

Hidrografía y corrientes en la entrada de la Laguna de Alvarado, México

Hydrography and flow at the entrance of Alvarado Coastal Lagoon, Mexico

Diana Carolina Uscanga-Montalvo ^a | Rosario Sanay-González ^b |
Héctor Perales-Valdivia ^c |

Recibido: 26 de enero de 2022.

Aceptado: 9 de marzo de 2022.

^a Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, México. Contacto: bio.dianacum@gmail.com

^b Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Boca del Río, México. Contacto: rsanay@uv.mx | ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2830-4500> *Autora para correspondencia.

^c Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Boca del Río, México. Contacto: hperales@uv.mx | ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0794-789X>

Resumen: El propósito de este trabajo es exhibir las características de la señal transitoria, y residual, de la estratificación y el flujo observadas en la boca de la Laguna de Alvarado, la cual tiene libre conexión con el mar y está expuesta a condiciones de micro-marea y descarga fluvial/lluvias bimodal. Se analizaron series temporales de temperatura, salinidad y flujo colectadas en dos campañas de 24 h cada una, bajo diferente descarga fluvial. De acuerdo al valor del parámetro de estratificación ($Sp > 1$) y al número de Richardson estuarino ($RiE > 4$), la entrada a la laguna se comporta como un estuario de cuña salada y es gobernada por la descarga fluvial principalmente. El flujo residual es dominado por la circulación gravitacional en época de estiaje, y por la descarga fluvial en época de lluvias. Para ambas condiciones de descarga fluvial, los perfiles de salinidad submareal muestran fuerte estratificación ($Sp > 1$).

Palabras clave: Cuña de sal; descarga fluvial; micromareal; laguna costera.

Abstract: *The purpose of this paper is to exhibit the transient and residual signal of stratification and observed flow at the entrance of Alvarado Lagoon. This Lagoon has a free connection to the sea and it is exposed to microtidal conditions and fluvial/rain bimodal discharge. Temperature, salinity and flow data, collected in two 24 hr campaigns, under different fluvial discharge, were analyzed. According to the stratification parameter value ($Sp > 1$) and estuarine Richardson number value ($RiE > 4$), the entrance of Alvarado Lagoon behaves as a saltwedge estuary and is mainly governed by fluvial discharge. The residual flow is dominated by the gravitational circulation in the dry season, and by the fluvial discharge in the rainy season. For both fluvial discharge conditions, the subtidal salinity profiles show strong stratification ($Sp > 1$).*

Keywords: Saltwedge; river flow; microtidal; coastal lagoon.

Introducción

Los estuarios y lagunas costeras son zonas de transición entre ambientes terrestres y marinos, que se caracterizan por ser cuerpos de agua semi-cerrados, con libre conexión con el mar y dentro de los cuales el agua de mar y el agua dulce se mezclan (Cameron & Pritchard, 1963, Valle-Levinson, 2010). Su dinámica esta influenciada por forzamientos externos como la mareas, descarga de ríos, oleaje, corrientes, viento; así como por factores geomorfológicos como la batimetría y morfología (Sierra et al, 2002). Su libre conexión con el mar, permanente o intermitente, permite que estos cuerpos costeros sean la principal vía de intercambio de materiales disueltos, o particulados, entre el continente y el océano (Schettini et al, 2016). Por otro lado, el resultado de la mezcla que se lleva a cabo en los estuarios y lagunas costeras depende de la importancia relativa entre los agentes de forzamiento que promueven la estratificación (como descarga fluvial) y los agentes que promueven la mezcla (como la marea, el oleaje y el viento). La columna de agua puede resultar verticalmente mezclada, parcialmente estratificada, fuertemente estratificada o de cuña de sal (Geyer & Ralston, 2011).

Los cuerpos costeros semi-cerrados de cuña salina son característicos, más no exclusivos, de ambientes micromareales (amplitud de la marea < 2 m), donde el flujo de agua dulce es significativamente más fuerte que la mezcla inducida por la marea (Geyer & Ralston, 2011; Ibañez et al, 1997). En estos ambientes, la descarga fluvial es el principal forzamiento que gobierna la

longitud de la intrusión de la cuña de sal, de tal manera que, mientras no se rebase el gasto crítico, la cuña de sal estará presente en el estuario, en caso contrario, la cuña será expulsada, dando lugar a un sistema dulceacuícola (Krvavica et al, 2017). Entre los ejemplo de ambientes micromareales que se caracterizan por la formación de cuña salina figuran: los estuarios de desembocadura de río ubicados en el Mediterráneo, como los ríos Strymon (Haralambidou et al, 2010), Ebro y Rhon (Ibanez et al, 1997) y los sistemas costeros ubicados al oeste-suroeste del Golfo de México, como los estuarios de desembocadura de los río Pánuco (Espinosa, 2008; Pérez & Ulloa, 2017) y Jamapa (Perales-Valdivia et al., 2018), así como en el sistema estuarino-lagunar de Alvarado (Olvera Prado, 2014).

El sistema estuarino-lagunar de Alvarado (SLA) es un sistema costero compuesto por decenas de cuerpos de agua interconectados (Figura 1), entre los que figuran las lagunas costeras de Alvarado, Buen País y Camaronera, más de 100 lagunas interiores y varios ríos, como el río Papaloapan, río Acula, río Blanco y río Limón (Portilla-Ochoa et al., 2003). El SLA fue señalado como humedal prioritario para su conservación, por lo que fue declarado sitio RAMSAR en 2004 (Portilla-Ochoa et al., 2003). La cuña de sal en este sistema costero (SLA) ha sido detectada a lo largo del canal que conecta a la laguna de Alvarado con la plataforma continental, así como en el río Papaloapan (Olvera-Prado, 2014). Pese a la importancia ecológica y económica que posee este sitio RAMSAR, existen pocos trabajos dedicados a elucidar la hidrodinámica e hidrografía del cuerpo costero.

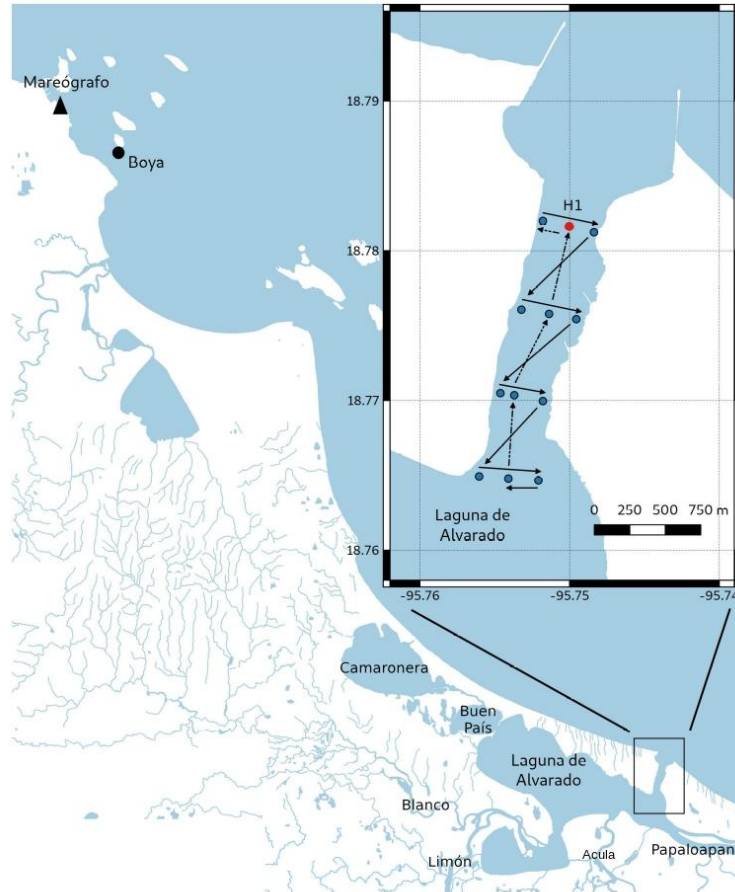
El propósito de este trabajo es exhibir las características de la señal transitoria, y residual, de la estratificación y del flujo observadas en la columna de agua en la boca de la Laguna de Alvarado (L-Alv). Estas dos variables son de gran interés en la ecología de los sistemas costeros (Gonenc & Wolflin, 2004), ya que: a) la estratificación controla-inhíbe la mezcla de la columna de agua, factor que limitará a su vez la distribución vertical de nutrientes, contaminantes, oxígeno disuelto, entre otros (Dyer, 1991; Geyer & Ralston, 2011); y b) el patrón de circulación en la bocana determina cómo y cuándo el sistema intercambia (exporta o importa) materia disuelta y suspendida con la plataforma continental adyacente (Gonenc & Wolflin, 2004). Este estudio se basa en el análisis de perfiles verticales de temperatura, salinidad y velocidad de la corriente, obtenidos durante dos campañas de muestreo de 24 horas cada una, una en época de lluvias (condiciones de alta descarga fluvial, 1000 m³s⁻¹) y otra en época de estiaje (condiciones de baja descarga fluvial, 400 m³s⁻¹), las cuales tomaron lugar durante 8-9 de septiembre-2008 y 18-19 de febrero-2014, respectivamente.

1. Área de estudio

La Laguna de Alvarado es un cuerpo de agua somero de forma alargada, que corre paralelo a la línea de costa, y se ubica al suroeste del Golfo de México, (18 o 48" N, 95o 50" O) (Figura 1). En la parte este de la L-Alv desemboca el río Papaloapan, el cual es el segundo río mas caudaloso que descarga en el litoral de Golfo de México, promediando alrededor de 17,000 millones de metros cúbicos en un año (Riverón-Enzástiga, 2008). Adicionalmente, esta laguna se comunica con el mar adyacente a través de un canal que promedia 400 m de ancho, 10 m de profundidad y tiene una longitud de 3 km aproximadamente (Figura 1). La profundidad de la L-Alv oscila entre 1 y 3 m (Ruiz-Fernández et al., 2014), excepto en el canal de entrada a la laguna y en su parte este, donde desemboca el río Papaloapan, donde la profundidad suele ser mayor a 10 m. Cabe señalar, que la L-Alv funge como

puerto y alberga una flota camaronera, por lo que el canal de entrada a la laguna es dragado con regularidad, esto para conservar el canal de navegación y las zonas de maniobras y atracado de los barcos. En el canal de navegación y la zona de atracado de las embarcaciones, la profundidad llega a ser mayor a 15 m.

Figura 1
 Área de estudio. Laguna de Alvarado, Veracruz



Nota: Se indica la posición del mareógrafo y la boya de VERV4. El punto rojo indica la posición de la estación hidrográfica donde se realizaron los lances de CTD que se reportan en este manuscrito.
 Fuente: Elaboración propia.

El río Papaloapan muestra una variación estacional, con temporada de alta descarga fluvial de junio a fines de octubre, y temporada de baja descarga fluvial de noviembre a fines de mayo (Riverón-Enzástiga, 2008). Tiene un caudal medio anual de $650 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que los promedios de las descargas fluviales para las temporadas de alta y baja descarga fluvial promedian $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente (Tenorio-Fernández et al., 2019).

En la parte suroeste del Golfo de México las mareas son mixtas, predominantemente diurnas, donde los principales componentes de marea son K1, O1 y M2 (Kantha, 2005). Las mareas exhiben una variabilidad quincenal, donde el nivel del agua oscila entre 0.3 m y 0.8 m (Tenorio-Fernández et al., 2019), por lo que las mareas son micromareales. De acuerdo a Tenorio-Fernández et al. (2019), la

amplitud de la señal de marea dentro en la laguna se atenúa desde la boca hacia la cabeza, donde aparentemente la descarga del río juega un papel importante en ese fenómeno.

En cuanto al viento, estudios previos (Ruiz-Barradas et al., 2010) han evidenciado una variación estacional tanto en su magnitud como en su dirección. Durante los meses de otoño-invierno, el viento registra una magnitud mayor en comparación con el resto del año, y la mayoría del tiempo sopla del norte-noroeste. Durante este periodo es frecuente la ocurrencia de eventos intensos (> 10 ms⁻¹) cuya dirección del viento es del noreste y noroeste, con duración de 3-5 días, asociados al arribo de frente fríos. En contraste, durante los meses de primavera-verano, el viento es débil (< 3 ms⁻¹) y no presenta una dirección predominante (Ruiz-Barradas et al., 2010).

2. Métodos

2.1. Datos Auxiliares

2.1.1. Descargas Fluviales

Datos de promedios diarios de la descarga fluvial (Q) del río Papaloapan, para los años 2000 a 2008 y 2014 fueron obtenidos de la base de datos BANDAS de la Comisión Nacional del Agua (CNA), para la estación hidrométrica CNA-Chalcaltianguis. De la serie de tiempo de Q para el periodo 2000-2008, se evaluó el promedio y la climatología mensual. El valor promedio de Q fue de 650 m³ s⁻¹. De acuerdo a la climatología mensual, el mes de máxima descarga fluvial es junio con 980 m³ s⁻¹, mientras el mes de mínima descarga fluvial es diciembre con 400 m³ s⁻¹.

El gasto promediado a lo largo del año 2008 y del 2014 fue de 600 m³ s⁻¹ y 734 m³ s⁻¹, respectivamente. La descarga de agua dulce reportada durante los días de muestreo, 8-9 de septiembre 2008 (época de alta descarga fluvial) y 18-19 febrero 2014 (época de baja descarga fluvial), fueron 1000 m³ s⁻¹ y 390 m³ s⁻¹ respectivamente. Nótese que el gasto promedio de los años de muestreo 2008 y 2014 fue diferente, mostrándose el 2008 un año relativamente más seco. Sin embargo, las descargas de río durante las campañas de medición muestran valores similares a los valores normales históricos, donde el valor promedio de las descargas fluviales para las temporadas de alta y baja son 1000 m³ s⁻¹ y 400 m³ s⁻¹, respectivamente.

2.1.2. Esfuerzo del viento

Datos de velocidad del viento para septiembre 2008 fueron tomados de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de la ciudad de Veracruz, localizada en 19° 08' 45" N, 96° 11' 14" O. En tanto los datos de viento correspondientes a febrero 2014 fueron tomados de la boya VERV4 (19° 12' 16" N 96° 6' 47" O), localizada en el Puerto de Veracruz y administrada por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Ambas estaciones meteorológicas se localizan aproximadamente a 60 km al noroeste del área de estudio. Las campañas de muestreo tomaron lugar bajo condiciones de calma. El promedio de la magnitud del viento durante el muestreo de septiembre 2008, y durante los cuatro días previos a este fueron: 1.5 ms⁻¹ y 6.4 ms⁻¹ respectivamente. Para la campaña de febrero de 2014, el promedio de la magnitud del viento

durante el muestreo y durante los cuatro días previos a este, fueron 1.7 m s⁻¹ y 1.9 m s⁻¹, respectivamente.

2.1.3. Elevación del nivel del mar

Datos horarios de la elevación de la superficie libre del mar, estación “Puerto de Veracruz” correspondiente al mes de septiembre de 2008 y febrero 2014 fueron tomados de la base de datos del Servicio Mareográfico Nacional (<http://www.mareografico.unam.mx/portal/>). La serie de tiempo muestra que la campaña de 2008 tomó lugar en mareas vivas, con un rango de marea de 0.50 m, mientras que la campaña de 2014 tomó lugar al inicio de la fase de marea viva, y el rango de marea de ese día fue de 0.3 m aproximadamente.

2.2 Estrategias de muestreo

Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo en el canal de comunicación de la Laguna de Alvarado, en una embarcación con motor fuera de borda. En cada campaña se recolectaron perfiles hidrográficos y de corrientes. Para la medición de las corrientes se utilizó un correntímetro de efecto Doppler acústico (ADCP, por sus siglas en inglés, marca y modelo Teledyne RDI-Sentinel 1200kz) montado en un catamarán, el cual fue remolcado de manera continua a lo largo de un circuito predeterminado (indicado con flechas negras en Figura 1). Se promediaron los perfiles de velocidad de tal manera que la resolución espacial fuese entre 30 m y 40 m. Para la campaña de septiembre 2008 se realizaron 12 repeticiones del circuito a lo largo del ciclo de marea, mientras que para la campaña de febrero 2014 se realizaron 14 repeticiones. De tal manera que en cada punto de la malla se obtuvo una serie de tiempo de 12 -14 elementos, haciendo posible exhibir la variación intramareal en cada punto.

Para la colecta de datos hidrográficos se utilizó un perfilador de temperatura y salinidad (CTD, por sus siglas en inglés) marca y modelo SeaBird19 Plus V2. Las estaciones hidrográficas predeterminadas (marcadas con puntos azules en Figura 1), fueron visitadas por lo menos doce veces a lo largo del ciclo de marea, en cada campaña. En cada una de ellas se realizaron los lances de CTD con la embarcación en reposo. Los datos hidrográficos fueron procesados usando los programas provistos por el fabricante (SBE Data Processing) para alinear sensores, filtrar datos y promediar las mediciones cada 0.25 m. La trayectoria del circuito y la ubicación de las estaciones hidrográficas fueron localizadas utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS).

Para fines de este estudio se utilizan solo parte de los datos oceanográficos colectados en las campañas de muestreo. Los datos analizados y presentados aquí son los correspondientes a la estación central (marcada como H1 en Figura 1) del trayecto más próximo al mar. Dado que el agua salada en los estuarios tiende a ingresar por la zona de mayor profundidad, se eligió la estación del centro de la bocana, donde se localiza el canal de navegación, para asegurar la detección del agua marina. El experimento se planeó con varios objetivos en mente, y para fines de ilustrar las características de la señal transitoria, y residual, de la estratificación y del flujo observadas en la columna de agua en la entrada de la laguna de Alvarado, se eligió la estación H1.

2.2. Pos-procesamiento de datos

Parámetro de estratificación: La estratificación global de la columna de agua en la estación CTD se evaluó mediante el parámetro (Sp):

$$Sp = (S_{fondo} - S_{sup}) / [0.5 (S_{fondo} + S_{sup})] \quad (1)$$

Donde S_{fondo} y S_{sup} son la salinidad en el fondo y en la superficie de la columna de agua, respectivamente. Cuando Sp es < 0.1 , la columna de agua se considera completamente mezclada, mientras que cuando Sp es > 1.0 , se considera característica de una cuña de sal (Haralambidou et al., 2010).

Frecuencia de Brunt-Väisälä, esfuerzo cortante y número de Richardson: La intensidad de la estratificación fue cuantificada mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä,

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

Donde, g es la aceleración debida a la gravedad, ρ es la densidad del agua, $\delta \rho_i$ el gradiente de densidad en el espacio δz_i .

Número de Richardson estuarino (Rie): Para determinar la importancia relativa de los principales mecanismos de forzamiento en el estuario (flotabilidad derivada del agua dulce por unidad de ancho y capacidad de mezcla de la marea) en los procesos circulación y mezcla, se utilizó el Rie . Cuando $Rie > 1$ se considera al estuario fuertemente estratificado (Geyer & Ralston & 2011). La transición entre un estuario bien mezclado a fuertemente estratificado ocurre en el rango $0.08 < Rie < 1$. Rie se evaluó como (siguiendo a Geyer & Ralston & 2011):

$$Rie = U_d^2 U_f / U_t^3 \quad (3)$$

Siendo, $U_d^2 = \beta g S_o h_o$, $U_f = Q/A$ y U_t = velocidad (rms) de la corriente de marea promediada verticalmente.

Donde $\beta \cong 0.8 \times 10^{-3}$, S_o salinidad del agua de mar, h_o la profundidad promedio de la sección transversal, A área de sección transversal, Q es la tasa de entrada de agua dulce.

3. Resultados

En las figuras de flujo, los valores positivos representan flujo yendo hacia el océano, mientras que los valores negativos representan flujo yendo hacia la laguna. Los vectores de velocidad de la corriente fueron girados, de tal manera que una de sus componentes (v) estuviese alineada al canal de entrada a la Laguna de Alvarado, y la otra componente (u) estuviese perpendicular al canal. En las figuras solo se considera la componente v de la corriente.

3.1. Señal transitoria: Condiciones de alta descarga de agua dulce, septiembre-2008

El perfil de velocidades durante la vaciante (Figura 2b) fue de tipo parabólico, con velocidad máxima en la superficie (2 ms^{-1}) y mínima cerca del fondo. Mientras que durante la llenante, se observaron dos capas de circulación yendo en sentidos opuestos. La capa superficial yendo hacia el océano (con magnitudes de 1 ms^{-1} o mayores) y la capa de fondo yendo hacia la laguna. Nótese que a todo lo largo del ciclo de marea, la corriente de la capa superficial se mantuvo hacia el océano. La magnitud máxima de la corriente hacia la laguna fue de 0.77 ms^{-1} y se ubicó alrededor de 3 m por arriba del lecho del estuario.

Los gráficos de temperatura y salinidad, en el plano profundidad-tiempo, exhiben estratificación termal y halina durante la llenante, mientras que durante la vaciante, la columna fue cuasi-homogénea (Figuras 2c, 2d) con salinidad menor a la unidad y temperatura de $26\text{-}26.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Nótese que la columna de agua mostró estratificación termal inversa, es decir, el agua de la capa superficial (agua dulce del río, $26 \text{ }^\circ\text{C}$) era más fría que el agua de la capa de fondo (agua de mar, $28 \text{ }^\circ\text{C}$). El agua dulce mantuvo una temperatura entre $26 \text{ }^\circ\text{C}$ y $26.5 \text{ }^\circ\text{C}$ a lo largo del ciclo de marea, excepto al final de la campaña de muestreo, donde se observó un incremento de $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ en la capa superficial, evento que pudo deberse a escurrimiento de agua dulce de otro río que desemboca en la Laguna de Alvarado diferente del Papaloapan, como el río Acula.

Pese a que la columna de agua presenta estratificación termal, es la estratificación halina la que juega el papel principal en la estabilidad/estratificación de la columna de agua. Para la campaña de septiembre-2008, el valor máximo de la diferencia de temperatura entre la capa de fondo y la capa superficial ($\Delta T = (T_f - T_s)$) fue de $2 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el valor máximo de $\Delta S = (S_f - S_s)$ (diferencia de salinidad entre la capa de fondo y la de superficie) fue mayor a 30 unidades, esto a lo largo del ciclo de marea. Considerando que, grosso modo, el cambio de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura influye lo mismo que un cambio de 0.2 unidades de sal en el cálculo de la densidad de agua (Geyer & Ralston, 2011), el grado de estratificación de la columna de agua bajo estas condiciones está dictado por la salinidad.

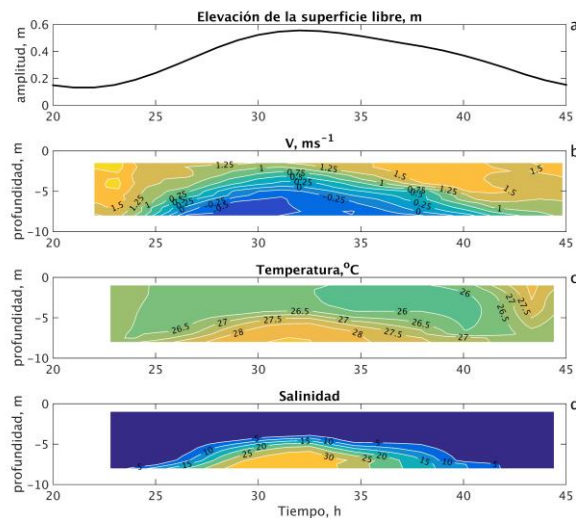
El valor de $\Delta S > 30$ observado durante la llenante en condiciones de alta descarga fluvial, (Figura 2d), así como el valor del parámetro de estratificación (Sp igual a 1.4, no se muestra gráfico) ubica a este sistema costero micromareal como uno de cuña salina, donde la cuña de sal ingresa al estuario durante la llenante, y es erosionada/expulsada durante la vaciante.

3.2. Señal transitoria: Condiciones de baja descarga de agua dulce, febrero-2014

La forma de los perfiles de velocidad durante la vaciante y llenante para la campaña que tomó lugar bajo condiciones de baja descarga fluvial (febrero 2014), fueron similares en comparación con los observados en septiembre-2008. Sin embargo, la magnitud de la corriente, la posición de la isotaca del cero y la posición de la máxima magnitud de la llenante fueron diferentes (**Figura 3**). Durante la vaciante el perfil de velocidad mostró forma parabólica, observándose magnitudes de hasta 1.2 m s^{-1} (**Figura 3b**) en la superficie. Durante la llenante, el perfil de velocidad mostró dos capas verticales yendo en sentido opuesto. La capa superior, de menos de 2 m de espesor, transportó agua

hacia el océano con velocidades máximas (0.5 ms^{-1}) ubicadas en la superficie. La capa del fondo transportó agua hacia la laguna, donde la máxima magnitud de la corriente se situó 5 m por arriba del lecho estuarino y alcanzó magnitudes de 0.4 ms^{-1} . Como se observó en septiembre-2008, la isotaca del cero en el caso de febrero-2014 no intersectó la superficie libre durante el periodo de muestreo.

Figura 2
Nivel de la superficie libre



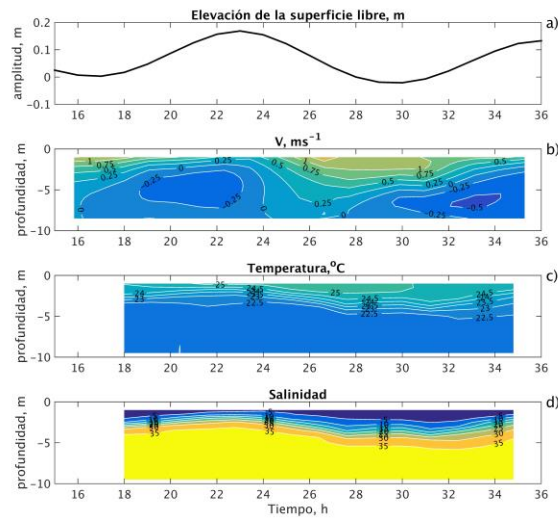
Nota: (a). Contornos de velocidad (b), temperatura (c) y salinidad (d) en el espacio profundidad-tiempo observados, a lo largo de un ciclo diurno a partir de las 20 h del 8 de septiembre de 2008 (tiempo en GMT). Velocidades con signo positivo indican flujo hacia el océano.

Fuente: Elaboración propia.

La columna de agua se mantuvo estratificada a lo largo de todo el ciclo de marea, donde el valor de $\Delta T = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\Delta S > 35$ unidades, se mantuvieron prácticamente invariantes a lo largo del periodo de muestreo (Figuras 3c, 3d). En general, la columna de agua mostró dos capas de agua de diferente densidad (1000 kgm^{-3} y 1024 kgm^{-3}), separadas por una interface cuyo espesor y posición en la vertical varió con la misma frecuencia que oscilación de la marea. El valor Sp fue entre 1.6 y 1.8 a lo largo del ciclo de marea.

Durante todo el periodo de muestreo de febrero-2014, la capa superficial estuvo ocupada por agua de baja salinidad relativamente cálida (temperatura de $24.5 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ y salinidad entre 3 y 5), mientras que la capa de fondo estuvo ocupada por agua marina relativamente fría ($22 \text{ }^\circ\text{C}$ y salinidad de 35.8). Nótese que durante esta campaña de muestreo, el agua marina era más fría que el agua continental, contrario a lo observado en septiembre-2008.

Figura 3
 Nivel de la superficie libre



Nota: (a). Contornos de elevación de la superficie libre (b), temperatura (c) y salinidad (d) en el espacio profundidad-tiempo, observados a lo largo de un ciclo de un ciclo diario a partir de las 15.8 h del 18 de febrero de 2014 (tiempo en GMT). Velocidades con signo positivo indican flujo hacia el océano.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Señal Submareal

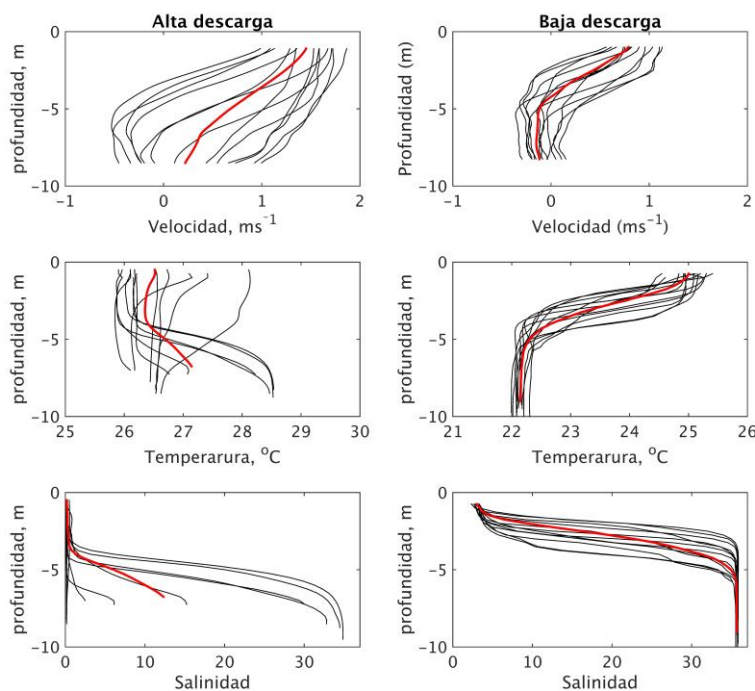
El promedio temporal y las mediciones intramareales de los perfiles de velocidad, salinidad y temperatura para cada campaña se presenta en la **Figura 4**. Para el caso de alta descarga de agua dulce, el perfil de velocidad promedio fue hacia el océano desde la superficie (1.5 ms^{-1}) hasta el fondo (0.3 ms^{-1}), exhibiendo la predominancia de la descarga del río en la advección en toda la columna de agua. Los perfiles de temperatura y salinidad promediados a lo largo de un ciclo de marea exhiben dos capas, la capa superficial de 4 m de espesor con temperatura y salinidad cuasi-uniforme, y la capa de fondo, donde la temperatura y salinidad aumentan de manera monótonica con la profundidad, es decir, la capa de fondo es ocupada por la haloclina. Los promedios temporales de temperatura y salinidad de la capa de superficie son de $26.4 \text{ }^\circ\text{C}$ y menos de una unidad de salinidad, respectivamente. Mientras que en la capa de fondo el promedio temporal de la temperatura alcanza valores superiores a $27 \text{ }^\circ\text{C}$ y la salinidad exhibe valores por encima de las 12 unidades.

El perfil del promedio temporal de la velocidad para las mediciones de febrero 2014 (baja descarga fluvial) exhibe dos capas de circulación yendo en sentido contrario, donde la isotaca del cero se ubicó a 3.8 m por debajo de la superficie libre. El flujo promedio de la capa superficial se dirige hacia el océano, con magnitud máxima de 0.7 ms^{-1} en la superficie libre. Mientras que, la corriente residual de la capa de fondo se dirige hacia la laguna. Nótese que por debajo de los 4.5 m de la superficie libre, la velocidad residual se mantiene prácticamente uniforme, con magnitudes de 0.15 ms^{-1} . Es

importante comentar que la parte de la columna de agua comprendida entre el lecho del estuario y 1.5 m por encima de este, las mediciones de la corriente no son confiables (por las características del equipo utilizado), por lo que no se consideran en este manuscrito.

Para las mediciones de febrero 2014, los perfiles de temperatura y salinidad promediados a lo largo de un ciclo de marea exhiben dos capas. La capa superficial, de 5 m de espesor aproximadamente, exhibe el cambio casi lineal de la temperatura y la salinidad con la profundidad. Mientras que la capa de fondo es prácticamente homogénea. La temperatura en la capa superficial disminuye con la profundidad, registra 25 °C en la superficie y 22.2 °C a los 5 m. Por otro lado, la salinidad en la capa superficial aumenta con la profundidad, yendo de una salinidad de 2, en la superficie, a 34.8 a los 5 m. Los valores de temperatura y salinidad de la capa de fondo promedian 22 °C y 35, respectivamente.

Figura 4
Perfiles de velocidad, temperatura y salinidad, correspondientes a las campañas de septiembre-2008 (paneles izquierdos, alta descarga) y febrero 2014 (paneles derechos, baja descarga)

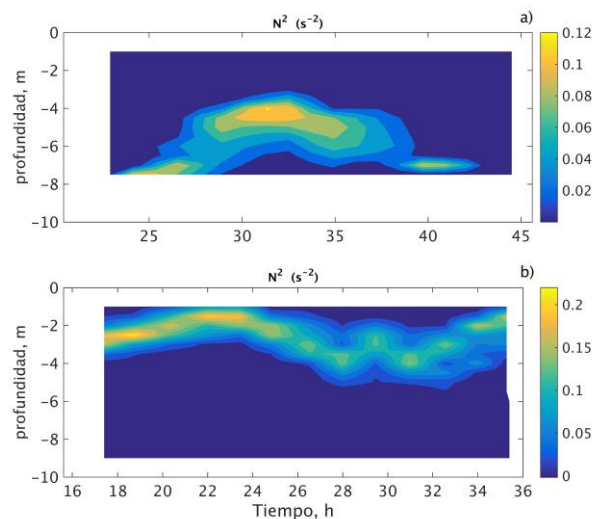


Nota: Las líneas rojas representan los promedios temporales. Las líneas negras son las mediciones transitorias.
 Fuente: Elaboración propia.

3.4. Intensidad de estratificación

Contornos en el espacio profundidad-tiempo del cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä, N^2 , muestran la intensidad de la estratificación a lo largo de la columna de agua (z_i), y a lo largo del ciclo de marea (**Figura 5**) para ambas campañas oceanográficas. Los valores máximos de N^2 están asociados a la pycnoclina. Los valores máximos de N^2 y su posición en la columna de agua variaron a lo largo del ciclo de marea. En general los valores máximos de N^2 (asociados con la fuerza de la pycnoclina) ocurrieron durante la llenante, cuando la pycnoclina migró hacia la superficie. Durante la vaciante, los valores de N^2 disminuyeron, y la pycnoclina se hundió. Los valores de N^2 por arriba y por debajo de la pycnoclina fueron cercanos a cero, es decir, las capas por arriba y abajo de la pycnoclina son capas bien mezcladas. La variación espacial y temporal de N^2 confirma que para ambas condiciones de Q, la cuña de sal estuvo presente y su geometría e intensidad de la estratificación variaron con la marea.

Figura 5
Variación temporal de N^2 en el plano profundidad-tiempo



Nota: (a) Época de alta descarga (ciclo diurno a partir de las 20 h de 8 de septiembre de 2008. (b) Época de baja descarga (ciclo diurno a partir de las 15.8 h de 18 de febrero de 2014. El tiempo está en GMT.

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

La discusión de este trabajo se centra en dos puntos: i) en señalar a la Laguna de Alvarado como un estuario de cuña salina micromareal cuya dinámica es dominada por la descarga fluvial y ii) en exhibir la diferencia del flujo residual en condiciones de alta y baja descarga fluvial. Es reconocido que los estuarios son sistemas muy dinámicos, con alta variación temporal, asociada a la variación temporal de forzamientos externos y al carácter no-lineal de su interacción, donde la poca profundidad, los cambios batimétricos y la geomorfología de las cuencas juegan un papel muy

importante. Así, para llegar a caracterizar la dinámica e hidrografía de un estuario, es necesario contar con mediciones con una resolución temporal adecuada y una longitud suficientemente larga, que permitan elucidar la importancia relativa de cada forzamiento externo, y sus interacciones. En este estudio, pese a que se utiliza datos de solo dos ciclos diurnos, en un solo punto, se logran exhibir claras diferencias en la dinámica que toman lugar bajo condiciones de alta y baja descarga fluvial.

4.1. Alvarado como estuario de cuña salina dominada por el río

Durante el periodo cuando la columna de agua está estratificada, el valor de Sp para ambas campañas oceanográficas registra valores mayores a la unidad, lo que indica que esta parte del complejo lagunar mantiene la condición de cuña de sal, tanto en condiciones de alta, como de baja descarga fluvial, al menos para valores Q iguales o menores a $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La intensidad de la estratificación de la columna de agua (evaluada por medio de N^2) exhibe también una fuerte estratificación durante los periodos de presencia de agua marina, es decir, la mezcla es débil entre al agua del río y el agua marina. Sin embargo, es notable que la intensidad de la estratificación a lo largo de la haloclina es menor para el caso de alta descarga fluvial. Esto puede deberse a que al ingresar la punta de la cuña de sal al estuario, cuyo espesor es pequeño y está pegada al lecho marino, experimenta tanto la fricción interna (en la interfaz de las aguas ocurre un fuerte esfuerzo cortante) como la del fondo, lo que deriva en una mayor mezcla.

Para identificar el principal mecanismo de forzamiento que afecta a L-Alv, se evaluó el número de Richardson estuarino (Ri_e) definido en la (ec. 3), para lo cual se consideró: $\beta \cong 0.8 \times 10^{-3}$, $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$, $S_0 = 36$, $h_0 = 10 \text{ m}$, $A = 4000 \text{ m}^2$, para ambas campañas oceanográficas. Mientras que los valores de Q y U_t correspondientes a cada época de muestreo fueron $Q = 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $U_t = 0.54 \text{ ms}^{-1}$ para septiembre-2008 y $Q = 400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $U_t = 0.32 \text{ ms}^{-1}$ para febrero-2014.

Los valores de Ri_e bajo condiciones de alta ($1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y baja descarga ($400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) del río y con un rango de marea entre 0.4 m y 0.2 m, fueron 4.3 y 6.6 respectivamente, lo que implica que el principal mecanismo de forzamiento que afecta la dinámica del estuario es la descarga de agua dulce. Es notable que aunque los valores Ri_e son $\gg 1$, la influencia de la marea puede distinguirse en la señal transitoria. Por ejemplo, la cuña ingresa solo durante la llenante, y es erosionada/expulsada durante la vaciante en el caso de alta descarga del río. También se puede observar que la variación temporal de posición vertical de la picnoclina oscila con la misma frecuencia que la marea. Esto ocurre para ambas condiciones de Q , indicando que la cuña de sal no es estacionaria, es decir, presenta variación intramareal. Esta condición ha sido observada en otros sistemas micromareales, como en el estuario del río Neretva de Croacia (Krvavica et al, 2021) y en el río Xiaoqinghe de China (Zou et al, 2016).

De acuerdo a Olvera-Prado (2014), la intrusión salina en condiciones de baja descarga fluvial se extiende por el lecho del río Papaloapan alcanzando más de 12 km de longitud. Haciendo un cálculo burdo, donde la intrusión salina se retraiga a una velocidad constante de 0.2 ms^{-1} (valor aproximado durante la vaciante para febrero-2014) durante el periodo de la vaciante (12 h), la cuña de sal recorrería alrededor de 8 km, es decir, no alcanzaría a ser expulsada del estuario.

La variación temporal de la estratificación en los estuarios, y de la geometría de la cuña de sal inducida por la variación temporal de los forzamientos externos (p.e. descarga de agua dulce), puede tener implicaciones cruciales en la ecología de estos sistemas (Dyer, 1991; Kasai et al., 2010; Watanabe et al., 2014), como se ha observado en la composición de las comunidades bentónicas (e.g. Balthis et al., 2006) y en la distribución y composición del fitoplancton (Kasai et al., 2010; Thompson, 2001) en otros sistemas estuarino-lagunares. Es de esperarse que la presencia/ausencia, tiempo de residencia y características de la cuña de sal tenga un alto impacto en la ecología del Complejo Lagunar de Alvarado, en general, y en la Laguna de Alvarado y parte baja del río Papaloapan, en particular.

Considerando la importancia de la descarga fluvial en la extensión de la cuña salina en la entrada de la laguna de Alvarado y la parte baja del río Papaloapan, y considerando la alta variación temporal de la descarga fluvial del río Papaloapan, es de esperarse que la longitud de la cuña de sal y su geometría, en general, tengan una alta variación temporal.

4.2. Tipo de perfil de densidad en la residual indica la importancia de la estratificación -circulación gravitacional

Los perfiles promedio del flujo durante la campaña oceanográfica de alta descarga fluvial, evidencian que la Laguna de Alvarado tiene un transporte promedio hacia el mar en toda la columna de agua, es decir, que la circulación residual está dominada por la descarga fluvial. Los perfiles submareales de temperatura (T) y salinidad (S), por su parte, evidencian la ocurrencia de la intrusión/expulsión de la cuña salina. Esto es patente porque la columna de agua muestra dos capas, la superficial de 4 m de espesor ocupada por agua de río, y una capa de fondo ocupada por la haloclina. Dicha haloclina representa el promedio de las características T-S originadas por la presencia/ausencia de la cuña de sal durante la llenante/vacante.

Por otro lado, los perfiles promedio del flujo, durante las mediciones de baja descarga fluvial, muestran una circulación residual en dos capas, donde la capa de fondo tuvo un transporte promedio hacia la laguna y la capa de superficie tuvo un transporte promedio hacia el mar. Lo anterior sugiere que la circulación residual es dominada por la circulación gravitacional, la cual es inducida por la descarga del río y los gradientes de densidad. Los perfiles promedio de temperatura y salinidad son evidencia de que la cuña de sal ocupó la capa de fondo, cuya velocidad residual fue de -0.2 ms^{-1} . La magnitud de las velocidades residuales de la capa superficial no solo fue mayor que la observada en la capa de fondo, sino también mostraron fuerte cizallamiento, lo que sugiere que el agua del río se deslizó sobre la cuña de sal.

5. Conclusiones

El canal que conecta a la Laguna de Alvarado con el mar adyacente se comporta con un estuario de cuña salina, cuya dinámica está dominada por el gasto del río (p.e. $Ri_e > 1$).

Bajo condiciones de alta descarga del río ($\sim 1000 \text{ ms}^{-1}$), la cuña de sal es expulsada de la laguna durante la vaciante, e ingresa al sistema costero durante la llenante.

Bajo condiciones de baja descarga del río ($< 400 \text{ ms}^{-1}$) la cuña de sal permanece dentro del estuario. Durante la llenante se observan dos capas de circulación yendo en sentido contrario. La columna de agua se mantiene estratificada a lo largo del ciclo de marea, donde la posición vertical de la haloclina oscila con ella. La intensidad de la estratificación (N^2) exhibe una mezcla débil entre el agua del río y el agua de mar, habiendo en general, mayor mezcla durante las vaciantes, y en condiciones de alta descarga.

El flujo residual es dominado por la circulación gravitacional durante estiaje, y por la descarga fluvial durante las lluvias. Para ambas condiciones de descarga fluvial, los perfiles de salinidad submareal muestran fuerte estratificación ($Sp \sim 1.4$ en lluvias y $Sp \sim 1.7$ en estiaje).

Agradecimientos: La colección de los datos de la campaña 2014 fue financiada por el proyecto CONACYT -CB2010-153064.

Referencias

- Balthis**, W. L., Hyland, J. L., & Bearden, D. W. (2006). Ecosystem responses to extreme natural events: impacts of three sequential hurricanes in fall 1999 on sediment quality and condition of benthic fauna in the Neuse River Estuary, North Carolina. *Environmental monitoring and assessment*, 119(1), 367-389.
- Cameron**, W. M., & Pritchard, D. W. (1963). Estuaries (306–324). *The Sea*, 2.
- Dyer**, K. R. (1991). Circulation and mixing in stratified estuaries. *Marine Chemistry*, 32(2-4), 111-120.
- Espinosa**, G. A. (2008). Estudio teórico y práctico de la cuña salina: régimen estacionario y transitorio (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria).
- Geyer**, W. R., & Ralston, D. K. (2011). 2.03—The dynamics of strongly stratified estuaries. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Amsterdam: Elsevier, 37-52.
- Gonenc**, I. E., & Wolflin, J. P. (2004). Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development. CRC Press.
- Haralambidou**, K., Sylaios, G., & Tsihrintzis, V. A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90(4), 174-184.
- Ibañez**, C., Pont, D., & Prat, N. (1997). Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt - wedge estuaries. *Limnology and Oceanography*, 42(1), 89-101.
- Kantha**, L., 2005. Barotropic tide in the Gulf of Mexico. In: *Circulation in the Gulf of Mexico Observation and Models*. Geophysical Monograph Series, vol. 161 159-16.
- Kasai**, A., Kurikawa, Y., Ueno, M., Robert, D., & Yamashita, Y. (2010). Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(3), 408-414.
- Krvavica**, N., Gotovac, H., & Lončar, G. (2021). Salt-wedge dynamics in microtidal Neretva River estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 43, 101713.
- Krvavica**, N., Travaš, V., & Ožanić, N. (2017). Salt-wedge response to variable river flow and sea-level rise in the Microtidal Rječina River Estuary, Croatia. *Journal of coastal research*, 33(4), 802-814.

- Olvera-Prado, Erick Raúl.** (2014). "Respuesta hidrodinámica de las lagunas y ríos del estuario del Papaloapan a forzamiento meteorológico". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/262930>
- Perales-Valdivia, H., Sanay-González, R., & Valle-Levinson, A.** (2018). Effects of tides, wind and river discharge on the salt intrusion in a microtidal tropical estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 24, 400-410.
- Pérez, J. M., & Ulloa, M. J.** (2017). HIDROGRAFÍA DEL ESTUARIO DEL RÍO PÁNUCO EN AGOSTO 2015. Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica AC (ATICTAC). Libro de Memorias del 28 Encuentro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Golfo de México. Este material no puede ser reproducido o copiado por completo ni por partes en ninguna forma impresa, mecánica, electrónica, fotográfica o cualquier otro medio de, 13.
- Portilla-Ochoa, E.** 2003. Establecimiento de Unidades de Gestión Ambiental en el Humedal de Alvarado, Veracruz, México: Base para su Ordenamiento Ecológico y Social. Reporte académico semestral North American Wetlands Conservation Council (NAWCC). Área Biología de la Conservación. Instituto de Investigaciones Biológicas. Universidad Veracruzana.
- Riverón-Enzástiga, Mayra Lorena.** (2008). "Análisis de la variabilidad de las descargas de agua de los principales ríos del sur de la cuenca hidrológica del Golfo de México". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/330348>
- Ruiz-Barradas, A., Tejeda-Martínez, A., Miranda-Alonso, S., & Flores-Zamudio, R. H.** (2010). Climatología en Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. Gobierno del estado de Veracruz. México. <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9649/1/03CLIMATOLOGIA.pdf>.
- Ruiz-Fernández, A. C., Maanan, M., Sanchez-Cabeza, J. A., Pérez-Bernal, L. H., López-Mendoza, P., & Limoges, A.** (2014). Chronology of recent sedimentation and geochemical characteristics of sediments in Alvarado Lagoon, Veracruz (southwestern Gulf of Mexico). *Ciencias Marinas*, 40(4), 291-303.
- Schettini, C. A. F., Miranda, J. B. D., Valle-Levinson, A., Truccolo, E. C., & Domingues, E. C.** (2016). The circulation of the lower Capibaribe Estuary (Brazil) and its implications for the transport of scalars. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64, 263-276.
- Sierra, J. P., Sánchez-Arcilla, A., Del Río, J. G., Flos, J., Movellán, E., Mösso, C., ... & Romero, I.** (2002). Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research*, 22(2), 361-378.
- Tenorio-Fernandez, L., Zavala-Hidalgo, J., & Olvera-Prado, E. R.** (2019). Seasonal variations of river and tidal flow interactions in a tropical estuarine system. *Continental Shelf Research*, 188, 103965.
- Thompson, P. A.** (2001). Temporal variability of phytoplankton in a salt wedge estuary, the Swan-Canning Estuary, Western Australia. *Hydrological Processes*, 15(13), 2617-2630.
- Valle-Levinson, A.** (Ed.), 2010. Definition and classification of estuaries. In: Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1–11.
- Watanabe, K., Kasai, A., Antonio, E. S., Suzuki, K., Ueno, M., & Yamashita, Y.** (2014). Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139, 67-77.
- Zou, T., Zhang, H., Meng, Q., & Li, J.** (2016). Seasonal hydrodynamics and salt exchange of a shallow estuary in Northern China. *Journal of Coastal Research*, 74 (10074), 95-103.