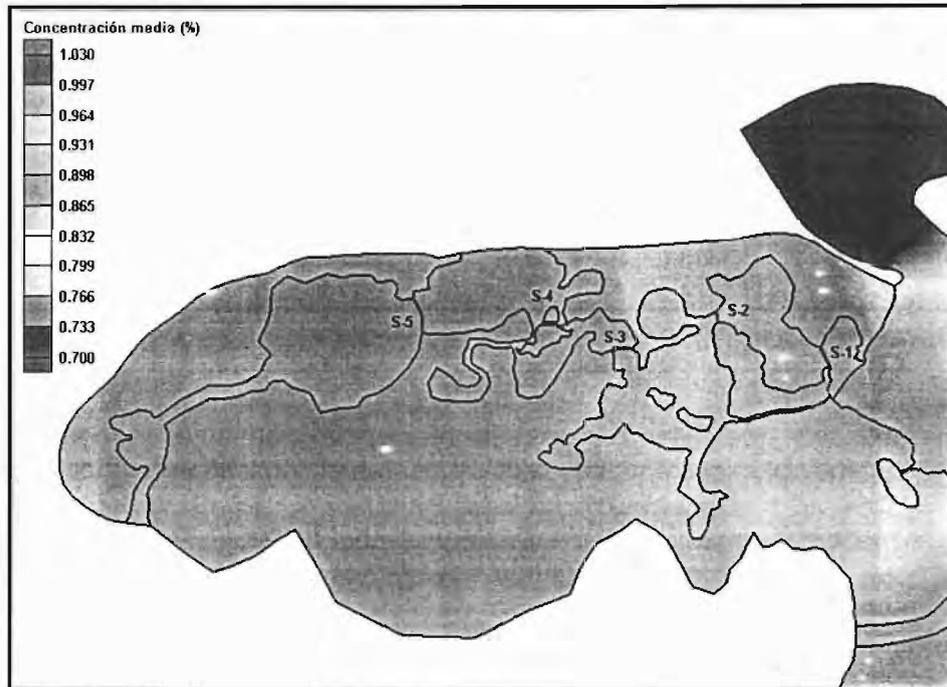


Figura 5. 25 Variación de concentración en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.

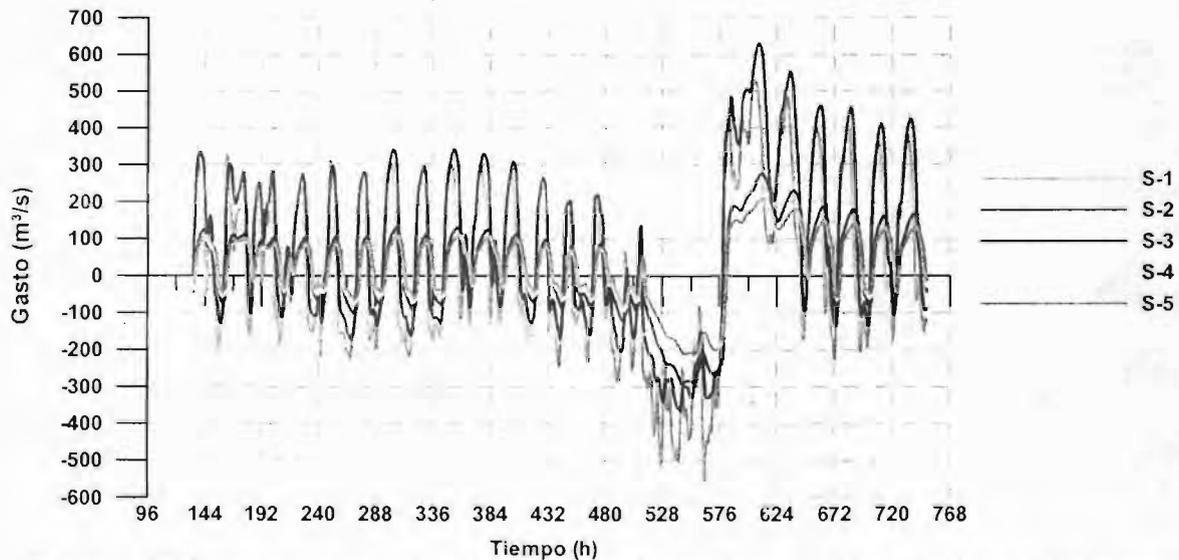


Figura 5. 26 Gasto que pasa a través de las secciones de control localizadas en el sistema de lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.

En principio, de los resultados obtenidos se tiene un aumento en el patrón de circulación lo que genera una mayor evolución espacial de la concentración y por tanto una disminución en los tiempos de residencia, ya que fenómenos como un Huracán mejoran la calidad del agua en cuerpos con zonas de poca renovación de agua, como el estudiado (sistema de lagunas adyacentes). En la Tabla 5. 4 se presentan los gastos y concentraciones medias así como los tiempos de residencia obtenidos en cada sección de control.

Tabla 5. 4 Tiempo de residencia en las secciones alojadas en las lagunas adyacentes a la Laguna de Términos, Caso 4.

Sección de control	Q_m $m^3 \cdot s^{-1}$	$C(t)_m$ (%)	tr		
			(s)	(días)	(meses)
S-1	175.1582	0.83342	18250973	211	7
S-2	140.3059	0.92557	25303695	293	10
S-3	105.8117	0.98235	35610932	412	14
S-4	83.0398	0.99193	45819264	530	18
S-5	74.0973	0.99979	51755892	599	20

Q_m Gasto medio
 $C(t)_m$ Concentración media

Dicha tabla muestra que los tiempos de residencia disminuyeron considerable al compararlos con los obtenidos en cualquiera de los tres escenarios anteriores.

Tal como se mencionó antes, la presencia del Huracán favoreció la modificación en las concentraciones en el sistema de lagunas adyacentes, por ejemplo en la sección de control S-2 la concentración media disminuyó de 0.99 unidades (valor medio de los casos 1,2 y 3) a 0.92 unidades, por consecuencia en la sección S-3 el valor de concentración media corresponde al valor reportado en la sección de control 1 en el escenario 2. Esta comparación se realiza ya que el escenario 2 muestra la mayor influencia del patrón de circulación de la Boca del Carmen sobre este sistema y por ende las mayores modificaciones en concentración bajo condiciones habituales. De esta comparación se observa cómo la capacidad de renovación de agua en este sistema lagunar aumentó sobre todo en las secciones de control más alejadas del cuerpo principal, manteniendo la misma tasa de renovación en las secciones cercanas a dicho cuerpo.

5.4.5. Resumen de resultados y conclusiones

En la Tabla 5. 5 se presentan los tiempos de residencia obtenidos en los distintos puntos y secciones de control presentados en este trabajo. Tomando como referencia el análisis de resultados y la tabla antes mencionada se observa que la capacidad de respuesta para la renovación o intercambio de agua en el sistema de Laguna de Términos depende de la posición del punto o la sección analizada, entre mayor sea la distancia entre las bocas y el punto o sección, los tiempos de residencia aumentarán.

En general, los tiempos de residencia en la boca de Puerto Real y su área de influencia son menores, con respecto a la Boca del Carmen, ya que los tiempos de residencia varían dependiendo de las condiciones hidrodinámicas analizadas. En el caso de la Boca de Sabancuy, los tiempos de residencia no presentan mayor variabilidad entre un caso y otro.

Por otro lado en el interior del cuerpo principal la distribución de los tiempos de residencia está en función de los procesos de advección – dispersión, ya que el intercambio de concentraciones responde principalmente a estos fenómenos. Para el sistema de lagunas adyacentes (Pom, Atasta, Laguna Verde, San Carlos, etc.), la variabilidad en los tiempos de residencia responde directamente al patrón hidrodinámico que se presente en la Boca del Carmen ya que la magnitud, dirección y persistencia de las corrientes así lo permiten.

Tabla 5. 5 Resumen de los tiempos de residencia obtenidos en los puntos y secciones de control propuestos en la Laguna de Términos.

Tiempo de residencia	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	días	meses	días	meses	días	meses	días	meses
Puntos de control								
P-1	13	0.4	10	0.3	30	1.0	24	0.8
P-2	6	0.2	9	0.3	9	0.3	5	0.2
P-3	79	2.6	46	1.5	280	9.3	193	6.4
P-4	119	4.0	75	2.5	285	9.5	121	4.0
P-5	28	0.9	48	1.6	46	1.5	18	0.6
P-6	156	5.2	139	4.6	251	8.4	100	3.3
P-7	92	3.1	109	3.6	145	4.8	68	2.3
P-8	40	1.3	48	1.6	47	1.6	40	1.3
P-9	14	0.5	20	0.7	20	0.7	15	0.5
P-10	248	8.3	247	8.2	352	11.7	184	6.1
P-11	44	1.5	54	1.8	73	2.4	35	1.2
Secciones de control								
S-1	284	9.5	239	8.0	217	7.2	211	7.0
S-2	448	14.9	404	13.5	286	9.5	293	9.8
S-3	845	28.2	902	30.1	509	17.0	412	13.7
S-4	1090	36.3	1160	38.7	652	21.7	530	17.7
S-5	1296	43.2	1268	42.3	844	28.1	599	20.0

Existen tres escalas de tiempos diferentes en el sistema lagunar: en el área de influencia de las bocas oceánicas la capacidad de renovación e intercambio de agua se da en un orden de días, en tanto que para el cuerpo principal de la laguna y extremos del estero la escala de variabilidad en el tiempo es de meses y por último en la zona de lagunas adyacentes al cuerpo principal los tiempos de residencia son de años.

De los resultados descritos anteriormente se asume que la determinación de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos esta regida por la capacidad de asimilación de las concentraciones en la Boca de Puerto Real. Pero si la capacidad de respuesta hidrodinámica en la Boca del Carmen aumenta, se incrementa el área de influencia de esta boca por lo que disminuye el dominio de Puerto Real, situación que se traduce en una disminución considerable en los tiempos de residencia del área influenciada por Carmen y un aumento en los tiempos de residencia en el dominio de Puerto Real. Si por el contrario la respuesta hidrodinámica en Carmen disminuye los tiempos de residencia en el área de influencia aumentan, mientras que en Puerto Real se mantienen.

En el caso del sistema de lagunas adyacentes se tiene que el comportamiento en la Boca de Atasta, Laguna Peralta y Laguna de Puerto Rico esta directamente relacionado con el comportamiento en la Boca del Carmen, esto por ser el área de comunicación directa entre en sistema de lagunas adyacentes y el cuerpo principal de la Laguna de Términos. En esta región los tiempos de residencia son del orden de los que se presentan en el cuerpo principal de la laguna. A partir de la Laguna los negros y hasta la Laguna de Pom el comportamiento hidrodinámico y los tiempos de residencia responden a la interacción entre las lagunas antes mencionadas y la Boca del Carmen principalmente.

Finalmente en el caso en el que se presenta la influencia del Huracán Isidore, los tiempos de residencia disminuyen notablemente con respecto a los obtenidos en cualquiera de los anteriores, estos resultados ratifican el hecho que un fenómeno meteorológico extremo, no sólo implica posibles problemas de erosión e inundaciones, sino que también puede mejorar e incrementar la capacidad de renovación del sistema lagunar en conjunto, a pesar de que una vez pérdida la afectación directa por este fenómeno la laguna regrese en forma relativamente rápida a su comportamiento habitual. En otras palabras, eventos extremos, sean estos de origen marino (huracanes, nortes) ó terrestres (precipitación abundante, avenidas), son benéficos para la calidad del agua de cuerpos de agua semi-cerrados.

Conclusiones

CONCLUSIONES

De las 130 lagunas costeras con que cuenta México, la Laguna de Términos ubicada en el estado de Campeche, es una de las más importantes. Particularmente, esta importancia está ligada no sólo al factor socioeconómico por estar situada cerca de la Sonda de Campeche, también radica en su extensión, diversidad de habitat y finalmente su configuración física e hidrodinámica: al formar parte del delta del sistema Grijalva-Usumacinta y estar comunicada con el mar por medio de sus dos bocas naturales y su boca artificial.

La laguna de Términos esta formada por una laguna principal en la que descargan cuatro ríos, siendo el río Palizada el de mayor importancia en cuanto a caudal o gasto descargado se refiere. A su vez este cuerpo de agua principal esta comunicado con un sistema de lagunas menores ubicadas al Noroeste de la región, dentro de las que destacan las Lagunas de Pom y Atasta por ser las más alejadas del cuerpo principal. Adicionalmente, se comunica con el Estero de Sabancuy, en donde a su vez se localiza la boca artificial denominada "Boca de Sabancuy".

Debido a la complejidad de este sistema lagunar se implemento un modelo numérico (en dos dimensiones promediado en la vertical) con la finalidad de caracterizar hidrodinamicamente la zona para a posteriormente representar y evaluar por medio de un modelo de advección-dispersión la calidad del agua en el sistema lagunar. Puesto que la calidad del agua del sistema lagunar esta en función de las características hidrodinámicas y de la geometría de los cuerpos de agua, se prestó especial atención en la determinación del patrón de circulación en la laguna con el objeto de tener mayor certidumbre en los resultados presentados en este trabajo.

Con base en los resultados obtenidos se puede sugerir que, las corrientes que se desarrollan en el interior de la Laguna de Términos son complejas, pues dependen de la entrada y salida de flujo de sus dos bocas naturales y su boca artificial, así como de la interacción de los cuerpos de agua adyacentes (lagunas menores) al cuerpo principal y la descarga de los ríos. Dadas las dimensiones de ambas bocas naturales, y la separación que existe entre ellas, se presenta una dinámica en las corrientes que se ve afectada por

diferentes factores, que dependiendo de las condiciones en las que se desarrolle, uno u otro factor cobra mayor relevancia.

Dichos factores son la distorsión de la onda de marea, configuración de fondo, geometría de los cuerpos de agua, variación en el nivel de superficie libre. Por ejemplo, el desfase de la onda de marea, que varía dependiendo si la onda se propaga por afuera o por dentro de la laguna, depende de la configuración del fondo y la geometría de los cuerpos de agua por donde se va propagando, además de los diferentes materiales que repercuten directamente en la fricción. Otro factor importante es el nivel de superficie libre en el cuerpo principal, que, por un lado, hace las veces de un vaso regulador al tratar de empatar los niveles de superficie libre del agua del mar, bocas oceánicas y del propio cuerpo, por otro lado se tiene que la laguna a parte de contar con un cuerpo principal somero, característico de este tipo de lagunas (ver capítulo 1), cuenta con otras lagunas y canales de menores proporciones que también tienen participación en el sistema, pues como se mencionó antes, se considera en la estimación de corrientes, un área de alrededor de 4,500 km², con canales que van desde los 5 m hasta bocas de 3,000 m de ancho y profundidades que van desde 12 m hasta los 0.2 m. Es por ello que la caracterización hidrodinámica es altamente no lineal y únicamente se puede presentar a través de escenarios simplificados con mareas tipo, descargas de ríos medias o máximas, y ambientes de fricción promedio.

El patrón de circulación en todo los cuerpos de agua que conforman el sistema lagunar Laguna de Términos proporciona la base para entender otros fenómenos que se suscitan en la laguna como son: la conformación de zonas de erosión y depósito, las zonas de circulación o estancamiento (importantes desde el punto de vista de calidad de agua), y los tiempos de residencia, tema principal de esta tesis. Es por ello que se invirtió una gran cantidad de esfuerzos en representar adecuadamente el patrón, pues es la base de los estudios posteriores.

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas:

- El patrón hidrodinámico en la Laguna de Términos está gobernado por la interacción que existe entre los prismas de marea de las bocas del Carmen y Puerto Real. No obstante, el predominio del prisma de marea de la Boca del Carmen limita y determina el área de dominio del prisma de marea de Puerto Real.

En la boca artificial de Sabancuy, el patrón de corrientes se encuentra fuertemente afectado por el patrón de corrientes en la Boca de Puerto Real, al mismo tiempo y en menor escala por la interacción entre la hidrodinámica al interior del estero y el mar.

- Para las condiciones de circulación habitual en la Boca del Carmen predomina el reflujó con tendencia a exportar agua del interior de la laguna principal. Las corrientes que se desarrollan en la sección mínima de la Boca del Carmen, presentan en promedio una velocidad cercana a $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, esta velocidad desde el punto de vista de estabilidad de la boca, permite que todo el tiempo permanezca abierta, debido a que las corrientes en toda la sección estudiada, favorecen el acarreo de sedimento y sólo en el interior al disminuir la energía de la corriente podría presentarse depósito de material, que después como en eventos climatológicos extremos puede volver a ser removidos.
- Otro aspecto importante que destaca sobre todo en la Boca del Carmen es la variación entre el flujo de entrada y salida por esta boca, pues de los resultados estudiados se observa que a pesar que las velocidades de entrada y salida en promedio son similares, existe un incremento en el volumen salida de 35% con respecto al de entrada, esto indica que esta boca tiene una tendencia al reflujó, caso contrario a la Boca de Puerto Real.
- La Boca de Puerto Real tiene condiciones para favorecer la entrada de flujo al sistema lagunar además de la capacidad de importar sedimento, situación que se ratifica con la existencia de una zona de bajos la cual funciona como un área de disipación de energía, que capta la mayor cantidad de sedimento importado por esta boca.
- Las magnitudes de velocidad máxima en la Boca de Puerto Real, indican baja capacidad para remover sedimento (menores a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), concordando con el estado de asolvamiento tanto de la zona marina de la boca, como de la zona lagunar (formación de bajos). Adicionalmente, esta boca está directamente relacionada con la modificación del comportamiento del sistema lagunar debido a que esto provoca un ciclo que de forma simple consiste en deja pasar el flujo, detenerlo e impedir el regreso por esta zona, es por ello que la celda de circulación en la mayoría de los casos estudiados, parte del prima de marea entrante de Puerto Real y sale por la Boca del Carmen obviamente en promedio, pues este

patrón como tal sólo se presenta unas horas, ya que si existe flujo y reflujo en ambas bocas como tal.

- La Boca artificial de Sabancuy es una boca importadora de agua con tendencia al flujo. Las magnitudes de corrientes en flujo en esta boca rebasan fácilmente el valor de equilibrio comúnmente aceptado ($1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), en tanto que las máximas de reflujo están por debajo de dicho valor, lo cual tiene implicaciones importantes en la estabilidad de la boca. Por esta razón se sugiere que la Boca de Sabancuy no es solamente importadora de agua, sino que muy probablemente es importadora de sedimento, lo cual a la larga se traduce con inestabilidad de la boca y su eventual cierre si no se toman medidas correctivas de dragado o cambio en su geometría.
- Cuando el patrón de corrientes en el sistema lagunar se encuentra afectado por los efectos de un evento meteorológico extremo (en el caso que nos implica es el Huracán Isidore), el intercambio de agua entre el mar y la laguna se ve modificado sustancialmente al incrementarse considerablemente el volumen de agua en el cuerpo principal a consecuencia de las descargas de los ríos (por las lluvias generadas) generando un gradiente entre la Laguna y el mar.

Al generarse el gradiente de superficie libre, el nivel de la laguna fue mayor que el nivel del mar por lo que, tanto en la Boca de Puerto Real como la Boca del Carmen se presentó una clara tendencia al reflujo, con la finalidad de disminuir el volumen excedente en el cuerpo de agua y empatar ambos niveles de superficie libre (en la laguna y en el mar) hasta alcanzar nuevamente las condiciones hidrodinámicas "normales" (flujo en Puerto Real, reflujo en Carmen).

- Con respecto a la observación de la evolución de concentración al interior de la laguna, se tiene que la capacidad de dilución y mezclado entre el agua dulce y el agua de mar está reducida al área de intercambio entre las bocas oceánicas y dicho cuerpo, siendo estas las zonas de renovación más altas.
- En todos los casos, la modificación en la concentración de la Laguna de Términos está fuertemente ligada con la variación de dicha concentración en la Boca de Puerto Real. La Boca del Carmen únicamente favorece la dilución en un área reducida. Cuando las condiciones hidrodinámicas son tales que existe una modificación en el desfase y amplitud en la onda de marea al propagarse,

entonces la dilución en la Laguna de Términos se ve favorecida e incrementa la capacidad de dilución en la Boca del Carmen.

- En la zona del estero (Estero de Sabancuy), dado que las velocidades son muy bajas ($0.001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) es probable que el proceso dominante para el mezclado sea la dispersión/ difusión y no la advección, ya que a pesar de las bajas velocidades es esta zona en donde se observa la mayor dilución.
- En la zona de lagunas adyacentes al cuerpo principal (al Noroeste del sistema lagunar), no se observó variación aparente en las concentraciones para el tiempo simulado, lo cual sugiere que la respuesta de este ante la variación espacial de concentración del cuerpo principal es mucho más lenta (una o dos escalas de tiempo de tiempo mayor dependiendo de la posición) a pesar de estar comunicado e influenciado hidrodinámicamente por dicho cuerpo.
- La determinación de los tiempos de residencia en la Laguna de Términos esta gobernada por la capacidad de asimilación de concentraciones en la Boca de Puerto Real. Es por esto que en general, esta zona es en donde se presentan los menores tiempos de residencia.
- En el sistema lagunar se detectó la existencia de tres escalas de tiempo diferentes para el proceso de renovación de agua, (1) en el área de influencia de las bocas oceánicas el intercambio de agua se da en periodos de días, (2) para el cuerpo principal y extremos del Estero de Sabancuy la escala de variabilidad en el tiempo es de meses y (3) en la zona Oeste (sistema de lagunas adyacentes), el tiempo de residencia del agua es de años.
- Los tiempos de residencia en el cuerpo principal son inversamente proporcionales a los tiempos residencia en el sistema de lagunas adyacentes. Como se mencionó antes, el sistema de lagunas adyacentes está directamente influenciado por el comportamiento hidrodinámico y advectivo en la Boca del Carmen. Al intensificarse la hidrodinámica en Carmen, aumentan el mezclado y área de dilución, distribuyéndose entre el cuerpo principal y el sistema de lagunas, y causando una disminución en los tiempos de residencia del agua en el cuerpo principal y un aumento de estos en las lagunas adyacentes. Si por el contrario, el mezclado y área de influencia disminuyen, este comportamiento únicamente afecto a las concentraciones en las lagunas y por tanto los tiempos de residencia

en estas disminuyen.

- Adicionalmente, se tiene que eventos extremos, sean estos de origen marino (huracanes, nortes) o terrestres (precipitación abundante, avenidas), son benéficos para la calidad del agua de cuerpos de agua semi-cerrados, porque aumentan el tirante en todas las zonas al arrastrar sedimento a zonas con mayor renovación. Existe renovación e intercambio de agua en zonas con predominancia al estancamiento, además de que promueve el desazolve los canales de comunicación, a pesar de que estos eventos sea de corta duración (horas o decenas de horas). Las modificaciones que provocó el Huracán Isidore, demostró que estos eventos, si bien presentan problemas para las poblaciones asentadas en zonas cercanas (Isla del Carmen), como son inundaciones, mal tiempo, etc., son también parte importante para el bienestar del sistema lagunar en general.

Futuras líneas de investigación

Incluir en el estudio hidrodinámico los efectos por oleaje principalmente en las bocas oceánicas ya que como se observó en este trabajo, la variación en el patrón de corrientes en estas zonas de intercambio determina el comportamiento hidrodinámico en el cuerpo principal y por ende el resto del sistema estudiado. Situación que a su vez se reflejaría en una mejora o deterioro de la calidad del agua y por lo tanto aumento o disminución en los tiempos de residencia dependiendo de la coincidencia en las direcciones de propagación del oleaje con las corrientes estudiadas en este trabajo.

Implementación de sistemas que permitan contar con datos de aforos en los principales ríos que descargan en el cuerpo principal tanto en época de estiaje como avenidas. Además, por medio de mediciones en campo, obtener valores representativos de parámetros para la adecuada implementación de los modelos numéricos, así como para la calibración y validación de dichos modelos, como son: salinidad y granulometría de fondo en distintos puntos de la laguna.

Implementación de trazadores en distintos puntos de la Laguna de Términos (con base en los resultados obtenidos en este trabajo) que permitan obtener los tiempos de residencia del agua en forma empírica y compararlos con los reportados en este trabajo.

Bibliografía

Bibliografía

- Bruun, P., 1978. Stability of Tidal Inlets, Theory and Engineering. Development in Geotechnical Engineering, 23. Elsevier.
- Castanedo B., 2000. "Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras". Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- CFE,(2002). "Campaña de mediciones de corriente, oleaje y batimetría en el sistema lagunar Laguna de Términos". COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Subdirección Técnica. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil y Administración Portuaria Integral de Campeche S.A. de C.V.
- Chow, V.T., 1959. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill. New York, NY
- CONAPO, 1999. "La situación socio demográfica de las zonas costeras", Publicaciones CONAPO 1999.
- Contreras F., 1985. Las lagunas costeras mexicanas. Centro de ecodesarrollo, Secretaria de Pesca.
- David, L.T, Kjerfve, (in press). Seasonal salinity, sediment and chlorophyll distributions in a large coastal Laguna de Términos, México.
- Dean R. G. and Dalrymple R. A. Coastal Processes with Engineering applications. Cambridge University (2002).
- Enciso, S. G. "Sedimentación y Dispersión en las lagunas costeras Pom y Atasta, Campeche" Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería UNAM
- EPOMEX (1993) Estudio de declaratoria como área ecológica de protección de flora y fauna de la Laguna de Términos, Campeche, México, EPOMEX. Informe técnico. 300 pp.
- Escoffier, F.F., 1977. Hydraulics and Stability of Tidal of Tidal Inlets. General Investigation of Tidal Inlets (GITI) Reports, 13.USACE.
- Escoffier, F. F., 1940. The Stability of Tidal Inlets Shore and Beach, 8. pp 114-115.
- Espinal G. J.C. "Caracterización del transporte de sedimentos en las Bocas del Carmen y Puerto Real en Laguna de Términos, Campeche" Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería UNAM
- Fischer, et al., 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press.
- Gutiérrez E. M, Martínez R. Et. Al. (1981) Geomorfología y Sedimentos Recientes del Sistema Lagunar Atasta-Pom, Campeche, México. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

- Henderson, F. M., 1966. Open Channel Flow. McMillan. NY.
- INEGI, 1995. Censos de población y vivienda 1995, INEGI.
- Lankford, R.R., 1977. Coastal lagoon of Mexico. Their origin and classification En WILEY, M., Estuarine processes. Academic Press Inc. 182-215.
- Le Méhauté, Bernard, 1972. An Introduction to Hidrodinamics and Water Waves. Springer-Verlag New Cork Inc.
- Mantilla T. M. I. "Interacción Oleaje – Corriente en la Boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche" Tesis de maestría, Posgrado de Ingeniería UNAM
- Marina, S. d. (2001). Tablas de Mareas, Golfo de México y Mar Caribe, Dirección general de Oceanografía Naval.
- Moran, D.K., Salles, P., Espinal, J.C. & Silva, R, 2003. "Efectos Hidrodinámicos De La Apertura De La Boca De Sabancuy", En IV Congreso Internacional Puertos Y Costas, Realidades Y Perspectivas (AMIP 2003), Ed. , Pág. Cd016_1 A Cd016_19, Mexico, 2003
- Norton, W. R. I. P. King y G. T. Orlob (1973). A Finite Element Model for Lower Granite Reservoir. Report prepared by Water Resources Engineers, Walnut, Creeke, California, for U. S. Army Corps of Engineers, Walla Walla, Washington.
- PRITCHARD, D.W., 1967. What is an estuary: physical viewpoint. En: LAUFF, G. H., Estuaries. Ass. Ame. Adv. Scienc. 3-6.
- Pugh, T. David. Tides, Surges and Mean Sea-Level. A Handbook for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons. Great Britain.
- Ree, W. o. and Crow, F. R., 1977. Friction Factors for Vegetated Waterways of Small Slope. Model of Tidal Numerical Propagation, Report No. ARS-1-151.F. U.S. Departament of Agriculture.
- Thomann, R. V., and Mueller. 1987. Principles of surface water quality modeling and control. HarperCollins.
- Uribe, R., 2003, et al. "Análisis Armónico de Ondas de Marea". IV Congreso Internacional de Puertos y Costas. México.
- Van de Kreeke J., 1983. Residence Time: Application to Small Boat Basins Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 109, N0. 4, pp 416-428.
- Van de Kreeke J., 1988. Hydrodynamics of Estuaries. Vol I. Estuarine Physics. Chapter 3. Dispersion in shallow Estuaries. CRC Press.