CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLOGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

# ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE MONITOREO DE ALTA FRECUENCIA EN EL ÁREA MARINA PROTEGIDA ESTERO EL SOLDADO, GOLFO DE CALIFORNIA.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

**Aurora Ávila García**

La Paz, Baja California Sur, marzo de 2020.

# ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11 horas del día 7 del mes de febrero del 2020, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**" ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE MONITOREO DE ALTA FRECUENCIA EN EL ÁREA MARINA PROTEGIDA ESTERO EL SOLDADO, GOLFO DE CALIFORNIA "**

Presentada por el alumno:

**AURORA ÁVILA GARCÍA**

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **BIOLOGÍA MARINA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

**Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga**
**Director de Tesis**

**Dr. Ramón Héctor Barraza Guardado**
**Co-Tutor**

**Dr. Luis Brito Castillo**
**Co-Tutor**

**Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro**
**Directora de Estudios de Posgrado y**
**Formación de Recursos Humanos**

## CONFORMACIÓN DE COMITÉS

### Comité Tutorial

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Director de Tesis

Dr. Ramon Héctor Barraza Guardado
Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora
Co-Tutor de Tesis

Dr. Luis Brito Castillo
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

### Comité Revisor de Tesis

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dr. Ramon Héctor Barraza Guardado
Dr. Luis Brito Castillo

### Jurado de Examen

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dr. Ramon Héctor Barraza Guardado
Dr. Luis Brito Castillo

**Suplente:**
Dr. Jorge Eduardo Chávez Villalba

## Resumen

El monitoreo continuo de alta frecuencia de las características del agua de lagunas costeras mediante sensores *in situ* proporciona información más precisa de su variabilidad. El objetivo de este estudio fue conocer el comportamiento de la calidad de agua mediante monitoreo de características físico-químicas con registros cada 30 minutos durante un ciclo anual en el Área Natural Protegida estero El Soldado, Golfo de California. Se obtuvieron registros de, temperatura, oxígeno disuelto salinidad y pH del agua con una sonda multiparamétrica marca HYDROLAB modelo DATASONDE 5X, la cual fue programada para registrar cada 30 minutos desde las 9:00 horas del 07 de junio del 2016 hasta las 23:30 horas del 30 de junio del 2017. Los datos se organizaron en una hoja de cálculo Microsoft® Office Excel y se elaboraron gráficas de línea para mostrar el comportamiento anual de temperatura, oxígeno disuelto salinidad y pH. Los registros de pH y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se utilizaron para estimar la variabilidad anual del estado trófico mediante el Índice Simple de Estado Trófico. Adicionalmente, se seleccionaron dos eventos de lluvias, uno en 2016 asociado al huracán Newton y otro en 2017 asociado a la tormenta tropical Lidia para conocer su efecto en el comportamiento de salinidad del agua. Información de viento y precipitación se registró cada 10 minutos con una estación meteorológica marca Davis modelo Vantage Vue 62050M ubicada adyacente al estero. Los datos de precipitación, viento y salinidad se procesaron con el software MATLAB y se elaboraron gráficos para mostrar y comparar el comportamiento de estas variables durante los eventos meteorológicos. Los resultados mostraron que la temperatura del agua durante junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre fluctuó entre 30 y 34 °C; en seis semanas, desde mediados de octubre y hasta finales de noviembre ocurre un marcado descenso desde 30 hasta 20 °C; el periodo de diciembre, enero y febrero es el periodo más frío del año con temperatura de 15-20 °C; durante marzo, abril y mayo los valores fluctúan entre 20 y 28 °C. Concentraciones de oxígeno disuelto < 4 mg $L^{-1}$ se observaron como eventos puntuales durante julio, agosto y septiembre, y eventos de hipoxia (< 3 mg $L^{-1}$) ocurrieron uno en julio y otro en agosto por periodos menores a tres horas. En el estero se presenta un incremento de concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y mayor variabilidad diurna con valores entre 5 y 10 mg $L^{-1}$ durante diciembre, enero, febrero y marzo. La salinidad del agua tuvo 36 - 39 ups en la mayor parte del año y únicamente disminuyó hasta < 30 ups durante eventos de lluvias en julio, agosto, septiembre y enero. El pH tuvo variación a través del año con un intervalo de 6.9 –

9.1 unidades con valores más bajos en los meses cálidos de junio, julio, agosto y septiembre. El Índice Simple de Estado Trófico (ISET) tuvo un intervalo anual de 17 – 58 y con un valor promedio de 34 ± 10. Esto indicó que el estero El Soldado tiene buena condición ambiental a través del año y el ISET tiene potencial para aplicarse en otras lagunas del Golfo de California. En septiembre del 2016 el huracán Newton y en agosto-septiembre de 2017 la tormenta tropical Lidia, impactaron al estero con vientos de ≈ 5-10 m $s^{-1}$ y precipitaciones con intensidades de 24-48 mm $hr^{-1}$. En ambos eventos el patrón de cambio y disminución de la salinidad fue similar con descensos desde 36 ups hasta > 25 ups, 24 horas después de los eventos de lluvias, y los valores de salinidad regresaron hasta 36 ups en las siguientes 72 horas después de las lluvias. Los registros *in situ* de alta frecuencia de las características físico-químicas del agua en el estero El Soldado aportaron nuevo conocimiento indicando la magnitud de los cambios diurnos y estacionales.

**Palabras clave:** Laguna costera, calidad del agua, estado trófico, monitoreo de alta frequencia.

Vo. Bo. Director de Tesis

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

## Summary

Continuous high-frequency monitoring of estuarine water quality by on-site sensors provides a more accurate information on the variability of their physical-chemical characteristics. The objective of this study was to know the behavior of water quality by monitoring physical-chemical characteristics with records every 30 minutes during an annual cycle in the estuary El Soldado Natural Protected Area, Gulf of California. Records of temperature, salinity, dissolved oxygen and pH of the water were obtained with a HYDROLAB model DATASONDE 5X multiparameter probe, which was programmed to record every 30 minutes from 9:00 a.m. on June 7, 2016 until 11:30 p.m. hours of June 30, 2017. The data was organized in a Microsoft® Office Excel spreadsheet and line graphs were prepared to show the annual behavior of temperature, salinity, dissolved oxygen and pH. The pH and percentage saturation of dissolved oxygen records were used to estimate the annual variability of the trophic state using the Simple Index of Trophic Status (SITS). Additionally, two rain events were selected, one in 2016 associated with Hurricane Newton and another in 2017 associated with Tropical Storm Lidia to know its effect on water salinity behavior. Wind and precipitation information was recorded every 10 minutes with a Davis Vantage Vue 62050M weather station located adjacent to the estuary. Precipitation, wind and salinity data were processed with MATLAB software and graphs were developed to show and compare the behavior of these variables during weather events. The results showed that the water temperature during June, July, August, September and part of October fluctuated between 30 and 34 °C; in six weeks, from mid-October until the end of November a marked decrease from 30 to 20 °C occurs; the period of December, January and February is the coldest period of the year with a temperature of 15-20 ° C; during March, April and May the values fluctuate between 20 and 28 °C. Dissolved oxygen concentrations <4 mg $L^{-1}$ were observed as specific events during July, August and September, and hypoxia events (<3 mg $L^{-1}$) occurred one in July and one in August for periods of less than three hours. In the estuary there is an increase in concentrations of dissolved oxygen in the water and greater daytime variability with values between 5 and 10 mg $L^{-1}$ during December, January, February and March. Water salinity had 36-39 ups in most of the year and only decreased to <30 ups during rainy events in July, August, September and January. The pH had variation throughout the year with an interval of 6.9 - 9.1 units with lower values in the warm months of June, July, August and September. The SITS had an annual interval of 17 - 58 and with an average value of 34 ± 10. This

indicated that the El Soldado estuary has good environmental condition throughout the year and the SITS has the potential to apply in other coastal lagoons of the Gulf of California. In September 2016, Hurricane Newton and in August-September 2017 the Tropical Storm Lidia, hit the estuary with winds of ≈ 5-10 m $s^{-1}$ and rainfall with intensities of 24-48 mm $hr^{-1}$ with accumulated rain in each event > 70 mm. In both events the pattern of change and decrease in salinity was similar with decreases from 36 ups to> 25 ups, 24 hours after the rainy events, and the salinity values returned to values up to 36 ups in the next 72 hours after raining. The high-frequency on-site records of the physicochemical characteristics of water in the El Soldado estuary brought new knowledge indicating the magnitude of diurnal and seasonal changes, as well as the responses indicated by the salinity of the water in the event of extreme rainfall events.

**Key words:** coastal lagoon, water quality, trophic state, high-frequency monitoring.

Vo. Bo. Director de Tesis

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

**Dedicatoria**

*A mi hija Ambar Lunett,*
*llegaste en medio de este proyecto de vida*
*y has sido mi motivación más grande.*
*Ser madre ha sido lo más difícil*
*y lo mejor que me ha pasado.*
*Te amo*

**Agradecimientos**

Principalmente a Dios por permitirme levantarme cada día para continuar.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C por aceptarme como estudiante y orientar mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca No. 636229 que me fue otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

Al personal directivo y operativo del Área Natural Protegida estero El Soldado por todo el apoyo otorgado en la instalación y cuidado del equipo multisensor utilizado en el monitoreo de la calidad del agua y por las atenciones brindadas para realizar el estudio.

A mi director de tesis Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga, mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo y toda la ayuda que me ha brindado en estos dos años para desarrollar esta tesis y gracias infinitas por toda la comprensión que me ha dado durante los cambios repentinos que han surgido en esta etapa de mi vida, por motivarme y alentarme a seguir adelante.

A los miembros de mi comité tutorial Dr. Luis Brito Castillo y Dr. Ramón Héctor Barraza Guardado, gracias por sus consejos, revisiones del manuscrito y apoyo para realizar este trabajo.

A la M. en C. María del Refugio López Tapia por la ayuda en el procesamiento de datos.

Al M. en C. Edgar Alcántara Razo por la ayuda en la organización y análisis de la base de datos y elaboración de gráficos.

Al Ing. Xicotencatl Galicia García responsable del Área Informática de la Unidad Guaymas, por su apoyo en aspectos de computación y videoconferencias en CIBNOR.

Al Ing. Julio Egrén Féliz Domínguez, responsable técnico del Laboratorio de Modelación Espacial y Sensores Remotos por la disponibilidad de los datos meteorológicos.

A la M. en C. Claudia Esmeralda León López por su asesoría en la utilización de procesadores de texto.

Gracias a mis compañeras de generación Nathaly y Jyasu por el apoyo y ayuda a través de estos dos años donde compartimos experiencias y conocimiento, que a pesar de mi ausencia siempre me ayudaron cuando lo necesitaba.

A mi pareja y padre de mi hija, gracias por apoyarme en todas mis decisiones personales y profesionales, por ayudarme y ser parte de mi vida.

A mi familia, principalmente a mis padres, gracias por el apoyo incondicional a lo largo de mi vida y en este proyecto de superación personal, gracias por creer en mí y por siempre alentarme a seguir hacia adelante. Gracias por la ayuda que me dieron para poder terminar este trabajo. Gracias por apoyar todas las decisiones de mi vida.

**Contenido**

**Resumen** ..... i
**Summary** ..... iii
**Dedicatoria** ..... v
**Agradecimientos** ..... vi
**Contenido** ..... viii
**Lista de figuras** ..... ix
**Lista de tablas** ..... x
**1. INTRODUCCIÓN** ..... 1
**2. ANTECEDENTES** ..... 4
2.1 Importancia de la calidad del agua ..... 4
2.2 Importancia de los registros *in situ* ..... 6
2.3 Antecedentes de estudios realizados con sensores *in situ* ..... 7
**3. JUSTIFICACIÓN** ..... 10
**4. HIPÓTESIS** ..... 11
**5. OBJETIVOS** ..... 12
5.1 Objetivo general ..... 12
5.2 Objetivos específicos ..... 12
**6. MATERIALES Y MÉTODOS** ..... 13
6.1 Área de estudio ..... 13
6.2 Trabajo de campo ..... 16
6.2.1 Registros de características del agua ..... 16
6.2.2 Registros de variables meteorológicas ..... 16
6.3 Trabajo de gabinete ..... 17
6.3.1 Datos de calidad del agua ..... 17
6.3.2 Datos meteorológicos ..... 17
**7. RESULTADOS** ..... 19
7.1 Variabilidad de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH ..... 19
7.2 Estado trófico ..... 22
7.3 Eventos de precipitación y vientos ..... 22
**8. DISCUSIÓN** ..... 25
8.1 Variabilidad de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH ..... 24
8.2 Estado trófico ..... 25
8.3 Eventos de precipitación y vientos ..... 27
**9. CONCLUSIONES** ..... 32
**10. LITERATURA CITADA** ..... 34

**Lista de figuras**


| | | |
|---|---|---|
| **Figura 1.** | Área de estudio indicando el sitio de monitoreo de las propiedades físico-químicas del agua, y el sitio de ubicación de la estación meteorológica. | 15 |
| **Figura 2.** | Variabilidad anual de la temperatura del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado. | 19 |
| **Figura 3.** | Variabilidad anual de oxígeno disuelto del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado. | 20 |
| **Figura 4.** | Variabilidad anual de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado. | 20 |
| **Figura 5.** | Variabilidad anual de salinidad del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado. | 21 |
| **Figura 6.** | Variabilidad anual de pH del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado. | 21 |
| **Figura 7.** | Variabilidad de la precipitación durante el ciclo anual (2016 – 2017) en el estero El Soldado | 21 |
| **Figura 8.** | Comportamiento del estado trófico estimado mediante el Índice Simple de Estado Trófico a través un ciclo anual en el estero El Soldado. | 22 |
| **Figura 9.** | Comparaciones de salinidad, precipitación y viento en un evento meteorológico característico registrado del 5 al 8 de septiembre del 2016 (Huracán Newton). | 24 |
| **Figura 10.** | Comparaciones de salinidad, precipitación y viento en un evento meteorológico registrado del 31 de agosto al 2 de septiembre del 2017 (Tormenta tropical Lidia). | 24 |

**Lista de tablas**

**Tabla 1.** Características físico-químicas del agua en cuerpos de agua costeros ……5

# 1. INTRODUCCIÓN

Una laguna costera se define como un cuerpo de agua somero, generalmente orientado paralelo a la costa, separado del océano por una barrera arenosa compuesta y conectado al océano por una o más bocas restringidas, y una profundidad máxima generalmente menor a dos metros (Kjerfve, 1994). Estos ecosistemas son complejos y están influenciados por factores diversos que interactúan en diferentes escalas, las cuales pueden ser escalas temporales grandes, como las inundaciones y sedimentación que determinan la morfología de la cuenca, y en escalas temporales cortas, como las lluvias que modifican las condiciones hidrodinámicas a nivel local (Contreras y Polo, 2012).

Específicamente, en cuerpos de agua costeros, las características fisicoquímicas del agua son considerablemente variables tanto espacial como temporalmente, ya que están regidos por las características de la propia cuenca como la forma, la topografía, el clima de la región y la actividad humana, así como la inundación de las mareas, por lo que estos ecosistemas resultan de interés debido a su continuo cambio ambiental (Wolfe y Kjerfve, 1986; Briciu-Bughina et al., 2014).

La dinámica de las zonas costeras está determinada por las influencias e interacciones del continente, océano y atmósfera, por lo que a lo largo de la línea de costa se encuentran diferentes tipos de cuerpos de agua como son las lagunas, esteros, estuarios, bahías, marismas, ensenadas, entre otros (Lara-Lara et al., 2008). Las características de los ambientes lagunares y estuarinos forman una mezcla de hábitats los cuales son dinámicos, debido a que son zonas de transición, es decir, donde los flujos de agua constantemente están en cambio, esto genera un transporte de sal, calor y sedimentos a diario, lo que supone un reto cuando se trata del monitoreo ambiental (Briciu-Bughina et al., 2014).

La calidad del agua es un término utilizado para describir las características tanto fisicoquímicas como biológicas del agua, las cuales están en función su uso específico, por lo que el monitoreo de estas diferentes características que determinan la calidad del agua proporciona información acerca de la condición ambiental de un cuerpo de agua, y es útil para identificar los cambios en escalas temporal y espacial (Contreras y Polo, 2012); lo anterior considerando que el comportamiento de procesos hidrológicos como la calidad del agua en los cuerpos costeros tienen una variación en escalas de minutos a horas (Horsburgh et al., 2010). En este sentido el monitoreo del agua de alta frecuencia con sensores *in situ* proporciona información más detallada y conocimiento más preciso de sus variaciones espacial y temporal (Briciu-Bughina et al., 2014). En este trabajo denominamos monitoreo de alta frecuencia a las mediciones c/30 min de diferentes características del agua como oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y pH.

La información del oxígeno disuelto en el agua es de vital importancia para la supervivencia de los organismos marinos, y su monitoreo ayuda a conocer la dinámica ambiental del ecosistema por su influencia en el estado trófico (Best et al., 2007). El estado trófico se define como la tasa de abastecimiento de materia orgánica a un ecosistema; eutrofización se define como el incremento en la tasa de abastecimiento de materia orgánica a un ecosistema (Nixon, 1995). Este cambio de estado trófico a un nivel superior es inducido por la adición excesiva de nutrientes (Moreno-Franco et al., 2010).

La temperatura es una variable primordial para diferentes procesos como la solubilidad de sustancias como la sal, lo cual influye en la variación de la salinidad del mar; además, la actividad biológica se incrementa con el aumento de temperatura y estos cambios pueden suceder entre estaciones del año (Aznar-Jiménez, 2000). El potencial de hidrógeno (pH) es una medida en la cual se determina la concentración de iones hidronio (H3O+) en una solución (Aznar-Jiménez, 2000). En el agua de mar varia de 7.5 a 8.4 en función de la temperatura por lo que puede afectar la concentración de los micronutrientes en el agua que afectan el desarrollo de los organismos (Hernández-Ayón et al., 2003).

El clima en Sonora está determinado por patrones de circulación atmosférica de gran escala. La existencia de dos sistemas semipermanentes de alta presión: uno localizado en el Pacifico Oriental y el otro sobre las Islas Bermudas, están asociados con aire descendente lo que promueve el tiempo claro, seco y cálido, y favorece las condiciones semiáridas de la entidad. Estos sistemas, además, modulan la cantidad de precipitación, llegándose a registrar el 80% de la lluvia anual tan solo entre los meses de julio y septiembre y un segundo máximo de precipitación en la estación de invierno, producto de la incursión de frentes extra tropicales que producen precipitaciones de larga duración y baja intensidad (Brito-Castillo et al., 2010). Para la región del noroeste de México los vientos se caracterizan por soplar del sureste-suroeste en el verano mientras que soplan del noroeste-noreste en invierno este cambio de dirección de los vientos se conoce como circulación monzónica (Douglas et al., 1993), la cual tiene una influencia en los cambios de patrones de vientos y en la precipitación de la región noroeste del estado. Estos cambios a su vez inciden localmente en la variabilidad de la calidad del agua de estuarios y lagunas costeras.

Con base en lo expuesto, el monitoreo continuo de variables fisicoquímicas del agua como son la temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH resulta necesario para el mejor entendimiento del funcionamiento de un sistema lagunar y este conocimiento permite apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental. El estero El Soldado, al ser un Área Natural Protegida requiere de información de la variabilidad del agua mediante el monitoreo continuo. Este estudio contribuye al conocimiento de la variabilidad del agua y de su condición ambiental.

# 2. ANTECEDENTES

## 2.1 Importancia de la calidad del agua

El agua actúa como disolvente de compuestos orgánicos e inorgánicos gracias a sus propiedades fisicoquímicas además de tener la capacidad para desarrollar vida (Aznar-Jiménez, 2000), por lo que monitorear su calidad es de suma importancia ya que una alteración exagerada de sus características en el sistema se puede manifestar en la salud del ecosistema. Por tanto, el monitoreo de la calidad del agua permite tomar decisiones con respecto a la conservación. La calidad del agua depende tanto de factores ambientales tales como la erosión del sustrato, sedimentación, extracción de la materia orgánica, los nutrientes del suelo, los procesos biológicos, procesos atmosféricos, y la acción humana (conocida como influencia antrópica) (De la Lanza- Espino *et al*., 2000).

Algunas características fisicoquímicas del agua (Tabla I) como son el oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, y pH son de gran importancia para estudios en cuerpos de agua costeros ya que, al ser estos centros de crianza y reproducción de diversas especies, estas características del agua tienen un efecto en el crecimiento, maduración y reproducción de los organismos (Valdez-Holguín y Martínez-Córdova, 1993). El agua es un sistema complejo por lo que es necesario llevar a cabo análisis tanto cuantitativos como cualitativos para conocer el grado y tipo de alteraciones que ha sufrido y que repercusiones ha tenido en el ecosistema (Aznar-Jiménez,2000).

El monitoreo de calidad del agua también nos permite determinar el estado trófico y detectar procesos de eutrofización. El estado trófico es la relación que existe entre la tasa de suministro de materia orgánica de un ecosistema y la eutrofización como el incremento en la tasa de suministro de materia orgánica de un ecosistema (Nixon, 1995). Este proceso de eutrofización, ha sido reconocido como uno de los problemas más importante en la zona costera (Halpern et al., 2008), debido a sus efectos adversos en pérdida de vegetación

sumergida, cambios en la composición del fitoplancton incluyendo especies tóxicas o dañinas, incrementos en biomasa de fitoplancton, manifestación de eventos hipóxicos y anóxicos (De Jonge et al., 2002); así como afectación de actividades productivas (p.e., pesquerías, acuicultura, turismo) y en la salud pública (Painting et al., 2007).

**Tabla I.** Características físico-químicas del agua en cuerpos de agua costeros.

| Característica | Mide | Lectura normal | Lectura peligrosa | Influenciado por |
|---|---|---|---|---|
| Temperatura | Cantidad de calor en el agua | 0° - 30°C | > 37 °C | Radiación solar<br>Turbulencia |
| pH | Acidez o alcalinidad del agua | ≥ 8 | < 6 o > 9 | Plantas y sedimentos<br>Lluvia ácida<br>$CO_2$ atmosférico<br>Derrame de sustancias químicas |
| Oxígeno disuelto | Cantidad disponible de oxígeno en el agua | 5-12 $mgL^{-1}$ | < 5 = estrés<br>1-3 = pobre<br>0 = anóxico | Fotosíntesis<br>Viento<br>Oleaje<br>Escorrentías de agua |
| Salinidad | Cantidad de sal en el agua | 5-30 ups | > 40 ups en área de marismas | Nivel de la marea<br>Eventos de lluvia<br>Evaporación<br>Sedimentación |

Fuente: https://coast.noaa.gov/data/estuaries/pdf/water-quality-parameters-information-sheet.pdf

Es importante conocer la variabilidad del estado trófico del ecosistema y esto puede hacerse mediante registro de alta frecuencia del oxígeno disuelto y pH del agua (Moreno-

Franco *et al.*, 2010). O'Boyle *et al.* (2013) registraron el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y pH del agua con un multisensor Hydrolab en verano por tres años y con base en estas variables estimaron el estado trófico mediante un índice simple (descrito más adelante) en 90 cuerpos de agua de Irlanda.

## 2.2 Importancia de los registros *in situ*

Los registros de alta frecuencia son aquellas mediciones realizadas en intervalos de tiempo que pueden ir de minutos a horas, por lo que estos registros de alta frecuencia con sensores *in situ* mejoran el conocimiento de los procesos costeros ya que ofrecen una visión detallada en la variabilidad espacial y temporal en los cuerpos de agua (Briciu-Bughina *et al*., 2014). Entender estos procesos es de importancia para poder predecir el comportamiento de los cuerpos de agua costeros considerando que los tiempos en los que varían los procesos hidrológicos y la calidad de agua, pueden ser en escalas cortas de tiempo como minutos a horas (Horsburgh *et al*., 2010). Lo anterior se demuestra en la publicación de Kirchner *et al.,* 2004, donde compara muestreos mensuales, semanales, diarios, por hora y fracciones de hora, la conductividad y cloruro. Sus resultados ilustran claramente que en los muestreos semanales que son los más comunes para identificar las propiedades hidroquímicas del agua los eventos de menor duración no pueden ser identificados.

Si bien el muestreo tradicional del agua ha arrojado conocimientos significativos, las mediciones de alta frecuencia permiten interpretaciones más directas sobre procesos biogeoquímicos, desde la dinámica de las cuencas hasta la circulación de nutrientes y la respuesta del ecosistema a estas variaciones y perturbaciones (Rode *et al*., 2016). Para mejorar el conocimiento de las direcciones de los flujos hidrológicos y que a su vez afectan a la química del agua, se necesitan mediciones a escalas de tiempo más cortas que solo las mediciones *in situ* de alta frecuencia pueden proporcionar, por lo que los muestreos llevados a cabo con una frecuencia mensual o semanal no podrían capturar la dinámica

hidrológica de duración menor a una semana, además de tener una mejor visualización de eventos de lluvias y vientos (Kirchner *et al.,* 2004).

Se ha demostrado que los registros continuos *in situ* han arrojado evidencia de la ocurrencia de cambios repentinos en el comportamiento del sistema, en comparación con registros de baja frecuencia los cuales tienden a estar influenciados por cambios hidroclimáticos, pero que a diferencia de estos últimos, puede ocasionar que la variabilidad a largo plazo no sean visibles, y no es necesario esperar años o décadas para obtener una base de datos y poder interpretar el comportamiento del sistema (Burt *et al*., 2011).

## 2.3 Antecedentes de estudios realizados con sensores *in situ*

Entre los estudios más recientes realizados sobre la calidad del agua con registros de alta frecuencia, destaca el trabajo de Kirchner *et al.* (2004), donde se muestran las ventajas de trabajar con sensores *in situ* para la captación de flujos de agua y eventos de lluvias con duración de minutos a horas, en comparación con monitoreo tradicional en donde la toma de muestras es de días a meses, debido a lo anterior no es posible observar la variabilidad de los eventos, además de que estos últimos son lentos y caros.

Garel *et al*. (2009) realizaron un monitoreo de alta frecuencia en tres estuarios de Portugal en donde demostraron que el monitoreo *in situ* de calidad del agua es efectivo para detectar y poder mitigar a tiempo los efectos de la eutrofización, además de detectar los impactos causados por el represamiento de las aguas, por las descargas de agua y sedimentos en las desembocaduras de los estuarios.

Horsburgh *et al*. (2010) demostraron que variables como la turbidez y la conductancia específica medidas con sensores *in situ* pueden usarse como sustitutos de otros componentes de la calidad del agua (sedimentos y/o fosfato), y mostrar sus flujos y concentraciones.

Burt *et al*. (2011) en el río Great Ouse en el este de Inglaterra, realizaron la comparación de concentración de nitrato en agua, entre registros de un periodo de 50 años (1957-2007) y registros continuos con sensor *in situ* y este último mostró el mismo patrón, pero con mayor precisión.

Briciu-Bughina *et al*. (2014), midieron la turbidez de manera frecuente en un puerto de Dublín y observaron que las lecturas más altas coincidían con la hora de llegada de los buques al puerto, debido a la re-suspensión de sedimentos por los sistemas de propulsión de los buques, además los resultados del monitoreo continuo mostraron relación con el nivel del mar y el estado de la marea a la hora que los buques ingresaban al puerto.

Hartnett y Nash (2015) modelaron la dinámica de nutrientes en el agua considerando la relación entre el fitoplancton y ciclos de nitrógeno, fósforo y oxígeno disuelto, empleando mediciones de campo, sensores remotos y datos analizados dentro del SIG, como la batimetría, marea y flujos de agua dulce. El modelo se utilizó para simular patrones de circulación del agua en todos los ciclos de marea a lo largo de toda la primavera.

Rode *et al*. (2016) sugieren que los sensores de alta frecuencia han mejorado la visión y el entendimiento de los procesos hidrológicos, ya que ahora existen sensores capaces de medir tanto atributos físicos como químicos, lo que antes solo los métodos tradicionales para determinar la calidad del agua podían lograr.

En este sentido, a partir de registros c/30 min es posible conocer las fluctuaciones del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y pH, y proporcionar una indicación del equilibrio entre la autotrofía (producción de materia orgánica por productores primarios) y la heterotrofía (consumo de esa materia por parte de los consumidores). Mecánicamente, la sobresaturación de oxígeno y el aumento del pH, debido a la reducción fotosintética de dióxido de carbono, indican que un sistema es autotrófico neto (la producción primaria bruta excede la respiración comunitaria), mientras que la falta de saturación OD y niveles

decrecientes de pH indican que un sistema es heterotrófico neto (la respiración excede a la producción). Por lo tanto, se deduce que las fluctuaciones temporales tanto en el pH como en el OD en un ecosistema acuático pueden indicar un cambio de un estado a otro, es decir, de autotrofía a heterotrofia o viceversa (O´Boyle *et al*. 2013)

Esta tesis contribuirá al conocimiento de los cambios diurnos y estacionales de la calidad del agua analizando registros cada 30 minutos de diferentes características del agua. Esto permitirá tener un mejor entendimiento de las variaciones de la calidad del agua en la laguna semi-árida subtropical El Soldado, considerada una laguna prístina.

## 3. JUSTIFICACIÓN

Las lagunas costeras son reconocidas como sitios de importancia ecológica y socioeconómica, por lo que es importante generar conocimiento básico para orientar la toma de decisiones para su uso, manejo y preservación (Arreola-Lizárraga *et al*., 2018)

El estero El Soldado es un Área Natural Protegida en la categoría estatal de "Zona Sujeta a Conservación Ecológica" (BOGES, 2006), es centro de reproducción, crianza y alimento de diversas especies de invertebrados y peces, así como hábitat de descanso, refugio y anidación para aves migratorias, cuenta además con vegetación de manglar y alberga especies bajo protección especial (CEDES, 2007). Además, el estero El Soldado es un Sitio Ramsar (FIR-ES, 2011).

Considerando la importancia ecológica del estero, esta tesis aporta conocimiento acerca de sus características físico-químicas del agua, mediante un monitoreo continuo de alta frecuencia que permite tener un mejor entendimiento de la variabilidad ambiental en este sistema lagunar. Este conocimiento es útil para apoyar la toma de decisiones en conservación y manejo del ecosistema.

## 4. HIPÓTESIS

1. Las variaciones de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH en el agua, registradas cada 30 minutos exhibirán la magnitud de los cambios diurnos y estacionales, donde la transición verano-otoño será la más acentuada del ciclo anual.

2. El estado trófico estimado mediante el oxígeno disuelto y el pH del agua mostrará condiciones oligotróficas a través del año.

3. Los eventos de vientos, lluvias asociadas a tormentas tropicales propiciarán perturbación en el agua con disminución de salinidad < 20 ups por periodos de horas o días.

# 5. OBJETIVOS

## 5.1 Objetivo general

Conocer el comportamiento de la calidad de agua mediante monitoreo de características físico-químicas con registros cada 30 minutos durante un ciclo anual en el Área Natural Protegida estero El Soldado, Golfo de California

## 5.2 Objetivos específicos

1. Determinar la variabilidad de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH en el agua del estero a partir de registros c/30 min durante un ciclo anual.

2. Estimar el comportamiento del estado trófico del estero con base en los registros de oxígeno disuelto y pH.

3. Determinar el efecto de eventos de lluvias asociados a tormentas tropicales en el comportamiento temporal de la salinidad del agua.

# 6. MATERIALES Y MÉTODOS

## 6.1 Área de estudio

El estero El Soldado es una laguna costera ubicada en la costa este del Golfo de California (Fig. 1). Por su origen geológico se clasifica como una laguna Tipo III-B, las cuales se caracterizan por depresiones de la plataforma continental que han sido rodeados por cordones de arena acumulados por corrientes litorales y oleaje; las barreras arenosas fueron edificadas por refracción de oleaje o por conexión con una prominencia rocosa (Lankford, 1977).

Esta laguna tiene un área de espejo de agua de 1.6 $km^2$ y una profundidad promedio de 0.60 m (Russell, 1979). Su boca de comunicación con el mar adyacente tiene 40 m de ancho y 1.80 m de profundidad (Güereca-Hernández, 1994).

El tipo de clima es BW(h') hw (e), muy árido y seco. La temporada de lluvias ocurre en los meses de verano (entre julio y septiembre), la temperatura promedio anual es de 25 °C (García, 2004). La precipitación media anual acumulada es de 234 mm y la evaporación 2285 mm (Güereca-Hernández, 1994). En esta laguna los aportes de agua dulce provienen principalmente de escorrentías de lluvias, aunque no se descarta el aporte hacia la laguna de descargas subterráneas.

Los vientos de la región noroeste de México, donde se encuentra la laguna, cambian de dirección según la estación del año, ya que soplan de sureste-suroeste en verano y de noroeste-noreste en invierno, estos cambios en la dirección de los vientos es a lo que se denomina monzón mexicano (Douglas *et al*., 1993), pero debido a la cercanía al mar, además de otros factores como la estación del año y el relieve la zona, el viento muestra cambios locales muy particulares en cuanto a su dirección e intensidad (Brito-Castillo *et al*., 2010).

El mayor porcentaje de lluvias en la región (i.e. cerca del ochenta por ciento del total de la lluvia anual), ocurre durante los meses de julio a septiembre, el resto de las precipitaciones ocurren durante los meses de diciembre a febrero, que, aunque son menos significativas en cuanto a cantidad, su importancia es mayor para la vegetación de la región al ser esta agua mejor aprovechada (Brito-Castillo *et al*., 2010).

El estero El Soldado presenta mareas mixtas con predominancia de semidiurnas (Russell, 1979). La amplitud de marea es de 1 m (Filloux, 1973) y clasifica como laguna micromareal (Davies, 1964).

Los promedios anuales de las características del agua son: temperatura 26 °C, salinidad 37.4 y oxígeno disuelto 6.5 mg $L^{-1}$ (Güereca-Hernández, 1994).

El estero El Soldado como Área Natural Protegida cuenta con una gran diversidad biológica, además cuenta con seis sistemas naturales: (1) lagunar costero, (2) estuarino, (3) comunidad de manglar, (4) dunas costeras, (5) matorral espinoso y (6) una porción de la zona litoral que corresponde a la bahía a un lado del estero, y que es hábitat temporal de muchas especies para reproducción, crianza y alimentación (CEDES, 2007).

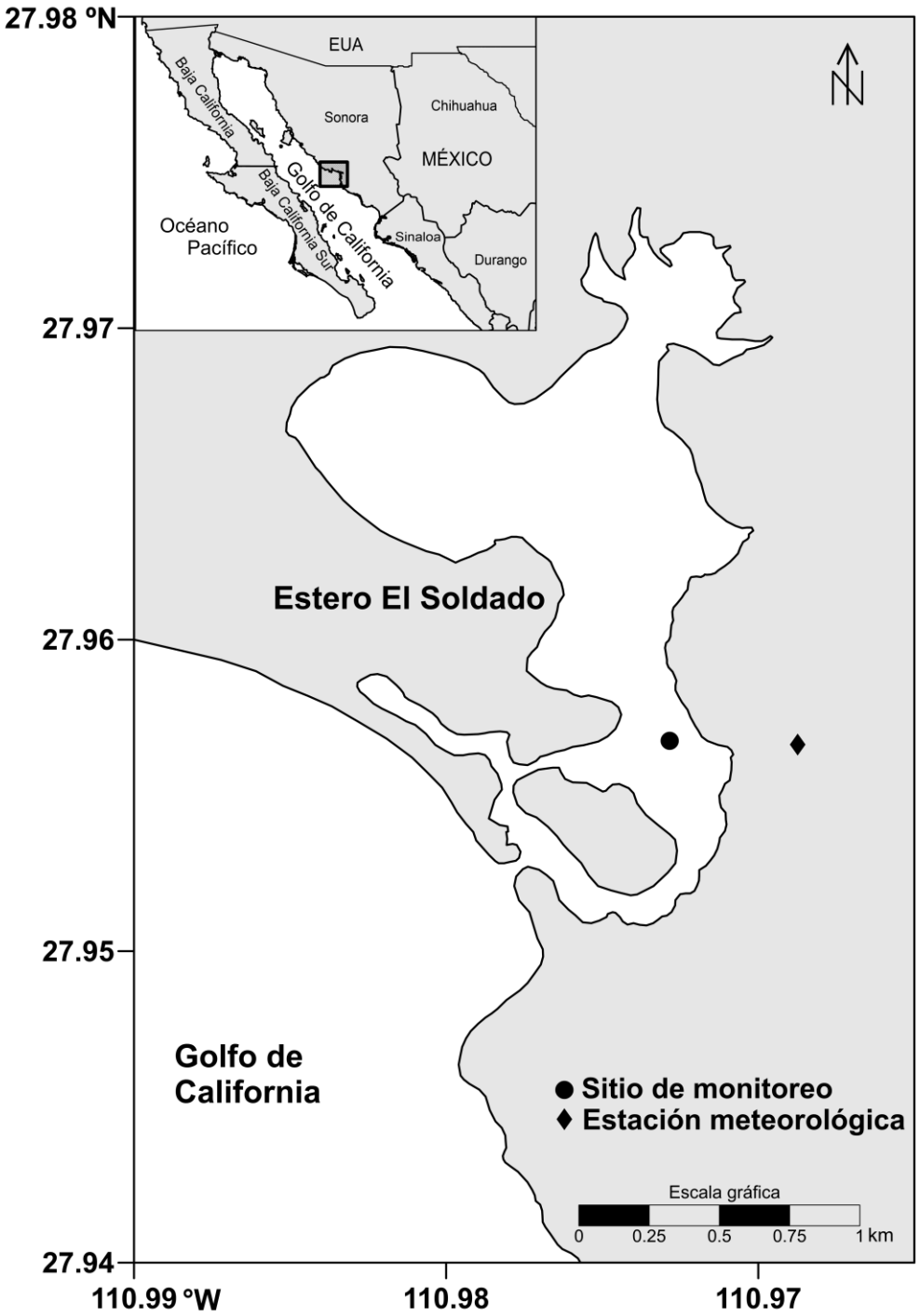


**Figura 1.** Área de estudio indicando el sitio de monitoreo de las propiedades físico-químicas del agua, y el sitio de ubicación de la estación meteorológica.

## 6.2 Trabajo de campo

### 6.2.1 Registro de características del agua

Para la toma de datos de calidad del agua en el estero El Soldado, se instaló en un canal del estero una sonda multiparamétrica marca HYDROLAB modelo DATASONDE 5X, la cual fue programada para registrar cada 30 minutos a través de un ciclo anual las variables de oxígeno disuelto, temperatura, salinidad, pH. Para este trabajo se tomaron en cuenta los datos registrados a partir de las 09:00 horas del 07 de junio del 2016 a las 23:30 horas del 30 de junio del 2017.

La sonda fue instalada para obtener registros de las características del agua por periodos de ocho a diez días. En cada periodo, los datos registrados se descargaban a una computadora para integrarse a un banco de datos; asimismo, a la sonda se proporcionaba el servicio de mantenimiento consistente en revisión de sensores, limpieza y cambio de baterías. Posteriormente, la sonda se programaba y se instalaba en el estero para el registro del siguiente periodo.

### 6.2.2 Registro de variables meteorológicas

La información de vientos y precipitaciones se registraron c/10 minutos durante un año, para ello se utilizó una estación meteorológica marca Davis (modelo Vantage Vue 62050M, serie: G120731DO29) ubicada adyacente al estero (Fig. 1). Las variables meteorológicas se registraron para el mismo periodo en que se registraron las variables del agua.

## 6.3 Trabajo de gabinete

### 6.3.1 Datos de calidad del agua

El total de datos registrados en el ciclo anual fue de n = 15,645. Los datos se organizaron en una hoja de cálculo Microsoft® Office Excel y se elaboraron gráficas de línea para mostrar el comportamiento anual del oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y pH. El estado trófico se estimó siguiendo los criterios del índice propuesto por O´Boyle *et al*. (2013) con la ecuación:

$$IET = [((\text{rango } pH_i)/(\text{rango max } pH_n/100)) + ((\text{ rango } OD_i)/(\text{rango max } OD_n/100))]/2$$

Este índice utiliza los valores del rango y rango máximo, tanto del pH como del porcentaje de oxígeno disuelto en agua. El índice tiene una escala de 0 a 100, a mayor valor del índice mayor estado trófico.

Para determinar los rangos se utilizaron los datos de un ciclo anual (junio 2016 – junio 2017) y se agruparon por semana/calendario resultando un total de 53 semanas. Los valores del estado trófico fueron estimados por semana. Tanto para pH como para porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, se determinó el valor mínimo y máximo de cada serie de datos semanal y se obtuvo el valor del rango *i.* El rango máximo de ambas variables resultó de los valores mínimo y máximo de la serie anual de datos. Estos datos se sustituyeron en la ecuación para obtener los valores del estado trófico por semana. Para mostrar la variabilidad anual del estado trófico se elaboró un gráfico.

### 6.3.2 Datos meteorológicos

Se seleccionaron dos eventos de lluvias, uno del 6 al 8 de septiembre de 2016 asociado al huracán Newton y otro del 31 de agosto al 2 de septiembre de 2017 asociado a la tormenta tropical Lidia. Los datos de precipitación, viento y salinidad se procesaron con el software

MATLAB y se elaboraron gráficos para mostrar y comparar el comportamiento de estas variables durante los eventos meteorológicos.

# 7. RESULTADOS

## 7.1. Variabilidad de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH

La temperatura del agua varió en el intervalo 30 – 35 °C desde mediados de junio hasta mediados de septiembre representando el periodo más cálido del año; mostró un marcado descenso de ≈ 27 a ≈ 16 °C desde mediados de octubre hasta finales de noviembre. El periodo más frío del año con valores entre 13 y 20 °C ocurrió durante diciembre y enero (Fig. 2).

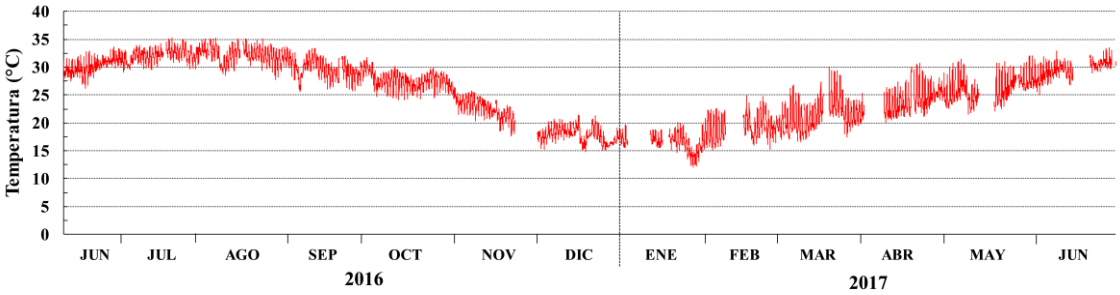


**Figura 2.** Variabilidad anual de la temperatura del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado.

Los valores más bajos de oxígeno disuelto se observaron en verano ≈ 5-7 mg $L^{-1}$ y los más altos ≈ 7-9 mg $L^{-1}$ en invierno y primavera. Fueron notables registros bajos de concentraciones de oxígeno disuelto con valores < 4 mg $L^{-1}$ en julio, agosto y septiembre, mientras que eventos con valores > 10 mg $L^{-1}$ de OD se observaron en febrero, marzo y abril (Fig. 3). Los valores del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en general fluctuaron entre 100 y 150 (Fig. 4).

Los valores de oxígeno disuelto y temperatura del agua mostraron un comportamiento inverso a través del ciclo anual; esto fue más marcado en el periodo cálido de junio a septiembre y frío de diciembre a febrero (Figs. 2 y 3).

La salinidad del agua tuvo 36 - 39 ups en la mayor parte del año y únicamente disminuyó hasta < 30 ups durante eventos de lluvias en julio, agosto, septiembre y enero (Fig. 5).

Los valores de pH tuvieron un intervalo de 6.9 – 9.1 y promedio de 8.3, los valores más bajos de observaron en agosto (Fig. 6).

En el ciclo anual las lluvias ocurrieron en verano (julio – septiembre) y en invierno (diciembre-febrero). La mayor precipitación ocurrió en verano (Fig. 7).

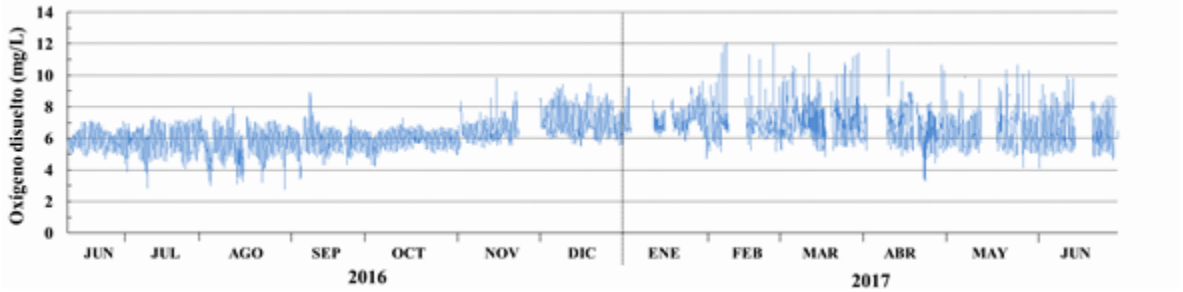


**Figura 3.** Variabilidad anual de oxígeno disuelto del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado.

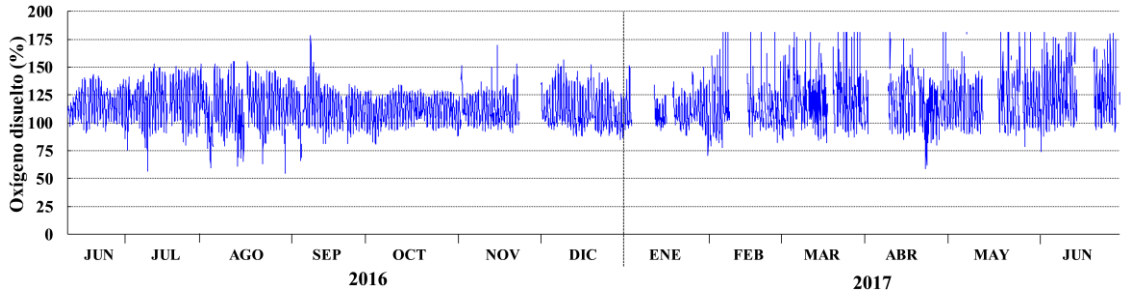


**Figura 4.** Variabilidad anual de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado.

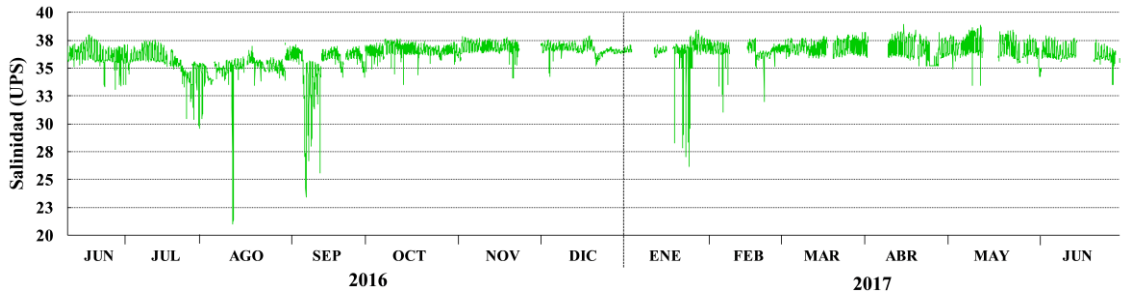


**Figura 5.** Variabilidad anual de salinidad del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado.

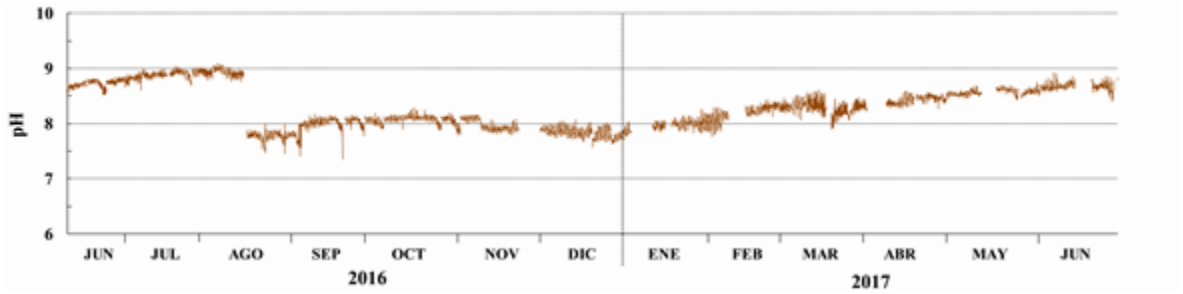


**Figura 6.** Variabilidad anual de pH del agua con base en registros cada 30 minutos en el estero El Soldado.

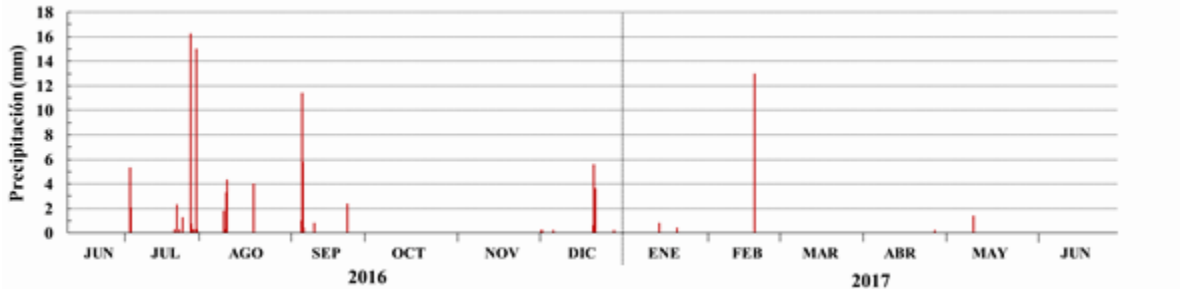


**Figura 7.** Variabilidad de la precipitación durante el ciclo anual (2016 – 2017) en el estero El Soldado

## 7.2 Estado trófico

Los valores semanales de estado trófico a través del ciclo anual tuvieron intervalo anual de 17 – 58 y con un valor promedio de 34 ± 10. En verano, específicamente en agosto se observaron los valores más altos ≈ 50, mientras que el estado trófico más bajo se observó en otoño durante el mes de octubre con valores de ≈ 20 (Fig. 7).

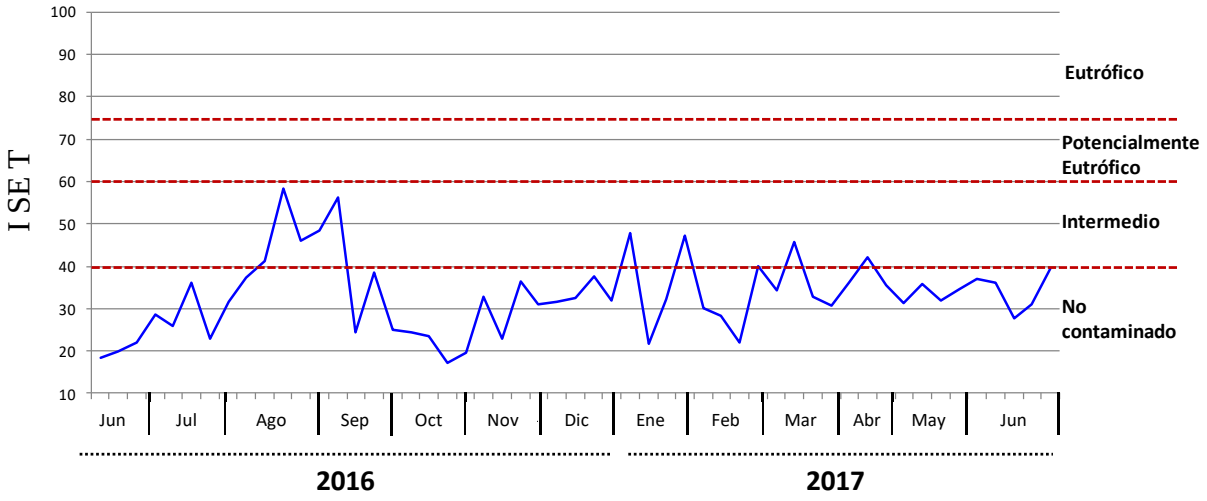


**Figura 8.** Comportamiento del estado trófico estimado mediante el Índice Simple de Estado Trófico a través un ciclo anual en el estero El Soldado.

## 7.3 Eventos de precipitación y vientos

En los eventos meteorologicos de 2016 (huracán Newton) y 2017 (tormenta tropical Lidia) se observó el efecto de las lluvias en el comportamiento de la salinidad del agua.

En septiembre del 2016 el huracan Newton impactó en el estero con ráfagas de viento máximo sostenido > 10 m $s^{-1}$ y precipitaciones con intensidades máximas de 24 mm $hr^{-1}$ con un total de 70.8 mm de lluvia que contribuyeron en la disminución de la salinidad del agua de 36 a 23 ups, despues de 24 horas del evento de lluvia (Fig. 8).

A finales de agosto y principios de septiembre de 2017 la tormenta tropical Lidia impactó el estero con vientos máximos sostenidos > 4 m $s^{-1}$ y precipitaciones con intensidades

máximas de 48 mm $hr^{-1}$ con un total de 125.4 mm de lluvia que contribuyeron en la disminución de la salinidad del agua de 36 a 20 ups, despues de 24 horas del evento de lluvia (Fig. 9).

En ambos eventos meteorológicos, se observó el mismo patrón del comportamiento de la salinidad del agua en el estero, caracterizada por una disminución de ≈ 15 ups en el transcurso de las 24 horas despues de los eventos de lluvias y recuperación de las condiciones de salinidad originales en las siguientes 72 horas (Figs. 8 y 9).

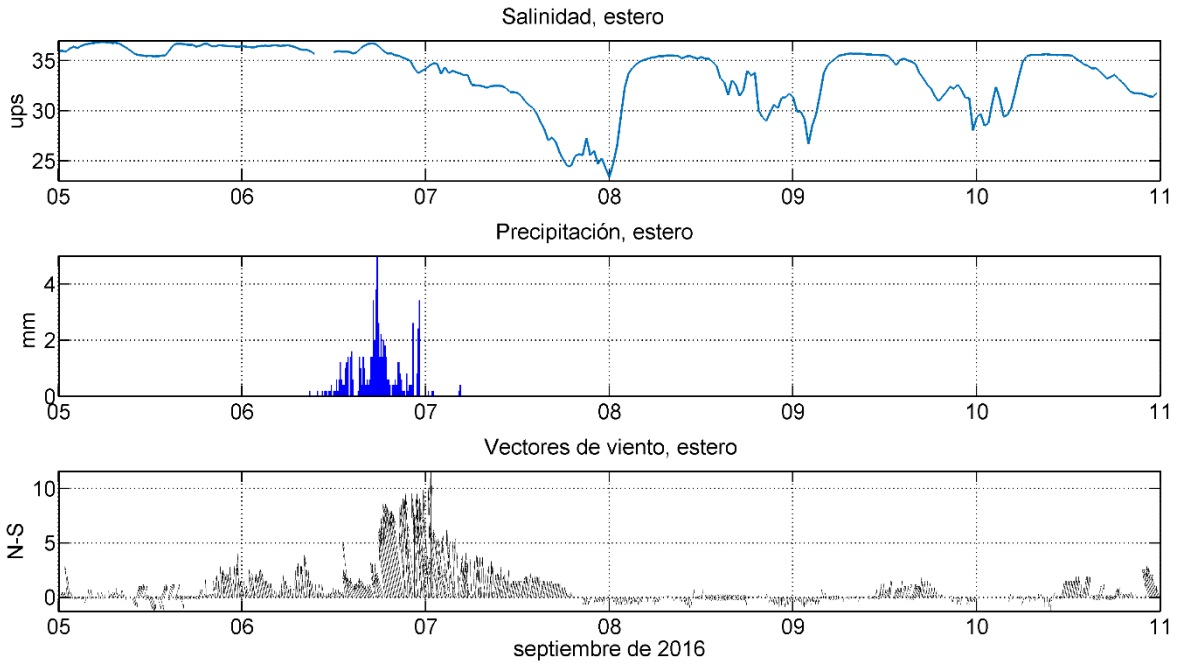


**Figura 9.** Comparaciones de salinidad, precipitación y viento en un evento meteorológico característico registrado del 5 al 8 de septiembre del 2016 (Huracán Newton).

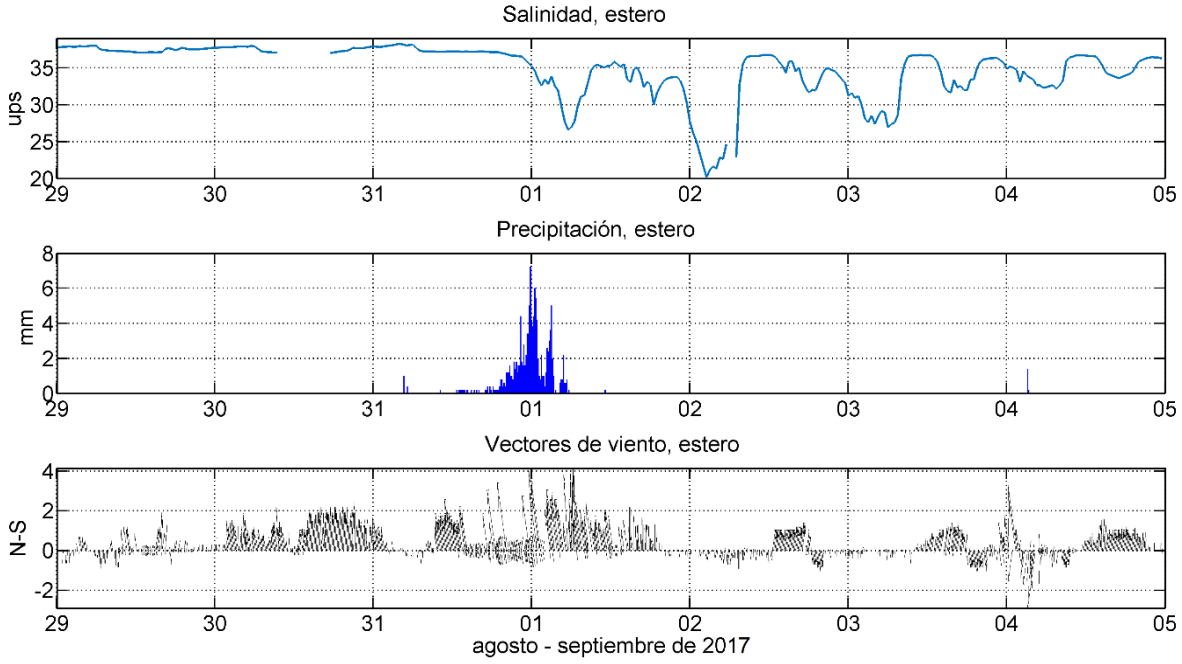


**Figura 10.** Comparaciones de salinidad, precipitación y viento en un evento meteorológico registrado del 31 de agosto al 2 de septiembre del 2017 (Tormenta tropical Lidia).

# 8. DISCUSIÓN

## 8.1 Variabilidad de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH

Los registros cada 30 minutos de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y pH del agua a través de un ciclo anual aportan evidencia de la magnitud de los cambios y detectan registros irregulares bajos en las variables del agua explicados por la influencia meteorológica y oceanográfica, así como por procesos biogeoquímicos de esta laguna semi-árida subtropical influenciada por masas de agua del Golfo de California.

La región donde se encuentra ubicado el estero El Soldado es una zona con un clima muy árido y seco, por lo que es común tener temperaturas ambientales muy altas en la temporada de verano, en ciertos meses (junio, julio, agosto, septiembre) las cuales incluso superan los 40 °C, por el contrario en temporada de invierno (diciembre, enero, febrero) la temperatura puede llegar a bajar hasta los 5 °C (Brito-Castillo *et al.*, 2010). Esta variabilidad de la temperatura del aire tiene marcada influencia en la temperatura del agua del estero porque exhibió un patrón anual similar con valores de 30-34 °C en verano y de 13-20 °C en invierno y explicado por ser un sistema somero (< 1 profundidad promedio). Esto también fue observado por Valdez-Holguín (1994) al comparar las variaciones diarias de temperatura del aire y temperatura del agua en otra laguna costera de esta región del Golfo de California (La Cruz).

En particular, la evidencia del registro de alta frecuencia de la temperatura del agua a través del ciclo anual reveló cuatro condiciones: 1) durante junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre la temperatura del agua fluctuó entre 30 y 34 °C, 2) en seis semanas, desde mediados de octubre y hasta finales de noviembre ocurre un marcado descenso desde 30 hasta 20 °C, 3) el periodo de diciembre, enero y febrero es el periodo más frío del año con temperatura de 15-20 °C y 4) durante marzo, abril y mayo los valores fluctúan entre 20 y 28 °C. En estas condiciones, además de la influencia de la temperatura del aire, también influye

el cambio estacional de las masas de agua del mar adyacente en esta región del Golfo de California como han mostrado los patrones superficiales de temperatura del mar observados desde satélites (Mitchell et al., 2002), porque el estero tiene un intercambio de agua diario con el mar adyacente por flujo y reflujo de la marea y se tiene evidencia de que la tasa de renovación de agua es < 5 días (Medina-Galván et al., 2019).

Las observaciones de oxígeno disuelto en el agua del estero El Soldado a partir de registros c/30 min aportan nueva evidencia de la magnitud de su variabilidad y permite discernir la ocurrencia de eventos de hipoxia y anoxia, los cuales difieren cuantitativamente en la disponibilidad de oxígeno, así como cualitativamente en la presencia de compuestos tóxicos tales como sulfuro de hidrógeno (Diaz y Breitburg, 2009) y permite conocer información más detallada de la exposición de los organismos a condiciones potencialmente estresantes de calidad del agua (Jones y Graziano, 2013).

Sobre los resultados, cabe destacar dos observaciones: 1) concentraciones de OD < 4 mg $L^{-1}$ se observaron como eventos puntuales durante julio, agosto y septiembre, y eventos de hipoxia (OD < 3 mg $L^{-1}$) ocurrieron uno en julio y otro en agosto por periodos menores a tres horas. Estos resultados son relevantes porque no se registraron condiciones de anoxia y los eventos de hipoxia fueron escasos, de poca duración y poca intensidad. Estas condiciones del oxígeno disuelto en el agua son atribuidas a la disminución de la solubilidad del gas debido valores de temperatura del agua > 30 °C en estos meses que además favorecen el incremento en las tasas de respiración del ecosistema dominando el metabolismo heterótrofo como observaron Valenzuela-Siu et al. (2007), adicionalmente existe un ingreso de materia orgánica por ser el periodo de mayor precipitación (Brito-Castillo, 2010) y el periodo de mayor aporte de hojarasca de manglar en esta región semi-árida del Golfo de California (Arreola-Lizárraga et al., 2004) y esto incrementa la demanda oxígeno para la oxidación de esta materia orgánica, 2) incremento de concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y mayor variabilidad diurna con valores entre 5 y 10 mg $L^{-1}$ durante diciembre, enero, febrero y marzo, lo cual es atribuido al incremento de la solubilidad del gas debido a

valores de temperatura del agua < 20 °C, a la menor tasa de respiración del ecosistema predominando metabolismo autótrofo (Valenzuela-Siu et al., 2007), y a la acción mecánica de los vientos que favorece mayor intercambio gaseoso atmósfera-mar, por lo que influyen en los pulsos de incrementos del oxígeno disuelto. Los vientos en estos meses soplan predominantemente del Noroeste paralelos a la línea de costa (Reyes-Coca et al., 1984) con intensidades frecuentes de 2.5 – 5 m $s^{-1}$ y eventos con intensidades > 15 m $s^{-1}$ (Alcocer-Vázquez, 2019).

El estero El Soldado recibe aportes de agua exclusivamente por las lluvias y sus escorrentías (< 300 mm $año^{-1}$) y las tasas de evaporación (≈ 2,800 mm $año^{-1}$) superan a las tasas de precipitación (García, 2004) y esto se ajusta a la tendencia general de que la salinidad es alta allí donde la evaporación supera a la precipitación, de tal forma que la variabilidad de la salinidad tiene una fuerte dependencia del balance precipitación-evaporación. Lo anterior explica que en el estero El Soldado, la mayor parte del año, los valores de salinidad del agua tengan escasa variación de 36 – 38 ups con valores más altos a la salinidad del mar adyacente. Esto de acuerdo con Contreras-Espinoza y Warner (2004) caracteriza a este cuerpo de agua como un sistema eurihalino. Sin embargo, los registros mostraron evidencia de la magnitud de los cambios en la salinidad del agua por efecto de eventos de lluvias y se manifestaron pulsos específicos en los meses de verano (junio, julio, agosto y septiembre). Específicamente, posterior a eventos extremos de lluvia, la salinidad bajo abruptamente hasta un intervalo de 20 – 25 ups, lo cual se explica más adelante.

El pH tuvo variación a través del año con un intervalo de 6.9 – 9.1 unidades. Los valores más bajos se observaron en verano asociados a las altas temperaturas en los meses cálidos de junio, julio, agosto y septiembre. El pH del agua está fuertemente relacionado tanto con la temperatura como con el oxígeno disuelto, ya que al aumentar la temperatura disminuyen los valores del pH, aunado a un aumento de la respiración por procesos biológicos (fotosíntesis) la cual produce $CO_2$ y ocasiona una disminución del pH (Hernández-Ayón et al., 2003).

## 8.2 Estado trófico

El Índice Simple de Estado Trófico (ISET) mostró que el estero, durante la mayor parte del año, mantuvo valores del índice < 40 que indican condiciones de un sistema no contaminado. Específicamente, los valores más altos se observaron en agosto (> 50, pero < 60), así como en enero y marzo (entre 40 y 50); no obstante, estos valores más altos indicaron un sistema intermedio entre no contaminado y potencialmente eutrófico. Además, los valores > 40 siempre se manifestaron con cambios notables, de tal forma que antes y después de cada incremento, los valores fueron más bajos. Esto significa que el sistema experimenta períodos de actividad autotrófica excesiva seguido de períodos de actividad heterotrófica elevada a medida que se consume la materia orgánica producida (O´Boyle *et al*., 2013). En agosto, este comportamiento sugiere un incremento de biomasa de fitoplancton como expresión de la actividad autotrófica y una disminución de oxígeno disuelto asociado al incremento de tasas de oxidación de materia orgánica, inducidas por temperatura del agua >30 °C que implican la dominancia en verano de un metabolismo neto heterótrofo, como se ha observado en lagunas costeras de esta región (Valenzuela-Siu *et al*., 2007), mientras que los saltos observados en enero y marzo, sugieren estar asociados al incremento del estado trófico por enriquecimiento de nutrientes que provienen de surgencias costeras que ocurren desde octubre hasta marzo en esta región (Arreola-Lizárraga *et al*., 2016), cuando también tienden a dominar procesos de autotrofía (Valenzuela-Siu *et al*., 2007).

Los índices de estado trófico (TRIX e ICAC) estimados en el estero El Soldado, lo han clasificado como un sistema oligotrófico y que tiende a alcanzar un estado mesotrófico en algún periodo desde finales de otoño hasta inicios de primavera, asociado al enriquecimiento de nutrientes por surgencias costeras (Ruiz-Ruiz, 2017; Mata-Ángeles et al., 2019). En este estudio, el ISET tuvo los valores más altos en agosto y septiembre, pero también hubo incrementos en enero y febrero, aunque la variabilidad de los valores del índice ocurrió siempre en un umbral < 60, exhibiendo un sistema saludable, lo cual coincidió

con el estado oligotrófico indicado por el TRIX y el ICAC arriba mencionado. Esto es consistente con lo observado por O´Boyle *et al.* (2013) en el sentido de que, en sistemas oligotróficos, la limitación de nutrientes debería resultar en una menor tasa del metabolismo neto del ecosistema y por lo tanto, en comparación con las aguas eutróficas, en niveles más bajos de variación de OD y pH.

En algunas lagunas costeras semi-áridas del Golfo de California, el estado trófico ha sido estimado mediante los índices ICAC, TRIX y ASSETS, los cuales, además de oxígeno disuelto involucran nutrientes inorgánicos disueltos y los últimos dos también clorofila *a* (Arreola-Lizárraga *et al*., 2018). Estos índices han sido consistentes en indicar que estas lagunas se caracterizan por condiciones oligotróficas, pero exhiben síntomas de eutrofización cuando reciben ingresos de nutrientes por aguas residuales (Arreola-Lizárraga *et al*., 2016; Ruiz-Ruiz *et al*., 2016; Ruiz-Ruiz *et al*., 2017). Particularmente, en el estero El Soldado, el ISET estimado a partir del oxígeno disuelto y el pH del agua, mostró consistencia con los resultados arrojados por los índices TRIX e ICAC con prevalencia de condiciones oligotróficas (Ruiz-Ruiz, 2017).

También O´Boyle *et al*. (2013) en 90 estuarios de Irlanda compararon los resultados del ISET con otros esquemas de clasificación y resultó particularmente consistente con los criterios de OSPAR que clasifica las áreas como "áreas problemáticas", "áreas problemáticas potenciales" o "áreas no problemáticas" con respecto a la eutrofización.

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, el ISET tiene potencial de aplicación en lagunas costeras semi-áridas del Golfo de California para proporcionar una aproximación de su condición ambiental. Por ejemplo, los valores de índice estimados en el estero El Soldado (presumiblemente prístino) u otros sistemas que no reciban aguas residuales, podrían usarse como una línea base para evaluar sí en otras lagunas costeras receptoras de aguas residuales tienen problemas de eutrofización. En un primer paso, con base en el ISET, las lagunas podrían clasificarse y seleccionarse para evaluaciones más detalladas que

pueden involucrar la recopilación de datos para todas las variables del agua empleadas para hacer estimaciones del estado trófico.

### 8.3 Influencia de eventos de lluvias en salinidad del agua

El funcionamiento de las lagunas costeras en climas áridos es impulsado por el intercambio de agua con el mar adyacente y la intensa evaporación (Mendoza-Salgado *et al*., 2005). El escaso aporte de agua dulce, la alta evaporación y las aguas someras propician que prevalezca alta salinidad > 36 como se ha observado en lagunas costeras de esta región del Golfo de California (Valdez-Holguín, 1994; Arreola-Lizárraga *et al*., 2016; Ruiz-Ruiz *et al*., 2017), donde se ubica el estero El Soldado. Sin embargo, el ingreso de agua dulce aportado por lluvias y sus escorrentías asociadas a tormentas tropicales representa un aporte importante de agua que puede llegar a contribuir con > 50 % de la tasa anual de precipitación. Algunos estudios (Rivera-Monroy et al., 2019; Ruiz-Ramírez *et al*., 2019) han evaluado el efecto de tormentas tropicales y huracanes en lagunas costeras enfocándose en los cambios que se observan sobre los manglares antes y después de ocurrido el fenómeno. En el caso de las características del agua, los efectos de las tormentas tropicales en estuarios y lagunas costeras siguen siendo poco estudiados, en parte debido a la imprevisibilidad de trayectorias que dificultan organizar un muestreo apropiado antes y después de la tormenta (Herbeck *et al*., 2011).

En el estero El Soldado la magnitud de los cambios de la salinidad del agua, por el efecto de eventos extremos de lluvias asociadas a huracanes y tormentas tropicales, fue posible detectarla debido a los registros c/30 min. Estos cambios suceden en frecuencias menores a un día, y pueden propagarse por más de 24 hrs, después de ocurrido el evento.

En septiembre del 2016 el huracán Newton y en agosto-septiembre de 2017 la tormenta tropical Lidia, impactaron al estero con vientos de ≈ 5-10 m $s^{-1}$ y precipitaciones con intensidades de 24 y 48 mm $hr^{-1}$, respectivamente. En ambos eventos el patrón de cambio

y disminución de la salinidad fue similar con descensos desde 36 ups hasta > 25 ups en el transcurso de las 24 horas, después de los eventos de lluvias, los valores fluctuaron entre 25 y 30 ups en las siguientes 72 horas.

Lo anterior aporta evidencia de que la perturbación al estero El Soldado por estos eventos extremos de lluvia, es menor a un día y esto es atribuido a la tasa de renovación del agua del sistema que es < 5 días (Medina-Galván et al., 2019). En otra laguna costera árida del suroeste del Golfo de California (Ensenada de La Paz), Mendoza-Salgado et al. (2005) observaron que en condiciones áridas "típicas" la laguna se comportó como un sumidero de nitrógeno y fuente de fósforo, pero después de un evento de lluvia y su escorrentía, la laguna fue fuente de nitrógeno e incrementó la liberación de fósforo y después de 10 días de perturbación, la laguna mostró una ligera tendencia hacia condiciones "típicas" con respecto a su funcionamiento químico.

## 9. CONCLUSIONES

Los registros *in situ* de alta frecuencia de las características físico-químicas del agua en el estero El Soldado aportó nuevo conocimiento indicando la magnitud de los cambios diurnos y estacionales.

La temperatura del agua durante junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre fluctúa entre 30 y 34 °C; en seis semanas, desde mediados de octubre y hasta finales de noviembre ocurre un marcado descenso desde 30 hasta 20 °C; el periodo de diciembre, enero y febrero es el periodo más frío del año con temperatura de 15-20 °C; durante marzo, abril y mayo los valores fluctúan entre 20 y 28 °C.

Concentraciones de oxígeno disuelto < 4 mg $L^{-1}$ se observaron como eventos puntuales durante julio, agosto y septiembre, y eventos de hipoxia (< 3 mg $L^{-1}$) ocurrieron uno en julio y otro en agosto por periodos menores a tres horas. En el estero se presenta un incremento de concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y mayor variabilidad diurna con valores entre 5 y 10 mg $L^{-1}$ durante diciembre, enero, febrero y marzo.

En el estero El Soldado, la mayor parte del año, los valores de salinidad del agua tienen variación de 36 – 39 ups y califica como un sistema eurihalino. La salinidad del agua disminuyó hasta < 30 ups únicamente por efecto de lluvias en julio, agosto, septiembre y enero.

La salinidad del agua tuvo 36 - 39 ups en la mayor parte del año y únicamente disminuyó hasta < 30 ups durante eventos de lluvias en julio, agosto, septiembre y enero.

El pH tuvo variación a través del año con un intervalo de 6.9 – 9.1 unidades. Los valores más bajos se observaron en verano asociado a las altas temperaturas en los meses cálidos de junio, julio, agosto y septiembre.

El Índice Simple de Estado Trófico (ISET) indicó que el estero El Soldado tiene buena condición ambiental, lo cual coincide con los resultados del índice TRIX en estudios previos y que indican un estado oligotrófico. Con base en estos resultados, el ISET tiene potencial para ser usado en otras lagunas por su simplicidad.

En septiembre del 2016 el huracán Newton, y en agosto-septiembre de 2017 la tormenta tropical Lidia, impactaron al estero con vientos de ≈ 5-10 m $s^{-1}$ y precipitaciones con intensidades de 24-48 mm $hr^{-1}$, respectivamente. En ambos casos el patrón de cambio y disminución de la salinidad fue similar con descensos desde 36 ups hasta > 25 ups, 24 horas después de las lluvias, la salinidad regresó a valores de 36 ups en las siguientes 72 horas después de los eventos de lluvias.

## 9. LITERATURA CITADA

Alcocer-Vázquez, M.D. 2019. Análisis espacio-temporal de los vientos en la zona núcleo de la circulación monzónica: Sonora, México. Tesis de Maestría. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, 106 p.

Arreola-Lizárraga, J. A., F. J. Flores-Verdugo, A. Ortega-Rubio. 2004. Structure and litterfall of an arid mangrove stand on the Gulf of California, México. Aquatic Botany, 79 (2): 137-143.

Arreola-Lizárraga, J.A., G. Padilla-Arredondo, J. Medina-Galván, L. Méndez-Rodríguez, R. Mendoza-Salgado, M.V. Cordoba-Matson. 2016. An analysis of hydrobiological responses to anthropogenic and natural influences in a lagoon system in the Gulf of California. Oceanol. Hydrobiol. St. 45 (1):112-120.

Arreola-Lizárraga, J.A., G. Padilla-Arredondo, T.M. Ruiz-Ruiz, L.M. Cruz-García, L.C. Méndez-Rodríguez, P. Hernández-Almaraz y H.H. Vargas-González. 2018. Estuaries and Coastal Lagoons of Mexico: Challenges for Science, Management, and Conservation. pp. 251-284. En: A. Ortega-Rubio (ed.) Mexican Natural Resources Management and Biodiversity Conservation. Springer, Cham, Switzerland.

Aznar-Jiménez, A., 2000. Determinación de parámetros físico-químicos de la calidad de las aguas. Gest. Amb. 2(23):12-19

Best, M. A., A. W. Wither, S. Coates. 2007. Dissolved oxygen as a physico-chemical supporting element in the Water Framework Directive. Mar. Pollut. Bull. 55: 53–64.

BOGES. 2006. Declaratoria que establece como área natural protegida bajo categoría de zona sujeta a conservación ecológica donde se encuentra el Estero El Soldado y áreas aledañas. Boletín Oficial del Gobierno del Estado de Sonora, Tomo CLXXVII, No. 40, Sección III, 18 mayo 2006, Hermosillo, Sonora.

Briciu-Bughina, C., T. Sullivan, J. Champan. F. Regan. 2014. Continuous high-frequency monitoring of estuarine water quality as a decision support tool: a Dublin Port case study. Environ. Monit. Assess. 186 (9): 5561-80.

Brito-Castillo, L., M.A. Crimmins, S.C. Díaz. 2010. Clima. pp-73-96. En: F.E. Molina-Freaner, T.R. Van-Devender (eds). Diversidad Biológica de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Burt, T.P, N. J. K. Howden, F. Worrall, J. J. McDonnell. 2011. On the value of long-term, low-frequency water quality sampling: avoiding throwing the baby out with the bathwater. Hydrol. Process. 25: 828-830.

CEDES. 2007. Programa de Manejo de la Zona Sujeta a Conservación Ecológica. El estero "El Soldado". Municipio de Guaymas, Sonora, México. Documento Interno. Mayo 2007.

Contreras, E., M. J. Polo. 2012. Measurement frequency and sampling spatial domains required to characterize turbidity and salinity events in the Guadalquivir estuary (Spain). Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12:2581-2589.

Contreras-Espinoza F., B. Warner. 2004. Ecosystem characteristics and management considerations for coastal wetlands in Mexico. Hydrobiologia, 511: 223-245

Davies, J. L. 1964. A morphogenic approach to world shorelines: Zeit fur Geomorph. 8:27-42.

De Jonge, V. N., M. Elliot, E. Orive. 2002. Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. Hidrobiologia, 475/476: 1 – 19.

De la Lanza- Espino, G., S. Hernández P., J. Carbajal P., 2000. Organismos indicadores de la calidad del agua y la contaminación (bioindicadores). Editorial Plaza y Valdés, S.A de C. V. 633 p.

Diaz, R.J., D.L. Breitburg. 2009. The hypoxic environment. Fish Physiology, 27: 1-23.

Douglas, M.W., Robert A. M., Kenneth H., Sergio T., 1993. The Mexican Monsoon. Journal of Climate. 6:1665-1678.

Filloux, J. H. 1973. Tidal Patterns and Energy Balance in the Gulf of California. Nature. 243: 217–221.

FIR-ES. 2011. Ficha Informativa del sitio Ramsar “Estero El Soldado”. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza, 14 p.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 246p.

Garel, E., S. Nunes, J. Magalhães Neto, R. Fernandes, R. Neves, J. C. Marqués, O. Ferreira. 2009. The autonomous Simpatico system for real-time continuous water-quality and current velocity monitoring: examples of application in three Portuguese estuaries. Geo-Mar Lett. 29 (5): 331-341.

Guereca-Hernández, L.P. 1994. Contribuciones para la caracterización ecológica del Estero del Soldado, Guaymas, Sonora, México. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-Campus Guaymas, México. 135 p.

Halpern, B. S., S. Walbridge, K. A. Selkoe, C. V. Kappel, F. Micheli, C. Agrosa, J. F. Bruno, K. S. Casey, C. Ebert, H. E. Fox, R. Fujita, D. Heinemann, H. S. Lenihan, E. M. P. Madin, M. T. Perry, E. R. Selig, M. Spalding, R. Steneck, R. Watson. 2008. A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. Science, 319 (5865): 948 - 952.

Hartnett, M., S. Nash. 2015. An integrated measurement and modeling methodology for estuarine water quality management. Water Sci. Eng. 8(1): 9-19.

Herbeck, L.S., D. Unger, U. Krummea, S. M. Liu, T.C. Jennerjahn. 2011. Typhoon-induced precipitation impact on nutrient and suspended matter dynamics of a tropical estuary affected by human activities in Hainan, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science 93: 375-388.

Hernández-Ayón., J. M., A. Zirino, S.G Marinore, R. Canino-Herrera, M. S. Galindo-Bect. 2003. Relación del pH-densidad con el agua de mar. Ciencias Marinas. 29(4): 497–508.

Horsburgh, J. S., A. Spackman Jones, D. K. Stevens, D. G. Tarboton, N. O. Mesner. 2010. A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates. Environ. Modell. Softw. 25:1031–1044

INE. 2007. La calidad del agua en los ecosistemas costeros de México. 1ra Edición. México, D.F. 407p.

Jones, R.C., A.P. Graziano. 2013. Diel and seasonal patterns in water quality continuously monitored at a fixed site on the tidal freshwater Potomac River. Inland Waters, 3: 421-436.

Kirchner, J. W., X. Feng, C. Neal, A. J. Robson. 2004. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future. Hydrol. Process. 18:1353-1359

Kjerfve, B. 1994. Coastal Lagoons Processes. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. 576p.

Lara-Lara, J. R., J. A. Arreola-Lizárraga, L. E. Calderón-Aguilera, V. F. Camacho-Ibar, G. De la Lanza-Espino, A. Escofet-Giansone, M. I. Espejel-Carbajarl, M. Guzmán-Arroyo, B. Lladah, M. López-Hernández, E. A. Meling-López, B. P. Moreno-Casasola, H. Reyes-Bonilla, E. Ríos.Jara, J. A. Zertuche-González. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. pp 109-134. En: CONABIO. Capital Natural de México, conocimiento actual de la biodiversidad. Primera edición. México, D.F.

Lankford, R. R. 1977. Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification. pp 182-215. En: Wiley M (ed.). Estuarine Processes. Elsevier. New York.

Mata-Ángeles, J.A., R. Casillas-Hernández, T.M. Ruiz-Ruiz, J.A. Arreola-Lizárraga. 2019. Estado trófico del estero El Soldado, Sonora, México. pp 365-370. En: Paz, F., A. Velázquez y M. Rojo (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2019. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

Medina-Galván, J., J. M. Audelo-Naranjo, J. A. Arreola-Lizárraga. 2019. Importancia del monitoreo de procesos biogeoquímicos en lagunas costeras: Área Natural Protegida estero El Soldado como estudio de caso. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 27(77): 12-18.

Mendoza-Salgado, R. A., C. H. Lechuga-Devéze, A. Ortega-Rubio. 2005. First approach of a method to assess water quality for arid climate bay in the Gulf of California. Sci. Total Environ. 347:208-216.

Mitchell, D.I., D. Ivanova, R. R. Timothy, J. Brown, K. Redmond. 2002. Gulf of California Sea Surface Temperatures and the North American Monsoon: Mechanistic Implications from Observations. Journal of Climate, 15 (17):2261-2281.

Moreno-Franco, D. P., J. Quintero Manzano, A. López Cuevas. 2010. Método para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. ContactoS. 78: 25-33.

Nixon, S. W. 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. Ophelia. 41:199-229.

O'Boyle, S., G. McDermott, T. Noklegaard y R. Wilkes. 2013. Tone Noklegaard & Robert WilkesA Simple Index of Trophic Status in Estuaries and Coastal Bays Based on Measurements of pH and Dissolved Oxygen. Estuaries and Coasts, 36: 158–173.

Painting, S.J., M.J. Devlin, S.J. Malcolm, E.R. Parker, D.K. Mills, C. Mills, P. Tett, A. Wither, J. Burt, R. Jones, K. Winpenny. 2007. Assessing the impact of nutrient enrichment in estuaries: Susceptibility to eutrophication. Marine Pollution Bulletin, 55:74-90.

Reyes-Coca, S., E. Pavía-López, J. Candela-Pérez, R. Troncoso-Gaytan. 1984. Estudio preliminar de las condiciones meteorológicas y climatológicas alrededor del Golfo de California. 1ra. parte: Análisis del viento. Ciencias Marinas, 10 (2): 9-26.

Rivera-Monroy, V.H., T.M. Danielson, E. Castañeda-Moya, B.D. Marx, R. Travieso, X. Zhao, E.E.Gaiser, L.M. Farfan. 2019. Long-Term demography and stem productivity of Everglades mangrove forests (Florida,USA):Resistance to hurricane disturbance. Forest Ecol. Manag., 440: 79-91.

Rode, M., A. J. Wade, M. J. Cohen, R. T. Hensley, M. J. Bowes, J. W. Kirchner, G. B. Arhonditsis, P. Jordan, B. Kornvang, S. J. Halliday, R. A. Skeffington, J. C. Rozemeijer, A. H. Aubert, K. Rinke, S. Jomaa. 2016. Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. Environ. Sci. Tecnol. 50: 10297-10307

Roden, G. 1964. Oceanographic aspects of the Gulf of California. En: Van Andel, T.H., G.G. Shor (eds.). Marine geology of the Gulf of California. Am. Assoc. Petroleum Geologists memoir 3. pp 30-53.

Ruiz-Ramírez, J. D., J. I. Euán-Ávila, V. H. Rivera-Monroy. 2019. Vulnerability of Coastal Resort Cities to Mean Sea Level Rise in the Mexican Caribbean. Coast Manage., 47 (1): 23-43.

Ruiz-Ruiz, T.M., J.A. Arreola-Lizárraga, L. Morquecho, R.A. Mendoza-Salgado, A. Martínez-López, L.C. Méndez-Rodríguez, J. Enríquez-Flores. 2016. Assessment of eutrophication in a subtropical lagoon in the Gulf of California. Aquat. Ecosyst. Health, 19 (4): 382-392.

Ruiz-Ruiz, T.M. 2017. Análisis comparativo de índices de eutrofización en lagunas costeras del estado de Sonora, México. Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., La Paz, B.C.S., 120 p.

Ruiz-Ruiz, T.M., J.A. Arreola-Lizárraga, L. Morquecho, L.C. Méndez-Rodríguez, A. Martínez-López, R.A. Mendoza-Salgado. 2017. Detecting eutrophication symptoms by means of three methods in a subtropical semi-arid coastal lagoon. Wetlands, 37:1105-1118.

Russell, G. A. 1979. A seventeen month study of the meteorology, geology, hidrology and water chemistry of Laguna (estero) El Soldado, Guaymas, Sonora, México. Tech. Rep. University of Manitoba. Winnipeg, Manitoba, Canadá. 146 p.

Valdez-Holguín, J. E., L. R. Martínez-Córdova. 1993. Variabilidad de algunos parámetros fisicoquímicos y productividad primaria en la laguna La Cruz, Sonora, México. Rev. Biol. Trop. 41 (2): 161-172.

Valdez-Holguín, J. E. 1994. Variaciones diarias de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila a, en una laguna hipersalina del Golfo de California. Cienc. Mar. 20: 123-137

Valenzuela-Siu, M., J. A. Arreola Lizárraga, S. Sánchez Carrillo y G. Padilla Arredondo. 2007. Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. Hidrobiológica. 17 (3): 193-208.

Wolfe, D. A., Kjerfve B. 1986. Estuarine variability: an overview. En: Wolfe DA (ed). Estuarine Variability. Academic Press Inc., San Diego, California, USA. pp. 3–17