



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

Análisis de los transportes de agua en la laguna
Chacmochuch, Quintana Roo durante tres eventos
contrastantes del periodo 2013-2014.

Tesis que presenta

Gabriela Reséndiz Colorado

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo

Marzo 2019

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de materiales y métodos experimentales, los resultados y discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó, para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de la Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'G' followed by a long horizontal line extending to the right.

Cancún, Quintana Roo 20 de Marzo, 2019

Gabriela Reséndiz Colorado.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.

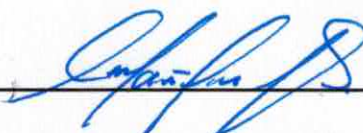
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Gabriela Reséndiz Colorado titulado "Análisis de los transportes de agua en la laguna Chacmochuch, Quintana Roo durante 3 eventos contrastantes del periodo 2013-2014." fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Ecología y Dinámica de Ecosistemas Acuáticos, en el Laboratorio de Ecología marina, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Antonio Almazán Becerril, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente.



Dra. Clelia De la Peña Seaman
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 7 de Marzo de 2019

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado la beca 619226 que me ha permitido cursar mis estudios de maestría, sin este apoyo no habría sido posible.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán por abrirme las puertas de la Unidad de Ciencias del Agua y del Laboratorio de Ecología Costera para formarme como Maestra en Ciencias del Agua. Gracias a todos los que formaron parte de mi formación y desarrollo dentro de la UCIA.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, especialmente al Departamento de Ecología Marina por brindarme todas las facilidades para realizar una estancia académica en el laboratorio de Modelación Físico-Biológica, el conocimiento y la experiencia adquirida son invaluable.

Dr. Antonio Almazán, muchas gracias por confiar en mí, por las múltiples revisiones, debates e ideas que de este proyecto han surgido, por todo el tiempo, conocimiento y esfuerzo invertido en mí y en esta tesis. Por último y no menos importante gracias por tu amistad y valiosos consejos.

Dr. David Rivas, muchas gracias por aceptarme como estudiante, por el trabajo, tiempo, dedicación y sobre todo paciencia para conmigo y esta tesis. Gracias por abrirme las puertas del laboratorio de modelación físico-biológica y compartir tus conocimientos. Por supuesto, muchas gracias por la confianza, por tus consejos y amistad.

Al técnico M. en C. Benjamín Delgado, gracias por estar siempre dispuesto a apoyarme, por todas las facilidades para que mi estancia en el laboratorio fuera productiva, por compartir tus conocimientos y experiencia conmigo, gracias por todos tus consejos.

Dr. Ismael Mariño, agradezco su siempre amable disposición para participar en los tutoriales, por sus valiosos comentarios y preguntas que ayudaron a enriquecer este trabajo y me llevaron a analizar más los resultados.

Dr. Jorge Perera muchas gracias por sus atinados comentarios cada tutorial y sobre esta tesis, que han permitido afinar el resultado final.

Dr. Adán Caballero gracias por contribuir con su experiencia y conocimiento de la zona de estudio a la mejora de esta tesis.

Mamá, gracias por tu amor, por siempre estar ahí, por apoyarme, por animarme en los momentos difíciles a pesar de la distancia, los esfuerzos y sacrificios que hiciste son parte de lo que me ha permitido llegar hasta aquí. Gracias porque sé que a pesar de cualquier diferencia siempre hay alguien que eleva una plegaria por mí.

Tío Moy y tía Carmen: Gracias por ser a quienes considero unos segundos papás, por amarme, por apoyarme, por animarme y aconsejarme en este recorrido de la vida. Son para mí un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y trabajo, gracias por ello, sin su apoyo esta historia sería muy distinta.

Luis, hermano de mi sangre, corazón y alma, gracias por siempre estar, sin importar la distancia sé que me apoyas, sé que no lo digo, pero para mí eres un ejemplo de que los sueños sí los puedes hacer realidad. Gracias por estar siempre dispuesto a ayudarme, aconsejarme y abrirme las puertas de tu hogar en los momentos en que lo necesito.

Neira, Vilchis, Gustavo, Richard, J.L. (El Lic.), Cristian (Pandita): Gracias por los años de amistad, porque sé que a pesar de los muy distintos lugares donde estamos la amistad está sobre todo, porque me han visto soñarlo y me han motivado a lograrlo.

Damaris, Yino, Jenny, Zuzy y Lucy: Mi estancia en Cancún no hubiera sido tan feliz sin ustedes, me alegra muchísimo que hayamos coincidido, gracias por brindarme su amistad, consejos, paciencia, gracias por las charlas, por sus múltiples palabras de aliento, gracias por ser una segunda familia.

Aldo, Roger, Rocío, Michel: Definitivamente mi estancia en Ensenada no hubiera sido la misma sin ustedes, gracias por los meses que compartimos, por su apoyo y por brindarme su amistad, el tiempo lejos de casa no hubiera pasado tan rápido ni tan ameno sin ustedes.

A todas las personas que de una u otra forma formaron parte de este proceso, estén o no en mi vida para el día de hoy. Porque aunque el curso de esta maestría inicio en enero de 2017 todo lo que me ha hecho llegar hasta aquí y ser quien soy viene de varios años atrás.

Índice

Resumen.....	1
Abstract	3
1. Introducción	5
2. Antecedentes.....	7
2.1 Zona de estudio	9
3. Justificación	5
4. Hipótesis.....	14
5. Objetivo general	14
6. Objetivos específicos.....	14
7. Materiales y Métodos	15
7.1 Modelo regional	16
7.2 Modelo Laguna Chacmochuch	20
8. Resultados.....	23
8. 1 Primer periodo, 1 a 11 de junio de 2013	23
8.2 Segundo periodo, 23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013.....	29
8.3 Tercer periodo, 20 al 30 de mayo de 2014	35
8.4 Advección de partículas.....	40
8.4.1 Primer periodo, 1 a 11 de junio del 2013.....	40
8.4.2 Segundo periodo, 23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013	46
8.4.3 Tercer periodo, 20 al 30 de mayo de 2014.....	51
8.5 Tiempo de residencia	56
9. Discusión	58
9.1 Circulación	58

9.2 Forzamientos	59
9.3 Tiempo de residencia.....	63
9.4 Ventajas y limitantes del modelo.....	65
10. Conclusiones	69
11. Referencias	70
12. Anexo A Comparación de resultados de salinidad y temperatura superficial con datos medidos.	80
13. Anexo B Contenido multimedia	84

Listado de figuras

Figura 1. Circulación de la Corriente de Caimán y de Yucatán (Tomada de Carrillo <i>et al.</i> , 2015).	10
Figura 2. a) Ubicación de la laguna Chacmochuch	11
Figura 3. Asociación de sitios de muestreo por salinidad y turbidez (Tomada de Caballero-Vázquez <i>et al.</i> , 2005).....	12
Figura 4. Zonificación de la laguna Chacmochuch (Tomada de Aguilar Martínez, 2015).	13
Figura 5. Batimetría (m) del dominio regional.....	17
Figura 6. Representación de mallas de datos para un tiempo, para una variable.	18
Figura 7. Comparación del promedio espacial mensual de temperatura superficial del mar entre el modelo regional y datos del satélite MODIS.....	19
Figura 8. Batimetría (m) de la Laguna Chacmochuch.	21
Figura 9. Serie de transporte promedio diario a través de la boca de la laguna.....	24
Figura 10. a) Vectores de velocidad promedio para el periodo del 1 al 11 de junio de 2013..	27
Figura 11. Sección vertical meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio para el periodo del 1 a 11 de junio de 2013.....	28
Figura 12. Distribución horizontal a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio; durante el periodo del 1 al 11 de junio de 2013.....	29
Figura 13. a) Vectores de velocidad promedio para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013.	33
Figura 14. a) Sección meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013.	34

Figura 15. Distribución horizontal de a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio, para el periodo del 23 de diciembre al 3 de diciembre de 2013. .	35
Figura 16. a) Vectores de velocidad promedio para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.	38
Figura 17. Sección meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio y c) densidad potencial promedio, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.	39
Figura 18. Distribución horizontal de a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.....	40
Figura 19. Posiciones iniciales de las partículas en los experimentos de advección. El color indica los valores iniciales de su longitud (a) y latitud (b).	41
Figura 20. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 1 al 11 de junio de 2013. Los colores indican la posición respecto a la longitud (a, b y c) y latitud (d, e y f) de su posición inicial. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 1 de junio del 2013.....	43
Figura 21. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 1 al 11 de junio de 2013..	44
Figura 22. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas para el primer periodo...	45
Figura 24. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas respecto a su profundidad, para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013..	49
Figura 25. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas del segundo periodo.....	50
Figura 26. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.....	52
Figura 27. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas respecto a su profundidad, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.....	53

Figura 28. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas del tercer periodo.	55
Figura 29. Porcentaje de partículas, con respecto a su cantidad inicial, que permanecen dentro de la laguna contra días de la advección transcurridos.....	57
Figura 30. Promedio del campo del viento en el este de la Península de Yucatán (Elaborado con datos provenientes del NARR; Mesinger <i>et al.</i> , 2006).....	60
Figura 31. Vectores de velocidad promedio del modelo regional para cada periodo de análisis.....	61
Figura 32. Secciones transversales de temperatura promedio del modelo regional.	62
Figura 33. Vectores de velocidad de las corrientes horizontales en las capas de fondo (Modificado de Enríquez y Mariño-Tapia, 2014).....	65
Figura 34. Mapas de salinidad: a) Observaciones (Aguilar Martínez, 2015), b) Modelo sin entrada de agua, c) Modelo con entrada de agua y d) diferencia entre modelos.	68
Figura 35. Salinidad superficial medida a) octubre, b) noviembre y c) diciembre (Modificado de Aguilar Martínez, 2015).....	81
Figura 36. Salinidad superficial del modelo sin entrada de agua dulce y del modelo con entrada de agua dulce.	81
Figura 37. Temperatura superficial medida a) octubre, b) noviembre y c) diciembre (Modificado de Aguilar Martínez, 2015).....	82
Figura 38. Temperatura superficial del modelo sin entrada de agua dulce y del modelo con entrada de agua dulce.	83

Resumen

El objetivo de este trabajo fue implementar un modelo hidrodinámico de la laguna Chacmochuch, localizada en la costa norte de Quintana Roo, para describir el efecto de eventos meteorológicos (vientos intensificados) sobre la circulación y el tiempo de residencia del agua en la laguna. Para ello se implementó un modelo hidrodinámico sustentado en el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS), para el cual se definieron dos dominios: un modelo regional que conecta el mar abierto con la zona costera y un modelo local de alta resolución que solo considera a laguna Chacmochuch. Los datos usados para la configuración del modelo regional fueron tomados del Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas (HYCOM) y del Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR), mientras que los datos para configurar el modelo local provienen de salidas del modelo regional y del NARR. Para el análisis de resultados se analizaron dos periodos de alto transporte y un periodo de bajo transporte. Los resultados mostraron que la circulación del agua en la laguna Chacmochuch se presenta en dos capas con dirección inversa entre sí, por lo que la entrada y salida de agua se presenta en capas diferentes. La circulación de la capa superficial está controlada por el viento, mientras que en la capa de fondo está controlada por la influencia de la Corriente de Yucatán y por la surgencia en Cabo Catoche cuando ésta se presenta junto con vientos del sureste. En el primer periodo (1-11 junio de 2013) la circulación del agua en la superficie alcanzó una velocidad máxima de ~ 7 cm/s, controlada por viento del sureste, mientras que en la capa de fondo la Corriente de Yucatán y la surgencia Cabo Catoche controlaron la entrada de agua que alcanzó una velocidad máxima de ~ 3 cm/s. En el segundo periodo (23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013) se detectó un cambio en la dirección de la circulación del agua en ambas capas, en superficie se presentó la entrada de agua con velocidades que alcanzaron ~ 6 cm/s, controlada por un evento de “norte”, y la salida de agua se observó en el fondo con una velocidad máxima de ~ 3 cm/s. En el último periodo (20-30 de mayo de 2014) la salida de agua nuevamente se presentó en superficie, controlada por los vientos alisios y con una velocidad máxima de ~ 4 cm/s, y la entrada se produjo en el fondo y estuvo controlada por la Corriente de Yucatán con una velocidad máxima de ~ 3

cm/s. El tiempo de residencia promedio del agua dentro de la laguna fue de 18 días, sin embargo, en los periodos analizados se presentaron variaciones dependiendo de las condiciones meteorológicas dominantes; particularmente, el tiempo de residencia se incrementó considerablemente debido a la influencia de un “norte”. De acuerdo a los resultados analizados en este trabajo, la circulación en dos capas del agua en la laguna Chacmochuch es producto del efecto combinado de los vientos y de la influencia de la Corriente de Yucatán, por lo que la salida y entrada del agua están controladas por distintos procesos para cada periodo analizado.

Abstract

The objective of this work was to implement a hydrodynamic model of Chacmochuch lagoon, located on the north coast of Quintana Roo, to describe the effects of the meteorological events (enhanced winds) on the circulation and residence time into the lagoon. To achieve this task, a hydrodynamic model based on the Regional Ocean Modeling System (ROMS) was implemented, which included two domains: a regional model that connects the open ocean with the coastal zone, and a high-resolution local model that includes only the Chacmochuch lagoon. The regional model was configured with data from the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) and the North American Regional Reanalysis (NARR), whereas the local model was configured with data from NARR and the outputs from the regional model. Analysis of the results included two periods of high transport and a period of low transport. The results showed a two-layer circulation within the Chacmochuch lagoon, in which the inflow occurs in the surface layer and the outflow occurs in the bottom layer, and vice versa. The circulation of the surface layer was forced by the wind, whereas the circulation of the bottom layer was forced by the Yucatan Current and the Cabo Catoche upwelling, especially when upwelling occurs together with southeast wind. In the first period (1-11 June 2013) the surface flow reached a maximum speed of ~ 7 cm/s and was controlled by southeast wind, while the Yucatan Current and the Cabo Catoche upwelling controlled the water inflow that reached a maximum speed of ~ 3 cm/s. In the second period (November 23 to December 3, 2013) there was a change in the water circulation: the water inflow occurred in the surface layer with a maximum speed of ~ 6 cm/s, controlled by a "norte" (northern wind), and the water outflow occurred in the bottom layer with a maximum speed of ~ 3 cm/s. In the last period (May 20-30, 2014), the water outflow occurred in the surface layer and was controlled by the trade winds, with a maximum speed of ~ 4 cm/s, whereas the water outflow occurred in the bottom layer, with a speed of ~ 3 cm/s, and was controlled by the Yucatan Current. The mean residence time of the water within the lagoon was 18 days, but this time was different in each analyzed period depending of the dominant meteorological process; particularly the residence time showed an important increase by the influence of the

northern wind. According to the findings of this study, the two-layer water circulation within the lagoon is a result of a combined effect of the winds and the influence of the Yucatan Current, so that the water outflow and inflow in the lagoon are controlled by different processes in each analyzed period.

1. Introducción

Las lagunas costeras ocupan aproximadamente 13% de las zonas costeras del mundo. África y Norteamérica son las regiones con mayor presencia de estos ecosistemas (17.9% y 17.6% de la línea de costa, respectivamente), mientras que en Asia, Sudamérica, Australia y Europa su presencia disminuye a 13.8%, 12.2%, 11.4% y 5.3% de la línea de costa respectivamente (Barnes, 1980).

Las lagunas costeras son cuerpos de agua someros, que se ubican de forma paralela a la costa y están separadas del océano por una barrera y la conexión con este puede ser permanente o intermitente (Contreras, 1993; Kjerfve, 1994). Tienen una interacción con el continente por medio de descargas de agua que pueden ser superficiales o subterráneas (Kjerfve, 1994). La interacción de estas dos masas de agua con diferentes características de salinidad, concentración de nutrientes o iones, produce que las lagunas tengan un comportamiento físico, químico y biológico particular (Contreras, 1993). Estos ecosistemas que resultan de complejas interacciones entre factores marinos, atmosféricos y terrestres (Lankford, 1977) son de los más productivos en la Tierra.

En general, la estructura ecológica y funcionamiento de estos ecosistemas depende de la circulación de las masas de agua, movimiento que por sí mismo es de importancia científica pero que también se relaciona con la dispersión de organismos (Jouon *et al.*, 2006). El movimiento de agua dentro de las lagunas es uno de los factores que determinan el tiempo de residencia o renovación del agua e influye en la calidad del agua y el potencial de eutrofización del sistema (Kjerfve, 1994).

Para tener una mejor comprensión del papel de la hidrodinámica en los procesos ecológicos del sistema, primero deben identificarse los factores dinámicos que determinan su funcionamiento (Jouon *et al.*, 2006). Una forma de obtener esta información es mediante el empleo de modelos (Tsihrintzis *et al.*, 2007; Webster, 2010).

En la región del Caribe mexicano, la laguna costera de Nichupté y Bojorquez es la más estudiada ya que alrededor de ella se construyó la ciudad de Cancún; sin embargo, en la misma zona norte del estado de Quintana Roo, existen otras dos lagunas: la Laguna Yalahau y la Laguna Chacmochuch (Romero-Sierra *et al.*, 2018). Esta última es un cuerpo de agua de mayor volumen que Nichupté, y a diferencia de esta, su contacto con el mar es a través de una amplia boca localizada en su porción norte. A pesar de la importancia de las lagunas costeras para mantener la conectividad de los ecosistemas costeros es muy poco lo que se conoce sobre esta laguna. Por ello, y como una primera aproximación a su complejidad ecológica, es necesario entender su funcionamiento como sistema físico.

Por todo lo anterior, este proyecto de investigación tiene como objetivo generar un modelo de circulación hidrodinámica de la laguna Chacmochuch que permita conocer, entre otras cosas, la dirección y velocidad de las corrientes, el tiempo de residencia de sus aguas y los factores que determinan la circulación del agua.

2. Antecedentes

En México las lagunas costeras tienen gran relevancia, ya que en los 11,592 km de litoral del país se ubican aproximadamente 130 de estos cuerpos acuáticos. Cada laguna tiene características específicas de extensión, regímenes hidrológicos, biota, hábitats, flujos de energía y problemas particulares (Contreras, 1993). Las lagunas costeras proveen múltiples servicios ecosistémicos (Kennish y Hans, 2010), como la presencia de pesquerías, la protección contra tormentas y todos los servicios turísticos asociados (Mitchell *et al.*, 2017).

Un rasgo fundamental de las lagunas costeras es el gradiente de salinidad que le otorga las características estuarinas. Por otro lado, el calentamiento y enfriamiento de estos sistemas está determinado por flujos de calor (Smith, 1994). Ambos aspectos del comportamiento dinámico de las lagunas costeras dependen en gran medida de la circulación del agua.

Para estudiar la circulación del agua, muchas veces se recurre a modelos hidrodinámicos. Estos son modelos numéricos que resuelven ecuaciones de hidrodinámica y transporte de materia, por medio de métodos iterativos (Farreras, 2004) considerando las fuerzas que generan la circulación oceánica: rotacionales, gravitacionales, termodinámicas, mecánicas, internas y condiciones de fronteras (Apel, 1998). Por medio de estos modelos se obtiene información relativa al volumen de agua de mar que entra a una laguna, la velocidad del flujo en los canales de entrada, temperatura, salinidad, niveles de agua y difusividad de trazadores (Farreras, 2004; Tsihrintzis *et al.*, 2007; Webster, 2010; Rivas *et al.*, 2016). Esta información ha sido utilizada para evaluar el comportamiento y las condiciones de algunos ecosistemas, documentar la toma de decisiones y el manejo futuro de los mismos (Tsihrintzis *et al.*, 2007; Webster, 2010).

Un modelo hidrodinámico que actualmente es ampliamente usado es el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS por sus siglas en inglés, Shchepetkin and McWilliams 2005). Este modelo es usado para simular corrientes oceánicas en zonas costeras así como interacciones físico-biológicas, resultados que son validados mediante la comparación de datos obtenidos por medio de muestreos o imágenes de satélite (Marchesiello *et al.*, 2003; Di Lorenzo, *et al.*, 2005; Powell *et al.*, 2006; Rivas *et al.*, 2010; Rivas y Samelson, 2011; Mateos *et al.*, 2013; Chevalier, 2015; Peña *et al.*, 2016).

Los ecosistemas costeros de la región nororiental de la Península de Yucatán se encuentran influenciados por la corriente de Yucatán (Capurro, 2003). Esta fluye desde el sur de la isla de Cozumel a través del oeste del canal de Yucatán, comunicando el Mar Caribe con el Golfo de México (Enriquez *et al.*, 2010; Athié *et al.*, 2011). Esta corriente ocasionalmente origina una surgencia en Cabo Catoche que empuja agua fría y rica en nutrientes hacia la costa de Yucatán, lo que propicia las condiciones para la formación de florecimientos algales (Enriquez *et al.*, 2010).

Aunque la zona costera de la Península de Yucatán cuenta con numerosos ecosistemas, los trabajos de modelación hidrodinámica son escasos. Entre estos se pueden citar los realizados por Enríquez *et al.* (2010) para la zona costera del norte de la Península de Yucatán, Torres-Freyermuth *et al.* (2012) para la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Enríquez y Mariño-Tapia (2014) para los procesos que originan la surgencia de Cabo Catoche y Romero-Sierra *et al.* (2018) para la laguna Nichupté.

La laguna Chacmochuch, localizada al noreste de la Península de Yucatán en el estado de Quintana Roo, está dentro de la zona de influencia de la surgencia de Cabo Catoche. Los trabajos de investigación realizados en esta laguna son escasos, pero es posible destacar dos trabajos: El primero realizado por Caballero-Vázquez *et al.* (2005) quienes identifican y clasifican las especies de peces que habitan la laguna de acuerdo a los parámetros hidrológicos, y el segundo realizado por Aguilar Martínez (2015) quien caracteriza la variabilidad hidrológica de la laguna. Sin embargo, no se cuenta con

información suficiente de los procesos hidrodinámicos que afectan a la laguna y la forma en que estos influyen en la circulación del agua del sistema. La influencia predominante de la corriente de Yucatán (Capurro, 2003) y la existencia de una entrada de agua marina en la boca norte de la laguna Chacmochuch (Aguilar Martínez, 2015) son dos factores que deben tener influencia en la circulación del agua en la laguna y por lo tanto también en sus características hidrológicas y variabilidad ambiental del ecosistema.

2.1 Zona de estudio

La región en la que se ubica la Laguna Chacmochuch, tiene un clima caliente subhúmedo con lluvias en verano del subtipo más seco de los cálidos húmedos (Aw0), se presentan lluvias en los meses de mayo a octubre, en este último mes se presenta la mayor precipitación (García, 1998; PMSLC, 2008). De acuerdo a los registros del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx>), la temperatura media anual del (1951-2010) considerando la estación de Cancún es de 27.2 °C, la máxima anual es de 31.7°C y la mínima anual es de 22.6°C, mientras que el promedio de precipitación pluvial anual de 1,300.2 mm. En la zona se diferencian dos épocas climáticas, la época de lluvias que abarca los meses de mayo a octubre y la época de secas que comprende dos subperíodos, el primero es la época de nortes que abarca de noviembre a febrero y el segundo es la época de sequía que abarca los meses de febrero a abril (PMSLC, 2008).

La parte este de la Península de Yucatán forma parte del Gran Ecosistema Marino del Mar Caribe (LME, por sus siglas en inglés), que se encuentra influenciado por la Corriente del Caribe y se conecta al Golfo de México por medio del canal de Yucatán. El LME comprende una gran variedad de hábitats, biodiversidad marina y recursos pesqueros que se encuentran fuertemente influenciados por los procesos oceanográficos (Carrillo *et al.*, 2017). La Corriente de Caimán (originada por la Corriente del Caribe al circular por las Islas Caimán) se convierte en la Corriente de Yucatán cuando gira al norte de la Península de Yucatán, en donde se intensifica y alcanza velocidades mayores a 2 m/s,

para ingresar al Golfo de México donde se conoce como la Corriente de Lazo (Figura 1) (Carrillo *et al.*, 2015; Carrillo *et al.*, 2017).

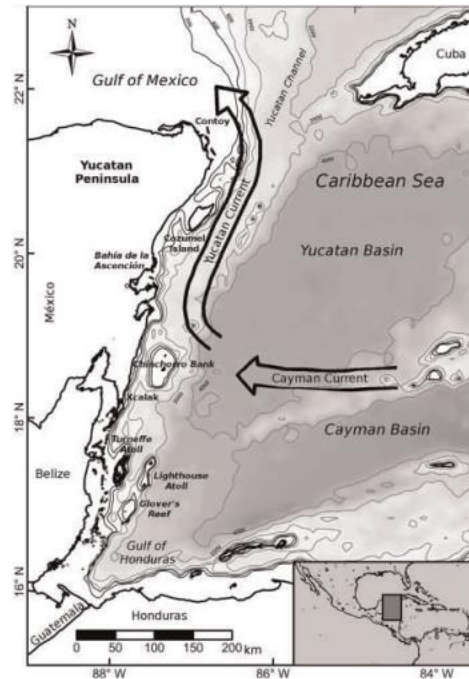


Figura 1. Circulación de la Corriente de Caimán y de Yucatán (Tomada de Carrillo *et al.*, 2015).

El área de estudio de este trabajo es la laguna Chacmochoch, que es la laguna de mayor extensión del sistema lagunar Chacmochoch. Este sistema se localiza al noreste de Cancún (Figura 2), entre las latitudes $21^{\circ}10'53''\text{N}$ y $86^{\circ}48'45''\text{N}$, y las longitudes y $21^{\circ}15'14''\text{N}$, $86^{\circ}51'29''\text{O}$. Tiene un área de 115.27 km^2 y está conformado por las siguientes lagunas: Larga, Punta Sam, Las Garzas, Cocodrilos, Zapatito, Esmeralda, Manatí y la Esperanza (Caballero-Vázquez, 2003; Caballero-Vázquez y Vega-Cendejas, 2012).

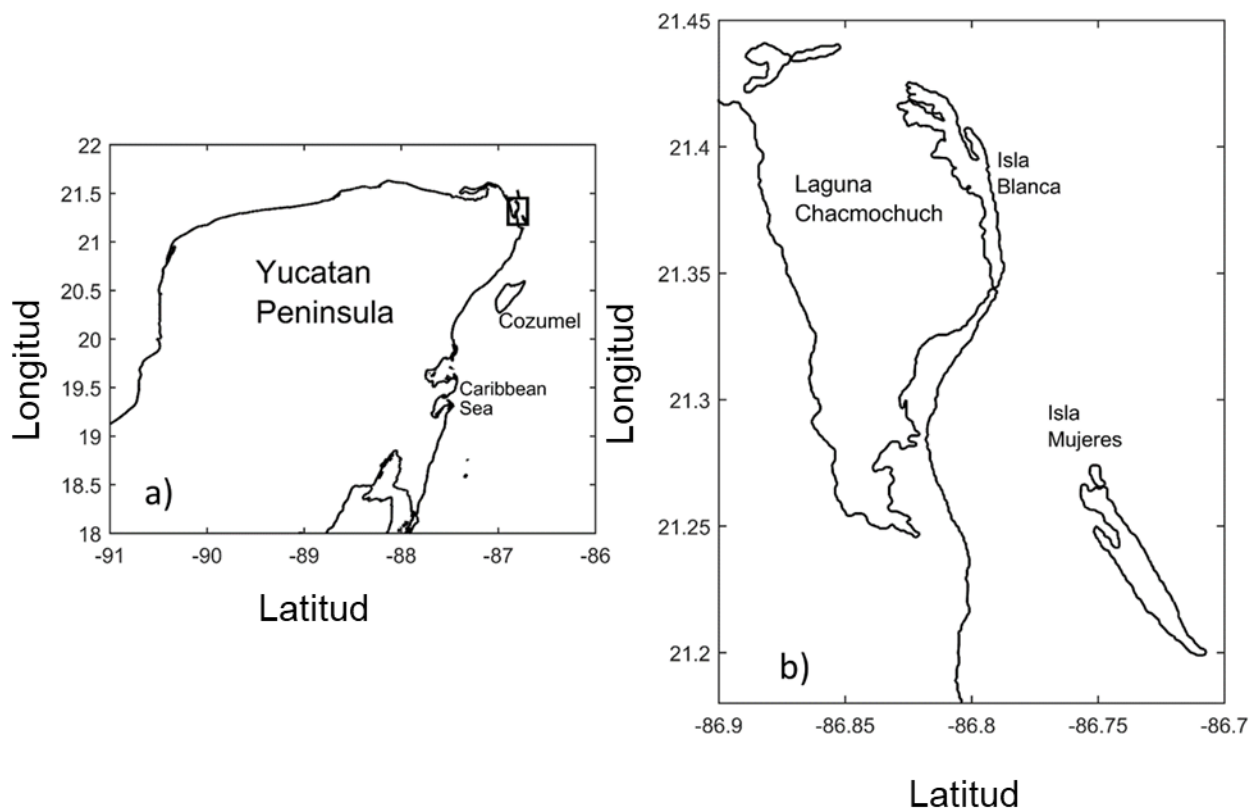


Figura 2. a) Ubicación de la laguna Chacmochuch (el recuadro negro indica el área de la laguna) con respecto a la Península de Yucatán y b) dominio de la laguna Chacmochuch.

De acuerdo a los trabajos de Caballero-Vázquez (2003) y Aguilar Martínez (2015), existe una marcada variación en los parámetros fisicoquímicos de la laguna Chacmochuch. La mayor salinidad se presenta en la zona norte de la laguna y disminuye hacia el sur de esta, los nitratos tienen un comportamiento semejante, mientras que el oxígeno disuelto y la clorofila a presentan un patrón inverso al de la salinidad. De acuerdo a Caballero-Vázquez *et al.* (2005), la salinidad es determinante en la distribución de especies de peces en la laguna. Esta se clasifica en tres grupos (Figura 3): el grupo I que corresponde a especies estohalinas y marinas, el grupo II que comprende peces estuarinas y eurihalinos, y el grupo III que alberga los peces de agua dulce.

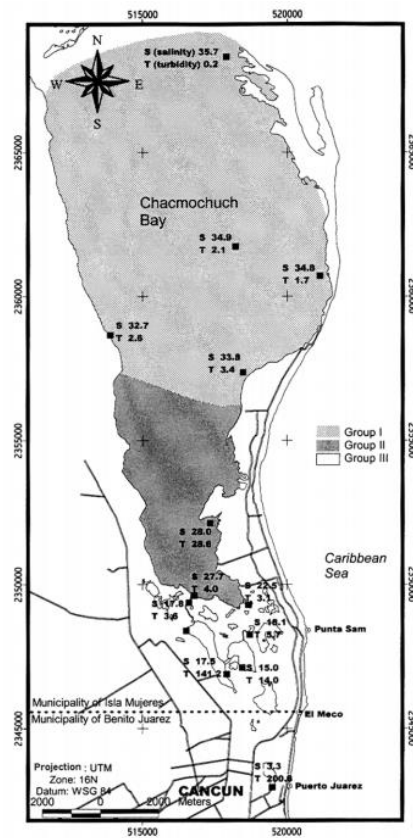


Figura 3. Asociación de sitios de muestreo por salinidad y turbidez (Tomada de Caballero-Vázquez *et al.*, 2005).

Posteriormente, Aguilar Martínez (2015) propone cuatro zonas de afinidad hidrológica para la laguna Chacmochuch de acuerdo a las variables de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (Figura 4). La zona 1 corresponde a la boca norte del sistema lagunar y se caracteriza por una mayor influencia de agua marina lo que provoca que tenga salinidad mayor a 30, las temperaturas van de 22°C a 29°C en la temporada de nortes, de 24°C a 30°C en temporada de secas y en promedio 30°C en la temporada de lluvias. La zona 2 se ubica en el oeste del centro de la laguna, mantiene salinidades menores y se observa mejor definida en los meses de abril a julio y de noviembre a febrero. La zona 3 se ubica del centro al este, que corresponde a una zona de menor profundidad. Esta zona presenta salinidades y temperaturas altas. La zona 4 es el sur de la laguna, que tiene los menores valores de salinidad pero los valores más altos de temperaturas (Aguilar Martínez, 2015).

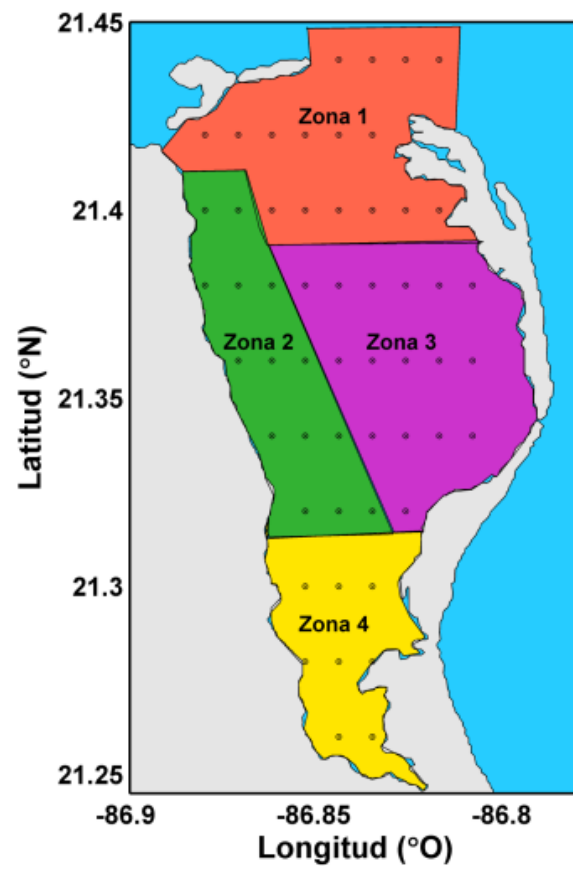


Figura 4. Zonificación de la laguna Chacmochuch (Tomada de Aguilar Martínez, 2015).

3. Justificación

Debido a las implicaciones que tiene la circulación del agua en el funcionamiento ecológico de laguna Chacmochuch, así como para el entendimiento de los riesgos asociados a las actividades humanas como eutrofización y contaminación, es fundamental conocer los patrones estacionales de circulación como el tiempo de residencia del agua e información de la hidrodinámica que contribuya a entender su funcionamiento y los riesgos potenciales a los cuales se encuentra expuesto.

4. Hipótesis

El patrón de circulación y tiempo de residencia en la laguna Chacmochuch está controlado por los eventos meteorológicos de escala sinóptica asociados a las temporadas climáticas que se presentan en la región.

5. Objetivo general

Implementar un modelo hidrodinámico de la laguna Chacmochuch para describir cómo afectan los eventos meteorológicos la circulación y el tiempo de residencia del agua en la laguna.

6. Objetivos específicos

- Implementar un modelo hidrodinámico para la laguna Chacmochuch.
- Describir de la circulación de agua en la laguna y sus intercambios con el mar adyacente, de acuerdo a periodos de interés, dentro de las distintas temporadas climáticas.
- Cuantificar el transporte de agua hacia la laguna y el tiempo de residencia del agua interior, y determinar las diferencias entre los periodos de interés.

7. Materiales y Métodos

Las simulaciones de la circulación hidrodinámica de la laguna Chacmochuch se realizaron empleando el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS, por sus siglas en inglés). Este modelo tridimensional de superficie libre (la superficie del agua está en contacto directo con la atmósfera) resuelve las ecuaciones primitivas con una aproximación hidrostática y de Boussinesq. El modelo se configuró en un dominio de coordenadas rectangulares en la horizontal y coordenadas sigma con estiramiento en la vertical (Rivas y Samelson, 2011; Mateos *et al.*, 2013). Las ecuaciones primitivas en coordenadas cartesianas son las siguientes (Hedström, 2000):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_u + D_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + F_v + D_v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = F_T + D_T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla S = +F_S + D_S, \quad (4)$$

$$\rho = \rho(T, S, P), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

donde u , v , w son las componentes del vector de velocidad $\vec{v}$, $T(x, y, z, t)$ es la temperatura potencial, $S(x, y, z, t)$ es la salinidad total, $\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$ es la densidad total

con una ρ_0 de referencia, $\phi(x, y, z, t) = P/\rho_0$ es la energía asociada a la presión dinámica P , $f(x, y)$ es el parámetro de coriolis, g es la aceleración de la gravedad, D_u , D_v , D_T , D_S son los términos de difusión y F_u , F_v , F_T , F_S son los términos de forzamiento.

Las ecuaciones (1) y (2) corresponden al *momentum* en la dirección zonal (Longitud) y meridional (Latitud), considerando los términos del parámetro de Coriolis y los términos de forzamiento superficial y difusión (Hedström, 2000). Las ecuaciones (3) y (4) describen los balances de temperatura y salinidad respectivamente, que son determinados por la advección y difusividad (Hedström, 2000). Las variables que se resuelven en las ecuaciones son el campo de velocidad y la densidad; para resolver esta última se recurre a la ecuación (5), que es la ecuación de estado del agua de mar, que describe la densidad como función de la salinidad, temperatura y la presión (Henk, 2008). La ecuación (6) describe el equilibrio hidrostático en la vertical. La ecuación (7) es la ecuación de continuidad para un fluido incompresible (Hedström, 2000).

Para el desarrollo del modelo de la laguna Chacmochuch se usaron dos dominios. El primer dominio se extiende de los 21.10°N a los 21.70°N y de los 86.50°O a los 87.10°O. El segundo dominio, contenido en el primero, de menor escala y mayor resolución se extiende de los 21.24°N a los 21.44°N y de los 86.80°O a los 86.90°O. El primer dominio permitió la obtención de un modelo regional que genera los datos de frontera utilizados en el segundo dominio correspondiente al modelo de la Laguna Chacmochuch.

7.1 Modelo regional

Para obtener la batimetría y mallas del modelo regional se generó una malla del dominio con resolución de 1/200° (~0.5 km) con la herramienta “ROMSTOOLS” (para ver más detalles del uso de esta herramienta, consultar Penven *et al.*, 2007). La batimetría usada por el ROMSTOOLS (ETOPO 2) fue sustituida por una de mayor resolución, como en la metodología propuesta por Romero-Sierra *et al.* (2018). Esta batimetría (figura 5) fue obtenida por medio de la interpolación de la batimetría tomada del modelo de relieve

global “ETOPO1” que cuenta con resolución de ~ 2 km (Amante y Eakins, 2009) a la malla del dominio regional. El modelo se configuró con 10 niveles de profundidad. La resolución vertical aumenta hacia la superficie y el fondo, correspondiente a los parámetros de estiramiento $\theta_S=4$ y $\theta_B=0.9$ en las coordenadas verticales.

El modelo regional cuenta con cuatro fronteras abiertas (norte, sur, oeste y este) en las que se impusieron los valores de temperatura, salinidad, velocidad de la corriente y nivel del mar; estos datos de frontera varían con el paso del tiempo, por lo que se impusieron datos cada tres horas. Estos datos provienen del Modelo Oceánico en Coordenadas Híbridas (HYCOM, por sus siglas en inglés) que cuenta con una resolución de $1/25^\circ$ (~ 4 km) y 40 niveles de profundidad, que abarcan profundidades desde la superficie hasta los 5,000 m (<https://hycom.org/>). Los datos descargados para el dominio regional consideran una profundidad máxima de 600 m. Se obtuvo una serie de mallas de datos para cada tiempo, cada malla corresponde a un nivel de profundidad para la variable correspondiente (Figura 6).

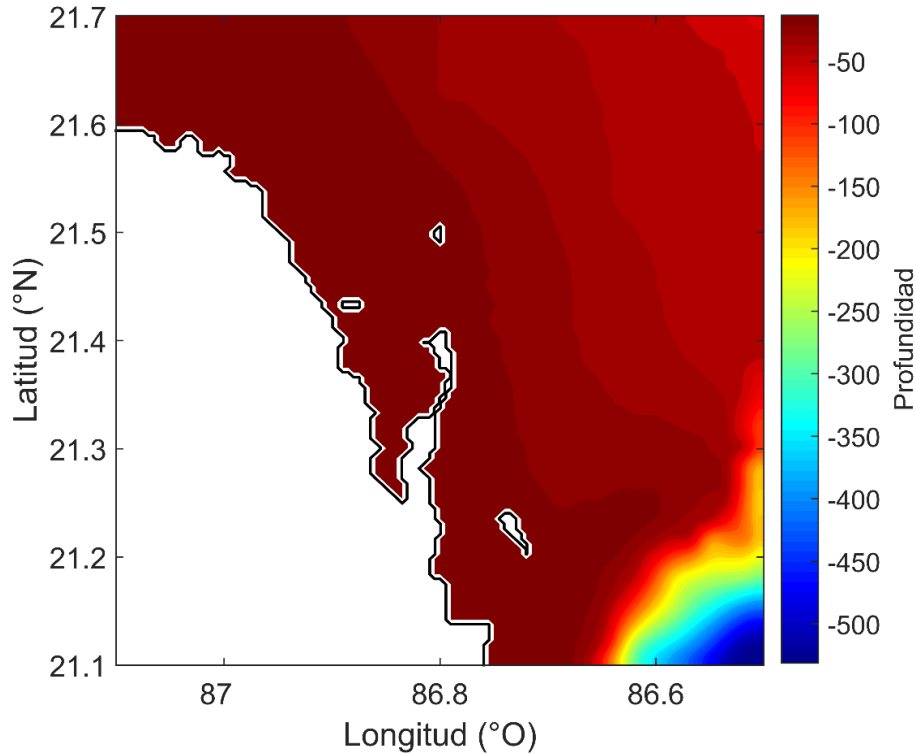


Figura 5. Batimetría (m) del dominio regional obtenida para la malla de resolución de ~ 0.5 km.

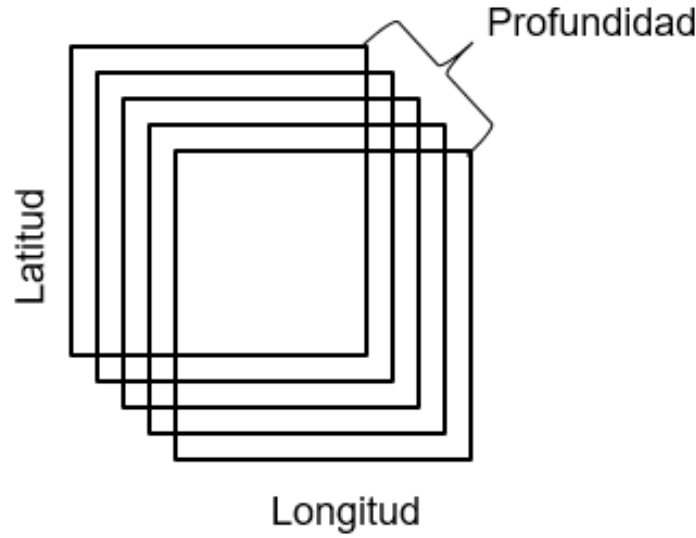


Figura 6. Representación de mallas de datos para un tiempo, para una variable.

Los puntos de malla de los datos provenientes del HYCOM no coinciden con los puntos de malla del modelo regional. Debido a esto es necesario realizar una interpolación de la malla de datos a la malla del modelo. Este proceso se realizó mediante un programa diseñado para seleccionar los datos disponibles a menor distancia de las fronteras del modelo regional e interpolarlos a la frontera correspondiente y a la profundidad por medio de un mapeo objetivo (*e.g.* Thomson y Emery, 2014), con escalas de decaimiento exponencial de la correlación de 0.2° en la horizontal y 100 m en la vertical, imponiendo un cociente de señal a ruido de 0.08.

En la superficie del modelo se impuso el campo de esfuerzo del viento estimado mediante la siguiente formulación (Dijkstra, 2008):

$$\vec{\tau} = C_D \rho_a |\vec{U}_{10}| \vec{U}_{10} \quad (8)$$

donde $\vec{\tau}$ es el esfuerzo del viento, ρ_a es la densidad del aire (1.3 kg/m^3), $\vec{U}_{10}$ es el vector de velocidad del viento a 10 m de altura, los datos del vector de viento provienen del Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR; Mesinger *et al.*, 2006), C_D es el coeficiente de arrastre estimado mediante las parametrizaciones propuestas por Smith (1998).

El flujo de calor sensible y el flujo de agua dulce (evaporación menos precipitación) para la superficie del modelo provienen de promedios mensuales del modelo HYCOM. Estos datos se interpolaron a la malla del modelo aplicando nuevamente un mapeo objetivo (e.g. Thomson y Emery, 2014) con escalas de decaimiento exponencial de la correlación de 0.2° en la horizontal, imponiendo un cociente de señal a ruido de 0.08. El modelo se corrió para un periodo de dos años para propósitos de ajuste (*spin-up*), a partir de una condición inicial de valores iniciales de temperatura y salinidad uniformes para toda la laguna de 25°C y 35 respectivamente. La última salida del periodo de ajuste se usó como condición inicial para realizar la simulación de los años 2013-2014.

Con datos provenientes del satélite MODIS (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) y del modelo regional se realizaron series de tiempo del promedio espacial mensual de temperatura superficial del modelo regional (Figura 7). La comparación de estas series se usó para evaluar la similitud del modelo respecto a los datos de satélite. Se obtuvo una correlación de 0.91 entre ambas series con una variación máxima de 2.5°C entre el modelo y los datos provenientes del satélite, en promedio el modelo subestima en 1.1°C la temperatura.

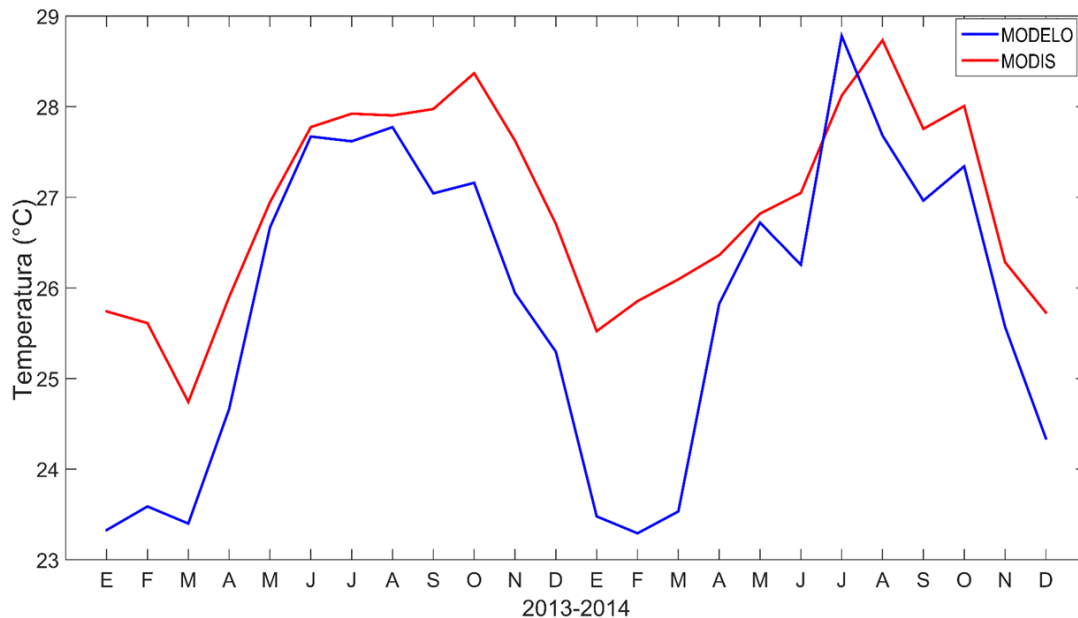


Figura 7. Comparación del promedio espacial mensual de temperatura superficial del mar entre el modelo regional y datos del satélite MODIS.

7.2 Modelo Laguna Chacmochuch

La batimetría de la laguna Chacmochuch (Figura 8) se obtuvo a partir de la interpolación de 31 datos medidos con un equipo Hydrolab DS5 44693 en septiembre del 2009. A estos datos se les aplicó un mapeo objetivo (e.g., Thomson y Emery, 2014), con escalas de decaimiento exponencial de la correlación de 0.2° en la horizontal y un cociente de señal a ruido de 0.06. Por medio de la herramienta “ROMSTOOLS” (Penven *et al.*, 2007) se generaron las mallas del modelo, con una resolución de $1/900^\circ$ (~ 0.1 km). La batimetría de la laguna se interpoló a la malla obtenida, con la que se sustituyó la batimetría del “ROMSTOOLS” de forma similar a lo realizado en el modelo regional, de acuerdo a la metodología de Romero-Sierra, *et al.* (2018). Este dominio de escala fina es el modelo local, de la laguna el cual tiene una configuración de 5 niveles en la vertical. La resolución vertical aumenta hacia la superficie y el fondo, correspondiente a los parámetros de estiramiento $\theta_S=4$ y $\theta_B=0.9$ en las coordenadas verticales. El modelo de la laguna cuenta con tres fronteras abiertas (norte, este y oeste) en las que se impusieron valores de temperatura, salinidad, velocidad de la corriente y nivel del mar cada tres horas obtenidos de la simulación del año 2013 y 2014 del modelo regional. Estos datos se procesaron con el mismo método que los datos de frontera empleados para el modelo regional, seleccionando los datos adecuados para cada frontera y realizando la interpolación de la malla del modelo regional a la malla de las fronteras del dominio de la laguna Chacmochuch.

Existen dos opciones para proveer al modelo los datos de esfuerzo del viento, flujo de calor neto y flujo de agua dulce en superficie. La primera consiste en imponer los datos directamente al modelo (opción usada en el modelo regional). La segunda consiste en ingresar al modelo los campos atmosféricos el vector de viento, la temperatura, presión y humedad relativa del aire, evaporación, tasa de precipitación y el flujo neto de radiación de onda corta a 10 m de la superficie. Con esta información el campo de esfuerzo del viento, el flujo de calor y el flujo de agua dulce son calculados internamente en el modelo.

Estos cálculos se realizan usando los métodos de Liu *et al.* (1979) y Fairall *et al.* (1996a, 1996b) (<https://www.myroms.org/main.php?page=forcing>).

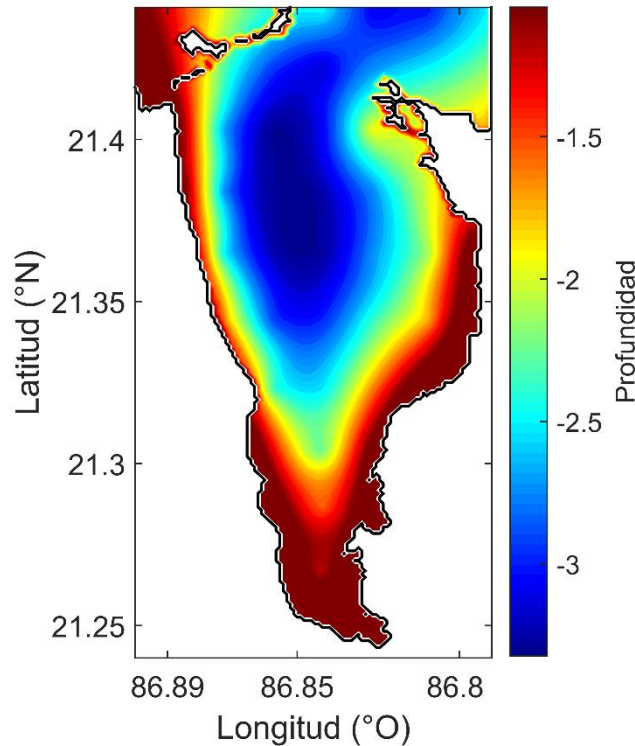


Figura 8. Batimetría (m) de la Laguna Chacmochuch.

Esta segunda opción fue aplicada para el modelo de la Laguna Chacmochuch usando los datos meteorológicos provenientes del NARR (Mesinger *et al.*, 2006), que fueron interpolados a la malla de la Laguna Chacmochuch. El modelo se corrió dos años para fines de ajuste (*spin-up*) y la última salida se usó como condición inicial para realizar la simulación correspondiente a los años 2013 y 2014.

Para el análisis de los resultados de la simulación, se consideró como boca de la laguna la latitud 21.40 °N. En esta latitud se estimó el área de la sección de la boca de la laguna para estimar el transporte a través de esta. Este transporte se estimó con los promedios diarios de la velocidad meridional.

A partir del promedio de transporte entrante a la laguna en el año analizado, se calculó el tiempo de residencia de las aguas de la laguna. Para esto se consideró el volumen total de agua en la laguna y el transporte promedio (e.g., Jouon *et al.*, 2006) dado de la forma:

$$Tr = \frac{V}{Q_f}, \quad (9)$$

donde Tr es el tiempo de residencia en segundos, V el volumen del cuerpo de agua en m^3 y Q_f el transporte promedio m^3/s .

Los resultados de velocidad de corriente mostraron la existencia de una circulación prácticamente en dos capas. Por lo anterior, para el análisis de las corrientes se estimaron los promedios de la capa superficial y la de fondo. Para la primera se consideraron los dos niveles superficiales del modelo y para la segunda los tres niveles del fondo.

Para el estudio de los tiempos de residencia, se realizaron experimentos numéricos de advección de partículas con el método de Rivas y Samelson (2011). En cada experimento se realizó la liberación de 1,946 partículas en el día inicial del periodo, a 0.10 m de profundidad. El periodo de advección fue de once días, correspondientes a cada uno de los periodos de interés.

Los resultados de los análisis antes mencionados proveen información útil sobre la hidrodinámica de la laguna y de la cinemática de sus aguas, lo que ayuda a identificar patrones característicos dentro de este cuerpo de agua. Estos resultados obtenidos del procesamiento de los datos del modelo, se describen en la siguiente sección.

8. Resultados

La simulación realizada abarca los años 2013 y 2014, pero el periodo considerado en este trabajo abarca un ciclo anual de junio del 2013 a mayo del 2014. Se tomó este periodo debido a que la serie de transporte analizada para los dos años muestra que a partir de agosto del 2014 el transporte tiene un comportamiento aparentemente anormal respecto a lo observado en el periodo previo. Este último periodo corresponde a un cambio de experimento en el HYCOM, por lo que se decidió no considerar este periodo en los resultados.

El transporte promedio hacia el interior de la laguna durante el año de análisis es de 180 m³/s y el tiempo de residencia promedio del agua en la laguna es de 18 días. Con base en la serie de tiempo del transporte promedio diario hacia la laguna (figura 9), se seleccionaron tres periodos de interés de diferentes magnitudes y épocas del año. El primero corresponde al periodo comprendido entre el 1 y el 11 de junio de 2013, seleccionado por ser un sistema de verano con un transporte intenso. El segundo periodo abarca del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013, caracterizado por el mayor transporte del año analizado. El tercer periodo comprende del 20 al 30 de mayo de 2014, que corresponde a un periodo de transporte débil, al que se ha denominado periodo calmo. Cada uno de estos periodos se señala en la figura 9.

8. 1 Primer periodo, 1 a 11 de junio de 2013

Este periodo corresponde a un sistema de verano (temporada de lluvias) en el que se tiene un transporte de agua hacia la laguna que supera los 350 m³/s. De forma general la circulación se presenta en dos capas, en la superficial ocurre la salida de agua y en la capa de fondo ocurre en la entrada de agua (figura 10a). Los vectores de velocidad en superficie tienen, de forma general, una dirección de sureste a noroeste con velocidades que alcanzan ~7 cm/s en las zonas cercanas a las costas y a la boca de la laguna. Las

variaciones de magnitud y dirección de la velocidad de la corriente para esta capa se desarrollan principalmente en el norte y en el oeste cerca de la costa (figura 10b).

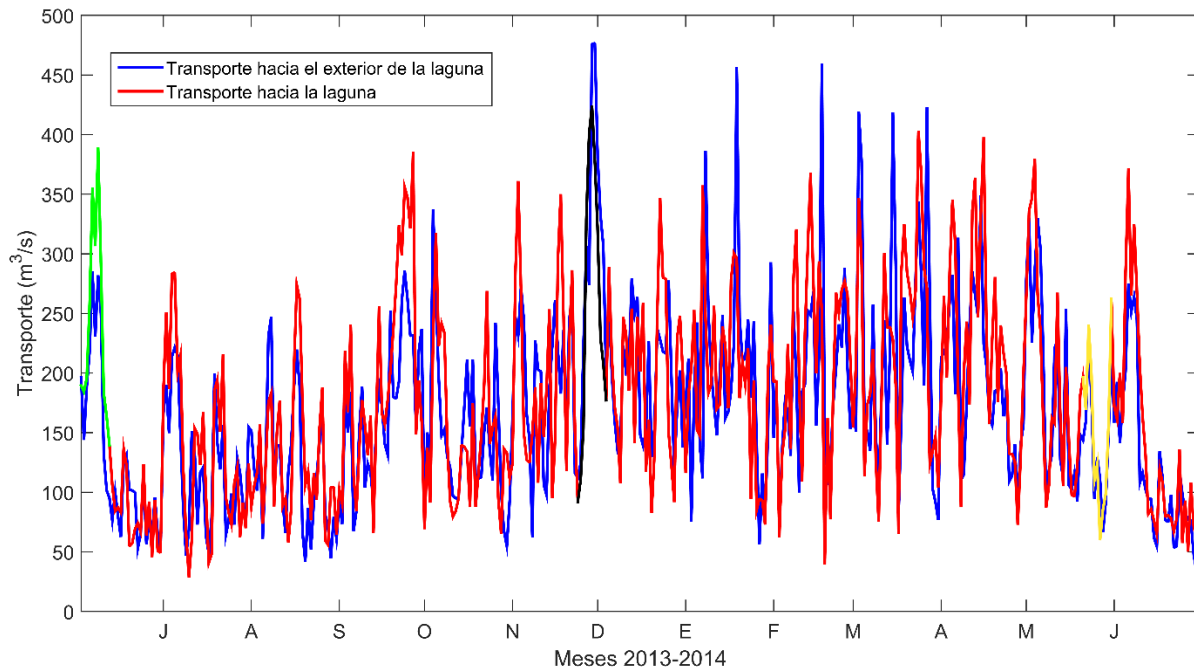


Figura 9. Serie de transporte promedio diario a través de la boca de la laguna (21.40 °N), en la que se señalan tres periodos de interés. Los valores negativos indican flujo hacia el interior de la laguna. Periodo del 1/06/13 a 11/06/13 (verde), periodo del 23/11/13 a 3/12/13 (negro) y periodo del 20/05/14 a 30/05/14 (amarillo).

En la capa del fondo la dirección de los vectores de velocidad es de norte a sur principalmente en el centro de la laguna con velocidades máximas de ~3 cm/s. Hacia las costas la velocidad disminuye y se presentan variaciones en las direcciones de la corriente. En la figura 10b se presentan las elipses de desviación estándar de la velocidad de corriente. En estas se identifica que la principal variación de dirección de corriente superficial se presenta en el centro de la laguna aunque con bajas magnitudes. En la costa oeste la dirección es norte-sur pero con magnitudes mayores a las de toda la laguna. Para la capa de fondo, nuevamente las principales variaciones de dirección se presentan en el centro de la laguna, con magnitudes mayores respecto a las velocidades superficiales en esta zona.

Para analizar la entrada de agua, se presenta una sección de velocidad en la boca de la laguna (figura 10c) que permite corroborar que el flujo de agua hacia el interior de la laguna ocurre en la capa de fondo. Esta capa alcanza su mayor espesor en el centro de la boca, con una magnitud de la velocidad que alcanza 3 cm/s, esta es la mayor velocidad de entrada de agua. La salida de agua como se ha mencionado se presenta en la capa superficial, cuyo espesor es de ~2 m en la dirección zonal de la laguna disminuye hasta 0.5 m en el centro. Las mayores velocidades de salida se presentan en los primeros centímetros de las costas con velocidades de ~6.5 cm/s.

En la sección vertical de velocidad, perpendicular a la boca de la laguna (figura 9d), se observa que la capa superficial no rebasa los 0.5 m de profundidad para la mayor parte de la laguna, con velocidades de ~2 cm/s. Por otro lado, en la capa de fondo el espesor varía de ~0.5 m hasta ~2.5 m y las velocidades varían de 1 cm/s en la zona adyacente a la capa superficial y en el sur de la laguna, hasta 4 cm/s en la zona central cercana a la boca. De forma general la velocidad disminuye con la profundidad en la capa superficial y tiene el comportamiento inverso en la capa de fondo.

En la sección de temperatura de norte a sur de la laguna (figura 11a) se observa que la mayor temperatura (~28 °C) se presenta en la superficie, desde la boca hasta el centro. De forma general, la variación de temperatura es de ~1 °C. En este periodo la temperatura desde la boca hasta el centro varía inversamente con la profundidad. Hacia el sur de la laguna se tiene una distribución que tiende a una variación horizontal débil. La menor temperatura ~27.5 °C se presenta en el sur, la zona más somera de la laguna.

En la sección vertical de salinidad (figura 11b) se observa una variación horizontal. La salinidad en el norte de la laguna (boca) es de ~35.0 y se incrementa hacia el interior de esta hasta alcanzar un valor de ~36.5 en el centro. Hacia el sur de la zona de máxima salinidad, esta disminuye hasta alcanzar ~34.5 en el sur.

La sección de densidad potencial (figura 11c) tiene un patrón similar al de la sección de salinidad. En la boca de la laguna se tiene un valor de densidad de $\sim 22.6 \text{ kg/m}^3$ que se incrementa hacia el interior de la laguna, con la mayor densidad de 23.6 kg/m^3 en el centro, en la misma zona del máximo de salinidad. Hacia el sur se presenta una disminución de densidad hasta alcanzar un valor de $\sim 22 \text{ kg/m}^3$ en la zona más somera de la laguna.

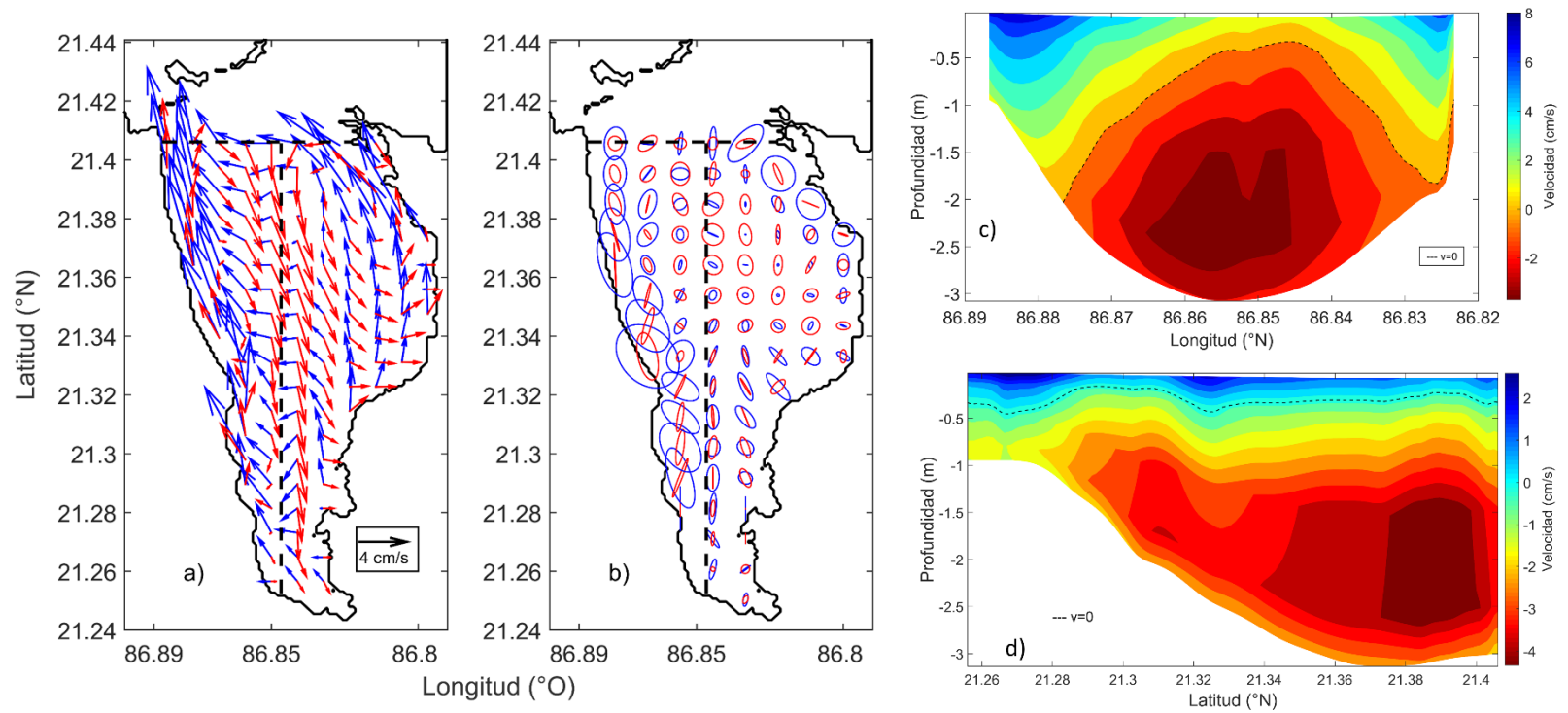


Figura 10. a) Vectores de velocidad promedio (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional), b) elipses de desviación estándar de velocidad (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional), c) sección de velocidad promedio en la boca de la laguna (valores positivos corresponden a flujo hacia el exterior de la laguna) y d) sección de velocidad promedio de norte a sur de la laguna (valores positivos corresponden a flujo hacia el exterior de la laguna), para el periodo del 1 al 11 de junio de 2013. La línea punteada señala la latitud considerada como la boca de la laguna.

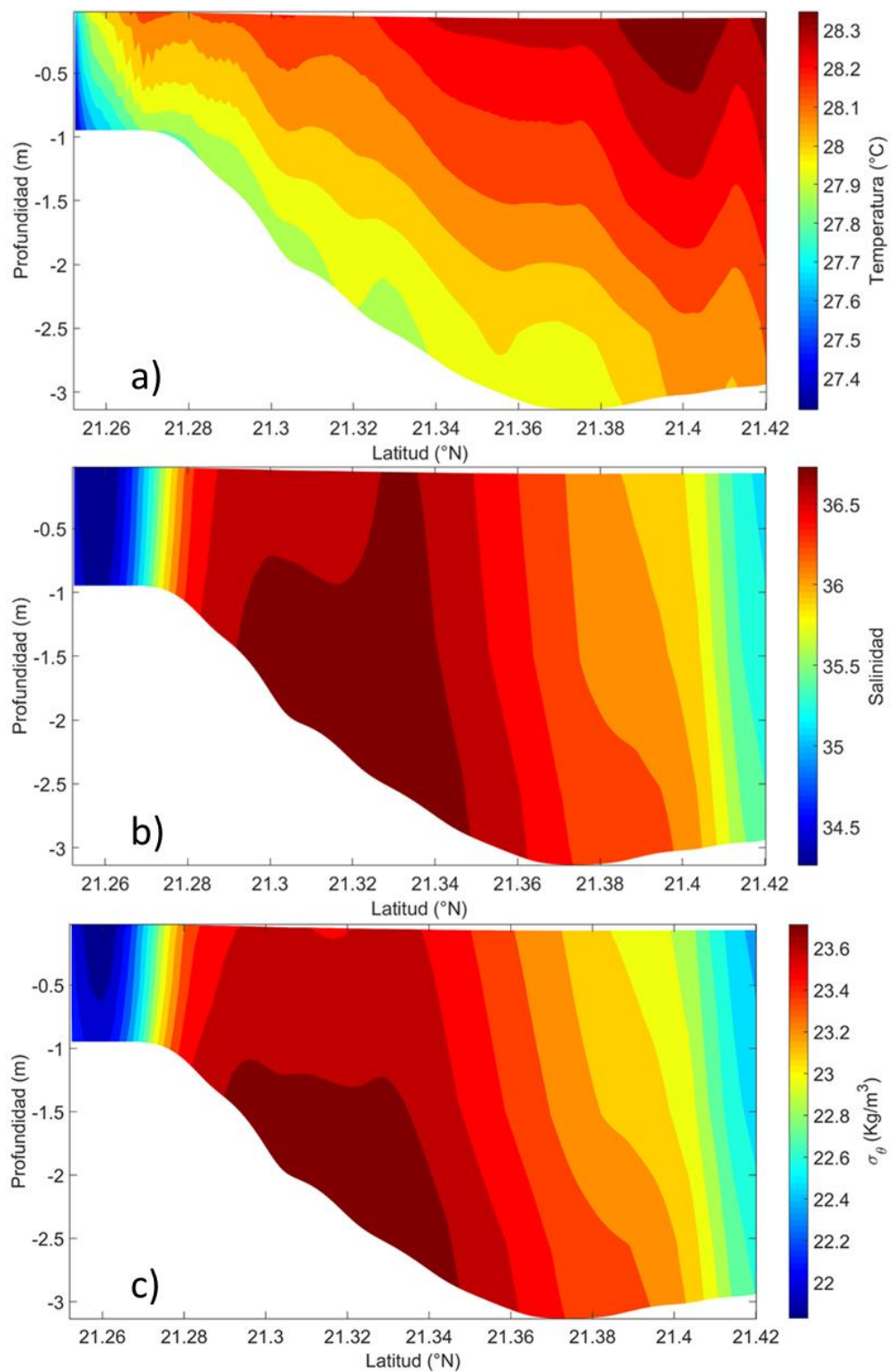


Figura 11. Sección vertical meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio y c) densidad potencial promedio; para el periodo del 1 a 11 de junio de 2013.

La temperatura superficial es bastante homogénea en todo el dominio (figura 12a) durante este periodo, con un promedio de 28.2 °C y con una ligera disminución hacia el sur de la laguna. En cuanto a la salinidad superficial (figura 12b), existe una menor salinidad en el sur de la laguna con valores de 34.0 que se incrementan hacia el norte. En el centro se presenta la zona de mayor salinidad de toda la laguna con valores ~36.6. Hacia el norte de esta zona la salinidad disminuye hasta 35.6 en la boca de la laguna.

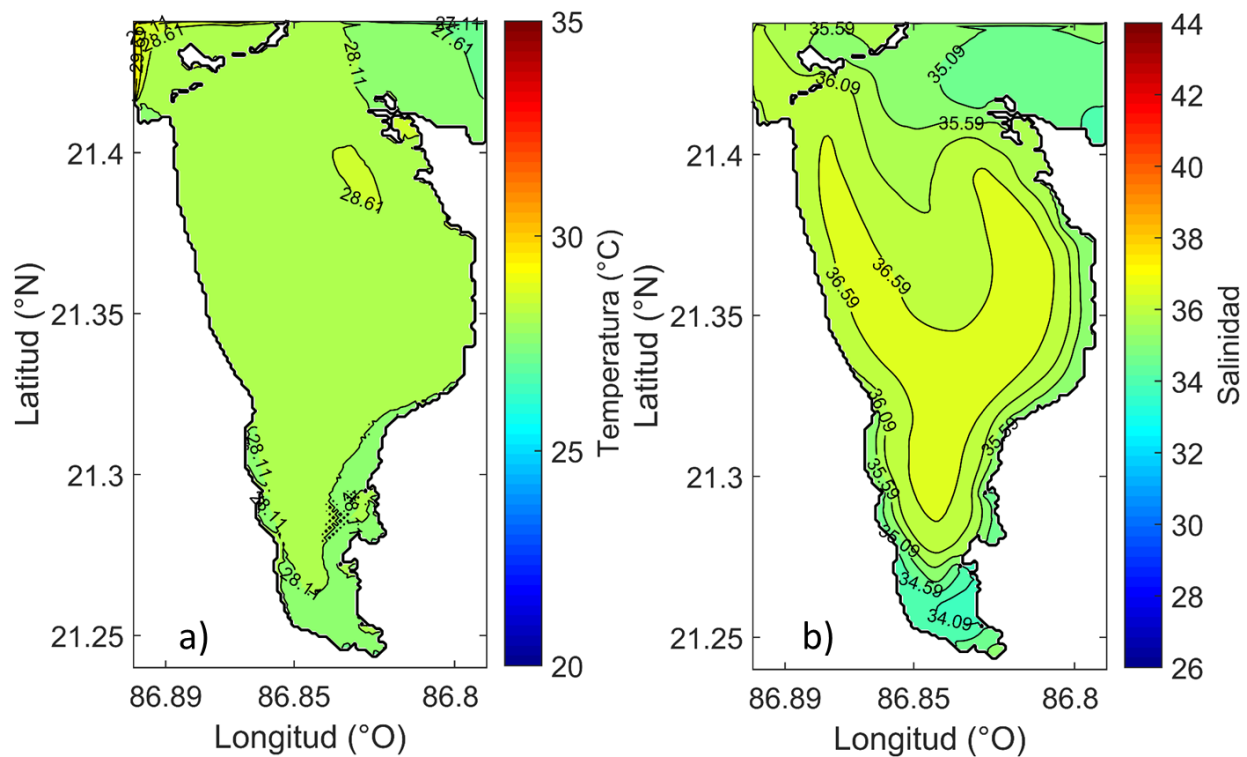


Figura 12. Distribución horizontal a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio; durante el periodo del 1 al 11 de junio de 2013.

8.2 Segundo periodo, 23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013

En este periodo el transporte hacia la laguna alcanza más de 400 m³/s lo que es el mayor de todo el año y se presenta en la temporada de nortes. Nuevamente se presenta una circulación bidimensional, en la que la entrada de agua ocurre en la capa superficial, como indican los vectores de velocidad promedio (figura 13a). En esta capa las

velocidades alcanzan valores de ~ 6 cm/s en la costa oeste. En las zonas cercanas a las costas la dirección es principalmente de norte a sur y hacia la zona central el sentido de la dirección cambia hacia el oeste.

En la capa de fondo se presenta la salida de agua en el centro con dirección de sur a noroeste con velocidades de ~ 3 cm/s. En la zona oeste, cercana a la costa, la dirección es del noroeste hacia el sur. En la zona este, en el área norte la dirección de la corriente es de oeste a este, mientras que en el área sur es de noreste a sur, con una dirección similar a la de la capa de superficie de esta zona.

Las elipses de desviación estándar de la velocidad (figura 13b) muestran que la mayor variación en la dirección de la corriente se presenta en la capa superficial, principalmente en la boca y en el este de la laguna en donde se presentan también las velocidades más altas. En el resto de la capa superficial, aunque existe variación de la dirección de la corriente, las velocidades son considerablemente menores. En la capa de fondo las variaciones se dan en el centro de la laguna con velocidades mínimas y en el oeste en dirección oeste-este con las mayores velocidades. En esta zona la capa superficial y de fondo presentan direcciones de corriente similares con una disminución de velocidad en la capa de fondo.

La sección de velocidad en la boca (figura 13c) muestra la entrada de agua en la capa superficial con velocidades desde 1 cm/s hasta 6 cm/s en la costa oeste. Esta capa alcanza espesores de ~ 2.5 m en las costas, mientras que en la zona central se tienen 0.5 m de espesor. La salida de agua se da en la capa de fondo, que alcanza un espesor de ~ 2.5 m en la zona central de la laguna, con velocidades de hasta ~ 1.5 cm/s en el centro y fondo de esta zona.

La sección de velocidad de norte a sur de la laguna (figura 13d) permite identificar que a lo largo de la misma se mantiene una circulación bidimensional. La capa superficial en la que se desarrolla la entrada de agua tiene un espesor menor de 0.5 m. La entrada de

agua alcanza una velocidad de ~ 1.5 cm/s en los primeros centímetros de la capa superficial. Esto concuerda con lo que se presenta en la sección de la boca y con los vectores de velocidad. La capa de fondo alcanza espesores de poco más de 2.5 m. Las mayores velocidades se presentan en el centro de la laguna, alcanzando 3 cm/s con disminución hacia el sur y en la boca de la laguna donde tiene valores ~ 1.5 cm/s.

La sección de temperatura presenta una disminución de $\sim 4^{\circ}\text{C}$ de temperatura respecto al periodo anterior (figura 14a). La variación de la temperatura es horizontal con las isotermas dispuestas de manera vertical.

Nuevamente la zona de mayor temperatura es la capa superficial del norte de la laguna en la que los valores de temperatura llegan a ser de $\sim 25^{\circ}\text{C}$. En la zona norte-centro de la laguna, la temperatura disminuye desde la superficie hacia el fondo. Del centro hacia el sur la temperatura disminuye horizontalmente hasta llegar a los $\sim 23^{\circ}\text{C}$.

En la sección de salinidad (figura 14b) se observa una orientación vertical de las isohalinas cuyo valor disminuye de norte a sur. La máxima salinidad se presenta en la boca de la laguna, en la que en el fondo se tiene una pequeña área con valores de ~ 33.5 , mientras que en el resto de la columna se tiene un valor de ~ 33 . Esta salinidad disminuye considerablemente hasta alcanzar valores alrededor de ~ 29 en el sur de la laguna, misma zona en la que se detectó la menor temperatura.

En la sección de densidad potencial (figura 14c) se observa un patrón similar al de distribución de salinidad, como es de esperarse. La densidad varía de 22.5 kg/m^3 en la boca hasta $\sim 19\text{ kg/m}^3$ en el sur. En la latitud 21.34°N , en superficie, se observa un área pequeña en la que la densidad es distinta a la del agua que la rodea. Esta área corresponde con la zona en la que el agua que sale de la laguna en la capa de fondo empuja el agua superficial y alcanza la superficie (figura 13d).

La temperatura superficial (figura 15a) para este periodo muestra un patrón de aumento de temperatura de oeste a este, con una variación de ~ 0.5 °C. La mayor temperatura se presenta en el este de la laguna, desde el noreste hasta la zona centro-este de la laguna con 24.9 °C. Para la zona más somera en el sur de la laguna se presenta una disminución de la temperatura hasta 23.9 °C, cabe señalar que esta área no sigue el patrón de incremento de oeste a este.

En cuanto a la salinidad superficial (figura 15b), esta presenta una disminución considerable de norte a sur de la laguna. En la boca se tienen salinidades de alrededor de 34, valor hasta dos unidades menores a la salinidad se tuvo en el periodo anterior. La salinidad disminuye hacia el interior de la laguna para llegar a valores de ~ 28 en la zona sur, donde además se presenta la zona de menor temperatura. Se observa la formación de isohalinas desde la boca de la laguna hacia las costas, resultado de la existencia de un área central con menor salinidad.

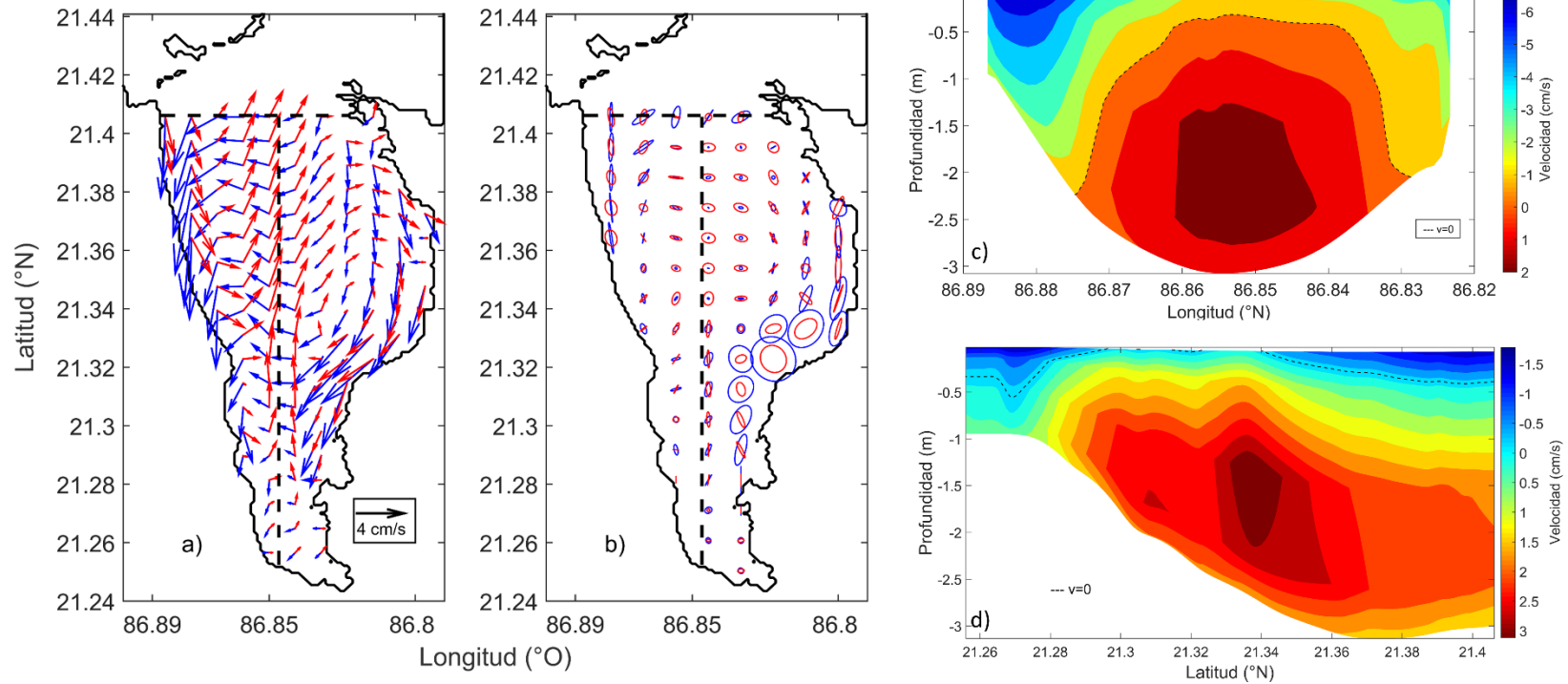


Figura 13. a) Vectores de velocidad promedio (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional), b) elipses de desviación estándar de velocidad (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional); c) sección de velocidad promedio en la boca de la laguna y d) sección de velocidad promedio de norte a sur de la laguna; para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013.

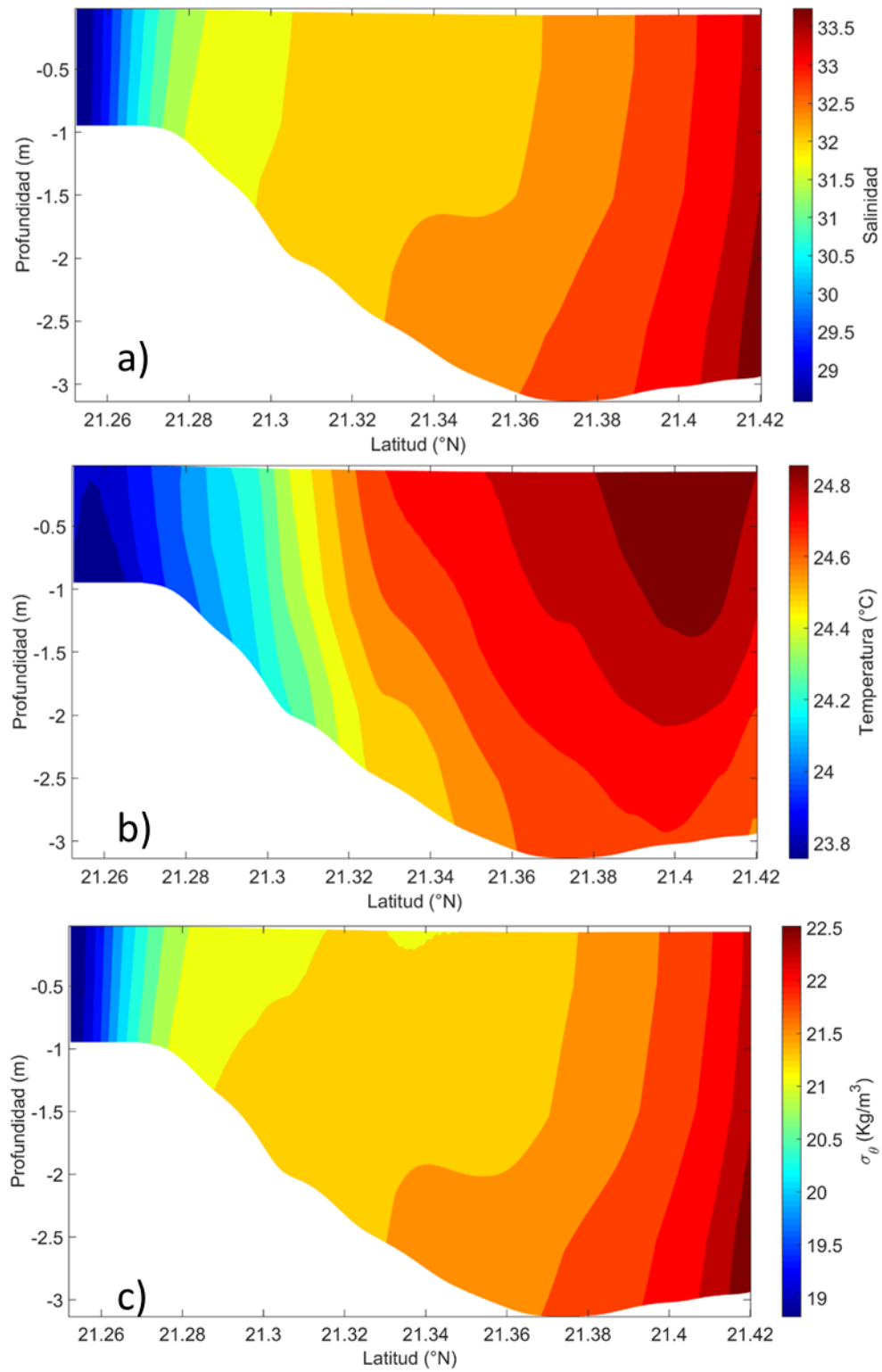


Figura 14. a) Sección meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio y c) densidad potencial promedio; para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013.

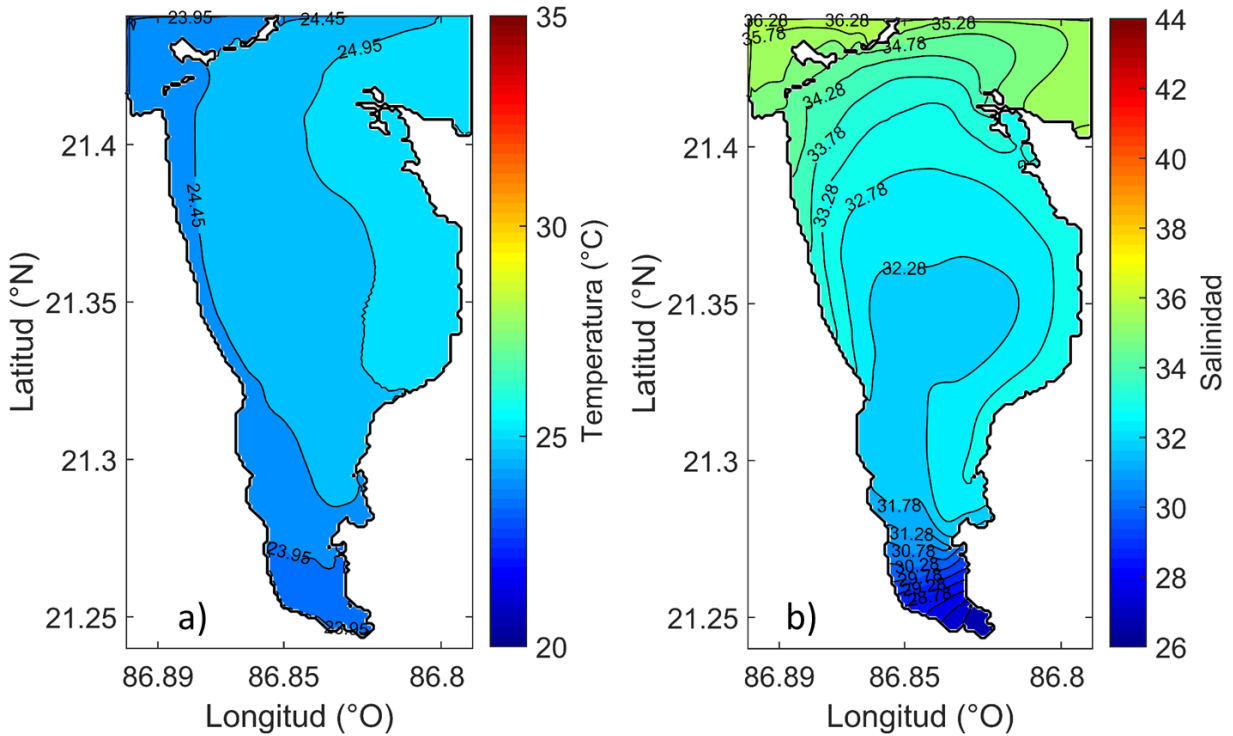


Figura 15. Distribución horizontal de a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio, para el periodo del 23 de diciembre al 3 de diciembre de 2013.

8.3 Tercer periodo, 20 al 30 de mayo de 2014

El tercer periodo se considera como un periodo de calma, porque en comparación con los periodos anteriores el transporte hacia la laguna es de apenas 100 m³/s, lo que es menos de la tercera parte que en los casos anteriores. Este periodo está comprendido en la temporada de secas.

Los vectores de velocidad (figura 16a) muestran que la entrada de agua se da en la capa de fondo en dirección noroeste a sureste, con velocidades de ~3 cm/s. Cerca de la costa oeste la dirección cambia hacia el norte con un ligero incremento en las magnitudes. En la capa superficial, de forma general, la dirección es de este a oeste, mientras que en la zona de la costa oeste es hacia el norte. La velocidad también se incrementa de este a oeste, alcanzando ~4 cm/s.

Las elipses de desviación estándar (figura 16b) muestran que la variación de la velocidad en la capa superficial es mínima en el norte y centro de la laguna pero se incrementan en el sur. La dirección en el norte y centro de la laguna es de este a oeste, mientras que para la zona sur la variación es en múltiples direcciones como indican las elipses más redondeadas. Para la capa de fondo en el centro se presentan variaciones en múltiples direcciones, hacia el sur de la laguna la variación es de norte a sur. Las mayores magnitudes se presentan en las zonas cercanas a las costas, las cuales disminuyen hacia el interior y el norte de la laguna.

La sección en la boca de la laguna (figura 16c) muestra que la salida de agua ocurre en la capa superficial con velocidades de hasta ~ 3.5 cm/s. En el centro se observa una pequeña área en la que no existe salida sino entrada de agua con una velocidad de ~ 0.5 cm/s. Esta capa adquiere mayor espesor hacia las costas, alcanzando 2.0 m en la costa oeste y 2.5 m en la costa este. Es en esta última costa es en la que se presentan las mayores velocidades. En la capa de fondo existe una entrada de agua con velocidades de hasta ~ 1.5 cm/s que se presentan en la zona central de esta capa. En el centro de la boca la entrada de agua abarca toda la columna, con un espesor de 3 m que disminuye hacia las costas.

La sección de velocidad de norte a sur (figura 16d) muestra que la capa superficial en la que se da la salida de agua varía de espesor, alcanzando 1.5 m en la boca de la laguna. La mayor velocidad en esta capa se presenta en el centro y sur de la laguna. En la capa de fondo, acorde con lo mencionado anteriormente, se observa que la mayor velocidad de entrada se presenta en la zona central de la capa de fondo, principalmente en la boca de la laguna. Debido a la batimetría de la laguna en esta capa se tienen variaciones considerables del espesor, que van desde menos de 0.5 m hasta 2.5 m.

La sección de temperatura (figura 17a) muestra que para este periodo la temperatura se incrementó 5°C respecto a la temporada anterior. La mayor temperatura se tiene en la capa superficial en la zona central de la laguna y en la zona sur cercana a la costa, con

temperaturas alrededor de los 30.5 °C. En la mayor parte de la columna de agua se observan temperaturas entre 29 °C y 30 °C. De forma general, para este periodo la temperatura disminuye con la profundidad.

El patrón de distribución de la salinidad (figura 17b) se invierte respecto al de los periodos anteriores, la menor salinidad se presenta en el norte de la laguna y la mayor en el sur. Los valores más bajos de salinidad son de ~37 y los mayores en la costa sur son de ~42. La salinidad en la vertical es bastante homogénea, sin embargo en el sur, en la zona más somera de la laguna, estos valores se incrementan considerablemente de 39 a 42 en la costa.

La sección de densidad potencial (figura 17c) presenta una distribución similar a la de la salinidad, casi constante en la vertical y variando en la horizontal, incrementándose de norte a sur. En la boca de la laguna se presenta la menor densidad, con un valor de ~24 kg/m³ que se incrementan hacia el interior, hasta ~27.5 kg/m³ en el sur.

La temperatura superficial del agua en la laguna disminuye de oeste a este, desde ~31 °C a ~30.4 °C (figura 18a), con un incremento de aproximadamente 4 °C respecto al periodo anterior con un patrón inverso de aumento de la temperatura.

Por su parte, la salinidad (figura 18b) se incrementa considerablemente respecto a los dos periodos anteriores y el patrón de distribución se invierte. La menor salinidad es de ~38 en el norte de la laguna y se incrementa hacia el interior, hasta que, en el sur, en la zona más somera, se alcanza un valor de 42.

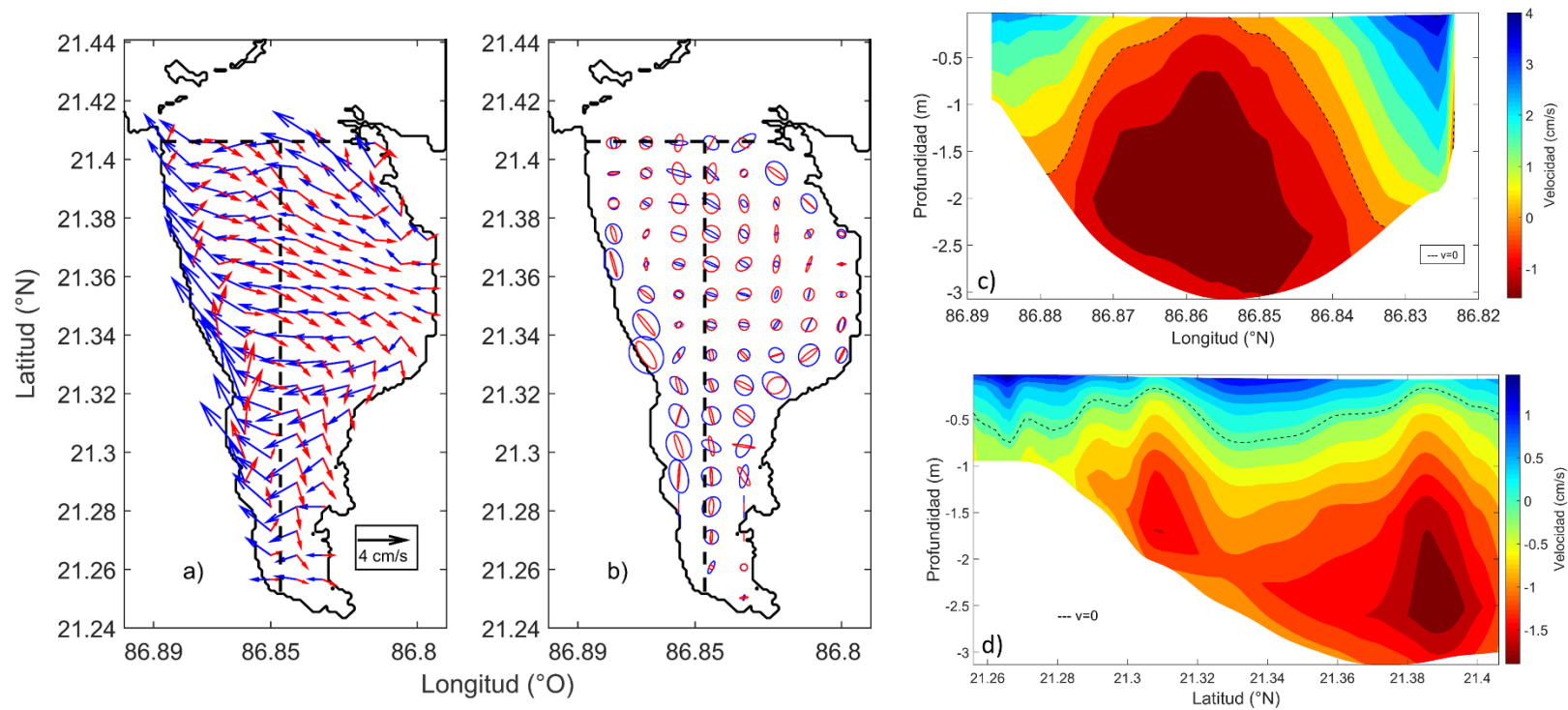


Figura 16. a) Vectores de velocidad promedio (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional), b) elipses de desviación estándar de velocidad (azul: superficie; rojo: fondo; línea punteada: boca de la laguna y transecto meridional), c) sección de velocidad promedio en la boca de la laguna y d) sección de velocidad promedio de norte a sur de la laguna, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.

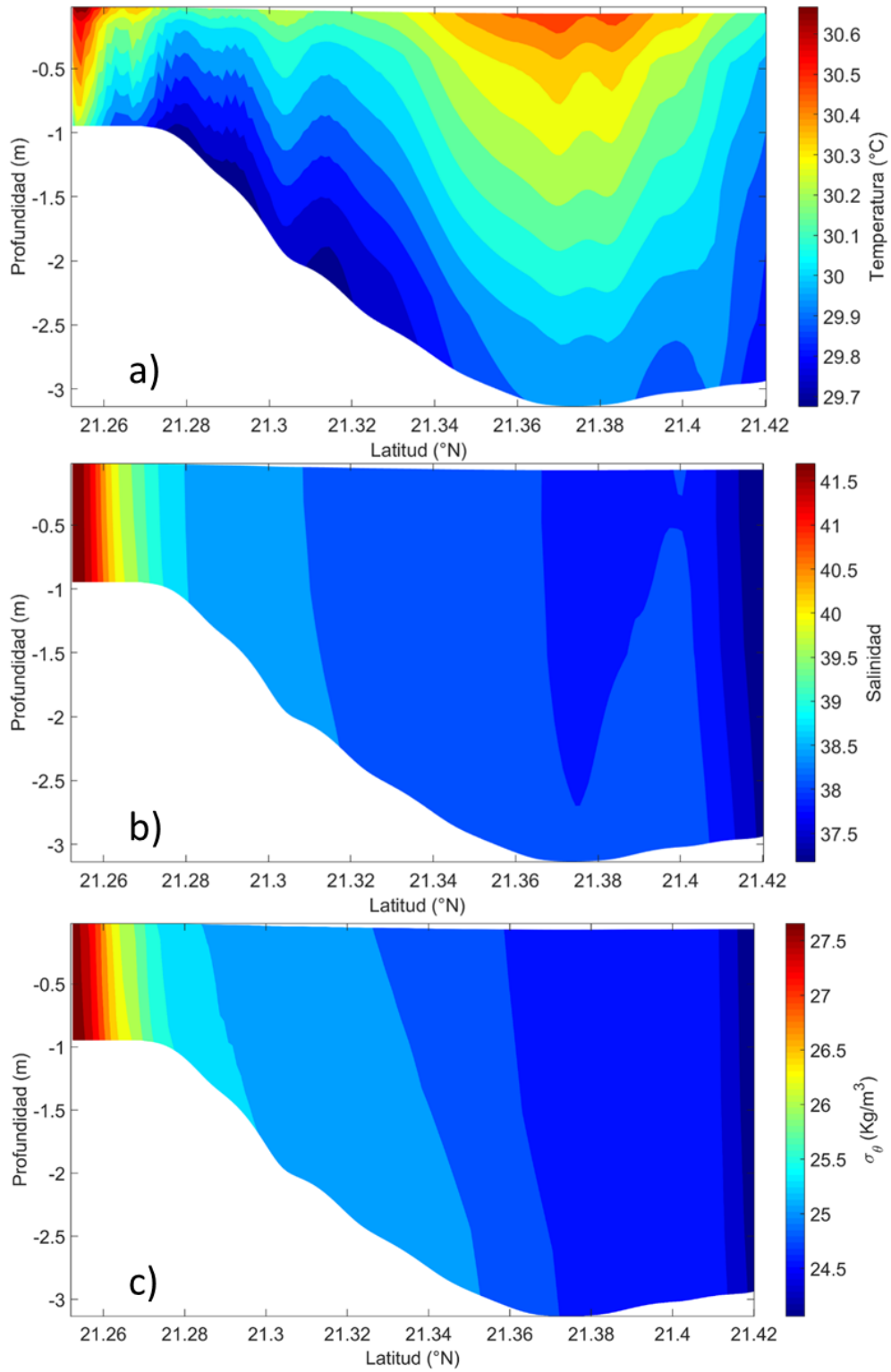


Figura 17. Sección meridional de a) temperatura promedio, b) salinidad promedio y c) densidad potencial promedio, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.

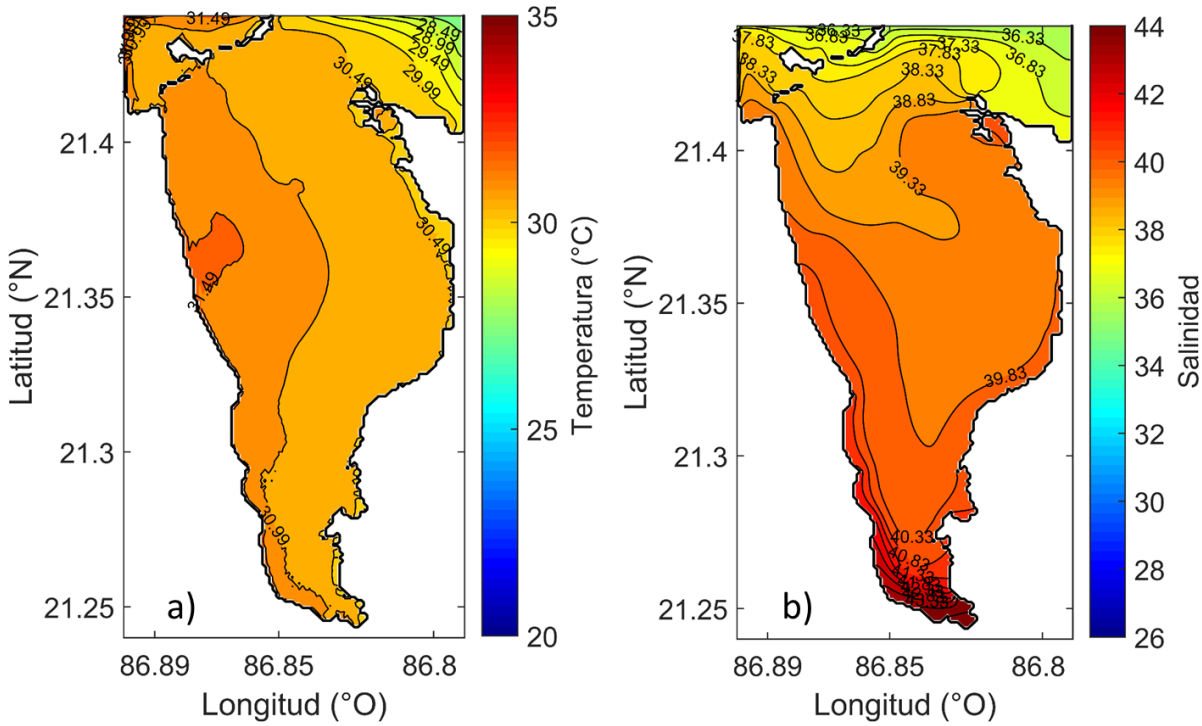


Figura 18. Distribución horizontal de a) temperatura superficial promedio y b) salinidad superficial promedio, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014.

8.4 Advección de partículas

Como se mencionó en la sección 7.2 con el fin de estimar los tiempos de residencia del agua para cada uno de los periodos analizados se realizaron experimentos de advección de partículas. Las posiciones iniciales de estas se muestran en la figura 19.

8.4.1 Primer periodo, 1 a 11 de junio del 2013

En el día 3 de la advección (3 de junio) la mayor parte de las partículas han sido desplazadas en dirección noroeste (figura 20a), algunas de estas han comenzado a salir de la laguna. En la costa de la laguna se observa la acumulación de partículas, la mayor acumulación se presenta en la costa suroeste, mientras que en la parte centro-este se tiene una marcada ausencia de partículas. Para el día 7 del experimento, correspondiente

al 7 de junio (figura 20b), las partículas han sido desplazadas principalmente hacia el noroeste, otras más hacia el centro, hasta la costa oeste, donde se han acumulado. En un periodo de 7 días, 91% de las partículas han salido de la laguna, incluyendo muchas de las que quedaron atrapadas en las costas. Es evidente que las partículas de diferentes posiciones han convergido en algunos sitios, lo que indica que existe una mezcla vigorosa del agua en estas zonas y en la laguna en general. En el día 11 de la advección (11 de junio), que corresponde al final de este periodo (figura 20c), las partículas concentradas en la parte oeste ya han sido dispersadas hacia el este y el sur de la laguna. En la costa oeste la mayoría de las partículas no han sido desplazadas y se presenta una acumulación en las costas este y sur de la laguna, aunque para este día 95% de las partículas se encuentran fuera de la laguna.

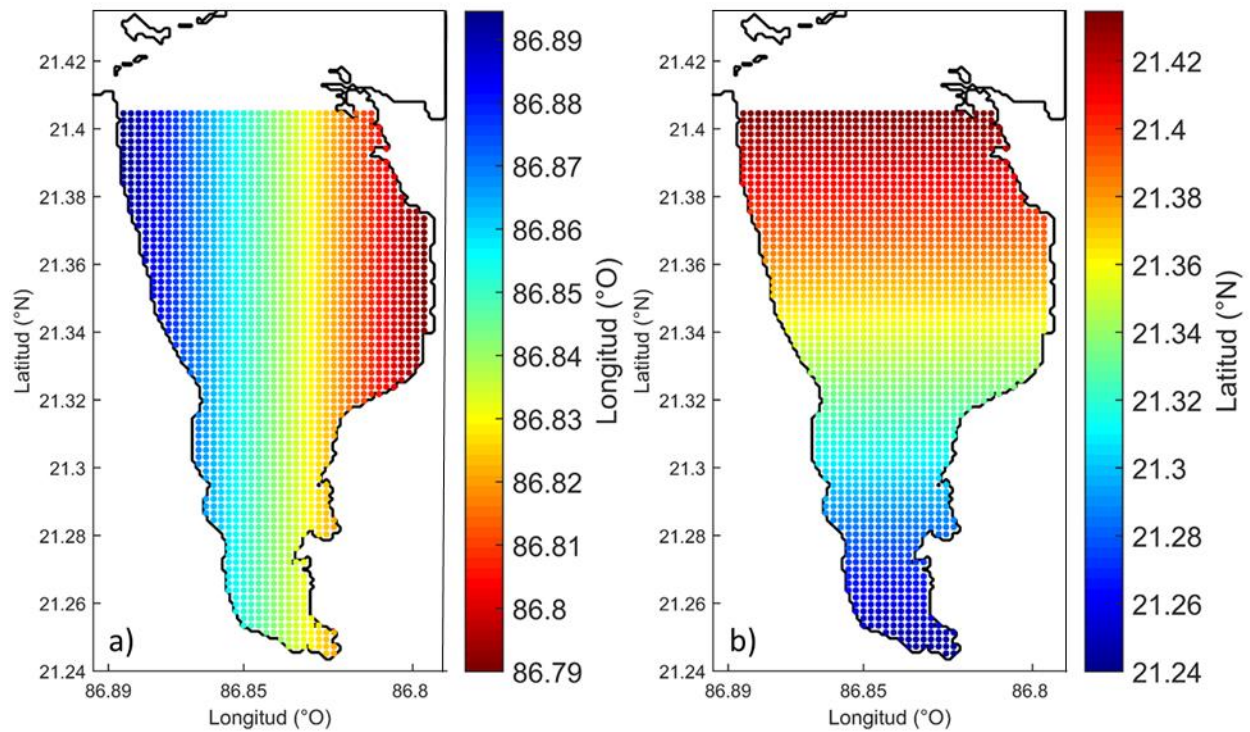


Figura 19. Posiciones iniciales de las partículas en los experimentos de advección. El color indica los valores iniciales de su longitud (a) y latitud (b).

Respecto a la latitud inicial, para el día 3 de junio la mayoría de las partículas del norte ha salido de la laguna (figura 20d). Las partículas ubicadas entre las latitudes 21.34 °N y 21.40 °N se concentran en el noroeste de la laguna y las del sur se mantienen en las costas de estas zonas, pocas de estas partículas fueron desplazadas hacia el norte. Para el 7 de junio (figura 20e), las partículas que se encontraban en el sur de la laguna han sido desplazadas por la corriente hacia el noroeste. Mientras que algunas de las partículas de las zonas central y sur se han acumulado en la costa sur. En la porción este de la boca de la laguna se presenta una acumulación de partículas que no están siendo desplazadas, lo que sugiere que en esta zona la circulación de agua es mínima en estos primeros días. Para el 11 de junio (figura 20f), las partículas se encuentran dispersas en toda la laguna, manteniéndose la acumulación de partículas en las costas. La mezcla de los colores de las partículas sugiere que el agua se ha mezclado completamente durante este periodo.

En el día 3 de la advección las partículas en el noroeste de la laguna se encuentran dispersas en toda la columna de agua, aunque existe una mayoría de partículas en superficie que son claramente arrastradas hacia afuera de la laguna junto con las partículas que se encuentran a profundidades medias. Las partículas ubicadas cerca del centro de la laguna, y cuyo origen principalmente es el este de la laguna, se encuentran cercanas al fondo y dispersas. Para el 7 de junio las partículas han sido llevadas hacia profundidades mayores (figura 21b), encontrándose partículas agrupadas en el oeste a profundidades de ~3m. Las partículas se encuentran distribuidas en toda la columna de agua, sin embargo, en las costas se encuentran cercanas a la superficie. Para el 11 de junio (figura 21), las partículas han sido desplazadas hacia el este, la mayoría a profundidades menores, sin embargo, se mantiene un pequeño grupo de partículas en el centro a mayor profundidad.

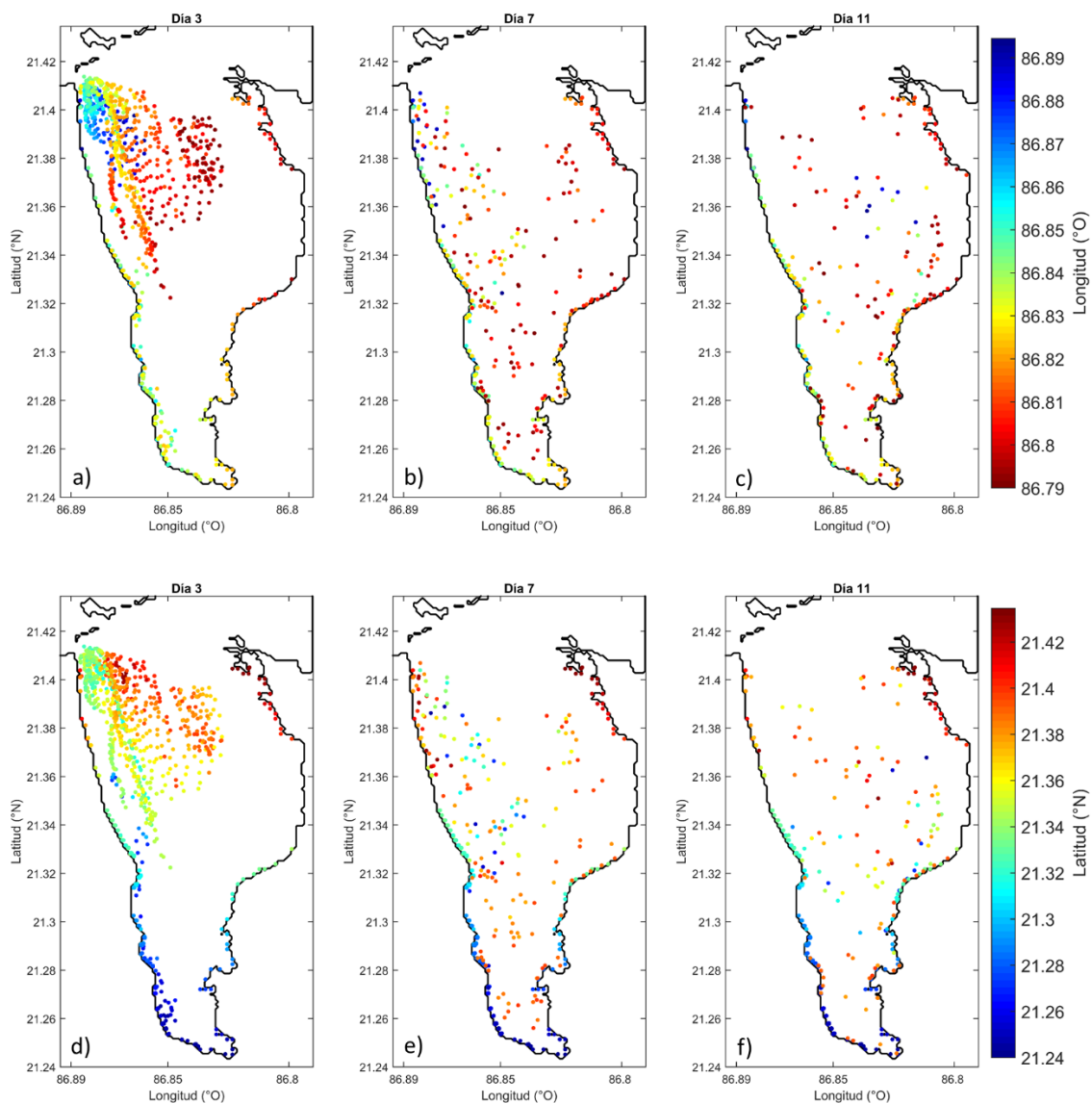


Figura 20. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 1 al 11 de junio de 2013. Los colores indican la posición respecto a la longitud (a, b y c) y latitud (d, e y f) de su posición inicial. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 1 de junio del 2013.

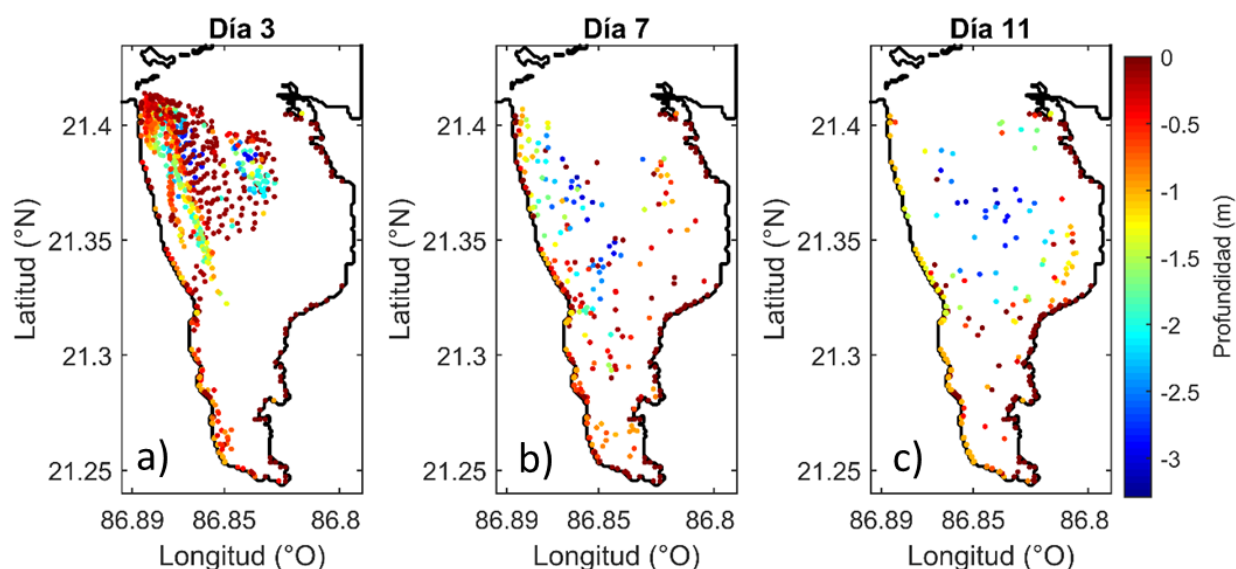


Figura 21. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 1 al 11 de junio de 2013. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 1 de junio del 2013.

El comportamiento de las partículas respecto a longitud, latitud y profundidad indica la existencia de un giro en el centro (figura 22). En un principio este giro desplaza agua hacia el oeste y la empuja al fondo y con ello las partículas, para después llevarlas hacia la superficie y ser dispersadas en la laguna. En la zona sur se presenta un menor desplazamiento de las partículas, lo que sugiere que la circulación de agua en esta zona es menor comparada con el del resto de la laguna. Para el final de este periodo solo 5% de las partículas permanecen en la laguna.

Como parte del análisis de los resultados obtenidos, se realizó la animación de la advección de partículas correspondiente a este periodo, el enlace a la misma puede consultarse en el anexo B.

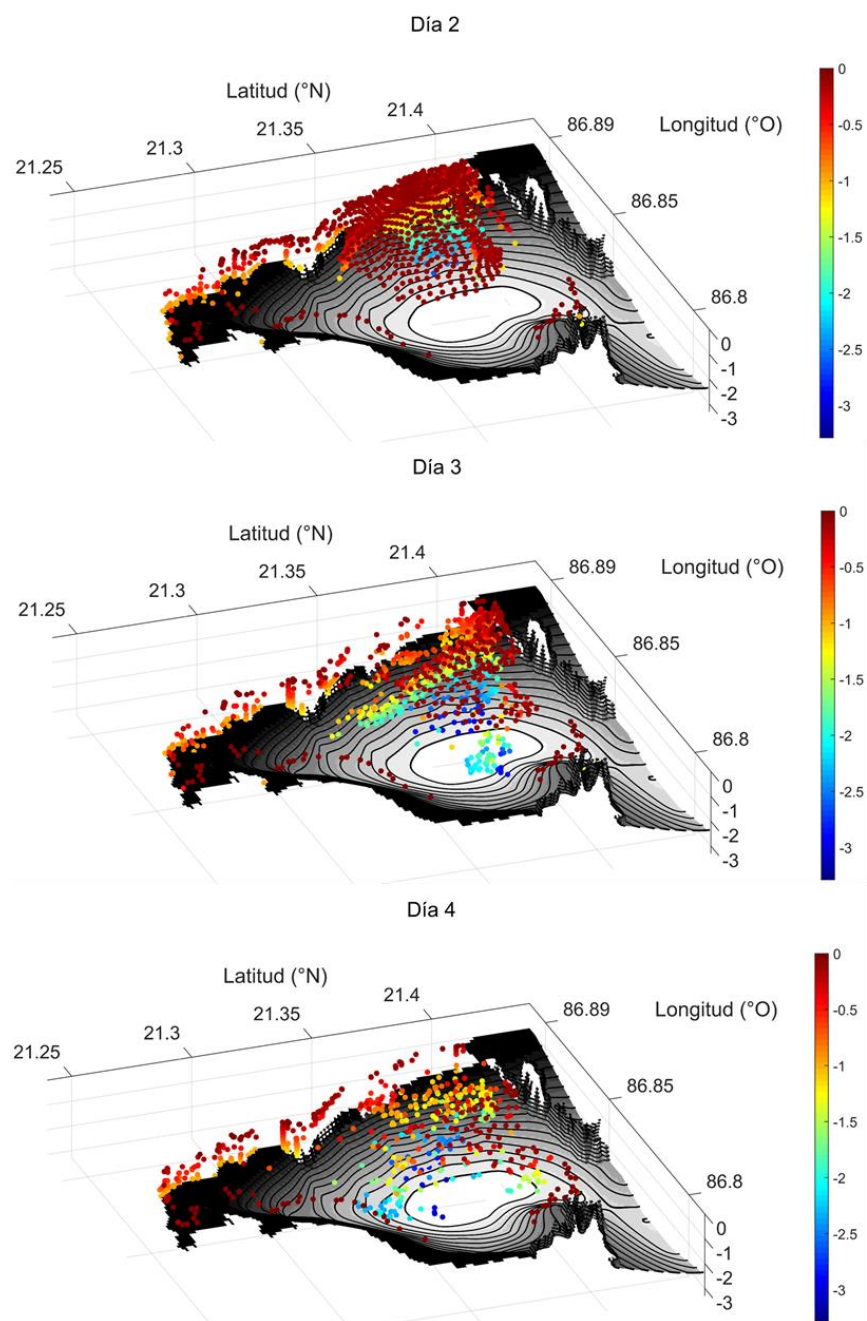


Figura 22. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas para el primer periodo. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 1 de junio del 2013.

8.4.2 Segundo periodo, 23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013

En el día 3 de la advección (25 de noviembre) respecto a la longitud se observa que las partículas han sido desplazadas hacia el oeste de la laguna (figura 23a), manteniendo la distribución de la longitud inicial. Algunas partículas se han quedado atrapadas en el noreste de la laguna, sin embargo la mayor acumulación de partículas está en la costa de la zona sur. Para el día 6 de la advección, que corresponde al 28 de noviembre (figura 23b) las partículas han sido desplazadas hacia el centro de la laguna en donde se observa la mayor concentración. Existe acumulación de partículas en las costas, principalmente en el este de la boca y en el sur. Para el día 11 de la advección (3 de diciembre), las partículas han sido desplazadas hacia el norte provocando una acumulación de las mismas en la costa noreste (figura 23c), para este día 60% de las partículas han salido de la laguna. Las partículas han sido dispersadas por toda la laguna sin guardar relación con su longitud de origen, lo que indica que el agua de la laguna se encuentra altamente mezclada.

Respecto a la latitud, en el día 3 de la advección (figura 23d) se observa claramente que las partículas han sido desplazadas hacia el sur de la laguna, propiciando que estas se concentren en la zona central y sur. Para el 28 de diciembre es posible observar que el desplazamiento de las partículas (figura 23e) se ha producido de la costa oeste hacia el centro. En esta zona se tiene un patrón de distribución norte-sur en el que las partículas se encuentran mezcladas, concentrándose en la zona este del área de mayor profundidad de la laguna. Mientras que en el sur las partículas permanecen principalmente en las costas, son pocas las partículas de esta zona que fueron arrastradas al centro de la laguna. Para el 3 de diciembre (día 11 de la advección) las partículas han sido dispersadas hacia el centro y norte de la laguna (figura 23f), donde se encuentran altamente mezcladas. En el sur se mantienen partículas que no fueron desplazadas fuera de esta zona, lo que indica que la circulación en esta área es mucho menor a comparación del resto de la laguna. En esta zona y en el noreste de la laguna se presenta la mayor acumulación de partículas.

En lo que refiere al movimiento vertical de las partículas en la columna de agua, en el día 25 de noviembre (figura 24a) las partículas cuyo origen es el oeste de la laguna se han hundido a profundidades que varían entre los 1.5 y 3 m. Las partículas que fueron desplazadas desde el este y las del sur se encuentran mayormente en profundidades cercanas a la superficie del agua. Para el 28 de noviembre (figura 24b) se observa que las partículas han sido, de forma general, dispersadas en toda la columna de agua. La región este del área de mayor profundidad de la laguna, tiene mayor concentración de partículas distribuidas en toda la columna de agua, mientras que en torno a esta zona, se encuentran cercanas a la superficie. En el este y sur las partículas se encuentran cercanas a la superficie, mientras en la costa oeste, cuya profundidad incrementa hasta ~1 m, se encuentran cercanas al fondo. Esto se relaciona con la batimetría de la laguna que es somera en el sur y en la costa este, alcanzando profundidades medias en la costa oeste. Para el 3 de diciembre (figura 24c) las partículas se encuentran distribuidas en toda la columna, de agua en el centro y norte de la laguna. La mezcla de las partículas y por tanto del agua es alta y no se observa ningún patrón relacionado con el origen de las partículas.

En este periodo la circulación del agua superficial arrastra a las partículas hacia el oeste en donde son llevadas hacia la zona de mayor profundidad por medio de un giro, que posteriormente las impulsa a la superficie en el este de la zona de mayor profundidad (figura 25). Esta masa de agua circula hacia la superficie y el sureste arrastrando consigo las partículas que aún se encuentran en la superficie, para posteriormente hundirlas en la zona de profundidad media que se encuentra en el sur de la laguna.

Esto provoca que el agua de la laguna a excepción de la zona sur, se encuentre altamente mezclada y las partículas se encuentren dispersas en toda la columna de agua. En el sur de la laguna la circulación es mínima y las partículas son arrastradas por el remolino incorporándose a la mezcla de agua formada por el mismo. Para el final de este periodo 40% de las partículas han quedado dentro de la laguna.

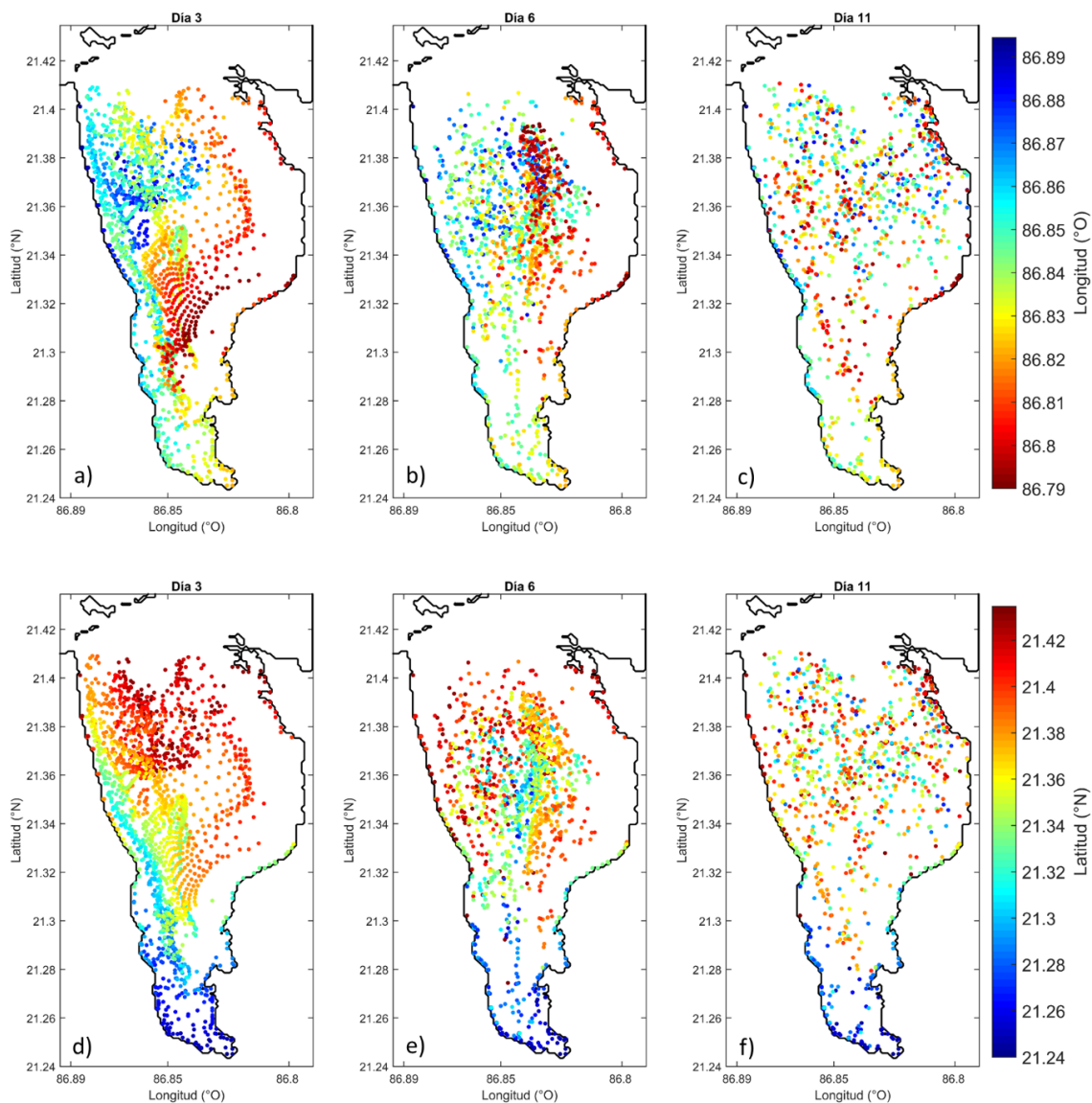


Figura 23. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013. Los colores indican la posición inicial respecto a la longitud (a, b y c) y latitud (d, e y f). El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 23 de noviembre del 2013.

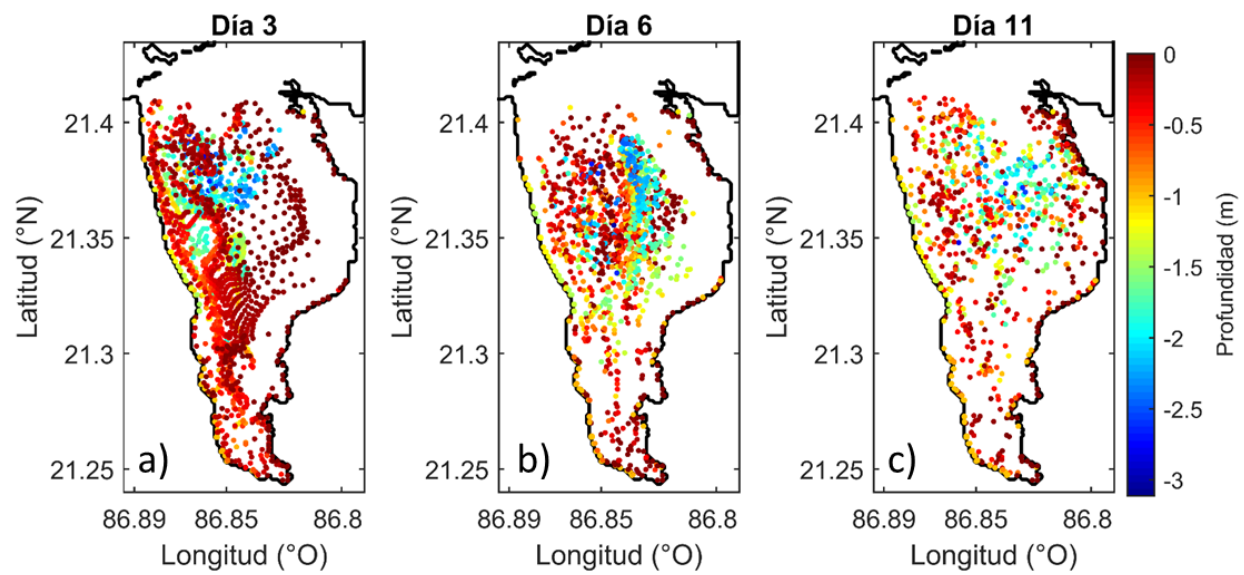


Figura 24. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas respecto a su profundidad, para el periodo del 23 de noviembre al 3 de diciembre de 2013. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 23 de noviembre del 2013.

Como parte del análisis de los resultados obtenidos, se realizó la animación de la advección de partículas correspondiente a este periodo, el enlace a la misma puede consultarse en el anexo B.

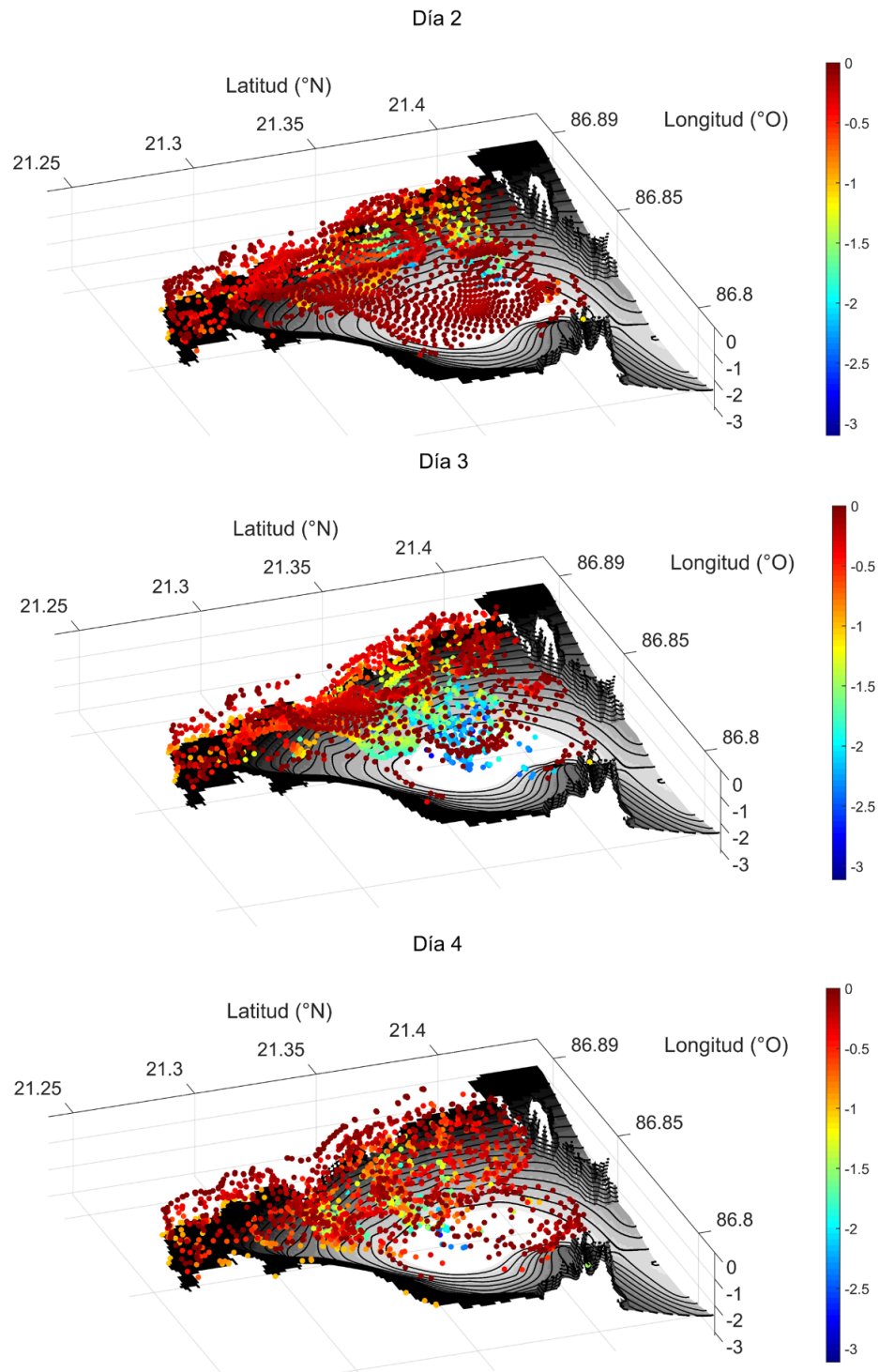


Figura 25. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas del segundo periodo. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 23 de noviembre del 2013.

8.4.3 Tercer periodo, 20 al 30 de mayo de 2014

En el día 2 de la advección (21 de mayo) las partículas han sido desplazadas de oeste a este (figura 26a), manteniendo su distribución respecto a su longitud, acumulándose hacia el noroeste de la laguna. Se observa que las partículas provenientes del este se superponen a las partículas del oeste, lo que sugiere que estas se encuentran a mayor profundidad. Para el 26 de mayo (día 7 de la advección) las partículas cuyo origen corresponde a la zona este han sido desplazadas en su mayoría fuera de la laguna (figura 26b), mientras que las partículas del oeste han sido desplazadas hacia el suroeste y algunas hacia el este. En las costas sur y este se tiene acumulación de partículas. Mientras que en la zona noroeste de la laguna se presenta una marcada ausencia de partículas, manteniéndose algunas solamente en la costa. Para este día 73% de las partículas han salido de la laguna. En el día 30 de mayo (día 11 de la advección) las partículas se encuentran dispersas en toda la laguna, sin embargo la mayoría de estas cuya posición inicial fue en el oeste (figura 26c), han sido arrastradas hacia el sur, sin alcanzar la zona más somera de la laguna, donde las partículas se encuentran acumuladas principalmente en la costa. Para el fin de este periodo 82% han sido llevadas fuera de la laguna.

Respecto a la latitud para el 21 (día 7 de la advección) de mayo (figura 26d) las partículas del norte y centro han sido desplazadas al noroeste, lo que ha provocado la salida de partículas del norte principalmente. Mientras que las partículas del sur se han acumulado en la costa oeste manteniéndose en las latitudes bajas. El 26 de mayo (día 7 de la advección) las partículas con posición inicial en el centro y norte son desplazadas hacia el noroeste de la boca de la laguna y fuera de esta (figura 26e). Algunas de estas partículas se han acumulado en la costa noreste, principalmente aquellas cuyo origen es el centro. Las partículas se acumulan en dirección suroeste-noreste, en la zona de mayor profundidad de la laguna. Mientras que en el sur pocas partículas han sido desplazadas hacia el centro de la laguna, quedándose acumuladas en la costa. Para el 30 de mayo (figura 26f) las partículas han sido desplazadas hacia el noreste y sureste, promoviendo

su dispersión en toda la laguna. Algunas de las partículas que se habían acumulado en la costa noreste han sido desplazadas, hacia el interior o exterior de la laguna.

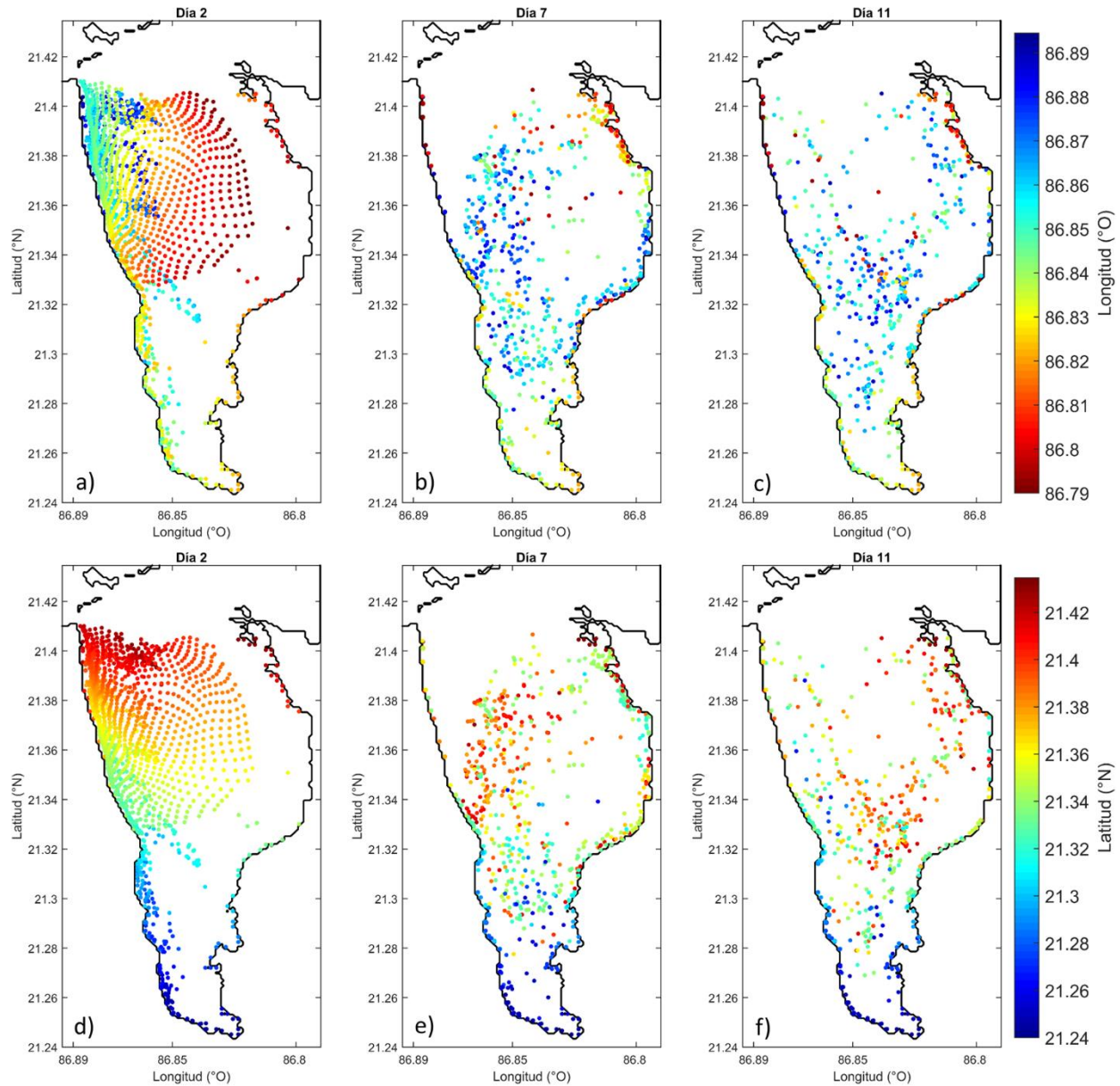


Figura 26. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas en el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014. Los colores indican la posición inicial respecto a la longitud (a, b y c) y latitud (d, e y f). El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 20 de mayo del 2014.

En lo que refiere al desplazamiento en la columna de agua, para el 21 de mayo (día 2 de la advección) las partículas cuyo origen es el oeste han sido llevadas a profundidades de

entre 2 y 3 m, mientras que las partículas cuyo origen es el centro y este de la laguna se encuentran en el oeste cercanas a la superficie (figura 27a). En el 26 del mismo mes las partículas provenientes de la zona centro-norte se encuentran presentes en toda la columna de agua y algunas incluso se encuentran cercanas al fondo de la laguna (figura 27b). Hacia el sur se observan partículas cercanas a la superficie al igual que en la costa este de la zona sur. En la costa oeste se encuentran cercanas al fondo. Para el día 30 de mayo las partículas se han dispersado en toda la laguna (figura 27c). En general, las partículas se encuentran a profundidades medias y pocas han sido llevadas al fondo. En las costas se mantiene la acumulación de partículas de forma similar al 26 de mayo, lo que indica una débil circulación de agua en estas zonas, con excepción de algunas partículas de la costa noreste que han sido desplazadas.

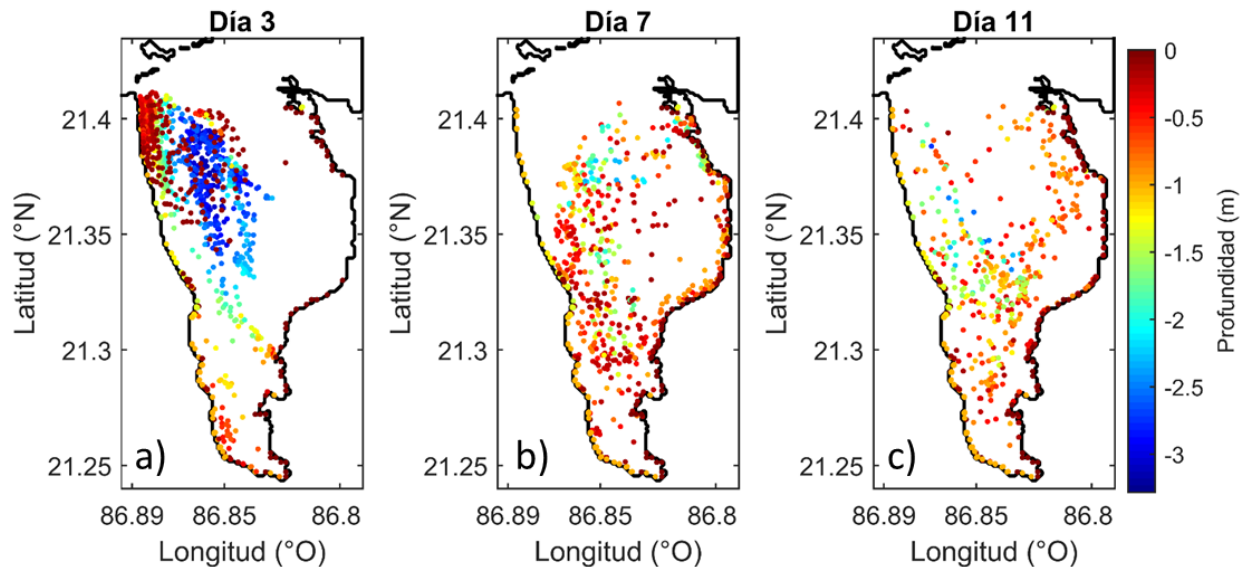


Figura 27. Posiciones instantáneas de las partículas advectadas respecto a su profundidad, para el periodo del 20 al 30 de mayo de 2014. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 20 de mayo del 2014.

En este periodo las partículas que se encuentran en el oeste en el inicio de la advección son empujadas a profundidades mayores, mientras que las partículas del este son arrastradas hacia el oeste manteniéndose cerca de la superficie (figura 28). Las partículas que se encuentran a mayor profundidad son desplazadas hacia el centro de la laguna, desde donde por un giro son llevadas hacia el este y sur de la laguna, que son zonas

más someras. Algunas partículas se mantienen en este giro y otras son nuevamente incorporadas siguiendo de esta forma la circulación. La salida de partículas en este periodo ocurre principalmente en el oeste de la laguna. Para el final de este periodo permanecen dentro de la laguna el 18% de las partículas.

Como parte del análisis de los resultados obtenidos, se realizó la animación de la advección de partículas correspondiente a este periodo, el enlace a la misma puede consultarse en el anexo B.

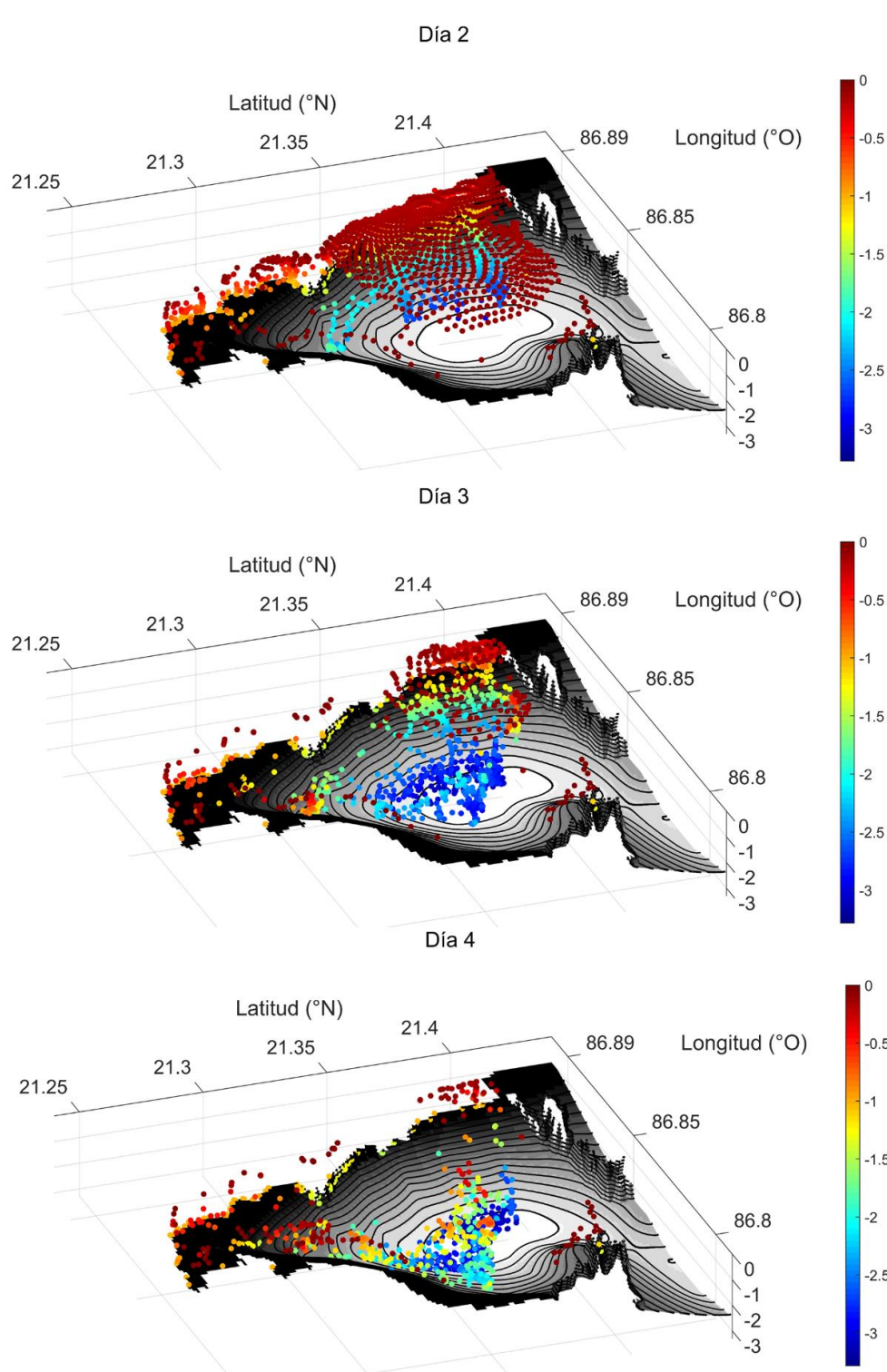


Figura 28. Secuencia tridimensional de las posiciones instantáneas de las partículas advectadas en los días 2, 3 y 4 de la advección de partículas del tercer periodo. El tiempo indicado corresponde a los días de advección transcurridos, a partir del 20 de mayo del 2014.

8.5 Tiempo de residencia

Como se mencionó anteriormente, el tiempo de residencia promedio para el periodo de junio del 2013 a mayo de 2014 es de 18 días. A fin de comparar los tiempos de residencia para cada periodo analizado se graficó el porcentaje acumulado de partículas dentro de la laguna contra el tiempo de advección en días (figura 29).

Se observa que el menor tiempo de residencia ocurrió durante el primer periodo, en el que la entrada de agua se da en el fondo de la laguna y la salida en la capa superior, principalmente en la zona noroeste de la laguna, con velocidades de hasta 7 cm/s. Es en esta zona en la cual la mayor cantidad de partículas es arrastrada fuera de la laguna en los primeros días de advección. Las partículas restantes permanecen principalmente en la zona centro y norte de la laguna lo que permite que estas sigan siendo arrastradas fuera de la laguna.

Para el segundo periodo, el tiempo de residencia se incrementa considerablemente. Durante este tiempo la entrada de agua se produce en la capa de superficie y la salida en la capa de fondo, con velocidades de ~1.5 cm/s. Una velocidad de salida considerablemente menor a la del periodo anterior. En este periodo las partículas son desplazadas hacia el centro y sur de la laguna debido a la acción de un “norte”. Esto genera que el tiempo de residencia sea mayor, al disminuir la cantidad de partículas cercanas a la boca que pueden ser desplazadas al exterior.

Para el tercer periodo, que se ha considerado un periodo que se ha denominado calmo debido al poco transporte que se presenta el tiempo de residencia, disminuye considerablemente respecto al periodo 2. En este periodo la salida de agua en la capa de superficie alcanza 3.5 cm/s. En los primeros tiempos se tiene una considerable salida de partículas en el noroeste de la laguna. Las partículas que son llevadas a mayores profundidades son desplazadas hacia el este y sur de la laguna. En estas áreas, por efectos de la circulación y batimetría, las partículas son llevadas a menores

profundidades haciendo que estas se incorporen a la capa superficial para después ser llevadas fuera de la laguna.

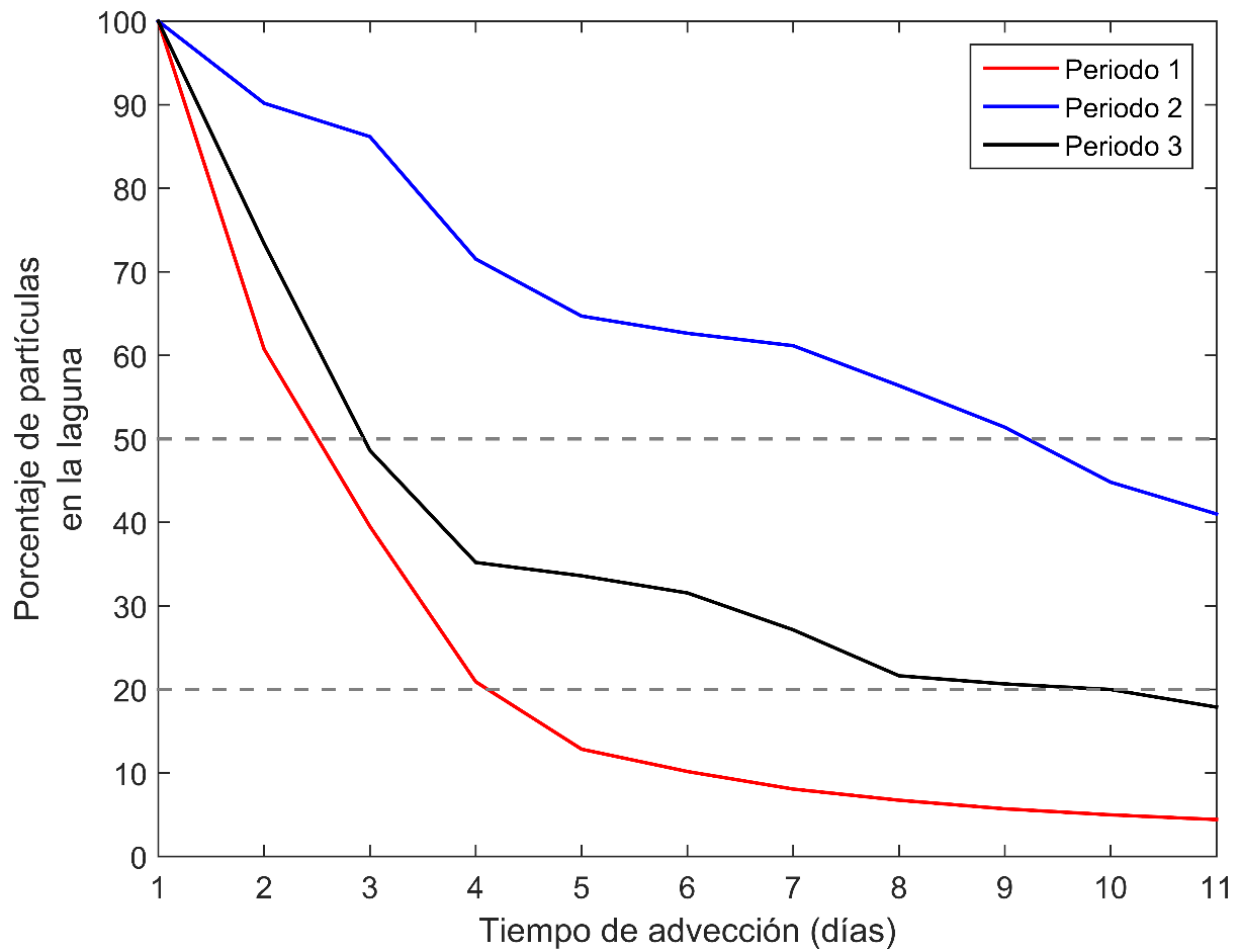


Figura 29. Porcentaje de partículas, con respecto a su cantidad inicial, que permanecen dentro de la laguna contra días de la advección transcurridos. Se muestran los resultados para los tres periodos de interés. Periodo 1 (1-11 de junio de 2013), periodo 2 (23 de noviembre a 3 de diciembre de 2013) y Periodo 3 (20 al 30 de mayo de 2014).

9. Discusión

9.1 Circulación

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la circulación del agua en Laguna Chacmochuch se presenta en dos capas con dirección inversa. Aunque la circulación se presenta en dos capas en todos los periodos analizados, la dirección en cada capa varía en cada periodo. Estas variaciones originan que la entrada de agua en el primer y tercer periodo se presente en el fondo, mientras que en el segundo se presenta en superficie, de forma inversa sucede con la salida de agua. Este tipo de circulación en dos capas es típica de los estuarios (Zemlys *et. al.*, 2013), sin embargo, se presenta durante periodos cortos en el estrecho Klaipeda de la laguna Curlandia en Lithuania (Zemlys *et. al.*, 2013) y en la laguna de los Patos en Brasil (Möller *et. al.*, 2001).

La laguna Chacmochuch se ubica en la región noreste de la Península de Yucatán, en la que se presentan tres temporadas climáticas (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). La temporada de secas que abarca de marzo a mayo; la temporada de lluvias de junio a octubre, que se caracteriza por lluvias regulares (60 mm mensuales); y la tercera temporada que es conocida como de “nortes”, en la que la velocidad del viento puede alcanzar hasta 90 km/hr (Zepeda, 2005; Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Los “nortes” son masas de aire frío que se desplazan desde el sur de Canadá y el norte de Estados Unidos hacia la Península de Yucatán, atravesando el Golfo de México, donde se modifican y se calientan, lo que ocasiona que la humedad relativa del aire se incremente y puedan originarse algunas lluvias (Zepeda, 2005).

Cada uno de los periodos seleccionados se encuentra en una de estas tres temporadas climáticas. El primer periodo (1 al 11 de junio) corresponde al inicio de la temporada de lluvias, el segundo (23 de noviembre a 3 de diciembre) pertenece a la temporada de “nortes” y el tercero (20-30 de mayo) está comprendido en la temporada de secas. Esto permite que el análisis hidrodinámico de la Laguna Chacmochuch abarque las

condiciones climáticas de cada temporada que pueden estar influyendo en el forzamiento de la circulación del agua y por lo tanto en los tiempos de residencia, temperatura y salinidad.

9.2 Forzamientos

En la Laguna Chacmochuch, como sucede en otras lagunas costeras, el viento es un forzante de gran importancia (Kjerfve y Magill, 1989). Para establecer una relación entre el viento y la circulación de la laguna, se muestra el campo promedio del viento en la región nororiental de la Península de Yucatán para cada uno de los periodos de estudio (figura 30). Comparando la dirección del viento de cada uno de los periodos estudiados (figura 30) con la dirección de la velocidad de corriente (descritos en las secciones 8.1 a 8.3), se observa que la dirección del viento y de la capa superficial es semejante.

La dirección del viento en cada periodo analizado es diferente, por esto en el primer y tercer periodo la salida de agua se presenta en la capa superficial, que tiene dirección sureste-noroeste y este-oeste, respectivamente, resultado directo del forzamiento del viento. Por otro lado, en el segundo periodo la entrada de agua ocurre en la capa superficial, nuevamente forzada por el viento, pero con una clara influencia de un “norte” que tuvo presencia en este periodo.

En el primer y tercer periodo, en los que la salida de agua ocurre en la capa superficial, la entrada de agua se desarrolla en la capa de fondo. Esta entrada puede ser forzada por la Corriente de Yucatán, mediante un proceso similar al que se presenta en una región de la laguna de los Patos en Brasil, en la que cerca del fondo, la circulación inducida por el viento en superficie, es vencida por la intensificación de la descarga de agua proveniente de un río (Möller *et al.*, 2001).

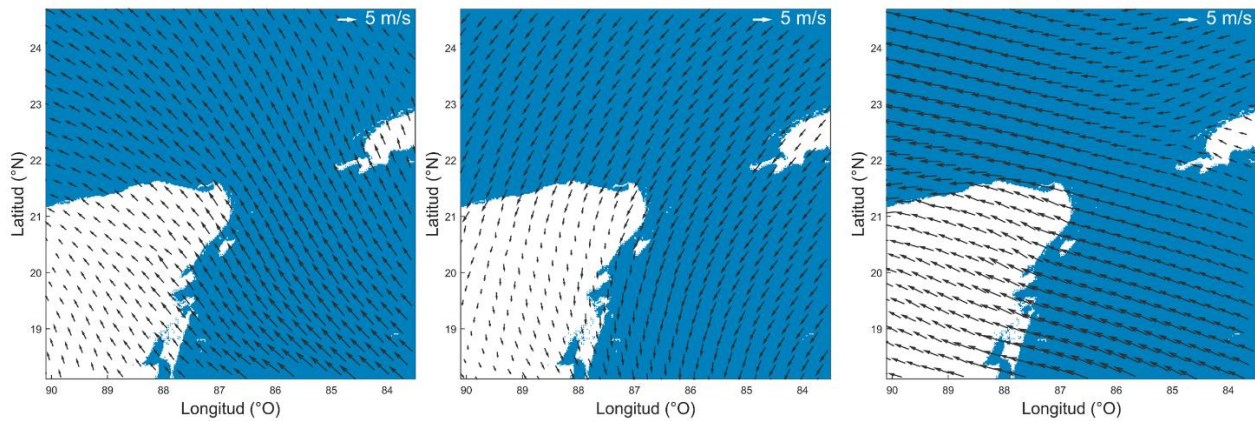


Figura 30. Promedio del campo del viento en el este de la Península de Yucatán para cada periodo de análisis: a) 01/06/2013 a 11/06/2013, b) 23/11/2013 a 03/12/2013 y c) 20/05/2014 a 30/11/2014 (Elaborado con datos provenientes del NARR; Mesinger *et al.*, 2006).

La Corriente de Yucatán fluye desde el sur de la isla de Cozumel a través del oeste del canal de Yucatán, comunicando el Mar Caribe con el Golfo de México (Enriquez *et al.*, 2010; Athié *et al.*, 2011) y normalmente tiene influencia en el ambiente costero de la Península de Yucatán (Capurro, 2003). El campo promedio de velocidad de la corriente para cada periodo, provenientes del modelo regional, permiten observar la dirección de la circulación en la región noreste de la Península de Yucatán (figura 31). Se observa que para el primer periodo la dirección de la circulación en la capa de superficie y fondo es diferente (figura 31a), en la capa superficial se observa la circulación típica de la Corriente de Yucatán, pero en el fondo se tiene una circulación distinta proveniente principalmente del noreste hacia la costa este de la Península de Yucatán, para después incorporarse hacia el norte y fluir hacia el oeste.

Dada la ubicación de la Laguna Chacmochuch, a la circulación regional que se presenta en la capa de fondo y a la época del año de este primer periodo, la entrada de agua puede estar influenciada por la surgencia Cabo Catoche. Esta surgencia se origina en el noreste de la Península de Yucatán, con mayor intensidad durante la primavera y el verano (Merino, 1997; Enríquez y Mariño-Tapia, 2014). Para identificar si se está desarrollando una surgencia durante este periodo, se analizaron tres secciones de

temperatura transversales a la costa proveniente del modelo regional que permiten identificar la existencia de un proceso de surgencia a diferentes latitudes (figura 32). Se determinó que la surgencia tuvo su mayor influencia en la zona cercana a la laguna (figura 32c) del día 5 al día 7 de junio del 2013. Los resultados obtenidos de la sección norte (figura 32a) sugieren que el efecto de la surgencia en la zona costera (figura 32b y 32c) es notable en los días posteriores a su desarrollo en la zona norte (figura 32a), y por lo tanto también posterior al periodo en el que se haya originado en la zona de Cabo Catoche.

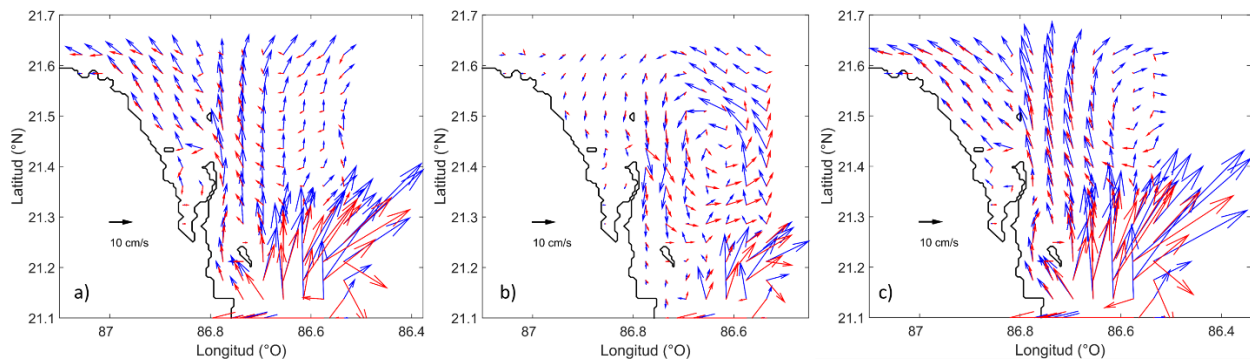


Figura 31. Vectores de velocidad promedio (azul: superficie; rojo: fondo) del modelo regional para cada periodo de análisis: a) 01/06/2013 a 11/06/2013, b) 23/11/2013 a 03/12/2013 y c) 20/05/2014 a 30/11/2014.

De acuerdo a Enríquez y Mariño-Tapia (2014), la dirección del viento durante los periodos de surgencia no influye en la intensidad de la surgencia, pero tiene influencia en las corrientes horizontales, más específicamente en la plataforma continental, teniendo influencia incluso en las capas del fondo. Lo anterior implica que si se tiene un evento de surgencia y vientos del sureste, el transporte de agua se dirigirá hacia el oeste de la plataforma continental (figura 33) (Enríquez y Mariño-Tapia, 2014). La circulación del fondo del modelo regional (figura 31a) aunque corresponde a una región no completamente resuelta en el trabajo de Enríquez y Mariño-Tapia (2014), muestra una tendencia similar al desplazarse desde la zona noreste.

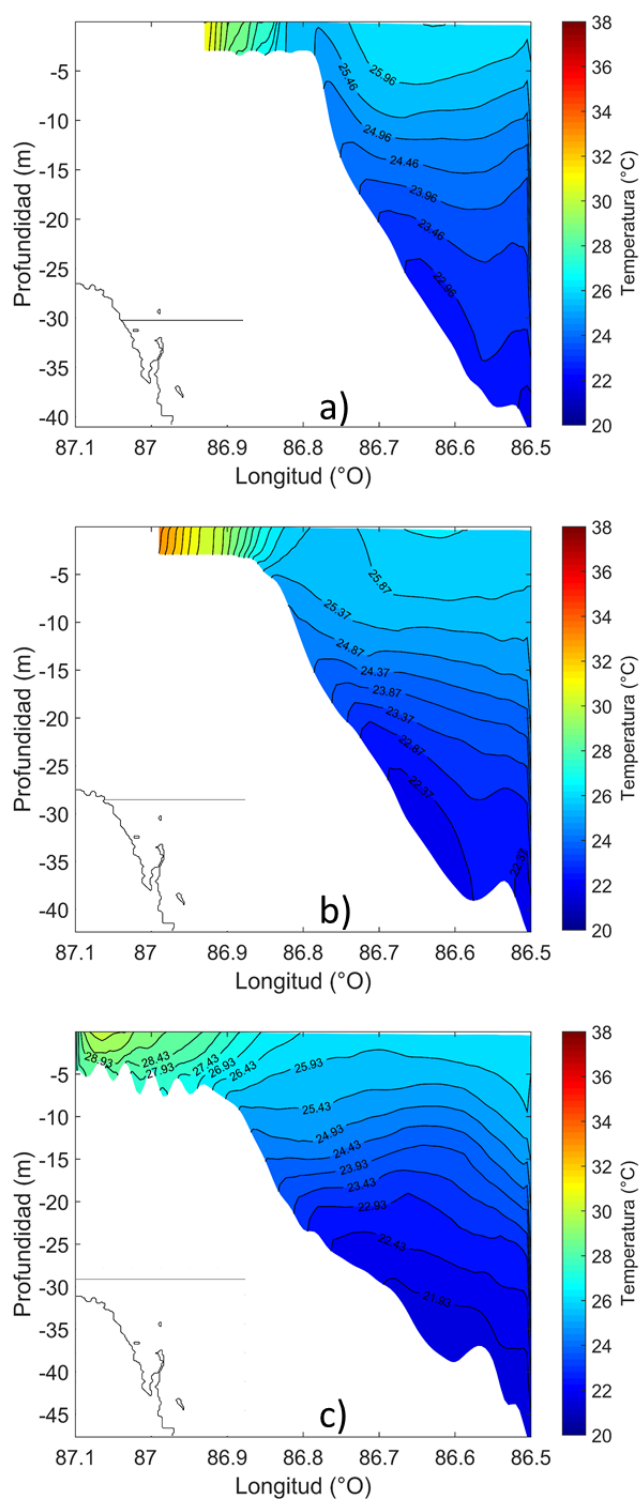


Figura 32. Secciones transversales de temperatura promedio del modelo regional para el periodo del 5/06/2013 a 7/06/2013, a lo largo de tres transectos zonales: a) norte a 21.3 °N, b) centro a 21.34 °N y c) sur a 21.32 °N.

De acuerdo a la dirección del viento, al evento de surgencia que se presenta y a la dirección de la circulación regional, la surgencia en Cabo Catoche está influenciando la entrada de agua en la laguna durante el primer periodo de análisis. Esto indica que la surgencia en Cabo Catoche puede ser un proceso oceanográfico que bajo ciertas condiciones climatológicas tenga influencia en los procesos hidrodinámicos de la laguna.

En el segundo periodo la entrada de agua a la Laguna Chacmochuch se presenta en la capa superficial. Los vectores del viento muestran que en este periodo se ha presentado un “norte”, cuya influencia se infiere por la dirección noreste a suroeste del viento, que a su vez influye en la entrada de agua en la laguna. En el modelo regional se observa que la dirección de la circulación en la capa superficial es muy diferente respecto a la circulación típica de la Corriente de Yucatán, que es de sur a norte (Enríquez *et al.*, 2010; Athié *et al.*, 2011). Está documentado que el viento tiene una influencia en la circulación en la plataforma interna del Golfo de México y en el oeste del Banco de Campeche (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014), lo que coincide con la variación que el “norte” provoca en la circulación de la zona estudiada.

Es importante destacar que si bien en el primer y tercer periodo la entrada de agua se presenta en la capa de fondo, los resultados indican que los procesos que están controlando esta entrada de agua son distintos. Es posible identificar la existencia de distintos procesos debido a las diferencias en la dirección y magnitud de las corrientes, principalmente de la corriente en la capa de fondo. Estas diferencias se ven reflejadas en el transporte hacia la laguna, en el que el tercer periodo es el de menor transporte (figura 9) y la menor velocidad de entrada de agua en la boca de la laguna (figura 16a).

9.3 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia promedio estimado a partir del transporte para la laguna Chacmochuch es de 18 días. Este tiempo de residencia puede considerarse normal, si se compara con el tiempo de residencia del sistema lagunar Nichupté, en el que el mayor

tiempo de residencia se presenta en la cuenca central en temporada de lluvias y es de 40.1 días y el menor se presenta en la cuenca del sur en la temporada de frentes fríos con una duración de 1.7 días (Romero-Sierra *et al.*, 2018)

De acuerdo con los resultados obtenidos con los experimentos de advección de partículas, el tiempo de residencia varía en función de las temporadas climáticas y está fuertemente influenciado por la dirección y velocidad de corriente superficial. Por lo anterior, en el primer y tercer periodo se tienen tiempos de residencia cortos, al ser las partículas arrastradas rápidamente a la costa noroeste, donde se presenta la mayor salida de agua. Mientras que el segundo periodo presenta el mayor tiempo de residencia, debido a que la corriente superficial arrastra la mayoría de las partículas hacia el interior de la laguna, en donde permanecen circulando y son pocas las que salen de la laguna cada día.

El tiempo de residencia de la laguna Chacmochuch, puede ser un factor que minimice el efecto del aporte de nutrientes a la laguna, y por lo tanto, disminuya el riesgo de eutrofización. Sin embargo, de acuerdo a Aguilar Martínez (2015), las concentraciones de NO_x (nitritos+nitratos) son variables durante todo el año, pero alcanza valores máximos de 25 µM en la zona sur mientras que para el resto de la laguna los valores generalmente son menores a 10 µM, y en algunas temporadas se alcanzan máximos de 24 µM. Esta variación en las concentraciones de nutrientes, aunada al corto tiempo de residencia del agua en la laguna, podría originar una rápida exportación de nutrientes hacia el mar lo que muy probablemente afectaría a los ecosistemas costeros cercanos y a los arrecifes a los que puede brindar soporte principalmente en la temporada de mayor concentración de NO_x.

En cuanto al estado de salud de la laguna Chacmochuch, las altas concentraciones de nutrientes en la zona sur de la laguna y la poca circulación en esta zona, estaría afectando a las especies de peces estuarinas y euralinas que habitan esta porción de la laguna (Caballero-Vázquez *et al.*, 2005). Las implicaciones que el incremento de nutrientes tiene

para la laguna y los ecosistemas costeros aledaños, hacen importante destacar la necesidad de realizar monitoreos continuos de las concentraciones de nutrientes en estas áreas, con el fin de determinar si la laguna está en un proceso de eutrofización y si esto se refleja en la zona costera.

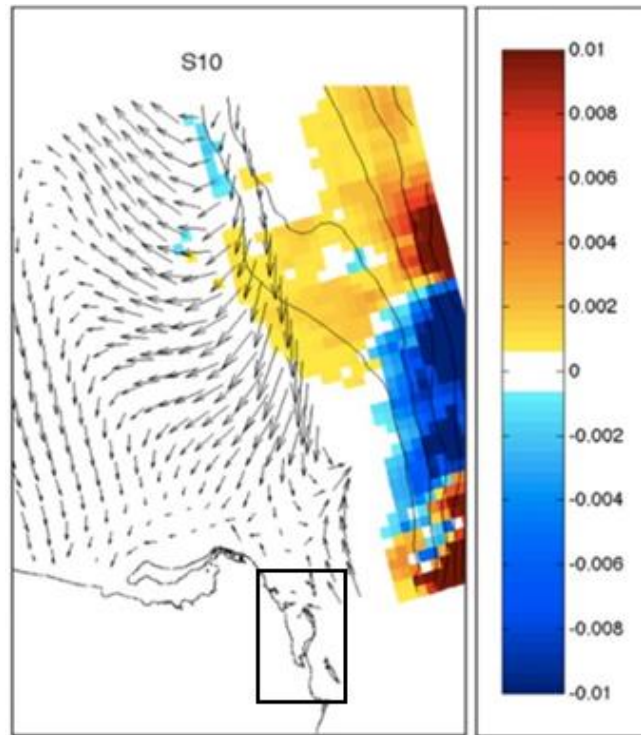


Figura 33. Vectores de velocidad de las corrientes horizontales en las capas de fondo, para el evento de surgencia y viento del sureste. El cuadro negro señala aproximadamente la región considerada en el modelo regional (Modificado de Enríquez y Mariño-Tapia, 2014).

9.4 Ventajas y limitantes del modelo.

En este trabajo el ROMS fue usado para la implementación de un modelo para el estudio de la circulación de agua en la laguna costera Chacmochuch. Las ventajas de este modelo y la metodología usada para su implementación son: a) uso de datos de modelos globales, b) permite el estudio de una laguna costera somera, c) se obtuvieron resultados congruentes con el comportamiento conocido de la laguna y d) es posible la configuración de un aporte de agua dulce, aunque este no fue considerado en esta tesis.

La ubicación y extensión de la laguna no permite el uso de datos de satélite o modelos globales como datos de frontera, por lo que la metodología para implementar el modelo consistió en la realización de un modelo regional y uno local, similar a la metodología empleada por Rivas y Samelson (2011). Esto permitió que a partir de datos provenientes del modelo HYCOM, del NARR y mediante la generación de un modelo regional fuera posible realizar el modelo de la laguna Chacmochuch considerando un dominio de escala fina. Los resultados obtenidos permiten considerar que la metodología implementada es una alternativa adecuada para el estudio de la circulación de agua en las lagunas costeras de esta región.

Los resultados obtenidos mediante la implementación de este modelo no están exentos de limitantes. Un ejemplo de ello es que los resultados presentados y descritos en este trabajo no contemplan el aporte de agua dulce que ha sido reportado por Caballero-Vázquez *et al.* (2005) y Aguilar Martínez (2015). Esta limitante ocasiona que los resultados de la distribución de la salinidad del modelo estén sobreestimados, ya que la laguna tiene un aporte importante de agua subterránea, de acuerdo a Caballero-Vázquez (2005) y Aguilar Martínez (2015). Sin embargo, para la etapa final de este trabajo fue posible implementar una descarga de agua dulce de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, que se ubicó al sur de la laguna, acorde con lo que sugieren los resultados presentados por Caballero-Vázquez (2005) y Aguilar Martínez (2015).

A fin de observar las variaciones que la entrada de agua produce en la salinidad de la laguna se comparan los mapas de salinidad superficial del agua, obtenidos mediante la modelación sin entrada, con entrada de agua, y los resultados presentados por Aguilar Martínez (2015) para el mes de noviembre (figura 34). Los datos medidos por Aguilar Martínez (2005) reflejan una considerable disminución de la salinidad en el sur y oeste de la laguna (figura 34a), mientras que el modelo sin entrada de agua (figura 34b) presenta principalmente una disminución en el sur de la laguna. Esta disminución queda explicada por la entrada de agua proveniente de la precipitación considerada para el modelo. El modelo que considera una descarga de agua en la laguna (figura 34c)

presenta una distribución espacial de la salinidad semejante a la presentada por Aguilar Martínez (2005), con disminución de salinidad al sur y al oeste de la laguna. Si bien los valores de la salinidad obtenidos no reproducen exactamente los de laguna, se observa que los patrones de distribución sí son reproducidos por el modelo. La diferencia de valores entre los resultados medidos y los modelados con la entrada de agua quedan explicados debido a que la simulación se realizó considerando una sola entrada de agua en el sur de la laguna, de la que no se tienen volúmenes estimados. Es muy probable que existan descargas de agua subterráneas en la costa oeste de la laguna, ya que es común la existencia de estas descargas en las costas de la Península de Yucatán (Hernández-Terrones, 2011; Null *et al.*, 2014) y los valores de salinidad en el oeste de la laguna así lo sugieren (Aguilar Martínez, 2015).

Las diferencias de los valores de salinidad superficial del modelo sin entrada de agua y del modelo con entrada de agua (figura 34d) muestran que existe una disminución considerable de la salinidad en la mayor parte de la laguna, aunque solo se esté considerando una sola descarga de agua. Este resultado sugiere que en el sur de la laguna el aporte de agua es considerable pero no constante, sino que varía en función de las temporadas, lo que origina que esta zona tenga características salobres, (Aguilar Martínez, 2015; Caballero-Vázquez *et al.*, 2005). Estos resultados muestran que la descarga de agua en la laguna, si bien no tiene una influencia considerable en la circulación del agua sí la tiene en la salinidad de la laguna principalmente en la zona sur. Es importante destacar este proceso, ya que las especies que habitan en esta zona son estuarinas y eurihalinas (Caballero-Vázquez *et al.*, 2005), por lo que su distribución en la laguna Chacmochuch depende completamente del gradiente de salinidad.

La Península de Yucatán se caracteriza por la presencia de un acuífero subterráneo, cuya dirección de flujo es hacia las costas (Bauer *et al.*, 2011), en las que se descargan volúmenes importantes de agua subterránea que influyen en las características de los ecosistemas costeros (Hernández-Terrones, 2011; Null *et al.*, 2014). Por esto es necesario realizar estudios que permitan estimar el volumen de agua subterránea que se

descarga a la laguna, con el fin de conocer mejor su influencia en la variabilidad hidrodinámica de este cuerpo de agua.

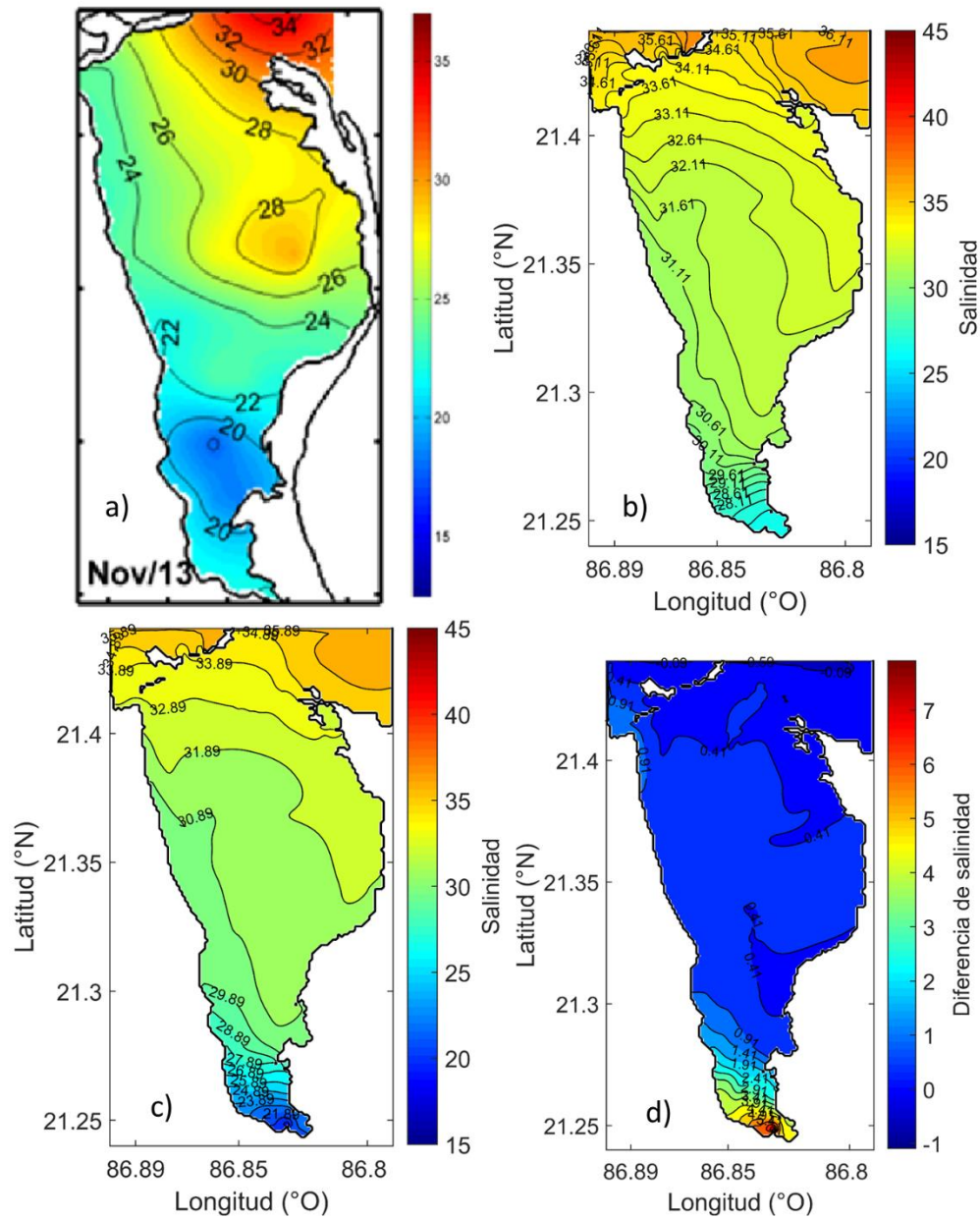


Figura 34. Mapas de salinidad: a) Observaciones (Aguilar Martínez, 2015), b) Modelo sin entrada de agua, c) Modelo con entrada de agua y d) diferencia entre modelos.

10. Conclusiones

1. La circulación de agua en la laguna Chacmochuch es compleja, al desarrollarse en dos capas y estar forzada por los vientos que se presentan en cada periodo de análisis.
2. En la laguna la entrada y salida de agua presenta variaciones de acuerdo con los periodos de análisis y procesos oceanográficos regionales.
3. La circulación del agua en la capa superficial en todos los periodos analizados se encuentra forzada por el viento regional.
4. Cuando la entrada de agua en la laguna se desarrolla en la capa de fondo de acuerdo con el periodo analizado, está controlada por la surgencia Cabo Catoche y por la Corriente de Yucatán.
5. Los vientos que se presentan en cada periodo de análisis influyen el tiempo de residencia del agua. Con tiempos de residencia alrededor 15 días cuando se presenta un “norte” intenso y de aproximadamente 12 días cuando se presentan vientos alisios o del sureste con menor intensidad.
6. Se tienen aportes de agua considerables en el sur y probablemente en el oeste de la laguna, que es necesario estudiar, ya que son determinantes en la salinidad de la laguna.
7. El ROMS mediante la metodología aplicada en este trabajo permitió la implementación de un modelo de escala fina para un dominio somero, como lo es la laguna Chacmochuch con resultados adecuados.

11. Referencias

Abascal A.J., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J. y Badan, A. (2003) Analysis of flow variability in the Yucatan Channel. *Journal of Geophysical Research*, 108(C12), pp.1–18.

Aguilar Martínez, P. (2015) *Variación estacional de parámetros ambientales e hidrológicos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo*. Tesis de Maestría. Cancún, Quintana Roo, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Amante, C., Eakins, B.W. (2009) ETOPO1 1 Arc-minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, 19 pp.

Apel, J.R. (1988) *Principles of Ocean Physics*. International geophysics series, ISSN 0074-6142. Academic Press pp. 634.

Athié, G., Candela, J., Sheinbaum, J., Badan, A. y Ochoa, J. (2011) Yucatan Current Variability through the Cozumel and Yucatan channels. *Ciencias Marinas*. 37(4A), pp. 471-492.

Barnes, R.S.K. (1980) *Coastal lagoons*. Cambridge University Press. 106 pp.

Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011) Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507–524.

Beaumont, N. J. *et al.* (2007) Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin*, 54(3), pp. 253–265.

Caballero-Vázquez, J. A., Gamboa-Pérez, H. C. y Schmitter-Soto, J. J. (2005) Composition and spatio-temporal variation of the fish community in the Chacmochuch Lagoon system , Quintana Roo , Mexico, *Hidrobiológica*, 15, pp. 215–225.

Caballero-Vázquez, J. A. y Vega-Cendejas, M. E. (2012) Spatial patterns of diversity at local and regional scales in a tropical lagoon. *Neotropical Ichthyology*. 10(1), pp. 99-108.

Caballero-Vázquez, J.A. (2003) *Composición y variación espacio-temporal de la comunidad de peces en el Sistema Lagunar Chacmochuch, Quintana Roo, México*. Tesis de Maestría. Chetumal, Quintana Roo, El Colegio de la Frontera Sur.

Capurro, L. (2003) Un gran ecosistema costero: la península de Yucatán. *Avance y perspectiva*. pp. 69–75.

Carrillo, L., Johns, E.M., Smith, R.H., Lamkin, J.T., Largier, J.L. (2015) Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research* (109) pp. 164–176.

Carrillo, L., Lamkin, J.T., Johns, E.M., Vásquez-Yeomans, L., Sosa-Cordero, F., Malca, E., Smith, R.H. y Gerard, T. (2017) Linking oceanographic processes and marine resources in the western Caribbean Sea Large Marine Ecosystem Subarea. *Environmental Development*, (22) pp. 84–96.

Chevalier, C., Sous, D., Devenon, J. L., Pagano, M., Rougier, G. y Blanchot, J. (2015) Impact of cross-reef water fluxes on lagoon dynamics: a simple parameterization for coral lagoon circulation model, with application to the Ouano Lagoon, New Caledonia. *Ocean Dynamics* (65) pp. 1509–1534.

Christian, R., Voss M. C., Bondavalli, C., Viaroli, P., Naldi, M., Tyler, C. A., Anderson,

C. I., McGlathery, K. J., Ulanowicz, R. E. y Camacho-Ibar, I. (2010) Chapter 4: Ecosystem Health Indexed through Networks of Nitrogen Cycling en: Coastal Lagoons. *Critical habitats of environmental change*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, U.S.A. pp. 73-90.

Contreras, E. F. (1993) *Ecosistemas Costeros de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa pp. 415.

Cruz Rico, J. E. (2015) *Análisis de la variabilidad de la clorofila en la Bahía de Todos Santos a través de un modelo numérico físico-biológico*. Tesis de maestría. Ensenada, Baja California, México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Cushman-Roisin, B. y Beckers J.M. (2009) Introduction to geophysical fluid dynamics. *Physical and Numerical Aspects*. Academic Press pp. 759.

Di Lorenzo, E., Miller, A. J., Schneider, N. y McWilliams, J. C. (2005) The Warming of the California Current System: Dynamics and Ecosystem Implications. *Journal of physical oceanography*. (35) pp. 336-362.

Di Lorenzo, E. Moore, M. A., Arango, G. H., Cornuelle, D. B., Miller, J. A., Powell, B., Chua, S. B. y Bennett, F. A. (2007) Weak and strong constraint data assimilation in the inverse Regional Ocean Modeling System (ROMS): Development and application for a baroclinic coastal upwelling system. *Ocean Modelling* (16) pp. 160-187.

Dijkstra A. H. (2008) *Dynamical oceanography*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 407.

Enriquez, C., Mariño-Tapia, I. J. y Herrera-Silveira, J. A. (2010) Dispersion in the

Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30(2) pp. 127–137.

Enriquez, C. y Mariño-Tapia, I. (2014) *Mechanisms Driving a Coastal Dynamic Upwelling*. Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) conference, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil, 19–24 October 2014.

Fairall, C.W., Bradley, E.F., Rogers, D.P., Edson, J.B. y Young, G.S. (1996a). Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101, 3747-3764.

Farreras S., S. (2004). *Hidrodinámica de Lagunas Costeras*. México. CICESE.

García, E. (1998) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). *Instituto de Geografía*. Universidad Nacional Autónoma de México, No. 6. Offset Larios S.A. México D.F. pp. 97.

Gobierno del estado de Quintana Roo (2017). “Medio físico” en Qro.gob.mx. [En línea]. Chetumal, Quintana Roo, México, disponible en: <http://www.quintanaroo.gob.mx/qroo/medio-fisico> [Accesado el día 3 de octubre del 2017].

Haidvogel, D.B., Arango, H., Budgell, W.P., Cornuelle, B.D., Curchitser, E., Di Lorenzo E., Fennel, K., Geyer, W.R., Hermann, A.J., Lanerolle, Levin, L., J., McWilliams, J.C., Miller, A.J., Moore, A.M., Powell, T.M., Shchepetkin, A.F., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Warner, J.C., Wilkin, J. (2008) Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System, *Journal of Computational Physics*, 227 pp. 3595-3624

Hedström, K. S. (2000) Technical Manual for a Coupled Sea Ice/Ocean Circulation Model (Version 2). *U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Anchorage, Alaska* pp. 102.

Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A. y Monroy-Rios E., (2011) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems, *Water, Air, and Soil Pollution*, 218(1–4), pp. 517–528.

Herrera-Silveira, J. A. (2006) Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): investigación, diagnóstico y manejo. *Ecotropicos*, 19(2), pp. 94–108.

Herrera-Silveira, J.A. Comin, F. A., Aranda-Cirerol, N., Troccoli, L. y Capurro, L. (2004) Coastal water quality assessment in the Yucatan Peninsula: management implications. *Ocean & Coastal Management*. (47) pp. 625-639.

Herrera-Silveira, J.A. y Morales-Ojeda, S.M. (2010) Chapter 13: Subtropical karstic coastal, lagoon assessment, Southesat Mexico. The Yucatan Peninsula Case, en: *Coastal Lagoons. Critical habitats of environmental change*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, U.S.A. pp. 307-333.

Howarth R. W. y Marino R. (2006) Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography*. 51(1, part 2).

Jewell, S. A., Walker, D. J. y Fortunato, A. B. (2012) Tidal asymmetry in a coastal lagoon subject to a mixed tidal regime. *Geomorphology*. Elsevier B.V., 138(1), pp. 171–180.

Jouon, A., Douillet, P., Ouillon, S., y Fraunie (2006) Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*. (26) pp. 1395–1415.

Kennish J. M. y H. W. Paerl, (2010) Chapter 1: Coastal Lagoons Critical Habitats of Environmental Change en: *Coastal Lagoons. Critical habitats of environmental change*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, U.S.A. pp. 1-16.

Kjerfve, B. (1994) *Coastal lagoons processes*. Elsevier oceanography series: 60. pp. 577.

Kjerfve, B., and K.E. Magill. (1989) Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology* (88) pp. 187–199.

Lankford, R. (1977) Coastal Lagoons of Mexico: Their Origin and Classification, en: Wiley, M., Ed., *Estuarine Processes*, pp. 182-215.

Liu, W.T., Katsaros, K.B. y Businger, J.A. (1979). Bulk parameterization of the air-sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36, 1722-1735.

Marchesiello, P., McWilliams J. C., y Shchepetkin, A. (2003) Equilibrium Structure and Dynamics of the California Current System. *Journal of physical oceanography*. (33) 753-783 pp.

Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O. Infante Mata, D. y Rodríguez-Revelo (2014) *Diagnóstico de las dunas costeras de México*. CONAFOR. 350pp. ISBN. 978-607-8383-17-7 pp. 255-264.

Mateos, E., Marinone, S. G. y Lavín, M. F. (2013) Numerical modeling of the coastal

circulation off northern Baja California and southern California. *Continental Shelf Research*. Elsevier, 58, pp. 50–66.

Merino, M. (1997) Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* (13) pp. 101-121.

Merino, M., GONZÁLEZ, A., Reyes, E., Gallegos, M. y Czitrom, S. (1992) Eutrophication in the lagoons of Cancún, México. *Science of the Total Environment* pp. 861-870.

Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzaki, W., Jovic, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E.H., Ek, M.B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., Shi, W. (2006) North American regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 87, 343-360.

Mitchell, S., Boateng, I. y Couceiro, F. (2017) Influence of flushing and other characteristics of coastal lagoons using data from Ghana. *Ocean and Coastal Management*. Elsevier Ltd, 143, pp. 26–37.

Möller, O. O. Jr., Castaing, P., Jean-Claude, Salomon y Lazure, P. (2001) The Influence of local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*. (24) pp. 297-311.

Null, K.A., Knee, K.L., Crook, E.D., De Sieyes, N.R., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández-Terrones, L. y Paytan, A. (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research*, (77), pp. 38-50.

Penven P., P. Marchesiello, L. Debreu, and J. Lefevre. (2008) Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*. (23) pp. 660-662.

Peña, M. A., Masson, D. y Callendar, W. (2016) Annual plankton dynamics in a coupled physical–biological model of the Strait of Georgia, British Columbia. *Progress in Oceanography*. (146) pp. 58-74.

Powell, T. M., Lewis, C. V. W., Curchister, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., y Dobbins, E. L. (2006) Results from a three-dimensional, nested biologicalphysical model of the California Current system and comparisons with statistics from satellite imagery. *Journal of Geophysical Research*, pp. 111, 1-14.

Rivas, D., Cruz-Rico, J., Vivas-Téllez, I., Arellano, B. y Bermúdez, A. (2016). Modelación numérica de interacción físico-biológica aplicada a florecimientos del fitoplancton en el Pacífico Mexicano frente a Baja California en: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S. I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E. J. (eds.) 2016. *Florecimientos Algales Nocivos en México*. Ensenada, México. CICESE. pp. 438.

Rivas, D. y Samelson, R. M. (2011) A Numerical Modeling Study of the Upwelling Source Waters along the Oregon Coast during 2005. *Journal of Physical Oceanography*, 41(1), pp. 88–112.

Rivas, D., Mancilla-Rojas, R., García-Mendoza, E. y Almazán-Becerril, A. (2010) Lagrangian Circulation in Todos Santos Bay and off Baja California During Spring 2007: Exploratory Experiments en Pavia, E., Sheinbaum, J. y Candela, J. (2010) *The Ocean, The Wine, and The Valley: The Lives of Antoine Badan*. CICESE. pp. 331.

Romero-Sierra, P., Rivas, D., Almazán-Becerril, A., Hernández-Terrones, L. (2018) Hydrochemistry and hydrodynamics of a Mexican Caribbean Lagoon: Nichupté

Lagoon System. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. pp. 185–198.

Servicios ambientales y jurídicos, S.C. (2008) *Programa de manejo sistema lagunar Chacmochuch*.

Shchepetkin, A. F., y McWilliams J. C. (2005) The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Modelling*. 9, 347–404.

Smith, N. P. (1994) Chapter 4. Water, salt, and heat balances of coastal lagoons. Pages 69-101 en B. Kjerfve, editor. *Coastal lagoon processes*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Smith, S.M., (1988) Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *J. Geophys. Res.* 93, 15467-15472.

Smith, W. H. y Sandwell, D. (1997) Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings, *Science*, 277(5334), pp. 1956–1962.

Song, Y. y Haidvogel D. (1994) A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of computational physics*. (115) pp. 228-244.

Torres-Freyermuth, A., Mariño-Tapia, I., Coronado, C., Salles, P., Medellín, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva, R., Candela, J. e Iglesias-Prieto, R. (2012) Wave-induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. (12) pp. 3765–3773.

Tsihrintzis, V. A., Sylaios, G. K., Sidiropoulou, M., Koutrakis, E. T. (2007)

Hydrodynamic modeling and management alternatives in a Mediterranean, fishery exploited, coastal lagoon. *Aquacultural Engineering*, 36(3), pp. 310–324.

Vallis, G. K. (2006) *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. Cambridge University Press.

Vidal-Zepeda, R. (2005) Región 11. Península de Yucatán. En: Las regiones climáticas de México. *UNAM, Instituto de Geofísica* pp.189-204.

Webster, I. T. (2010) The hydrodynamics and salinity regime of a coastal lagoon-The Coorong, Australia-Seasonal to multi-decadal timescales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Elsevier Ltd, 90(4), pp. 264–274.

Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey S. L., Martínez-López, B. (2014) The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmósfera* 27(3) pp. 317-334.

Zemlys, p., Ferrarin, C., Umgiesser, G., Gulbinskas, S. y Bellafiore, D. (2013) Investigation of saline water intrusions into the Curonian Lagoon (Lithuania) and two-layer flow in the Klaipeda Strait using finite element hydrodynamic model. *Ocean Science* (9) pp. 573-584.

12. Anexo A Comparación de resultados de salinidad y temperatura superficial con datos medidos.

Este anexo presenta los resultados de temperatura y salinidad superficial de los datos medidos (figura 35) por Aguilar Martínez (2015) y los obtenidos por el modelo sin entrada de agua y con entrada de agua (figura 36), para las fechas de las mediciones realizadas por Aguilar Martínez (2015) en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2013. Se observa que la salinidad presenta un gradiente de disminución de norte a sur (figura 35), y que la salinidad en general disminuye en noviembre, presentándose en este mes las menores salinidades, esto debido a las lluvias que se presentaron en esta época (Aguilar Martínez, 2015). Los resultados del modelo, con entrada y sin entrada de agua dulce, reproducen el gradiente de salinidad de norte a sur y la disminución de salinidad en el mes de noviembre. Para diciembre en los datos medidos y en los resultados del modelo se presenta un incremento de salinidad en la zona central y parte del sur de la laguna, que también es reproducida por el modelo.

El modelo, sin entrada y con entrada, de agua sobreestiman las salinidades, en el primero por la ausencia del aporte de agua dulce, que de acuerdo a los datos obtenidos por Aguilar Martínez (2015) y en este trabajo es considerable. En el modelo con entrada de agua dulce, la salinidad se sobreestima debido a la configuración del volumen de entrada de agua del modelo, ya que este no corresponde necesariamente a la realidad, ya que no se cuenta con estimaciones de la descarga de agua dulce hacia la laguna. Aunado a lo anterior, la salinidad en las fronteras de la laguna es mayor a la que se observa en los mapas de Aguilar Martínez (2015). Sin embargo, tener un patrón de distribución similar indica que el modelo está resolviendo adecuadamente la circulación de agua en la laguna.

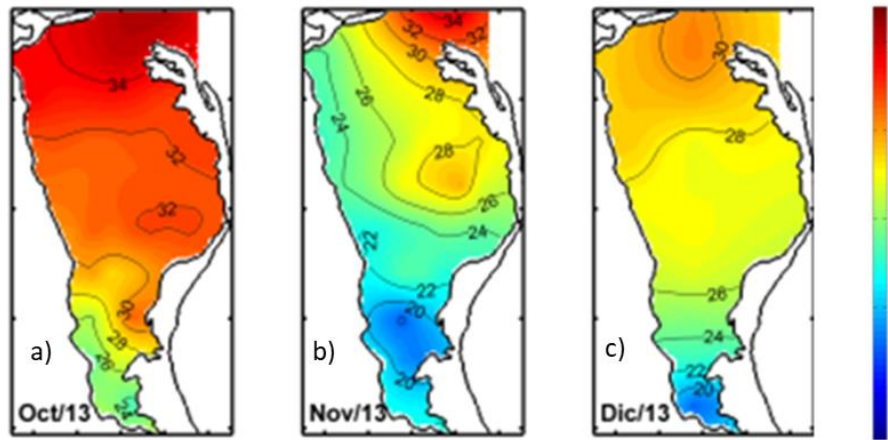


Figura 35. Salinidad superficial medida a) octubre, b) noviembre y c) diciembre (Modificado de Aguilar Martínez, 2015).

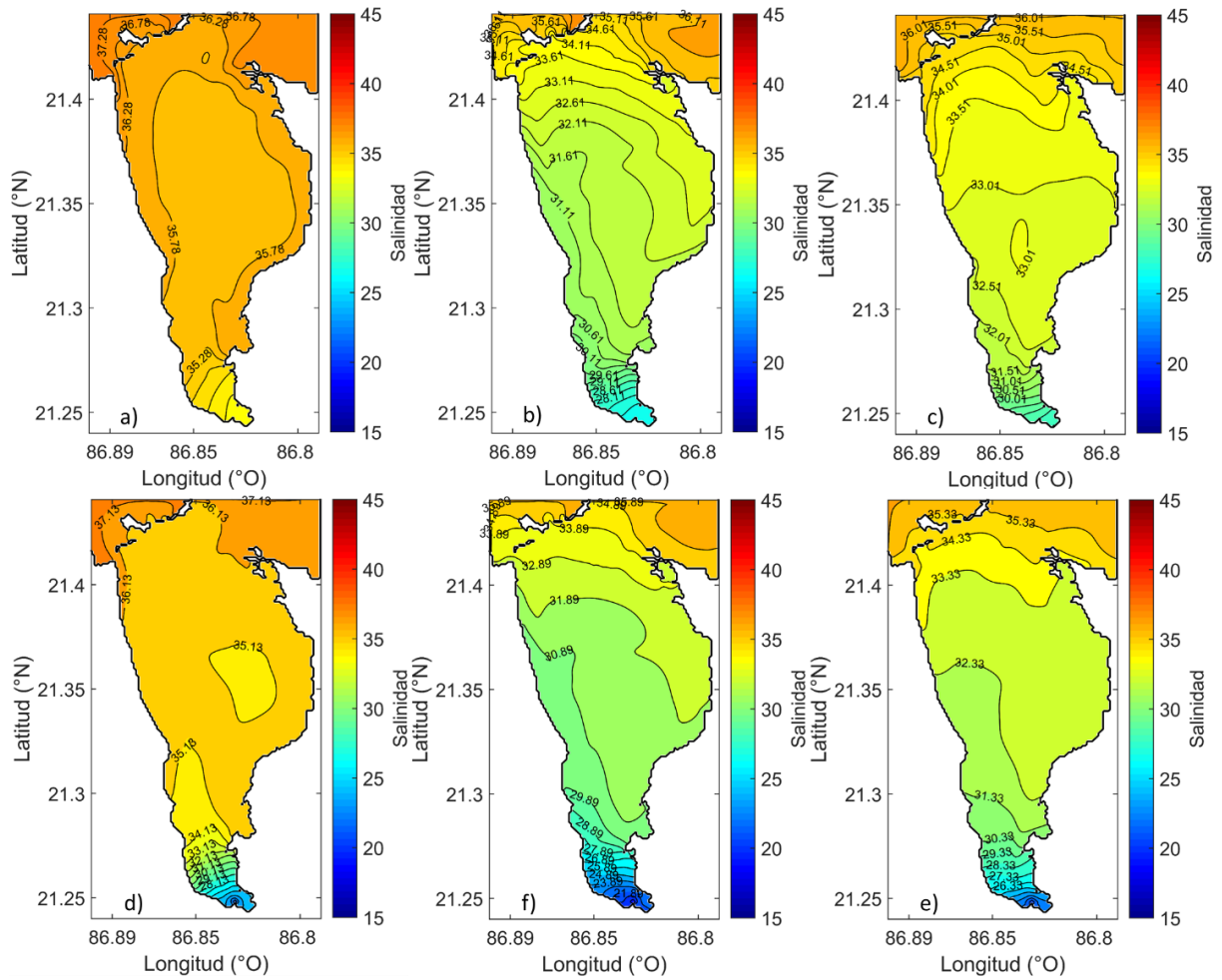


Figura 36. Salinidad superficial del modelo sin entrada de agua dulce: a) octubre, b) noviembre, c) diciembre; y del modelo con entrada de agua dulce: d) octubre, e) noviembre y f) diciembre.

Respecto a la temperatura, esta se incrementa de norte a sur y disminuye conforme la temporada de nortes avanza (figura 37); esta distribución y comportamiento son reproducidos por el modelo (figura 38). En el modelo con entrada de agua se puede observar que la temperatura en el sur incrementa ligeramente respecto al modelo sin entrada de agua, esto es debido a la temperatura considerada para la entrada de agua, la cual se consideró como constante a lo largo de la simulación y con un valor de 25°C. La entrada de agua puede estar influyendo en la temperatura que se presenta en el sur de la laguna, la cual para todas la temporadas medidas (Aguilar Martínez, 2015) es mayor respecto al resto de la laguna. En general, para los tres meses el modelo subestima la temperatura $\sim 1^\circ\text{C}$, esto puede deberse a que los flujos netos de calor y agua fueron calculados internamente en el modelo usando los métodos de Liu *et al.* (1979) y Fairall *et al.* (1996a, 1996b) (<https://www.myroms.org/main.php?page=forcing>), formulaciones que podrían ser inadecuadas para cuerpos de agua someros como la laguna Chacmochuch. Los resultados de salinidad y temperatura muestran que el modelo resuelve adecuadamente el comportamiento de la laguna, sin embargo es susceptible de ser mejorado con datos climatológicos más exactos y del aporte de agua dulce a la laguna.

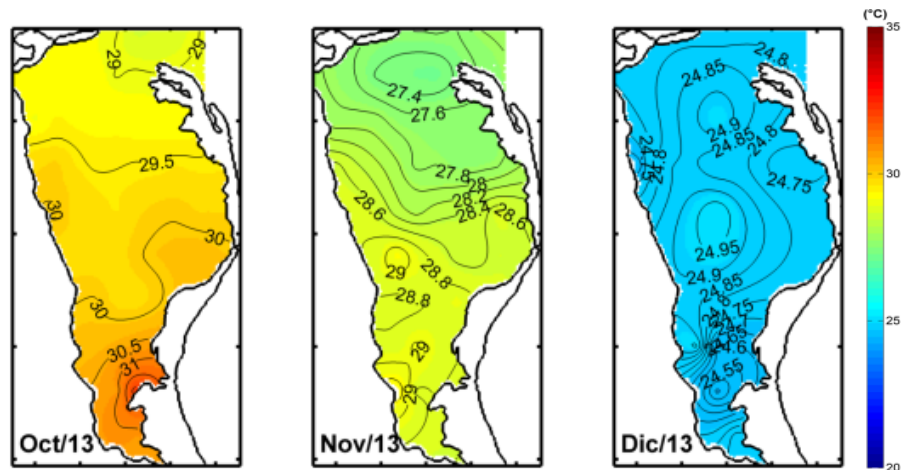


Figura 37. Temperatura superficial medida a) octubre, b) noviembre y c) diciembre (Modificado de Aguilar Martínez, 2015).

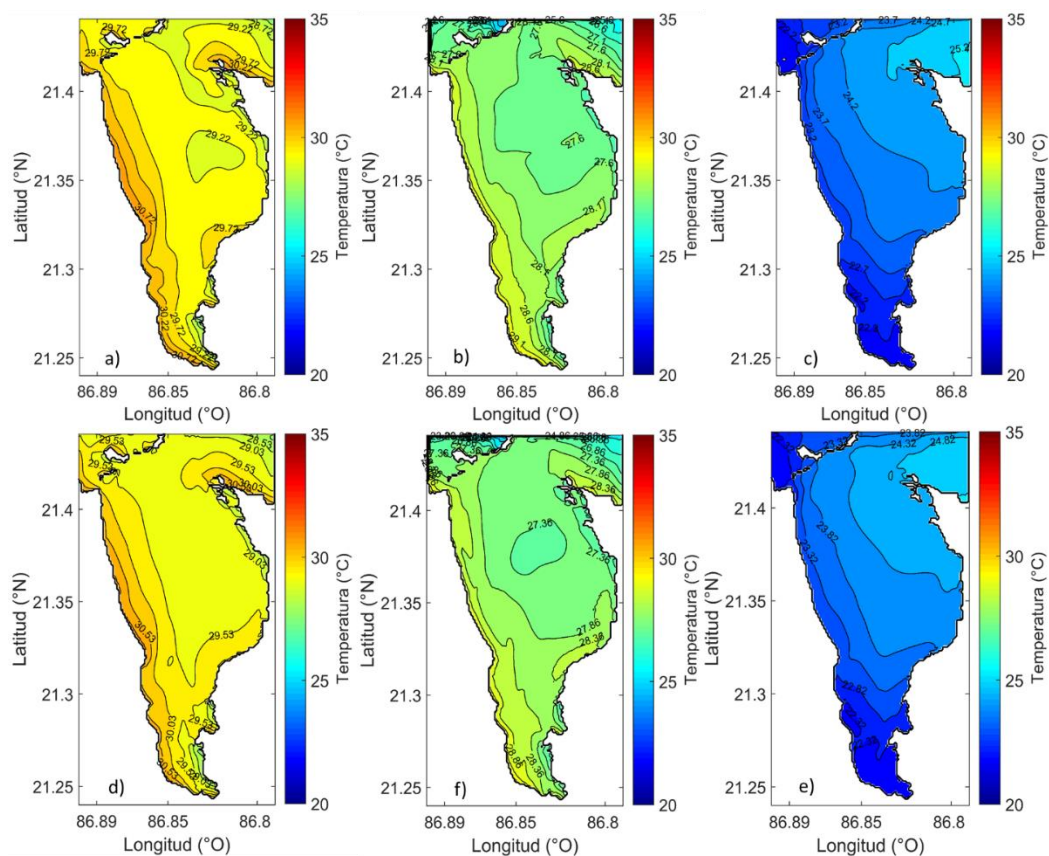


Figura 38. Temperatura superficial del modelo sin entrada de agua dulce: a) octubre, b) noviembre, c) diciembre; y del modelo con entrada de agua dulce: d) octubre, e) noviembre y f) diciembre.

13. Anexo B Contenido multimedia

El siguiente enlace dirige a una lista de reproducción en la plataforma Youtube en la que se encuentran las animaciones correspondientes a la advección de partículas para cada periodo estudiado.

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLcD2G7ex9HwKRxRpuGGUZOiO00sLP1wmr>.

La lista de reproducción contiene los siguientes vídeos:

- 1.- Advección de partículas periodo 1: Vídeo de advección del primer periodo, del 1 al 11 de junio de 2013.
- 2.- Advección de partículas periodo 2: Vídeo de advección del segundo periodo, del 23 de noviembre al 3 de diciembre del 2013.
- 3.- Advección de partículas periodo 3: Vídeo de advección del tercer periodo, del 20 al 30 de mayo de 2013.