



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**“CARACTERIZACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA EN BAHÍA SAN QUINTÍN UTILIZANDO UN
MODELO NUMÉRICO DE MALLA NO ESTRUCTURADA Y VOLUMEN FINITO”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
O C E A N Ó L O G O
PRESENTA:
VICTOR DANIEL SOLORZA RODRIGUEZ

ENSENADA, B.C. AGOSTO DE 2023



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA**



“Caracterización de la hidrodinámica en Bahía San Quintín utilizando un modelo numérico de malla no estructurada y volumen finito”

TESIS

**PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Oceanólogo**

PRESENTA:

**Victor Daniel Solorza Rodríguez
357656**

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


**Ana Laura Flores Morales
DIRECTOR**


**Alejandro Francisco Parés Sierra
Codirector**


**Mauro Wilfrido Santiago García
SINODAL**


**Rubén Castro Valdez
SECRETARIO**

“Por la Realización Plena del Ser”

Resumen

La Bahía San Quintín (BSQ) es una laguna costera del Pacífico Oriental ubicada en Baja California, México, posee una morfología peculiar, en forma de “Y”, que se separa en dos brazos: Bahía Falsa (BF) al oeste y Bahía San Quintín (Bsq) al este. Además de que, su única conexión con el Pacífico es a través de una boca ubicada al extremo sur. Es una región que ha sido muy estudiada debido a que sus características hidrodinámicas hacen que sea una laguna con alta productividad primaria. En este trabajo se analizó la hidrodinámica de BSQ implementando el modelo numérico FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model), y utilizando a la marea como único forzamiento. Si bien los componentes que se utilizaron para forzar al modelo fueron de carácter diurno y semidiurno, en el interior de la laguna se encontró otra frecuencia relevante de ~ 9.3 cpd (periodo de ~ 2.3 hrs), la cual correspondió al primer modo de la frecuencia natural de oscilación de la laguna. Además, al ser una laguna somera (~ 2 m) y poseer un canal profundo que la atraviesa, el forzamiento por la marea induce una circulación secundaria que corresponde con rasgos importantes en la circulación superficial, por ejemplo, las partículas tienden a aglomerarse en las partes más profundas. También se cuantificó la capacidad de retención del agua dentro de la laguna, calculando así los tiempos de residencia y en promedio resultaron de ~ 19 días en BF y ~ 22 días en Bsq. Y aunado con las trayectorias preferenciales se observó que existen zonas dinámicas de atrapamiento o retención de partículas, y otras que facilitan el flujo, por ejemplo la gran mayoría de las partículas quedan en BF, ninguna se adentra a Bsq, mientras que un $\sim 26\%$ de las partículas de Bsq entraron por el canal este de BF y eventualmente salieron por la boca principal.

Palabras clave: Bahía San Quintín, FVCOM, hidrodinámica, transportes, tiempos de residencia.

Dedicatoria

A mis padres, *Daniel* y *Thelma*, quienes han sido mi fuente inagotable de apoyo, inspiración y amor incondicional a lo largo de esta etapa. Sin su constante aliento y sacrificio, este logro no hubiera sido posible.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California, por la oportunidad de estudiar esta carrera y ser parte de su hermosa comunidad. Así como a todos su personal docente y administrativo que fue parte de mi desarrollo profesional.

A CONACYT: Ciencia de Frontera 2019. Proyecto de grupo CICESE-UABC 2020, FORDECYT-PRONACES 1727972 “Estudio de la interacción hidrodinámica entre lagunas costeras y mares adyacentes mexicanos”, por la beca otorgada durante la realización de este trabajo.

A la Dra. Ana Laura Flores por la confianza, el conocimiento y todo el apoyo que me brindó durante la etapa final de mis estudios profesionales. Ha sido un gran ejemplo para mí y le estoy muy agradecido.

A mi comité de tesis: Dra. Ana Laura Flores, Dr. Alejandro Parés, Dr. Mauro Santiago, Dr. Rubén Castro, por todas sus sugerencias y correcciones a este trabajo.

Al Dr. Victor Camacho Ibar y al Dr. Adán Mejía Trejo por proporcionarnos los datos de la batimetría de la zona.

A mis mejores amigos, Isaias, Leonardo, Roberto, Max, Bryan, Isaac, por subirme los ánimos con esas tardes de juegos de mesas y carnita asada. También a Yessica quien ha sido una gran amiga y compañera de equipo durante gran parte de la carrera.

A mi querida novia Evelin, por ser una gran compañera de vida durante todos estos años, dándome ánimos y cariño cuando más los he necesitado. Gracias por darme fuerzas y ser tan genial, te quiero.

Contenido	Página
1. Introducción.....	7
1.1. Generalidades.....	7
1.2. Antecedentes.....	9
2. Justificación.....	11
3. Objetivos.....	12
3.1. General.....	12
3.2. Específicos.....	12
4. Metodología.....	12
4.1. Análisis de componentes de marea.....	12
4.2. Modelo numérico.....	14
4.3. Tiempos de residencia.....	18
5. Resultados.....	18
5.1. Corrientes superficiales.....	19
5.2. Cortes verticales de velocidad y transporte de masa.....	23
5.3. Modelo Lagrangiano y tiempos de residencia.....	28
6. Discusiones.....	33
6.1. Análisis de componentes de marea.....	33
6.2. Hidrodinámica en BSQ.....	36
6.3. Lagrangianos y tiempos de residencia.....	38
7. Conclusiones.....	43
8. Recomendaciones.....	45
9. Referencias bibliográficas.....	46

1. Introducción

1.1. Generalidades

La modelación numérica a gran escala ha permitido el estudio de la circulación general del océano con el fin de monitorear, describir y entender diversos fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden en el océano y en la atmósfera (Smith, 1993). Sin embargo, el tipo de forzante varía según la escala espacial y temporal que se quiera resolver, por ejemplo, los procesos de los modelos de escalas regionales son muy distintos a los costeros y/o estuarinos (Fringer et al. 2019). En la actualidad para estudiar estuarios se utilizan técnicas numéricas cada vez más eficientes que resuelven las ecuaciones primitivas en cuerpos costeros, la mayoría suelen utilizar una malla estructurada, la cual tiene la ventaja de una fácil operación a la hora de discretizar las ecuaciones y después al analizar las salidas. Sin embargo, al igual que en los modelos de gran escala, la línea de costa y la batimetría son difíciles de ajustar al dominio; para ello se utilizan modelos numéricos de malla no-estructurada, caracterizados por resolver con mayor resolución la hidrodinámica de lagunas costeras, adaptándose mejor a líneas de costa con geometría irregular y de batimetría somera y accidentada (Chen et al., 2003).

Bahía San Quintín (BSQ, en mayúsculas para referir a todo el sistema lagunar) es una laguna costera hipersalina (Camacho-Ibar et al., 2003) ubicada en Baja California, México, entre las coordenadas 30°20' y 30°30'N y 115°55' y 116°04W (figura 1). Esta tiene forma de "Y" separándose en dos brazos: Bahía Falsa (BF) del lado oeste y Bahía San Quintín (Bsq, en minúscula para referir al brazo) al este. Tiene un área estimada de 42 km², con profundidades promedio de 2m y máximas de 7 a 13 m en los canales principales. Se encuentra comunicada con el océano Pacífico al sur de BF por una sola boca de apenas

800 m de apertura. Por su forma fue clasificada por Largier (2020) como una bahía elongada, semicerrada y somera.

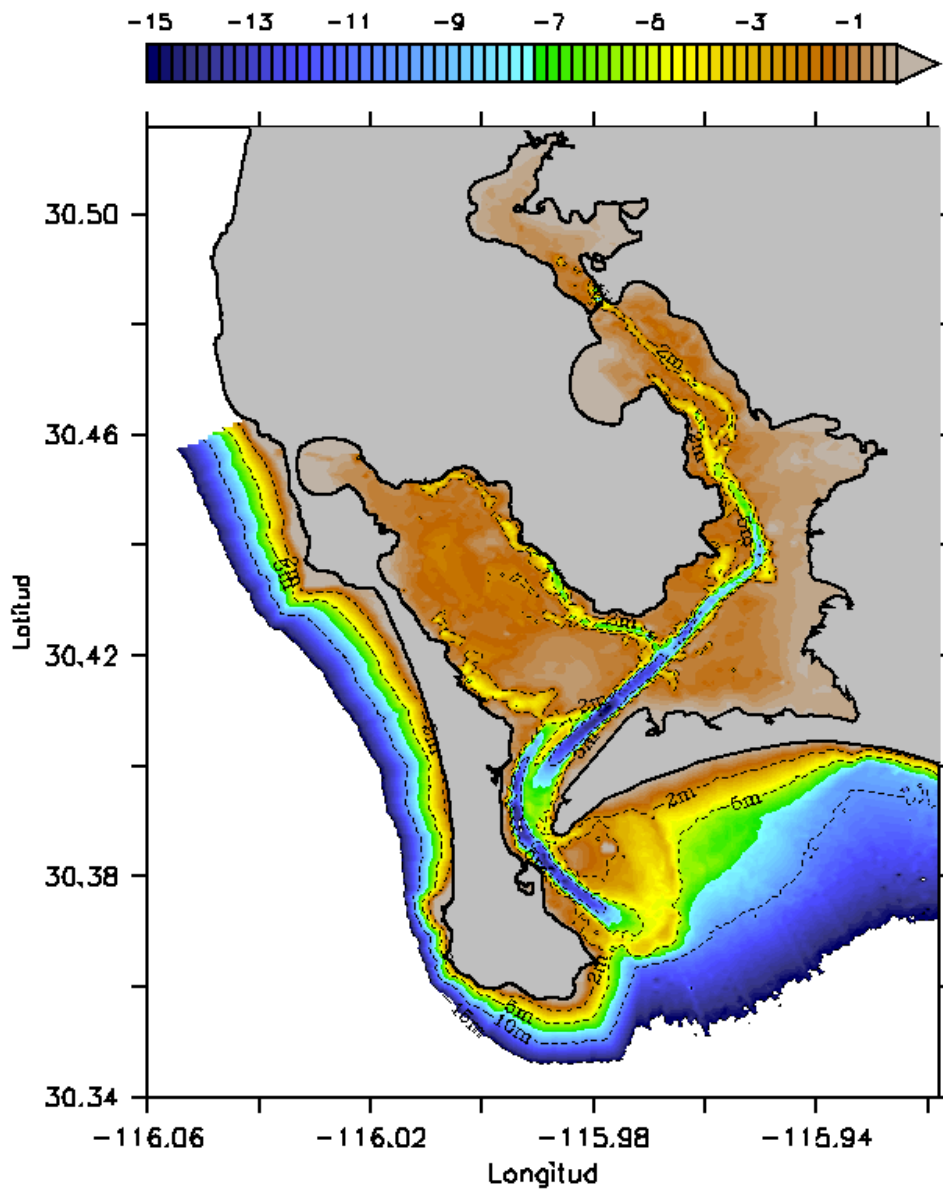


Figura 1. Batimetría de Bahía San Quintín en metros.

En cuanto a sus forzantes, Bahía San Quintín se encuentra forzada principalmente por componentes de marea gravitatoria mixta, especialmente las semidiurnas (M2, S2, K1,

O1), aunque también se ven afectada, en menor medida, por componentes de aguas someras (M4, M6) (Ocampo-Torres, 1980). Los rangos de marea van de 1 m en marea muerta hasta 2.5 m en marea viva (Fischer et al., 1979). Otro de los forzantes es el viento que, generalmente, es fuerte y persistente del noroeste, con magnitudes máximas de 5-8 m/s durante primavera y verano (Angulo-Larios, 2006 y Delgado-González, 2012). Esta laguna costera se encuentra en una zona afectada por la Corriente de California, con vientos predominantes del noroeste, los cuales son favorables a eventos de surgencia (especialmente durante invierno y primavera). Sin embargo, la morfología que tiene BSQ, especialmente la posición y tamaño de la boca, restringe el forzamiento de la plataforma dentro de la bahía. En cambio, este es reemplazado por el bombeo por marea, el cual realiza el intercambio de agua traída desde la subsuperficie hasta el interior de la bahía (Vidal-Juárez, 2014; Largier, 2020).

1.2. *Antecedentes*

Uno de los primeros trabajos donde se utilizan modelos bidimensionales en la zona fue el de Jiménez-Hernández (2005) donde, con un método de diferencias finitas, resolvió las ecuaciones de momentum horizontal y conservación de masa para un caso barotrópico, considerando también los efectos de fricción con el fondo, las mareas y el viento. También, identificó cómo el viento intensifica las celdas de circulación y contracorrientes, principalmente en BF y en la boca de la bahía. Además, acopló un modelo biológico a la hidrodinámica, y observó que el intercambio de nutrientes de BSQ y el océano adyacente es provocado principalmente por las mareas, siendo una de las razones por la que se sustenta la producción primaria en ésta laguna. Posteriormente, Delgado-González (2010) utilizando el modelo numérico MIKE 21 Flow Model

(<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>) en su modo barotrópico, analizó las corrientes y relacionó la disponibilidad de alimento con la profundidad de los cultivos de ostión, y así creó un índice biofísico que identificaba los mejores espacios para granjas acuícolas; y encontraron que los sitios óptimos fueron al oeste del canal de Bahía Falsa, ya que ahí los tiempos de residencia y de exposición fueron los más cortos. Delgado-González y colaboradores (2012) aplicaron el modelo CMS-Flow (Coastal Modeling System Flow, por sus siglas en inglés) (<https://www.erdc.usace.army.mil>) para estudiar a mayor detalle la hidrodinámica de la laguna tomando en cuenta los efectos del viento, observaron que durante el patrón de refluo las corrientes divergen desde las zonas someras hacia los canales, especialmente al oeste de BF; mientras que durante la inundación, el flujo se propaga en las explanadas arenosas de BF y Bsq. Además, con el modelo PTM (Particle Tracking Model) (<https://doer.el.erdc.dren.mil/ptm.html>), simulamos trayectorias lagrangianas para identificar la distribución del detritus dentro del cuerpo de agua, notaron que el flujo en Bsq es más rápido que en BF, lo que favorece su distribución en las zonas más alejadas del brazo este. Otro modelo que se ha utilizado para esta zona es el Delft3D FLOW (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>), por ejemplo: Vidal-Juárez y colaboradores (2014) simulamos un escenario en donde, bajo condiciones extremas (oleaje de 3.5 m, periodos de 7.5 seg y marejadas de tormenta de 0.9 m), la barra de arena en BF se abre conectando la laguna con el Pacífico; Vidal-Juaréz (2014) también describió la formación de un dipolo al sureste de la boca, el cual se sugiere es provocado por la morfología de la barra arenosa y de la misma boca de la laguna, siendo este un factor importante en los procesos de mezcla dentro del cuerpo de agua; García y colaboradores (2014) y Morales y colaboradores (2020) hicieron una descripción general de la hidrodinámica de BSQ utilizando siete componentes de marea y con vientos estáticos

como dinámicos, obteniendo velocidades de corriente bastante similares en canal Bsq con 0.35-0.7 m/s, mientras que en la boca es de 0.8-1 m/s. Melaku-Canu y colaboradores (2016) utilizaron el modelo SHYFEM (Shallow water Hydrodynamic Finite Element Model) (<https://sites.google.com/site/shyfem>), el primero en donde se emplea una malla no estructurada en BSQ, forzado con marea y viento, del cual se obtuvieron magnitudes de corrientes similares al resto de simulaciones realizadas por otros autores, mostrando la robustez de los resultados obtenidos con los años. Por último, en la tesis de maestría de Zertuche-Chanes (2016) se utilizó el modelo tridimensional ELCOM (Estuary and Lake Computer Model) (<https://www.caee.utexas.edu/>), en su modo barotrópico, y describió la formación de remolinos en el extremo sureste de la boca, entre los ciclos de flujo y reflujos.

2. Justificación

La Bahía San Quintín es una laguna costera del Pacífico Oriental con una morfología muy particular (Figura 1), ya que su única conexión con el Pacífico es a través de una boca ubicada en el extremo sur y que no es paralela a la costa (oculta por una barra arenosa). Por ello, analizar la hidrodinámica de este sistema lagunar es de gran importancia para caracterizar las condiciones físicas que vuelven a Bahía San Quintín un sitio de alta productividad primaria, así como analizar las interacciones entre este y el océano adyacente en relación a su morfología y los forzamientos externos.

3. Objetivos

3.1. General

A través de un modelo numérico de malla no estructurada y volumen finito, se estudiará la hidrodinámica en Bahía San Quintín poniendo como principal forzamiento la marea.

3.2. Específicos

- Se analizará el campo de corrientes generado por el modelo y se calculará el transporte en la boca durante la marea de inundación y reflujó.
- Se calcularán los tiempos de residencia y recambio de agua dentro de la Bahía de San Quintín.

4. Metodología

4.1. Análisis de componentes de marea

Para identificar las frecuencias de marea que predominan en la zona, inicialmente se realizó un análisis de una serie de tiempo de nivel del mar de una estación mareográfica ubicada en BSQ proveniente de la red mareográfica de CICESE, es importante mencionar que aunque se cuentan con datos históricos de varios años, solo se muestra como ejemplo la del 2015, ya que en otros años se observan muchos huecos en la serie. Los datos están muestreados cada minuto, pero para este análisis se hicieron promedios horarios (Figura 2a), posteriormente para identificar las frecuencias dominantes se realizó aplicó a la serie la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) (Figura 2b). Obteniendo así el espectro que muestra que las frecuencias dominantes de marea dentro de BSQ, son de característica mixta, predominantemente semidiurna (Tabla I).

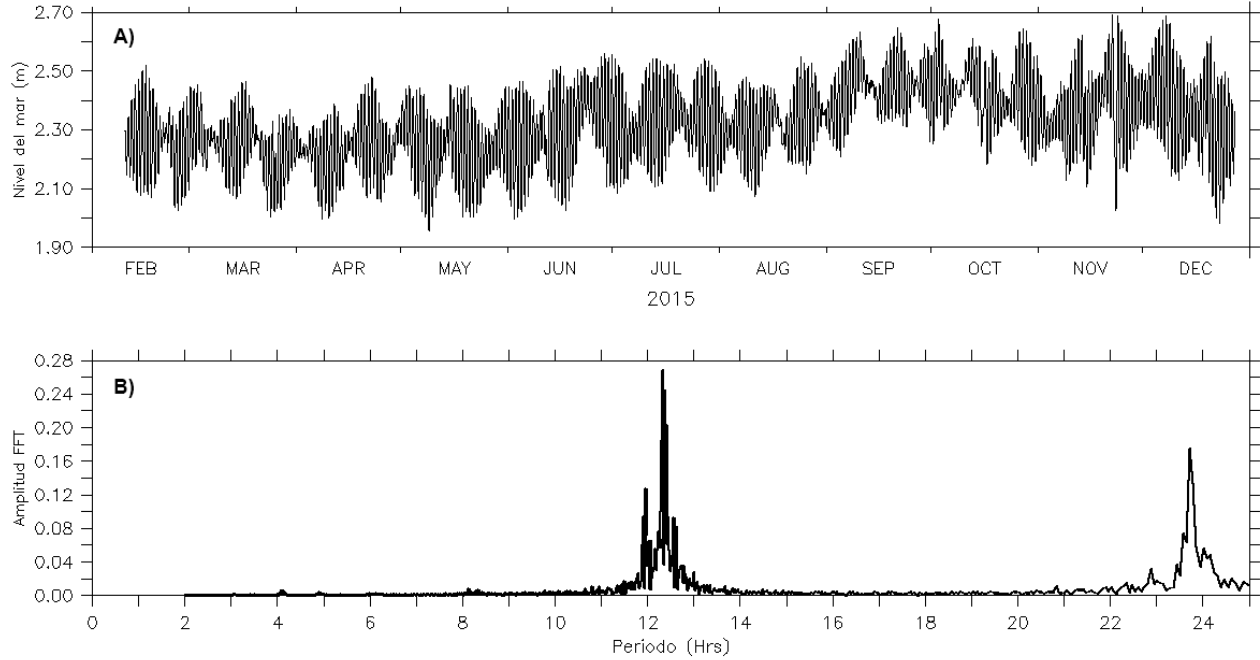


Figura 2. a) Serie de tiempo de nivel del mar de la estación meteorológica. b) Amplitud del espectro de la serie de tiempo de la estación meteorológica.

Tabla I. Componentes principales de marea con amplitud obtenida de una estación mareográfica en BSQ (Ocampo-Torres, 1980)

Componente	Frecuencia (ciclos por día [cpd])	Amplitud (cm)
S2	2	21.83
M2	1.93227	48.27
N2	1.89598	11.78
K1	1.00274	31.48
O1	0.92954	20.60

4.2. Modelo numérico

FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model;

<http://www.smast.umassd.edu/Fisheries/modelerFV/aboutFVCOM.php>) es un modelo

numérico tridimensional desarrollado por Chen et al. (2003), de malla no estructurada,

volumen finito, diseñado principalmente para resolver la hidrodinámica de lagunas costeras

que, debido a su complicada geometría, no podían ser resueltas con los métodos de

discretización tradicionales, como los utilizados en modelos regionales. FVCOM utiliza las

ecuaciones primitivas del momento, presión hidrostática y de continuidad:

Ecuaciones de momento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v$$

Ecuación de Presión Hidrostática

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Donde x , y , z son los ejes este, norte y vertical, u , v y w son sus componentes x , y , z de

la velocidad, respectivamente. F_u y F_v son términos de difusión horizontal. K_m el coeficiente

de difusión vertical turbulenta (5 a $15 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en zonas costeras), ρ la densidad del

agua de mar ($1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), P la presión, f el parámetro de Coriolis y g gravedad (9.81

$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Para este trabajo, como primer escenario, se corrió el modelo FVCOM durante dos meses de octubre y noviembre de 2015 con un ΔT de 3 segundos, utilizando como forzante las componentes de marea obtenidas del análisis armónico anterior y puestas en los puntos de la frontera abierta como se observa en la malla de la figura 3.

Las salidas del modelo fueron post-procesadas para ordenar los datos en una malla regular de 201x221 con una resolución de 0.001° , posteriormente se analizó el campo de corrientes superficiales durante marea viva y muerta para tres tiempos principales: inundación, transición y reflujo de la marea. Además, se analizaron los flujos de entrada y salida en los mismos tiempos mencionados anteriormente para cortes transversales en la boca y en ambas bahías (Bsq y BF).

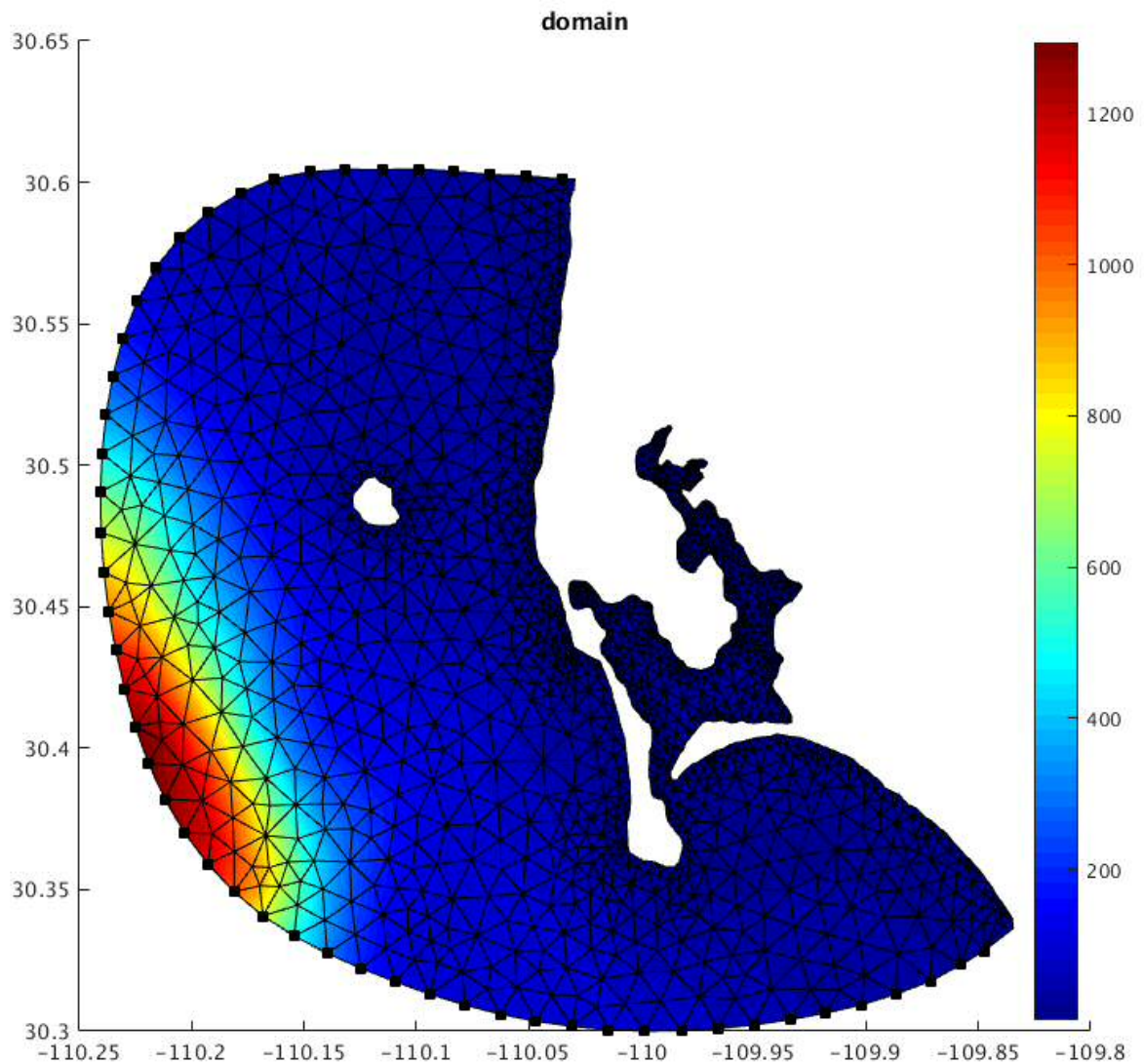


Figura 3. Dominio que muestra la malla no estructurada compuesta por 3032 nodos y 1809 elementos. Con la batimetría (metros) utilizada para correr el modelo.

Otra parte importante fue el seguimiento de partículas dentro de la bahía utilizando un modelo lagrangiano; el cual resuelve la ecuación de la velocidad con el esquema Runge-Kutta de cuarto orden.

$$\bar{v} = \frac{d\bar{x}}{dt}$$

$$\bar{x} = \int \bar{v} dt$$

Donde \bar{v} es el vector de la velocidad, \bar{x} el vector de la posición y t el tiempo .

Los experimentos consisten en poner partículas inertes en cada nodo de la malla del dominio (malla ya transformada a regular) y se dejan adveccionar con las corrientes superficiales provenientes del modelo. Para tener una estadística robusta se realizaron 24 repeticiones con el modelo lagrangiano, iniciando cada uno en una hora distinta durante todo un ciclo de marea. Durante este experimento las partículas de BF fueron diferenciadas de Bsq con un color distinto (azul y rojo, respectivamente), y así analizar la estadística Lagrangiana de cada lugar de manera independiente (Figura 15).

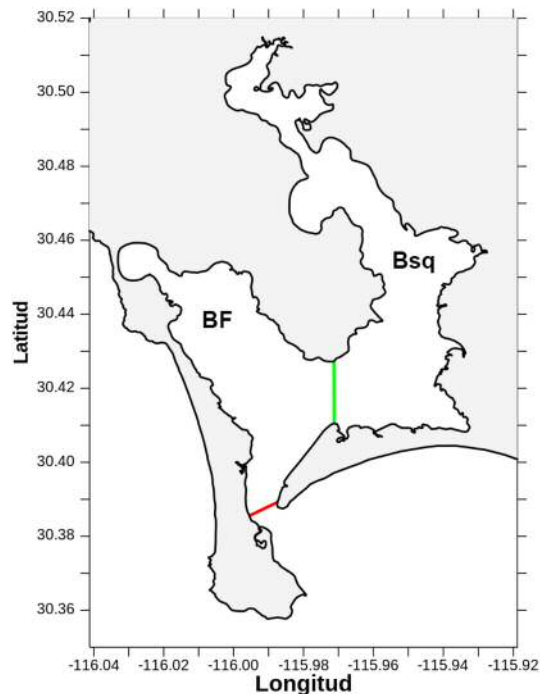


Figura 4. Bahía San Quintín: El brazo oeste Bahía Falsa (BF) y al este Bahía San Quintín (Bsq), separados en esta clasificación por la línea verde la cual comunica los dos brazos. La línea roja representa la boca de la laguna.

4.3. *Tiempos de residencia*

Para calcular el tiempo de residencia se contabiliza, para cada trayectoria lagrangiana, el momento en que una recta formada por los dos o tres puntos más avanzados de cada trayectoria se intersecta con una recta prescrita, que en este caso sería la línea roja o verde de la figura 4, las cuales representan ya sea la boca o la conexión entre los canales. El cruce entre estas rectas no se calcula de manera analítica, que aunque esta manera sería más clara resultaría muy lento y menos divertido, así que el algoritmo que lo hace es puramente geométrico, ver por ejemplo Sedgewick R. capítulo 24 y 25, Algorithms in C++.

5. Resultados

A partir de las salidas de la implementación del modelo FVCOM se realizaron tres diferentes análisis para describir la hidrodinámica en Bahía San Quintín: corrientes superficiales, cortes verticales de velocidad y transportes de masa en la boca y canal profundo principal de Bsq, y además un modelo Lagrangiano para estimar tiempos de residencia en cada bahía. Estos se analizan en diferentes momentos de la marea (durante la inundación, la transición y el refluo), en marea viva y marea muerta (Figura 5).

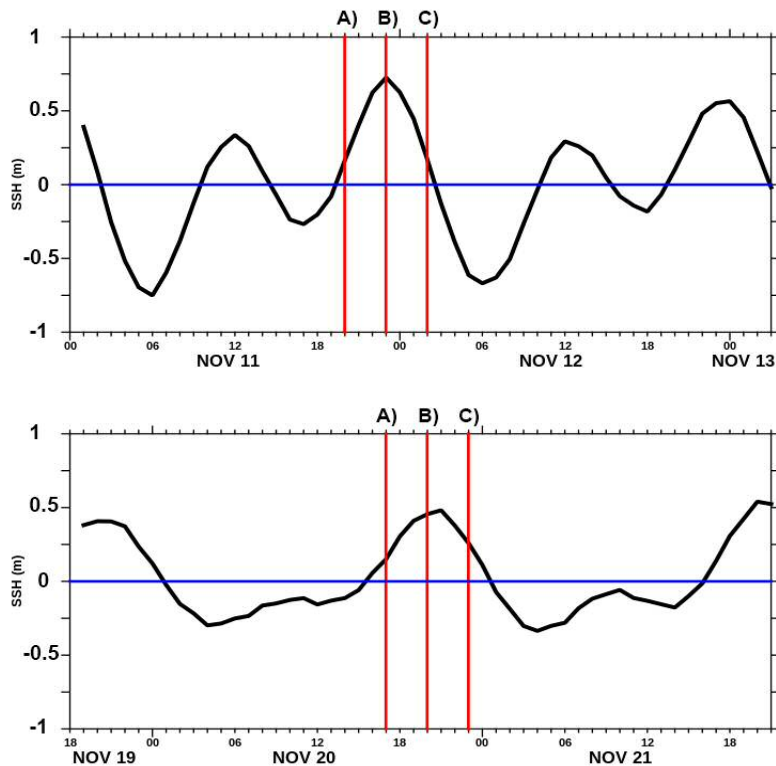


Figura 5. Altura superficial del mar durante marea viva en la parte superior y marea muerta en la inferior. Las líneas rojas representan los tiempos de (A) inundación, (B) transición y (C) reflujó.

5.1. *Corrientes superficiales*

Durante la marea viva (Figura 6A), las velocidades de entrada en la boca son de ~ 1.5 m/s y disminuyen a ~ 0.5 m/s en su trayecto por el canal profundo de Bsq hasta alcanzar la cabeza del brazo derecho. En BF, las corrientes superficiales entran por sus dos canales profundos (~ 5 m). Sin embargo, las mayores velocidades se observan en el canal derecho (noreste de BF). También se observa que, el nivel del mar sube más rápidamente por BF, alcanzando 0.3 m sobre el nivel medio del mar, mientras que la onda de marea de la misma altura se encuentra a la mitad de Bsq. Para la transición (Figura 6B), las corrientes superficiales en BF disminuyen considerablemente, menores a ~ 0.1 m/s y cambian de dirección hacia la boca, esto provocado por la diferencia en el nivel del mar, fluyendo por el canal izquierdo (noroeste de BF), y así converger con las corrientes superficiales de la

boca, las cuales se encuentran entrando; en donde se observa la formación de remolinos en diferentes instantes, con una duración de apenas ~ 1 hrs (Figura 7). En el trabajo de Vidal-Juaréz (2014), observó la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos al final de los canales de BF, así como en la periferia de la boca. Estos también fueron observados por Zertuche-Chanes (2016) al sureste de la barra arenosa, los cuales se generaron con mayor frecuencia después del cambio de la inundación al reflujó; y reporta una duración de apenas un par de horas, desplazándose hacia el océano hasta desaparecer. Estos procesos de formación de remolinos en la boca de Bsq incrementan los procesos de mezcla y permiten que el agua sea expulsada a una distancia más lejana a la fuente, renovando el agua que ingresa en el siguiente ciclo de marea (Vidal-Juaréz, 2014).

También, en la figura 6B se observa cómo las corrientes superficiales en Bsq siguen su trayecto hacia la cabeza, con una onda de marea que alcanza ~ 1 m sobre el nivel medio del mar y velocidades superficiales de ~ 0.5 m/s sobre el canal profundo (~ 10 m). Para el reflujó (Figura 6C), las corrientes superficiales de ambas bahías se dirigen hacia la boca, en BF divergen hacia sus extremos, donde se encuentran los canales profundos, al mismo tiempo en Bsq las corrientes convergen hacia el canal profundo principal. Encontrando en la boca velocidades de ~ 1.5 m/s y al salir de esta, divergen en forma de abanico hacia el océano abierto. Esta estructura en la boca hacia mar abierto es descrita por Wells y Van Heijst (2004) como la causa que origina la formación de remolinos dipolos fuera de algunos cuerpos de agua semicerrados, el cual está relacionado con la anchura del canal, la velocidad máxima en el canal y el periodo de marea.

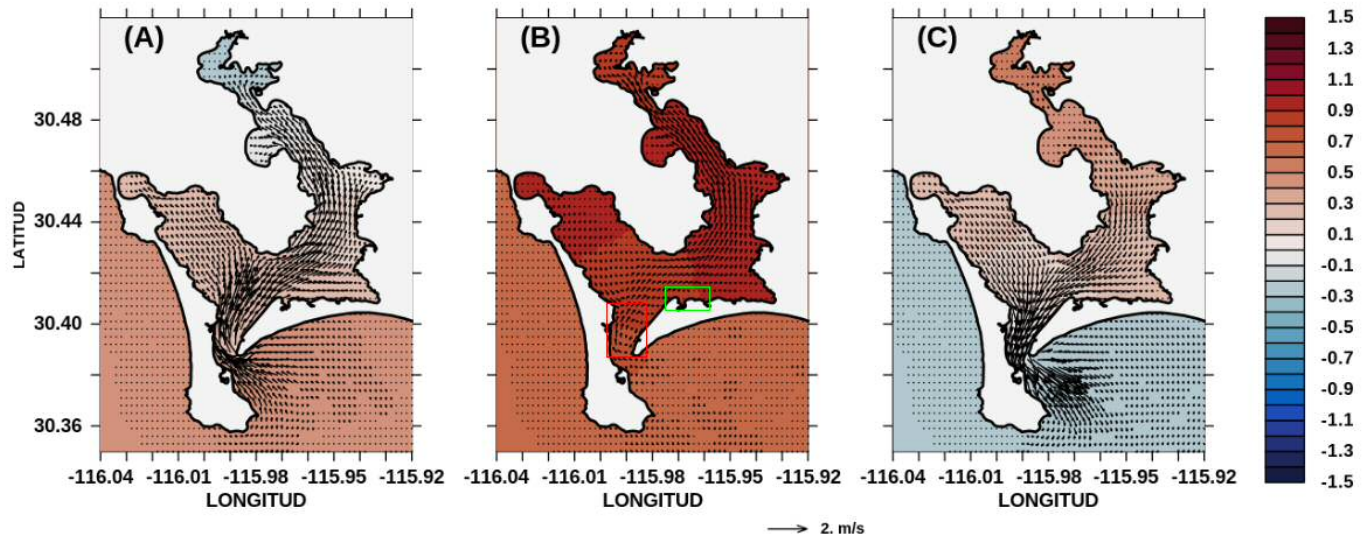


Figura 6. Corrientes superficiales (m/s) en BSQ durante marea viva en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujo.

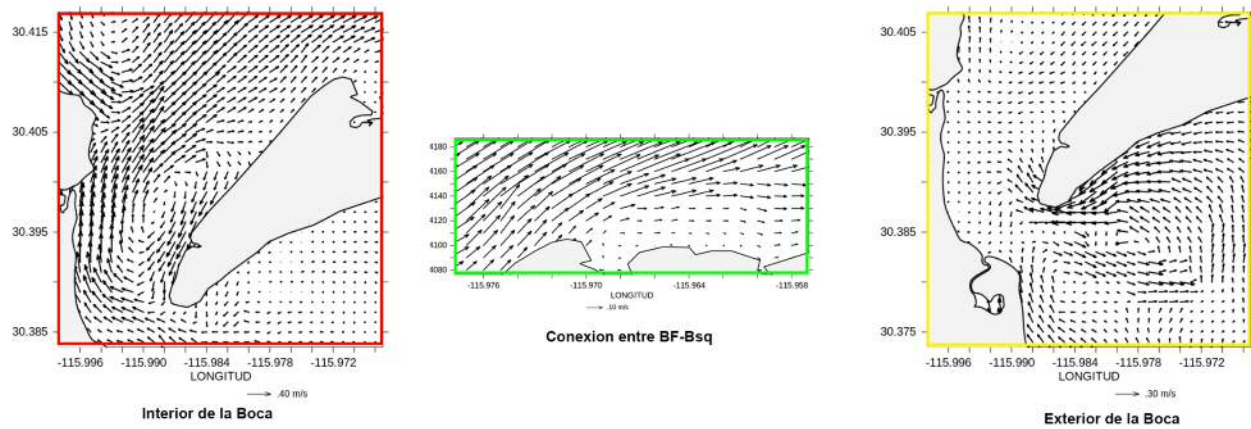


Figura 7. Formación de remolinos durante diferentes instantes en BSQ: En rojo un giro ciclónico en el interior de la boca; en verde un giro anticiclónico en la conexión de BF y Bsq; en amarillo la formación de un dipolo afuera de BSQ

Durante la marea muerta en Bsq la componente semidiurna se reduce drásticamente, dominando así la frecuencia diurna (Figura 5). Sin embargo, el patrón de circulación sigue el mismo que en marea viva, pero menos intenso. Durante la inundación (Figura 6A), las corrientes en la boca tienen velocidades de hasta ~ 1.3 m/s y continúan su trayecto dentro

de la laguna siguiendo los canales profundos de BF y Bsq. Además, la altura superficial del mar es aproximadamente la mitad de intensa que durante la marea viva. En el momento de la transición (Figura 8B) el cambio en la dirección de las corrientes en Bsq ahora se da más rápido que durante marea viva, moviéndose una parte por los canales profundos hacia la boca y la otra hacia el canal derecho de BF. Nuevamente, se observa como las corrientes en BF salen por el canal izquierdo, formándose remolinos cercanos a la boca tanto por fuera como por dentro de la laguna (Figura 7).

Ahora, durante el reflujó (Figura 8C), las corrientes superficiales más intensas siguen la batimetría más profunda de la laguna, al igual como se describió en la marea viva, pero en este caso con menor intensidad, siendo de ~ 0.4 m/s en el canal profundo de Bsq y ~ 1.1 m/s en la boca.

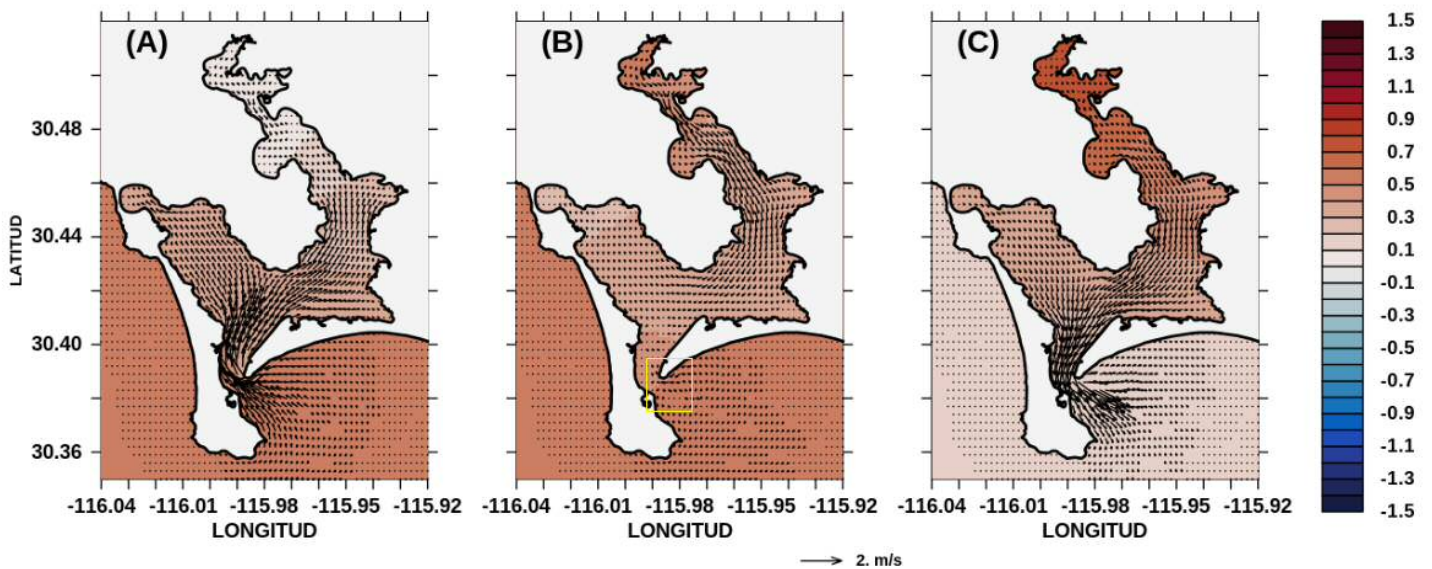


Figura 8. Corrientes superficiales (m/s) en BSQ durante marea muerta en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujó.

5.2. Cortes verticales de velocidad y transporte de masa.

Para analizar cómo se comporta el flujo en la vertical durante la marea viva y la marea muerta se calcularon los transportes para momentos de flujo, transición y reflujos, además de que se realizaron dos cortes, uno en la boca principal de la laguna y otro en la conexión entre BF y Bsq. El primer corte vertical se realizó durante marea viva en la boca (transecto rojo de la figura 4). Durante la inundación (Figura 9A), las corrientes más intensas de entrada se observan cargadas al extremo derecho de la boca, que es justo donde se encuentra una curvatura en la línea de costa, con velocidades superiores a ~ 1.5 m/s y un transporte positivo de ~ 3000 m³/s de agua del Pacífico hacia BF (Figura 11A). Para la transición (Figura 9B), se forman dos flujos opuestos, uno de entrada el cual está sobre el canal profundo con velocidades de ~ 0.1 m/s y un flujo de salida en el extremo derecho, el cual es ligeramente más somero, con velocidades máximas de ~ 0.1 m/s. Este patrón ha sido explicado por varios autores (*i.e.* Robinson, 1981 y Valle-Levison et al., 2009), donde el flujo de entrada se da por los canales y el de salida por los bancos de arena, esto causado principalmente por la interacción de la marea con la batimetría y la morfología de la laguna. En el reflujos (Figura 9C), las corrientes más intensas se encuentran sobre el canal profundo hasta el extremo derecho de la boca, con velocidades de salida de ~ 1.5 m/s y un transporte negativo de ~ 3500 m³/s (Figura 11A).

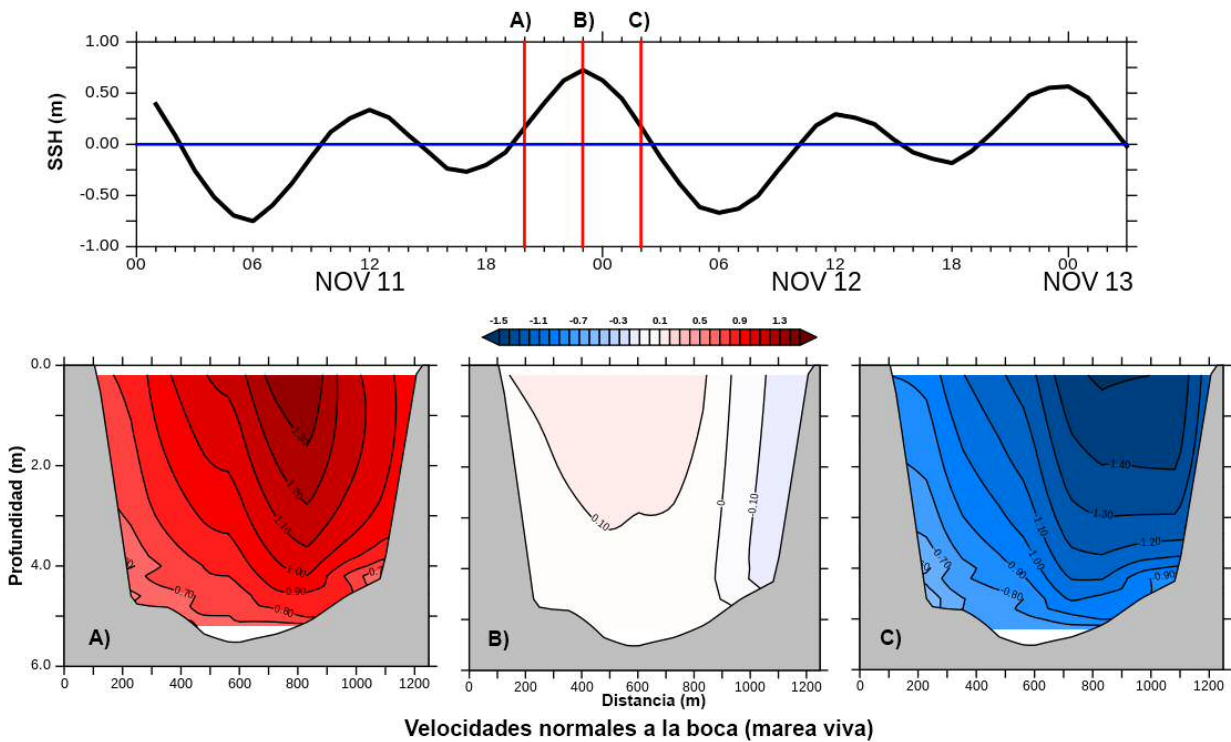


Figura 9. Corte vertical de velocidades en la boca principal de BSQ durante marea viva en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujo. La distancia parte desde el lado oeste.

Por otro lado, durante la marea muerta (Figura 10AC) el comportamiento de la inundación y el reflujo es parecido al de marea viva pero de menor intensidad: las corrientes de entrada tiene valores máximos de ~ 1.3 m/s y un transporte positivo de ~ 1500 m³/s (Figura 11B), mientras que las corrientes de salida presentan valores de ~ 1.2 m/s y un transporte negativo de ~ 1500 m³/s (Figura 10B). Sin embargo, en la transición el comportamiento de los flujos se invierte en comparación con marea viva, ahora la entrada es en la zona somera con corrientes de ~ 0.2 m/s y las corrientes de salida suceden encima del canal profundo con valores inferiores a ~ 0.1 m/s (Figura 10B). Esta variación en el patrón de flujo podría ser causada por el rápido cambio de dirección en las corrientes provocado por el relativo poco aumento del nivel del mar con respecto a la marea viva (Figura 8).

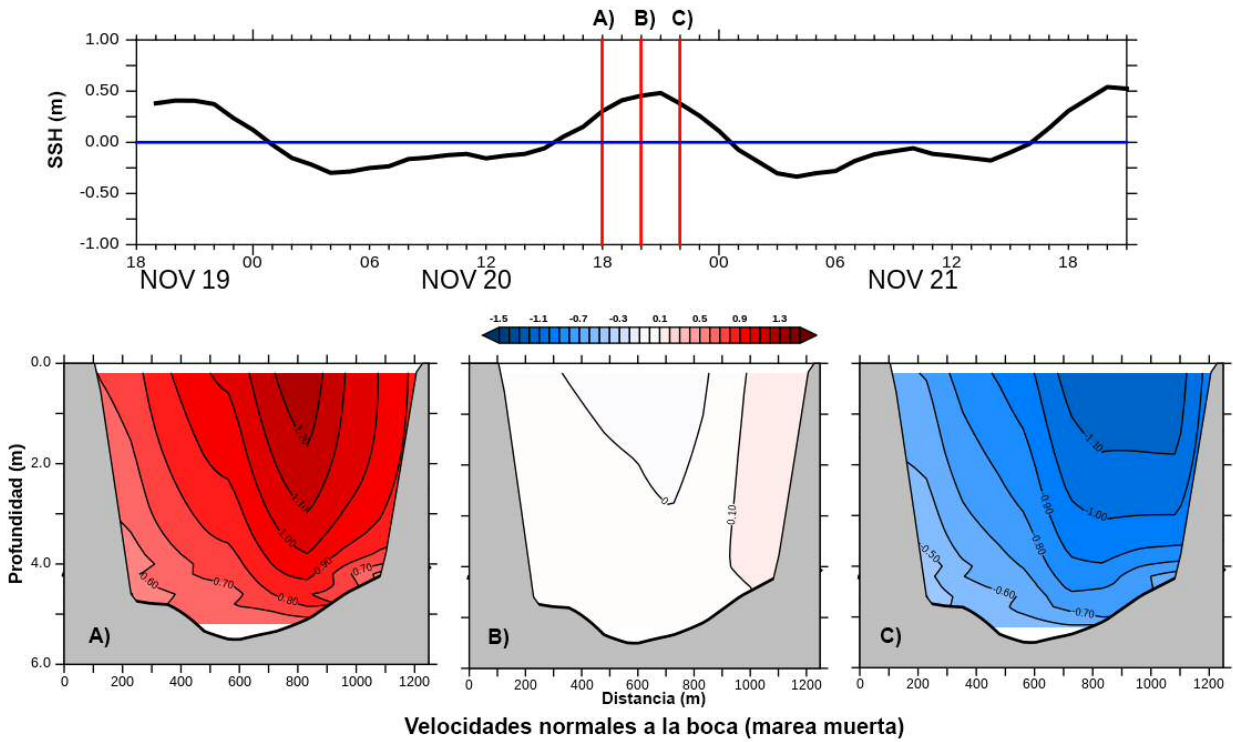


Figura 10. Corte vertical de velocidades en la boca de BSQ durante marea muerta en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujó. La distancia parte desde el lado oeste.

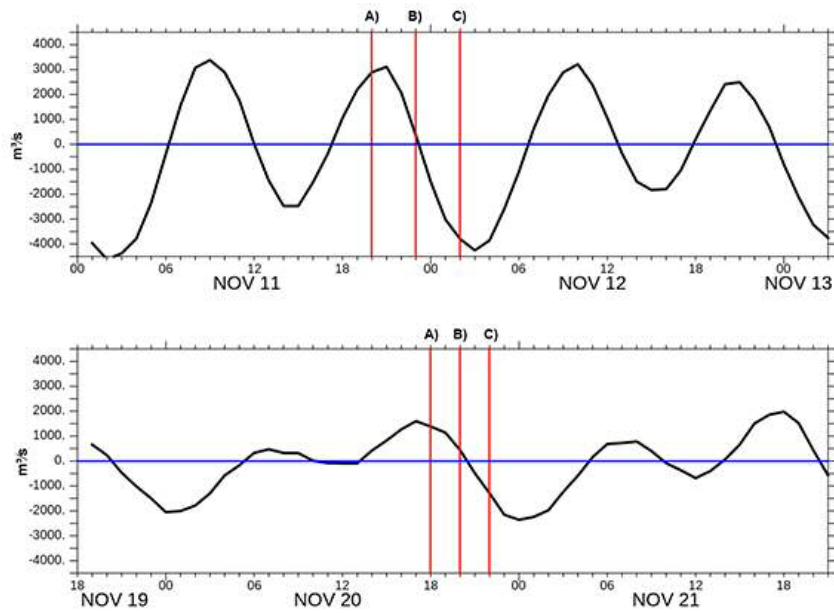


Figura 11. Transporte de masa en la boca de BSQ durante marea viva en la parte superior y marea muerta en la inferior. Las líneas rojas representan los tiempos de inundación, transición y reflujó.

En el canal profundo de Bsq, durante la marea viva se observaron flujos de entrada de ~ 0.5 m/s, ubicados por encima del canal profundo y al extremo izquierdo, siendo este último la zona más somera (Figura 12A). El transporte calculado en Bsq durante esta etapa de la marea es de hasta ~ 1500 m³/s de agua de BF que ingresan a Bsq (Figura 14). En la transición aún se observa corrientes de entrada en gran parte del canal, con velocidades de ~ 0.2 m/s (Figura 12B). Sin embargo, se observa una corriente inferior a ~ 0.1 m/s saliendo del lado derecho, causado por un giro anticiclónico (Figura 7). Para el reflujó, las corrientes de salida tienen una velocidad de hasta ~ 0.6 m/s, las cuales se transportan por el lado sur de la costa, provocado por la curvatura del brazo. El transporte calculado durante este tiempo es de ~ 2000 m³/s que sale de Bsq, una parte entrando a los canales de BF (Figura 12A).

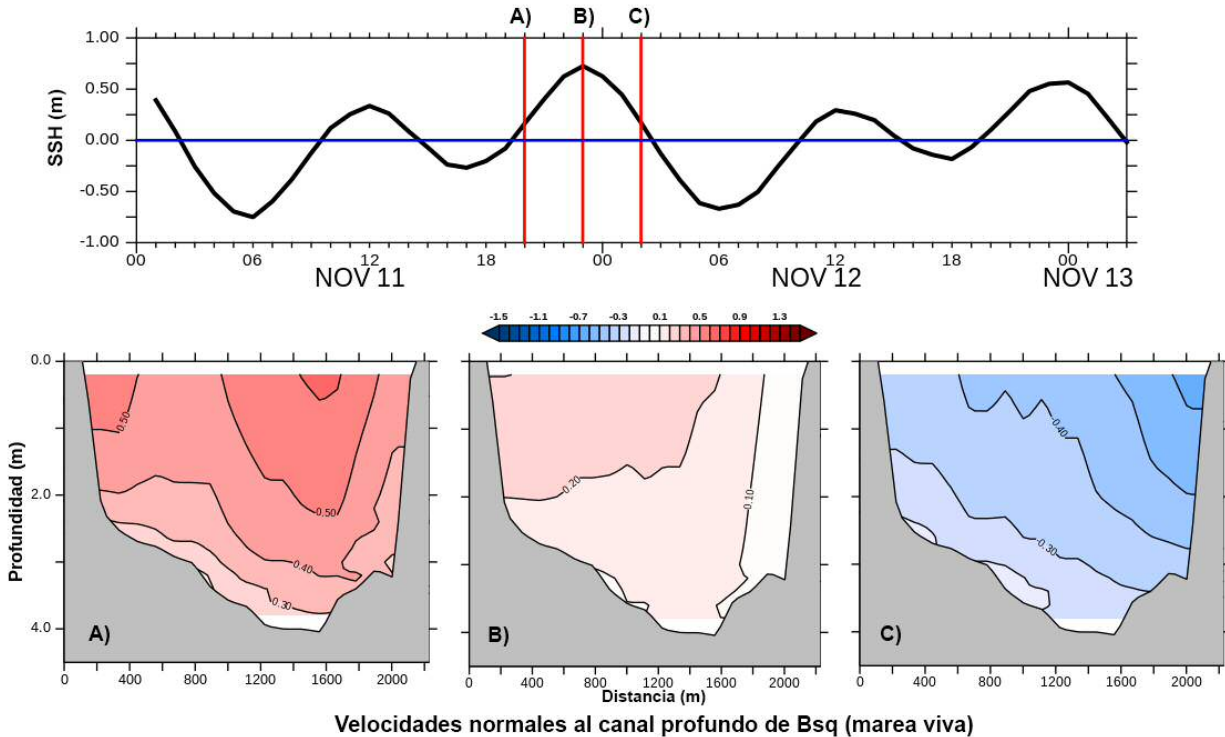


Figura 12. Corte vertical de velocidades en el canal profundo de Bsq durante marea viva en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujó. La distancia del canal medida de norte a sur.

Durante la marea muerta, las velocidades de entrada se dan por encima de los canales profundos, con velocidades máximas de ~ 0.5 m/s (Figura 13A) y un transporte positivo de ~ 800 m³/s que entra a Bsq (Figura 14). En la transición (Figura 13B), las corrientes salen de Bsq con velocidades de ~ 0.2 m/s del extremo norte hacia BF. En el reflujó (Figura 13C), las corrientes salen de Bsq con velocidades de ~ 0.5 m/s por el lado sur, mientras que en el lado norte del canal se observan velocidades de ~ 0.4 m/s. Ambos, sumando con un transporte negativo de ~ 800 m³/s que entra a BF (Figura 14).

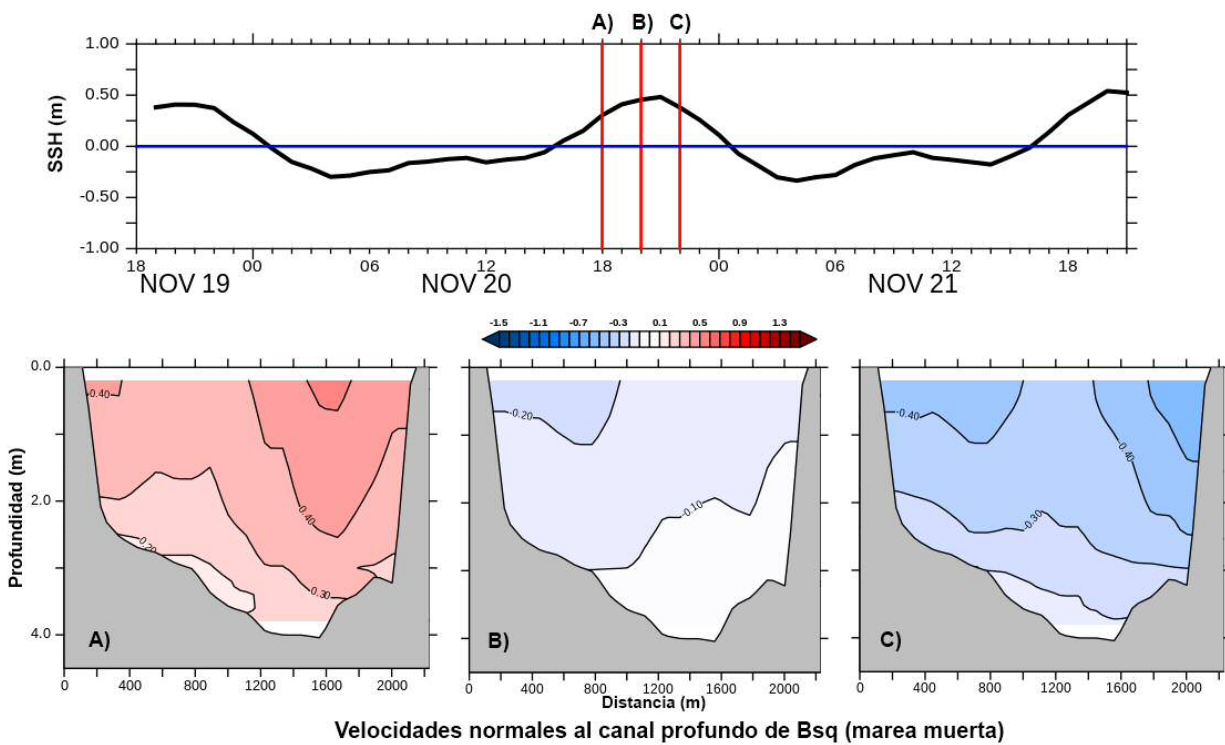


Figura 13. Corte vertical de velocidades en el canal profundo de Bsq durante marea muerta en 3 tiempos: A) inundación B) transición C) reflujó. La distancia del canal medida de norte a sur.

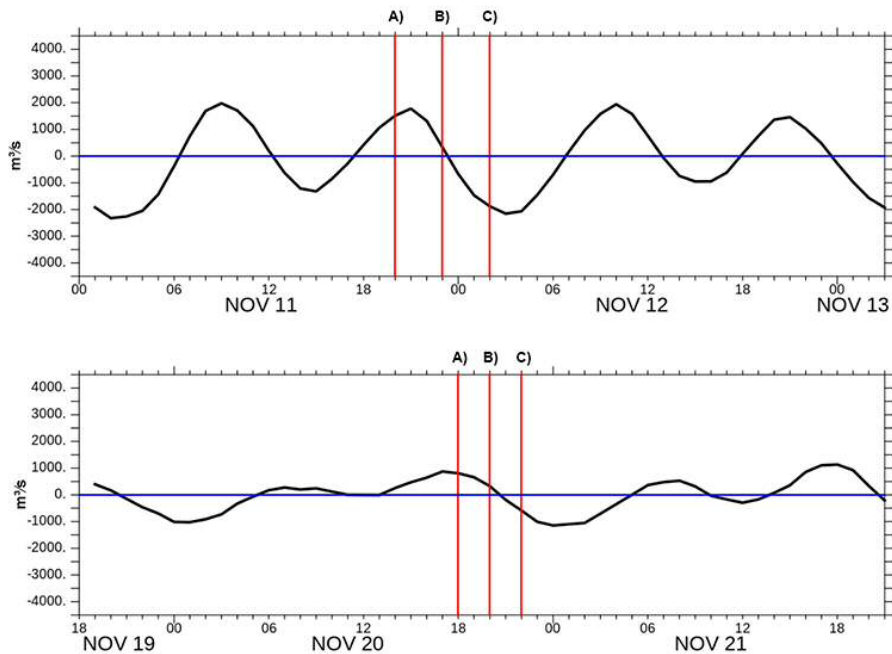


Figura 14. Transporte de masa en canal profundo de Bsq durante marea viva en la parte superior y marea muerta en la inferior. Las líneas rojas representan los tiempos de inundación, transición y reflujó.

5.3. Modelo Lagrangiano y tiempos de residencia.

Para los experimentos lagrangianos se diferenciaron de color azul las partículas con posiciones iniciales en BF y de color rojo las partículas que iniciaron en Bsq (Figura 15A). En los primeros pasos de tiempo en Bsq se observa cómo gran parte de las partículas comienzan a aglomerarse rápidamente en el eje central del brazo, mientras que otras circulan lentamente a los lados, en las explanadas arenosas. Por otro lado, en BF las partículas que se encontraban más cercanas a la boca se adentran al canal este de BF, y las que ya se encontraban dentro comienzan a salir por el canal oeste (Figura 15B). Después de 15 días, las partículas de Bsq ya se han aglomerado en el eje central del brazo, para dirigirse hacia la boca principal de BSQ, siguiendo el canal profundo; el resto de las partículas se quedan retenidas dentro de Bsq dentro de pequeñas bahías formadas

a lo largo de la línea de costa. En BF, las partículas empiezan a circular dando vueltas por ambos canales, acumulándose preferentemente en el canal noreste. Para este momento, pocas son las partículas de ambas bahías que han salido totalmente de la laguna (Figura 15C). Al transcurso de 50 días, la mayoría de las partículas de Bsq se encuentran ahora en BF cercanas a la boca, otra parte sigue viajando por el canal profundo en el eje central del brazo y otras se encuentran retenidas en las zonas más someras, especialmente al este de Bsq. En BF las partículas se encuentran retenidas en el centro del brazo, sacando partículas de la laguna e ingresando otras. Para este momento la mayoría de las partículas de Bsq han salido por la boca principal y otras han quedado en BF, cabe señalar que el flujo de partículas no se da en el otro sentido, es decir de BF a Bsq (Figura 15D).

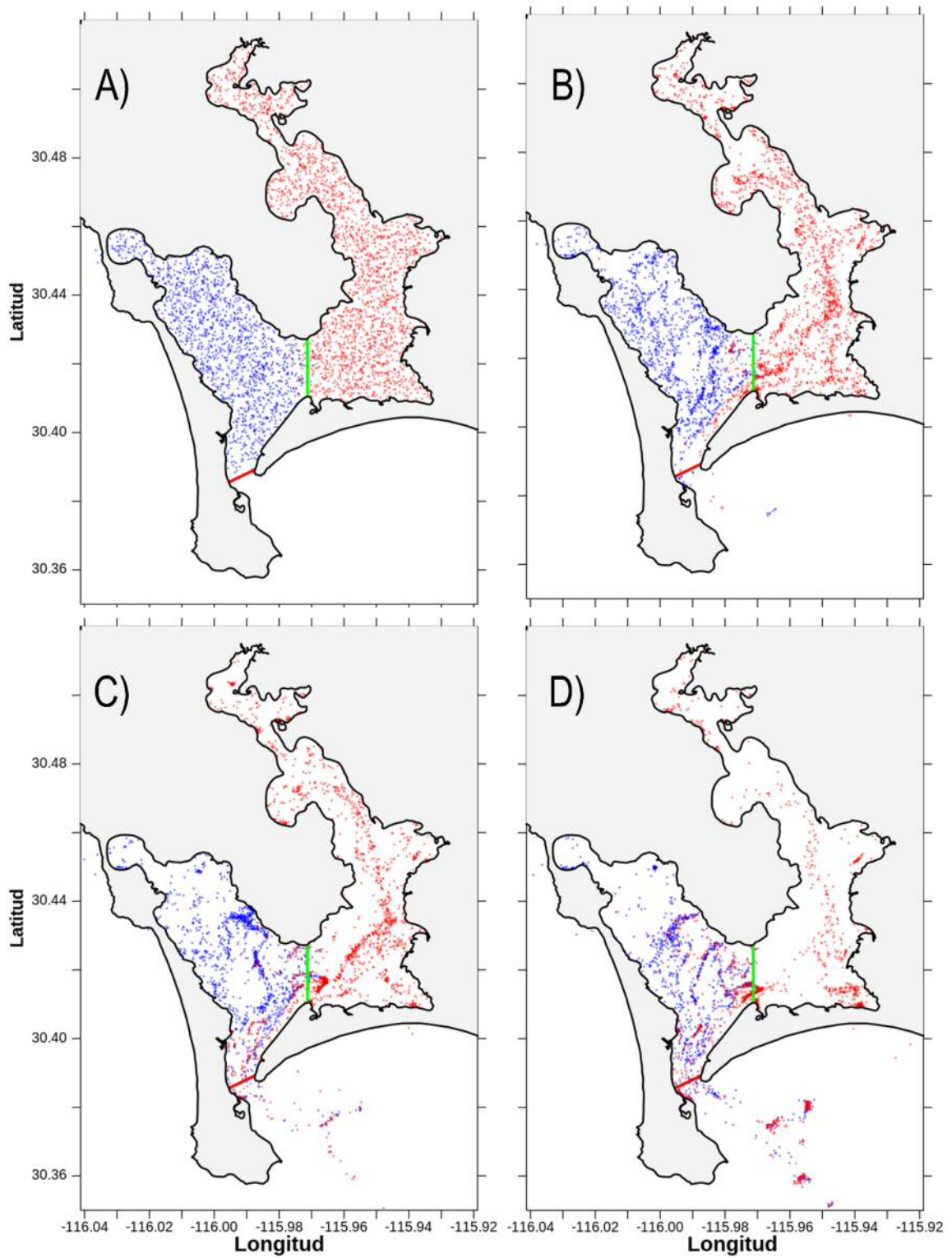


Figura 15. Modelo lagrangiano en diferentes tiempos: A) Posiciones iniciales. B) 120 horas. C) 360 horas. D) 1200 horas. La boca de BSQ está representada por una línea color rojo y el corte del canal profundo de Bsq con una línea verde.

Con las 24 corridas de las trayectorias de las partículas en ambas bahías, se calcularon las trayectorias preferenciales (*i.e.* trayectorias por las que más transitan las partículas sin importar donde inician) en cada una. Por ejemplo, en BF se observa que las trayectorias preferenciales tienden a ser circulares, entrando en el canal este y saliendo por el canal oeste sin entrar a Bsq. Además, del constante movimiento causado por las mareas, que eventualmente, transporta las partículas hacia fuera de la laguna (Figura 16A). En Bsq, el trayecto que toman las partículas es sobre el eje central del brazo, siguiendo los canales profundos hasta llegar a la boca. También se observa que las partículas que pasan a BF siguen las trayectorias circulares (Figura 16B). Con las partículas de ambos brazos diferenciadas por colores se logró observar la conectividad entre ellas; las partículas de BF en ningún momento de los 2 meses se adentraron a Bsq, sin embargo, ~26% de las partículas que salieron de Bsq, entraron a los canales de BF como eligiendola como una de las trayectoria preferenciales para eventualmente salir por la boca.

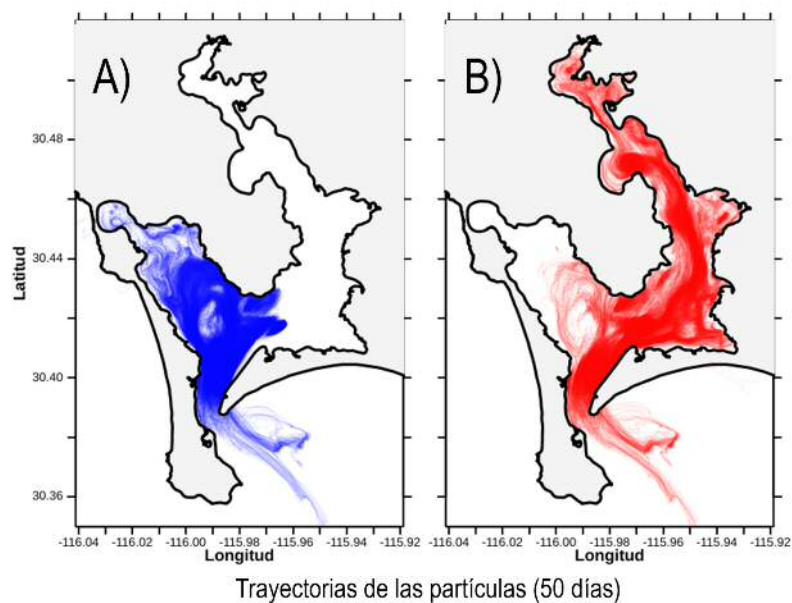


Figura 16. Trayectorias de las partículas a partir del modelo lagrangiano. De color azul se observa el trayecto de las partículas con posiciones iniciales en BF. De color rojo son las partículas con posiciones iniciales en Bsq. Los colores más intensos representan mayor frecuencia de los trayectos.

Una forma de cuantificar la conexión de esta laguna con el mar adyacente es calculando el tiempo de residencia de las partículas dentro de esta. Así, con base en el modelo Lagrangiano se calcularon los tiempos de residencia, es decir el tiempo en que las partículas tardaron en cruzar la boca de BSQ, calculados como se indica en la metodología (línea roja, figura 17). Se obtuvo que en BF el 35.686% de las partículas salieron durante los 50 días de simulación, 10.874% en los primeros 5 días, 4.876% en 15 días, 9.587% en un mes, 10.349% en dos meses y un 64.314% tardaron más de 2 meses en salir (partículas que se quedan retenidas en el giro central). Por otro lado, en Bsq el 30.985% de las partículas salieron durante los 50 días, 1.227% durante los primeros 5 días, 11.806% en 15 días, 8.398% en un mes, 9.555% en dos meses y 69.015% tardaron más de 2 meses en salir (sobre todo las que se encuentran en la cabeza). Cabe señalar que hay una zona de retención en la parte suroeste de Bsq, la cual parece atrapar por un tiempo indefinido las partículas que pasen por ahí, dicha zona se encuentra entre los canales profundos y podría representar una frontera para que las partículas logren escapar.

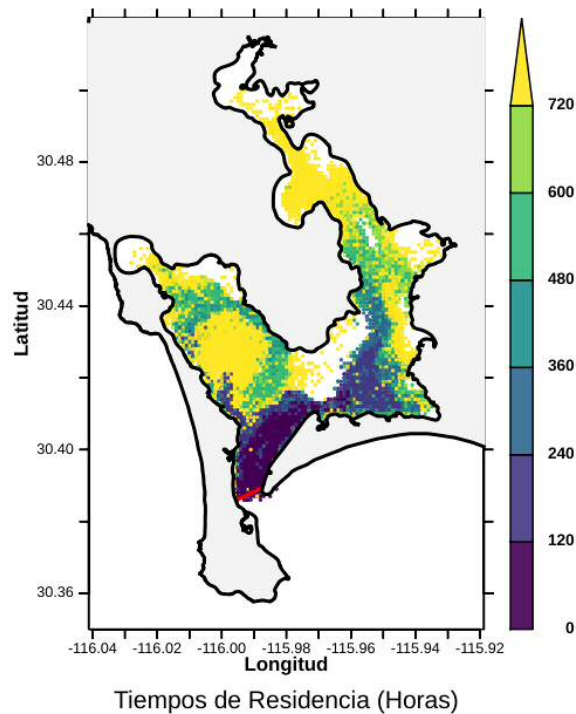


Figura 17. Tiempos de residencia en horas calculado a partir del modelo lagrangiano y el tiempo que tardan en cruzar la boca principal (línea roja). Zonas de color blanco representan partículas que tardan más de dos meses en salir.

6. Discusiones

6.1. Análisis de componentes de marea.

Una de las particularidades observadas en el análisis de marea utilizando las salidas del modelo fue la presencia de una frecuencia con mayor amplitud que la diurna y semidiurna, siendo esta de ~ 9.3 cpd (Figura 18). Esta frecuencia se encontraba solo dentro de BSQ, por lo que se sospechó que era producto de alguna característica particular de la laguna. Aunque la amplitud del espectro para la frecuencia de 9.3 cpd muestra una amplitud por encima de la frecuencia diurna y semidiurna, cuando se escala a su frecuencia correspondiente podemos observar que, energéticamente hablando dicha frecuencia no es comparable con la energía de las frecuencias semidiurna y diurna (Figura 19), sin embargo está presente y es relevante explicar su origen.

En el caso de los cuerpos de agua cerrados o semicerrados, cada uno tiene una frecuencia natural de oscilación, la cual es provocada por la presencia de dos ondas de gravedad de la misma longitud de onda que se propagan en direcciones opuestas, formando así una onda estacionaria (Palomino-Monzón et al., 2001). En el caso de BSQ, el avance de la marea se da por co-oscilación con el Pacífico y se da al unísono en toda la laguna costera, sin llegar a amplificarse más en una de las cabezas de ambos brazos; así que, por lo dicho por Marinone y Lavín (1997) en un estudio para el golfo de California, mencionan que este tipo de comportamiento se trata de una onda estacionaria que tiene un antinodo en el extremo cerrado y su nodo fuera del canal. Un comportamiento similar podemos observar en el desfase que existe entre el nivel del mar y las corrientes de marea, encontrando el máximo de la corrientes entre marea alta y baja, mientras que, los tiempos sin corrientes corresponde a la pleamar y bajamar (Figura 20).

Si observamos la geometría de BSQ, la podemos idealizar como una canal semicerrado, si bien es cierto que tiene dos brazos BF y Bsq, ambos son someros (~2 m) y de similar longitud (~10,000 m).

Lo que dice la teoría es que se puede calcular periodo del primer modo de oscilación para un canal utilizando la fórmula de Merian (1828)

$$T_0 = \frac{2L}{c} = \frac{2L}{\sqrt{g*h}}$$

Donde T_0 es periodo del primer modo en segundos, L la longitud del canal en metros, c la velocidad de fase de la onda de gravedad, g la gravedad terrestre (9.81 m/s^2) y h la profundidad del canal. Sin embargo, esta fórmula es para un canal cerrado. Y para un canal semicerrado la longitud del canal tiene que ser de un cuarto de longitud de onda, entonces

$$L = TC/4 = \lambda /4$$

Despejando el periodo obtenemos la fórmula de Merian para un canal abierto uninodal

$$T_0 = \frac{4L}{c} = \frac{4L}{\sqrt{g*h}}$$

Ahora, si sustituimos los datos de BSQ, suponiendo una longitud de 10 km y profundidad promedio de 2 m obtenemos:

$$T_0 = \frac{4(10000 \text{ m})}{\sqrt{(9.81 \text{ m/s}^2)*(2 \text{ m})}} = 9030.47 \text{ s} = \sim 2.5 \text{ hr}$$

donde el periodo 9030.47 segundos equivale a ~9.6 cpd, un valor muy cercano a los ~9.3 cpd que se observan dentro de BSQ.

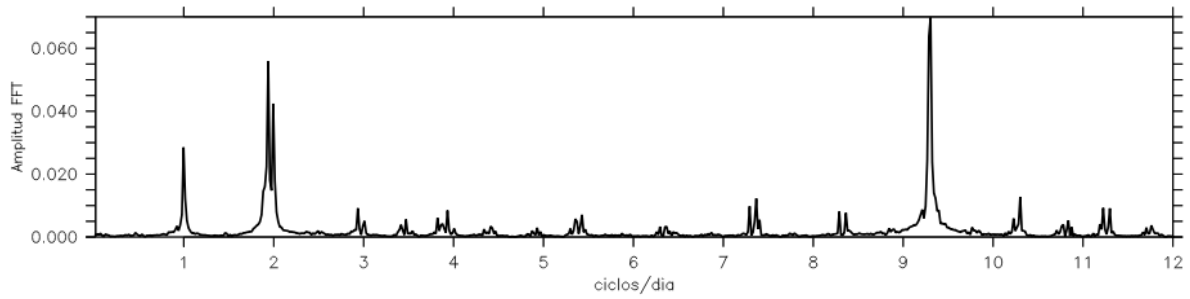


Figura 18. Espectro de una serie de tiempo de un punto dentro de BSQ de la componente zonal superficial de la velocidad proveniente del modelo numérico. Amplitud de la FFT (transformada rápida de Fourier)

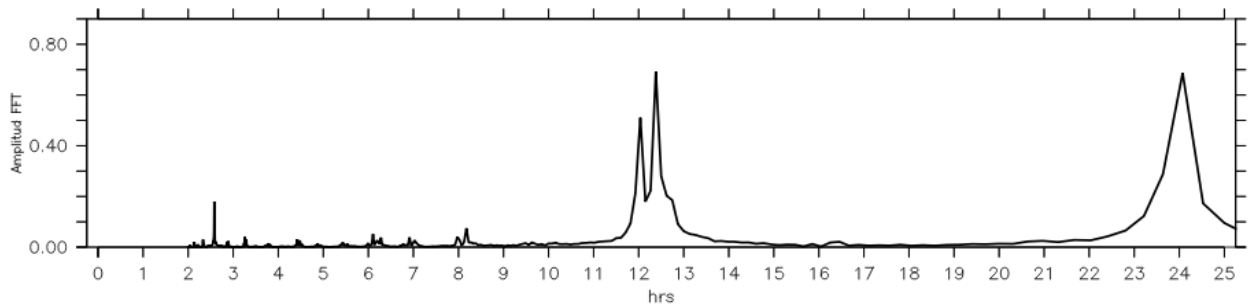


Figura 19. Espectro de una serie de tiempo de un punto dentro de BSQ de la componente zonal superficial de la velocidad proveniente del modelo numérico. Amplitud de la FFT (transformada rápida de Fourier) escalada con su frecuencia, proporcional a la energía.

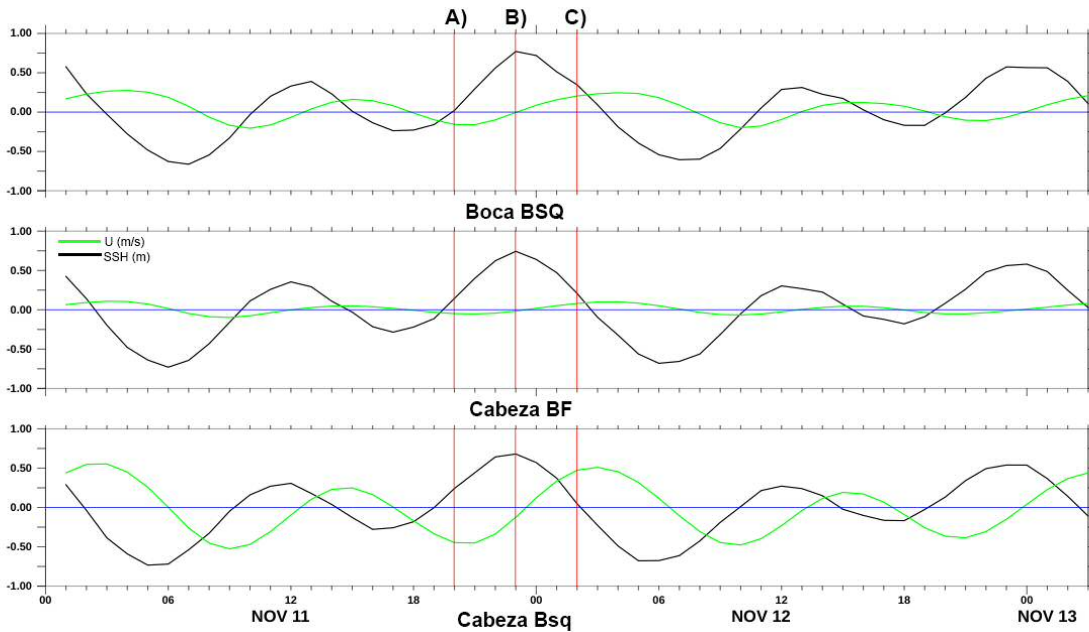


Figura 20. Comparación de la altura superficial del mar (línea negra) y la componente U de la velocidad (línea verde) en la boca de BSQ y en las cabezas de BF y Bsq.

6.2. Hidrodinámica en BSQ.

Con la herramienta de los modelos numéricos se ha logrado describir la circulación de muchas regiones del océano, una de ellas las zonas someras, donde realizar mediciones resulta ser una gran dificultad para la mayoría de equipos (Flores-Vidal, 2006), especialmente en BSQ donde una gran área está cubierta por explanadas arenosas. En el trabajo de Vidal-Juárez (2014) durante una simulación numérica durante marea viva, estimó velocidades promedio de ~ 0.4 m/s y ~ 0.2 m/s para las explanadas de Bsq y BF, respectivamente. Mientras que, en el canal profundo de Bsq obtuvo velocidades de hasta ~ 0.7 m/s y en la boca superiores a 1 m/s, siendo estas magnitudes muy parecidas a nuestros resultados obtenidos con la nuestra implementación del FVCOM a BSQ.

La influencia del viento es de gran importancia en las costas de Baja California por los eventos que surgencia que se producen en esta región, especialmente durante

primavera-verano, siendo uno de los principales mecanismos que aportan nutrientes hacia las lagunas costeras como lo es BSQ (Aveytua-Alcázar et al., 2020). Sin embargo, este también tiene efectos en la circulación local de la laguna, según lo descrito por Melaku-Canu y colaboradores (2016), quienes comparando dos simulaciones realizadas en condiciones de viento y sin viento, observando que las corrientes residuales incrementan considerablemente en BF cuando el viento está activo, lo que podría modificar las trayectorias de algunos trazadores, como se mencionará más adelante. Delgado-González y colaboradores (2012) a partir de una simulación numérica proponen como es el patrón de velocidad en BSQ durante un ciclo de marea, el cual describen empezando por el refluo como la divergencia de las corrientes de las zonas más someras viajan hacia los canales profundos, siendo el flujo de Bsq el más intenso. Finalmente las corrientes convergen en la boca y salen en forma de abanico. Durante la inundación, las corrientes entran por los canales de BF e inundan las explanadas arenosas, sucediendo lo mismo en las corrientes que subieron por BSQ pero más lentamente. En adición al patrón de circulación, Zertuche-Chanes (2016) describió que por la proximidad de BF a la boca este tiene una mayor influencia durante la inundación y el refluo, mientras que Bsq tiene un retraso en el cambio de dirección producido por la llegada de la onda de marea en la cabeza del mismo brazo, lo cual se llega a observar en los resultados durante los cortes verticales en marea viva.

Por parte de las mediciones, Angulo-Larios (2006) utilizando múltiples anclajes de perfiladores acústicos basado en el efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), los cuales estaban colocados en la boca de BSQ y los canales profundos de BF y Bsq. Sus mediciones en la boca registraron velocidades máximas de 1 m/s, siendo del 99% la variabilidad provocada por la corriente de marea. Mientras que en los canales se tienen

velocidades promedio en la vertical de 1.34 m/s y 1 m/s para BF y Bsq, respectivamente. En ellos, la variabilidad es del 76.5% para BF y 85% para Bsq, por lo que las corrientes totales están estrechamente relacionadas a la marea. Utilizando el mismo arreglos de ADCP's, Flores-Vidal (2006) propuso un esquema de circulación para BSQ en base a sus mediciones, esquematizando para dos casos: el primer caso es bajo vientos persistentes (verano), provocando que el agua que entra a BF ingresa por el canal oeste, se mezcla por el efecto del viento y salga del sistema por el canal este; el segundo caso es en ausencia de un viento persistente (invierno), aquí el agua entraría a BF por el lado oeste y re-circula por el resto de canales hasta abandonar el sistema por lado este de Bsq. Concluyendo el autor que el viento juega un papel muy importante en la circulación superficial, especialmente en BF, y que la marea domina especialmente en las velocidades cercanas al fondo. Aunque en esta tesis se realizó un escenario sin viento, el patrón de circulación y las magnitudes de velocidad obtenidas fueron muy cercanas a las descritas por los anteriores trabajos. Sin embargo, donde existe una mayor diferencia es en BF, que pudiera deberse por la ausencia del viento en nuestra simulación, por lo que será primordial agregar en un trabajo futuro para representar mejor la hidrodinámica de la laguna.

6.3. Lagrangianos y tiempos de residencia.

Inspirados en el patrón de agrupamiento que observa en las animaciones de las trayectorias lagrangianas (Figura 15), se analizó la circulación secundaria, para ello se realizaron cortes en el plano u,w (w escalada a la profundidad) en las zonas más importantes de la laguna como: la boca principal, la conexión entre BF-Bsq y dos secciones del canal profundo de Bsq, para explorar la posible causa del aglutinamiento en el eje central de Bsq.

Una de las características que resulta interesante mencionar, es el efecto de la morfología con las corrientes, la zonas más profundas suelen ser también donde se encuentran las corrientes de marea más intensas, esto debido a la menor fricción con el fondo en comparación con las someras (Wolanski y Elliott, 2016). Otro factor que afecta a la circulación durante la inundación y el reflujó es la curvatura de algunos lugares de la laguna, la cual hace que se intensifiquen las corrientes en la parte más externa de su giro (Figura 21 y 22).

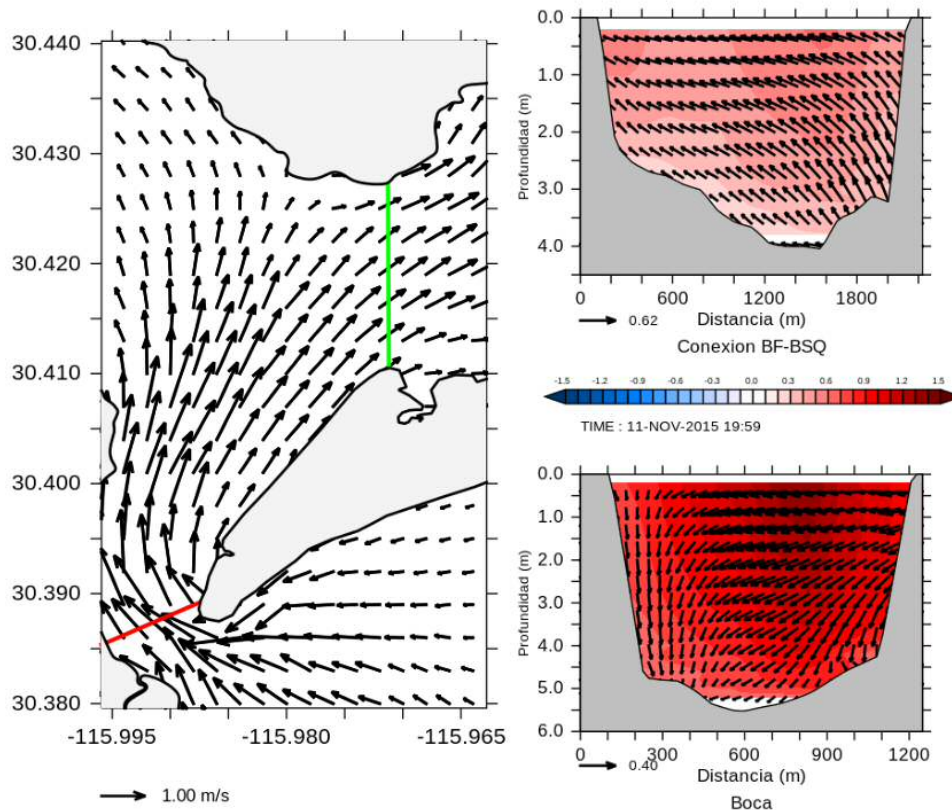


Figura 21. Panel izquierdo con las corrientes superficiales, línea roja representa la boca y verde la conexión entre BF y Bs_q. Panel derecho con los cortes transversales, los vectores representan la componentes de la velocidad en U y W multiplicado por un factor de 200 y 450 para la boca y la conexión, respectivamente.

Color rojo son velocidades normales en dirección a la cabeza de Bs_q en m/s.

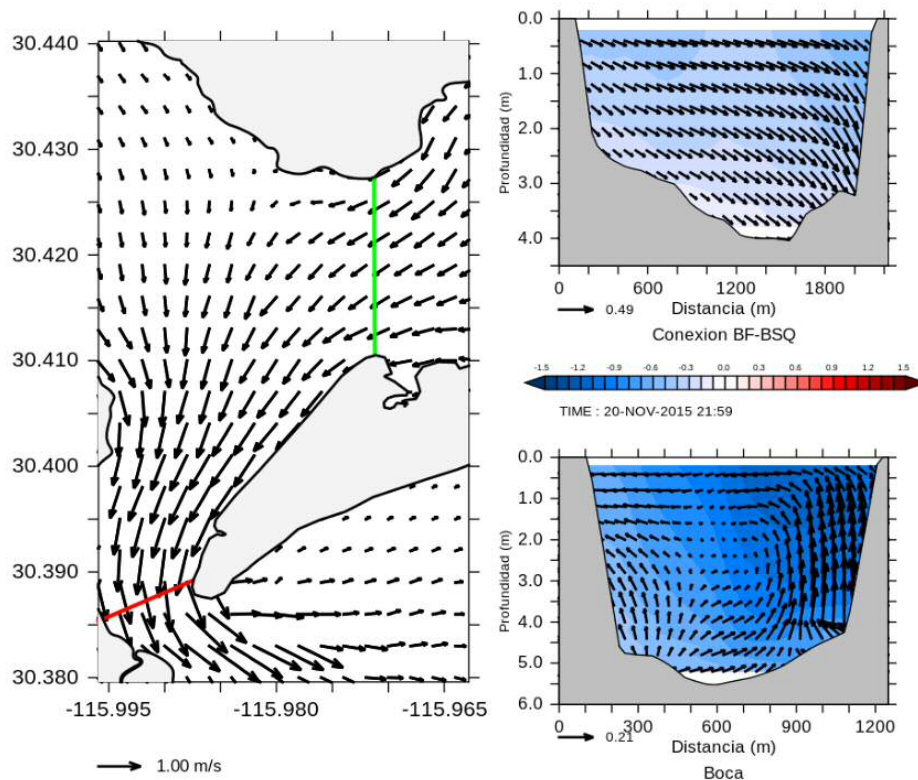


Figura 22. Panel izquierdo con las corrientes superficiales, línea roja representa la boca y verde la conexión entre BF y Bsq. Panel derecho con los cortes transversales, los vectores representan la componentes de la velocidad en U y W multiplicado por un factor de aspecto 200 y 450 para la boca y la conexión, respectivamente. Color azul son velocidades normales en dirección a la boca de BSQ en m/s.

Seguidamente, en el canal profundo de Bsq también se observan efectos de la profundidad y la curvatura en la manera en la que fluye. Sin embargo, en el caso durante la inundación, en la superficie las corrientes convergen y se hunden estando muy cerca del eje central del canal (Figura 23); mientras que en el refluo sucede de manera inversa, las corrientes divergen y suben (Figura 24). Esto ha sido descrito en otras lagunas y estuarios (*i.e.* Wolanski y Elliott, 2016 y Chen et al. 2020) como una doble circulación secundaria, la cual es causada por fuertes gradientes de densidad y que se transporta por las zonas más profundas (y más veloces). Sin embargo, eso no se explica en su totalidad en este trabajo ya que el modelo solo está forzado con mareas y no hay cambios de densidad que

promuevan esos gradientes, sin embargo, puede observarse que ya que el flujo debe conservar volumen, en cuanto el agua superficial es desplazada (hacia la cabeza o la boca), esta debe ser reemplazada en la columna vertical, lo que provoca la formación parcial de celdas de circulación secundarias y que se ven reflejadas en la superficie con la aglomeración de las partículas en el centro de Bsq, justo en la parte más profunda.

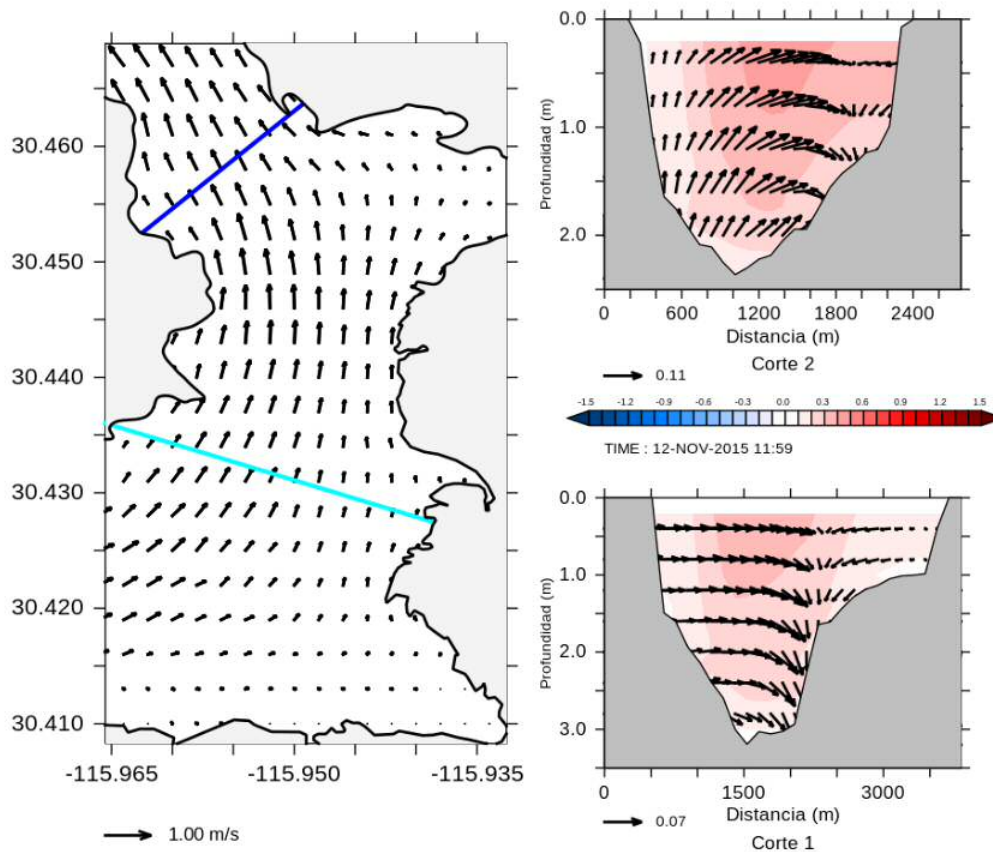


Figura 23. Panel izquierdo con las corrientes superficiales, línea azul claro representa el corte 1 y azul oscuro el corte 2. Panel derecho con los cortes transversales, los vectores representan la componentes de la velocidad en U y W multiplicado por su factor de aspecto de 1000 y 1200 para el corte 1 y 2, respectivamente. Color rojo son velocidades normales en dirección a la cabeza de Bsq en m/s.

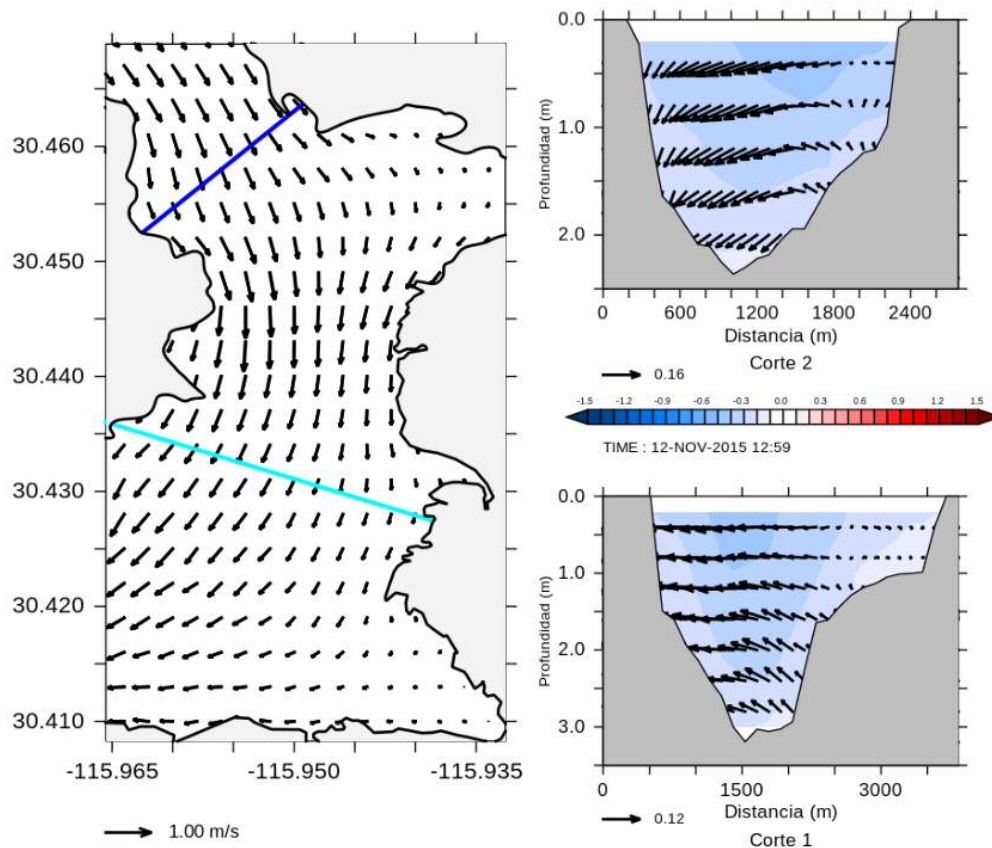


Figura 24. Panel izquierdo con las corrientes superficiales, línea azul claro representa el corte 1 y azul oscuro el corte 2. Panel derecho con los cortes transversales, los vectores representan la componentes de la velocidad en U y W multiplicado por un factor aspecto de 1000 y 1200 para el corte 1 y 2, respectivamente. Color azul son velocidades normales en dirección a la boca de BSQ en m/s.

Con respecto a los tiempos de residencia que se obtuvieron en este trabajo, en promedio fueron de ~19 días en BF y ~22 días en Bsq. Otros trabajos han calculado tiempos de residencia con diferentes modelos numéricos y metodologías; Jiménez-Hernández (2005) calculó tiempos de residencia que van de 3.4 a 4.5 días en BF y 5.5 a 8.5 días en Bsq; por otra parte, Delgado-Gonzales y colaboradores (2012) obtuvieron tiempos de residencia que van de 3 a 5 ciclos de marea. Sin embargo, las partículas solo fueron colocadas sobre los canales profundos y no en todo el dominio como en este trabajo, por lo que la mayoría de partículas colocadas en dichos trabajos salieron rápidamente de la laguna en comparación

con las que se encontraban en las zonas más someras; Melaku-Cano y colaboradores (2016) utilizando el modelo SHYFEM calcularon un tiempo de residencia promedio de 7 días; Zertuche-Chanes (2016) calculó los tiempos de residencia utilizando el modelo ELCOM, obteniendo en BF hasta ~14 días y en Bsq hasta ~16 días. Se puede observar que en la mayoría de dichos trabajos el tiempo de residencia encontrado está restringido al tiempo de las simulaciones, así como a que limitaron la zona de liberación de las partículas, en cambio en este trabajo se sembraron partículas en todo el dominio sin distinción, y se dejaron adveccionar por el flujo producido por las corrientes del modelo por casi dos meses.

7. Conclusiones

- En general, la utilización de modelos numéricos ha permitido el estudio y el entendimiento de diversos fenómenos oceánicos a diferentes escalas; con el pasar del tiempo estos se vuelven más sofisticados y el poder de cómputo actual evoluciona permitiendo resolver con mayor resolución la hidrodinámica de este tipo de lagunas costeras. El modelo FVCOM es uno de los modelos numéricos de uso libre que más potencial tiene para el estudio de cuerpos de agua semicerrados, someros y con una línea de costa y batimetría complicada. Aunque no es trivial el pre y el post-procesado de las salidas del modelo, se compensa con el nivel de resolución espacial y temporal que se obtiene.
- La respuesta de BSQ al forzamiento de la marea es fundamental en el entendimiento de la hidrodinámica de la zona, ya que co-oscila con la marea del Pacífico a través de su boca. Si bien es cierto que las componentes de marea que dominan son de carácter semidiurno y diurno, se encontró otra frecuencia relevante,

que aunque su aporte de energía no es comparable a las frecuencias anteriormente mencionadas, corresponde al primer modo de la frecuencia natural de oscilación de una laguna semiabierta con largo ~ 10 km y profundidad promedio de 2 m, y que corresponde a ~ 9.3 cpd (periodo de ~ 2.3 hrs) y aunque no amplifica el rango de marea se puede decir que resuena dentro de la laguna.

- Se observaron corrientes superficiales máximas en el canal central con valores de ~ 1.5 m/s en la boca y ~ 0.5 m/s en el canal de Bsq. Mientras que, las velocidades en las explanadas arenosas disminuyeron considerablemente a ~ 0.2 m/s. Lo anterior concuerda con lo reportado en la literatura en trabajos con observaciones.
- En los cortes de la boca principal se encontraron patrones similares durante marea viva y marea muerta, la diferencia radica en la intensidad del flujo, siendo mayor durante marea viva; con una característica primordial, que el flujo se encuentra cargado al extremo derecho de la boca, encontrando máximos/mínimos valores de la corriente que entra/sale de la laguna según el momento de flujo/reflujo. Tal comportamiento obedece a que se crea un corte vertical en la circulación secundaria lo que produce un cambio en la vorticidad generando remolinos dentro o fuera de la boca (Valle-Levinson 2010).
- Aunque la BSQ es una laguna somera (~ 2 m), posee un canal más profundo que la atraviesa, dichas características morfológicas y el forzamiento por marea inducen una circulación secundaria que se corresponde con rasgos importantes en la circulación superficial, por ejemplo, las partículas tienden a aglomerarse en las partes más profundas.
- Los tiempos de residencia promedio calculados fueron de ~ 19 días y ~ 22 días en BF y Bsq, respectivamente. Aunque este puede variar espacialmente según la zona,

nos dan información de la geografía dinámica de la laguna, ya que cuantifica la capacidad de retención del agua dentro de esta, lo cual puede traducirse en la capacidad de exportar/importar partículas (nutrientes) y el efecto que tienen de fertilizar o enriquecer las aguas circundantes.

- En BSQ se diferenciaron las trayectorias preferenciales según el brazo que se analice: en la parte central de BF existe un movimiento de vaivén de las partículas causada por las mareas, causando que salgan y reingresen a la laguna, mientras que, en la parte alta las partículas describen un movimiento circular ciclónico por los canales causando que las partículas queden retenidas. Por otra parte, en Bsq las trayectorias preferenciales se encuentran en el eje central del brazo en dirección a la boca, destacando que la gran mayoría de las partículas quedan en BF, ninguna se adentra a Bsq, mientras que un ~26% de las partículas de Bsq entraron por el canal este de BF y eventualmente salieron por la boca.

8. Recomendaciones

Los resultados en esta implementación, a pesar de solo ser forzados con mareas, son bastante congruentes con los resultados obtenidos en trabajos anteriores. Nuestros resultados nos ayudaron a comprender gran parte de la dinámica interna de la laguna. Como recomendaciones finales, sería deseable incluir más forzantes como el viento, y analizar otros escenarios de la hidrodinámica de la zona. Además, sería muy interesante realizar un estudio con periodos de tiempo más largos, y así resolver los efectos estacionales provenientes del Océano Pacífico dentro de Bahía San Quintín, por ejemplo las surgencias.

9. Referencias bibliográficas

- Angulo-Larios, N. (2006). Hidrodinámica de la Bahía de San Quintín. BC Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Marinas (FCM), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, MX, USA.
- Aveytua-Alcázar, L., Canu, D. M., Camacho-Ibar, V. F., y Solidoro, C. (2020). Changes in upwelling regimes in a Mediterranean-type lagoon: A model application. *Ecological Modelling*, 418, 108908.
- Chen, C., Liu, H., y Beardsley, R. C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 20(1), 159-186.
- Chen, Y., He, Q., Shen, J., y Du, J. (2020). The alteration of lateral circulation under the influence of human activities in a multiple channel system, Changjiang Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 242, 106823.
- Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D., y Smith, S. V. (2003). Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintin Bay, México. *Estuaries*, 26(5), 1220–1237. doi:10.1007/bf02803626
- Delgado-González, O. E., Jiménez, J. A., Fermán-Almada, J. L., Marván-Gargollo, F., Mejía-Trejo, A., y García-Esquivel, Z. (2010). La profundidad e hidrodinámica como herramientas para la selección de espacios acuícolas en la zona costera. *Ciencias marinas*, 36(3), 249-265.
- Delgado-González, O., Marván-Gargollo, F., Mejía-Trejo, A., y Gil-Silva, E. (2012). San Quintin Lagoon hydrodynamics case study. *Water Resources Management and Modeling* (pp. 127-144). IntechOpen.
- Fischer, H.B. List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979) Mixing in inland and coastal waters. *Academic Press*, Boston, 483 pp.
- Flores-Vidal, X. (2006). Circulación residual en Bahía San Quintín, BC, México [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1190/1/174111.pdf>
- Fringer, O. B., Dawson, C. N., He, R., Ralston, D. K., y Zhang, Y. J. (2019). The future of coastal and estuarine modeling: Findings from a workshop. *Ocean Modelling*, 143, 101458.
- García, M., Ramírez, I., Verlaan, M., y Castillo, J. (2014). Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintín Bay, BC, México. Validation and calibration using OpenDA. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 273, 428-437.

- Jiménez-Hernández, S. B. (2005). Análisis de procesos físico-biológicos acoplados en la Bahía de San Quintín, BC, México [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Baja California]. Catálogo Cimarrón. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=133259>
- Largier, J. L. (2020). Upwelling bays: how coastal upwelling controls circulation, habitat, and productivity in bays. *Annual Review of Marine Science*, 12, 415-447.
- Marinone, S. G., y Lavín, M. F. (1997). Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California. Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía, 3, 113-139.
- Melaku-Canu, D., Aveytua-Alcázar, L., Camacho-Ibar, V. F., Querin, S., y Solidoro, C. (2016). Hydrodynamic properties of San Quintin Bay, Baja California: merging models and observations. *Marine Pollution Bulletin*, 108(1-2), 203-214.
- Morales, M., Aquije, J., Carvalho, L., y Mejía, A. (2020). Hydrodynamic Modelling of a Coastal Lagoon in México. *Revista de Investigación de Física*, 23, 3.
- Ocampo-Torres, F. J. (1980). Análisis de marea y predicción de velocidad mediante un modelo unidimensional en Bahía San Quintín, BC [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California]. Catálogo Cimarrón. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=44107>
- Palomino Monzón, M., Almazán Gárate, J. L., y Arrayás González, J. L. (2001). Oscilaciones en masas de agua confinadas: resonancia en puertos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Robinson, I. S. (1981). Tidal vorticity and residual circulation. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 28(3), 195–212. doi:10.1016/0198-0149(81)90062-5
- Sedgewick, R. (1996). Algoritmos En C++. Addison Wesley Longman.
- Smith, N. R. (1993). Ocean modeling in a global ocean observing system. *Reviews of Geophysics*, 31(3), 281. doi:10.1029/93rg00134
- Valle-Levinson, A., (2010). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press.
- Valle-Levinson, A., Gutierrez de Velasco, G., Trasviña, A., Souza, A. J., Durazo, R., & Mehta, A. J. (2009). Residual Exchange flows in subtropical estuaries. *Estuaries and Coasts* 32, 54–67.

- Vidal-Juárez, T. (2014). Influencia de remolinos y procesos de mezcla en el intercambio de agua entre una laguna y el mar abierto, Bahía San Quintín, Baja California, México [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California]. Catálogo Cimarrón. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=188681>
- Vidal-Juárez, T., de Alegría-Arzaburu, A. R., Mejía-Trejo, A., García-Nava, H., y Enríquez, C. (2014). Predicting barrier beach breaching due to extreme water levels at San Quintín, Baja California, Mexico. *Journal of coastal research*, (71 (10071)), 100-106.
- Wells M.G. y van Heijst G.J.F. (2004). Dipole formation by tidal flow in a channel. *Proceedings of the International Symposium on Shallow Flows*, 16-18 June 2003, Delft, The Netherlands. Pp. 63-70
- Wolanski, E., y Elliott, M. (2016). Estuarine water circulation. *Estuarine Ecohydrology*, 35–76.
- Zertuche-Chanes, R. (2016). Simulación numérica 3D de la hidrodinámica de Bahía San Quintín y su influencia de la distribución de nitrato [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California]. Catálogo Cimarrón. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=215347>