# Variabilidad fisicoquímica y proyección de escenarios climáticos sobre el oxígeno disuelto en la Laguna de Términos, Campeche

# Physicochemical variability and climate scenario projections on dissolved oxygen in the Terminos Lagoon, Campeche

Canedo-López, Yunuén * [a], Ruiz-Marín, Alejandro [b] y Ayala-Coronado, Kenya Amaranta [c]

[a] Universidad Autónoma del Carmen • JHU-3969-2023 • 0000-0003-1791-4899 • 91434
[b] Universidad Autónoma del Carmen • MYS-5428-2025 • 0000-0001-5075-9611 • 208285
[c] Universidad Autónoma del Carmen • MZR-5720-2025 • 0009-0004-8216-4216 • 1314547

**Clasificación:**

**DOI:** https://doi.org/10.35429/H.2025.1.56.70

Área: Física, Matemáticas y Ciencias de la Tierra
Campo: Ciencias de la Tierra y del Espacio
Disciplina: Oceanografía
Subdisciplina: Oceanografía química

## Key Handbooks

Esta investigación aporta significativamente a la ciencia y tecnología al calibrar un modelo de transferencia de oxígeno [R=0.8] que permite proyectar escenarios de impacto del cambio climático sobre el oxígeno disuelto en la Laguna de Términos. Los aspectos clave para la generación de conocimiento universal incluyen la metodología de monitoreo sistemático durante cuatro años [2021-2024], la aplicación del modelo matemático para escenarios de incremento térmico, y la correlación entre variables fisicoquímicas y factores ambientales en sistemas lagunares costeros. Se concluye que la laguna es vulnerable al calentamiento global y que el modelo puede optimizarse con datos adicionales de productividad primaria y variables ambientales.

.

**Área:** Incidencia y atención de problemáticas nacionales.

**Citación:** Canedo-López, Yunuén, Ruiz-Marín, Alejandro y Ayala-Coronado, Kenya Amaranta. 2025. Variabilidad fisicoquímica y proyección de escenarios climáticos sobre el oxígeno disuelto en la Laguna de Términos, Campeche. 56-70. ECORFAN.

* ✉ [ycanedo@pampano.unacar.mx]

**Handbook shelf URL:** https://www.ecorfan.org/handbooks.php

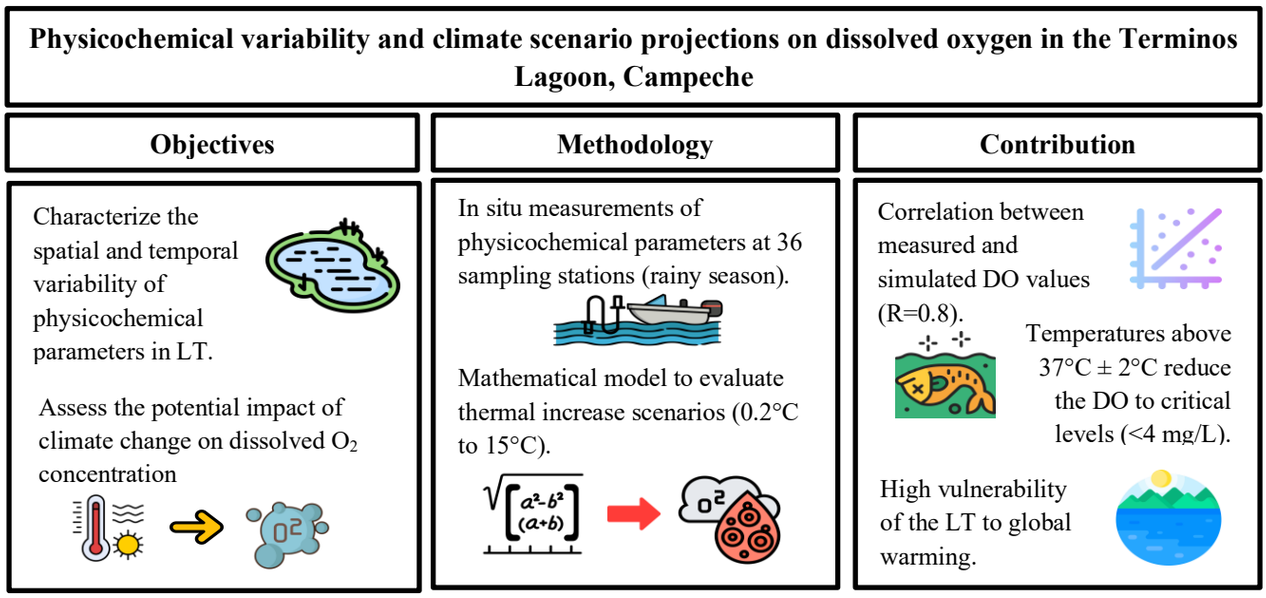
ISBN 978-607-8948-59-8 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HCMPDS. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.

RENIECYT
Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas
1702902 SECIHTI

## Abstract

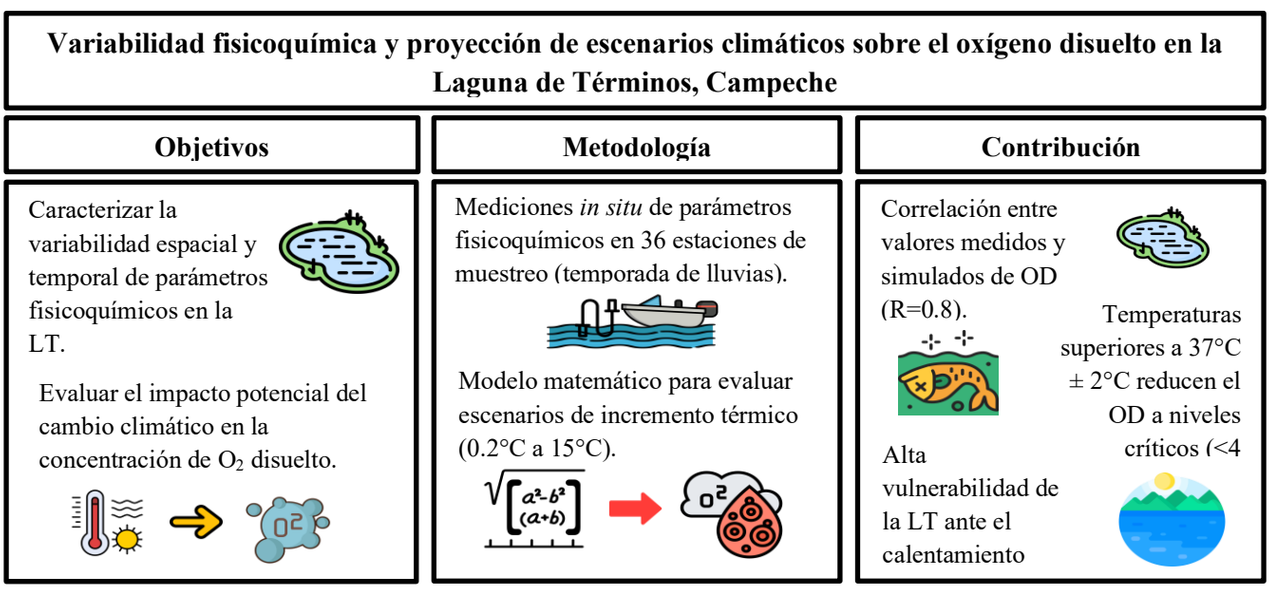
This study characterizes the spatial and temporal variability of key physicochemical parameters in the Terminos Lagoon [LT] during the rainy season [September] from 2021 to 2024, and assesses the potential impacts of climate change on dissolved oxygen [DO] concentrations using predictive scenarios of temperature increase. In situ measurements of temperature, salinity, pH, conductivity, and DO were taken across 36 sampling stations. A dissolved-oxygen transfer model calibrated with field data [R=0.8] indicates that DO levels remain above 6 mg $L^{-1}$ with temperature rises up to 10 °C, but drop below 4 mg $L^{-1}$ beyond a 37 °C ± 2 threshold, entering critical hypoxic conditions. The findings underscore the lagoon's vulnerability to warming and the need for continuous environmental monitoring.


**Coastal lagoon; Dissolved oxygen; Climate change scenarios**


## Resumen

Este estudio describe la variabilidad espacial y temporal de variables fisicoquímicas en la Laguna de Términos [LT] durante la temporada de lluvias [septiembre] de 2021 a 2024, y evalúa el posible impacto del cambio climático en las concentraciones de oxígeno disuelto [OD] mediante escenarios de incremento térmico. Se realizaron mediciones in situ de temperatura, salinidad, pH, conductividad y OD en 36 estaciones de muestreo. El modelo de transferencia de oxígeno, calibrado con datos de campo [R=0.8], predice que los niveles de OD se mantienen por encima de 6 mg $L^{-1}$ con aumentos de hasta 10 °C, pero descienden por debajo de 4 mg $L^{-1}$ al superar 37 °C ± 2, entrando en condiciones críticas de hipoxia. Estos resultados resaltan la vulnerabilidad de la laguna y la necesidad de monitoreo continuo.


**Laguna costera; Oxígeno disuelto; Escenarios climáticos**

## Introducción

El impacto generado en zonas costeras se ha atribuido al crecimiento poblacional y a las actividades antropogénicas, ocasionado cambios en el uso del suelo, en el hábitat de flora y fauna, cambios en la química del agua, así como el balance de los ciclos biogeoquímicos y la diversidad de la vida en la tierra, lo que ha llevado a la necesidad de realizar estudios y desarrollar enfoques aptos que encaucen las acciones tendientes a un manejo integral adecuado de las zonas costeras [Gameiro et al., 2004; Usang et al., 2025].

El manejo adecuado de la zona costera ha tomado especial relevancia debido a las diversas problemáticas ambientales ocasionadas por las actividades económicas, lo que ha ocasionado el surgimiento acelerado y no planeado de centros de población, que demandan espacios de vivienda y servicios, mismos que contribuyen con el enriquecimiento de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que provienen de las descargas o vertimientos clandestinos de residuos industriales o de servicios, escorrentías de tierras agrícolas y actividad ganadera [Newton et al., 2014]. Por otro lado, se reconoce como una problemática ambiental la depositación atmosférica de compuestos liberados durante la combustión incompleta de combustibles fósiles [Antonio-Durán et al., 2025; Lee et al., 2024].

Las zonas costeras reciben una gran cantidad de aportes externos como sedimentos y contaminantes provenientes de ríos tributarios, además de los provenientes de la zona marina y del desarrollo urbano y por actividades antropogénicas, por lo que ejercen fuertes presiones en el equilibrio ecológico [He & Xu, 2015]. Tal es el caso de las zonas costeras del Golfo de México, donde una de las actividades más desarrolladas en los últimos años, ha sido la actividad petrolera costa afuera y en tierra, así como el desarrollo de actividades económicas como la industrial, comercial y de servicios, residencial, pesquera y turística que, a su vez han traído consigo un importante crecimiento poblacional y demanda de viviendas y servicios [Villalobos-Zapata et al., 1999; Pulster et al., 2020].

Es un hecho que las lagunas costeras y estuarios se ubican entre los ecosistemas de mayor productividad, la cual depende de muchos factores, entre los que se encuentra la disponibilidad de luz y nutrientes para la comunidad fitoplanctónica [Pérez-Ruzafa et al., 2024]. Estos factores a su vez se ven modificados por los aportes fluviales y los intercambios mareales, los cuales alternarán su dominancia en función de las principales épocas climáticas que se presentan a lo largo del año. Las lagunas costeras son ambientes muy importantes de los que dependen una gran variedad y cantidad de recursos biológicos y comunidades humanas, como es el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. Sin embargo, este ecosistema ha sido sometido cada vez más a presiones como consecuencia de las actividades humanas, por lo que se hace indispensable conocer adecuadamente sus características físicas y químicas.

La temperatura es una de las variables fisicoquímicas de importancia en la biosfera, dado que afecta el movimiento de las partículas, la dinámica de los fluidos, las constantes de saturación de los gases disueltos en agua, el metabolismo de los organismos y otros factores directa o indirectamente relacionados con la vida. Típicamente la mayor fuente de calor en el agua es la radiación solar, particularmente cuando la luz penetra directamente en la superficie del agua [Johnson & Jones, 2000]. Sin embargo, existen otros factores como el transporte de calor de las aguas subterráneas el cual importante en el control de la temperatura de un cuerpo de agua [Baxter & Hauer, 2000; Mellina et al., 2002]. Por lo tanto, la temperatura juega un papel vital en la presencia o ausencia de los microorganismos de vida acuática [Ebersole et al., 2001]. Se podría esperar que el cambio climático incremente la temperatura, ocasionando un nivel mayor en muchos lagos costeros. Es un hecho, que el cambio climático puede tener considerables implicaciones en la estratificación de los lagos, estudios empleando modelos predictivos han sugerido que el incremento en la temperatura puede ocasionar impactos en la concentración de oxígeno disuelto [OD] en el agua [Lehman, 2002].

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las principales variables fisicoquímicas de la Laguna de Términos durante la temporada de lluvias [septiembre] en el periodo 2021 2024, y evaluar el impacto potencial del cambio climático —mediante escenarios de incremento de temperatura— sobre la concentración de oxígeno disuelto [OD], con el fin de fundamentar la necesidad de crear observatorios ambientales que permitan un monitoreo continuo y una mejor comprensión del funcionamiento del sistema costero.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La Laguna de Términos [LT] que se encuentra dentro del estado de Campeche. Esta zona fue decretada desde 1994 como Área de Protección de Flora y Fauna [APFFLT], ya que posee gran importancia ecológica y además de su categoría de protección por la CONANP, es considerado desde 2004 como Humedal de Importancia Internacional por la Convención de Ramsar y forma parte de la Región Terrestre Prioritaria no. 144 llamada "Pantanos de Centla", su zona marina forma parte de la Región Marina Prioritaria "Pantanos de Centla-Laguna de Términos", además es Región Hidrológica Prioritaria y Área de Importancia para la Conservación de las Aves [AICAS], por la Comisión Nacional para el Uso y Manejo de la Biodiversidad [CONABIO].

El APFFLT se ubica en la zona costera del estado de Campeche, entre el Río San Pedro y San Pablo al occidente y el área de drenaje del Estero de Sabancuy hacia el Oriente, con una superficie de 706,147.67 ha, de las cuales 351,582 ha son de superficie terrestre [49.87%] y 353, 434 ha son de superficie acuática [50.13%] [SEMARNAT & CONAGUA, 2015].

La Laguna de Términos tiene dos bocas que la comunican con el mar, la de Puerto Real del lado este y El Carmen [Figura 1], del lado oeste y está en la zona de transición entre la topografía calcárea baja y las llanuras aluviales del Golfo de México [Amezcua-Linares & Yáñez-Arancibia, 1978]. La laguna posee forma elipsoidal en dirección este-oeste, con 70 km de longitud y 30 km en la zona de más anchura, siendo su área de 1700 $km^2$. La Laguna de Términos obtiene sus principales aportaciones del sistema Candelaria-Panlau formado por la confluencia de los ríos Candelaria y Mamantel y del sistema Chumpan Balchacah.

La descarga total media anual de los ríos a la Laguna de Términos se ha estimado en $6x10^9$ $m^3$. El agua que entra a la laguna es a través de la boca de Puerto Real y sale por la boca Del Carmen con un flujo neto de hasta 1350 $m^3$ $s^{-1}$. Estas dos entradas oceánicas son sustancialmente más profundas que el resto de la laguna, la entrada situada al occidente posee 3.4 km de ancho y una profundidad máxima de 17 m y la entrada oriental con 3.2 km de ancho y una profundidad máxima de 12 m. La circulación media de la laguna cambia de modo intermitente de un flujo Este a Oeste y se comporta como dos unidades hidrológicas casi independientes con su respectivo aporte proveniente de la marea [Smith et al., 1997].

Los márgenes de la Laguna de Términos están cubiertos por manglares siendo *Rhizophora mangle* el más abundante y, para las zonas con alta influencia fluvial es el manglar negro. La vegetación existente son pastos marinos como *Thalassia testadinum, Halodule wrightii y Syringodium filiforme.* Los extensos humedales que rodean la Laguna Términos proporcionan condiciones óptimas para la migración y reproducción de multitud de especies incluyendo lubina, mariscos, camarón y manatíes, entre otras. Esta región también alberga la mayor densidad de delfines dentro del Golfo. Además, esta zona protegida representa uno de los hábitats de invernada más significativos para las especies aviares en el Golfo de México, y su diversidad de flora y fauna marina y terrestre es considerada como excepcionalmente alta [Yáñez-Arancibia & Day Jr, 1988]. Además, se ha reportado que para la Laguna de Términos la producción neta promedio del fitoplancton en el estero es de 300 g $cm^2$ $año^{-1}$ y en la laguna de aproximadamente 200 g $cm^2$ $año^{-1}$ [Day Jr et al., 1988].

La Laguna de Términos presenta cuatro temporadas climáticas claramente definidas según análisis recientes de precipitaciones. La temporada seca ocurre de febrero a abril, caracterizada por lluvias mínimas. Mayo constituye un período de transición con precipitaciones considerablemente mayores y más variables que los meses previos. La temporada húmeda se extiende de junio a septiembre con lluvias abundantes. Finalmente, la temporada de "nortes" abarca de octubre a marzo, solapándose parcialmente con la temporada seca, y se distingue por los fuertes vientos del norte que afectan la región [Guerra-Santos & Kahl, 2018].

### Programa de monitoreo

El estudio se realizó entre 2021 y 2024 en la Laguna de Términos, enfocándose principalmente en la temporada de lluvias. Se establecieron 36 estaciones de muestreo distribuidas de acuerdo con las diferentes zonas hidrológicas características de la laguna [Figura 2].

En cada estación, se realizaron mediciones *in situ* de parámetros fisicoquímicos utilizando una sonda multiparamétrica de bajo costo [SMBC] desarrollada específicamente para monitoreo de sistemas estuarinos [Méndez-Barroso et al., 2020]. Esta sonda permitió medir de manera continua y confiable temperatura del agua [°C], potencial de hidrógeno [pH], salinidad [PSU], conductividad eléctrica [µS/cm], oxígeno disuelto [mg/L], sólidos disueltos totales [SDT] y nivel de agua.

## Box 1

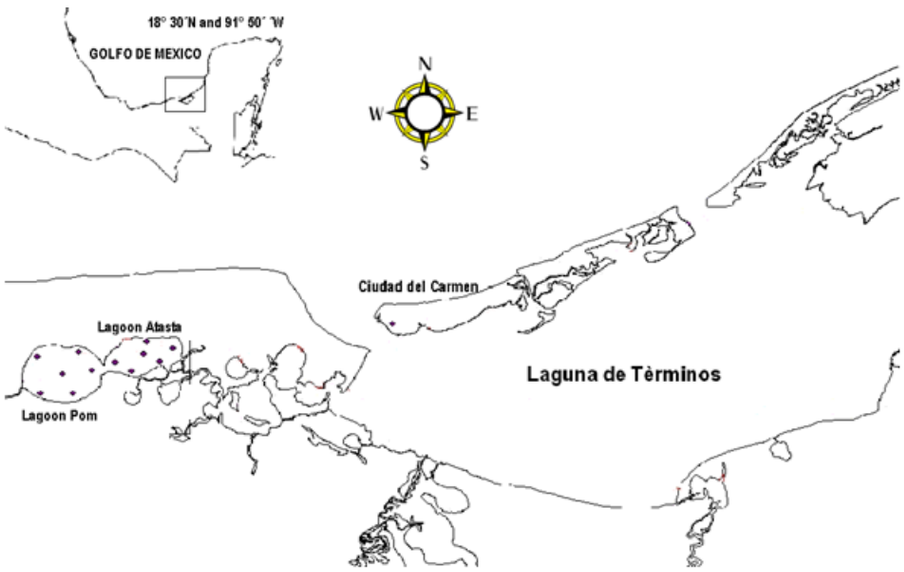



**Figura 1**

Área de estudio Laguna de Términos, Campeche.

*Fuente: Ruiz-Marín et al. [2009, p.65].*

Las muestras de agua se recolectaron en botellas oscuras de un litro, se preservaron en hielo durante el trabajo de campo y posteriormente fueron trasladadas al Laboratorio de Producción Primaria del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional en Mérida [CINVESTAV-Unidad Mérida] para su almacenamiento y análisis.

## Box 2

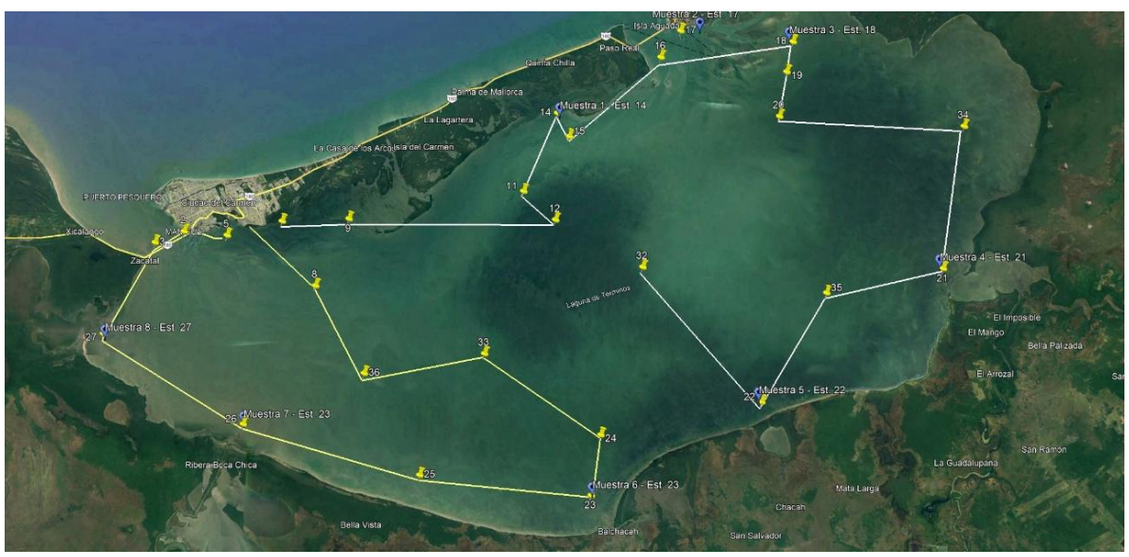



**Figura 2**

Ubicación de las estaciones de muestreo en la Laguna de Términos.

*Fuente: Google Earth [© 2025 Google], elaboración propia.*

**Modelo de oxígeno disuelto**

Los niveles de saturación de oxígeno disuelto en la Laguna de Términos se emplearon para calibrar el modelo descrito por Thomann & Mueller [1987] el cual describe el mecanismo de transferencia de oxígeno de la atmósfera a un cuerpo de agua. Si un cuerpo de agua está en equilibrio con la atmósfera alcanzará un nivel fijo de oxígeno en relación con la temperatura. Bajo estas condiciones se alcanzarán niveles de saturación de oxígeno como lo describe la ley de Henry, la cual menciona que el peso de cualquier gas que se disuelve en la columna de agua a temperatura constante es directamente proporcional a la presión que ejerce sobre el líquido. Por lo tanto, la ecuación de Henry se describe como:

$$P = H_e C_s \quad [1]$$

Donde P es la presión parcial de $O_2$ [mm Hg]; Cs es la concentración de oxígeno saturado [OD] en el líquido [mg $L^{-1}$] y Hc es la constante de la ley de Henry [mm Hg $mg^{-1}$ $L^{-1}$]. De una forma adimensional se tiene que:

$$He = 16 \frac{M}{T} \frac{P\ [mm\ Hg]}{Cs\ [mg\ L^{-1}]} \quad [2]$$

Donde T es la temperatura [°K]; M es el peso molecular [g $gmol^{-1}$]; He tiene unidades en mg $L^{-1}$ en la fase líquida. Por lo tanto, el peso molecular del $O_2$ es 32, la presión parcial 158 mm Hg y un valor de saturación de 14.2 mg $L^{-1}$, el valor de la constante de Henry es 21. El nivel de saturación del OD [Cs] en equilibrio con la atmósfera depende de la temperatura, salinidad y presión.

Para determinar el valor de saturación de OD a nivel del mar en función de la temperatura y salinidades se utilizó la ecuación 3.

$$Ln\ C_{sf} = -139.344 + \frac{1.576\ x\ 10^5}{T} - \frac{6.642\ x\ 10^7}{T^2} + \frac{1.244\ x\ 10^{10}}{T^3} - \frac{8.622\ x\ 10^{11}}{T^4} - [0.04662 * T] \quad [3]$$

Donde $C_{sf}$ es la concentración de OD saturado en agua [mg $L^{-1}$ a 1 atm]; Ln es el logaritmo natural, T la temperatura [°K].

Para determinar el efecto de la presión barométrica se empleó la ecuación 4.

$$Csp = Cso\ P \left[ \frac{[1-\frac{P_{wv}}{P}][1-\theta P]}{[P-P_{wv}][1-\theta]} \right] \quad [4]$$

Donde $C_{sp}$ es OD saturado a determinada P [mg $L^{-1}$]; $C_{so}$ es el OD saturado a nivel del mar; P es la presión no estándar [atm]; $P_{wv}$ es la presión parcial de vapor de agua [atm], determinada por la ecuación 5.

$$Ln\ P_{wv} = 11.8571 - \left(\frac{3840.7}{T}\right) \quad [5]$$

$$\theta = 0.000975 - [1.426\ x\ 10^{-5} T^2 + 6.436\ x\ 10^{-8} T^2] \quad [6]$$

Con T [temperatura] en °C.

La presión barométrica a determinada altitud [P] en atmósferas, se estimó de acuerdo con la ecuación 7.

$$P = P_0 - \left[0.02667 \frac{\Delta H}{760}\right] \quad [7]$$

Donde $P_0$ es la presión barométrica o presión atmosférica [mm Hg]; ΔH es la diferencia de elevación entre la estación 0 y H [ft].

**Coeficiente de Re-aireación**

En los cuerpos de agua, el intercambio de oxígeno se lleva a cabo en el área interfacial de la superficie del agua. El coeficiente de re-aireación del oxígeno en agua depende de varios factores, como es la dinámica de mezcla y el grado de turbulencia, así como la velocidad de flujo, temperatura, velocidad del viento, entre otras. La ecuación de O´Connor´s para determinar este coeficiente se basa en la ecuación [Thomann & Mueller, 1987].

$$K_a = \frac{K_L}{H} \quad [8]$$

Donde, $K_L$ es el coeficiente de transferencia de viento [m día$^{-1}$]; H = Profundidad [ft]

En el caso de lagos, la transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia la capa superficial es significativo, debido a la turbulencia o velocidad del viento que se genera sobre estos ecosistemas, dando como resultado un incremento de re-aireación. Por lo tanto, el coeficiente de transferencia puede determinarse con la ecuación 9.

$$K_L = 0.728U_W - 0.31U_W^{0.5} + 0.372U_W^2 \quad [9]$$

Donde $U_W$ es la velocidad del viento [m s$^{-1}$] a 10 m sobre la superficie del agua.

**Resultados**

El sistema Laguna de Términos durante la temporada de lluvias mostró variaciones de temperatura con diferencias significativas [ANOVA P≤0.05] entre las diferentes campañas de muestreo de muestreo, obteniéndose las mínimas de 26 °C a máximas de 34 °C [Figura 3]. La temperatura promedio registrada desde el año de referencia 2007 a un periodo de 2021 a 2024 fue de 29.4 °C a 30.89 °C [Tabla 1], sugiriendo que los cambios que ocurren en la temperatura son de baja variabilidad durante la temporada de lluvias.

Durante la temporada de lluvias, la influencia combinada del océano adyacente y de las descargas fluviales moldeó tanto el gradiente de salinidad como los niveles de oxígeno disuelto [OD] en la Laguna de Términos. En particular, el aporte de materia orgánica por los ríos provocó disminuciones puntuales de OD, con valores que oscilaron entre 2 y 10 mg L$^{-1}$ [Figura 3], aunque las diferencias globales entre campañas no resultaron significativas [ANOVA P≥0.126], manteniéndose el promedio entre 7.3 y 10.10 mg L$^{-1}$ [Tabla 1].

Este comportamiento concuerda con estudios previos que relacionan la descomposición microbiana de los materiales orgánicos transportados con el consumo de oxígeno, generando condiciones de hipoxia o incluso anoxia.

Por ejemplo, Ghandourah et al. [2023] demostraron en lagunas costeras del Mar Rojo oriental que elevados aportes orgánicos aceleran la deficiencia de OD, y Marinov et al. [2008] documentaron un aumento del metabolismo anaeróbico en aguas profundas bajo similar influencia orgánica.

## Box 3

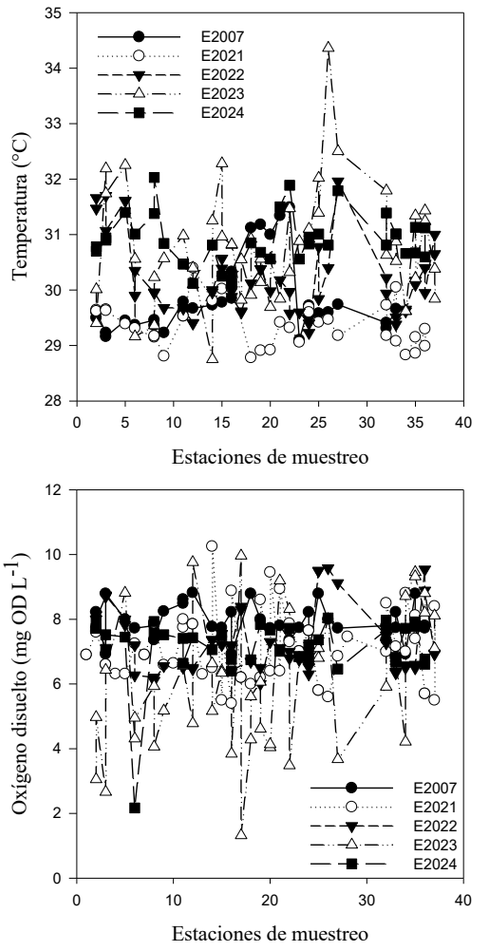



**Figura 3**

Variación de temperatura y oxígeno disuelto en las estaciones de la Laguna de Términos durante las campañas de muestreo 2007 y 2021-2024.

*Fuente: elaboración propia.*

De manera similar, las mediciones de salinidad exhibieron una variabilidad considerable con diferencias estadísticamente significativas [ANOVA P≤0.05], que van desde un mínimo de 15 UPS hasta un máximo de 37 UPS [Figura 4].

Los valores medios registrados a lo largo de las campañas de muestreo fluctuaron entre 27.94 y 37.9 UPS. Las variaciones en la salinidad dentro de Laguna de Términos están intrínsecamente ligadas a los insumos de precipitación, los cuales juegan un papel fundamental en la atenuación de la salinidad durante periodos que coinciden con la descarga del río.

La salinidad en las lagunas costeras está determinada por la interacción entre aportes de agua dulce y salada, conformando ambientes salobres con un gradiente salino que disminuye desde la conexión con el mar hacia las desembocaduras internas de los ríos [UNAM, 1983].

Este gradiente es resultado de la mezcla de agua marina y fluvial, influenciada por factores como las mareas, las precipitaciones y la evaporación. Las corrientes internas también juegan un papel crucial, ya que afectan la distribución de materiales orgánicos e inorgánicos a lo largo del sistema lagunar [Tenorio-Fernández, 2015].

## Box 4

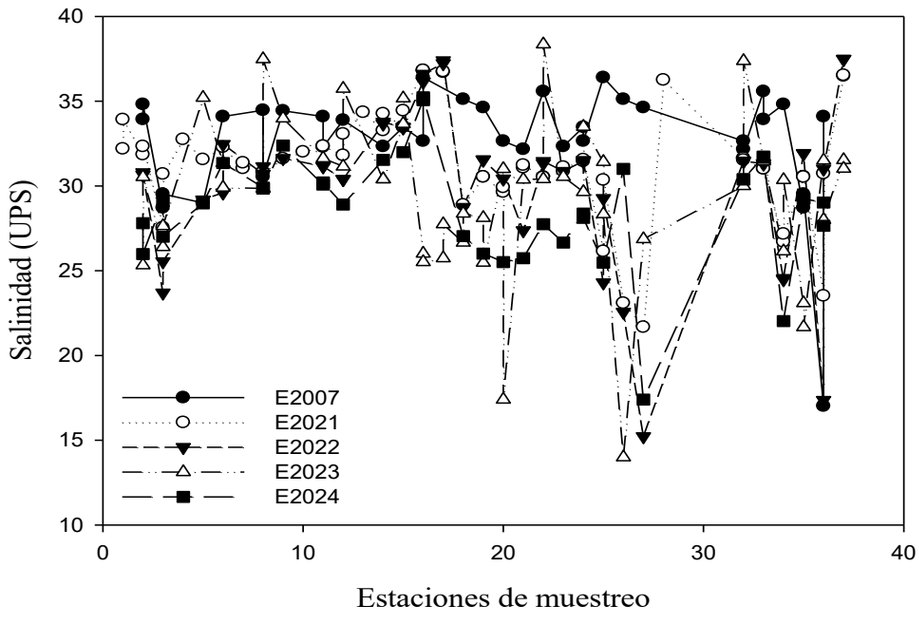



**Figura 4**

Variación de la salinidad [UPS] en las estaciones de muestreo las estaciones de la Laguna de Términos durante las campañas de muestreo 2007 y 2021-2024.

*Fuente: elaboración propia.*

### Distribución Espacial

La distribución espacial de salinidad y OD muestra la influencia de los aportes de ríos causando una disminución de la concentración de ambos parámetros en la temporada de lluvia, sugiriendo que el aumento de materia orgánica podría contribuir a la disminución de oxígeno disuelto. Los valores más bajos de OD se observan en zonas cercanas a las descargas de ríos y zonas de baja profundidad con valores que vas desde 1.2 a 1.5 m [Figura 5 y 6].

## Box 5

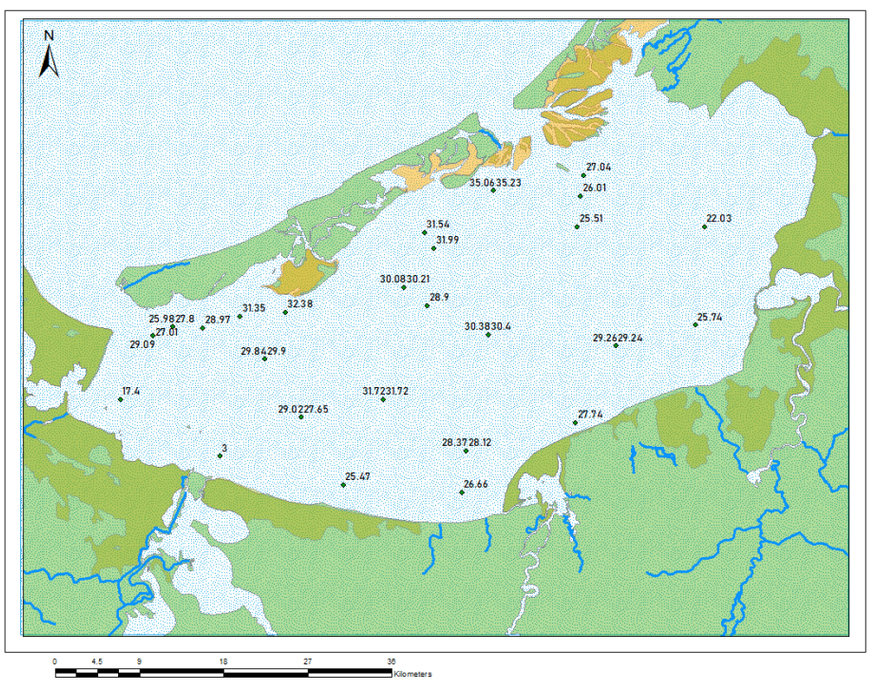



**Figura 5**

Distribución espacial de salinidad [UPS] en la Laguna de Términos, campaña 2023

*Fuente: elaboración propia.*

## Box 6

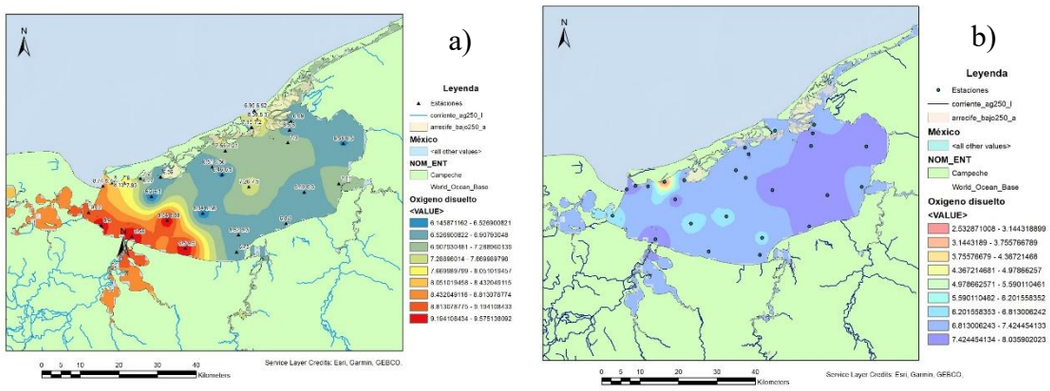



**Figura 6**

Distribución espacial de oxígeno disuelto [OD] en la Laguna de Términos. a] Campaña 2022 b] Campaña 2024.

*Fuente: elaboración propia.*

Por otro lado, la distribución de temperatura en la Laguna de Términos durante las campañas de muestreo, indica que existe un aumento mínimo en zonas de baja profundidad [menos de 1 m], observándose poca variación en el resto de la laguna [Figura 7].

### Calibración del modelo

El resultado de la calibración fue a partir de los datos obtenidos de OD en la columna de agua de la Laguna de Términos, así como el uso de valores de temperatura y salinidad obtenidos de las campañas de muestreo 2021-2024. Del proceso de calibración se obtuvo una correlación entre el OD medido y el OD simulado [Csf y Csp] de R=0.8 [Tabla 1].

## Box 7

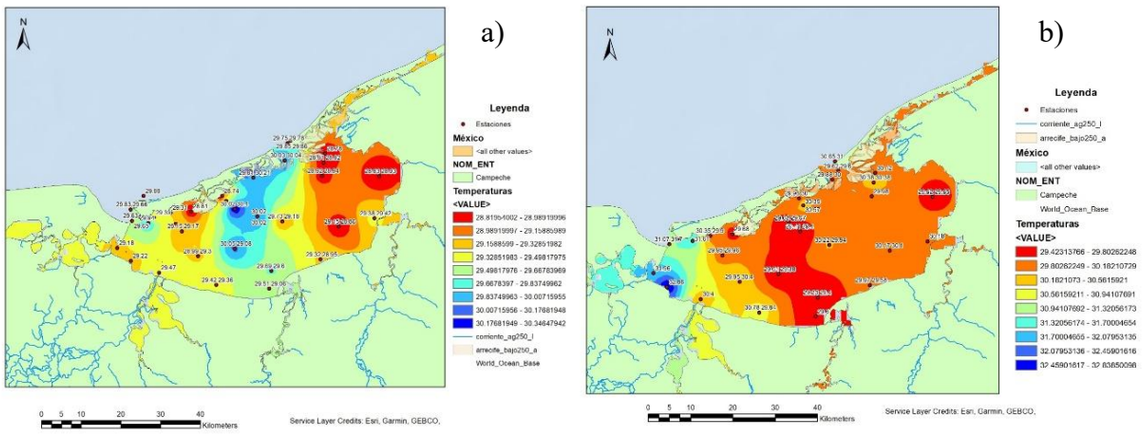



**Figura 7**

Distribución espacial de temperatura [°C] en la Laguna de Términos. a] Campaña 2021, b] Campaña 2022

*Fuente: elaboración propia.*

A partir de esta línea base, con un coeficiente de re-aireación de 2.7 m $d^{-1}$ $ft^{-1}$, se evaluaron escenarios de incremento térmico anual de 0.2 °C a 15 °C. El modelo predice que, hasta un aumento de 10 °C [X = 37 °C ± 2], las concentraciones de OD se mantendrían por encima de 6 mg $L^{-1}$; sin embargo, al superar los 37 °C ± 2 °C, el OD descendería por debajo de 4 mg $L^{-1}$, entrando en zona crítica [Figura 8]. Estos valores contrastan con los niveles óptimos de 5–14 mg $L^{-1}$ requeridos para una vida acuática saludable [Instituto del Agua, s/f] y con los 2 mg $L^{-1}$ que definen condiciones de hipoxia severa [Instituto del Agua, s/f; U.S.EPA, 2025], subrayando la elevada vulnerabilidad de la Laguna de Términos ante el calentamiento global. Mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto es esencial para preservar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos.

En lagunas costeras, donde las temperaturas pueden variar considerablemente debido a factores climáticos y estacionales, la disminución del OD por aumento de temperatura puede ser especialmente crítica. Estas lagunas suelen ser poco profundas, lo que las hace más susceptibles a cambios térmicos rápidos. Además, la combinación de temperaturas elevadas y aportes de materia orgánica [por ejemplo, desde ríos o escorrentías] puede intensificar la desoxigenación, ya que la descomposición de esta materia consume oxígeno adicional [Zhang et al., 2025].

## Box 8

**Table 1**

Valores promedio de parámetros fisicoquímicos en la Laguna de Términos y valores de transferencia de oxígeno en agua del ecosistema

| Parámetros | Unidades | Años de estudio | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2007 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| pH | - | 9.39±0.012 | 7.59±0.025 | ND | 7.18±0.40 | 9.39±0.012 |
| Temperatura | °C | 29.83±0.46 | 29.41±0.15 | 30.19±0.48 | 30.74±0.01 | 30.89±0.21 |
| Salinidad | UPS | 32.38±18.15 | 31.41±9.98 | 30.38±20.53 | 37.90±41.29 | 27.99±29.32 |
| Conductividad | µS $cm^{-1}$ | 49.13±36.49 | 52.36±27.36 | 51.14±23.02 | ND | 44.58±21.79 |
| $O_2$ [medido] | mg $L^{-1}$ | 7.91±0.29 | 8.5±0.16 | 7.32±1.04 | 10.10±0.18 | 7.15±0.97 |
| $Ka_{[medido]}$ | [m $d^{-1}$ $ft^{-1}$] | 1.95 | 2.4 | 2.18 | 2.18 | 2.26 |
| $O_2$ [Csf] estimado | mg $L^{-1}$ | 7.75 | 7.89 | 7.81 | 7.37 | 7.81 |
| $O_2$ [Csp] estimado | mg $L^{-1}$ | 7.60 | 6.78 | 7.03 | 9.67 | 6.86 |

*Fuente: elaboración propia*

## Box 9

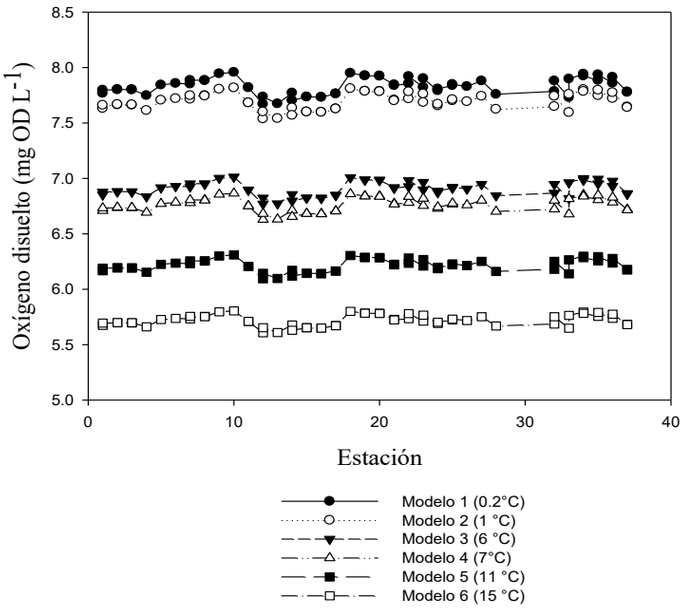



**Figura 8**

Variación del contenido de OD [mg $L^{-1}$] en relación con el aumento de la temperatura en la columna de agua de la Laguna de Términos.

*Fuente: elaboración propia.*

Un estudio reciente indica que el calentamiento global es una de las principales causas de la pérdida de oxígeno en ecosistemas acuáticos, contribuyendo en un 55% a la desoxigenación global de los lagos. A medida que las temperaturas aumentan, el oxígeno se disuelve menos en las aguas más cálidas, acelerando la desoxigenación [Zhang et al., 2025].

En resumen, el aumento de la temperatura en lagunas costeras puede reducir significativamente los niveles de oxígeno disuelto, afectando la biodiversidad y la salud general del ecosistema acuático.

## Conclusiones

La falta de información de campo limita las estimaciones del modelo, en la medida que se obtenga más información el desempeño del modelo puede mejorar y se podrá reportar estimaciones más confiables. El modelo también puede mejorar en la medida de que algunas variables como velocidad del viento y radiación solar, productividad, metabolismo, etc, se incluyan como variables dinámicas y no sean datos constantes. Por otro lado, el modelo no considera el efecto de las concentraciones de oxígeno disuelto de las entradas de agua por precipitación, escurrimiento superficial y los aportes de aguas residuales ubicado en los alrededores de la laguna.

Sin embargo, el modelo obtuvo una correcta correlación entre los valores de OD medidos y los estimados en el presente estudio, lo cual significa que se puede establecer y comprender el efecto del aumento de temperatura sobre la concentración de oxígeno y el momento en que el ecosistema puede llegar a una situación crítica, esto ha sugerido que la elevación de temperatura en agua mayor 37 °C ± 2, lleva a una disminución de la tasa de transferencia de oxígeno. En futuras investigación, es necesario incorporar la productividad primaria en el modelo para estimar el efecto adverso en organismos y el metabolismo neto, así como el consumo de oxígeno utilizado en la degradación de materia orgánica.

## Declaraciones

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

### Contribución de los autores

Los tres autores participaron de manera equitativa en todas las etapas del desarrollo de esta investigación, incluyendo el análisis estadístico de los datos, la aplicación del modelo matemático, la búsqueda bibliográfica, la discusión de resultados y la redacción del manuscrito. Todos revisaron y aprobaron la versión final del documento.

### Disponibilidad de datos y materiales

Los datos generados y analizados durante el presente estudio están disponibles previa solicitud razonable al autor correspondiente. Actualmente no se encuentran en un repositorio público debido a restricciones de formato y organización interna.

### Financiación

La presente investigación fue financiada parcialmente por el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera [LANRESC], el cual proporcionó los recursos para la realización de los muestreos y el análisis de los datos fisicoquímicos obtenidos en la Laguna de Términos. El resto del trabajo de investigación fue financiado por la Universidad Autónoma del Carmen.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera [LANRESC] por el acceso a la base de datos fisicoquímicos generada en el Observatorio Costero Regional de la Laguna de Términos. Asimismo, agradecen el acompañamiento del Dr. Paulo Salles y del equipo técnico responsable del procesamiento de dichos datos, especialmente al Dr. Eduardo Amir Cuevas Flores y a la M.C. Karol Paulina Granados Martínez.

De igual forma, se extiende un agradecimiento especial a Aracely María Barrientos Cornelio y José Luis Aguilar Echánove, estudiantes del programa educativo de ingeniería Geológica de la Facultad de Química y Mtra. Rosalba Lima Velázquez, por su valioso apoyo en la elaboración de los gráficos de distribución espacial presentados en este estudio.

**Abreviaturas**

| | |
|---|---|
| AICAS | Área de Importancia para la Conservación de las Aves. |
| APFFLT | Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. |
| CONANP | Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. |
| LT | Laguna de Términos. |
| OD | Oxígeno disuelto. |
| SDT | Sólidos disueltos totales. |

**Referencias**

**Antecedentes**

Amezcua-Linares, F., & Yáñez-Arancibia, A. [1978]. *Ecología de los sistemas fluvio-lagunares asociados a la Laguna de Términos*. VI Congreso de Oceanografía, Ensenada, Baja California.

Day Jr, J. W., Ley-Lou, F., Madden, C., Wetzel, R., & Machado, A. [1988]. Aquatic primary productivity in Terminos Lagoon. In: Yáñez-Arancibia, A. & Day Jr. J. [Eds]*, Ecology of Coastal Ecosystems in the Southern Gulf of Mexico: The Terminos Lagoon Region* [pp. 221–236]. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU. Editorial Universitaria.

Guerra-Santos, J. J., & Kahl, J. D. W. [2018]. Redefining the Seasons in the Términos Lagoon Region of Southeastern México: May Is a Transition Month, Not a Dry Month. *Journal of Coastal Research*, *341*, 193–201.

Ruiz-Marín, A., Campos-García, S., Zavala-Loría, J. del C., & Canedo-López, Y. [2009]. Hydrological aspects of the lagoons of Atasta and Pom, Mexico. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10[1], 63–74.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. [2015]. *Estadísticas del Agua en México, edición 2015*. Comisión Nacional del Agua.

Smith, S. V., Ibarra-Obando, S., Boundreau, P. R., & Camacho-Ibar, V. F. [1997]. *Comparison of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes in Mexican Coastal Lagoons*. LOICZ Reports and Studies No 10. LOICZ. Texel, The Netherlands.

Yáñez-Arancibia, A., & Day Jr, J. W. [1988]. Ecology of coastal ecosystems in the southern Gulf of Mexico: The Terminos Lagoon Region. *Inst Cienc Del Mar y Limnol UNAM, COSAT Ecol Inst LSU. Editorial Universitaria, Mexico DF.*

**Básicos**

Antonio-Durán, R. E., Sosa-Echeverría, R., Fuentes-García, G., César-Valdez, E., Cortez-Huerta, M., & Kahl, J. D. W. [2025]. Atmospheric emissions from maritime activities in Altamira, Gulf of Mexico. *International Journal of Environmental Science and Technology*.

Baxter, C. V., & Hauer, F. R. [2000]. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout [*Salvelinus confluentus*]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *57*[7], 1470–1481.

Ebersole, J. L., Liss, W. J., & Frissell, C. A. [2001]. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish*, *10*[1], 1–10.

Gameiro, C., Cartaxana, P., Cabrita, M. T., & Brotas, V. [2004]. Variability in Chlorophyll and Phytoplankton Composition in an Estuarine System. *Hydrobiologia*, *525*[1–3], 113–124.

He, S., & Xu, Y. J. [2015]. Three decadal inputs of total organic carbon from four major coastal river basins to the summer hypoxic zone of the Northern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, *90*[1–2], 121–128.

Johnson, S. L., & Jones, J. A. [2000]. Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *57*[S2], 30–39.

Lee, M.-Y., Kim, T.-H., Choi, Y., & Song, Y. [2024]. Wet depositional fluxes of fossil fuel-derived carbon in East Asia: Dynamics of Brown carbon. *Environmental Pollution*, *361*, 124786.

Lehman, J. T. [2002]. Mixing Patterns and Plankton Biomass of the St. Lawrence Great Lakes under Climate Change Scenarios. *Journal of Great Lakes Research*, *28*[4], 583–596.

Mellina, E., Moore, R. D., Hinch, S. G., Macdonald, J. S., & Pearson, G. [2002]. Stream temperature responses to clearcut logging in British Columbia: The moderating influences of groundwater and headwater lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *59*[12], 1886–1900.

Newton, A., Icely, J., Cristina, S., Brito, A., Cardoso, A. C., Colijn, F., Riva, S. D., Gertz, F., Hansen, J. W., Holmer, M., Ivanova, K., Leppäkoski, E., Canu, D. M., Mocenni, C., Mudge, S., Murray, N., Pejrup, M., Razinkovas, A., Reizopoulou, S., … Zaldívar, J.-M. [2014]. An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of European large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *140*, 95–122.

Pérez-Ruzafa, A., Molina-Cuberos, G. J., García-Oliva, M., Umgiesser, G., & Marcos, C. [2024]. Why coastal lagoons are so productive? Physical bases of fishing productivity in coastal lagoons. *Science of The Total Environment*, *922*, 171264.

Pulster, E. L., Gracia, A., Armenteros, M., Toro-Farmer, G., Snyder, S. M., Carr, B. E., Schwaab, M. R., Nicholson, T. J., Mrowicki, J., & Murawski, S. A. [2020]. A First Comprehensive Baseline of Hydrocarbon Pollution in Gulf of Mexico Fishes. *Scientific Reports*, *10*[1], 6437.

Usang, R. O., Olu-Owolabi, B. I., & Adebowale, K. O. [2025]. Integrating principal component analysis, fuzzy inference systems, and advanced neural networks for enhanced estuarine water quality assessment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *57*, 102182.

Villalobos-Zapata, G. J., Yáñez-Arancibia, A., Day Jr, J. W., & Lara-Domínguez, A. [1999]. Ecología y Manejo de los Manglares en la Laguna de Términos, Campeche, México. En *A. Yáñez-Arancibia, & A. Lara-Domínguez [Eds.], Ecosistemas de Manglar en América Tropical* [1a. ed., pp. 263–274]. Instituto de Ecología, A.C.

**Soporte**

Méndez-Barroso, L. A., Rivas-Márquez, J. A., Sosa-Tinoco, I., & Robles-Morúa, A. [2020]. Design and implementation of a low-cost multiparameter probe to evaluate the temporal variations of water quality conditions on an estuarine lagoon system. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*[11], 710.

Thomann, R. V., & Mueller, J. A. [1987]. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper-Collins.

**Discusiones**

Ghandourah, M. A., Orif, M. I., Al-Farawati, R. K., El-Shahawi, M. S., & Abu-Zeid, R. H. [2023]. Illegal pollution loading accelerate the oxygen deficiency along the coastal lagoons of eastern Red Sea. *Regional Studies in Marine Science*, *63*, 102982.

Instituto del Agua. [s/f]. *Oxígeno disuelto en acuicultura: Elemento clave para la vida acuática*. Recuperado el 3 de abril de 2025, de https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/oxigeno-disuelto-en-acuiculturaacuicultura/

Marinov, D., Zaldívar, J. M., Norro, A., Giordani, G., & Viaroli, P. [2008]. Integrated modelling in coastal lagoons: Sacca di Goro case study. *Hydrobiologia*, *611*[1], 147–165.

Tenorio-Fernández, L. [2015]. *Hidrodinámica mareal y submareal de una laguna costera tropical* [Doctorado]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California [CICESE].

Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. [1983]. Las lagunas costeras. Nota de los editores. *Ciencias*, *3*, 46–47.

U.S. Environmental Protection Agency [U.S. EPA]. [2025]. *Hypoxia 101*. https://www.epa.gov/ms-htf/hypoxia-101

Zhang, Y., Shi, K., Woolway, R. I., Wang, X., & Zhang, Y. [2025]. Climate warming and heatwaves accelerate global lake deoxygenation. *Science Advances*, *11*[12], eadt5369.