

# UC San Diego

## Technical Reports

### Title

Aspectos oceanográficos y cambios climáticos

### Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/89c5v5rb>

### ISBN

978-1-4951-2227-9

### Authors

Favoretto, Fabio

Salgado Castrejón, Melissa

Rodríguez de la Peña, Alexandro

et al.

### Publication Date

2025-03-26

Peer reviewed

# 2



## Aspectos oceanográficos y cambios climáticos

Fabio Favoretto<sup>1</sup>,  
Melissa Salgado Castrejon<sup>2</sup>,  
Alexandro Rodríguez de la Peña<sup>2</sup>,  
Héctor Villalobos<sup>3</sup>,  
Jaime Gómez Gutiérrez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, 9500 Girman Drive, La Jolla, CA. 92093, USA.

<sup>2</sup> Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación, A. C., Calle del Pirata 450, Benito Juárez, 23090 La Paz, Baja California Sur, México.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, Baja California Sur, C.P., 23096, México.

[Página anterior](#): Oleaje en Isla San Benedicto. Foto por: Octavio Aburto.

# Introducción

---

El Archipiélago de Revillagigedo, constituye un ecosistema único y extraordinariamente rico en biodiversidad marina. Formado por cuatro islas remotas que emergen de una cadena montañosa de volcanes sumergidos, este archipiélago presenta tanto un paisaje terrestre impresionante como un entorno marino diverso, caracterizado por volcanes activos, arcos, acantilados y afloramientos rocosos aislados (Claudino-Sales, 2019). Estas islas actúan como un auténtico “oasis” oceánico, proporcionando un refugio vital para innumerables especies marinas y sirviendo como un laboratorio natural para el estudio de procesos oceanográficos, ecológicos y evolutivos. En este capítulo, realizamos una revisión exhaustiva de los procesos oceanográficos y climáticos que definen esta área extraordinaria, ubicando al Archipiélago de Revillagigedo dentro del complejo y dinámico sistema oceanográfico del Pacífico Oriental Tropical.

Nos adentraremos en la exploración y análisis de recientes datos oceanográficos recopilados en las proximidades del Archipiélago, integrando esta información con investigaciones previas centradas en temáticas específicas de oceanografía a nivel regional e insular, con especial atención a la escala espacial impuesta por las islas. Discutiremos la dinámica meteorológica y oceanográfica predominante en la región, incluyendo el destacado “efecto de masa de isla”, que potencia la surgencia de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, catalizando una productividad primaria típicamente baja (oligotrófica), la cual paradójicamente sostiene la rica biodiversidad insular y del hábitat pelágico-oceánico.

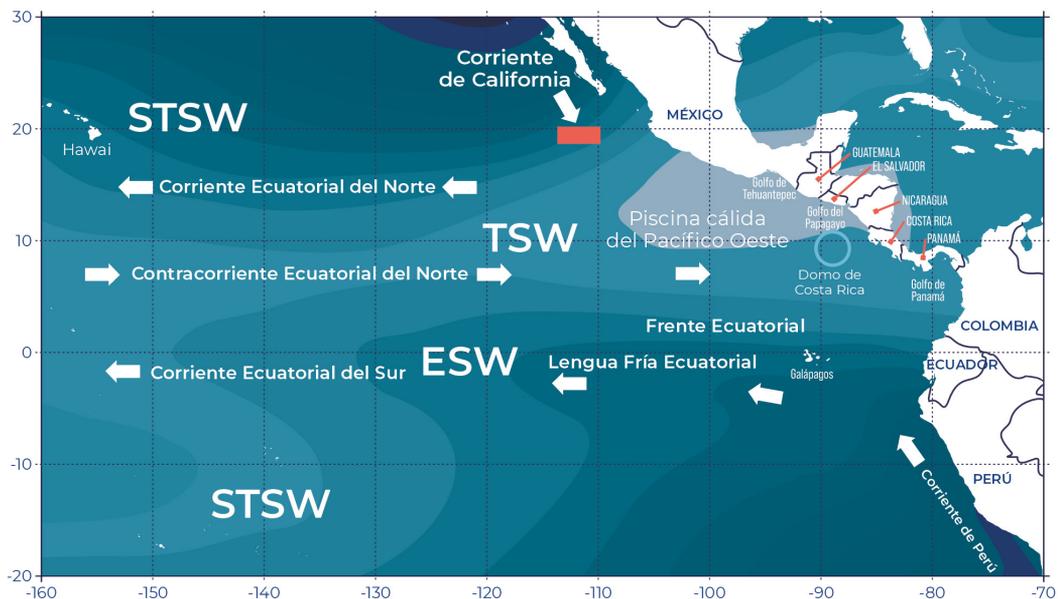
Además, examinaremos cómo fenómenos climáticos significativos como las ondas de calor marinas, El Niño y la variabilidad climática a largo plazo están moldeando y alterando los patrones oceánicos y climáticos en el Pacífico Oriental Tropical, centrándonos en el área del Parque Nacional Revillagigedo. La influencia del cambio climático, con sus múltiples escalas de tiempo y espacio, desde el aumento de la temperatura superficial del mar hasta los cambios en los patrones de circulación oceánica, está reconfigurando el escenario en el que flora y fauna del Archipiélago de Revillagigedo han prosperado durante milenios. Este análisis nos permitirá comprender mejor las interconexiones entre los sistemas marinos y climáticos, así como los desafíos actuales que enfrenta la resiliencia de estos ecosistemas insulares.

## Oceanografía del Pacífico Oriental Tropical:

---

El Archipiélago de Revillagigedo está ubicado en el sector norte del Pacífico Oriental Tropical que se distingue por sus características ambientales tropicales con una somera termoclina y capa del mínimo de oxígeno ( $< 0,5 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$ ) (Serrano, 2012; Fiedler y Lavín, 2017). El Pacífico Oriental Tropical es una región biogeográfica con numerosas especies endémicas marinas que se han adaptado a su clima tropical y a una columna de agua altamente estratificada y somera capa de mínimo oxígeno (Brinton, 1979; Hastings, 2000; Robertson y Crammer, 2019; Victor y Wellington, 2000; Wicksten y Hendrickx, 2003; Fernández-Alamo y Färber-Lorda, 2006). La región del Pacífico Oriental Tropical alberga el extremo oriental del sistema de corrientes ecuatoriales del Pacífico y una parte importante de la piscina cálida del Pacífico Oriental, influenciando significativamente la evolución de la vida marina de plancton, corales, peces, aves y mamíferos marinos (Wang y Enfield, 2001); particularmente después del cierre del istmo de Panamá que separó la fauna del

océano Atlántico y el Pacífico hace cerca de 2,8 millones de años (Coates et al., 1992; O’Dea et al., 2016). Aproximadamente el 12% de las >1 600 especies de aves, mamíferos y tortugas marinas conocidas en el Pacífico Oriental Tropical se encuentran en categorías amenazadas, lo que indica un elevado riesgo de extinción ante futuros estresores climáticos y antropogénicos. La distribución de especies amenazadas en el Pacífico Oriental Tropical está vinculada principalmente a áreas con altas tasas de sobrepesca, pérdida de hábitat y crecientes impactos de eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), así como a islas oceánicas con altos factores de riesgo estocástico para especies endémicas (Polidoro et al., 2012). Las especies asignadas a las categorías de amenaza más altas tienen rasgos de historia de vida que probablemente disminuyen su resiliencia a diversas amenazas regionales y específicas del sitio (Polidoro et al., 2012). García-Navarrete et al. (2023) investigaron el ensamblaje biótico del Archipiélago de Revillagigedo bajo un marco biogeográfico evolutivo con un análisis parsimónico de endemidad con carácter progresivo de eliminación de 194 especies vegetales y animales lo que permitió identificar el archipiélago como un área o nodo complejo donde se superponen componentes bióticos Neárticos y Neotropicales. Estos resultados sugieren que el Archipiélago de Revillagigedo puede clasificarse como una provincia, aunque ellos prefieren mantenerlo como un distrito de la provincia de las Tierras Bajas del Pacífico. García-Navarrete et al. (2023) identificaron dos cenocrones (conjunto de taxones temporalmente integrados) que pueden fecharse en el Plioceno-Pleistoceno: uno Neártico que se dispersó desde la Península de Baja California y otro Neotropical donde las especies se dispersaron desde la costa del Pacífico hacia las islas. De esta forma ellos concluyen que las islas son probablemente resultado del vulcanismo asociado a la Cordillera Oceánica de los Matemáticos, y la llegada de los cenocrones al archipiélago sucedió posiblemente durante el Plioceno–Pleistoceno (5-2,5 millones de años), después de que las islas estuvieran disponibles para la colonización.



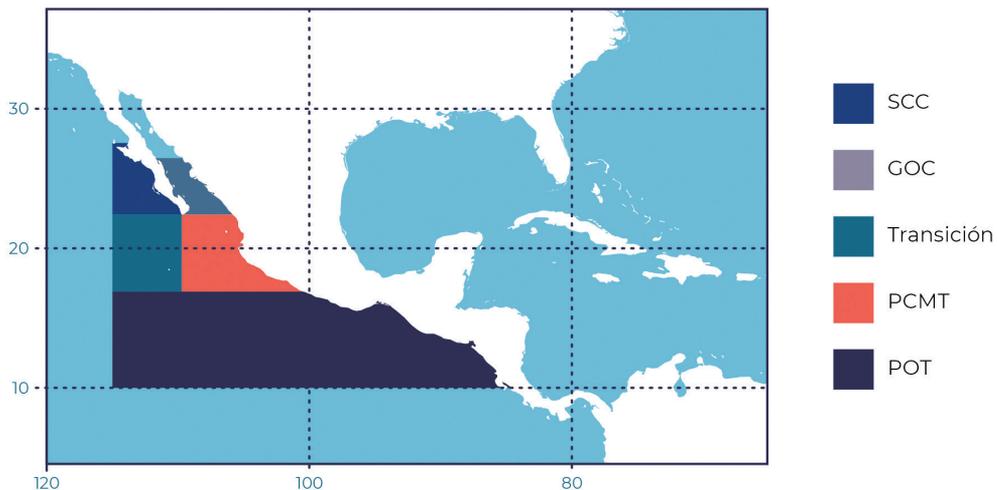
**Figura 1:** Toponimia y principales características oceanográficas del Océano Pacífico Oriental Tropical. El rectángulo rojo representa la ubicación del Parque Nacional Archipiélago de Revillagigedo. Masas de agua superficiales: agua superficial subtropical (STSW), agua superficial tropical (TSW), agua superficial ecuatorial (ESW). El sombreado de fondo corresponde a la temperatura superficial promedio, cuyo rango oscila entre los 18 ° y 29 °C (gradiente de oscuro a claro) (Shea et al., 1992). Mapa modificado por Fiedler y Lavín (2017).

Las corrientes provenientes del norte y sur, junto con los procesos solares y atmosféricos, definen las masas de agua y la circulación en el Pacífico Oriental Tropical. Además, la costa y la orografía de México y Centroamérica modifican estos procesos, especialmente en zonas costeras ricas en arrecifes de coral en el sur y manglares en la región norte de la costa Pacífica de México. El Pacífico Oriental Tropical se extiende desde la costa de América Central y del Sur hasta aproximadamente los 140 °W, es decir, hasta cerca de la mitad del Océano Pacífico. El Pacífico Oriental Tropical está delimitado por los Trópicos de Cáncer (23,5 °N) y Capricornio (23,5 °S) cubre una superficie de 28 millones de kilómetros cuadrados (Figura 1). La región comprende el giro subtropical del Pacífico Norte con vientos que soplan en dirección

ciclónica y el giro subtropical Sur con vientos que soplan en dirección anticiclónica (Pennington et al., 2006; Fiedler y Lavín, 2017). Las corrientes de borde oriental, tales como la Corriente de California al norte y la Corriente de Perú o Humboldt al sur, están influenciadas por factores solares y atmosféricos tanto intrínsecos como extrínsecos del Pacífico Oriental Tropical (Fiedler y Lavín, 2017) (Figura 1).

El noreste del Pacífico Oriental Tropical incluye cinco regiones distintas basadas en sus características hidrográficas: la región Tropical, el Pacífico Central Mexicano Tropical, la región de Transición, el Golfo de California y el Sistema de la Corriente de California (Figura 2).

Portela et al. (2016) identificaron que estas regiones demarcan las áreas de origen de diferentes masas de agua dentro del noreste del Pacífico Oriental Tropical. Las zonas del Sistema de la Corriente de California (SCC), Golfo de California (GOC), y Pacífico Central Mexicano Tropical (PCMT) se destacan



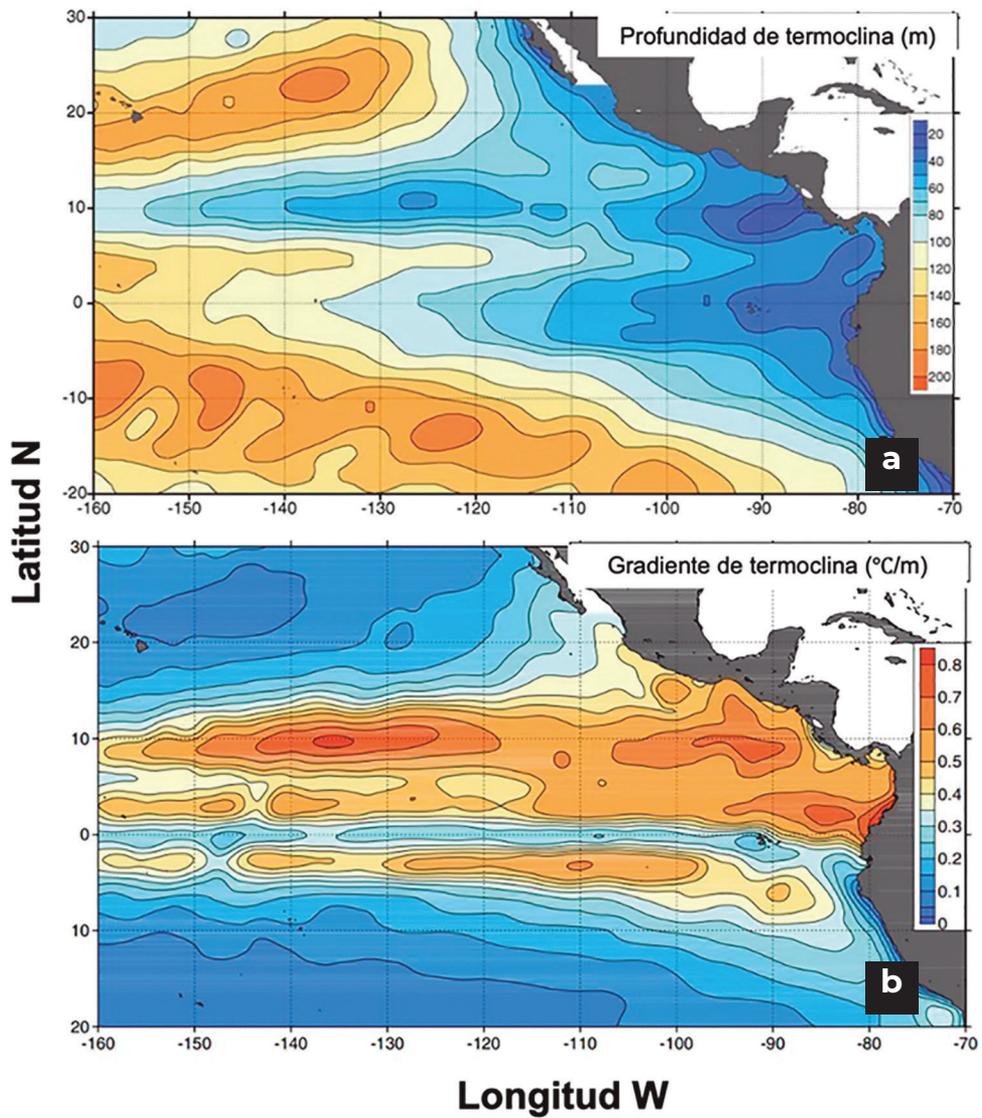
**Figura 2:** Mapa de distribución espacial de las masas de agua superficiales. Sistema de la Corriente de California (SCC), Golfo de California (GOC), Pacífico Central Mexicano Tropical (TPCM) y Pacífico Oriental Tropical (POT).

como puntos de origen de estas tres masas de agua superficiales. Por otro lado, la región de Transición es única por presentar condiciones hidrográficas termohalinas intermedias entre las restantes masas de agua circundantes, con una extensión latitudinal y de cobertura que varía a escala estacional e interanual (Figura 2). La dinámica hidrográfica del Pacífico Central Mexicano Tropical está marcada por una notable actividad de remolinos que se desplazan típicamente hacia el suroeste (Kurczyn et al., 2012, 2013; Lavín et al., 2013).

## Termoclina y variaciones en la columna del Pacífico Oriental Tropical

Una característica distintiva del Pacífico Oriental Tropical es su termoclina somera típicamente ubicada a <80 m de profundidad (Figura 3). Esta termoclina presenta un incremento de profundidad de este a oeste, con dos crestas termoclínicas zonales alineadas con la corriente predominante de oeste a este, especialmente al oeste de los 110 °W (Fiedler y Talley, 2006). La termoclina, definida por un pronunciado gradiente de temperatura que frecuentemente excede 1 °C cada 10 m, exhibe diferencias térmicas notables entre sus capas superior e inferior (Wyrtki, 1964b; Fiedler y Talley, 2006). La picnoclina es igual de pronunciada y poco profunda que la termoclina, teniendo significativas implicaciones ecológicas, influenciando los límites de tolerancia térmica de diversos organismos pelágicos y alterando los gradientes de nutrientes y concentración de oxígeno disuelto entre otros factores ambientales limitantes (Fiedler y Lavín, 2017).

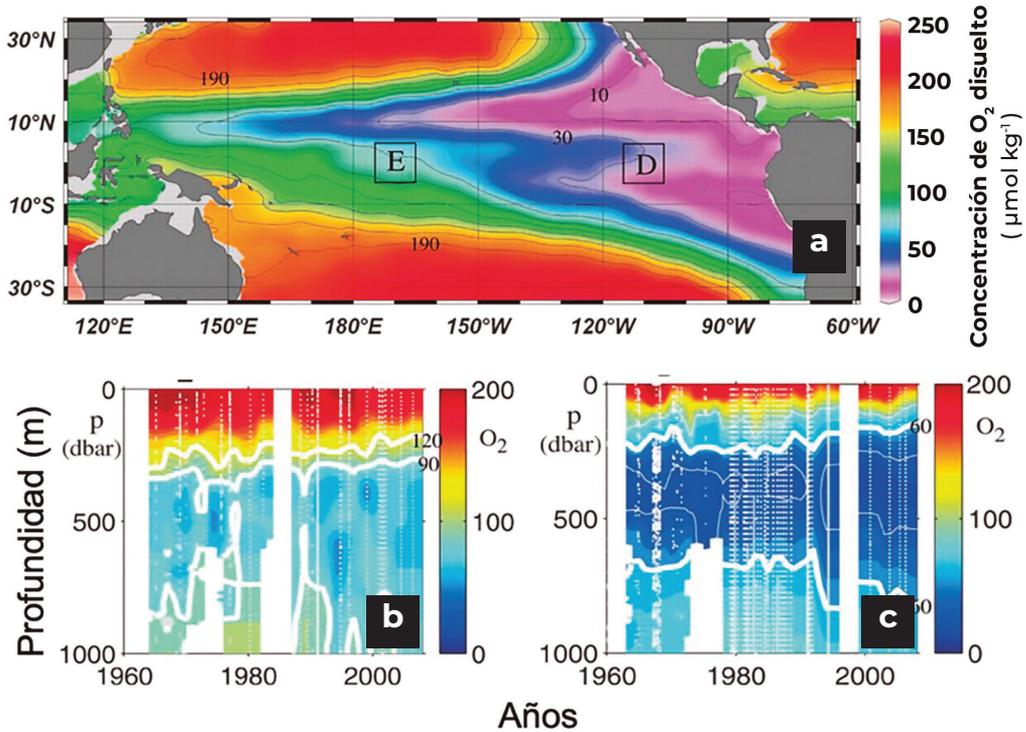
El máximo gradiente de la termoclina se ubica entre los 5 °S y 15 °N, con excepción de las áreas ubicadas directamente sobre el ecuador. La variabilidad vertical de las isotermas dentro de la termoclina ecuatorial es influenciada por el flujo geostrofico de la Corriente Subecuatorial, la divergencia ecuatorial y las surgencias en las aguas tropicales oceánicas (Fiedler y Talley,



**Figura 3:** A) Profundidad media de la termoclina (m); B) gradiente medio de la termoclina ( $^{\circ}\text{C m}^{-1}$ ) calculados a partir de datos registrados con batitermógrafos y CTD. Mapas tomados de Fieldler y Talley (2006).

2006; Kessler, 2006). La termoclina es resultado de la convergencia de los vientos alisios en la Zona de Convergencia Intertropical, alejada del continente americano y el punto convergencia de los giros del Pacífico Norte y Sur, lo que resulta en una zona triangular con corrientes de menor velocidad promedio en el Pacífico Oriental Tropical (Figura 1 y Figura 2). Esta disposición de corrientes da lugar a una “zona de sombra” al oeste de México y América Central, con vientos más débiles, baja tasa de evaporación y reducida mezcla vertical, junto con un calentamiento superficial intenso, manteniendo así la termoclina superficial fuertemente pronunciada y, por ende, temperaturas superficiales del mar elevadas en comparación con otras regiones del Océano Pacífico (Lavín et al., 2006). Estas condiciones favorecen la formación de una capa subsuperficial con bajas concentraciones de oxígeno disuelto que se ha extendido en grosor y hacia latitudes mayores en las últimas décadas (Stramma et al., 2008 y Figura 4).

La concentración de oxígeno disuelto es considerablemente baja en profundidades entre 200-800 m. Esto propicia la zonación de la fauna bentónica a lo largo de la ladera de montes submarinos (Raineault, 2018). Las zonas del mínimo de oxígeno del Pacífico modifican la diversidad alfa y beta de los distintos grupos taxonómicos de fauna bentónica, así como la composición de las asociaciones de la macrofauna, particularmente en el estrato núcleo de la zona del mínimo de oxígeno. Las condiciones de hipoxia se asocian con una disminución en la riqueza de especies en todos los grupos taxonómicos de la fauna bentónica, pero también existe evidencia de endemismo en entornos con condiciones de hipoxia en la zona del mínimo de oxígeno (Gooday et al., 2010). Dicha zonación fue confirmada por la expedición del Nautilus de la cual provienen las observaciones de Raineault (2018). Sin embargo, con la información actual y la carencia de monitoreos sistemáticos de la influencia de la zona del mínimo de oxígeno en la meiofauna, la diversidad regional (gamma) de macrofauna y megafauna en la fauna insular de Revillagigedo es aún difícil de evaluar.



**Figura 4:** A) Concentraciones medias climatológicas (18) de oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ , mostradas en color) a 400 m de profundidad contorneadas en intervalos de 20  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  desde 10 hasta 230  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (líneas negras); B y C) perfiles verticales en función del tiempo (1960-2008) y la presión (1 dbar  $\sim$  1 m) con ubicaciones de muestra (puntos blancos) en los recuadros (E y D) mostrados en el mapa. Panel abajo a la izquierda (B) Océano Pacífico ecuatorial central (5 °S a 5 °N 165 ° a 175 °W), con contornos de 90 y 120  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (línea blanca gruesa). Panel abajo a la derecha (C) Océano Pacífico ecuatorial oriental (5 °S a 5 °N, 105 ° a 115 °W), con contornos de 60  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  (línea blanca gruesa). Figura simplificada de Stramma et al., (2008).

## Capa de mínimo de oxígeno

La capa de mínimo de oxígeno (**OMZ**, por sus siglas en inglés *oxygen minimum zone*) es una región oceánica caracterizada por bajas concentraciones de oxígeno disuelto, esencial para la vida marina con metabolismo aeróbico (Figura 3A,B). Esta capa tiene una función crucial en los ciclos biogeoquímicos globales y es un parámetro fundamental para evaluar la salud de los eco-

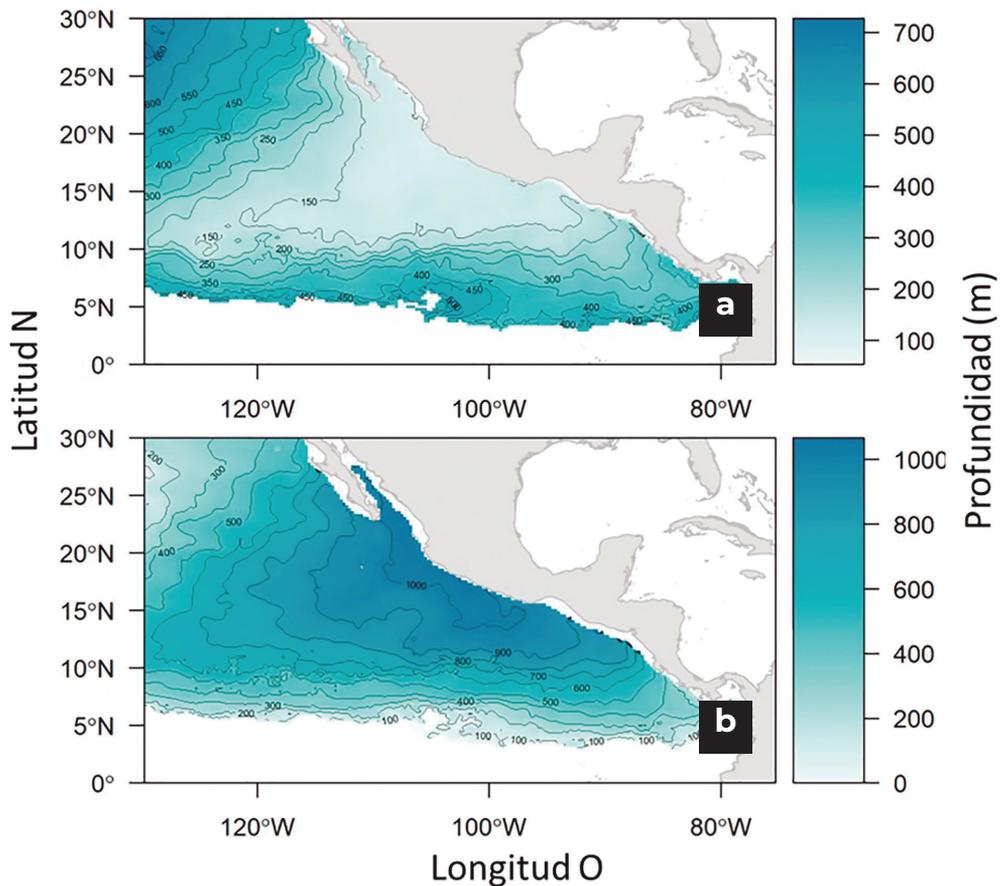
sistemas marinos (Paulmier y Ruiz-Pino, 2009). Los cambios en la extensión vertical o latitudinal de la capa de mínimo de oxígeno, como resultado de procesos naturales y antropogénicos, tienen implicaciones significativas en la distribución de especies marinas, la biodiversidad, y la trama alimentaria (Stramma et al., 2010).

En el contexto del Pacífico Oriental Tropical, la capa superior del mínimo de oxígeno ha sido definida con varios umbrales  $< 0.5 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$  (Serrano et al., 2012) a  $< 1 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$ ; (Fiedler y Talley 2006) y representa una de las características más distintivas de la estructura oceánica de esta región. Esta capa se encuentra entre la piconclina y las aguas subpiconoclinales, extendiéndose su límite superior entre los 60 y 80 m de profundidad (Figura 3A). La capa de mínimo de oxígeno en esta región es notable por su amplia distribución y la extrema deficiencia de oxígeno disuelto, lo que refleja condiciones únicas que afectan a la fauna marina (Karstensen et al., 2008; Stramma et al., 2008). La formación de esta zona está influenciada por una combinación de alta productividad primaria en la capa fotosintética superficial, una piconclina persistente que limita la mezcla de agua rica en oxígeno desde la superficie hacia profundidades mayores y una lenta ventilación en la subpiconclina debido a lentas velocidades de corrientes (Fiedler et al., 2017).

Stramma et al. (2008) concluyeron que estas zonas de bajo contenido de oxígeno disuelto se han expandido verticalmente, tanto en el Atlántico tropical oriental como en el Pacífico ecuatorial durante los últimos cincuenta años. Se ha estimado que la tasa de disminución de la concentración de oxígeno disuelto entre 300 y 700 m en las regiones este y central del Pacífico tropical oscila entre 0,09 y 0,34  $\mu\text{mol/kg/año}$  (Figura 4B,C). De continuar esta tendencia de disminución de la concentración de oxígeno disuelto en las próximas décadas, podríamos anticipar efectos significativos en la riqueza y biomasa, distribución y abundancia de los organismos presentes en los ecosistemas epipelágicos, con posibles repercusiones adversas para las eco-

nomías costeras (Stramma et al., 2008). Esto hace necesario monitorear y comprender la dinámica de la capa de mínimo de oxígeno para la gestión y conservación de los recursos marinos en el Pacífico Oriental Tropical.

El límite superior de la Zona del Mínimo de Oxígeno (OMZ, por sus siglas en inglés) en el Pacífico Mexicano Oriental Tropical durante el 2023 se localizó en promedio alrededor de los 150 m de profundidad, con un rango de desviación estándar entre 8,6 y 15 m y un grosor entre 700 y 1000 m (Figura 5A,B). Esto concuerda con los registros de la prospección acústica realizados



**Figura 5:** A) Profundidad media del límite superior (m) y B) grosor (m) de la zona del mínimo de oxígeno calculados con datos del 2023 a partir del análisis y pronóstico biogeoquímico global del Servicio Marino de Copernicus (<http://doi.org/10.48670/moi-00015>).

en abril 2023 en la zona insular y entre islas donde las capas de dispersión con organismos pelágicos tuvieron una considerable baja densidad en estratos >150 m de profundidad (Villalobos-Ortiz, datos sin publicar). Las Islas Revillagigedo se encuentran en una región donde la profundidad de la OMZ presenta una baja desviación estándar sugiriendo una relativa estabilidad en la profundidad de esta capa crítica. La profundidad relativamente somera de la OMZ y su amplio grosor podría comprimir verticalmente el hábitat potencial de los organismos marinos con metabolismo primariamente aeróbico (Prince y Goodyear, 2006; Färber-Lorda y Färber- Data, 2023). Carey et al. (2017) reportaron solamente un tapete bacteriano y la ausencia casi total de macrofauna en el nivel de mínimo de oxígeno en los flancos de Isla Socorro. Es necesario tener monitoreos continuos de las concentraciones de oxígeno disuelto para detectar si la capa de mínimo de oxígeno tiene una influencia notable en la biota de los arrecifes rocosos alrededor de las cuatro islas de Revillagigedo.

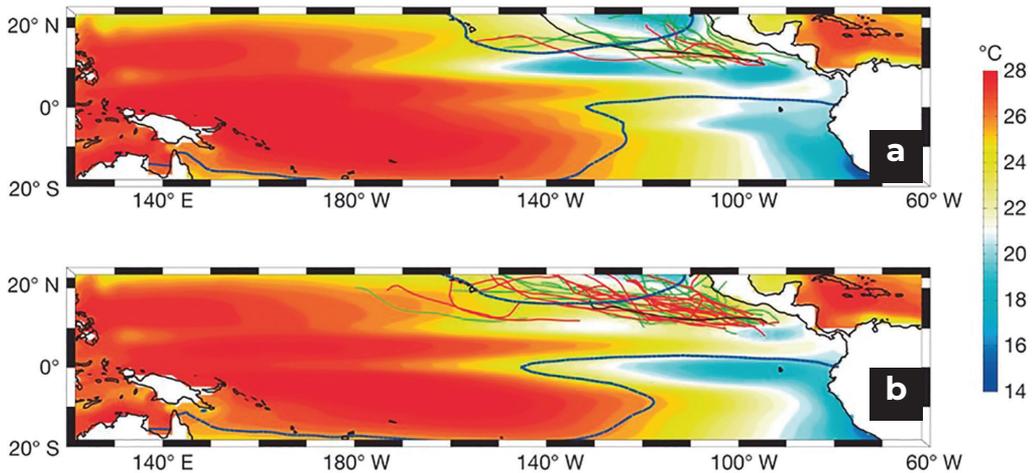
Este patrón en la profundidad de la OMZ es relevante para la comprensión del hábitat epipelágico debido a que la disponibilidad de oxígeno disuelto es un crítico factor limitante para numerosas formas de vida marina aeróbicas. Además, la estabilidad en la profundidad de la OMZ alrededor de las Islas Revillagigedo podría reflejar procesos oceanográficos subyacentes que contribuyen a la rica biodiversidad observada en el área. Estudios adicionales podrían proporcionar una mayor comprensión de cómo interactúan las corrientes, la temperatura y otros factores físicos y químicos para mantener estas condiciones hipóxicas someras, lo que podría ser crucial para futuros esfuerzos de conservación y manejo de las especies y hábitats únicos de las Islas Revillagigedo.

## Vientos y circulación oceánica

Los vientos alisios son la principal forzante de la Corriente Norecuatorial que va adquiriendo características tropicales a medida que se mueve hacia el Pacífico Ecuatorial Occidental. Los cambios estacionales en la presión atmosférica y el viento fuerzan la dirección norte-sur e intensidad de esta corriente. Los vientos predominantes durante el invierno en el Archipiélago de Revillagigedo son predominantemente del noroeste, y en abril son predominantemente del oeste cuando se produce la máxima intrusión al sur de la Corriente de California causando las temperaturas superficiales del mar más bajas (CONANP, 2019).

Los vientos del noreste y del oeste son en parte responsables de la existencia de la Corriente Norecuatorial. La máxima temperatura del mar está asociada con los vientos de verano procedentes del sur, los cuales aportan agua cálida proveniente de bajas latitudes (CONANP, 2019). Los vientos alisios en los trópicos constituyen un importante mecanismo de intercambio de energía y humedad norte-sur (como parte de la rama de bajo nivel de la circulación de Hadley), que determina en gran medida la distribución de las precipitaciones en el Pacífico Oriental Tropical, es decir, la humedad asociada a la Zona de Convergencia Intertropical (Amador et al., 2006).

La actividad de huracanes en el Pacífico Oriental es variable y puede ser influenciada por patrones climáticos a gran escala, como El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en su tipo ecuatorial y central. Durante la fase negativa (La Niña), en cambio, suele estar asociada con temporadas de huracanes por debajo del promedio debido al aumento de la cizalladura vertical (Figura 6A). Durante la fase positiva (El Niño), la actividad ciclónica suele ser más intensa de lo normal debido a la disminución de la cizalladura vertical del viento (Jin et al., 2014, Figura 6B). Sin embargo, los impactos del ENSO pueden ser influenciados por otros patrones climáticos (CONANP, 2019). Las cuatro islas del Archipiélago de Revillagigedo son frecuentemente impactadas por tor-



**Figura 6:** Temperatura subsuperficial de verano (junio-noviembre) promediada durante los períodos en A)  $PC2 < -1$  desviación estándar y B) cuando  $PC2 > 1$  desviación estándar. La línea azul gruesa denota la isoterma de  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la temperatura superficial del mar promediada durante los períodos de baja (A) y alta (B) actividad de  $PC2$ . En cada panel, las líneas coloreadas representan las trayectorias de los ciclones tropicales fuertes que ocurrieron durante los períodos correspondientes: verde = categoría 3; rojo = categoría 4; negro = categoría 5 en la escala Saffir-Simpson. Figura tomada de Jin et al. (2014).

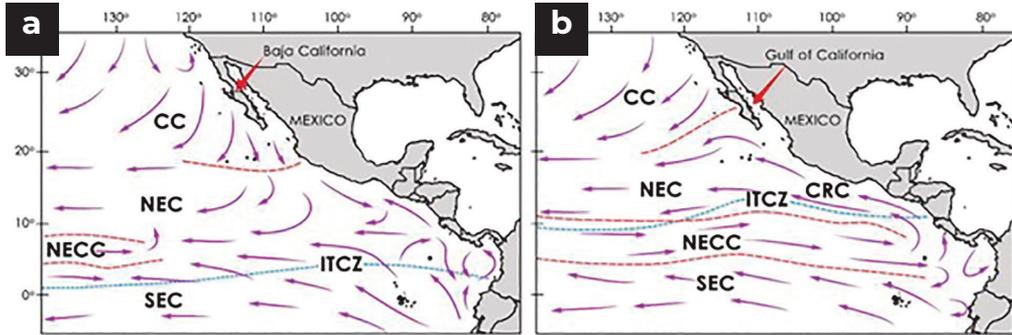
mentas tropicales y huracanes con vientos entre  $70\text{-}250\text{ km/h}$  (Figura 6A,B). Por lo tanto, la biota insular, tanto terrestre como marina, deben adaptarse a estas perturbaciones climáticas estacionales que en ocasiones resultan devastadoras para los hábitats bénticos someros. Esto se logra a través de morfologías robustas, tamaños reducidos y estrategias de vida que confieren resiliencia al impacto físico de las tormentas y huracanes de verano (Olvera et al., 2018).

En la región costera del Pacífico central Mexicano, particularmente en Cabo Corrientes se generan surgencias intensas causadas por la variación estacional de los vientos procedentes del noroeste debido al abrupto cambio de orientación de la línea de costa (Kessler, 2006). Estas surgencias transportan una abundante cantidad de nutrientes desde profundidades subsuper-

ficiales, fundamentales para los complejos ciclos ecológicos que ocurren en la región insular. Además, la productividad biológica en los océanos se ve impulsada por fenómenos de mesoescala, como remolinos que suelen desplazarse en dirección suroeste por el efecto de Coriolis. Los remolinos transportan y mezclan nutrientes, y redistribuyen las masas de agua (Kurczyn et al., 2012, 2013).

El análisis de la región Noroeste del Pacífico Tropical revela la notable influencia de las corrientes de Viento Costero de bajo nivel, también conocidas en inglés como Low Level Coastal-Jet, en la dinámica oceánica regional (Lavin et al., 2006). Estos vientos tienen una función crucial al modular las surgencias de aguas profundas ricas en nutrientes, impactando directamente en la productividad biológica de las zonas costeras. Las corrientes oceánicas, que constituyen masas de agua con movimientos tridimensionales influenciados por factores como la temperatura, salinidad y el forzamiento debido a la rotación terrestre (fuerza de Coriolis), flujo geostrófico, así como por la acción de los vientos, exhiben patrones complejos de circulación. El desplazamiento horizontal de estas corrientes es inducido principalmente por el viento y la fuerza de Coriolis, mientras que el movimiento vertical está asociado con el relieve submarino y fenómenos como el viento y las ondas marinas internas (Lavin et al., 2006).

En el hemisferio norte del Pacífico Oriental Tropical, la convergencia de diversas corrientes a lo largo de las costas mexicanas provoca un patrón de temperaturas oceánicas que varían estacionalmente. La Corriente de California, caracterizada por aguas frías, tiene su origen en la costa sur de Alaska y fluye hasta la parte sur de la Península de Baja California donde se dirige hacia el oeste como parte del gran giro oceánico del Pacífico norte, contrastando con la cálida Corriente Ecuatorial que se desplaza hacia el norte bordeando el continente (Lavin y Marinone, 2003; Lavin et al., 2006).



**Figura 7:** Corrientes superficiales predominantes del Océano Pacífico Tropical Este: A) invierno; B) verano. CC = Corriente de California; NEC = Corriente Ecuatorial del Norte; CRC = Corriente de Costa Rica; NECC = Contracorriente Ecuatorial del Norte; SEC = Corriente Ecuatorial del Sur; ITCZ = Zona de Convergencia Intertropical. Figura modificada de Wyrтки (1965) y Ketchum et al. (2020).

En el hemisferio sur, las corrientes de Humboldt y Perú, junto con la corriente Ecuatorial, aportan aguas más frías a la región sur del Pacífico Oriental Tropical (Figura 7). Además, en las profundidades del Pacífico, existen corrientes abismales y hadales cuyas dinámicas aún son objeto de estudio (Lavín et al., 2003; Espinosa, 2004; Lavín et al., 2006; Marinone, 2012).

La circulación en el Pacífico Oriental Tropical experimenta notables variaciones estacionales. Durante febrero-abril, con la convergencia intertropical cerca de los 23 °N, la Corriente de California se intensifica, fluyendo a una velocidad promedio de 0,37 km h<sup>-1</sup> y extendiéndose hacia el sur. Durante este periodo, se convierte en la corriente dominante en la región norte del Archipiélago de Revillagigedo (Figura 7) (Wyrтки, 1965; Portela et al., 2016). Entre mayo y julio, la convergencia se desplaza hacia los 10 °N, y la Corriente de California, aunque fuerte, no alcanza latitudes tan meridionales, por la influencia de la Contracorriente Norecuatorial Pacífica y la Corriente Surecuatorial, por lo que en verano, la Corriente de Costa Rica se convierte en la corriente predominante en la región del Archipiélago de Revillagigedo, desplazándose

hacia el noroeste desde América Central (Figura 7) (Wyrтки, 1965; Portela et al., 2016).

La circulación en el Pacífico Oriental Tropical es estable entre agosto y diciembre con la convergencia intertropical por encima de los 10 °N y un flujo predominante de la Contracorriente alrededor del Domo de Costa Rica, mientras que la Corriente de California se desvía hacia el oeste (Portela et al., 2016). Rafter et al. (2017) investigaron los niveles de radiocarbono en corales del Archipiélago de Revillagigedo demostrando la conexión entre el índice Giro del Pacífico Norte y la circulación oceánica. En años con índice Giro del Pacífico Norte positivos, la intensificación de la circulación del giro subtropical incrementa la influencia de la Corriente de California y el transporte hacia el sur de aguas con alta salinidad y baja concentración de  $^{14}\text{C}$  en la región de Revillagigedo.

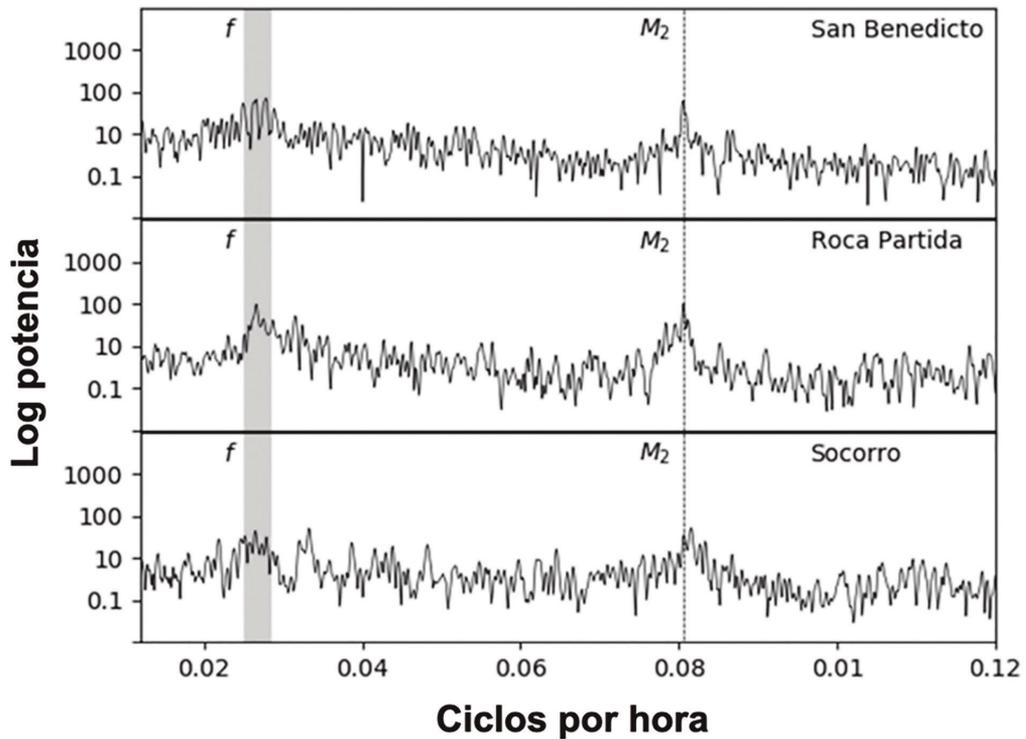
Este esquema de circulación superficial conceptual destaca la intrincada relación entre los procesos físicos y biológicos que ocurren en el Pacífico Oriental Tropical, donde la interacción entre las corrientes oceánicas y los fenómenos climáticos da lugar a una matriz de variabilidad ambiental que impacta desde los ecosistemas marinos regionales hasta las dinámicas climáticas globales. Las Islas Revillagigedo pueden estar vinculadas a un proceso aún no explícitamente explorado en el archipiélago, conocido como el “efecto de masa de isla”. Este fenómeno implica la generación de mezcla y turbulencia en el lado opuesto de la dirección del flujo de corrientes marinas en cada isla, causando una productividad insular relativamente alta en comparación con los hábitats oceánicos circundantes. El término “efecto de masa de isla” fue acuñado por Doty y Oguri (1956), para referirse al incremento en la biomasa y productividad que se registra alrededor de zonas insulares oceánicas de manera permanente por efecto turbulento de las corrientes marinas.

## Mareas

Las mareas en el Archipiélago de Revillagigedo son influenciadas principalmente por fuerzas astronómicas como los principales componentes lunares (M2, con un período de 12,42 h), solares (S2, con un período de 12,00 h) y los componentes diurnos luni-solares (K1, con un período de 23,93 h) siendo los picos más significativos a las 12,45 y 24 h (M2 y K1) (Salas et al., 2015). Estos datos fueron obtenidos con una boya oceanográfica, anclada aproximadamente a 700 m al sur de la Isla Socorro del 2005 al 2007 (Salas et al., 2015).

Además de las oscilaciones mareales, los eventos de viento fuerte pueden generar corrientes oscilatorias conocidas como “oscilaciones inerciales”, caracterizadas por el parámetro de Coriolis ( $f$ ). Estas oscilaciones se manifiestan como corrientes horizontales que giran en un período influenciado por la latitud, que varía desde 12 h en los polos hasta infinito en el ecuador. Teóricamente, al igual que las oscilaciones mareales, las oscilaciones inerciales pueden inducir eventos de surgencias frías en las islas. El período inercial en las latitudes del Archipiélago de Revillagigedo (18–19,5 °N) oscila entre 35 y 40 h. Es crucial distinguir entre los períodos mareales y los períodos inerciales. En estas latitudes, mientras que los períodos mareales pueden crear ondas internas que se propagan libremente, las oscilaciones inerciales no tienen la capacidad de propagar su energía de un lugar a otro. En consecuencia, cualquier corriente inercial observada en una isla debe ser, en teoría, generada in situ; mientras que las ondas internas de frecuencia mareal pueden tener un origen local o remoto. La boya oceanográfica de Isla Socorro detectó picos espectrales bien definidos para la temperatura y la componente u de los datos de corrientes oceánicas correspondientes a una oscilación inercial con un período de 37,4 h (Salas et al., 2015).

Los análisis espectrales de la temperatura realizados en tres sitios distintos mediante sensores de temperatura HOBO indican una variabilidad térmica más acentuada en el período de la marea semidiurna M2. Esta variabilidad



**Figura 8:** Mediciones de temperatura tomadas a intervalos de 13 minutos registradas por los sensores de temperatura HOBO in situ en tres islas del Archipiélago de Revillagigedo: San Benedicto, Roca Partida y Socorro. Se puede observar una mayor variabilidad de temperatura alrededor del período lunar principal ( $M_2$ : Línea vertical discontinua) y el período inercial en  $18^\circ\text{N}$  a  $19,5^\circ\text{N}$  ( $f$ : Barra vertical sombreada). Figura obtenida de Carter et al. (2020).

es especialmente pronunciada en la Isla San Benedicto y Roca Partida en comparación con la Isla Socorro (Figura 8). Sin embargo, debido a la ausencia de datos sobre la intensidad de los gradientes verticales de temperatura, o sea, la estratificación térmica alrededor de estas tres islas, no es posible inferir la magnitud de las ondas internas responsables de estas variaciones periódicas de la temperatura en los arrecifes rocosos y coralinos insulares. Es plausible que las señales correspondientes a los componentes  $M_2$  y  $S_2$  estén contribuyendo a la elevada varianza espectral en los períodos semidiurnos observados. No se detecta una señal distintiva para el período  $K_1$ , lo cual es

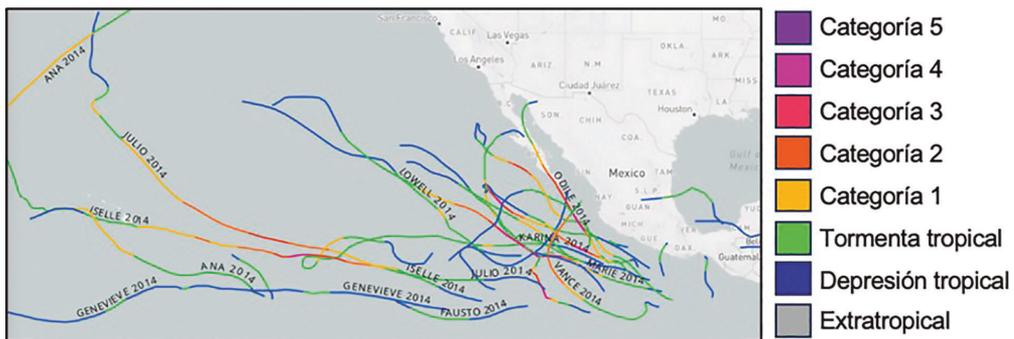
coherente con las expectativas teóricas, debido a que la influencia del componente K1 es  $< 25\%$  de la contribución combinada de los componentes M2 y S2 (Carter et al., 2020).

Las variaciones diarias en la temperatura superficial del mar medida *in situ* generalmente oscilan entre 2 y 3 °C, determinadas por la diferencia entre los registros máximos y mínimos (Carter et al., 2020) (Figura 8). Sin embargo, se han detectado períodos de elevada variabilidad térmica a escala diaria, con fluctuaciones de hasta 7 °C (Carter et al., 2020) (Figura 8). Estos cambios no son uniformes y pueden estar influenciados por procesos dinámicos como las ondas marinas internas que, de manera intermitente, pueden causar surgencias de aguas más frías, aumentando así el rango térmico diario detectado en la columna de agua en el área insular (Aston et al., 2019; Williams et al., 2018). En el caso de las islas oceánicas, la surgencia es a menudo el resultado de la interacción entre la estratificación térmica de la columna de agua y las corrientes de marea oscilantes, que promueven un desplazamiento vertical alternante del agua.

En mediciones de temperatura del agua tomadas a una profundidad constante, se esperarían variaciones térmicas que reflejen el ciclo de las corrientes de marea dominantes. No obstante, en el Archipiélago de Revillagigedo, los mecanismos subyacentes son probablemente más intrincados que esta descripción simplificada, debido a la complejidad de la batimetría volcánica local y las variaciones en la estratificación térmica del agua. Por ejemplo, se anticipa una mayor mezcla en lugares de poca profundidad o aquellos con una mayor influencia de las corrientes de marea y la dirección y velocidad de la circulación de las corrientes regionales. Por otro lado, en Roca Partida, caracterizada por una pendiente casi vertical y una profundidad de aproximadamente 80 m en la región insular, se esperarían menores efectos de las mareas y una estratificación más definida (Carter et al., 2020).

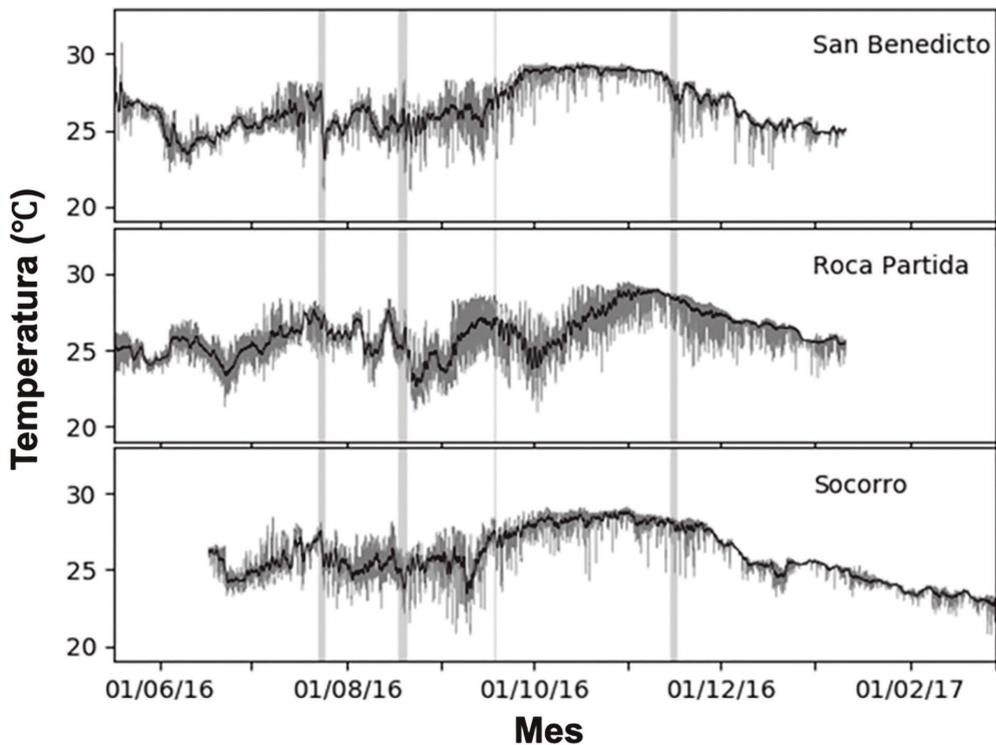
## Huracanes

Los huracanes tropicales ejercen efectos episódicos significativos en las condiciones oceanográficas, manifestándose en aumentos de la energía del viento, oleaje intensificado y notables anomalías de enfriamiento en la temperatura superficial del mar (Williams et al., 2018). Estos fenómenos meteorológicos tienen consecuencias importantes en la biota de los arrecifes insulares, en particular en organismos bentónicos como los corales y abanicos de mar, cuyas estructuras se han adaptado a ser pequeñas y robustas para resistir tales perturbaciones que ocurren estacionalmente durante el periodo de tormentas y huracanes tropicales (mayo-noviembre) (Olvera et al., 2018). Las islas del Archipiélago de Revillagigedo han sido afectadas por al menos 100 tormentas desde 1980 hasta la actualidad (2023) dentro de un radio de 200 km alrededor de cualquiera de las cuatro islas (<https://coast.noaa.gov/hurricanes>). Las Islas Revillagigedo están geográficamente posicionadas en la trayectoria de numerosas tormentas y huracanes, como se ejemplifica en el año 2014 (Figura 6, Figura 9). Las islas experimentan efectos de enfriamiento significativos post-ciclones, con disminuciones de hasta 6 °C en la TSM debido a la surgencia y mezcla de aguas subsuperficiales frías (Price et al., 2008).



**Figura 9:** Ejemplo de tormentas y huracanes clasificadas mediante la escala de Saffir-Simpson que ocurrieron durante 2014 en el este del Pacífico Oriental frente a México, la mayoría de estas pasan en el Archipiélago de Revillagigedo. Figura tomada de la NOAA (<https://coast.noaa.gov/hurricanes>).

Los impactos de enfriamiento de los cuatro ciclones tropicales que se aproximaron a un radio de 200 km de la Isla San Benedicto, la Isla Socorro y Roca Partida durante 2016 son evidentes en las mediciones de temperatura in situ (Figura 10). Además, el análisis espectral indica un incremento de la energía espectral en torno al rango del período inercial (Figura 8), sugiriendo que, además de los efectos de las mareas internas, las frecuentes tormentas regionales desempeñan una función mecánica en la generación de variaciones periódicas de la temperatura en escalas de tiempo de horas a días. La intensidad del impacto de enfriamiento post-tormenta probablemente varía



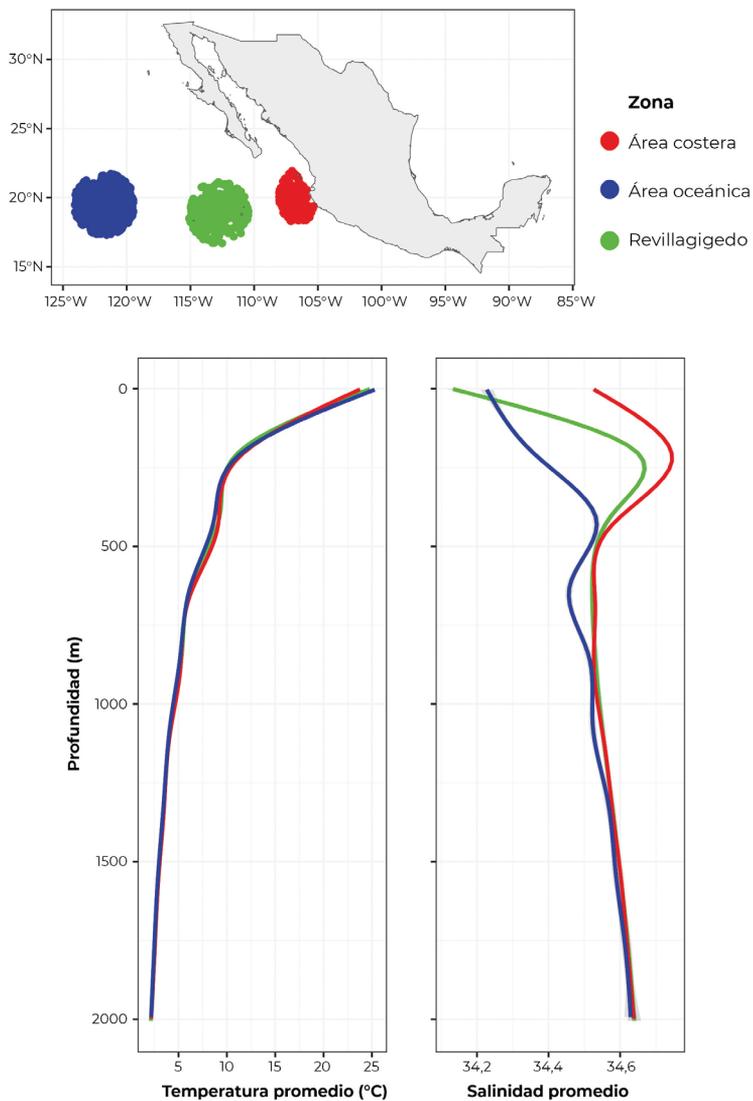
**Figura 10:** Temperatura registrada diariamente in situ con termómetros HOBO en las islas San Benedicto (23 m de profundidad), Socorro (28 m) y Roca Partida (38 m). Datos observados (gris) a intervalos de 13 minutos y promedio diario móvil (línea negra). Las barras verticales sombreadas indican períodos cuando ciclones tropicales estuvieron dentro de un radio de 200 km de las islas (Carter et al., 2020).

según la proximidad y la intensidad en la escala de Saffir-Simpson de cada evento, así como el tiempo que permanecen influyendo en la el área circundante de cada isla (Williams et al., 2018). Los ciclones tropicales en esta región suelen presentarse entre mayo y noviembre, coincidiendo con el período de las SST más elevadas que es la energía que promueve la ruta más probable de las tormentas y huracanes (Figura 9).

## Condiciones de la columna del agua

Los perfiles de temperatura y salinidad de la columna de agua obtenidos a través de flotadores Argo (ver Anexo Metodológico) en la región del Archipiélago de Revillagigedo muestran las características de aguas transicionales entre las zonas más costeras y oceánicas del Pacífico Mexicano, donde los gradientes verticales son más evidentes en salinidad en los primeros 500 m de profundidad que en la temperatura (Figura 11). El Archipiélago de Revillagigedo muestra una variación térmica y de salinidad (curva verde) característica de aguas insulares oceánicas, con una capa superficial relativamente cálida y salina que se extiende hasta aproximadamente 200 m de profundidad. Este patrón sugiere la presencia de una termoclina y haloclina bien definidas (Figura 11).

En el diagrama de temperatura-salinidad (diagrama TS) se observa como la curva roja presenta un perfil típico tomado en una región oceánica abierta, la curva blanca representa un perfil característico de una región costera frente a Cabo Corrientes (Figura 12). La curva verde muestra las condiciones termo-halinas presentes en el Archipiélago de Revillagigedo. Los gradientes de color en el fondo del diagrama representan la variación de la densidad del agua de mar desde valores más bajos (violeta) presentes en aguas profundas hasta más altos (amarillo) en aguas cerca de la superficie, ofreciendo una comparación visual entre las firmas termo-halinas de las tres áreas comparadas en Figura 11. Detalles metodológicos sobre la obtención de los

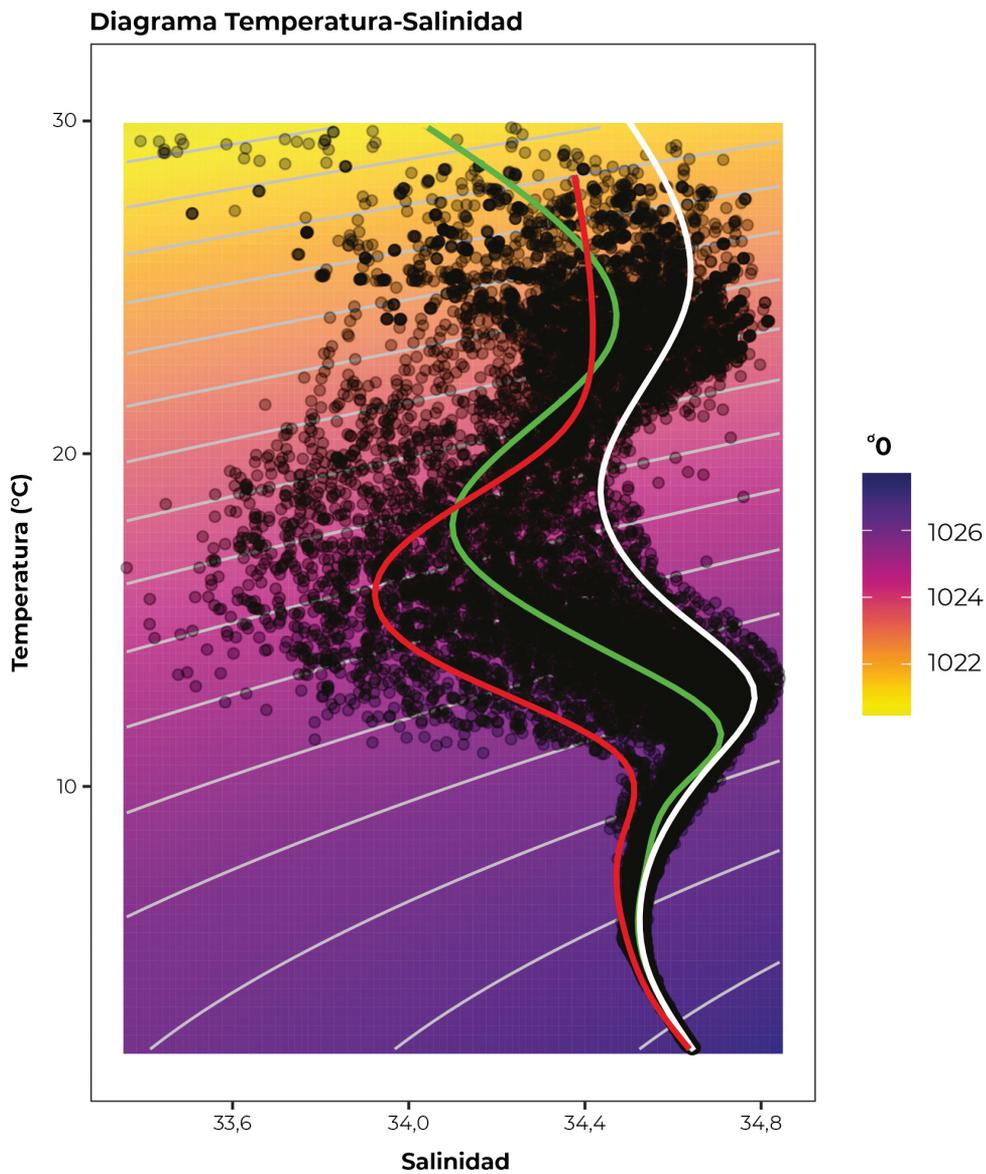


**Figura 11:** Mapa mostrando las regiones analizadas con datos de flotadores Argo en la zona costera (rojo), Parque Nacional Revillagigedo (verde) y zona oceánica (azul) en el Pacífico Oriental Tropical. Perfiles promedio de temperatura y salinidad del Archipiélago de Revillagigedo (en verde), de la zona costera de México (en rojo) y de la zona Oceánica del Pacífico (en azul). Detalles metodológicos sobre la obtención de los datos Argo de perfiles está disponible en el anexo metodológico mostrado al final del presente capítulo.

datos de flotadores Argo están disponibles en el Anexo Metodológico al final del presente capítulo. El análisis de la variabilidad térmica en el Archipiélago de Revillagigedo entre 1982 y 2023 (definido en adelante como el intervalo “histórico”) muestra una temperatura superficial del mar (TSM) media anual de 25,3 °C ( $\pm 1,3$  °C). Este promedio engloba fluctuaciones estacionales caracterizadas por temperaturas máximas promedio de 27,5 °C ( $\pm 0,03$ ) y mínimas promedio de 23,7 °C ( $\pm 0,01$ ). La amplitud térmica, capturada a través de la teledetección remota (Reynolds et al., 2007), refleja una oscilación significativa con extremos que alcanzan un máximo de 31,4 °C y un mínimo de 19,0 °C, subrayando la dinámica térmica estacional e interanual de la región. Las metodologías aplicadas para la adquisición y tratamiento de estos datos están documentadas en la sección metodológica presentada al final del presente capítulo.

El Archipiélago de Revillagigedo registra sus más bajas temperaturas superficiales del mar durante enero a junio. Esta tendencia térmica descendente es atribuible a la influencia de las aguas modificadas por la Corriente de California, cuyas aguas frías se extienden a lo largo de la costa occidental de la península de Baja California y avanzan hacia el suroeste. Sin embargo, a partir de junio, se observa una transición térmica; la influencia de la Corriente de California se atenúa, dando paso a la predominancia del agua cálida de la Contracorriente Ecuatorial Norte. Este cambio estacional ejerce un impacto directo en el aumento de la temperatura superficial del mar que se alinea con los patrones de circulación oceánica documentados para la región (Kessler, 2006).

El Archipiélago de Revillagigedo experimenta alteraciones en su estructura termoclinal inducidas por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical. El desplazamiento norte de la Zona de Convergencia Intertropical propicia eventos de surgencia costera que, a su vez, disminuyen la extensión vertical de la termoclina. Este fenómeno se invierte entre enero y



**Figura 12:** El diagrama de temperatura-salinidad (T-S) que muestra distintas masas de agua costeras (curva blanca), Archipiélago de Revillagigedo (curva verde) y aguas oceánicas (curva roja). Los contornos grises son las isopícnas, que indican gradientes de densidad potencial constante. Los puntos dispersos corresponden a observaciones individuales registradas por diferentes sensores Argo.

marzo cuando la Zona de Convergencia Intertropical se desplaza hacia el sur y la termoclina se profundiza hasta aproximadamente 70 m (Fiedler y Lavín 2017, Figura 3). Este comportamiento no solo impacta las condiciones locales, sino que también influye en las dinámicas biológicas y químicas asociadas a la columna de agua.

La heterogeneidad térmica a gran escala se manifiesta en la comparativa entre las zonas sur-este y noroeste del Archipiélago de Revillagigedo. Se observa que las primeras isotermas son consistentemente más cálidas por un margen de 2 °C en el promedio histórico, lo cual es destacado en el diagrama T-S de la Figura 12. Este patrón de variabilidad espacial es indicativo de los intrincados procesos de mezcla y las complejas interacciones entre las corrientes marinas y los sistemas atmosféricos en el Pacífico Tropical. Estos resultados no solo ofrecen una ventana a la comprensión de los patrones termo-halinos sino que también subrayan la importancia de las observaciones a largo plazo para discernir las tendencias y las variabilidades en el contexto de un clima cambiante en el Pacífico Oriental Tropical.

## **Efecto de masa de isla y productividad marina**

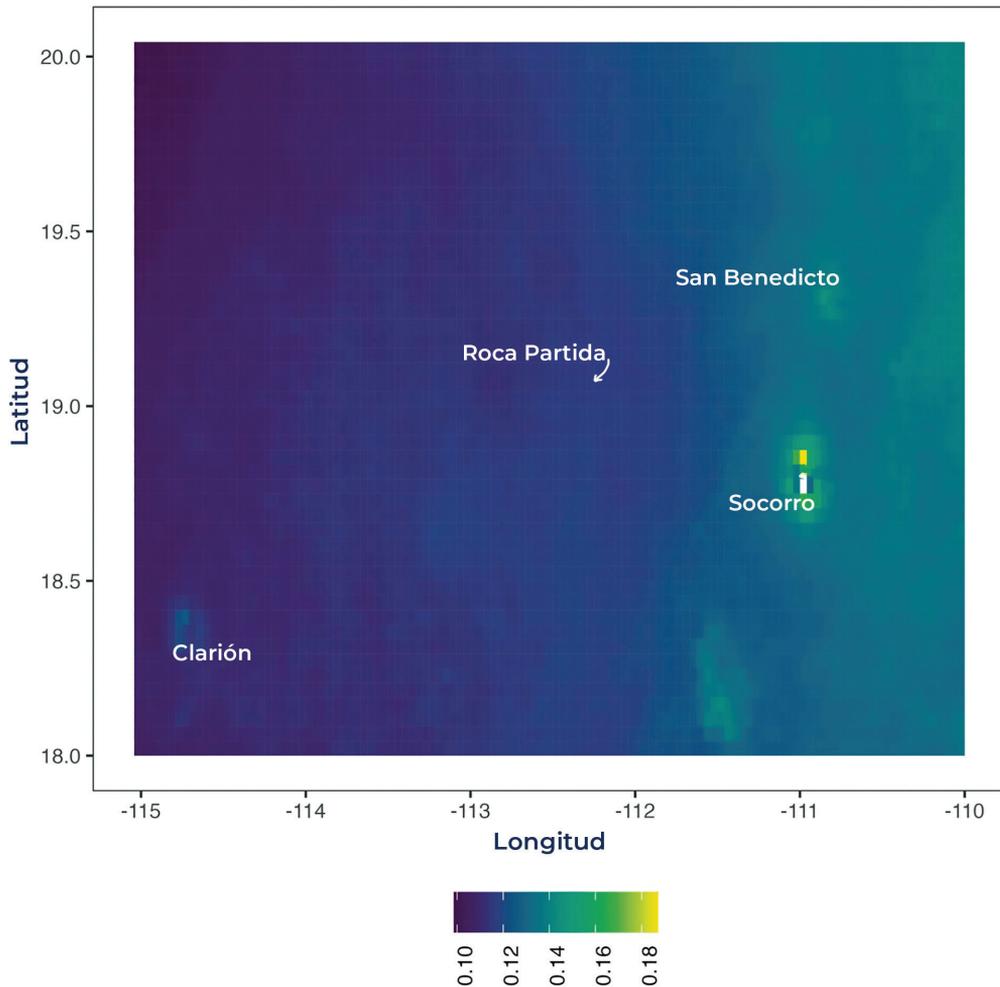
---

La productividad primaria de fitoplancton en la capa eufótica del Pacífico Oriental Tropical es comúnmente restringida por la baja disponibilidad de hierro, un micronutriente esencial para el crecimiento del fitoplancton. Esta limitación afecta la eficiencia de la fotosíntesis del fitoplancton, que desempeña una función vital en la captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. El Pacífico Oriental Tropical se caracteriza por una relativamente elevada tasa de producción primaria producida principalmente por nanofitoplancton y en menor medida microfitoplancton

que sin embargo no acumula alta biomasa debido a su elevada tasa de consumo y remineralización. Junto con la migración vertical del zooplankton y su dinámica fisiológica, el fitoplancton forma un componente fundamental de la bomba biológica de carbono, impulsando la transferencia de carbono desde la superficie hacia las profundidades del océano (Lavín et al., 2006). Sin embargo, la limitada circulación vertical de las aguas sub-termoclinales tiene implicaciones significativas en la distribución, en la baja concentración de oxígeno, y por ende la distribución y metabolismo de los organismos marinos y el secuestro de carbono en el lecho marino.

Desde hace tiempo la flota pesquera comercial y deportiva, se aprovecha de la mayor productividad biológica presente en las inmediaciones de las islas oceánicas, y desde el 2017 está prohibida la pesca en el Parque Nacional Revillagigedo. El fenómeno de productividad biológica mejorada alrededor de las islas fue reconocido científicamente por primera vez por Doty y Oguri en 1956, quienes introdujeron el término “efecto de masa de isla” para describir este efecto. Siguiendo esto, Uda e Ishino en 1958 vincularon la presencia de patrones de remolinos y características frontales alrededor de las islas con zonas de pesca productivas. La estela creada en el lado de sotavento de una isla puede mostrar varios comportamientos, desde movimientos irregulares en corrientes de fondo lentas hasta remolinos atrapados y desprendiéndose en flujos moderados y rápidos, respectivamente, asemejándose a la estela detrás de un cilindro circular (Hasegawa et al., 2004). Los niveles de nutrientes, como el nitrato, pueden ser hasta diez veces mayores en la estela que aguas arriba, con isopícnas potencialmente elevándose hasta 100 m, lo que lleva a un aumento de la productividad en la zona eufótica (Heywood et al., 1990).

El “Efecto masa de islas” es de especial importancia bajo el contexto de limitación de nutrientes en esta región biogeográfica tropical oceánica. En la Figura 13 se muestra una variación en la concentración superficial de



**Figura 13:** Concentración superficial de clorofila-a promedio ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en las proximidades del Archipiélago de Revillagigedo entre 1982 y 2023, destacando el "Efecto de masa de isla" que es más evidente en Isla Socorro que en Clarión y San Benedicto, siendo imperceptible en Roca Partida por su pequeño tamaño.

clorofila-*a* promedio alrededor del Archipiélago de Revillagigedo, con un notable incremento en las inmediaciones de la Isla San Benedicto y Isla Socorro. El "Efecto de masa de islas", conduce a un enriquecimiento de nutrientes y, por consiguientes, al aumento de la biomasa fitoplanctónica en áreas cercanas a las islas, siendo imperceptible en Roca Partida por su pequeño tamaño

(Kämpf et al., 2024; de Souza et al., 2013). Este enriquecimiento alrededor de las islas sostiene la fauna bentónica y nectónica presente en las cuatro islas de Revillagigedo.

La clorofila-*a* es el principal pigmento fotosintético de todos los grupos taxonómicos del fitoplancton, por lo tanto, es un indicador clave de la biomasa de los productores primarios en los ecosistemas pelágico marinos. Las zonas con mayor promedio de concentración superficial de clorofila-*a*, identificadas por tonalidades amarillas en la Figura 14 indican florecimientos que sostienen el resto de la vida marina impulsados por la surgencia de aguas ricas en nutrientes que las islas promueven.

La relevancia de este patrón reside en su contribución a la diversidad y abundancia de la vida marina, desde el fitoplancton hasta los niveles tróficos superiores (peces, aves marinas y mamíferos marinos). La presencia de estas floraciones de fitoplancton es una característica vital para ecosistemas insulares, ya que proporcionan el sustento para redes alimentarias complejas y biodiversidad significativa. El Archipiélago de Revillagigedo actualmente es un área protegida y Patrimonio de la Humanidad que ofrece una oportunidad única para estudiar estos procesos y su impacto en la conservación de la biota marina. La comprensión del “Efecto de masa de islas” y sus dinámicas asociadas es fundamental para desarrollar estrategias de manejo y conservación efectivas para estas ricas aguas insulares rodeadas de un ambiente oligotrófico oceánico (UNESCO, 2016).

## Fitoplancton

El fitoplancton fue inicialmente investigado cuantificando la concentración de clorofila-*a* en el programa EASTROPAC en la década de 1960 en la parte central y sur del Pacífico Oriental Tropical, resaltando que la concentración de Chl-*a* en estratos con >150 m de profundidad fue despreciable y no varió con la temporada o área (Blackburn et al., 1971). Las concentraciones super-

ficiales de Chl-*a* reportadas en 1967 y 1968 variaron entre 0,15-0,30 mg m<sup>-2</sup> (Blackburn et al., 1971). La abundancia y composición taxonómica del fitoplancton de Revillagigedo ha sido reportado a partir de registros de algunas especies particulares de dinoflagelados (Gárate-Lizárraga y González-Armas, 2017; Gárate-Lizárraga et al., 2018). Por lo tanto, hasta ahora no existen listados taxonómicos exhaustivos desconociéndose la estructura comunitaria base de la trama trófica insular compuesta por nanoplancton y microfitorplancton, excepto las diatomeas epifitas del género *Mastogloia* recolectadas sobre macroalgas de las Islas Revillagigedo (Siqueiros-Beltrones et al., 2022). En el Pacífico Oriental Tropical existe una relación entre el tamaño celular de las microalgas y la distancia de la costa, es decir las formas pequeñas (<1 µm) dominan en aguas oceánicas y las más grandes cerca de la costa donde las concentraciones de nutrientes en la superficie son altas (Chávez, 1989). En términos generales, la biomasa de concentración superficial de clorofila-*a* (promedio 0,2 µg L<sup>-1</sup>) y fitoplancton (promedio 20 µg C L<sup>-1</sup>) en la superficie de la región ecuatorial es baja y tiene también baja variación estacional y espacial (Chávez, 1989) que coincide con observaciones realizadas por Blackburn et al. (1970). El fitoplancton en la región oceánica del Pacífico Oriental Tropical es dominado por pequeñas células solitarias (<5 µm), principalmente proclorofitos, *Synechococcus*, picoplancton eucariota, haptofitos y dinoflagelados, mientras que las poblaciones costeras en el Pacífico Oriental Tropical son dominadas por organismos o colonias más grandes (principalmente diatomeas) (Chavez et al., 1996). Se espera que en la región insular de las Islas Revillagigedo predominen especies tropicales pequeñas y especies presentes a lo largo de la costa occidental de Baja California sur, incluyendo especies que realizan simbiosis y endosimbiosis que facilitan la absorción de nutrientes bajo condiciones de baja concentración de nutrientes típicas de la región oceánica del Pacífico Oriental Tropical.

## Zooplancton

El zooplancton es una compleja comunidad de organismos que pasan accidentalmente (ticozooplancton), una parte (merozooplancton) o todo (holozooplancton) su ciclo de vida en la columna de agua derivando con las corrientes marinas. Esta comunidad ubicada en la parte baja de la trama alimentaria del océano es intermediaria entre los productores primarios (fitoplancton) y los niveles tróficos superiores del bentos y necton. El zooplancton ha sido considerablemente bien estudiado en el Pacífico Oriental Tropical a través de numerosos cruceros oceanográficos oceánicos, como los derivados por el programa pionero EASTROPAC en los 1960's (Blackburn et al., 1970; Bears et al., 1971, Fernández-Álamo y Färber-Lorda 2006), pero virtualmente inexplorados en la región insular de cada isla de Revillagigedo. El zooplancton ha sido investigado alrededor de algunas islas oceánicas como el Archipiélago de las Islas Marías (Gómez-Gutiérrez et al., 2014), Islas del Coco (Esquivel-Garrote y Morales-Ramírez, 2020a,b) e Islas Galápagos (Figueroa, 2010, 2021) conformando distinta estructura comunitaria a la observada en aguas oceánicas del Pacífico Oriental Tropical (Blackburn et al., 1970; Saltzman y Wishner 1997a,b; Fernández-Álamo y Färber-Lorda 2006; Gutiérrez- Bravo et al., 2022) y zooplancton de aguas neríticas del Pacífico Mexicano (Ambriz- Arreola et al., 2018).

Investigaciones realizadas por Benett y Schaefer (1960) revelaron que los volúmenes de zooplancton cerca de la Isla Clarión eran considerablemente bajos en comparación con otras áreas del Pacífico Oriental Tropical. No obstante, un análisis cualitativo del zooplancton realizado en los años noventa por Verdi et al. (1994) identificó la presencia de géneros de tintínidos, como *Codonellopsis*, *Eutintinnus*, *Parafavella* y *Salpingella*, además de dinoflagelados de los géneros *Ceratium*, *Ceratocirva* y *Prorocentrum*. Este estudio también registró copépodos, anélidos pelágicos, larvas nauplio y huevos de peces, según el reporte del Programa de Manejo de Revillagigedo (2018).

Blackburn et al. (1970) a partir de muestreos oblicuos en la región ubicada al sur del Paque Nacional de Revillagigedo reportaron que el micronecton numéricamente dominante eran los eufáusidos (61%), Sergestidae (14,3%), Penaeidae (8,3%) y Oplophoridae entre otros crustáceos. Fernández-Alamo y Färber-Lorda (2006) realizaron una extensiva revisión de los patrones espaciales y temporales del zooplancton en el Pacífico Oriental Tropical, así como las interacciones con factores oceanográficos que inciden en su distribución, abundancia y dinámica trófica. La distribución vertical del zooplancton en relación con la profundidad de la capa del mínimo de oxígeno ha sido ampliamente investigada en relación con la hipótesis de compresión de hábitat que propone que la somera capa mínima de oxígeno es un estrato que deja un estrecho hábitat óxico en los primeros 40–100 m de la columna de agua (Brinton, 1979; Whishner et al., 2013; Färber-Lorda y Färber-Data 2023). Este es un proceso ecológicamente relevante en el contexto del Cambio Climático global y el engrosamiento vertical y la expansión latitudinal de la capa del mínimo de oxígeno hacia latitudes mayores (Saltzman y Wishner 1997a,b; Stramma et al., 2018; Gutiérrez-Bravo et al., 2022).

El Pacífico Oriental Tropical es propicio para el endemismo, con especies de organismos holoplanctónicos como los copépodos (*Eucalanus inermis*, *Pontellina sobrina* y *Pleuromamma johnsoni*) y los eufáusidos (*Euphausia eximia*, *E. distinguenda*, *E. lamelligera* y *Hansarsia gracilis*) que se han adaptado a condiciones de deficiencia de oxígeno y altas temperaturas (pequeño tamaño corporal o alargamiento de las branquias) (Brinton 1979) ocurridas después del levantamiento del istmo de Panamá que separó la circulación oceánica entre los océanos Atlántico y Pacífico (Coates et al., 1992; Fernández-Alamo y Färber-Lorda 2006; O’Dea et al., 2016). Shih (1979) propuso que la rica biodiversidad de especies endémicas en el Pacífico Oriental Tropical podría estar estrechamente vinculada a la complejidad oceanográfica e hidrográfica de la región. Esta singularidad biogeográfica respalda la idea de

que el Pacífico Oriental Tropical constituye una región biogeográficamente distintiva y aislada dentro del Océano Pacífico. Existen algunos registros aislados de cnidarios en el zooplancton de las Islas Revillagigedo (Estrada-González et al., 2023) y observaciones *in situ* de alimentación de mantas (Steward et al., 2016, 2019). Sin embargo, la estructura de la comunidad de zooplancton aún no ha sido estudiada en detalle y se desconoce cuáles especies son las que numéricamente dominan las rutas de carbono de la trama trófica insular de Revillagigedo.

## El Niño-Oscilación del Sur y cambio climático

---

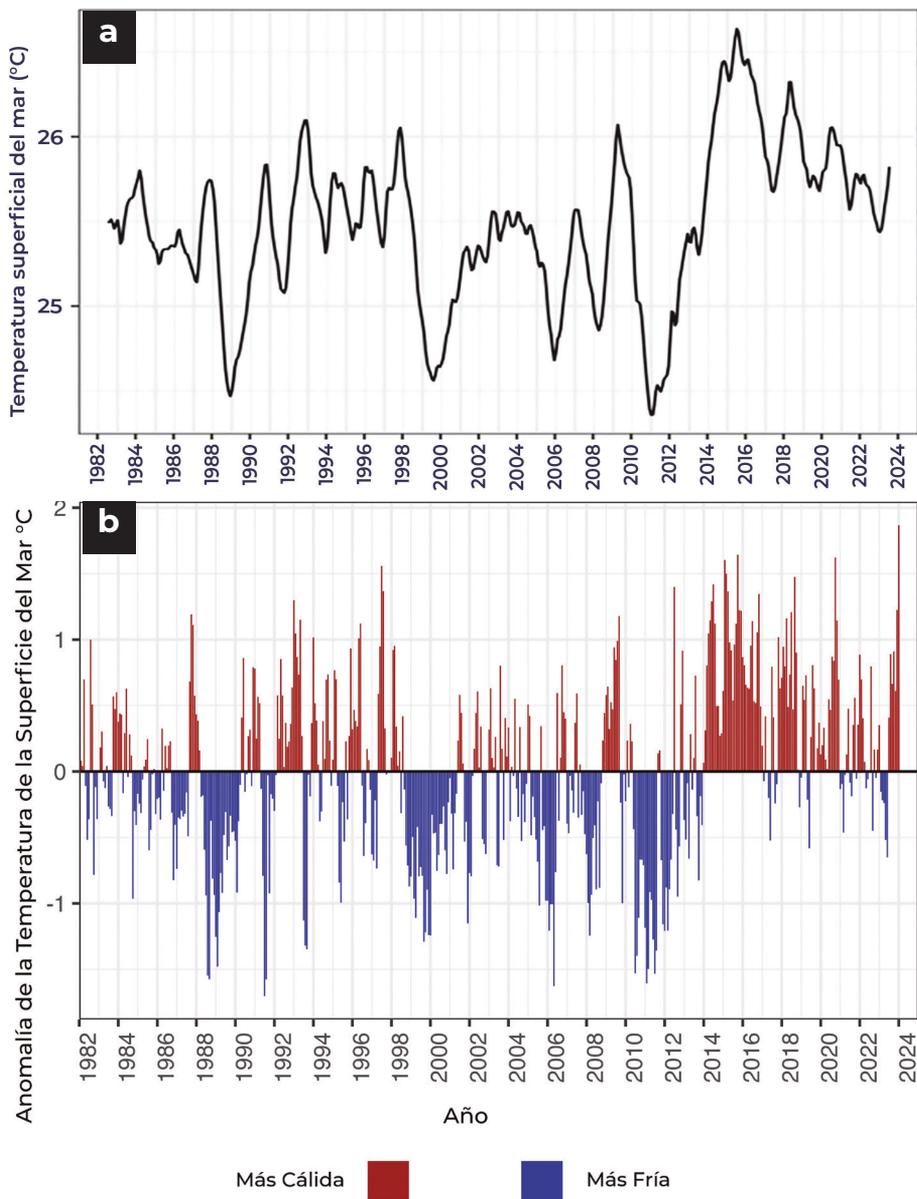
La variabilidad temporal preponderante asociada con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por las siglas en inglés de *El Niño Southern Oscillation*) tiene un impacto significativo en la distribución biogeográfica y abundancia de las especies marinas, así como en los patrones de reproducción y migración. Este fenómeno representa la principal causa de variabilidad climática interanual en el planeta (Lavín et al., 2006; Wang et al., 2017).

El análisis de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Oriental Tropical señala que la anomalía térmica mensual máxima durante los eventos de El Niño más intensos ocurridos entre 1982 y 2016 (1982-1983, 1997-1998, 2015-2016) fue aproximadamente de 2.4 °C (Carter et al., 2020). Los eventos de El Niño explican entre el 25 y el 38% de la variabilidad interanual en las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Archipiélago de Revillagigedo (Carter et al., 2020). Sin embargo, esta correlación se atenúa en escalas de tiempo estacional y mensual. El ENSO ejerce una mayor influencia en las Islas Revillagigedo durante el otoño y el invierno boreal en comparación con la primavera y el verano, atribuible a la intensidad de El Niño, que gene-

ralmente alcanza su apogeo durante esos períodos (Reynolds et al., 2002). Estos factores físicos y patrones de forzamiento climático convierten al Pacífico Oriental Tropical en un ecosistema marino complejo y dinámico, con una influencia directa en la biodiversidad y la dinámica del Archipiélago de Revillagigedo. La comprensión de los eventos de El Niño y La Niña es esencial para una apreciación integral de la respuesta de la vida marina insular y su función en el ecosistema insular y oceánico global. Aunque el efecto de estas considerables anomalías térmicas positivas durante los eventos de El Niño en la biota marina insular de Revillagigedo aún no ha sido evaluado en detalle, se presume que constituyen una perturbación interanual ecológicamente relevante.

La serie temporal de la temperatura superficial del mar (SST) del Pacífico Oriental Tropical muestra una tendencia de variabilidad interanual con una clara tendencia de aumento de la temperatura a lo largo del periodo 1981-2024 (Figura 14). La descomposición de la serie temporal permite observar cómo, a pesar de la variabilidad natural y los eventos cíclicos como El Niño y La Niña, existe una tendencia subyacente al calentamiento con años anómalamente fríos en 1989, 1999 y 2011 y prolongados períodos con anomalías positivas, particularmente entre el 2012 y 2023. Esta tendencia es consistente con lo que los modelos climáticos han proyectado y con las observaciones globales que indican un incremento en las temperaturas oceánicas como resultado del cambio climático antropogénico.

Carter et al. (2020) discutieron los cambios recientes y realizaron predicciones oceanográficas para el Archipiélago de Revillagigedo mediante el análisis de tendencia lineal de la TSM, la cual indica una tendencia de calentamiento de 0,7 °C desde 1880 al 2010 (Rayner et al., 2003). Este aumento de temperatura es moderado en comparación con la tendencia general de calentamiento del siglo XX en el Pacífico Oriental Tropical de 0,8-1,0 °C (Deser et al., 2010). La variación observada en Revillagigedo de la Temperatura superficial del mar es ligeramente superior a la registrada en la boca del Golfo



**Figura 14:** A) Tendencia mensual de la temperatura superficial del mar (SST) descompuesta en el Pacífico Oriental Tropical de 1982 a 2023. Los datos muestran fluctuaciones interanuales y una tendencia al calentamiento a lo largo del período analizado; B) Anomalías mensuales de temperatura para el mismo período con meses por arriba (rojo) o por debajo (azul) del promedio de la temperatura.

de California con un incremento de  $0,57 \pm 0,01$  °C por década (Sánchez-Cabeza et al., 2022).

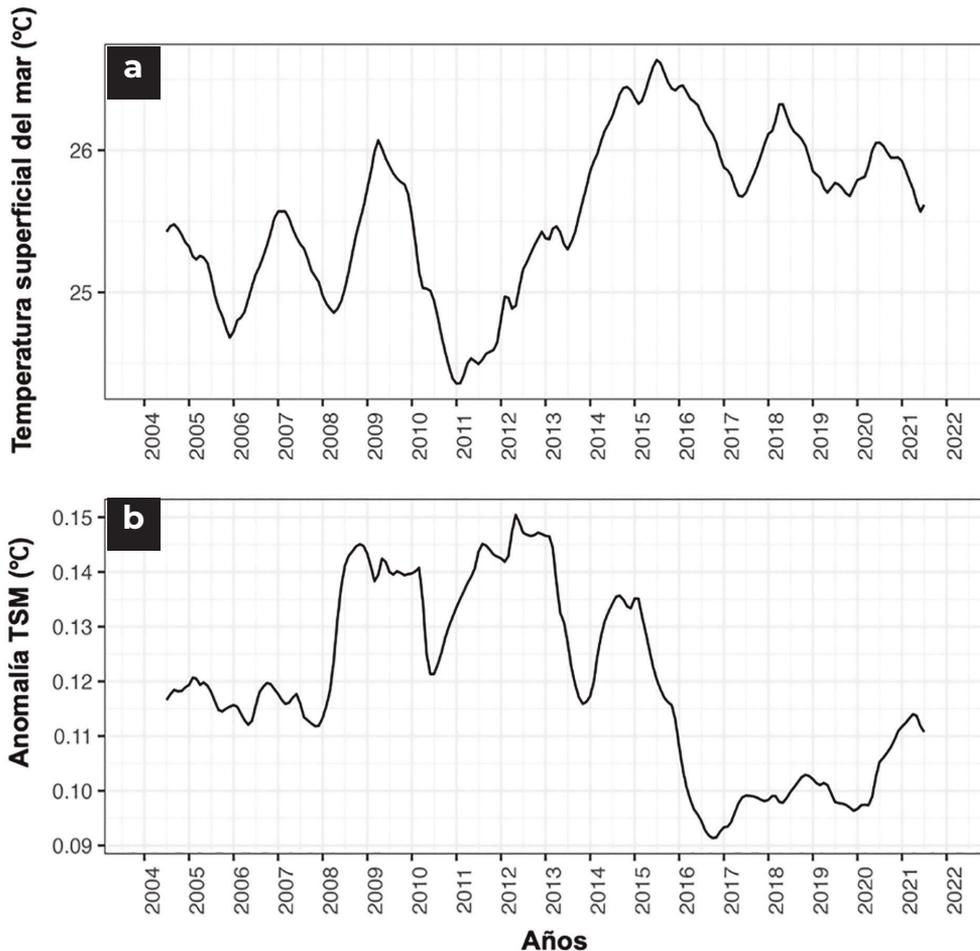
Es importante destacar que los patrones de calentamiento en el Pacífico Oriental Tropical son complejos en contexto espacial y temporal debido a la naturaleza heterogénea y dinámica de los procesos hidrográficos oceánicos (Jiménez et al., 2018, Kurczyn et al., 2012, 2013). Los Modelos de Circulación General utilizados para la predicción del clima sugieren que es probable que el calentamiento antropogénico futuro sea más intenso en la región ecuatorial ( $\sim 5$  °N a 5 °S) que en las regiones del Pacífico Oriental Tropical fuera del ecuador (Jiménez et al., 2018). No obstante, se señala que las tasas proyectadas de aumento de temperatura en la región de la Piscina Cálida del Pacífico Oriental (Deser et al., 2010) pueden influir en el área del Archipiélago de Revillagigedo de manera estacional, cuando la Corriente Norecuatorial es una influencia dominante en las condiciones oceanográficas (Carter et al., 2020).

Las generaciones actuales de modelos de circulación general no proporcionan aún una visión consensada sobre cómo cambiará la variabilidad interanual del ENSO en un mundo con tendencia de calentamiento global. La disminución de los vientos alisios y los patrones de cambio de la temperatura superficial del mar pueden indicar una tendencia de eventos de El Niño cada vez más intensos, lo que provoca anomalías positivas de temperatura superficial del mar de mayor duración y magnitud en el Pacífico Oriental Tropical (Cai et al., 2015). Sin embargo, el grado en que la dinámica del ENSO se ve influenciada por el cambio climático dependerá del equilibrio relativo de los procesos climáticos subyacentes y es incierto si los cambios esperados en los procesos de amplificación y atenuación de ciclos de El Niño Oscilación del Sur se compensarán parcialmente entre sí (Collins et al., 2010; Carter et al., 2020). Comprender mejor el sistema climático global depende de nuestra capacidad de extender los limitados registros instrumentales de la temperatura oceánica superficial de regiones tropicales. Las razones elementales Sr/

Ca y Mg/Ca registradas en las bandas de crecimiento del coral pétreo han demostrado ser una herramienta precisa para reconstruir la variabilidad de la temperatura oceánica superficial. Villaescusa y Carriquiry (2004) realizaron la calibración obtenida a partir de la medición biogeoquímica estacional entre las razones molares Sr/Ca y Mg/Ca en el esqueleto de coral del género *Porites* de Isla San Benedicto, y la temperatura oceánica superficial. Las razones geoquímicas medidas (precisión  $\pm 0,2\%$ ,  $2\sigma$ ) mostraron una alta covariación estacional estrechamente relacionada con la temperatura oceánica superficial de la región. Ellos concluyen que los paleotermómetros de Sr/Ca y Mg/Ca son altamente confiables en esta región del Pacífico, siempre y cuando exista una ecuación específica para la zona de estudio en cuestión (Villaescusa y Carriquiry, 2004).

Las tendencias descompuestas de la temperatura superficial del mar y la concentración superficial de clorofila- $\alpha$  a lo largo de la serie mensual de 2004-2021 muestran una significativa variabilidad en ambas métricas (Figura 15A,B). Esta variabilidad puede estar estrechamente relacionada con los impactos combinados de los fenómenos de El Niño y el cambio climático. Durante los eventos de El Niño, las anomalías en la temperatura del agua tienen el potencial de alterar la estratificación del océano, afectando a los procesos de afloramiento que resultan fundamentales para la disponibilidad de nutrientes en las aguas eufóticas superficiales. Estos nutrientes son esenciales para el fitoplancton, cuya biomasa se infiere indirectamente por la concentración superficial de clorofila- $\alpha$ . Un descenso en la biomasa del fitoplancton puede tener consecuencias en cascada para toda la trama trófica marina, impactando la productividad pesquera y la biodiversidad. Además, el cambio climático, mediante el calentamiento sostenido de las aguas oceánicas y el proceso de acidificación del océano, puede agravar estos efectos, potencialmente conduciendo a una disminución de la resiliencia del ecosistema marino del archipiélago y comprometiendo su capacidad para

soportar presiones antropogénicas y naturales futuras. Esta representación resalta la importancia de monitorear estrechamente estas variables, ya que pueden ser consideradas como indicadores clave de la salud oceánica y la productividad marina.



**Figura 15** A) Tendencia mensual de la temperatura superficial del mar (SST, arriba), y B) la concentración de la clorofila- $\alpha$  (Chl- $\alpha$ ) inferida por telemetría satelital en el Archipiélago de Revillagigedo, indicando fluctuaciones asociadas con eventos de El Niño y cambios climáticos a largo plazo.

## Ondas de calor marinas

---

Comprender el impacto de las ondas de calor marinas (MHWs, por las siglas en inglés de *Marine Heat Waves*) en los ecosistemas del Archipiélago de Revillagigedo es de suma importancia para los esfuerzos de conservación y gestión. Las MHWs son períodos prolongados de temperaturas inusualmente altas en la superficie del mar que pueden tener efectos devastadores en los ecosistemas marinos, similares a las ondas de calor terrestres, pero en el océano (Hobday et al., 2016). Estos fenómenos son de creciente preocupación en el contexto del cambio climático global, ya que su frecuencia, duración e intensidad han incrementado en la última década (Oliver et al., 2021).

Estudiar las MHWs es crucial por varias razones. Primero, pueden llevar a cambios ecológicos significativos a corto plazo, como cambios en la distribución de las especies, disminuciones en la salud y productividad de los hábitats marinos (por ejemplo, arrecifes de coral, bosques de algas), y alteraciones en la dinámica de las redes tróficas. Dichos cambios no solo afectan la estructura y función de los ecosistemas, sino también a las comunidades y economías que dependen de ellos (Wernberg, 2021). Segundo, las MHWs sirven como indicadores de los impactos más amplios del cambio climático, ofreciendo perspectivas sobre cuán rápidamente pueden alterarse los ambientes marinos y cómo podrían ser las condiciones futuras. Monitorear estos eventos permite a los científicos rastrear los cambios en tiempo real, proporcionando datos esenciales para modelos predictivos y estrategias de adaptación (Oliver et al., 2021).

El Archipiélago de Revillagigedo es un ecosistema oceánico que permite estudiar los efectos locales y la dinámica de las MHWs para entender los mecanismos intrínsecos de resiliencia y vulnerabilidad de las especies marinas al estrés térmico. Esto proporciona perspectivas que pueden informar estra-

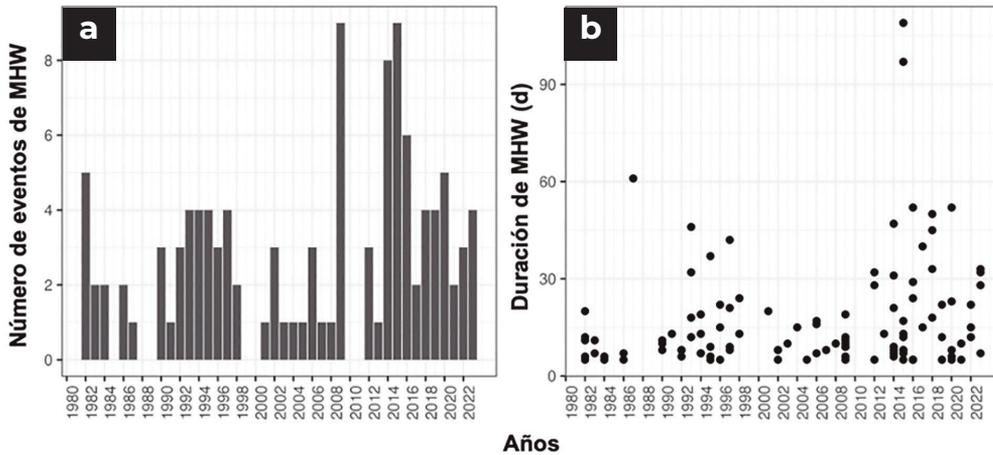


Figura 16: A) Número de eventos de Olas de Calor Marinas por año; B) Duración de los eventos de olas marinas de calor medidos en días.

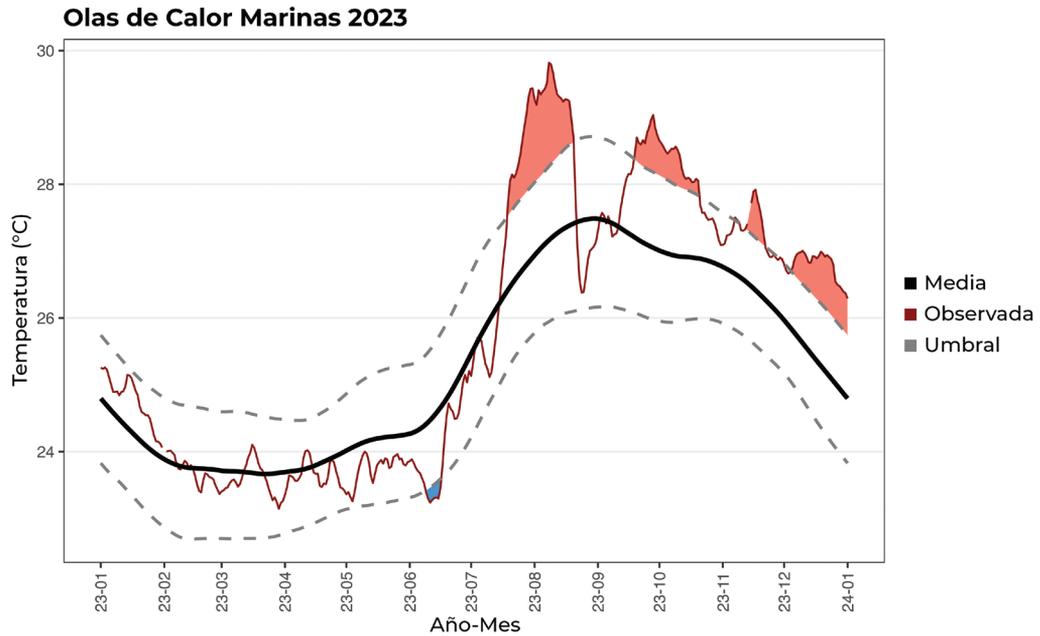
tegas de conservación no solo para el Archipiélago de Revillagigedo, sino también para otros ecosistemas marinos en el planeta.

El número y la duración de las ondas de calor marinas ha aumentado desde 1982 a la actualidad (Figura 16A,B). Un análisis estadístico utilizando un modelo lineal generalizado con distribución de Poisson revela que el número de ondas de calor marinas experimentó un aumento significativo después de 2011, con un aumento sustancial (60,2%) y estadísticamente significativo ( $p = 0,0129$ ) en la frecuencia de estos eventos. Este proceso es ecológicamente relevante, insinuando los efectos intensificantes de la variabilidad climática o el cambio climático. Adicionalmente, la duración de las Ondas de Calor Marinas también mostró un aumento notable en función del tiempo, con un incremento del 64,6% ( $p < 0,0001$ ) después de 2011, una cifra que subraya una elongación clara y significativa de estos eventos de calentamiento desde 2011 a la actualidad. El aumento del número y la duración de las ondas de calor marinas señala una tendencia climática preocupante, que podría conducir a impactos más pronunciados y duraderos en los ecosistemas marinos

sin precedentes desde el monitoreo climático realizado a nivel mundial.

Durante el año 2023 se observaron varios picos pronunciados (áreas sombreadas en rojo) que señalan ondas de calor marinas desde julio de 2023 a enero 2024 (Figura 17). La evidencia de la serie de tiempo sugiere que tales elevaciones de temperatura, particularmente cuando son prolongadas, pueden llevar a notables consecuencias ecológicas de tropicalización de la fauna bentónica como ha sido recientemente evidenciado en la región sur del Golfo de California (Favoretto et al., 2022). Entre las consecuencias negativas de la tropicalización se incluyen el blanqueamiento de corales, cambios en la distribución latitudinal y de profundidad de especies y alteraciones en los ciclos reproductivos y tasas de crecimiento de organismos marinos.

Las implicaciones de las ondas de calor marinas en Revillagigedo pueden ser profundas, ya que períodos extendidos de temperaturas anómalamente elevadas pueden causar daños sin precedentes a la estructura y función de los ecosistemas marinos, particularmente a las especies sensibles a la temperatura (estenotérmicas). Los cambios en curso en los patrones climáticos marinos enfatizan la necesidad de un monitoreo integral y modelos predictivos robustos para mitigar y comprender el impacto de estos eventos. Existe una necesidad urgente de investigación dirigida a los mecanismos de resiliencia de las especies marinas, el potencial de adaptación y las implicaciones más amplias de anomalías térmicas sostenidas en los ciclos biogeoquímicos oceánicos. Los datos encapsulan un momento crítico en la ecología marina, uno que requiere una reevaluación de las estrategias de conservación ante el desafío creciente que representa el cambio climático.



**Figura 17:** Olas de Calor Marinas inferidas al exceder el umbral de una desviación estándar ocurridas en el Archipiélago de Revillagigedo durante el año 2023. La línea sólida negra delinea el promedio climatológico, proporcionando una base contra la cual se miden los umbrales. Las líneas discontinuas indican el umbral para las condiciones de ola de calor, típicamente definidas como temperaturas que están a una desviación estándar por encima del promedio histórico. La línea roja traza la temperatura observada para 2023, con áreas sombreadas en rojo resaltando las instancias donde las temperaturas observadas superan el umbral, definidas como olas de calor marina.

## Anexo Metodológico

---

### Series de temperatura y Clorofila- $\alpha$

Recuperamos datos de la temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) óptimamente interpolados de Reynolds correspondientes al área del Archipiélago Revillagigedo. El producto OISST es un conjunto de datos global de 0,25x0,25 grados de resolución de SST derivados del Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) con una resolución diaria cuyo intervalo de tiempo va de 1982 a 2020. Los datos fuente están actualmente disponibles en: <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>. Los datos de concentración superficial de clorofila- $\alpha$ , indicativos de la biomasa del fitoplancton, se obtuvieron de conjuntos de datos oceanográficos globales disponibles a través del servidor ERDDAP. Los datos de concentración de clorofila- $\alpha$  recuperados, típicamente proporcionados en unidades de  $\text{mg}/\text{m}^3$ , fueron procesados para manejar cualquier valor faltante o anómalo aplicando los protocolos de control de calidad apropiados según se explica y declara en la documentación del conjunto de datos. Los datos fueron obtenidos a la resolución espacial y temporal disponible para la región de interés en el Archipiélago de Revillagigedo. El código para descargar, manipular y analizar datos fue escrito en R.

### Detección de ondas de calor marinas

Para detectar eventos de ondas de calor marinas, calculamos las propiedades estadísticas (media, varianza, ciclo estacional y cuantiles) de la serie de tiempo en relación al período climatológico sobre toda la serie de tiempo que cubre el período de diciembre de 2022 a enero de 2024. Luego detectamos ondas de calor marinas a partir de datos diarios de SST dentro de cada cuadrícula de 0,25 grados (es decir, cada píxel). El número y la duración de

las ondas de calor marinas se calcularon como períodos de cinco o más días consecutivos cuando la SST diaria fue mayor que el percentil 90 del umbral climatológico basado en nuestra serie de tiempo (Hobday et al., 2016). Después de detectar los eventos, ajustamos un modelo lineal generalizado (GLM) con distribución de Poisson a cada píxel para calcular tasas de cambio en la frecuencia de ondas de calor marinas. El análisis de las ondas de calor marinas se completó utilizando el paquete R *heatwaveR* (Schlegel y Smit, 2018).

## Series de perfiles de Argo

Los perfiles de temperatura superficial del mar (SST) y salinidad se obtuvieron del programa Argo (Wong et al., 2020). La base de datos Argos proporciona acceso público de una matriz global de más de 3 800 flotadores de perfilado a la deriva. Los datos de flotadores Argo se accedieron utilizando el paquete “*argoFloats*” en R, una herramienta integral diseñada para trabajar con el conjunto de datos de ARGO. La extracción de datos se centró en obtener perfiles de SST y salinidad para regiones y profundidades específicas de interés. Extrajimos 50 perfiles dentro de un buffer alrededor de tres puntos: 1) el centroide del Archipiélago Revillagigedo, 2) a un área oceánica, y 3) a un área costera (Figura 11). Una vez que los perfiles de SST y salinidad se leyeron en R, se aplicaron procedimientos de control de calidad para eliminar cualquier perfil con banderas que indicaran problemas potenciales con los datos. Los perfiles restantes fueron procesados para extraer los parámetros necesarios. Se calcularon estadísticas descriptivas para SST y salinidad, incluyendo medias, medianas, desviaciones estándar y rangos. Se analizaron las tendencias temporales para entender las variaciones durante el período de tiempo seleccionado.

## Límite superior de la zona del mínimo de oxígeno

La concentración mensual de oxígeno molecular disuelto ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ ) de enero a noviembre de 2023 fue obtenida del análisis y pronóstico biogeoquímico global del Servicio Marino de Copernicus<sup>1</sup> con una resolución espacial de  $0,25^\circ$  ( $\sim 27,6 \text{ km}$ ) y consta de 50 niveles de profundidad (0-5 500 m). Los archivos nc mensuales se importaron y procesaron en el entorno del lenguaje de programación R (R Core Team, 2023) utilizando funciones del paquete satin (Villalobos y González-Rodríguez, 2022). El conjunto de datos de concentración de oxígeno disuelto se convirtió de  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$ . El límite superior de la zona del mínimo de oxígeno ( $\text{O}_2 < 0,5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ ) se estimó por píxel calculando las diferencias ( $\Delta\text{O}_2$ ) entre la concentración de  $\text{O}_2$  y el umbral de  $0,5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$  para cada nivel vertical. Localizamos las profundidades en las que el signo de la diferencia cambiaba de positivo a negativo y de negativo a positivo. Estas profundidades, junto con su correspondiente  $\Delta\text{O}_2$ , se utilizaron como coordenadas de una línea recta para la que se calculó la pendiente. Esta pendiente se utilizó para estimar la profundidad a la que la concentración de  $\text{O}_2$  disuelto era igual al umbral anterior. Finalmente, se calculó la profundidad media del límite superior de la zona del mínimo de oxígeno y su desviación estándar, así como el grosor de la capa del mínimo de oxígeno.

## Referencias

---

- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., & Magaña, V. O. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 101142. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>.
- Ambriz-Arreola, I., Gómez-Gutiérrez, J., del Carmen Franco-Gordo, M., Plascencia-Palomera, V., Gasca, R., Kozak, E. R., & Lavaniegos, B. E. (2018). Seasonal succession of tropical community structure, abundance, and biomass of five zooplankton taxa in the central Mexican Pacific. *Continental Shelf Research* 168, 5467.
- Aston, E. A., Williams, G. J., Green, J. A. M., Davies, A. J., Wedding, L. M., Gove, J. M., ... & Tudhope, A. W. (2019). Scale-dependent spatial patterns in benthic communities around a tropical island seascape. *Ecography*, 42, 578–59 <https://doi.org/10.1111/ecog.04097>.
- Bennett, E. B., & Schaefer, M. B. (1960). *Studies of physical, chemical, and biological oceanography in the vicinity of the Revillagigedo Islands during the "Island Current Survey" of 1957.*
- Blackburn, M., Laurs, R. M., Owen, R. W., & Zeitzschel, B. (1970). Seasonal and areal changes in standing stocks of phytoplankton, zooplankton and micronekton in the eastern tropical Pacific. *Marine Biology*, 7, 14–31. <https://doi.org/10.1007/BF00346804>.
- Brinton, E. (1979). Parameters relating to the distributions of planktonic organisms, especially euphausiids in the eastern tropical Pacific. *Progress in Oceanography*, 8(3), 125–189. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(79\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0079-6611(79)90001-6).
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., ... & Vecchi, G. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5, 849–859. <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>.
- Carey, S., Raineault, N., Michel, A., Wankel, S., Soeule, A., Siebe, C., Escobar-Briones, E. (2017). *Reporte de las Expediciones Nautilus NA89-NA092 Mapeo del Archipiélago de Revillagigedo, Exploración de la región norte de la cuenca de Guaymas, Exploración de la cuenca Pescadero, Exploración del Archipiélago de Revillagigedo del 8 de octubre al 21 de noviembre del 2017.*
- Carter, A. L., Wilson, A. M. W., Bello, M., Hoyos-Padilla, E. M., Inall, M. E., Ketchum, J. T., ... Tudhope, A. W. (2020). Assessing opportunities to support coral reef climate change refugia in MPAs: A case study at the Revillagigedo Archipelago. *Marine Policy*, 112, 103769. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103769>

- Chavez, F. P. (1989). Size distribution of phytoplankton in the central and eastern tropical Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*, 3(1), 27-35. <https://doi.org/10.1029/GB003i001p00027>
- Chavez, F. P., Buck, K. R., Service, S. K., Newton, J., & Barber, R. T. (1996). Phytoplankton variability in the central and eastern tropical Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 43(4-6), 835-870. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(96\)00028-8](https://doi.org/10.1016/0967-0645(96)00028-8)
- Claudino-Sales, V. (2019). *Archipiélago de Revillagigedo, Mexico. Coastal World Heritage Sites, Springer Netherlands*, 361–366
- Coates, A. G., Jackson, J. B., Collins, L. S., Cronin, T. M., Dowsett, H. J., Bybell, L. M., ... & Obando, J. A. (1992). Closure of the Isthmus of Panama: the near-shore marine record of Costa Rica and western Panama. *Geological Society of America Bulletin*, 104(7), 814–828. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<0814:COTIOP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<0814:COTIOP>2.3.CO;2)
- Collins, M., An, S.-I., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F.-F., ... & Wittenberg, A. (2010). The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, 3, 391–397. <https://doi.org/10.1038/NGEO868>.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2019). *Programa de Manejo Parque Nacional Revillagigedo*.
- Deser, C., Phillips, A. S., & Alexander, M. A. (2010). Twentieth century tropical sea surface temperature trends revisited. *Geophysical Research Letters*, 37, L10701. <https://doi.org/10.1029/2010GL043321>.
- de Souza, C. S., da Luz, J. A. G., Macedo, S., Montes, M. J. F. & Mafalda, P Jr. (2013). Chlorophyll a and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical south-western Atlantic. *Marine and Freshwater Research* 64.2 (2013), 168– 184. <https://doi.org/10.1071/MF12075>.
- Doty, M. S., & Oguri, M. (1956). The island mass effect. *ICES Journal of Marine Science*, 22(1), 33–37. <https://doi.org/10.1093/icesjms/22.1.33>.
- Estrada-González, M. C., Agüero, J., & Mendoza-Becerril, M. A. (2023). Medusozoans from the Mexican Pacific: a review based on historical literature and recent observations. *Journal of Natural History*, 57(13–16), 784–853. <https://doi.org/10.1080/00222933.2023.2214967>.
- Espinosa, H. (2004). *El Pacífico mexicano. Ciencias* 76, octubre-diciembre, 14-21
- Esquivel-Garrote, O., & Morales-Ramírez, Á. (2020a). Nocturnal variation of the zooplankton community in coral reef substrates at Isla del Coco National Park (Eastern Tropical Pacific). *Revista de Biología Tropical*, 68, 261–270. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68is1.41189>.
- Esquivel-Garrote, O., & Morales-Ramírez, Á. (2020b). Community structure of coral reef zoo-

- plankton in Isla del Coco National Park, a natural World Heritage site in the Eastern Tropical Pacific. *Revista de Biología Tropical*, 68, 248–260. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68is1.41188>.
- Färber-Lorda, J., & Färber-Data, B. (2023). Autumn vertical distribution of zooplankton in the oxygen minimum zone of the Eastern Tropical North Pacific. *Marine Environmental Research*, 190, 106116. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106116>.
- Favoretto, F., Sánchez, C., & Aburto-Oropeza, O. (2022). Warming and marine heatwaves tropicalize rocky reefs communities in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 206, 102838. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102838>.
- Fernández-Alamo, M. A., & Färber-Lorda, J. (2006). Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 318-359. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.003>
- Fiedler, P. C., & Talley, L. D. (2006). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69\*(2–4), 143-180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Fiedler, P. C., & Lavín, M. F. (2017). Oceanographic conditions of the eastern tropical Pacific. In P.W. Glynn, D.P. Manzello, I.C. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment* (pp. 59–83). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_3)
- Figueroa, D. F. (2010). *Zooplankton of the Galapagos Islands*. PhD thesis, Oregon State University.
- Figueroa, D. F. (2021). Environmental forcing on zooplankton distribution in the coastal waters of the Galápagos Islands: spatial and seasonal patterns in the copepod community structure. *Marine Ecology Progress Series*, 661, 49–69. <https://doi.org/10.3354/meps13617>.
- Gárate-Lizárraga I., & González-Armas, R. (2017). First record of the dinoflagellate *Prorocentrum panamense* (Prorocentrales, Dinophyceae) in the Mexican Pacific from the Archipiélago de Revillagigedo. *CICIMAR Océánides*, 32(1), 63–66. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v32i1.197>
- Gárate-Lizárraga, I., González-Armas, R., & Okolodkov, Y. B. (2018). Occurrence of *Ostreopsis lenticularis* (Dinophyceae: Gonyaulacales) from the Archipiélago de Revillagigedo, Mexican Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.020>
- García-Navarrete, P. G., Escalante, T., Espinosa, D., & Morrone, J. J. (2023). Evolutionary biogeography of the Revillagigedo Archipelago, Mexico. *Journal of Natural History*, 57(9-12), 685–709. <https://doi.org/10.1080/00222933.2023.2203337>.

- Gooday, A. J., Bett, B. J., Escobar, E., Ingole, B., Levin, L. A., Neira, C., ... & Sellanes, J. (2010). *Habitat heterogeneity and its influence on benthic biodiversity in oxygen minimum zones. Marine Ecology*, 31(1), 125–147. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2009.00348.x>.
- Gómez-Gutiérrez, J., Funes-Rodríguez, R., Arroyo-Ramírez, K., Sánchez-Ortiz, C. A., Beltrán-Castro, J. R., Hernández-Trujillo, S., ... & Ezcurra, E. (2014). *Oceanographic mechanisms that possibly explain dominance of neritic-tropical zooplankton species assemblages around the Islas Marías Archipelago, Mexico. Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(5), 1009–1034. <https://doi.org/10.3856/vol42-is-sue5-fulltext-7>.
- Gutiérrez-Bravo, J. G., Tenorio-Fernández, L., Jiménez-Rosenberg, S. P., & Sánchez-Velasco, L. (2022). *Three-dimensional distribution of larval fish habitats at the entrance of the Gulf of California in the tropical-subtropical convergence region off Mexico (April 2012). Journal of Plankton Research*, 44(1), 130–144. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbab085>.
- Hasegawa, D., Yamazaki, H., Lueck, R. G., & Seuront, L. (2004). *How islands stir and fertilize the upper ocean. Geophysical research letters*, 31(16).
- Hastings, P. A. (2000). *Biogeography of the tropical eastern Pacific: distribution and phylogeny of chaenopsid fishes. Zoological Journal of the Linnean Society*, 128(3), 319–335. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2000.tb00166.x>.
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C., ... & Wernberg, T. (2016). *A hierarchical approach to defining marine heatwaves. Progress in Oceanography*, 141, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Jimenez, G., Cole, J. E., Thompson, D. M., & Tudhope, A. W. (2018). *Northern Galapagos corals reveal twentieth-century warming in the eastern tropical Pacific. Geophysical Research Letters*, 45, 1981–1988. <https://doi.org/10.1002/2017GL075323>
- Jin, F. F., Boucharel, J., & Lin, I. I. (2014). *Eastern Pacific tropical cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat. Nature*, 516(7529), 82–85. Chicago.
- Kämpf, J. (2024). *On the Wind-Driven Formation of Plankton Patches in Island Wakes. Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 193.
- Karstensen, J., Stramma, L., & Visbeck, M. (2008). *Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. Progress in Oceanography*, 77, 331–350. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.05.009>
- Kessler, W. S. (2006). *The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. Progress in Oceanography*, 69, 181–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.009>

- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín, A. Chaigneau, (2012). Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 117, C10021, <https://doi.org/10.1029/2012JC007970>.
- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín, A. Chaigneau, V. M. Godínez, (2013). Anatomy and evolution of a cyclonic mesoscale eddy observed in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 5931–5950, <https://doi.org/10.1002/2013JC20437>.
- Lavin, M., & Marinone, S. (2003). An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- Lavín, M. F., Fiedler, P. C., Amador, J. A., I, L. T., Färber-Lorda, J., & Mestas-Nuñez, A. M. (2006). A review of eastern tropical Pacific oceanography: Summary. *Progress in Oceanography*, 69, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.005>
- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, & V. M. Godínez (2013). Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1367–1381, <https://doi.org/10.1002/jgrc.20132>.
- Marinone, S. G. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.003>.
- O’Dea, A., Lessios, H. A., Coates, A. G., Eytan, R. I., Restrepo-Moreno, S. A., Cione, A. L., ... & Jackson, J. B. (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Science*, 2(8), e1600883. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600883>.
- Oliver, E. C., Benthuisen, J. A., Darmaraki, S., Donat, M. G., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., ... & Sen Gupta, A. (2021). Marine heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 13, 313–342.
- Olvera, U., Hernández, O., Sánchez, C., & Gómez-Gutiérrez, J. (2018). Two new endemic species of Gorgoniidae (Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia) from Revillagigedo Archipelago, Mexico. *Zootaxa*, 4442(4), 523-538. <https://doi.org/10.11646/zoota-xa.4442.4.2>
- Paulmier, A., & Ruiz-Pino, D. (2009). Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80 (3–4), 113-128. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.08.001>
- Pennington, J. T., Mahoney, K. L., Kuwahara, V. S., Kolber, D. D., Calienes, R., & Chavez, F. P. (2006). Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 285–317. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012>.

- Polidoro, B. A., Brooks, T., Carpenter, K. E., Edgar, G. J., Henderson, S., Sanciangco, J., & Robertson, D. R. (2012). *Patterns of extinction risk and threat for marine vertebrates and habitat-forming species in the Tropical Eastern Pacific*. *Marine Ecology Progress Series*, 448, 93–104. <https://doi.org/10.3354/meps09545>.
- Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fielder, P.C., Sánchez-Velasco, L., & Trasviña, A. (2016). *Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas*. *Journal of Physical Oceanography*, 46(10), 3069–3081. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>.
- Price, J. F., Morzel, J., & Niiler, P. P. (2008). *Warming of SST in the cool wake of a moving hurricane*. *Journal of Geophysical Research*, 113, C07010. <https://doi.org/10.1029/2007JC00439>
- Prince, E.D., & C.P. Goodyear. (2006). *Hypoxia based habitat compression of tropical pelagic fishes*. *Fisheries Oceanography* 15(6), 451–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00393.x>
- Rafter, P.A., Sigman, D.M. & Mackey, K.R.M. (2017) *Recycled iron fuels new production in the eastern equatorial Pacific Ocean*. *Nature Communications* 8, 1100. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01219-7>
- Raineault, N. (2018). *New Frontiers in Ocean Exploration: The E/V Nautilus, NOAA Ship Okeanos Explorer, and R/V Falkor 2017 Field Season*. *Oceanography*, 31(1), 1–126. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.supplement.01>
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, I P., ... & Kaplan, A. (2003). *Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, D14, 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., & Wang, W. (2002). *An improved in situ and satellite SST analysis for climate*. *Journal of Climate*, 15, 1609–1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015)
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, (2007). *Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature*. *Journal of Climate*, 20, 5473–5496, [doi:10.1175/JCLI-D-14-00293.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00293.1).
- Robertson, D. R., & Cramer, K. L. (2009). *Shore fishes and biogeographic subdivisions of the Tropical Eastern Pacific*. *Marine Ecology Progress Series*, 380, 1–17. <https://doi.org/10.3354/meps07925>.

- Salas de León, D., Monreal-Gómez, M., Gracia, A., & Salas-Monreal, D. (2015). Two years of oceanographic and meteorological data from the UNAM buoy anchored at Socorro Island in the Mexican Pacific. *Open Journal of Marine Science*, 5, 182–192. <https://doi.org/10.4236/ojms.2015.52015>.
- Saltzman, J., & Wishner, K. F. (1997a). Zooplankton ecology in the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone above a seamount: 1. General trends. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(6), 907–930. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00007-1).
- Saltzman, J., & Wishner, K. F. (1997b). Zooplankton ecology in the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone above a seamount: 2. Vertical distribution of copepods. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 44(6), 931–954. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00006-X).
- Sanchez-Cabeza, J. A., Herrera-Becerril, C. A., Carballo, J. L., Yáñez, B., Álvarez-Sánchez, L. F., Cardoso-Mohedano, J. G., & Ruiz-Fernández, A. C. (2022). Rapid surface water warming and impact of the recent (2013–2016) temperature anomaly in shallow coastal waters at the eastern entrance of the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 202, 102746. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102746>.
- Schlegel, R. W., & Smit, A. J. (2018). *heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells*. *Journal of Open Source Software*, 3(27), 821.
- Serrano, D. (2012). La zona del mínimo de oxígeno en el Pacífico mexicano. Pp. 105–119 en *Biodiversidad y comunidades del talud continental del Pacífico mexicano*. P. Zamorano, M.E. Hendrickx, M. Caso (eds.). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Shea, D. J., Trenberth, K. E., & Reynolds, R. W. (1992). A global monthly sea surface temperature climatology. *Journal of Climate*, 5(9), 987–1001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0987:AGMSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0987:AGMSST>2.0.CO;2)
- Shih, C.T., (1979). East–West diversity. En: Van der Spoel, S., Pierrot-Bults, A. (Eds.), *Zoogeography and Diversity in Plankton*. Bunge, Utrecht, pp. 87–102.
- Stewart, J. D., Hoyos-Padilla, E. M., Kumli, K. R., & Rubin, R. D. (2016). Deep-water feeding and behavioral plasticity in *Manta birostris* revealed by archival tags and submersible observations. *Zoology*, 119(5), 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2016.05.010>.

- Stewart, J. D., Smith, T. T., Marshall, G., Abernathy, K., Fonseca-Ponce, I. A., Froman, N., & Stevens, G. M. (2019). *Novel applications of animal-borne Crittercams reveal thermocline feeding in two species of manta ray*. *Marine Ecology Progress Series*, 632, 145–158. <https://doi.org/10.3354/meps13148>.
- Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J., & Mohrholz, V. (2008). *Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans*. *Science*, 320(5876), 655–658. <https://doi.org/10.1126/science.1153847>.
- Stramma, Lothar & Schmidtko, Sunke & Levin, Lisa & Johnson, Gregory. (2010). *Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts*. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 587-595. 10.1016/j.dsr.2010.01.005
- Uda, M., & Ishino, M. (1958). *Enrichment pattern resulting from eddy systems in relation to fishing grounds*.
- UNESCO. (2016). *Archipiélago de Revillagigedo*. En *Lista del Patrimonio Mundial*. Recuperado de <https://whc.unesco.org/es/list/1510>
- Victor, B. C., & Wellington, G. M. (2000). *Endemism and the pelagic larval duration of reef fishes in the eastern Pacific Ocean*. *Marine Ecology Progress Series*, 205, 241–248. <https://doi.org/10.3354/meps205241>
- Villalobos, H., & González-Rodríguez, E. (2022). *satin: Visualisation and Analysis of Ocean Data Derived from Satellites*. R package version 1.1.0, <https://github.com/hvillalo/satin>
- Villaescusa, J. A., & Carriquiry, J. D. (2004). *Calibración de los paleotermómetros de Sr/Ca y Mg/Ca en el coral *Porites* sp. de Isla San Benedicto, Archipiélago Revillagigedo, México*. *Ciencias Marinas*, 30(4), 603–618.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J.-Y., DiNezio, P., & Clement, A. (2017). *El Niño and southern oscillation (ENSO): A review*. In P.W. Glynn, D.P. Manzello, I.C. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment* (pp. 85–106). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4)
- Wang, C., & Enfield, D. B. (2001). *The tropical Western Hemisphere warm pool*. *Geophysical research letters*, 28(8), 1635–1638. <https://doi.org/10.1029/2000GL011763>
- Wernberg, T. (2021). *Marine heatwave drives collapse of kelp forests in Western Australia*. En: *Ecosystem collapse and climate change* (pp. 325–343). Cham: Springer International Publishing.

- Wong, A. P. S., et al. (2020). *Argo data 1999–2019: Two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats*. *Frontiers in Marine Science*, 7, 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
- Wicksten, M. K., & Hendrickx, M. E. (2003). *An updated checklist of benthic marine and brackish water shrimps (Decapoda: Penaeoidea, Stenopodidea, Caridea) from the Eastern Tropical Pacific*. *Contributions to the study of East Pacific crustaceans*, 2, 49–76.
- Williams, G. J., Sandin, S. A., Zgliczynski, B. J., Fox, M. D., Gove, J. M., Rogers, J. S., ... & Hartmann, A. C. (2018). *Biophysical drivers of coral trophic depth zonation*. *Marine Biology*, 165, 60. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3314-2>
- Wishner, K. F., Outram, D. M., Seibel, B. A., Daly, K. L., & Williams, R. L. (2013). *Zooplankton in the eastern tropical north Pacific: Boundary effects of oxygen minimum zone expansion*. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 79, 122–140. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.05.012>.
- Wyrtki, K. (1964). *The thermal structure of the eastern Pacific Ocean*. *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Ergänzungsheft A* 6, 84.
- Wyrtki, K. (1965) *The annual and semiannual variation of sea surface temperature in the North Pacific Ocean*. *Limnology and Oceanography*, 10, 307.

