



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



**“PROCESOS QUE CONTROLAN LA QUÍMICA DEL  
SISTEMA DEL CARBONO EN LAGUNA OJO DE LIEBRE,  
B.C.S.”**

**TESIS**

**PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE OCEANÓLOGA  
PRESENTA:**

**LESLIE JANETH SOTO LÓPEZ**

**ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO  
ABRIL DE 2024**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
CAMPUS ENSENADA



"PROCESOS QUE CONTROLAN LA QUÍMICA DEL SISTEMA  
DEL CARBONO EN LAGUNA OJO DE LIEBRE, B.C.S."

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
OCEANÓLOGA

**PRESENTA:**

**Leslie Janeth Soto López**  
**357682**

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, los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:

**Dr. José Martín Hernández Ayón**  
**DIRECTOR**

**Dr. Carlos Orion Norzagaray López**  
**SINODAL**

**Dr. Adán Mejía Trejo**  
**SINODAL**

**Dr. Jorge Manuel López Calderón**  
**SINODAL**

"Por la Realización Plena del Ser"

Resumen de la tesis de **Leslie Janeth Soto López** presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Oceanología. Ensenada, Baja California, México. Abril de 2024.  
*Procesos que controlan la química del sistema del carbono en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S.*

Resumen aprobado: \_\_\_\_\_

Dr. José Martín Hernández Ayón

Director

## Resumen

La Laguna Ojo de Liebre (LOL) es uno de los humedales costeros más emblemáticos de la península de Baja California, por su biodiversidad, extensión y uso de sus recursos naturales. Esta es alimentada por diferentes masas de agua que cambian y se desplazan al frente de la península, por lo que la dinámica fisicoquímica de las masas de agua externas rige, en parte, la dinámica interna de la laguna. Este estudio evaluó la dinámica estacional del sistema del CO<sub>2</sub> en la LOL considerando dos factores principales: 1) el efecto de la advección estacional de masas de agua superficiales, en combinación con el bombeo por mareas, y 2) el efecto de la evaporación que modifica las variables del sistema del carbono. Para ello, se colectaron muestras de agua superficiales en 18 estaciones en agosto y noviembre de 2021, y marzo y junio de 2022; y con un CTD se realizaron lances en cada estación. Se midió el carbono inorgánico disuelto (CID) mediante el método de coulometría y la alcalinidad total (AT) por titulación con HCl. Se identificó la influencia estacional de ASA, AStS y la mezcla de ambas; así como la influencia de las surgencias costeras en las concentraciones de las variables del carbono, principalmente en el CID durante los meses de primavera y verano. Las variables tanto físicas como químicas mostraron un patrón estacional y espacial similar, con un aumento en el gradiente de la boca hacia el interior de la laguna, y con los valores máximos y mínimos en verano tardío y primavera, respectivamente. La distribución de la salinidad y el CID/AT fue relativamente proporcional, debido a que el bicarbonato es uno de los macroconstituyentes de la salinidad, así como una de las especies más abundantes en el sistema del carbono en el agua de mar, sin embargo, las diferencias cuantitativas en el CID y la AT fueron significativamente mayores, con un valor promedio de 426  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y 547  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Por medio de la normalización de las variables del carbono, se encontró que los procesos de evaporación dominan en las estaciones anteriores a la cuenca de evaporación, mientras que en la cuenca las variables del carbono exhiben una disminución que se atribuye a los procesos de precipitación de carbonatos y/o fotosíntesis. El presente trabajo muestra que el gradiente de salinidad se debe a la evaporación en el interior de la laguna con relación a procesos físicos como el viento y el tiempo de residencia del agua. Además, se revela que en LOL la química del sistema del CO<sub>2</sub> está controlada espacialmente por los procesos de evaporación, pero responde a los procesos de advección estacionales, así como a la época de surgencias costeras en la región. Los resultados de este trabajo indican que la laguna es una fuente débil de CO<sub>2</sub> ( $8.05 \pm 6.1 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ), con excepción de la zona interior, donde actúa como sumidero.

## **Agradecimientos**

A mis papás **Celssy** y **Javier**, porque su trabajo y amor como padres me han llevado aquí. Por su sacrificio a mi educación, su amor y apoyo incondicional a mis pasiones.

A mis hermanas **Ale** y **Mich**, por ser las mejores amigas que la vida me haya dado. Por abrazarme en todas mis versiones. A mi sobrina, **Annette** y a mis perrhijas, **Dolly (†)**, **Candy** y **Blackie** porque son mi boya y mi faro.

A mis tíos **Lucy** y **Luis Felipe**, a quienes siempre vi enamoradxs de lo que hacían y me inspiraron a estudiar oceanología. Gracias por todo el amor y el apoyo.

A la familia que he encontrado a través de los años: **Paulina**, **Victoria**, **Elisa**, **Frida**, **Roger**, **Mike**, **Román**, **Héctor**, **Yessica**, **Andrea** y **Alex**. Y de Hermosillo a mis grandes amigas **Zyanya**, **Alfo** y **Ana Elisa**. Agradezco especialmente a mi Pau, de quien aprendí mucho desde el primer semestre y quien con amor y paciencia me acompañó en mis descarrilamientos.

A mis profesores de la licenciatura, por enseñarme y contagiarme de su pasión por la ciencia. Especialmente a **Hiram Rivera**, **Natalie Millán**, **Karina Lugo**, **Jorge López**, **Miguel Santa Rosa**, **Raúl Canino**, **Adriana González** y **Reginaldo Durazo**.

Al laboratorio de química del CO<sub>2</sub>, especialmente al **Dr. Martín** y al **Dr. Orión**, quienes me acogieron en 2019 para enseñarme con atención y apoyarme durante los años siguientes. Al **Oc. Arturo** quien me acompañó y guio durante los muestreos.

A las maestras **Claudia Camarena** y **Mariela Soto**, quienes me ayudaron a descubrir el potencial que tengo. A la maestra **Melissa Castañeda** y al maestro **Sergio Morales**, quienes con pasión nos impartieron la materia de química en la preparatoria y lograron que también yo me enamorara de ella.

A mi novio **Gerónimo**, por todo su amor, cariño y devoción, así como su compañía, apoyo y consideración a mi formación profesional.

A la **FCM** por sus enseñanzas y demostración de una gran comunidad científica. Al **CONAHCYT** por financiar el proyecto Indicadores Ambientales del Estado de Salud del Humedal Laguna Ojo de Liebre (Reserva de la Biósfera El Vizcaíno)

A todxs, gracias por creer en mí cuando yo no supe hacerlo.

## Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introducción</b> .....   | <b>6</b>  |
| <b>Antecedentes</b> .....   | <b>7</b>  |
| Bahía Sebastián Vizcaíno .....  | 7         |
| Circulación y masas de agua .....   | 8         |
| Surgencias costeras .....   | 10        |
| <b>Área de estudio</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>Hipótesis</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>Objetivos</b> .....  | <b>14</b> |
| <b>Materiales y métodos</b> .....   | <b>14</b> |
| Colecta de muestras discretas en campo y su análisis .....                    | 14        |
| Tiempo de residencia .....  | 16        |
| Flujos de CO <sub>2</sub> .....   | 17        |
| <b>Resultados</b> .....   | <b>18</b> |
| Variabilidad estacional en LOL .....  | 19        |
| Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos .....                  | 27        |
| Identificación de procesos que modifican el sistema del CO <sub>2</sub> ..... | 30        |
| <b>Discusión</b> .....  | <b>31</b> |
| Variabilidad estacional en LOL .....  | 31        |
| Variabilidad espacial en LOL .....  | 39        |
| Procesos que modifican las variables del sistema del CO <sub>2</sub> .....    | 40        |
| <b>Conclusiones</b> .....   | <b>43</b> |
| <b>Referencias</b> .....  | <b>44</b> |
| <b>Anexos</b> .....   | <b>50</b> |

## Índice de figuras

|   |           |
|---|-----------|
| Figura 1. Mapa de la Bahía Sebastián Vizcaíno, B.C.....   | <b>8</b>  |
| Figura 2. Estaciones de muestreo en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. ....   | <b>12</b> |
| Figura 3. Batimetría en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. La barra de colores indica la profundidad en metros. Elaborado por Dr. Adán Mejía Trejo. ....  | <b>13</b> |
| Figura 4. Promedios mensuales del índice de surgencia (barra de colores) para el periodo 1967 a 2022 en BSV. Los eventos de surgencias ocurren a partir de 100 m <sup>3</sup> -s-1-100 m-1. Elaborado por el Dr. Adán Mejía Trejo. ....   | <b>20</b> |
| Figura 5. Serie de tiempo mensual del índice de surgencia para el periodo 2020 a 2022. Las líneas rojas indican el promedio mensual, las líneas verdes señalan los meses correspondientes a los muestreos y los círculos amarillos los eventos de surgencias durante los muestreos. Elaborado por el Dr. Adán Mejía Trejo.....  | <b>21</b> |
| Figura 6. Perfiles de temperatura de los muestreos. La barra de colores indica los diferentes intervalos de temperatura de cada muestreo.....   | <b>22</b> |
| Figura 7. Perfiles de salinidad de los muestreos. La barra de colores indica el intervalo de salinidad. ....  | <b>23</b> |
| Figura 8. Diagrama estacional de temperatura vs salinidad que representa la influencia del océano adyacente en la Laguna Ojo de Liebre (izquierda). Se muestra una imagen de la laguna donde se indican las estaciones con influencia oceánica. La línea punteada azul marca las estaciones mayormente influenciadas, la línea punteada roja indica las que tienen menor influencia (derecha). ASA: Agua Subártica. AStS: Agua Subtropical Superficial. ATr: Agua Transicional. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11..... | <b>25</b> |
| Figura 9. Serie de tiempo mensual de la temperatura (A), carbono inorgánico disuelto (CID; B), alcalinidad total (AT; C), pH (D), pCO <sub>2</sub> (E) y flujos de CO <sub>2</sub> (F), registrado entre agosto de 2021 y junio de 2022 en 18 estaciones en LOL. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11. ....   | <b>27</b> |
| Figura 10. Distribución espacial de la temperatura (A), salinidad (B), pH (C), CID (D), TA (E) y pCO <sub>2</sub> (F) para cada estación de muestreo durante el período entre agosto de 2021 y junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11. ....  | <b>29</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| Figura 11. Distribución espacial de CIDn (arriba) y ATn (abajo). Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11. La normalización se hizo para cada evento de monitoreo, y usando un valor de referencia de salinidad de la primera estación (agua con condición oceánica).....  | <b>31</b> |
| Figura 12. Diagrama de dispersión entre salinidad y CID de las muestras discretas para el período de agosto 2021 a junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.....  | <b>35</b> |
| Figura 13. Distribución espacial de los pastos marinos y otros tipos de cobertura en las Lagunas Ojo de Liebre, Guerrero Negro y Manuela. Imágenes satelitales del año 1999 (Modificado de Ward <i>et al.</i> , 2022).....   | <b>36</b> |
| Figura 14. Diagrama de dispersión entre salinidad y AT de las muestras discretas para el período de agosto 2021 a junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11. ....  | <b>37</b> |
| Figura 15. Flujos de CO <sub>2</sub> laguna-atmósfera a lo largo de las estaciones, desde el océano adyacente hasta la parte interna de la laguna. El cero en el eje Y representa el equilibrio. Promedio de los flujos de CO <sub>2</sub> en mmol·m <sup>-2</sup> ·día <sup>-1</sup> : M03: 11.70, M06: 13.89, M08: 6.39 y M11: 0.20. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11..... | <b>38</b> |
| Figura 16. Flujos no conservativos del CID ( $\Delta$ CID) y de la AT ( $\Delta$ AT).....  | <b>41</b> |
| Figura 17. Relación entre la ATn y CIDn. La barra de colores indica aproximadamente el número de estaciones (izquierda) y los meses de muestreo (derecha).....   | <b>42</b> |
| Anexo 1. Distribución espacial de la clorofila-a. Datos proporcionados por el Dr. Jorge Calderón.....  | <b>50</b> |

### Índice de tablas

|  |           |
|--|-----------|
| Tabla I. Clasificación de masas de agua (Durazo y Baumgartner, 2002).....  | <b>9</b>  |
| Tabla II. Promedios superficiales de la temperatura y salinidad con la desviación estándar para cada muestreo. La región oceánica se comprende por las estaciones 1-3, y el sistema LOL por las estaciones 4-18. Según Durazo y Baumgartner (2002), la señal de ASA es entre 10-21°C y salinidad <34; y AStS es entre 20-28°C y >34.4. | <b>24</b> |

## Introducción

Los sistemas costeros representan el 8% del océano global y son altamente productivos (Walsh, 1989; Wollast, 1991). Entre estos, los estuarios se consideran uno de los ecosistemas acuáticos más productivos y dinámicos (Gattuso *et al.*, 1998). En estas zonas litorales, el ciclo del carbono se define como el conjunto de procesos biogeoquímicos que incluyen flujos de CO<sub>2</sub> verticales y laterales, por ejemplo, las interacciones entre la atmósfera, el medio terrestre y el océano con respecto a procesos que modifican especies del carbono (Spivak *et al.*, 2019; Tan *et al.*, 2020). Sin embargo, el papel de la zona costera como fuente o sumidero de CO<sub>2</sub> sigue aun en debate (Smith y Hollibaugh, 1997; Borges, 2005; Borges *et al.*, 2005). Lo anterior es debido a la marcada variabilidad en la dinámica del carbono en los estuarios, la cual depende de las características de este (geomorfología), así como de la estación del año e incluso la hora del día. Además, la complejidad hidrodinámica y geomorfológica de los estuarios influye en su variabilidad espacial (Oliveira *et al.*, 2017). Debido a la alta variabilidad que presentan los estuarios, se requiere una mejor descripción del sistema del CO<sub>2</sub> en estas regiones (Borges y Frankignoulle, 1999; Borges y Frankignoulle, 2002; Hales *et al.*, 2008; Zhai y Dai, 2009; de la Paz *et al.*, 2010; Ribas-Ribas *et al.*, 2011a).

Existe una falta de información sobre la dinámica del sistema del CO<sub>2</sub> en ecosistemas costeros como las lagunas, donde los pocos estudios sobre el ciclo del carbono se han enfocado principalmente en el metabolismo del ecosistema (e.g. Carmouze *et al.*, 1998; McGlathery *et al.*, 2001; Hung y Hung, 2003), por lo que existen pocos estudios que han abordado el ciclo del CO<sub>2</sub> en lagunas costeras (Hernández-Ayón *et al.*, 2007a; Koné *et al.*, 2009; Ribas-Ribas *et al.*, 2011b). Este trabajo tiene como propósito evaluar, por primera vez en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S., la dinámica

de las variables del carbono en una laguna costera hipersalina en el Pacífico Mexicano.

## **Antecedentes**

### **Bahía Sebastián Vizcaíno**

La Bahía Sebastián Vizcaíno (BSV) es el cuerpo de agua más extenso de la región nororiental del océano Pacífico (Fig. 1). Está ubicada en la costa occidental de la península de Baja California, en Guerrero Negro, Baja California Sur. La bahía está en una zona de transición entre aguas templadas y subtropicales que le confieren propiedades fisicoquímicas ideales para la productividad primaria y diversas especies de alto valor comercial, como la sardina del Pacífico, lenguado, langosta, camarón, tiburones y rayas (Martínez-Fuentes *et al.*, 2016). La BSV se delimita desde Punta Canoas a Punta Eugenia e incluye las islas de Cedros y Natividad (Navarro-Palacios y Mancilla-Peraza, 2008). Forma parte de la Reserva de la Biósfera El Vizcaíno, designada como tal en 1988 debido a su biodiversidad, la migración y el refugio de especies, así como el aprovechamiento de sus recursos naturales (SEMARNAP, 2000).

# Bahía Sebastián Vizcaíno

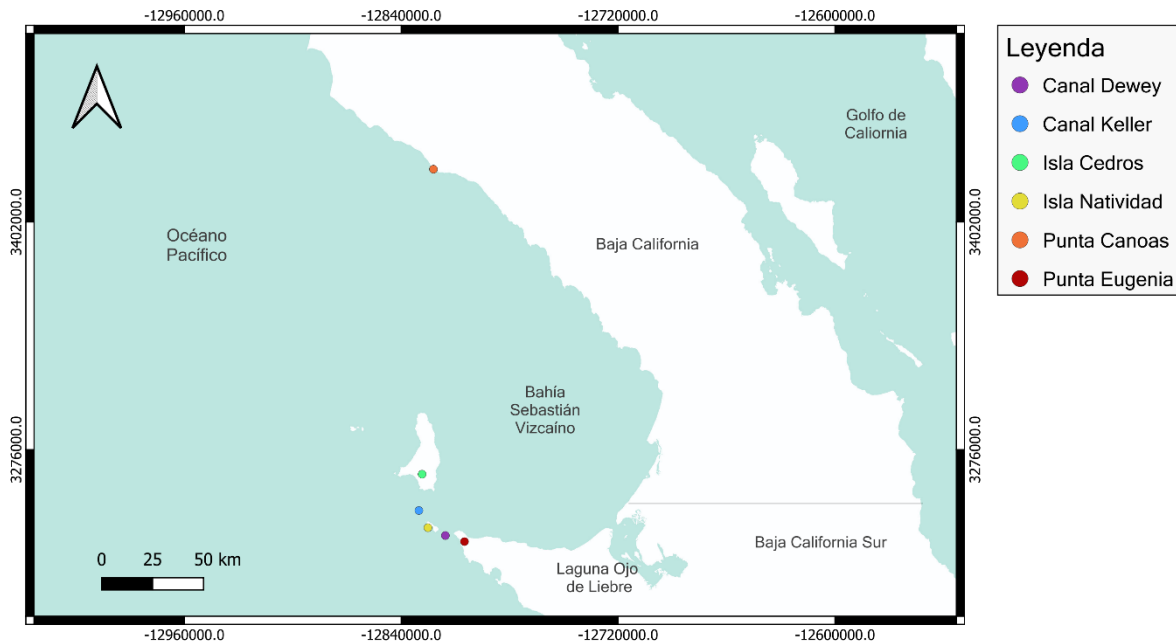


Figura 1. Mapa de la Bahía Sebastián Vizcaíno, B.C.

## Circulación y masas de agua

La circulación de BSV está dominada por un remolino anticiclónico de aguas relativamente cálidas, con un diámetro que oscila entre 50 a 65 km y profundidades de 60 a 70 m (Dawson, 1952). El remolino se ubica en la zona central y se origina debido a la advección hacia el sur, la fuerza de Coriolis que actúa sobre la circulación superficial, el esfuerzo del viento y la forma alargada de la bahía. Esta estructura ha sido reportada como semipermanente a lo largo del año (Palacios-Hernández, 1994; Amador-Buenrostro *et al.*, 1995). Adicionalmente, la circulación en BSV está influenciada por las masas de agua que ingresan a través de la boca norte, donde la entrada de agua superficial y subsuperficial es más significativa debido al flujo de la

Corriente de California (CC). En contraste, la boca sur es más estrecha y somera y está formada por los Canales Dewey y Keller (Martínez-Fuentes *et al.*, 2016).

Las principales masas de agua presentes son el Agua Subártica (ASA), transportada por la CC; el Agua Subtropical Superficial (AStS) provenientes del oeste y suroeste de la península, y el Agua Transicional (ATr) la cual resulta de la mezcla entre ASA y AStS. Estas tres masas de agua son transportadas entre los 0 a 100 m de profundidad. De manera subyacente, a profundidades aproximadas de 100 a 250 m, fluye hacia el polo la Contracorriente de California (CCC), que transporta el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs) (Durazo *et al.*, 2010).

Tabla I. Clasificación de masas de agua (Durazo y Baumgartner, 2002)

| Masa de agua | Temperatura (°C) | Salinidad |
|--------------|------------------|-----------|
| ASA          | 10-21            | <34       |
| AStS         | 20-28            | >34.4     |
| ATr          | 18-22            | 34-34.4   |
| AESs         | 8-15             | >34.3     |

La BSV experimenta cambios estacionales e interanuales en la temperatura, salinidad y niveles de oxígeno disuelto. Estos cambios se relacionan con ajustes verticales en el campo de densidad y con variaciones en los flujos de la CC y la CCC (Lynn y Simpson, 1987). Con base en las señales de densidad, temperatura y salinidad de cada masa de agua, se ha observado que las fronteras entre estas masas de agua se desplazan latitudinalmente y a lo largo de escalas temporales diversas, desde semanales hasta decadales (Lynn y Simpson, 1987; Durazo *et al.*, 2010). Durante la primavera y el verano, cuando los vientos del noroeste son más intensos, la presencia de ASA es predominante, de manera simultánea a la época

de surgencias. Por otro lado, la influencia de AStS es más común en verano y otoño cuando el flujo de la CC se debilita (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2009).

### **Surgencias costeras**

Frente a la península, las surgencias costeras exhiben patrones estacionales que están controlados por la intensidad y dirección del viento, aunque la batimetría local y las particularidades de cada ambiente costero también pueden contribuir a su variabilidad (Durazo *et al.*, 2010). Las surgencias facilitan la transferencia de calor, sales, nutrientes, energía y carbono (tanto orgánico como inorgánico) entre el agua superficial, que recibe una abundante luz solar; y el agua más profunda, que se caracteriza por tener baja temperatura, abundancia de nutrientes y carbono inorgánico disuelto (CID) (NASEM, 2022). No obstante, en la BSV la orientación de la costa impide que los vientos del noroeste generen surgencias costeras, con la excepción del área frente a Punta Canoas, donde ocurren durante todo el año, con un notable incremento en su intensidad en la temporada de primavera-verano (Martínez-Fuentes *et al.*, 2016; Mancilla-Peraza *et al.*, 1993).

### **Área de estudio**

La Laguna Ojo de Liebre (LOL), el sitio de interés de la tesis está situada en la parte sureste de BSV (27°36' a 27°55' N y 113°55' a 114°19' W) (Fig. 2). Esta laguna alberga cientos de especies de manera permanente o temporal, entre las que se encuentran aves como el águila pescadora, peces e invertebrados de importancia comercial, mantos de macroalgas, praderas de pastos marinos, tortugas y mamíferos marinos como lobos marinos, delfines y la ballena gris. La LOL forma parte de la Reserva de la Biósfera El Vizcaíno y cuenta con varios reconocimientos ecológicos, como su estatus como patrimonio de la humanidad, un humedal de importancia

internacional en la lista RAMSAR, así como un área de importancia para la conservación de las aves (AICA), entre otras distinciones. Además de actividades productivas como la pesca y el ecoturismo, en la laguna se encuentra la salina más grande del mundo, operada, desde hace 66 años, por la empresa Exportadora de Sal S.A., la cual genera recursos económicos y empleo para la población de Guerrero Negro (SEMARNAP, 2000; SINAP-021).

La LOL es una laguna hipersalina que forma parte del complejo lagunar Ojo de Liebre compuesto por tres lagunas: Laguna Manuela al norte, Laguna Guerrero Negro, y Laguna Ojo de Liebre, que se ubica al sur de las tres. Este complejo se encuentra entre las Sierras de San Borja al noreste y Vizcaíno al suroeste (Eberhardt, 1966). Diversos arroyos se extienden desde las partes altas de la sierra hasta llegar a zonas bajas y al interior de las lagunas. Sin embargo, debido al clima seco-semiárido de la región, con temperatura media anual entre los 18 y 22°C y precipitaciones anuales promedio de 30 mm, los aportes fluviales hacia las lagunas son insignificantes, salvo durante lluvias anómalas por el paso de huracanes (Rodríguez-Padilla, 2013).

La laguna comprende una superficie de 480 km<sup>2</sup>, con una longitud de 40 km y un ancho promedio de 6 km. Se conecta de manera permanente con la BSV por una boca de 3.7 km de ancho y cuenta con cuatro islas principales en su interior: Conchas, Brosas, Piedras y Choya (Gutiérrez de Velasco, 2000). La batimetría de LOL es mayormente somera e incluye un sistema de canales de hasta 30 m de profundidad (Rodríguez-Padilla, 2013). La marea es un factor determinante en la dinámica de LOL y tiene un rango de 1.20 en marea muerta, a 2.70 m en marea viva. Durante marea viva, el agua cubre aproximadamente 70 km<sup>2</sup> (Bryant *et al.*, 1984; Gutiérrez de Velasco, 2000; Zamora-Salvador, 2016). Además, existe un retraso de aproximadamente 3 horas en la marea entre la boca y la cabeza de LOL, asociado a

la profundidad de la laguna, el relieve del fondo y el ancho de los canales (Phleger y Ewing, 1962).

El complejo lagunar es hipersalino, pero Ojo de Liebre es la laguna que presenta mayores intervalos de temperatura y salinidad, principalmente en verano. Con respecto a la salinidad, las magnitudes de viento considerables, así como la morfología semicerrada de LOL propician una alta tasa de evaporación, lo que produce un gradiente de temperatura y salinidad hacia el interior (Gutiérrez de Velasco, 2000; Rodríguez-Padilla, 2013).

## Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. México

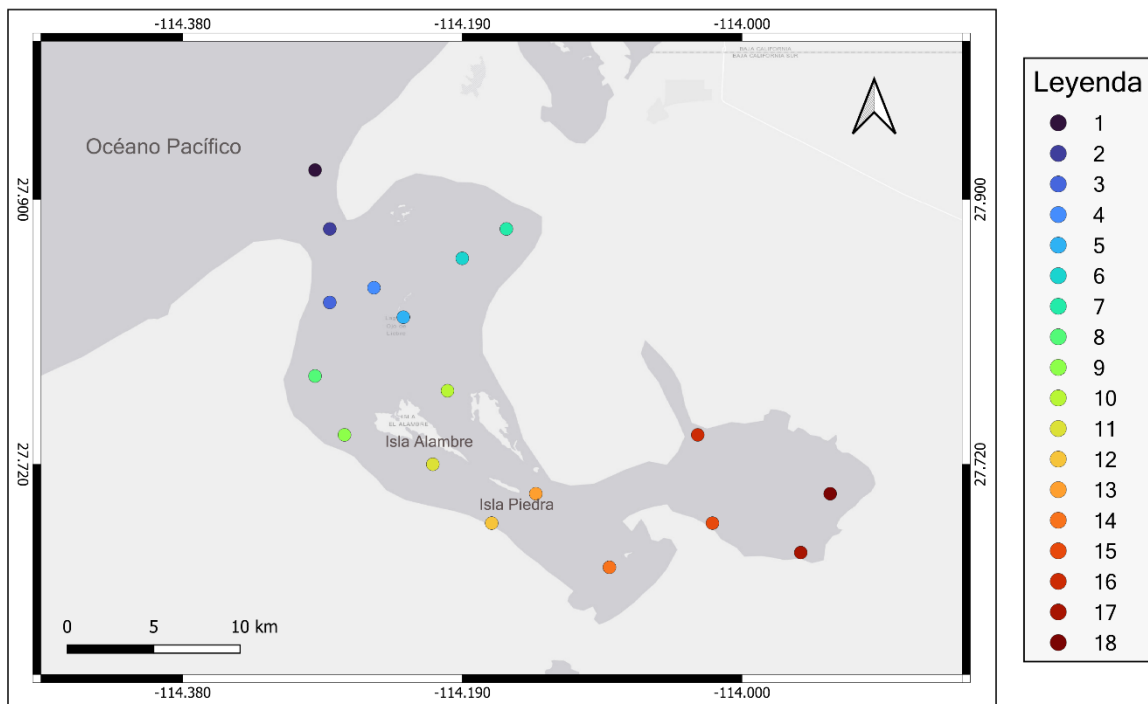


Figura 2. Estaciones de muestreo en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S.

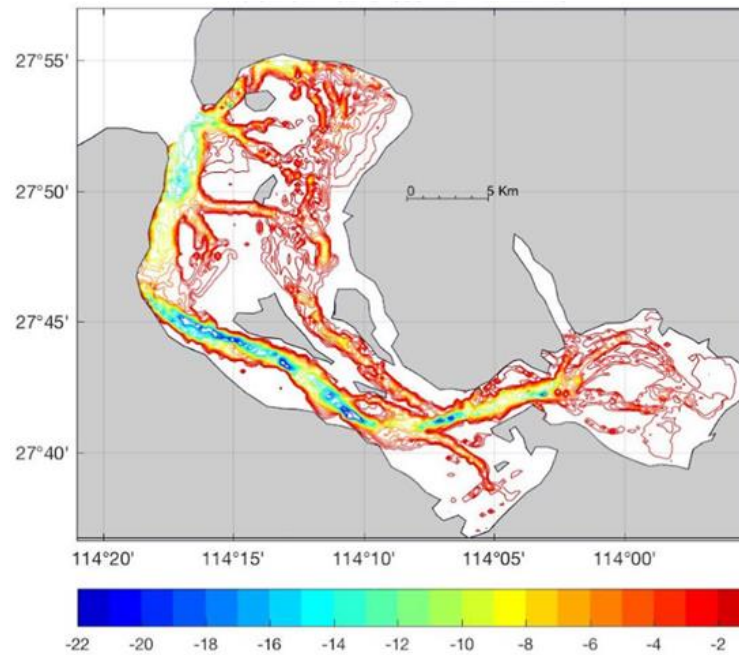


Figura 3. Batimetría en Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. La barra de colores indica la profundidad en metros. Elaborado por Dr. Adán Mejía Trejo.

### Hipótesis

Dado que las características de las masas de agua del océano adyacente a LOL varía estacionalmente, se plantea la hipótesis de que, durante la primavera y el verano, la fuente dominante será ASA; mientras que en otoño e invierno predominará AStS. Además, debido a la existencia de un gradiente de salinidad que se extiende desde la boca hacia el interior de la laguna, influenciado por el proceso de evaporación, se anticipa un incremento en las concentraciones CID y la alcalinidad total (AT). Esta hipótesis se basa en la presencia del ion bicarbonato  $[\text{HCO}_3^-]$  y boratos  $[\text{B}(\text{OH})_4^{3-}]$  los cuales son aceptores de protones y componentes de mayor concentración en la AT, pero el primero también lo es en la composición del CID. Ambos aniones son macroconstituyentes de la salinidad, por lo tanto, se sugiere que dicho gradiente es el resultado del tiempo de residencia del agua y que resulta en cambios por la evaporación, la cual está modulada principalmente por el viento.

## Objetivos

Evaluar la dinámica estacional del sistema del CO<sub>2</sub> en la Laguna Ojo de Liebre (LOL) considerando dos factores principales: 1) el efecto de la advección estacional de masas de agua superficiales, en combinación con el bombeo por mareas y 2) el efecto de la evaporación que modifica las variables del sistema del carbono.

- Evaluar la variabilidad espacial y temporal de los parámetros relacionados con el sistema de carbono en LOL, una laguna hipersalina con influencia de eventos de surgencias y cambios estacionales en la advección de masas de agua.
- Realizar una estimación, por primera vez en LOL, de las variaciones estacionales de los flujos de intercambio de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el medio marino, e identificar los factores y procesos clave que la controlan dichos intercambios.

## Materiales y métodos

### Colecta de muestras discretas en campo y su análisis

La colecta de muestras se llevó a cabo en cuatro temporadas: agosto y noviembre de 2021 y en marzo y junio de 2022, las cuales comprendieron períodos de mareas postmuertas, vivas y muertas. Se colectaron muestras discretas superficiales en 18 estaciones fijas a lo largo de la laguna (Fig. 1), con una botella Niskin, de la cual se extrajeron 125 mL de agua y se almacenó en botellas de borosilicato. Las muestras discretas fueron fijadas con cloruro de mercurio (HgCl<sub>2</sub>) con base en los procedimientos estándares recomendados para el análisis del sistema del CO<sub>2</sub> (Dickson *et al.*, 2007), y fueron almacenadas para su posterior análisis. En cada

estación se realizaron lances con un CTD CastAway para generar perfiles de temperatura ( $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ) y salinidad [ $\pm 0.1$  (PSS-78)]. Mediante las variables termohalinas se hizo el cálculo de la densidad con el uso del programa Ocean Data View (versión 5.6.5).

En el laboratorio, se determinó el CID de las muestras discretas con el uso de un método coulométrico descrito por Johnson *et al.* (1987), con el uso de un coulómetro marca UIC. Se utilizó material certificado de referencia (A. Dickson, Scripps, UCSD) para la calibración de los equipos y para determinar la precisión y exactitud en los análisis, donde la incertidumbre tiene un rango de  $\pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ . También, se midió la AT con una solución titulante de HCl 0.1 M en NaCl 0.7 M, calibrada contra material de referencia certificado (CRM) al inicio y al final de una serie de diez muestras, en un sistema de titulación automático (Model P-TA, PONTUS, México; <http://www.pontusbaja.com>). Los valores de CID y AT, además, fueron normalizados contra la salinidad para evaluar los efectos por evaporación y, para ello se utilizó la siguiente ecuación  $AT_n = \frac{AT * S_o}{Salinidad}$ , donde  $S_o$  es el valor de la salinidad de cada muestreo de la estación oceánica (Fig. 2, estación 1). La normalización elimina las posibles variaciones de la salinidad debida al efecto de la evaporación en el interior de la laguna, y considerando que la única fuente de agua es el océano adyacente, en el caso de la normalización de AT, los posibles cambios de  $AT_n$  pueden atribuirse a procesos biológicos o químicos (Millero, 2013). Posteriormente, con las mediciones de CID y AT (junto con la temperatura, presión y salinidad *in situ*) se calculó el pH (escala de Protones Totales;  $pHT_{Tot}$ ) y la presión parcial del  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) utilizando el software CO2SYS (Lewis y Wallace, 1998; Orr *et al.*, 2018). En los cálculos se utilizaron las constantes de disociación para carbonatos propuestas por Lueker *et al.* (2000).

La magnitud de los vientos fue obtenida a partir de promedios mensuales del viento ( $m \cdot s^{-1}$ ) correspondiente a las fechas de muestreo, generados a partir de promedios diarios capturados por la estación meteorológica de CICESE <http://redmar.cicese.mx/emmc/webm/emmc.php?nvar=now&nsta=BLAN&nday=2>. La precipitación y evaporación de la región se obtuvieron de los datos horarios del conjunto ERA5 de la base de datos Copernicus <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.

Se calculó el índice de surgencia para cada muestreo, con el uso del índice de Bakun, con datos obtenidos a partir de promedios diarios de los transportes costeros impulsados por el viento, calculados a partir de los análisis de presión en la superficie cada seis horas, y capturados por la NOAA <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>.

### **Tiempo de residencia**

Para el cálculo del tiempo de residencia del agua se aplicó el modelo biogeoquímico LOICZ-IGBP descrito por Gordon *et al.* (1996). Para el balance de agua y sal se asumió que el volumen de LOL permaneció constante a escalas mayores de un ciclo de marea ( $dV_{\text{Syst}}/dt = 0 = V_Q + V_P - V_E + V_G + V_O + V_R$ ), de tal forma que el volumen residual ( $V_R = V_{\text{in}} - V_{\text{out}}$ ) compensa las pérdidas o ganancias netas de agua dulce, de acuerdo con la ecuación:

$$V_R = -(-V_Q - V_P + V_E - V_G - V_O) \quad (1)$$

$$V_R = -(V_E) \quad (2)$$

Las variables del modelo son el volumen del sistema de LOL, los flujos de agua dulce aportados por ríos ( $V_Q$ ), agua subterránea ( $V_G$ ), precipitación pluvial ( $V_P$ ) y evaporación ( $V_E$ ). Sin embargo, debido a que los flujos de agua dulce en este sistema suelen ser limitados, a causa de la escasa precipitación ( $V_P$ ), el nulo aporte de ríos ( $V_Q$ ) o agua subterránea ( $V_G$ ), se consideraron como “cero” el aporte, por lo que el estado estacionario ( $\frac{dv}{dt} = 0$ ) para LOL se puede representar únicamente en función de la evaporación ( $V_E$ ) y el flujo residual ( $V_R$ ) (2). Se considera además que las sales disueltas fueron removidas o adicionadas a LOL solamente por procesos de mezcla y advección ( $V_X$ ) de acuerdo con la ecuación (Smith y Hollibaugh, 1997):

$$V_X = (V_R S_R) / (S_{Ocn} - S_{Syst}) \quad (3)$$

$$S_R = S_{Ocn} + S_{Syst} / 2 \quad (4)$$

donde  $S_{Ocn}$  es la salinidad del océano y  $S_{Syst}$  la salinidad del sistema en LOL. Los datos obtenidos en las estaciones 1-3 se consideraron como valores “oceánicos”, mientras que el resto de las estaciones serán promediadas para generar el valor representativo del sistema de la laguna. Con la información anterior, se estimó el tiempo de residencia ( $\tau$ ), mediante la ecuación:

$$\tau = V_{Syst} / (V_X + |V_R|)$$

### **Flujos de CO<sub>2</sub>**

Los flujos de CO<sub>2</sub> ( $F$ ) se calcularon utilizando la siguiente ecuación:

$$F = 0.24 \alpha k \Delta pCO_2 \quad (5)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de solubilidad del CO<sub>2</sub> (Weiss, 1974),  $k$  es la velocidad de transferencia del gas CO<sub>2</sub> y  $\Delta pCO_2$  es la diferencia entre la presión parcial del CO<sub>2</sub> del

agua y el aire ( $\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_{2\text{ocn}} - p\text{CO}_{2\text{atm}}$ ). Para obtener la  $p\text{CO}_{2\text{ocn}}$  se utilizó la base de datos generada de CID y AT junto con la temperatura, salinidad y presión para importarla al programa CO2SYS (Lewis y Wallace, 1998). Se usaron las constantes propuestas por Mehrbach *et al.* (1973), y finalmente, la  $p\text{CO}_{2\text{atm}}$  fue obtenida por estación del año a partir de datos mensuales de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/CMDL/CCGG airsampling network; disponible en <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>), este parámetro varió entre 414.42  $\mu\text{atm}$  y 420.94  $\mu\text{atm}$  durante el periodo de muestreo 2021 y 2022. Para estimar la magnitud del flujo de  $\text{CO}_2$  entre el océano y la atmósfera se calculó la constante  $k$  con el uso de la parametrización dada por Wanninkhof (2014):

$$k = 0.251 u_{10}^2 \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad (6)$$

Donde  $u_{10}$  es la velocidad del viento a 10 m de altura, obtenida a partir de promedios diarios generados por la estación meteorológica de CICESE, localizada en las coordenadas 28° 57 N y 113° 33 W, y asumiendo que la influencia del viento ocurre de manera uniforme en toda la superficie del sistema, finalmente  $Sc$  es el número de Schmidt, calculado de acuerdo con Wanninkhof (2014).

## Resultados

En este trabajo se evaluó la dinámica estacional de temperatura, salinidad y variables del sistema del  $\text{CO}_2$  a partir de la colecta de muestras discretas en los meses correspondientes a las estaciones del año. En las siguientes secciones, los muestreos serán denominados con una "M" y el número del mes correspondiente: M08 para agosto de 2021, M11 para noviembre de 2021, M03 para marzo de 2022 y M06 para

junio de 2022. Asimismo, serán ordenados de menor a mayor, aunque los muestreos hayan sido realizados en años consecutivos.

### **Variabilidad estacional en LOL**

La figura 4 muestra un diagrama de Hovmöller que representa la evolución temporal del índice de surgencia (CUI, por sus siglas en inglés) a lo largo de más de 50 años, desde 1967 hasta 2022. Se observa que, durante los meses de primavera y verano, se registraron los valores más altos del índice, lo cual marca un patrón estacional que es consistente con la época de surgencias de la región. Además, se destaca la presencia de valores inusualmente altos ( $\sim 180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ ) en el CUI durante el período de 2010 a 2012. Estos picos anómalos están relacionados con un evento La Niña fuerte (anomalías negativas en la temperatura superficial del mar de  $1.0$  a  $1.4^\circ\text{C}$ ), que ejerció una gran influencia sobre las condiciones de surgencia durante ese lapso temporal. También, se aprecian valores mínimos que son anteceditos por valores máximos. Por ejemplo, después del período La Niña 2010-2012 se observa que el CUI descendió a  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$  aproximadamente, lo cual coincide con un evento El Niño muy fuerte (anomalías positivas de  $\geq 2.0^\circ\text{C}$ ). Este patrón se observa de manera consistente a lo largo del período analizado. El período de muestreo se realizó durante un evento débil de La Niña (anomalías negativas  $\leq 1.0^\circ\text{C}$ ) (NOAA, 2023).

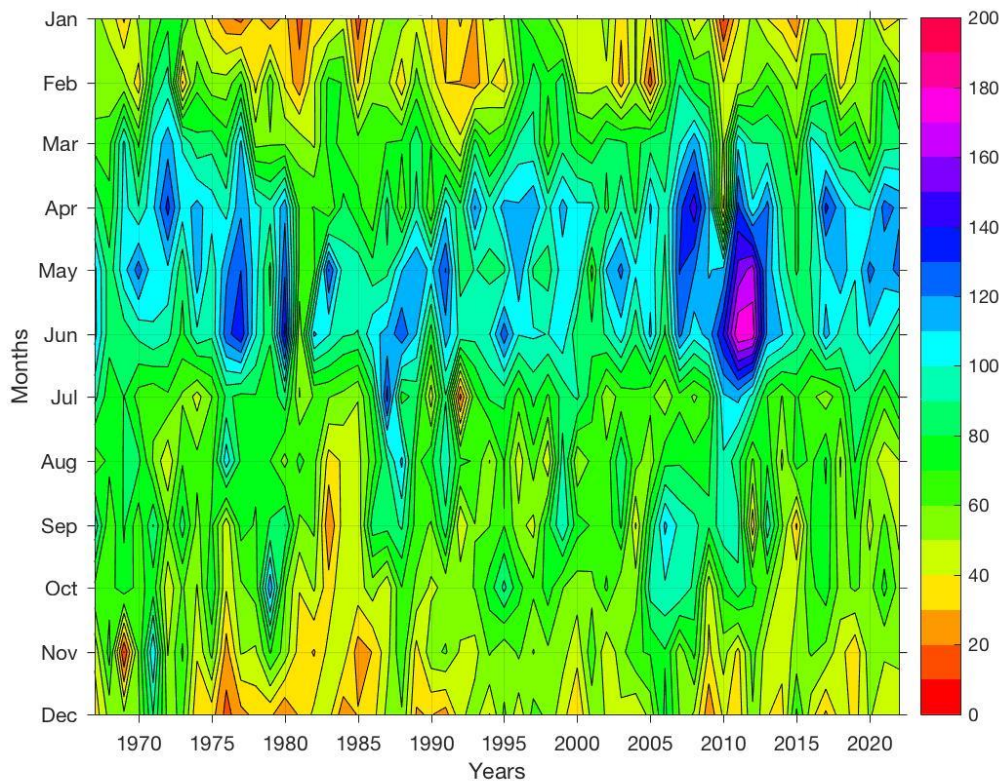


Figura 4. Promedios mensuales del índice de surgencia (barra de colores) para el periodo 1967 a 2022 en BSV. Los eventos de surgencias ocurren a partir de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ . Elaborado por el Dr. Adán Mejía Trejo.

De manera análoga, la figura 5 proporciona una visión general del CUI durante 2020 a 2022, incluyendo el período de muestreo. Durante este lapso temporal, el índice señaló la presencia de eventos de surgencias en dos de los muestreos realizados. En específico, durante los días de muestreo de M03 y M06, se registraron promedios de CUI de 168 y  $102.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ , respectivamente. La ocurrencia de los eventos es consistente con el patrón estacional y la época de surgencias de la región. Además, estos eventos coincidieron con el periodo de marea viva, donde el máximo rango de marea se observó durante M06, con un valor aproximado de 225 cm.

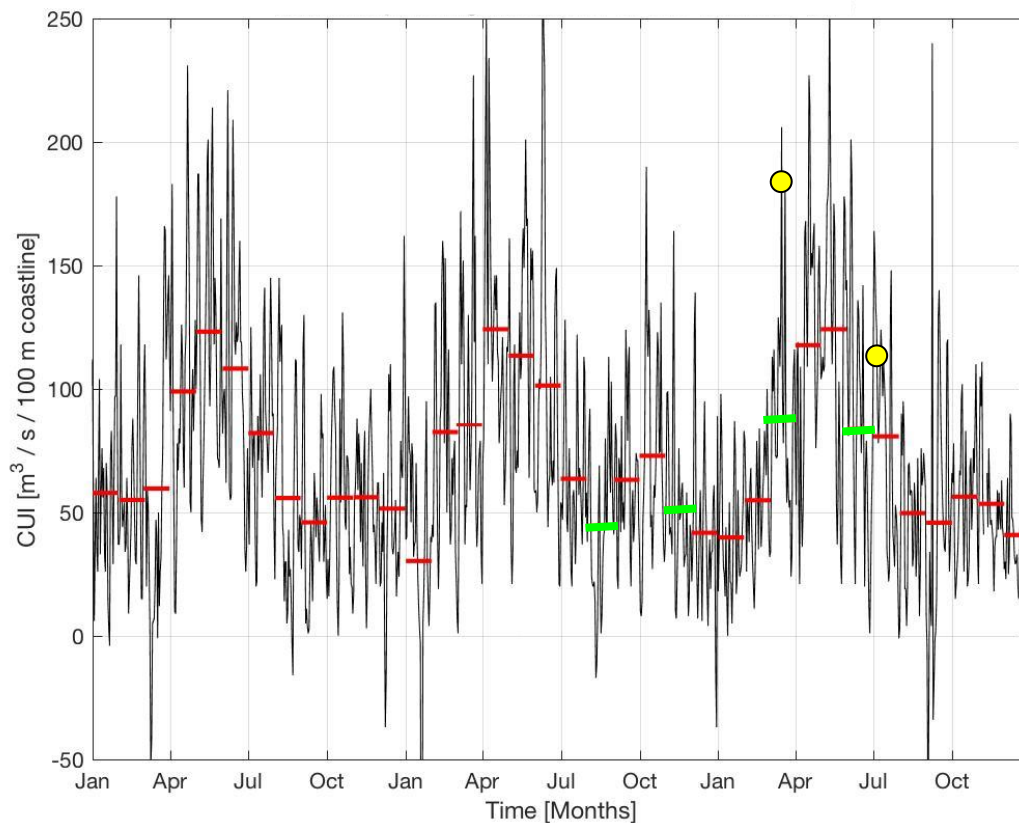


Figura 5. Serie de tiempo mensual del índice de surgencia para el periodo 2020 a 2022. Las líneas rojas indican el promedio mensual, las líneas verdes señalan los meses correspondientes a los muestreos y los círculos amarillos los eventos de surgencias durante los muestreos. Elaborado por el Dr. Adán Mejía Trejo.

Los perfiles verticales de temperatura y salinidad revelaron una marcada estacionalidad en LOL (Fig. 6). En general, la temperatura mostró una columna de agua bien mezclada, pero con diferentes intervalos en cada muestreo, es decir, con gradientes estacionales. El valor máximo promedio se observó en M08 (verano tardío) con un promedio de  $25.66 \pm 0.48^{\circ}\text{C}$ , mientras que el mínimo promedio se registró en M03 (primavera), con  $16.75 \pm 0.34^{\circ}\text{C}$ . Además, se identificó una estratificación leve en la zona interna de la laguna en los perfiles de M03, M08 y M11, lo cual podría estar relacionado con el calentamiento de la superficie por la radiación solar. Con excepción

de lo anterior, los cuatro muestreos presentaron homogeneidad térmica en la columna de agua a lo largo del sistema de LOL, lo cual denota, además, que las muestras de agua superficiales son representativas de la columna de agua.

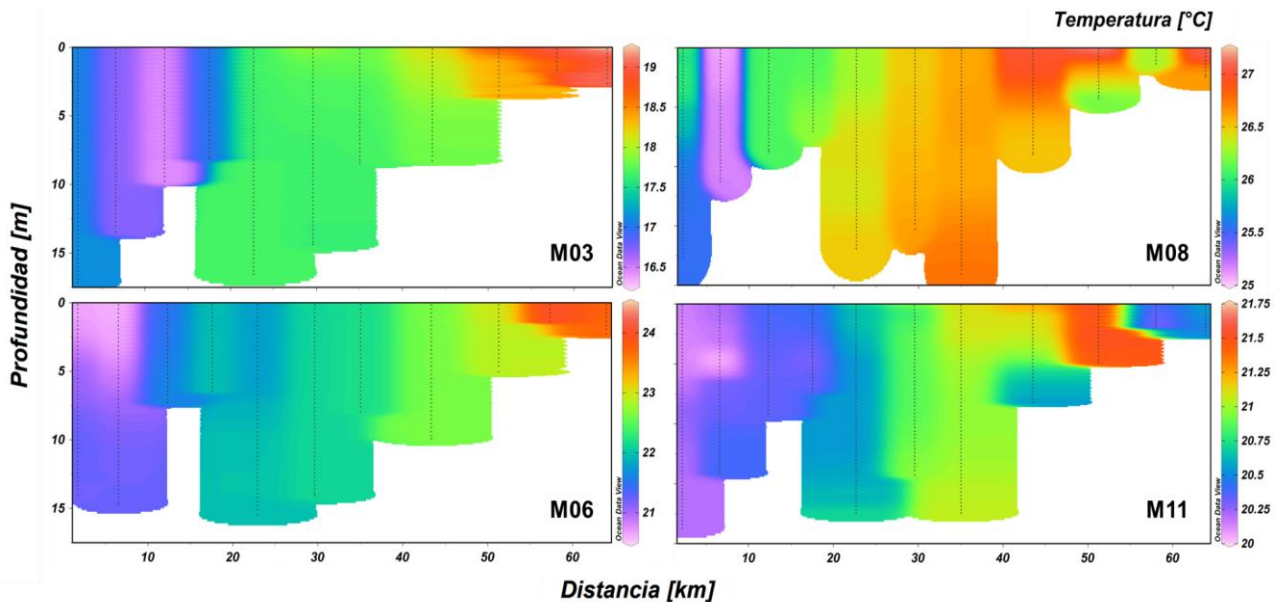


Figura 6. Perfiles de temperatura de los muestreos. La barra de colores indica los diferentes intervalos de temperatura de cada muestreo.

Con respecto a los perfiles de salinidad (Fig. 7), debido a que esta es una variable conservativa, los rangos no fueron tan distintos de un muestreo a otro. De manera similar a la temperatura, la salinidad presentó un incremento gradual asociado a las estaciones del año, donde el valor máximo promedio se observó en M08 (verano tardío) con  $37.98 \pm 3.33$  y el mínimo promedio en M03 (primavera) con  $35.98 \pm 2.25$ . La variabilidad de la salinidad en las estaciones cercanas a la boca de la laguna fue baja, en comparación con la de la temperatura, sin embargo, los cambios permitieron identificar la señal estacional de las masas de agua que incursionan en la laguna. Para determinar el efecto de la advección en LOL, se utilizó como referencia la clasificación de las masas de agua utilizando diagramas T-S descritos por Durazo y Baumgartner (2002) (Fig. 8, Tabla I). Con ello, se buscó detectar hasta qué punto se extendió la

influencia de las masas de agua superficiales en las estaciones cercanas a la boca de LOL, considerando una variabilidad estacional. En este estudio, se observaron valores ligeramente modificados en comparación con los rangos reportados para cada masa de agua, lo cual se atribuye al calentamiento de la capa superficial y la evaporación, aspectos que afectan la distribución de las masas de agua. Además, dado que la variación de la salinidad en esta laguna costera en cada evento de monitoreo fue mayor a 10 unidades, se le consideró como el trazador principal que permitió identificar el agua fuente (región oceánica) del proceso de evaporación (sistema LOL).

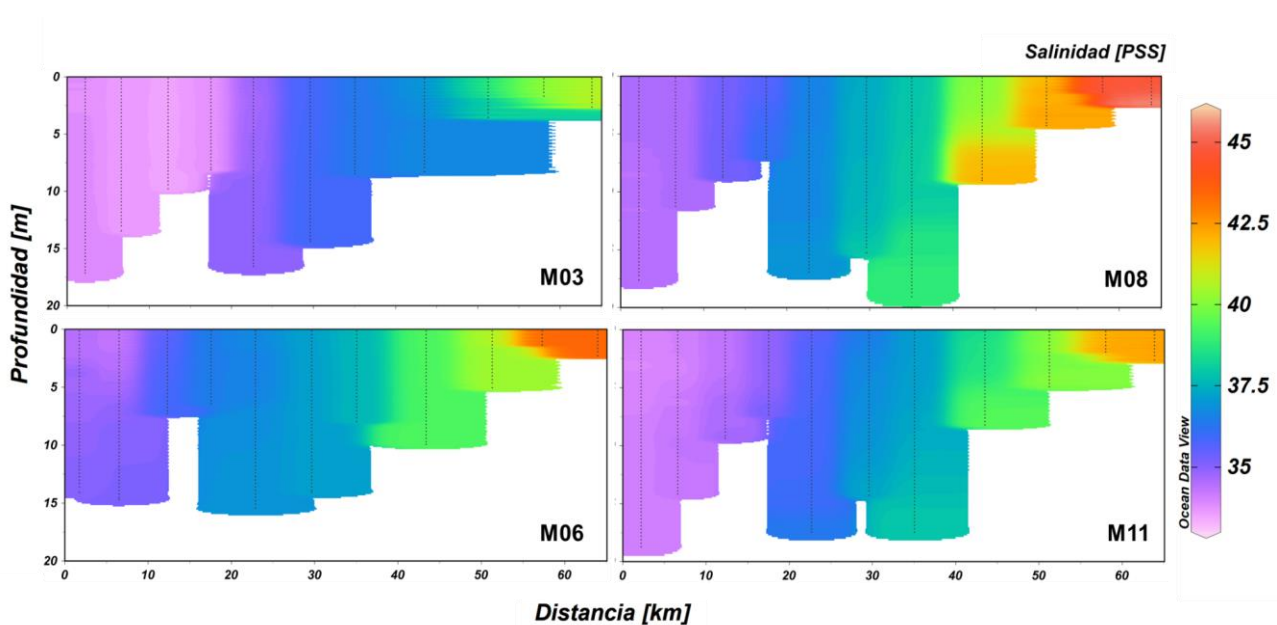


Figura 7. Perfiles de salinidad de los muestreos. La barra de colores indica el intervalo de salinidad.

Con base en lo anterior, en este trabajo la señal oceánica se detectó principalmente en las tres estaciones cercanas a la boca. En el diagrama T-S de la figura 8 se identificó la presencia de ASA en M03 y M11 con una temperatura menor a 18°C ( $17.60 \pm 1.72^\circ\text{C}$ ) y salinidad menor a 34 ( $33.78 \pm 0.20$ ), mientras que ATr se observó en M06 y M11 con temperaturas menores a 21°C ( $20.40 \pm 0.19^\circ\text{C}$ ) y salinidad

menor a 34.4 ( $34.27 \pm 0.16$ ). AStS se detectó en M06 y M08 con una temperatura menor a 25°C ( $24.46 \pm 2.57^\circ\text{C}$ ) y salinidad mayor a 34.4 ( $34.67 \pm 0.24$ ).

Tabla II. Promedios superficiales de la temperatura y salinidad con la desviación estándar para cada muestreo. La región oceánica se comprende por las estaciones 1-3, y el sistema LOL por las estaciones 4-18. Según Durazo y Baumgartner (2002), la señal de ASA es entre 10-21°C y salinidad <34; y AStS es entre 20-28°C y >34.4.

|            | Región oceánica  |                  | Sistema LOL      |                  | Masas de agua presentes |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------|
|            | T (°C)           | S                | T (°C)           | S                |                         |
| <b>M03</b> | $16.76 \pm 0.34$ | $33.70 \pm 0.14$ | $18.30 \pm 0.79$ | $36.41 \pm 2.27$ | ASA                     |
| <b>M06</b> | $20.91 \pm 0.49$ | $34.78 \pm 0.63$ | $22.47 \pm 0.86$ | $38.04 \pm 2.77$ | Atr + AstS              |
| <b>M08</b> | $25.73 \pm 0.57$ | $34.81 \pm 0.41$ | $26.38 \pm 0.64$ | $38.40 \pm 3.34$ | AstS                    |
| <b>M11</b> | $20.25 \pm 0.13$ | $34.16 \pm 0.19$ | $20.65 \pm 0.52$ | $37.29 \pm 2.64$ | ASA + ATr               |

Los meses con dominio de ASA coinciden con un aumento en la magnitud del viento en dirección noroeste, lo que podría ayudar a desplazar la masa de agua hacia el sur. En cambio, los meses con influencia de AStS corresponden a los meses de verano, cuando el flujo de la CC comienza a debilitarse. En el caso de M11, donde hubo presencia tanto de ASA como de ATr, podría deberse a que en la región los meses de otoño fungen como un período de transición hacia el debilitamiento de la magnitud del viento, lo cual fue reflejado en la presencia de ambas masas de agua en la laguna durante invierno.

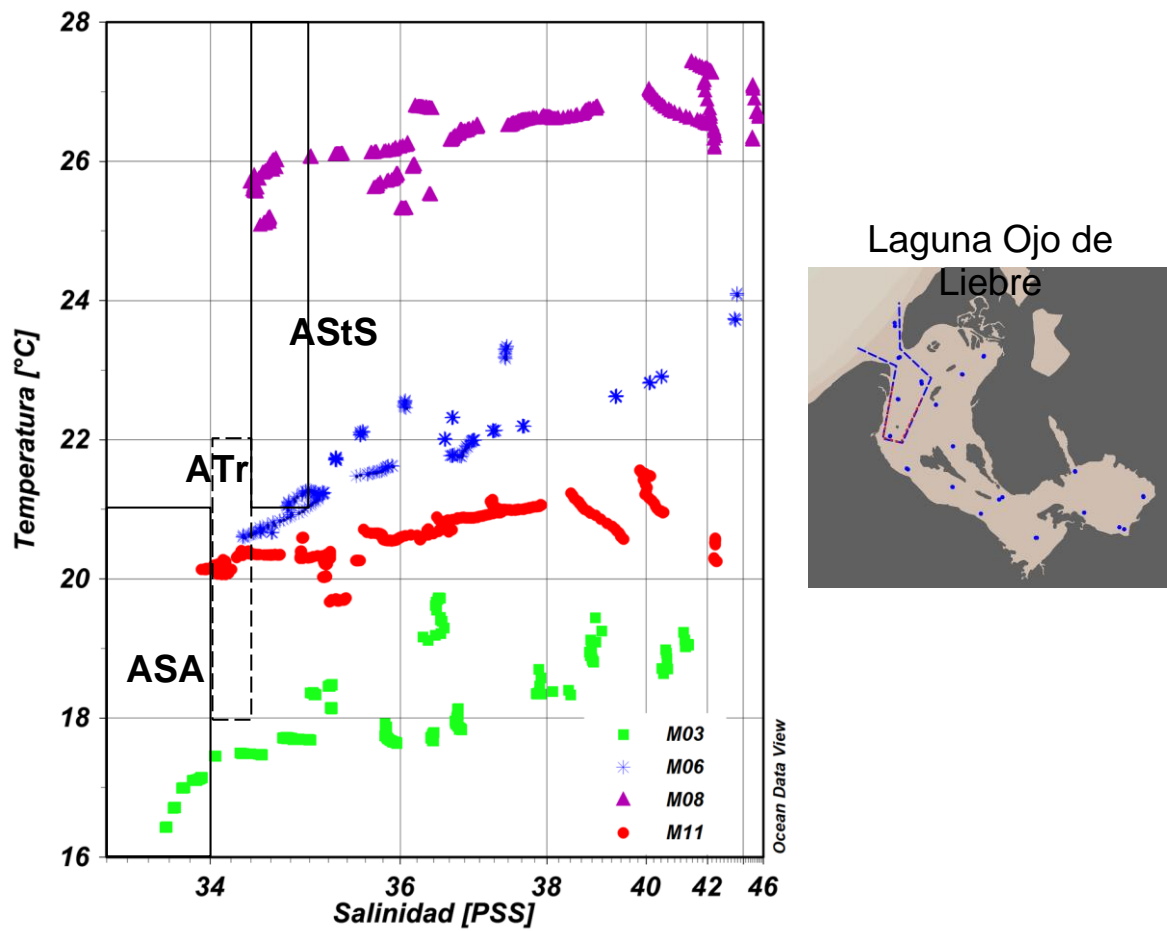


Figura 8. Diagrama estacional de temperatura vs salinidad que representa la influencia del océano adyacente en la Laguna Ojo de Liebre (izquierda). Se muestra una imagen de la laguna donde se indican las estaciones con influencia oceánica. La línea punteada azul marca las estaciones mayormente influenciadas, la línea punteada roja indica las que tienen menor influencia (derecha). ASA: Agua Subártica. AStS: Agua Subtropical Superficial. ATr: Agua Transicional. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

La figura 9 muestra la evolución temporal de las variables medidas. Al igual que en los perfiles verticales de temperatura, el gradiente estacional es evidente en esta variable (Fig. 9A). Los valores más altos de temperatura se presentaron en M08, seguidos de M06, M11 y finalmente M03. El CID exhibe el máximo gradiente en M03, disminuyendo a medida que avanzan los meses (Fig. 9B). Por otro lado, el gradiente de AT no muestra cambios abruptos, pero se percibe un aumento en la concentración de la variable de M03 a M08, seguido de un descenso en M11 (Fig. 9C). Por su parte,

el pH responde a la señal estacional de las variables previamente descritas (Fig. 9D). En la región oceánica (estaciones 1-3), se registraron los valores más bajos de pH en M03 (7.88-7.9); mientras que en M11 se observan los valores más altos (7.97-8.46). El comportamiento del pH no presenta un patrón claro entre los muestreos, aunque es posible observar un aumento hacia el interior, este no está claro en M06 y M08 que corresponden a los meses de verano. Sin embargo, el mínimo presentado en M03 coincide con el máximo de CID, asociado a los eventos de surgencias. Por otro lado, la  $p\text{CO}_2$  manifestó un incremento hacia el interior mayor a  $300 \mu\text{atm}$  en M03,  $\sim 30 \mu\text{atm}$  en M06,  $\sim 106 \mu\text{atm}$  en M08 y  $\sim 385 \mu\text{atm}$  en M11 (Fig. 9E). La mayor diferencia entre la boca y el interior se registró en M11, pero la  $\Delta p\text{CO}_2$  muestra que durante este muestreo se exhibieron los valores más bajos, después de M03, con un promedio de  $103$  y  $72 \mu\text{atm}$ , respectivamente. Adicionalmente, el tiempo de residencia del agua en LOL fue diferente para cada muestreo, donde en M03 fue de 60 días, 112 días para M06, en M08 fue de 72 días y 124 días para M11. Con todas las estimaciones, se obtuvo un promedio de  $92 \pm 30.7$  días.

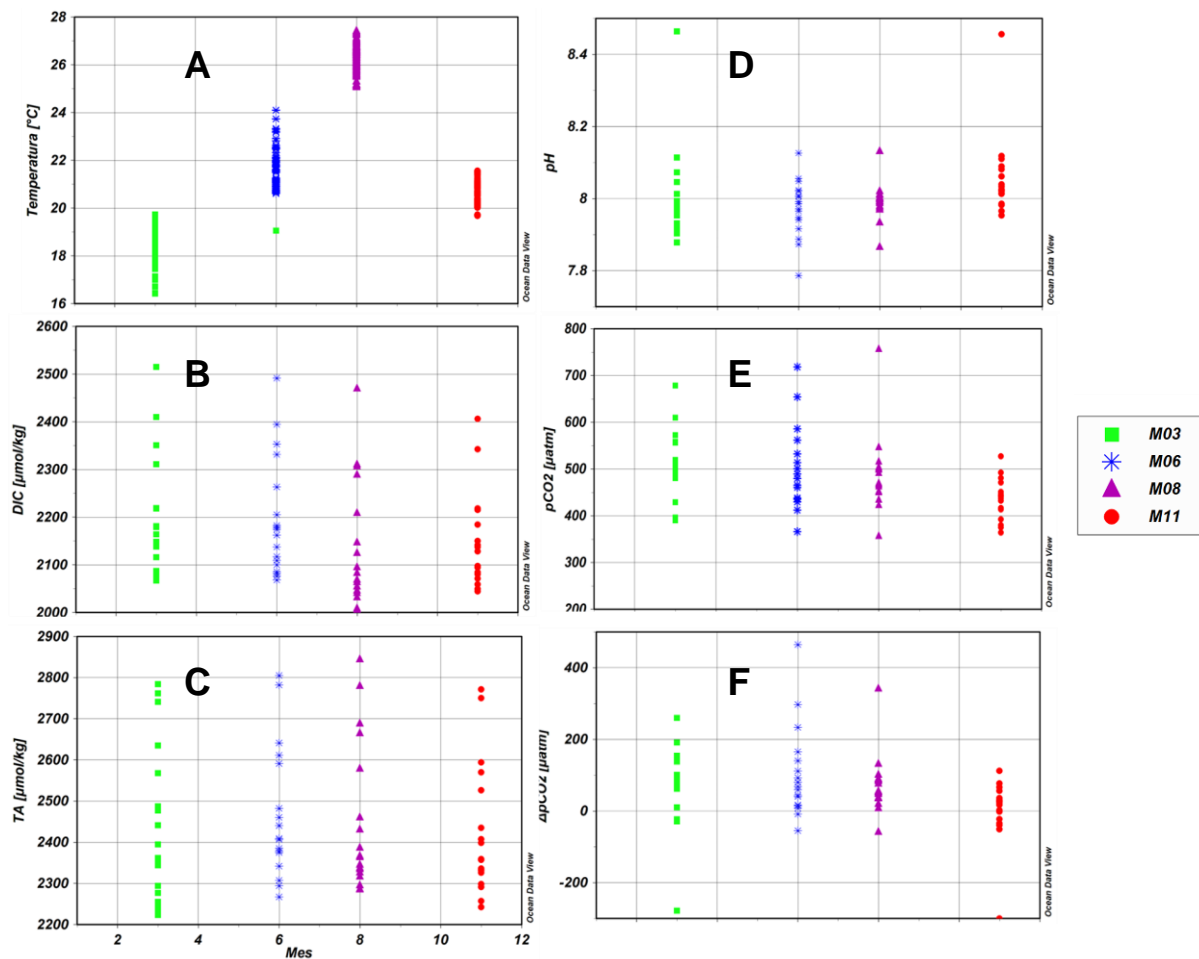


Figura 9. Serie de tiempo mensual de la temperatura (A), carbono inorgánico disuelto (CID; B), alcalinidad total (AT; C), pH (D),  $p\text{CO}_2$  (E) y  $\Delta p\text{CO}_2$  (F), registrado entre agosto de 2021 y junio de 2022 en 18 estaciones en LOL. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

### Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos

Los amplios intervalos observados en temperatura, salinidad y CID en todos los muestreos responden a la variabilidad espacial dentro de LOL, con una marcada diferencia entre estaciones de colecta en la boca y zona interna de la laguna. La distribución de los datos obtenidos en LOL, tanto en perfiles verticales (Figs. 6 y 7) como muestras discretas superficiales, mostraron una evidente zonificación, la cual estuvo presente en todas las variables en cada muestreo realizado. Sin embargo, a

pesar de la similitud en el patrón espacial entre muestreos, las magnitudes del gradiente fueron distintas.

Los datos superficiales de temperatura exhiben cierta heterogeneidad en el gradiente en todos los monitoreos (Fig. 10A), donde los valores más bajos se mantuvieron en las estaciones de la zona exterior, y los intermedios actuaron como la transición entre las cálidas que aumentan hacia la zona central e interior de la laguna. Asimismo, a pesar de que la distribución de la temperatura fue más homogénea entre las secciones de la laguna, se distingue el aumento de temperatura en la región cercana a la última isla (estación 13) y en las últimas dos estaciones (17 y 18).

Por otro lado, los perfiles de salinidad mostraron un evidente gradiente, que hace una diferenciación de las zonas de la laguna (Figs. 7 y 10B). Se identificó un primer grupo de la estación 1 a 10, la cual es la zona exterior y la más expuesta a los procesos de advección del océano adyacente. Después, las estaciones 11 a 14 presentan una tenue separación entre el grupo anterior, pero se optó por dividirlos por situarse en la zona central, en la zona de islas y marismas. Finalmente, en la zona interior de la laguna hay dos agrupaciones compuestas por las estaciones 15 y 16, y 17 y 18, respectivamente, pero se consideraron como un solo grupo. La diferenciación entre las zonas podría explicarse mediante la morfología y batimetría de la laguna y/o el tiempo de residencia del agua en cada zona.

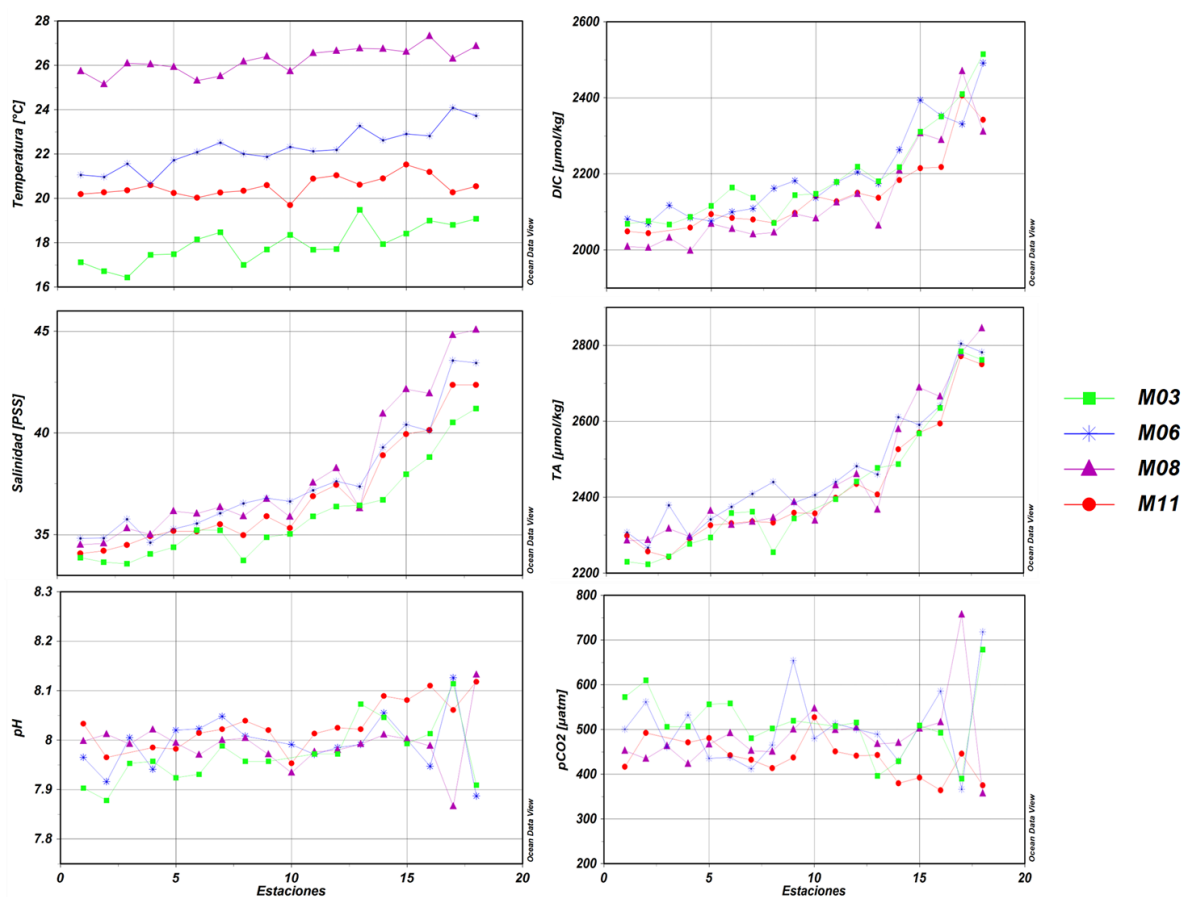


Figura 10. Distribución espacial de la temperatura (A), salinidad (B), pH (C), CID (D), TA (E) y pCO<sub>2</sub> (F) para cada estación de muestreo durante el período entre agosto de 2021 y junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

Con respecto a las variables del carbono, el gradiente espacial fue claro tanto en CID como en AT (Fig. 10D/E), debido a que en LOL la salinidad aumenta de la boca hacia el interior, por lo que hay un aumento de las sales disueltas de bicarbonato y borato y, por tanto, un incremento en ambas variables del carbono. En la porción oceánica de la laguna (estaciones 1-3), los valores de CID presentaron un intervalo de 2016 a 2088  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  con un ascenso gradual entre los muestreos. De manera general, las concentraciones de CID a lo largo de las estaciones de muestreo en la laguna manifestaron un incremento promedio de  $\sim 426 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  durante el periodo de monitoreo. La mayor diferencia entre la boca y el interior se presentó en M08, sin embargo, el valor máximo de la porción oceánica se observó en M06, y el máximo del

sistema se manifestó en M03. Con relación a AT, esta presentó concentraciones de 2297 a 2317  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la región oceánica durante el periodo de muestreo, con un ligero descenso en M11 y M03, seguido de un incremento en M06, el cual fue la máxima concentración de esta zona. La AT exhibió un incremento promedio de  $\sim 546$   $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  hacia el interior de la laguna, donde en M03 se observó la mayor diferencia entre la concentración de AT en las estaciones oceánicas y el interior de la laguna.

### **Identificación de procesos que modifican el sistema del $\text{CO}_2$**

La normalización de las variables del carbono permitió identificar los procesos que modifican al CID y AT en LOL. Para ello, se consideraron valores promedio de la región oceánica como el valor representativo del agua fuente (M03: 33.85, M06: 34.5, M08: 34.6, M11: 34.03). Con respecto a CIDn (Fig. 11), se destaca que en los cuatro muestreos a partir de la estación 10 la concentración de CIDn presentó una disminución hacia el interior de la laguna, lo cual sugiere que durante este periodo la dinámica en el interior estuvo dominada por procesos que consumen, secuestran o emplean especies del  $\text{CO}_2$ , los cuales pueden tener un origen biológico o químico, como la precipitación de carbonatos y/o fotosíntesis. En cuanto a la normalización de AT, esta manifestó un ascenso de 96  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  hacia el interior de la laguna en M03, mientras que en M06 se mantuvo relativamente constante la primera mitad de las estaciones, y presentó un ligero descenso hacia el interior. Por otro lado, en M08 y M11 el descenso de ATn hacia el interior es evidente. En general, el comportamiento de ATn durante el periodo de muestreo sugiere que la dinámica del sistema del carbono en M03 podría estar dominada por procesos que generan un aporte de AT como la disolución de carbonatos, mientras que en M06, M08 y M11 podrían estar dominados por procesos que consumen especies del  $\text{CO}_2$ , como la fotosíntesis.

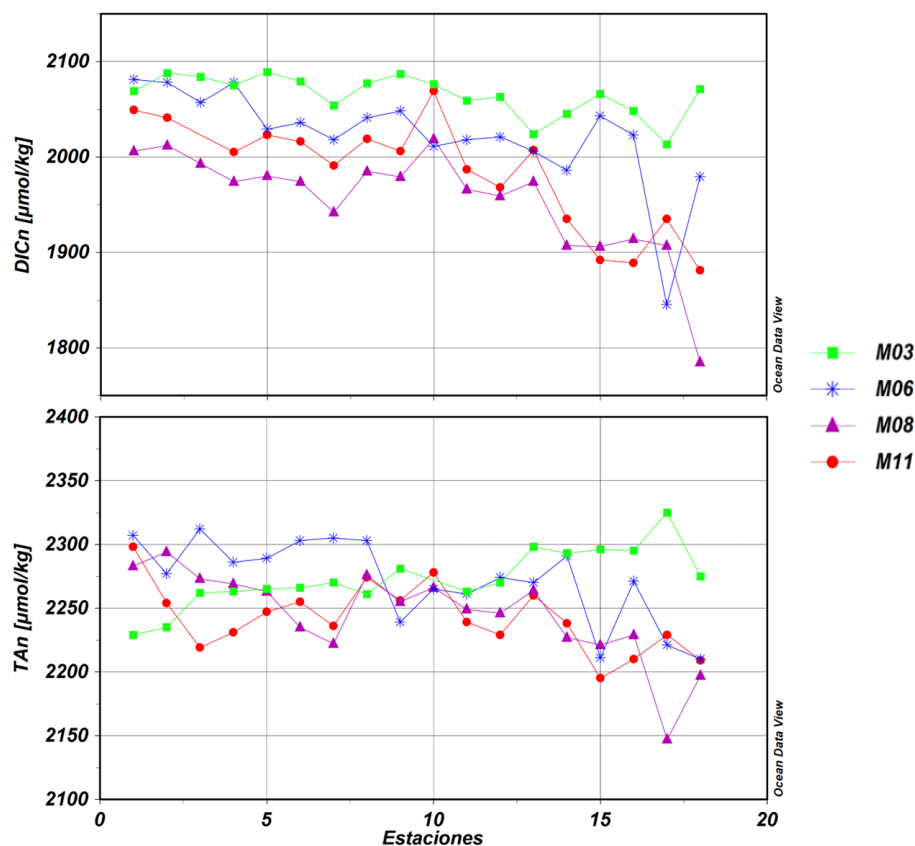


Figura 11. Distribución espacial de CIDn (arriba) y ATn (abajo). Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11. La normalización se hizo para cada evento de monitoreo, y usando un valor de referencia de salinidad de la primera estación (agua con condición oceánica).

## Discusión

### Variabilidad estacional en LOL

La BSV exhibe una marcada variabilidad estacional con respecto a las masas de agua superficiales presentes, que es de esperarse que se vea reflejada en las estaciones más cercanas a la boca de LOL. La estacionalidad de las masas de agua superficiales desempeña un papel fundamental en las propiedades físicas y químicas de la bahía y de la laguna a lo largo del año. En este estudio, se identificó la señal de ASA en primavera y otoño, mientras que AStS fue evidente en verano, lo cual difiere

ligeramente de la hipótesis planteada, dado que el agua de transición ATr se observó en verano y otoño. Estos resultados son consistentes con los reportados por Durazo y Baumgartner (2002), quienes indicaron que la bahía, al encontrarse en una zona de transición, experimenta una mayor influencia de ATr que de AStS durante el verano y otoño. Este punto es corroborado por Durazo (2015), quien analiza la zona de transición entre la CC y el agua cálida y más salina proveniente del Ecuador.

El tiempo de residencia del agua en LOL varía estacionalmente debido a los cambios en el patrón de vientos y el influjo de las mareas. Durante M11 se presentó el mayor tiempo de residencia, seguido de M06; los muestreos presentaron condiciones diferentes de surgencias y mareas. Es importante destacar que, un tiempo de residencia prolongado permite que las propiedades de la masa de agua se modifiquen notablemente (Ribas-Ribas *et al.*, 2011b). Sin embargo, el modelo utilizado para el cálculo del tiempo de residencia en este trabajo considera a la laguna como un solo sistema, lo que implica limitaciones para determinar cómo el tiempo de residencia influye en la dinámica del sistema del carbono de manera espacial en LOL.

Por otra parte, la época de surgencias costeras coincide con el flujo máximo de la CC (Bakun y Nelson, 1997). Además, el giro anticiclónico, identificado como semipermanente en estudios previos en BSV (Dawson, 1952; Wyllie, 1960; Palacios-Hernández, 1994; Amador-Buenrostro *et al.*, 1995), desempeña un papel importante en la estacionalidad tanto de BSV como en LOL. Tanto los eventos de surgencias como el giro responden al patrón de vientos característico de la región (Palacios-Hernández, 1994), es decir, ambos fenómenos están presentes cuando hay una elevada magnitud del viento. Por lo tanto, la laguna se enfrenta a diferentes factores que experimentan cambios estacionales, induciendo modificaciones en sus condiciones físicas y químicas a la misma escala temporal. Con base en lo anterior, y

considerando la condición mareal, se pueden proponer tres escenarios diferentes que podrían modificar las condiciones de la laguna. Si el giro y las surgencias costeras son dependientes de una alta magnitud del viento, los escenarios serían: (1) presencia de giro, (2) surgencias y marea vivas/muertas y (3) no hay giro ni surgencias, pero hay marea viva. Los primeros dos describirían los meses de primavera y verano, donde el primero sería el ideal para la productividad de la laguna, pues el giro distribuiría los nutrientes que acarrea el agua aflorada y estos serían incursionados por la marea. Después, el segundo es similar, pero con menor influencia de agua proveniente de las surgencias debido a la marea muerta. Por último, el tercer escenario describiría los meses de otoño e invierno cuando el viento se debilita y con ello las surgencias y el giro se disipan, sólo queda la marea para alimentar a la laguna del agua presente en la bahía.

La influencia estacional de las masas de agua y las surgencias costeras se reflejó en las concentraciones de las variables del carbono, principalmente en el CID durante M03, bajo la presencia de agua fría y menos salina, producto de las surgencias y el predominio de ASA. En la figura 12 se muestra la relación entre la salinidad y el CID, donde se aprecia una relación lineal y un gradiente estacional. En M03 (primavera), se registraron las mayores concentraciones de CID, con valores entre 2067 y 2515  $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$  a lo largo de la laguna. Después, en M06 (verano), a pesar de que las temperaturas fueron mayores que en primavera (con un promedio de 22.25°C), y la salinidad de la zona exterior se asemeja a la de M11 (otoño tardío), las concentraciones de CID fueron más altas que en el otoño tardío, con valores entre 2044 y 2406  $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Lo anterior destaca que los eventos de surgencias registrados en M03 y M06 enriquecieron de CID a la laguna, principalmente en M03 donde se muestreó durante la marea viva más alta. Por tanto, M03 corresponde al primer

escenario propuesto, en el cual están presentes el giro anticiclónico, las surgencias y la marea viva.

En contraste, al remover el gradiente de salinidad generado por el efecto de la evaporación, se exhibió una disminución en el CIDn en todos los muestreos a partir de la estación 10 (Fig 11). Estos resultados son consistentes con los de Ribas-Ribas *et al.* (2011b), en su estudio sobre los efectos de distintos procesos sobre el CID en Bahía San Quintín. Los autores encontraron que, en esta laguna costera, el CID disminuye de manera lineal conforme aumenta la salinidad en la bahía, principalmente en el Brazo San Quintín. Ribas-Ribas *et al.* (2011b) sugieren que esta disminución se debe a la presencia de praderas de *Zostera marina*, una especie de pasto marino que algunos estudios indican que, bajo condiciones limitantes de CO<sub>2</sub>, tiene la capacidad de absorber HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> mediante un mecanismo denominado bombeo de protones, el cual utiliza la enzima anhidrasa carbónica para asimilarlo (Beer y Rehnberg, 1997; Delille *et al.*, 2000; Hemminga y Duarte, 2000). En LOL también existen praderas de *Z. marina* (Sarur-Zanatta *et al.*, 1984; Cabello-Pasini *et al.*, 2004; Ward *et al.*, 2022; Fig. 12), y aunque el CID sugiere que los procesos de evaporación predominan sobre los procesos biológicos, el CIDn revela que hay un consumo de CO<sub>2</sub> hacia el interior de la laguna.

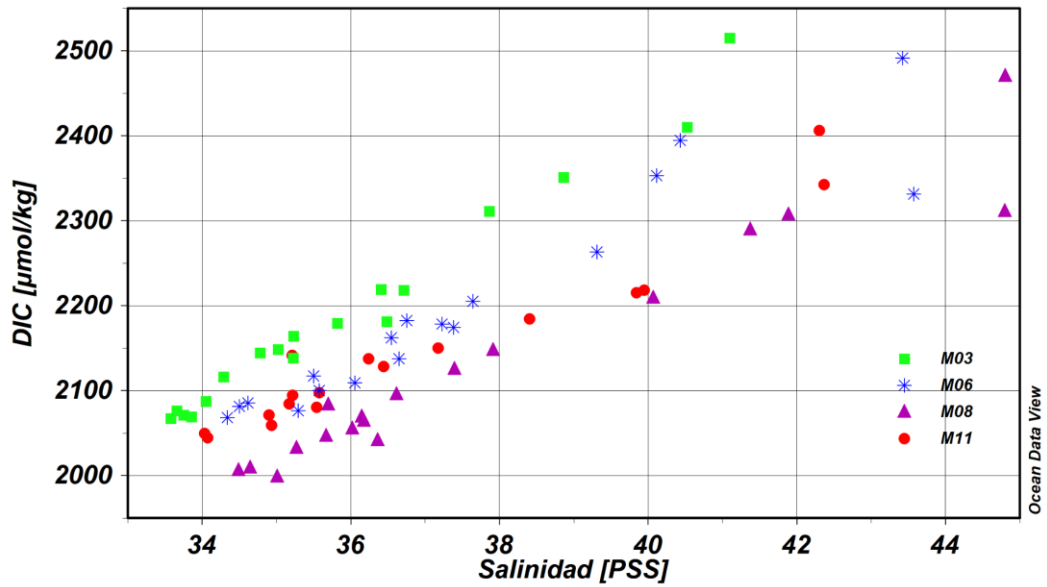


Figura 12. Diagrama de dispersión entre salinidad y CID de las muestras discretas para el período de agosto 2021 a junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

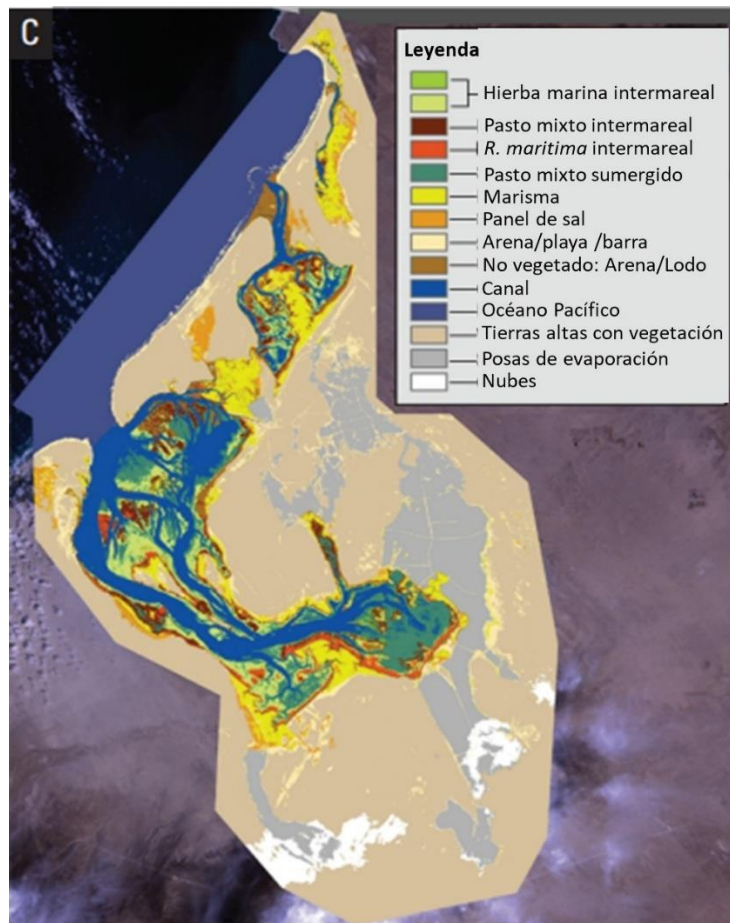


Figura 13. Distribución espacial de los pastos marinos y otros tipos de cobertura en las Lagunas Ojo de Liebre, Guerrero Negro y Manuela. Imágenes satelitales del año 1999 (Modificado de Ward et al., 2022).

Por otro lado, en la AT también se reflejaron los eventos de surgencias en M03. La figura 14 muestra la relación entre salinidad y AT, donde se observa que M03 presentó los valores más bajos de esta variable en la zona exterior/oceánica, en comparación con el resto de los muestreos. Esto podría estar relacionado con que, de manera natural, las zonas de surgencias experimentan el afloramiento de agua ASA que contiene baja salinidad y por tanto menor AT y además agua de menor pH y subsaturada de aragonita como consecuencia del arrastre de agua profunda corrosiva hacia la capa superficial (Harris *et al.*, 2013). Además, durante M03 se registró el menor intervalo de pH a lo largo de la laguna, lo cual coincide con el agua subsaturada y ácida producto de las surgencias. Este fenómeno se ha observado de manera consistente en diferentes zonas de surgencias, como en la costa de Oregon, EE. UU., el Golfo de Papagayo, Costa Rica y el Ártico (Feely *et al.*, 2008; Sánchez-Noguera *et al.*, 2018; Mathis *et al.*, 2001). Por otro lado, a pesar de que durante M03 se observaron valores bajos de AT en la entrada, este muestreo presentó la mayor concentración de AT a lo largo de la laguna, con excepción de la zona interior, donde M06 y M08 presentaron mayores valores que M03. Esto, por el contrario, no refleja el efecto de las surgencias que se esperaría que tuviese, es decir, bajas concentraciones de AT a lo largo de la laguna sino más bien efectos de evaporación como se muestra en la figura 11.

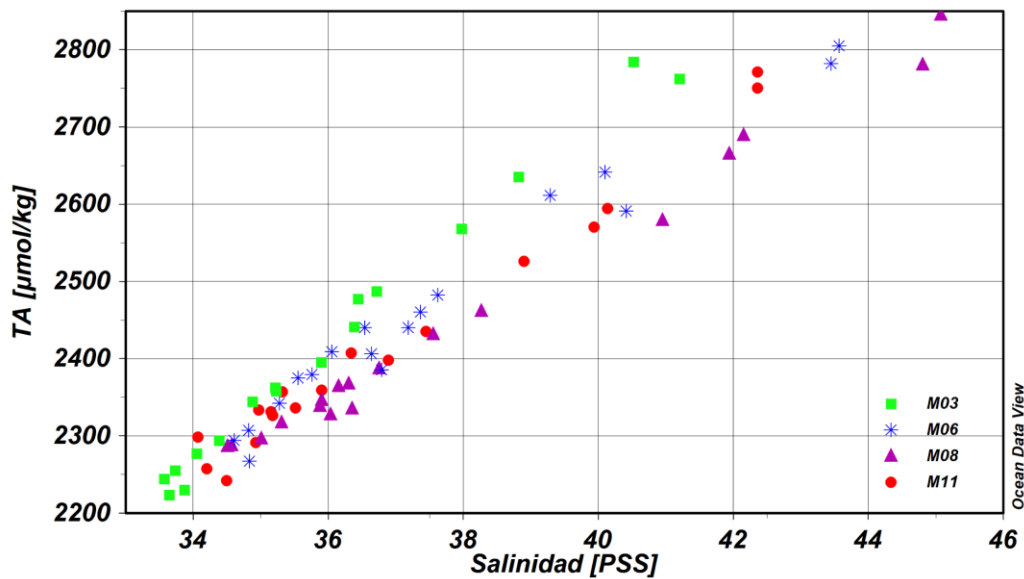


Figura 14. Diagrama de dispersión entre salinidad y AT de las muestras discretas para el período de agosto 2021 a junio de 2022. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

El papel de la laguna como una fuente o un sumidero de  $\text{CO}_2$  varía tanto espacial como temporalmente. En la boca, cerca de la fuente del agua de las surgencias, se espera que la laguna sea fuente de  $\text{CO}_2$  debido a que el agua transportada desde profundidades entre 75 a 100 m es rica en CID (Lara-Espinosa, 2007). Esto fue evidente en M03 y M06, donde se registraron valores superiores a  $10 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$  en la región oceánica. A pesar de que en la región oceánica se registraron con mayor frecuencia valores altos en los flujos de  $\text{CO}_2$  asociado a las surgencias, también se observaron picos positivos en el interior debido a que las aguas sobresaturadas de CID fueron transportadas por la marea. En cambio, en M06 la estación 15 presentó un pico que podría ser explicado por procesos de origen biológico, ya que se puede asumir que en esa zona el tiempo de residencia es bastante alto. En este estudio se registraron flujos positivos de  $\text{CO}_2$  en más del 80 % de los datos, de los cuales M06 presentó los valores máximos, seguido de M03, M08 y por último M11. No obstante, en estaciones al interior de la laguna actuó como sumidero de  $\text{CO}_2$  durante los cuatro muestreos, principalmente durante M11, pues en

este se registraron valores negativos a partir de la estación 14, mientras que en el resto de los muestreos solo se presentaron flujos negativos en las últimas dos estaciones (Fig. 15). La estimación promedio de los flujos de CO<sub>2</sub> para LOL fue diferente para cada muestreo, aunque todos positivos. Estos valores se sitúan dentro de los resultados reportados por Chen y Borges (2009) para otras lagunas costeras, pero son menores que otros ecosistemas costeros, como estuarios de macromarea (118 mmol·m<sup>-2</sup>·día<sup>-1</sup>), agua alrededor de manglares (51 mmol·m<sup>-2</sup>·día<sup>-1</sup>) y agua alrededor de marismas (64 mmol·m<sup>-2</sup>·día<sup>-1</sup>) compilado por Borges (2005). Con base en los resultados obtenidos, se concluye que LOL actúa como fuente de CO<sub>2</sub> en toda su superficie, especialmente durante eventos de surgencias, con la excepción de la zona más interna de la laguna, donde actúa como sumidero.

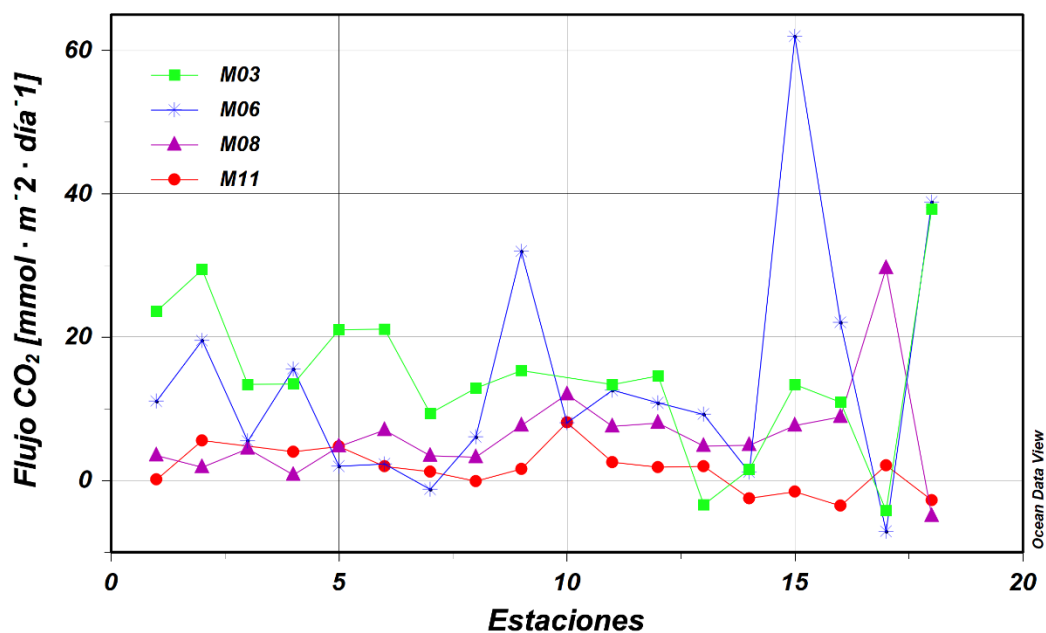


Figura 15. Flujos de CO<sub>2</sub> laguna-atmósfera a lo largo de las estaciones, desde el océano adyacente hasta la parte interna de la laguna. El cero en el eje Y representa el equilibrio. Promedio de los flujos de CO<sub>2</sub> en mmol·m<sup>-2</sup>·día<sup>-1</sup>: M03: 11.70, M06: 13.89, M08: 6.39 y M11: 0.20. Los cuadrados verdes representan a M03, los asteriscos azules a M06, los triángulos morados a M08 y los puntos rojos a M11.

## Variabilidad espacial en LOL

En este trabajo se demuestra que LOL presenta una marcada heterogeneidad espacial que parece ser reflejo del patrón estacional del viento y la circulación. En la laguna, la circulación está dominada por las mareas (Villa-Guerrero, 2019), por lo que estas, a su vez, van a controlar el tiempo de residencia del agua. De acuerdo con, Villa-Guerrero (2019), la zona exterior de LOL se caracteriza por estar “bien ventilada”, ya que las partículas en las proximidades del estrecho entre LOL y la Laguna Guerrero Negro son expulsadas por la boca de LOL en un ciclo mareal (~24 horas). En este estudio se empleó un modelo de una caja para el cálculo del tiempo de residencia, lo cual, aunque es útil, limita la comprensión de la dinámica interna de la laguna. Las variables termohalinas y del sistema del carbono dejan ver que en LOL existe una zonificación que pareciera responder al tiempo de residencia del agua, por tanto, para el cálculo del tiempo de residencia, se sugiere considerar la aplicación de un modelo de tres cajas asociadas a la zonificación aquí propuesta. Considerando lo reportado por Villa-Guerrero (2019) sobre la residencia de partículas, se cree que el promedio obtenido del tiempo de residencia se vería reducido.

La aplicación de un modelo de tres cajas para el cálculo del tiempo de residencia permitiría determinar si la zonificación está influenciada por el tiempo de residencia del agua y si este factor tiene algún efecto en la química del sistema del CO<sub>2</sub>. Esta recomendación se fundamenta en la compleja circulación de LOL, donde la marea domina en la boca y la zona central, mientras que los gradientes de densidad y el viento dominan en el interior (Juárez *et al.*, 2024). Además, en estudios similares, como el realizado por Ribas-Ribas *et al.* (2011b) en la Bahía San Quintín, la aplicación de un modelo de tres cajas para determinar el tiempo de residencia mejoró

significativamente la comprensión de la dinámica del sistema del carbono debido al intercambio y circulación del agua.

### **Procesos que modifican las variables del sistema del CO<sub>2</sub>**

Los diagramas de las variables del carbono normalizadas permitieron identificar qué tipo de procesos modifican a las variables del carbono. En la figura 11, se observa que en las estaciones anteriores a la 10, los procesos de evaporación dominan sobre cualquier otro, ya que tanto el CIDn como el ATn se mantuvieron constantes en las primeras diez estaciones. Por el contrario, ambas variables del carbono normalizadas exhibieron una disminución a partir de la décima estación, que puede atribuirse a precipitación de carbonatos (Zeebe y Wolf-Gladrow, 2001), o consumo por fotosíntesis (Goldman *et al.*, 1974). Las mediciones de clorofila-a indican que hay poca biomasa como para que esta tenga un efecto en el CID (Anexo 1); y, aunque no se tomaron muestras de sedimentos para medir la concentración de carbono, se podría esperar que, debido al gradiente de salinidad, el tiempo de residencia y la alta tasa de evaporación ( $1700 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ; ESSA, 2011), haya precipitación de carbonatos. Sin embargo, no se puede afirmar con certeza que dicha disminución se debe a precipitación de carbonatos y/o a fotosíntesis, dado que hacen falta mediciones que puedan corroborarlo. Por tanto, se sugiere que el consumo de CO<sub>2</sub> hacia el interior de la laguna es resultado de los procesos fotosintéticos de *Z. marina*. Por otro lado, la figura 16 muestra la proyección de  $\Delta\text{CID}$  y  $\Delta\text{AT}$ , donde los valores de ambas aumentan de manera lineal en el espacio. Esto sugiere que, en la laguna, el incremento neto de ambas variables es constante a lo largo del tiempo y no está influenciado por factores estacionales como las surgencias costeras. El aumento de ambas variables está relacionado con los procesos de evaporación, presentes durante

todo el año con distintas intensidades, lo que conduce a un incremento de la salinidad hacia el interior de la laguna.

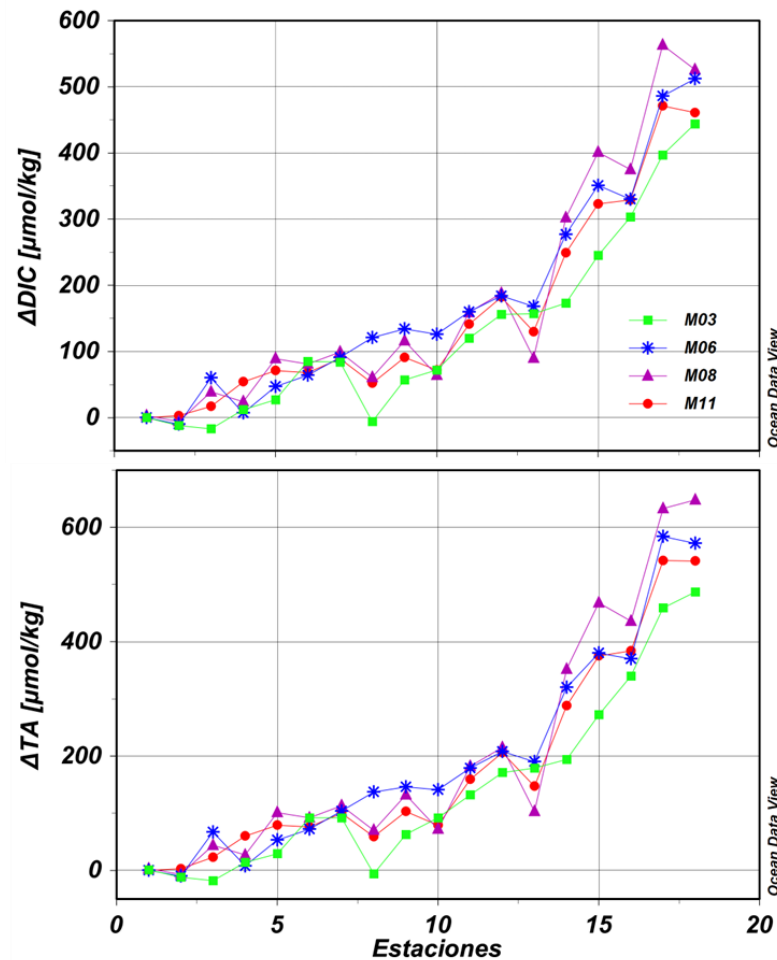


Figura 16. Flujos no conservativos del CID ( $\Delta\text{CID}$ ) y de la AT ( $\Delta\text{AT}$ ).

Como se señaló en la sección de variabilidad estacional, la AT en M03 presentó bajas concentraciones en la región oceánica, pero mayores concentraciones a lo largo de la laguna. Como resultado de esto, durante M03 se observó un incremento de 96  $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la ATn hacia el interior de la laguna. Esta tendencia es típicamente asociada con la disolución de carbonatos, pero este proceso no parece explicar el aumento, ya que no se observa un incremento correspondiente en el CIDn. Una

posible explicación para el aumento de ATn podría ser el aporte de bases orgánicas por parte de las microalgas, lo cual se ha demostrado que contribuye a la alcalinidad en el agua de mar costera (Hernández-Ayón *et al.*, 2007b; Kerr *et al.*, 2021); así como la adición de alcalinidad debido a que la absorción de  $[\text{NO}_3]$  tiene una estequiometría de 1:1 entre el consumo de N y el cambio de alcalinidad (Brewer y Goldman, 1976). Aunque no se disponen de mediciones específicas en LOL que respalden esta hipótesis, Jones (1981) señaló que, en Laguna San Ignacio, una laguna que comparte similitudes con LOL y que también forma parte de la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, existe una relación C/N alta. Además, la autora menciona que, durante el periodo de febrero a marzo, San Ignacio experimenta un crecimiento rápido del plancton, lo que se refleja en bajas concentraciones de nitrógeno, dado que este elemento actúa como nutriente limitante. Estos hallazgos podrían explicar el aumento observado en la ATn en M03, ya que coincide con la fertilización de la laguna por agua de surgencias.

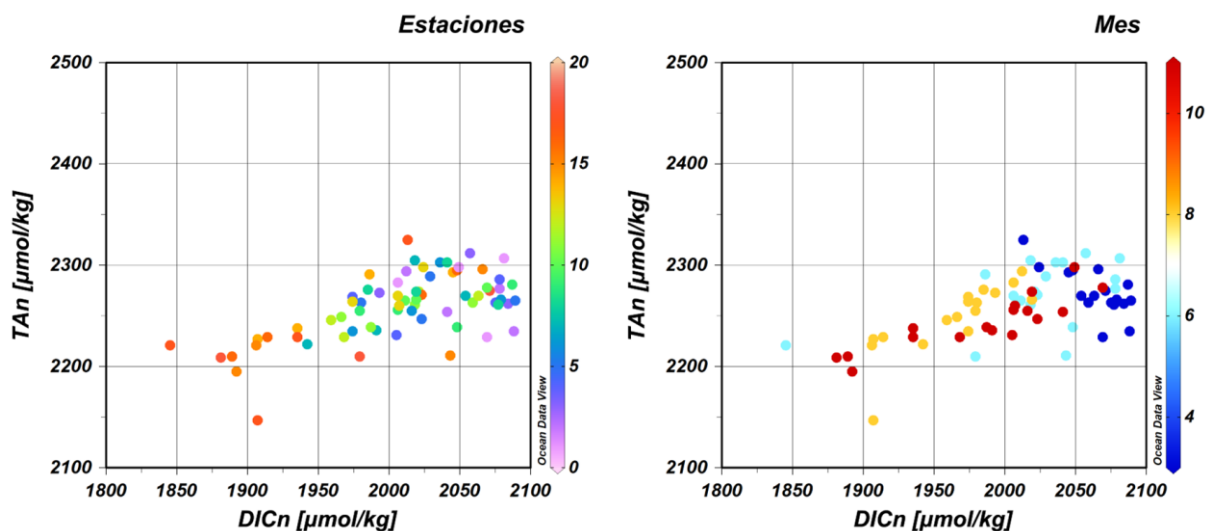


Figura 17. Relación entre la ATn y CIDn. La barra de colores indica aproximadamente el número de estaciones (izquierda) y los meses de muestreo (derecha).

Finalmente, la figura 17 muestra la relación entre la ATn y el CIDn, y se destaca que los cuatro eventos de monitoreo estuvieron dominados por procesos de respiración, con excepción de las estaciones de la zona interior de la laguna, donde dominaron los procesos de precipitación de carbonatos. El gráfico del lado derecho resalta que M03 es el muestreo donde estuvo más marcado el dominio por procesos de respiración a lo largo de la laguna, pues hubo mayor concentración de CIDn. En cambio, los valores en M06 estuvieron más dispersos. Este comportamiento dispersivo aumenta en M08 y M11 hacia las estaciones interiores, donde se observa una disminución de ambas variables, lo cual sugiere un dominio de precipitación de minerales carbonatados.

### **Conclusiones**

Durante el período de muestreo en LOL, se registraron dos eventos de surgencias, en M03 y M06, que coincidieron con mareas vivas, resultando en el enriquecimiento de CID, principalmente en M03. Además, en la boca de la laguna se identificó la incursión de ASA durante M03 y M11, mientras que, en los meses correspondientes a verano, M06 y M8, se registró la señal de agua transicional y AStS, respectivamente. La señal del océano adyacente se identificó en los primeros 18 km de la laguna.

Hacia el interior de la laguna se presentó un aumento del CID y la AT, producto de los procesos de evaporación. Los diferentes gradientes de salinidad generados por la evaporación se reflejan en el tiempo de residencia estacional, donde M11 presentó el máximo tiempo de residencia de la laguna, con 124 días. No obstante, al remover el efecto de la evaporación (normalización), los resultados muestran que en la zona

interna de la LOL hay un consumo de CO<sub>2</sub> que resulta de los procesos de precipitación de carbonatos y/o fotosíntesis.

La química del sistema del CO<sub>2</sub> en LOL está controlada espacialmente por los procesos de evaporación, pero responde a los procesos de advección estacionales, así como a la época de surgencias costeras en la región. Los resultados de este trabajo indican que la laguna es una fuente débil de CO<sub>2</sub>, con excepción de la zona interior, donde actúa como sumidero.

## Referencias

- Amador-Buenrostro, A., Argote-Espinoza, M. L., Mancilla-Peraza, M. y Figueroa-Rodríguez, M. (1995). Variaciones de periodo corto de la circulación anticiclónica en Bahía Sebastián Vizcaíno, B. C. Ciencias Marinas, 21(2), 201-223. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v21i2.987>.
- Bakun, A. y Nelson, C. S. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. CalCOFI Rep. (1 July 1975 to 30 June 1976), 19, 107-127. Recuperado de: <https://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/1977/7702.PDF>.
- Beer, S. y Rehnberg, J. (1997). The acquisition of inorganic carbon by the seagrass *Zostera marina*. Aquatic Botany, 56(3-4), 277-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(96\)01109-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(96)01109-6).
- Borges, A. V. (2005). Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO<sub>2</sub> fluxes in the coastal ocean? Estuaries, 28, 3-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02732750>.
- Borges, A. V. y Frankignoulle, M. (1999). Daily and seasonal variations of the partial pressure of CO<sub>2</sub> in surface seawater along Belgian and southern Dutch coastal areas. Journal of Marine Systems, 19(4), 251-266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(98\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(98)00093-1).
- Borges, A. V., Delille, B. y Frankignoulle, M. (2005). Budgeting sinks and sources of CO<sub>2</sub> in the coastal ocean: diversity of ecosystem counts. Geophysical Research Letters 32, L14601. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023053>.
- Borges, A. V., Frankignoulle, M. (2002). Distribution and air-sea exchange of carbon dioxide in the Scheldt plume off the Belgian coast. Biogeochemistry, 59 (1-2), 41-67. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015517428985>.
- Brewer, P. G. y Goldman, J. C. (1976). Alkalinity changes generated by phytoplankton growth. Limnology and Oceanography, 21, 108-117. DOI: <https://doi.org/10.4319/lo.1976.21.1.0108>.
- Bryant, P. J., Lafferty, C. M., y Lafferty, S. K. (1984). Cap. 15, Reoccupation of Laguna Guerrero Negro, Baja California, Mexico, by Gray Whales. En Jones, M. L., Swartz, S. L. y Leatherwood, S. (Eds.), The Gray Whale, *Eschrichtius robustus* (pp. 375-387). Orlando: Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092372-7.50021-2>.

- Cabello-Pasini, A., Muñiz-Salazar, R., y Ward, D. H. (2004). Caracterización bioquímica del pasto marino *Zostera marina* en el límite sur de su distribución en el Pacífico Norte. *Ciencias Marinas*, 30(1a), 21-34. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v30i11.123>.
- Carmouze, J. P., De Farias, B., Bernardes, M. C. y Kuroshima, K. N. (1998). Benthic influence on the metabolism of a shallow tropical lagoon (Lagoa da Barra, Brazil). *Hydrobiologia*, 373, 89-100. DOI <https://doi.org/10.1023/A:1017048128271>.
- Chen, C. T. A. y Borges, A. V. (2009). Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Deep-Sea Research Part II* 56 (8-10), 578-590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.01.001>.
- Dawson, E. Y. (1952). Circulation Within Bahía Vizcaíno, Baja California and its effects on marine vegetation. *American Journal of Botany*, 39(7), 425-432. DOI: <https://doi.org/10.2307/2438325>.
- de la Paz, M., Padín, X. A., Ríos, A. F. y Pérez, F. F. (2010). Surface fCO<sub>2</sub> variability in the Loire plume and adjacent shelf waters: high spatio-temporal resolution study using ships of opportunity. *Marine Chemistry*, 118(3-4), 108-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.11.004>.
- Delille, B., Delille, D., Fiala, M., Prevost, C. y Frankignoulle, M. (2000). Seasonal changes of pCO<sub>2</sub> over a subantarctic *Macrocystis* kelp bed. *Polar Biology*, 23, 706-716. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003000000142>.
- Dickson, A. G., Sabine, C. L. y Christian, J. R. (Eds.). (2007). Guide to Best Practices for Ocean CO<sub>2</sub> Measurements. PICES Special Publication 3, 191 pp. Recuperado de: [https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-acidification-data-system/oceans/Handbook\\_2007/Guide\\_all\\_in\\_one.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-acidification-data-system/oceans/Handbook_2007/Guide_all_in_one.pdf).
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, México: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, 83, 361-368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.043>.
- Durazo, R. (2015). Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 1173-1196. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014JC010405>.
- Durazo, R. y Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54(1-4), 7-31. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1).
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A. M., Miranda, L. E. y Soto-Mardones, L. A. (2010). Climatología de variables hidrográficas. En Gaxiola-Castro, G. y Durazo, R. (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007*. (pp. 25-58). Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 501 pp. Recuperado de: <https://imecocal.cicese.mx/wp/wp-content/uploads/Durazo-Gaxiola-2010.pdf>.
- Eberhardt, R. L. (1966). Coastal geographical features of Laguna Guerrero Negro. En Kennelly, R. A. (Ed.), *The California Geographer* (pp. 29-36). Los Angeles: Trade-Technical College. Recuperado de: <https://csun-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.2/2286/CAgeographer1966.pdf?sequence=1>.
- ESSA (Exportadora de Sal, S.A. de C.V.). (2011). Documento técnico unificado. Trámite unificado de cambio de uso de suelo forestal modalidad B para obras y actividades del proceso de producción de sal. Siad Consultores S.C. Guerrero Negro. B.C.S., México. 418 pp.

Recuperado

de:

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bcs/estudios/2011/03BS2011MD067.pdf>.

- Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernández-Ayón, J. M., Ianson, D. y Hales, B. (2008). Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the continental shelf. *Science* 32, 1490-1492. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1155676>.
- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M. y Wollast, R. (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 405-434. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.405>.
- Goldman, J. C., Oswald, W. J. y Jenkins, D. (1974). The kinetics of inorganic carbon limited algal growth. *Water Pollution Control Federation*, 46(3), 554-574. <https://www.jstor.org/stable/25038157>.
- Gordon Jr., D. C, Boudreau, P. R., Mann, K. H., Ong, J. E., Silvert, W. L., Smith, S. V., Wattayakorn, G., Wulff, F. y Yanagi, T. (1996). LOICZ Biogeochemical Modeling Guidelines. LOICZ/R&S/95-5. Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, Texel. The Netherlands. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5003.4401>.
- Gutiérrez de Velasco, G. (2000). Análisis de la circulación y las condiciones físicas de la Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. con relación a la mortandad de Tortugas Marinas durante diciembre de 1997. Informe final para la Compañía Exportadora de Sal, ESSA. México. Recuperado de: <https://inefectividad.conanp.gob.mx/i-inefectividad/PBCPN/>.
- Hales, B., Cai, W. J., Mitchell, G., Sabine, C. L. y Schofield, O. (2008). North American Continental Margins: a Synthesis and Planning Workshop. Report of the North American Continental Margins Working Group for the U.S. Carbon Cycle Scientific Steering Group and Interagency Working Group. U.S. Carbon Cycle Science Program, Washington, DC, 110 pp. Recuperado de: [https://web.whoi.edu/ocb/wp-content/uploads/sites/43/2017/01/NACM\\_small.pdf](https://web.whoi.edu/ocb/wp-content/uploads/sites/43/2017/01/NACM_small.pdf).
- Harris, K., DeGrandpre, M., y Hales, B. (2013). Aragonite saturation state dynamics in a coastal upwelling zone. *Geophysical Research Letters*, 40(11), 2720-2725. doi: <https://doi.org/10.1002/grl.50460>.
- Hemminga, M. A. y Duarte, C. M. (2000). *Seagrass Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press. 298 pp. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525551>.
- Hernández-Ayón, J. M., Camacho-Ibar, V. F., Mejía-Trejo, A. y Cabello-Pasini, A. (2007a). Variabilidad del CO<sub>2</sub> total durante eventos de surgencia en bahía de San Quintín, Baja California, México. En Hernández de la Torre, B., Gaxiola-Castro, G. (Eds.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones Científicas y de Educación de Ensenada. 187-200 pp. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/291831618\\_Variabilidad\\_del\\_CO2\\_total\\_durante\\_eventos\\_de\\_surgencias\\_en\\_Bahia\\_San\\_Quintin\\_Baja\\_California\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/291831618_Variabilidad_del_CO2_total_durante_eventos_de_surgencias_en_Bahia_San_Quintin_Baja_California_Mexico).
- Hernández-Ayón, J. M., Zirino, A., Dickson, A. G., Camiro-Vargas, T. y Valenzuela-Espinoza, E. (2007b). Estimating the contribution of organic bases from microalgae to the titration alkalinity in coastal seawaters. *Limnology and Oceanography: Methods*, 5(7), 225-232. DOI: <https://doi.org/10.4319/lom.2007.5.225>.
- Hickey, B. M. (1979). The California current system-Hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*, 8(4), 191-279. DOI: [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(79\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(79)90002-8).

- Hung, J. J. y Hung, P. Y. (2003). Carbon and nutrient dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 42, 97-114. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(03)00069-1).
- Johnson, K., J. Sieburth, Williams, P. y Brändström, L. (1987). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: Automation and calibration. *Marine Chemistry*, 21(2), 117-133. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(87\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0304-4203(87)90033-8).
- Jones, M. L. (1981). Lagoon Bathymetry, Benthic Surveys and Primary Production of Laguna San Ignacio, Baja California Sur, Mexico. Laguna San Ignacio Ecosystem Science Program. Recuperado de: <https://www.sanignaciograywhales.org/wp-content/uploads/2015/03/1981-lagoon-bathymetry.pdf>.
- Juárez, B., Alegría-Arzaburu, A. R. y García-Walther, J. (2024). Tidal, density and wind-driven subtidal circulation in a hypersaline coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 108748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108748>.
- Kerr, D. E., Brown, P. J., Grey, A. y Kelleher, B. P. (2021). The influence of organic alkalinity on the carbonate system in coastal waters. *Marine Chemistry*, 237: 104050. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2021.104050>.
- Koné, Y. J. M., Borges, A. V. (2008). Dissolved inorganic carbon dynamics in the waters surrounding forested mangroves of the Ca Mau Province (Vietnam). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(3), 409-421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.10.001>.
- Lara-Espinosa, A. (2007). Varabilidad espacial de alcalinidad total (At) durante eventos de surgencia en bahía San Quintín, Baja California, México. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., México.
- Lewis, E. y Wallace, D. W. R. (1998). Program Developed for CO<sub>2</sub> System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. DOI: <https://doi.org/10.2172/639712>.
- Lueker, T. J., Dickson, A. G. y Keeling, C. D. (2000). Ocean pCO<sub>2</sub> calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K<sub>1</sub> and K<sub>2</sub>: validation based on laboratory measurements of CO<sub>2</sub> in gas and seawater at equilibrium. *Marine Chemistry*, 70(1-3), 105-119. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(00)00022-0).
- Lynn, J. R. y Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The Seasonal Variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(C12), 12947-12966. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC092iC12p12947>.
- Martínez-Fuentes, L. M, Gaxiola-Castro, G., Gómez-Ocampo, E. y Kahru, M. (2016). Efectos de eventos interanuales (1997-2012) sobre la variabilidad hidrográfica y biomasa del fitoplancton en Bahía Sebastián Vizcaíno. *Ciencias Marinas*, 42(2), 81-97. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v42i2.2626>.
- Mathis, J. T., Cross, J. N., Evans, W. y Doney, S. C. (2015). Ocean acidification in the surface waters of the Pacific-Arctic boundary regions. *Oceanography*, 28(2), 122-135. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.36>.
- McGlathery, K. J., Anderson, I. C. y Tyler, A. C. (2001). Magnitude and variability of benthic and pelagic metabolism in a temperate coastal lagoon. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps216001>.

- Mehrbach, C., Culberson, C. H., Hawley, J. E. y Pytkowicz, R. M. (1973). Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnology and Oceanography*, 18 (6), 897-907. Recuperado de: <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4319/lo.1973.18.6.0897>.
- Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography*. Boca Raton: Taylor & Francis Group. 531 pp. doi: <https://doi.org/10.1201/b14753>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). (2022). Cap. 3, Artificial Upwelling and Downwelling (pp. 103-126). En *A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023). Climate Prediction Center. Cold and Warm Episodes by Season. Recuperado de: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).
- Navarro-Palacios, R. A. y Mancilla-Peraza, M. (2008). Sedimentología de la Bahía Sebastián Vizcaíno, Baja California, México. *CICICMAR Oceánides*, 23(1-2), 79-82. Recuperado de: <http://repositorio.uninav.edu.mx/xmlui/handle/123456789/2568>.
- Okuda, T., Valencia, M. y Trejos de Suescum, R. (1983). Nutrientes en las aguas superficiales y subsuperficiales en el área frente al ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico, INOCAR*, 2(1), 31-52. Recuperado de: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/publicaciones/actas-oceanograficas/file/14-nutrientes-en-las-aguas-superficiales-y-subsuperficiales-en-el-area-frente-al-ecuador>.
- Oliveira, A. P., Cabeçadas, G. y Mateus, M. D. (2017). Inorganic carbon distribution and CO<sub>2</sub> fluxes in a large European estuary (Tagus, Portugal). *Scientific Reports*, 7, 7376. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06758-z>.
- Orr, J. C., Epitalon, J. M., Dickson, A. G. y Gattuso, J. P. (2018). Routine uncertainty propagation for the marine carbon dioxide system. *Marine Chemistry*, 207, 84-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2018.10.006>.
- Palacios-Hernández, E. (1994). Circulación barotrópica de Bahía Sebastián Vizcaíno, B. C. simulada por un modelo numérico. (Tesis de maestría). CICESE. Recuperado de: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3521/1/103051.pdf>.
- Phleger, F. B. y Ewing, G. C. (1962). Sedimentology and oceanography of coastal lagoons in Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 73(2), 145-182. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1962\)73\[145:SAOCL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1962)73[145:SAOCL]2.0.CO;2).
- Ribas-Ribas, M., Gómez-Parra, A. y Forja, J. M. (2011a). Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the northeastern shelf of the Gulf of Cádiz (southwest Iberian Peninsula). *Marine Chemistry*, 123, 56-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2010.09.005>.
- Ribas-Ribas, M., Hernández-Ayón, J. M., Camacho-Ibar, V. F., Cabello-Pasini, A., Mejía-Trejo, A., Durazo, R., Galindo-Bect, S. et al. (2011b). Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95, 367-376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.017>.
- Roden, G. I. (1971). Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(15), 3462-3475. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC076i015p03462>.

- Rodríguez-Padilla, I. (2013). Análisis estadístico de la distribución espacial y temporal (2008-2010) de la temperatura y salinidad en la Laguna Ojo de Liebre, Baja California Sur, México. (Tesis de maestría). Universidad de Guadalajara.
- Sánchez-Noguera, C., Stuhldreier, I., Cortés, J., Jiménez, C., Morales, A., Wild, C. y Rixen, T. (2018). Natural ocean acidification at Papagayo upwelling system (north Pacific Costa Rica): implications for reef development. *Biogeosciences*, 15, 2349-2360. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-15-2349-2018>.
- Sarur-Zanatta, J. C., Millán-Núñez, R., Gutiérrez-Sigala, C. A., Small Mattox-Sheahen, C. A. (1984). Diversidad y similitud de tres zonas con diferente tipo de sustrato, en Laguna Ojo de Liebre, B. C. S., México. *Ciencias Marinas*, 10(2), 169-174. DOI: <https://doi.org/10.7773/cm.v10i2.436>.
- Schlitzer, R., Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2023.
- SEMARNAP. (2000). Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera El Vizcaíno. Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC). Recuperado de: [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/116\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/116_libro_pm.pdf).
- Smith, S. V. y Hollibaugh, J. T. (1997). Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecological Monographs*, 67(4): 509-533. doi: [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0509:ACAIVO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0509:ACAIVO]2.0.CO;2).
- Spivak, A. C., Sanderman, J., Bowen, J. L., Canuel, E. A. y Hopkinson, C. S. (2019). Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Natural Geoscience*, 12, 685-692. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0435-2>.
- Tan, L., Zhenming, G., Zhou, X., Li, S., Li, X. y Tang, J. (2020). Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands and peatlands increases greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 26(3), 1638-1623. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14933>.
- Villa-Guerrero, A. (2019). Circulación por marea y transporte de sedimento en el sistema lagunar Ojo de Liebre-Guerrero Negro. (Tesis de maestría). CICESE. Recuperado de: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2988>.
- Walsh, J. J. (1989). How much shelf production reaches the deep sea? En Berger, W. H., Smetacek, V. S., Wefer, G. (Eds.), *Productivity of the Ocean: Present and Past*. Berlín: John Wiley & Sons Ltd, 175-191 pp.
- Wanninkhof, R. (2014). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography: Methods*, 12, 351-362. DOI: <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>.
- Ward, D. H., Morton, A., Markon, C. J. y Hogrefe, K. R. (2022). Spatial extent of seagrasses (*Zostera marina* and *Ruppia maritima*) along the central Pacific coast of Baja California, Mexico, 1999–2000: U.S. Geological Survey Open-File Report 2022-1004. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr20221004>.
- Weiss, R. F. (1974). Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2(3), 203-215. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2).
- Wollast, R., 1991. The coastal organic carbon cycle: fluxes, sources, and sinks. En Mantoura, R. F. C., Martin, J. M., Wollast, R. (Eds.), *Ocean Margin Processes in Global Change*. Berlín: John Wiley and Sons Ltd. 365-381 pp.

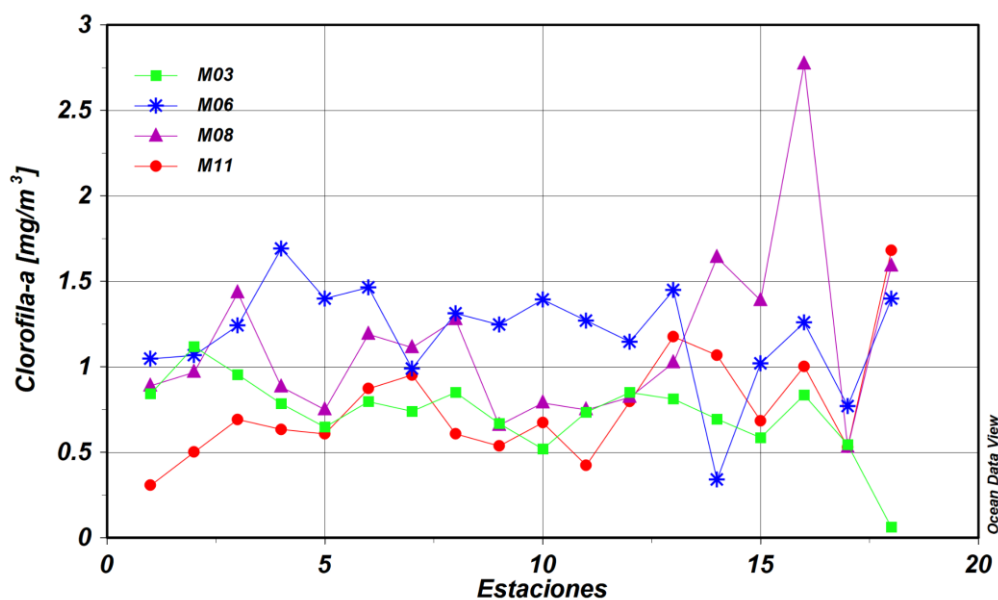
Wyllie, J. G. (1961). The water masses of Sebastian Vizcaino Bay. CalCOFI Rep. (1 July 1959 to 30 June 1960), 8, 907-917. Recuperado de: [https://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v08/CalCOFI\\_Rpt\\_Vol\\_08\\_1961.pdf](https://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v08/CalCOFI_Rpt_Vol_08_1961.pdf).

Zamora-Salvador, J. E. (2016). Transporte de sedimentos y evolución morfológica de la barra de laguna Ojo de Liebre, B.C.S. (Tesis de maestría). Universidad de Guadalajara. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12104/79841>.

Zeebe, R. E. y Wolf-Gladrow, D. (2001). CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Vol. 65. Amsterdam: Elsevier Oceanography Series. 346 pp. Recuperado de: [https://sseh.uchicago.edu/doc/Zeebe\\_CO2\\_In\\_Seawater\\_Ch\\_1.pdf](https://sseh.uchicago.edu/doc/Zeebe_CO2_In_Seawater_Ch_1.pdf).

Zhai, W. y Dai, M. (2009). On the seasonal variation of airesea CO<sub>2</sub> fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. Marine Chemistry, 117(1-4), 2-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.02.008>.

## Anexos



Anexo 1. Distribución espacial de la clorofila-a. Datos proporcionados por el Dr. Jorge Calderón.