

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**“IMPACTO ESPACIO-TEMPORAL DE LAS ONDAS CÁLIDAS
MARINAS EN LA ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL
ZOOPLANCTON FRENTE A LA COSTA OCCIDENTAL DE BAJA
CALIFORNIA (2023-2024)”**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA:

BIOL. ITZEL MARIANA SALAS RODELA

Ensenada, Baja California, México.

08 de agosto de 2025

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

**IMPACTO ESPACIO-TEMPORAL DE LAS ONDAS CÁLIDAS
MARINAS EN LA ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL
ZOOPLANCTON FRENTE A LA COSTA OCCIDENTAL DE BAJA
CALIFORNIA (2023-2024)**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA:

ITZEL MARIANA SALAS RODELA

Aprobada por:



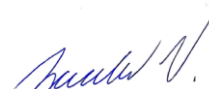
Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre
Directora de Tesis



Dra. Clara Maria Hereu
Co-Directora de Tesis



Dra. Ana Laura Flores Morales
Sinodal



Dr. Victor Antonio Zavala Hamz
Sinodal

1 Resumen

“Impacto Espacio-Temporal de las Ondas Cálidas Marinas en la Estructura y Composición del Zooplancton frente a la costa Occidental de Baja California (2023–2024)”

Las Ondas Cálidas Marinas (OCMs) son fenómenos de origen climático que alteran las condiciones térmicas superficiales del océano, afectando la productividad primaria y la estructura del ecosistema pelágico. En este estudio se analizó la respuesta espacio-temporal de la comunidad zooplanctónica frente a la costa occidental de Baja California, durante dos campañas oceanográficas realizadas en los veranos de 2023 y 2024. A bordo del B.I.O.P. *Jorge Carranza Fraser*, se recolectaron datos ambientales e hidrológicos, así como muestras de zooplancton mediante redes tipo Bongo. Las muestras fueron procesadas para estimar la abundancia, biomasa y composición taxonómica de los organismos. Además, se integraron datos satelitales e in-situ de temperatura superficial del mar y clorofila-a, como indicadores de la variabilidad física y productiva del sistema. Se identificaron más de 30 grupos taxonómicos, siendo los copépodos el grupo dominante en ambos años. En 2023, se registraron anomalías térmicas positivas superiores a 2.5 °C, asociadas a condiciones compatibles con una OCM, lo que coincidió con una menor diversidad y una alta dominancia de organismos tolerantes al calor como copépodos y apendicularias. En contraste, en 2024 se observaron temperaturas más frías y una estructura zooplanctónica más diversa, con mayor representación de grupos asociados a aguas frías y productivas como cladóceros y chaetognatos. La mayor abundancia y biomasa también se concentró en las zonas costeras, especialmente en regiones influenciadas por afloramiento. Los resultados sugieren una estrecha relación entre las condiciones térmicas superficiales, la productividad del sistema y la estructura de la comunidad zooplanctónica. Este estudio aporta evidencia de los efectos de eventos térmicos extremos en la biodiversidad planctónica y destaca la importancia de monitorear estas señales en regiones vulnerables como el sistema de la Corriente de California.

Palabras clave: Zooplancton, Ondas Cálidas Marinas, Corriente de California, Baja California

A los pilares de mi vida, mis padres.

Naty y Hugo

En memoria de los dos hombres que forjaron mi apellido

Juan Salas e Ines Rodela

Se cosecha lo que se siembra

y es un honor saber que soy el fruto de sus semillas

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California y a la Facultad de Ciencias Marinas.

A la secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes CONAHCYT.

A mi directora, la Dra. Mary Carmen Ruiz. Le agradezco profundamente por abrirme las puertas de su laboratorio aquel verano del 2021 y por creer en mi potencial incluso en los momentos en que yo misma dude de mis capacidades. Gracias por allanar el camino, por poner los medios para que tantas cosas grandiosas sucedieran y por acompañarme con generosidad en esta etapa tan importante de mi formación. La admiración que siento por usted nace de su inteligencia, porque es una gran investigadora, pero sobre todo de su calidez, que me hizo confiar y querer ser parte de esto desde el primer momento.

A la Dra. Clara Hereu, por resolver cada una de mis dudas, por compartir todos sus conocimientos conmigo e impulsarme a aprender más. Por enseñarme a ser crítica con mi propio trabajo y brindarme de su valioso tiempo para poner en orden mis ideas. Su participación dentro de mi comité fue invaluable. Gracias por estar al pendiente de mis pasos y alentarme a enfrentar retos mayores. Es un placer aprender de una investigadora con una gran experiencia como la suya.

A la Dra. Ana Laura y al Dr. Victor. Por aceptar formar parte de mi comité y ser mis sinodales. Por brindarme de su valioso tiempo, escuchar mis propuestas y guiarme a lo largo de este camino. Sus aportes y puntos de vista enriquecieron y fortalecieron enormemente este trabajo.

Gracias comité, por crear un gran equipo y permitirme aprender algo de cada uno. Trabajar con investigadores como ustedes hizo que todo esto fuera más fácil y llevadero. Su apoyo y paciencia fueron fundamentales.

Al Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS).

Al M.C. Victor Magaña, jefe de crucero durante mis dos campañas oceanográficas a bordo del gran Carranza. Por darnos espacio para preguntar, opinar y discutir. Por mostrarnos que el conocimiento se construye en colectivo, que cada mirada aporta y que el diálogo es la base

de cualquier descubrimiento. Su guía ha sido una de las columnas más firmes en la formación de esta bióloga que no sabía ni que era ODV cuando se subió por primera vez al barco.

A todos y cada uno de los miembros de la tripulación del B. I O/P Jorge Carranza Fraser durante las campañas JCFINP2306 y JCFINP2405, en especial a dos grandes mujeres la Dra. Carmen Jimenez, mi compañera de camarote aquel verano del 2023, por inspirarme, enseñarme y acompañarme y a la M.C. Selene Andrade Hernández por no dudar de mis capacidades y permitirme aprender de su gran experiencia. A Franklin, el mejor compañero de turno. Gracias por hacerme reír tanto en las jornadas tan largas y formar una bonita amistad.

A mi familia, en especial a mis padres y mi hermanita, Maritza. A mis tíos, Alvaro y Martin y a mi abuelita Concha. Su compañía a lo largo de cada pasito en mi vida me ha hecho avanzar por todos los caminos que he andado y su cariño, paciencia y apoyo me han levantado en cada tropiezo. Gracias por dejar a este pollo preguntar, soñar y volar.

A mis amigas, Yoseth y Selina. Por soñar junto conmigo todos estos años, por escucharme siempre que tengo algo que decir, por reírse en los momentos graciosos, secar mis lágrimas en los momentos tristes y apapacharme cuando he sentido que todo se me sale de las manos. Son impulso, contención y también inspiración en mi vida.

A Victor, mi compañero en esta gran aventura. Por compartir no solo la ciencia, sino también vida. Por ser mi compañía desde el primer instante que puse un pie en este laboratorio y en esta ciudad. Por acogerme desde el momento cero con ese calor humano que tanto se agradece cuando todo es nuevo y desconocido. Por renegar conmigo, cantar conmigo, viajar conmigo y crecer conmigo.

A mis compañeras de laboratorio Selene, Linda, Brianna y Judith, mujeres maravillosas a quienes admiro profundamente. Convivir con ustedes hizo de esta etapa una experiencia mucho más alegre y llevadera. Me guiaron en lo que desconocía, me apoyaron cuando más lo necesité, y aligeraron muchas de mis cargas con su generosidad y su presencia. Gracias por su calidez, por compartir el camino y por no dejarme sentir sola.

A Angelica, Ale y la Dra. Ale Castillo, por aligerar los días de trabajo y hacer del cubo un lugar tan agradable y seguro.

A Abril, no solo por apoyarme en la estimación de biomasa, si no por confiar en mí y permitirme compartir mi amor y conocimiento por el zooplancton contigo. Tu apoyo fue invaluable y contribuir a tu formación y experiencia durante tus últimos semestres de la licenciatura fue una experiencia muy gratificante.

A mi novio, Edwin, por caminar de mi mano, ayudándome a alcanzar mis sueños sin percatarse de que todas esas pequeñas acciones hacían siempre la diferencia. Gracias por estar ahí, haciéndome las cosas un poco más fáciles desde tu trinchera, involucrándote y apoyándome siempre. Agradezco también a tu familia, por abrirme las puertas de su hogar y acogerme como una de los suyos.

Al Dr. Alf Meling, a la Dra. Perlita Urquidez y al M.C. Erick Ponce. “somos Búhos, volamos alto”. Sin su apoyo en la licenciatura y mi titulación apresurada, esta bióloga no estaría haciendo su posgrado en Oceanografía costera. Agilizaron todo para que esto sucediera.

A todas y cada una de las personas que directa o indirectamente han formado parte de esta historia, en especial en estos últimos dos años, turbulentos pero muy gratificantes.

“El conocimiento es poder, y escribir es apropiarse de ese poder con las manos desnudas”

Bell Hooks

La escritura es la forma en que las mujeres científicas trascienden el olvido. Es un acto de memoria, de resistencia y de presencia. Porque pensar no basta si no se deja por escrito. Porque publicar es tomar la palabra, y eso, para nosotras, ha sido siempre un acto de valentía.

Índice

1	Resumen.....	3
	Dedicatoria.....	4
	Agradecimientos.....	5
	Lista de figuras.....	10
	Lista de tablas.....	12
2	Introducción	15
3	Objetivos	20
3.1	Objetivo general:	20
3.2	Objetivos específicos.....	20
4	Materiales y Metodología.....	21
4.1	Muestreo	21
4.2	Registro de parámetros hidrográficos.....	22
4.3	Colecta de muestras zooplanctónicas	23
4.4	Preservación y fijación de muestras	23
4.5	Identificación de muestras en laboratorio.....	23
4.6	Cálculo de Abundancia zooplanctónica	24
4.7	Estimación de biomasa zooplanctónica por el método volumétrico	25
4.7.1	Ensayo metodológico comparativo entre redes de 333 μm y 505 μm	26
4.8	Análisis de temperatura superficial del mar a partir de datos satelitales.....	26
4.9	Cálculo de anomalías térmicas	27
4.10	Procesamiento de datos in situ para mapas de temperatura y clorofila-a superficial 27	
4.11	Interpolación espacial de temperatura superficial	28
4.12	Análisis de correlación entre variables ambientales y biológicas	28
4.13	Análisis estadístico de la estructura comunitaria del zooplancton	29
4.13.1	Análisis de ordenación (NMDS)	29
4.13.2	Prueba de significancia entre grupos (ANOSIM).....	29
4.13.3	Comparación de abundancia zooplanctónica entre zonas y campañas.....	30
4.13.4	Análisis de varianza multivariado (PERMANOVA).....	30
4.13.5	Análisis de diversidad taxonómica.....	30
4.13.6	Análisis de contribución taxonómica (SIMPER)	30

5	Resultados	31
5.1	Distribución espacial de la abundancia de zooplancton	31
5.2	Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica	32
5.2.1	Comparación de biomasa zooplanctónica entre redes de 300 μm y 500 μm	33
5.3	Composición relativa de la comunidad zooplanctónica	35
5.4	Evolución mensual de la temperatura superficial del mar.....	37
5.5	Anomalías térmicas mensuales.....	39
5.6	Temperatura superficial en el área de estudio durante los cruceros	41
5.7	Distribución superficial de clorofila-a.....	42
5.8	Correlaciones entre variables ambientales y biológicas	44
5.9	Análisis estadístico de la estructura comunitaria del zooplancton	46
5.9.1	Análisis de ordenación (NMDS)	47
5.9.2	Prueba de significancia entre grupos (ANOSIM).....	48
5.9.3	Análisis de varianza multivariado (PERMANOVA).....	49
5.9.4	Diversidad taxonómica	49
5.9.5	Contribución de grupos taxonómicos (SIMPER).....	50
6	Discusión.....	52
6.1	Variación espacio-temporal de la temperatura superficial del mar.....	52
6.1.1	Panorama regional del Pacífico frente a la península de Baja California	52
6.1.2	Temperatura superficial en el área de estudio frente al estado de Baja California.....	52
6.2	Variación espacio-temporal en la abundancia y biomasa zooplanctónica	55
6.3	Composición de la comunidad zooplanctónica	57
6.4	Posibles efectos de señales térmicas extremas sobre la comunidad zooplanctónica	58
6.5	Relación entre variables ambientales y respuesta zooplanctónica	61
7	Conclusiones	62
8	Bibliografía:	64

Lista de Figuras

Figura 1. Distribución espacial de las estaciones oceanográficas muestreadas durante los cruceros JCFINP2306 y JCFINP2405	22
Figura 2. Distribución espacial de la abundancia zooplanctónica (ind/m ³) durante julio del 2023 y junio del 2024.	32
Figura 3. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica (ml/1000 m ³) estimada con la red de 300 µm durante julio del 2023 y junio del 2024.	33
Figura 4. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica (ml/1000 m ³) estimada mediante el método volumétrico a partir de muestras recolectadas con redes de 300 µm y 500 µm en 22 estaciones del crucero JCFINP2306.	34
Figura 5. Histograma de la diferencia relativa (%) entre la biomasa estimada con la red de 300 µm y la red de 500 µm en 22 estaciones del crucero JCFINP2306.	35
Figura 6. Composición relativa de los principales grupos taxonómicos del zooplancton en porcentaje, comparando zonas costera y oceánica durante los cruceros de verano de 2023 y 2024.	36
Figura 7. Mapas de temperatura superficial del mar (°C) antes, durante y después de los meses de muestreo en los veranos de 2023 y 2024 en la región frente a Baja California.	38
Figura 8. Anomalías de temperatura superficial del mar (°C) antes, durante y después del periodo de muestreo en los veranos de 2023 y 2024 frente a Baja California.	40
Figura 9. Distribución superficial de temperatura (°C) frente a la costa occidental de Baja California durante los veranos de 2023 y 2024.	42
Figura 10. Distribución superficial de clorofila-a (mg m ⁻³) frente a la costa occidental de Baja California durante los veranos de 2023 (izquierda) y 2024 (derecha).	43
Figura 11. Correlaciones entre temperatura, clorofila-a, abundancia y biomasa de zooplancton superficial para el crucero JCFINP2306. Se indican los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R) y su significancia (p).	45
Figura 12. Correlaciones entre temperatura, clorofila-a, abundancia y biomasa de zooplancton superficial para el crucero JCFINP2405. Se indican los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R) y su significancia (p).	46

Figura 13. Distribución de la abundancia zooplanctónica (ind/m ³) según zona (costera y oceánica) y crucero (JCFINP2306 y JCFINP2405). Se muestran las medianas, rangos intercuartílicos y valores atípicos para cada combinación	47
Figura 14. Análisis NMDS de la composición zooplanctónica. Colores indican zona (costera/oceánica); símbolos indican crucero.....	48
Figura 15. Comparación de la diversidad (índice de Shannon) entre zonas y cruceros. Las líneas horizontales indican la mediana.	50

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados del análisis ANOSIM para zona y crucero.	49
Tabla 2. Resultados del análisis PERMANOVA con matriz de Bray-Curtis.....	49
Tabla 3. Resultados del análisis SIMPER entre zonas costera y oceánica. Se muestran los taxones con mayor contribución promedio a la disimilitud total, desviación estándar (SD), razón promedio/SD, abundancia promedio en cada grupo (ava = zona oceánica, avb = zona costera), contribución acumulada (cumsum) y nivel de significancia (p-valor)	51

2 Introducción

El sistema de la Corriente de California (SCC) es uno de los ecosistemas marinos más productivos del planeta. Este sistema de borde oriental se extiende desde la costa de Columbia Británica, en Canadá, hasta el sur de Baja California Sur, en México, abarcando una región caracterizada por una alta productividad biológica, intensas surgencias costeras y una gran biodiversidad marina (Schwing, 2023, Thompson et al., 2024). La franja costera occidental de la península de Baja California forma parte del dominio sur del SCC, donde la combinación de vientos estacionales, la batimetría y las condiciones atmosféricas locales dan lugar a un sistema de afloramiento altamente dinámico (Lynn & Simpson, 1987). Estos procesos de surgencia transportan agua subsuperficial fría, rica en nutrientes, hacia la superficie, favoreciendo una elevada producción primaria, la cual sostiene una diversa comunidad planctónica y nectónica (Thompson et al., 2024).

El zooplancton, un componente esencial del ecosistema pelágico, está compuesto por pequeños animales y protistas que flotan pasivamente en la columna de agua y son transportados por las corrientes oceánicas. Estos organismos se clasifican tanto por su tamaño como por su ciclo de vida. Según Sieburth et al., (1978), el microzooplancton abarca organismos entre 0.02 y 0.2 mm como ciliados y nauplios; el mesozooplancton, de 0.2 a 20 mm, incluye copépodos, cladóceros y apendicularios; mientras que el macrozooplancton, con organismos mayores a 20 mm, comprende larvas de peces, decápodos y eufausiáceos, entre otros. Según su ciclo de vida, el plancton se clasifica en holoplancton, conformado por organismos que permanecen en estado planctónico durante toda su existencia, como los copépodos y ostrácodos, y meroplancton, integrado por organismos que solo presentan una fase planctónica, como las larvas de peces, moluscos y equinodermos (Raymont, 1983; Longhurst, 1985).

El estudio del zooplancton es fundamental para la comprensión del funcionamiento de los ecosistemas marinos. Estos organismos desempeñan roles ecológicos clave: son consumidores primarios que regulan la biomasa fitoplanctónica, constituyen una fuente de alimento crucial para peces pelágicos, mamíferos y aves marinas, y participan en la exportación vertical de carbono a través de la "bomba biológica". Además, su composición incluye todas las etapas larvarias de numerosos organismos bentónicos y nectónicos de

importancia comercial, lo que vincula directamente la dinámica planctónica con la productividad pesquera (Herrera, 2014).

Un cambio en la cantidad de biomasa del zooplancton podría desencadenar una serie de efectos que impacten también a las poblaciones de peces, influyendo directamente en las pesquerías comerciales, dado que una alta abundancia de presas disponibles durante el periodo de reproducción de los peces, como el zooplancton, incrementa el reclutamiento de estos. (Lomartire et al., 2021).

Diversos factores abióticos y bióticos influyen en la distribución, abundancia y estructura del zooplancton. Entre ellos, la temperatura superficial del mar (TSM) se ha identificado como una variable crítica que afecta la fisiología, la reproducción y la distribución espacial de los organismos planctónicos (Drinkwater, 2005). Cambios en esta variable pueden provocar desfases entre los picos de producción primaria y secundaria, alterando las redes tróficas marinas (Edwards & Richardson, 2004; Dickey & Bidigare, 2005).

Uno de los objetivos centrales de la oceanografía es comprender cómo responden los ecosistemas marinos a forzamientos físicos, como las olas de calor o las corrientes oceánicas, dado que esta información resulta esencial para evaluar los efectos potenciales del cambio climático sobre el océano (Dvoretzky & Dvoretzky, 2025). Entre estos forzamientos, las anomalías térmicas en ambientes oceánicos y costeros implican variaciones notables en la temperatura de la columna de agua que alteran tanto la biodiversidad como la estructura del ecosistema. Dichas variaciones, de carácter transitorio o persistente, pueden modificar la circulación superficial y las condiciones de surgencia, influyendo de manera directa en la distribución y abundancia de organismos planctónicos y marinos (Thompson et al., 2024). En el caso de El Niño, por ejemplo, se ha documentado un incremento en la presencia de especies tropicales y desplazamientos en los rangos de distribución de diversas especies, evidenciando el efecto de estas anomalías sobre la organización comunitaria. El seguimiento conjunto de las anomalías térmicas y de la composición de la comunidad zooplanctónica constituye una herramienta clave para anticipar y detectar cambios en los ecosistemas costeros asociados al cambio climático, favoreciendo la implementación de medidas de manejo y conservación (Lavaniegos, 2014).

En las últimas décadas, se ha registrado un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de los eventos extremos de temperatura en el mar, conocidos como Ondas Cálidas Marinas (OCMs) (Oliver, 2021). Las OCMs se definen como eventos en los que la TSM supera el percentil 90 del registro histórico durante al menos cinco días consecutivos (Hobday et al., 2018). Estos eventos son causados por una combinación de procesos atmosféricos y oceánicos locales, influenciados por patrones climáticos globales mediante teleconexiones (Holbrook et al., 2019).

Las OCMs tienen efectos documentados sobre los ecosistemas marinos, reducen la intensidad de las surgencias costeras, disminuyen la disponibilidad de nutrientes, provocan cambios en la productividad primaria y alteran la composición funcional del zooplancton (Lavaniegos, 2014; Jacox et al., 2016; Thompspon et al., 2024). Por ejemplo, Sarmiento-Lezcano et al. (2024) describen cómo estos eventos pueden desplazar la dominancia de formas gelatinosas hacia crustáceos como copépodos y eufausiáceos, modificando la estructura trófica y afectando la disponibilidad de presas para especies de importancia comercial.

En el SCC, las OCMs han ocurrido con mayor frecuencia desde 2011, incluyendo eventos notables como *The Blob* (2013–2015) y el evento de El Niño 2015–2016, que provocaron anomalías de temperatura superiores a 2 °C en la región costera (Jacox et al., 2019; Smith et al., 2023). Desde 2019, se han registrado OCMs de manera recurrente durante los meses de verano y otoño, algunas de las cuales han alcanzado la franja costera, alterando significativamente las condiciones oceanográficas locales (Thompson et al., 2019; Harvey et al., 2023).

En particular, estas condiciones anómalas han intensificado la estratificación térmica y reducido la profundidad de la capa de mezcla en el noreste del Pacífico, lo que ha contribuido a un calentamiento superficial más persistente y a una menor renovación de nutrientes (Amaya et al., 2021; Feddern et al., 2025). En el SCC, este fenómeno ha estado asociado con la disminución de especies zooplanctónicas clave como *Euphausia pacifica*, el aumento de especies de afinidad cálida y una mayor proporción de formas gelatinosas, lo que ha modificado la estructura trófica y afectado la disponibilidad alimentaria para peces pelágicos (Peterson et al., 2017; Lavaniegos, 2014; La Rosa-Izquierdo et al., 2022). Además, se han documentado alteraciones en la microbiota pelágica (Brown et al., 2023) y en la composición

funcional del plancton, con posibles repercusiones en los flujos de carbono y eficiencia trófica del ecosistema (Meunier et al., 2025; La Rosa-Izquierdo et al., 2022).

Las respuestas biológicas ante las OCMs han sido ampliamente documentadas, particularmente en niveles tróficos inferiores. En el Sistema de la Corriente de California (SCC), se han reportado disminuciones en la abundancia de especies zooplanctónicas de afinidad fría, como *Euphausia pacifica* y ciertos copépodos “norteños”, así como aumentos de especies de afinidad cálida y formas gelatinosas, lo que refleja un cambio en la estructura funcional del zooplancton (Lavaniegos, 2014; Peterson et al., 2017; La Rosa-Izquierdo et al., 2022). Estas alteraciones no solo modifican la calidad del alimento disponible para peces pelágicos, sino también la eficiencia de transferencia de energía en la red trófica (La Rosa-Izquierdo et al., 2022; Meunier et al., 2025). A nivel microbiano, también se ha observado una reorganización significativa del microbioma pelágico durante eventos térmicos extremos, lo que podría tener implicaciones importantes en los ciclos biogeoquímicos (Brown et al., 2023). Aunque las características e impactos de las OCMs varían entre regiones, se ha reconocido que su influencia es particularmente aguda en ecosistemas de surgencia como el SCC, Humboldt y Benguela, donde la productividad alta y las comunidades adaptadas a condiciones frías las hacen especialmente vulnerables a estos pulsos térmicos (Zhan et al., 2024; Feddern et al., 2025).

Además, el zooplancton cumple una función central como puente entre la producción primaria y los niveles tróficos superiores, especialmente durante las etapas larvarias de los peces pelágicos, cuya supervivencia depende de la cantidad, calidad y sincronía de presas zooplanctónicas disponibles (Sherman et al., 2002). Alteraciones en la biomasa, composición o valor nutricional del zooplancton, como las inducidas por OCMs, pueden desencadenar desajustes tróficos, disminuir la eficiencia alimentaria y afectar el reclutamiento de especies de interés pesquero, incluso sin alterar directamente a los adultos (Lomartire et al., 2021). Estos efectos tienen consecuencias ecológicas y económicas, particularmente en sistemas altamente productivos como el SCC, donde pequeñas variaciones en la base de la red alimentaria pueden amplificarse a lo largo de la cadena trófica

Este estudio se desarrolla en el contexto actual de cambio climático y aumento de la variabilidad térmica., con el objetivo de analizar la estructura del zooplancton de la región

del Pacífico norte frente a la costa occidental de Baja California para evaluar el impacto de las OCMs en su distribución espacio-temporal durante los veranos del periodo 2022–2024. La presente investigación se basa en los datos recolectados durante las campañas oceanográficas JCFINP2306 y JCFINP2405, las cuales incluyen mediciones in situ de variables hidrográficas y colectas de zooplancton mediante redes Bongo.

Este estudio contribuirá a elucidar el impacto de los eventos térmicos extremos sobre las comunidades zooplanctónicas en un sistema de surgencia de borde oriental. Los resultados permitirán entender los cambios en la estructura pelágica regional y aportar posibles medidas de manejo y conservación ante el cambio climático.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la estructura del zooplancton de la región del Pacífico norte frente a la costa occidental de Baja California para evaluar el impacto de las Ondas Cálidas Marinas en su distribución espacio-temporal durante los veranos del período 2022-2024.

3.2 Objetivos específicos

3.2.1 Analizar la variación espacio-temporal de la temperatura en la región del Pacífico norte frente a la costa Occidental de Baja California para identificar eventos de Ondas Cálidas Marinas durante el periodo 2022-2024.

3.2.2 Caracterizar la comunidad del zooplancton presente en la región del Pacífico norte frente a la costa Occidental de Baja California para identificar espacio-temporalmente los grupos dominantes y especies clave.

3.2.3 Relacionar la presencia de eventos de las Ondas Cálidas Marinas con los patrones de distribución espacio-temporal de los grupos dominantes del zooplancton en la región del Pacífico norte frente a la costa Occidental de Baja California para evaluar las respuestas biológicas y las implicaciones en niveles tróficos superiores.

4 Materiales y Metodología

4.1 Muestreo

Como parte del proyecto “Campaña Océano Pacífico 2023 y 2024: Investigaciones en la Corriente de California”, perteneciente al programa “Evaluación de recursos pesqueros en el noroeste mexicano: Golfo de California y costa occidental de la península de Baja California”, se llevaron a cabo dos campañas oceanográficas de prospección pesquero-oceanográfica a bordo del Buque de Investigación Dr. Jorge Carranza Fraser (JCF), operado por el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS).

Durante ambas campañas, el JCF efectuó un muestreo en la región oceánica comprendida desde las 10 millas náuticas de la línea de costa hacia mar abierto. El diseño del muestreo consistió en una estrategia sistemática, con las estaciones de colecta dispuestas a lo largo de transectos perpendiculares a la costa separados entre sí cada 10 millas náuticas, cubriendo desde aguas someras hasta zonas de mar profundo.

En la campaña de verano de 2023 (crucero JCFINP2306), se realizaron ocho transectos y un total de 26 estaciones oceanográficas. El muestreo se llevó a cabo del 3 al 16 de julio, iniciando en la latitud 28.4892°N, longitud -115.0527°W, y finalizando en 32.2215°N, -117.6354°W.

Para el verano de 2024 (crucero JCFINP2405), también se recorrieron ocho transectos y se visitaron 24 estaciones, siguiendo el mismo diseño operativo. El muestreo inició el 3 de junio en la latitud 28.0922°N, longitud -115.8092°W, y concluyó el 14 de junio en 32.2240°N, -117.6440°W.

El objetivo operativo general de ambas campañas fue realizar la prospección de recursos pesqueros en el noroeste mexicano para estimar su biomasa presente en áreas estratégicas, en conjunto con la caracterización ambiental y biológica de la zona de influencia de la Corriente de California.

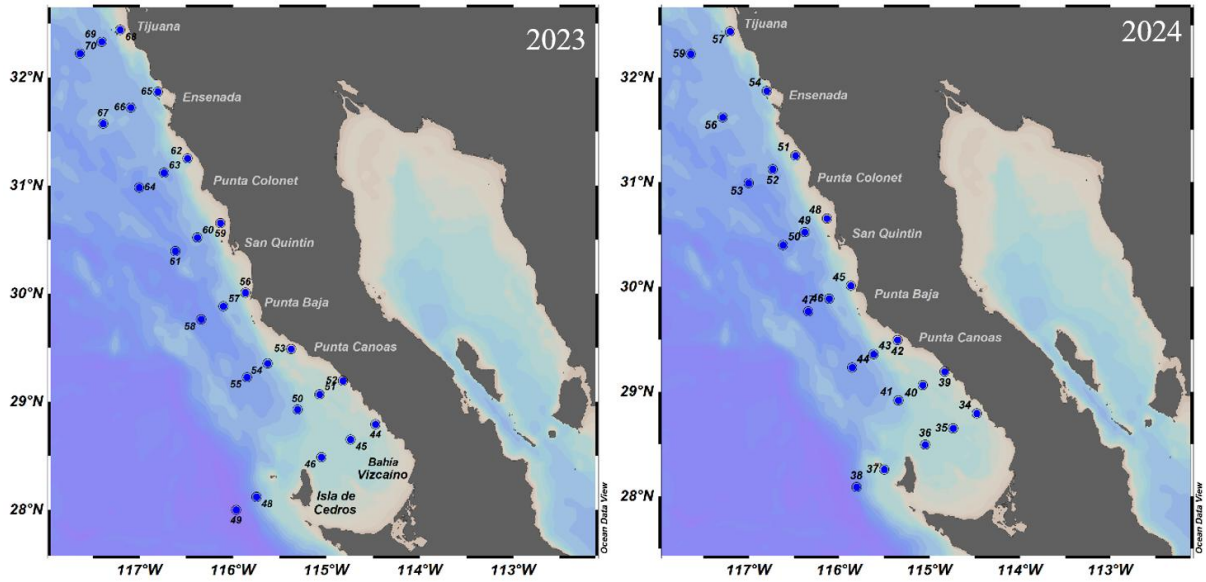


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones oceanográficas muestreadas durante los cruceros JCFINP2306 (Izquierda) y JCFINP2405 (derecha)

4.2 Registro de parámetros hidrográficos

Para la caracterización físico-química de la columna de agua se utilizó un perfilador CTD (Conductivity, Temperature and Depth) modelo Idronaut 320 Plus, equipado con sensores integrados y periféricos para la medición de oxígeno disuelto (OD), clorofila-a (Chla, mediante fluorescencia) y potencial de hidrógeno (pH). La profundidad máxima de cada estación oceanográfica fue determinada con base en los ecogramas obtenidos mediante un ecosonda científica EK60, estableciendo un margen de seguridad de 10 metros por encima del fondo, cuando éste era menor a 500 metros.

En cada estación de muestreo, se registraron continuamente los parámetros hidrográficos y meteorológicos superficiales, incluyendo la posición geográfica, hora, fecha y profundidad del lance. Adicionalmente, se empleó un termosalinómetro y una estación meteorológica para registrar temperatura y conductividad del mar en tiempo real. Por normativa de seguridad a bordo, los muestreos se realizaron únicamente cuando la velocidad del viento era inferior a 25 nudos.

4.3 Colecta de muestras zooplanctónicas

Las colectas de zooplancton se llevaron a cabo mediante lances oblicuos con una red tipo Bongo, compuesta por dos aros de aluminio de 70 cm de diámetro, unidos entre sí, cada uno con una red cónica de 4 metros de longitud. Se utilizaron redes con luz de malla de 333 μm y 505 μm , ambas equipadas con contadores de flujo modelo 2030R (General Oceanics, Inc.). Los lances se realizaron manteniendo un ángulo de 45° respecto a la superficie, alcanzando profundidades de hasta 200 metros o, en su caso, hasta 10 metros por encima del fondo cuando la batimetría local así lo requería.

4.4 Preservación y fijación de muestras

Las muestras recolectadas con la red de 505 μm fueron conservadas en etanol al 96 %, mientras que las muestras correspondientes a la red de 333 μm fueron fijadas en formaldehído al 4 % amortiguado con borato de sodio. Todas las muestras fueron almacenadas en frascos plásticos debidamente etiquetados con la clave del crucero, número de estación y fecha de muestreo. Las muestras fijadas en formol fueron destinadas al análisis de biomasa e identificación taxonómica, mientras que las conservadas en etanol se utilizaron para la estimación de biomasa a bordo y luego se reservaron para análisis genéticos (ADN).

Para los fines de esta investigación, únicamente se trabajó con las muestras obtenidas con la red de 333 μm . Estas fueron fraccionadas a la mitad utilizando un fraccionador tipo Folsom para su posterior análisis en laboratorio.

En el caso del macrozooplancton, como langostillas, pirosoomas, eufausídeos entre otros, los organismos de gran tamaño fueron extraídos previamente de la muestra y contabilizados individualmente, registrando el número total observado por muestra. Sin embargo, cuando la abundancia de estos organismos fue muy alta, se recurrió al fraccionamiento con un divisor Folsom y se realizó el conteo sobre una fracción representativa, aplicando posteriormente los cálculos de abundancia correspondientes.

4.5 Identificación de muestras en laboratorio

Las fracciones de 1/2 fueron utilizadas para el análisis cualitativo y cuantitativo de los principales grupos taxonómicos del zooplancton. Se obtuvieron alícuotas con una pipeta

Stempel de 2 ml hasta alcanzar un conteo aproximado de 1000 organismos por muestra. La identificación taxonómica se realizó bajo un microscopio estereoscópico Carl Zeiss Stemi 305 con aumento de 25×, utilizando como referencia la guía *A Guide to Marine Coastal Plankton and Marine Invertebrate Larvae* (Smith, 1977).

4.6 Cálculo de Abundancia zooplanctónica

La abundancia del zooplancton fue estimada como el número de individuos por metro cúbico de agua filtrada (ind/m³), a partir de las muestras obtenidas con la red de 333 µm. Para ello, fue necesario calcular primero el volumen de agua que atravesó la red durante cada lance, utilizando los registros del contador de flujo modelo 2030R (General Oceanics, Inc.).

El volumen filtrado (V_f , en m³) se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$V_f = \pi \cdot r^2 \cdot d$$

En donde:

- r es el radio de la boca de la red (en metros)
- d es la distancia recorrida por la red (en metros)
- $\pi = 3.14159$

La distancia d fue estimada con la fórmula:

$$d = \frac{(C_f - C_i) \cdot K}{999999}$$

En donde:

- C_f y C_i son los conteos final e inicial registrados por el rotor del flujómetro
- K es la constante del rotor específica del instrumento
- 999,999 es un factor de conversión definido por el fabricante.

Posteriormente, la abundancia zooplanctónica (en ind/m³) fue calculada con la siguiente fórmula:

$$Abundancia (ind/m^3) = \frac{N * V_k / V_c}{V_f}$$

En donde:

- N es el número de individuos contados bajo el microscopio
- V_k es el volumen total conocido de la muestra
- V_c es el volumen de muestra efectivamente contado
- V_f es el volumen de agua filtrada por la red.

Este procedimiento permitió estandarizar las abundancias por unidad de volumen, a fin de poder realizar comparaciones espaciales y temporales entre estaciones, cruceros y zonas.

Dado que todas las muestras fueron previamente fraccionadas a ½ de su volumen original, los valores de abundancia obtenidos mediante la fórmula fueron multiplicados por un factor de corrección de 2, con el fin de representar la abundancia correspondiente al volumen total de cada muestra.

4.7 Estimación de biomasa zooplanctónica por el método volumétrico

La biomasa zooplanctónica fue estimada mediante el método de volumen desplazado de las muestras obtenidas con la red de 333 μm . Para ello, se utilizó el método volumétrico descrito en Smith & Richardson (1977), en el cual se determina el volumen total de zooplancton en una probeta después de su y separación del líquido conservante. Para ello, las muestras fueron colocadas en una probeta de 1 litro y aforadas a la marca superior y posteriormente el contenido de la probeta se trasvasó a otra probeta de iguales dimensiones, en la que se ha colocado un tamiz con una malla de 130 μm para retener los organismos. La biomasa de zooplancton se obtuvo por la diferencia de volumen entre las dos probetas, y fue expresada en mililitros por cada 1000 m^3 de agua filtrada, utilizando el volumen de agua estimado con el contador de flujo modelo 2030R (General Oceanics, Inc.)

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$Biomasa (mL/1000 m^3) = \left(\frac{V_z}{V_f} \right) \times 1000$$

En donde:

- V_z = Volumen del zooplancton (mL),
- V_f = Volumen de agua filtrada (m^3),
- 1000 = Factor de conversión para expresar la biomasa por cada 1000 m^3 de agua filtrada.

4.7.1 Ensayo metodológico comparativo entre redes de 333 μm y 505 μm

Como parte del proceso de validación metodológica, se realizó una comparación exploratoria de la biomasa zooplanctónica recolectada por las redes de 333 μm y 505 μm de luz de malla de las estaciones del crucero JCFINP2306. Esta comparación tuvo como finalidad evaluar diferencias en la estimación de biomasa asociadas al tamaño de malla y así valorar su influencia sobre los resultados cuantitativos. Ambas muestras fueron obtenidas en una misma estación, en forma paralela, utilizando el mismo equipo de arrastre y bajo condiciones oceanográficas similares, con el fin de minimizar el efecto de otras variables ambientales sobre la biomasa recolectada. Los datos fueron analizados gráficamente y mediante cálculos de diferencias relativas.

La fórmula utilizada para estimar la diferencia relativa de biomasa entre ambas redes fue:

$$Diferencia\ relativa\ (\%) = \left(\frac{B_{333} - B_{505}}{B_{505}} \right) \times 100$$

En donde:

- B_{333} = Biomasa estimada con la red de 333 μm (mL/1000 m^3),
- B_{505} = Biomasa estimada con la red de 505 μm (mL/1000 m^3),
- El resultado se expresa como porcentaje relativo respecto a la red de 505 μm .

4.8 Análisis de temperatura superficial del mar a partir de datos satelitales

Para complementar el análisis de las variables obtenidas por los cruceros, también se utilizaron datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM). Esta base de datos es el resultado de la fusión de múltiples sensores a una resolución espacial de 1 km, correspondiente a la costa occidental de América del Norte, entre las latitudes 16° y 44° N y las longitudes 140° y 100° O. Dicho producto proviene de la base de Mati Kahru (<https://spg-satdata.ucsd.edu/>).

Para este estudio, se extrajo la información correspondiente al área de interés, definida entre las latitudes 23° y 34° N y las longitudes 122° y 110° O, coincidiendo con la región del Pacífico Nororiental frente a la península de Baja California (PNBC). Así, el siguiente paso fue construir una climatología, la cual se generó a partir de datos mensuales comprendidos entre enero de 2002 y agosto de 2024.

Los datos fueron procesados en pyferret (NOAA), se calcularon promedios mensuales por píxel, generando así una media climatológica multianual que sirvió como referencia para estimar las anomalías térmicas observadas durante los meses de muestreo.

4.9 Cálculo de anomalías térmicas

Las anomalías térmicas se calcularon con los datos de satélite, restando a la TSM mensual su correspondiente mes climatológico, para todo el periodo (enero 2002 -agosto 2024), el cual incluye TSM los años de muestreo (2023 y 2024) Este procedimiento permitió identificar desviaciones positivas o negativas respecto al promedio histórico, facilitando la caracterización de eventos cálidos o fríos anómalos en el área de estudio.

4.10 Procesamiento de datos in situ para mapas de temperatura y clorofila-a superficial

Para analizar la distribución superficial de temperatura y clorofila-a correspondientes a los cruceros JCFINP2306 (junio de 2023) y JCFINP2405 (junio de 2024), se utilizaron los registros obtenidos a partir de los perfiles hidrográficos realizados con el CTD Idronaut 320 Plus. En cada estación oceanográfica, se extrajeron los valores de temperatura y clorofila-a correspondientes a los primeros 10 metros de profundidad del perfil, con el fin de obtener un promedio representativo de la capa superficial.

Los promedios de temperatura (°C) y clorofila-a (mg m^{-3}) para la capa de 0 a 10 m fueron calculados individualmente para cada estación, y posteriormente utilizados como base para la elaboración de mapas de interpolación espacial. Dichos mapas se limitaron exclusivamente al área cubierta por las estaciones muestreadas durante cada crucero, con el objetivo de representar fielmente las condiciones superficiales observadas en el área de estudio.

4.11 Interpolación espacial de temperatura superficial

Para visualizar la distribución espacial de la temperatura superficial del mar (TSM) durante los dos cruceros, se realizaron interpolaciones espaciales a partir de los valores promedio registrados en la capa de 0–10 m de profundidad en cada estación oceanográfica. Como se mencionó con anterioridad, estos promedios fueron calculados a partir de los perfiles hidrográficos obtenidos con el CTD Idronaut 320 Plus.

La interpolación se realizó en el software R versión 4.3.1 (R Core Team, 2023) mediante la función `interp()` del paquete *akima* (v0.6-2.3; Akima et al., 2023), utilizando el método de interpolación bilineal. Este procedimiento estima los valores de temperatura en una malla regular de puntos con base en las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y los valores medidos, utilizando como opción `duplicate = "mean"` para promediar registros duplicados, y `extrap = FALSE` para evitar estimaciones fuera del área de muestreo.

Para delimitar espacialmente el área de interpolación, se creó un buffer geográfico de 50 km alrededor de las estaciones mediante objetos espaciales tipo *simple features* (sf) (v1.0-14; Pebesma, 2018), proyectados temporalmente a coordenadas métricas (UTM zona 11N) para la operación de distancia. Los puntos interpolados fuera de este buffer fueron descartados, con el fin de evitar artefactos en los bordes del mapa. Los productos resultantes se representaron en mapas con una resolución de 1 km, empleando gradientes de color tipo "jet" para la escala de temperatura. La visualización se complementó con líneas de contorno y etiquetas de isoterma, superpuestas sobre una capa base geográfica del continente con el paquete *rnaturalearth* (v0.1.0; South, 2017). Los gráficos finales se diseñaron con la librería *ggplot2* (v3.4.2; Wickham, 2016) y fueron optimizados para su inclusión en documentos científicos.

4.12 Análisis de correlación entre variables ambientales y biológicas

Para explorar las relaciones entre variables ambientales (temperatura superficial del mar y concentración de clorofila-a) y biológicas (abundancia y biomasa zooplanctónica), se realizaron análisis de correlación lineal de Pearson. Los datos utilizados para este análisis correspondieron a promedios superficiales (0–10 m) de temperatura y clorofila-a obtenidos

con el CTD Idronaut 320 Plus, así como a la abundancia y biomasa total de zooplancton estimada a partir de las muestras recolectadas con la red de 333 μm .

Las correlaciones se calcularon por separado para cada crucero (JCFINP2306 y JCFINP2405), utilizando la función `cor.test()` del software R (versión 4.3.1; R Core Team, 2023). Se obtuvieron los coeficientes de correlación (r) y los valores de significancia estadística (p) con un nivel de confianza del 95 %. Los resultados fueron representados gráficamente mediante diagramas de dispersión con líneas de regresión ajustadas y bandas de confianza al 95 %, generados con `ggplot2` (v3.4.2; Wickham, 2016).

4.13 Análisis estadístico de la estructura comunitaria del zooplancton

4.13.1 Análisis de ordenación (NMDS)

Para evaluar los patrones de variación en la composición del zooplancton entre zonas (costera vs oceánica) y cruceros (JCFINP2306 y JCFINP2405), se utilizó un Análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS, por sus siglas en inglés). Previo al análisis, los datos de abundancia fueron transformados mediante logaritmo natural y se calculó una matriz de disimilitud de Bray-Curtis. Esta medida es apropiada para datos ecológicos ya que considera la estructura relativa de las comunidades, siendo 0 para muestras idénticas y 1 para completamente distintas.

El NMDS se realizó en el software R (R Core Team, 2023) utilizando la función `metaMDS()` del paquete `vegan` (v2.6-4; Oksanen et al., 2022), con dos dimensiones ($k = 2$). La calidad de la representación fue evaluada mediante el valor de stress, considerando aceptable un valor menor a 0.2. Para facilitar la interpretación visual, se graficaron las muestras codificadas por zona (colores) y crucero (símbolos), e incluyeron elipses de agrupación para sugerir estructuras comunitarias.

4.13.2 Prueba de significancia entre grupos (ANOSIM)

Para comprobar si las diferencias observadas en el NMDS eran estadísticamente significativas, se aplicó un análisis ANOSIM (Análisis de Similitud), también con base en la matriz de Bray-Curtis. Esta prueba evalúa si la distancia promedio entre grupos (zonas o cruceros) es mayor que la distancia dentro de los grupos. El estadístico R se interpreta como

sigue: valores cercanos a 0 indican poca diferenciación, mientras que valores cercanos a 1 indican grupos bien diferenciados. El valor de p se calculó mediante 999 permutaciones aleatorias.

4.13.3 Comparación de abundancia zooplanctónica entre zonas y campañas

Previo al análisis multivariado de la estructura comunitaria, se realizó una comparación exploratoria de la abundancia zooplanctónica total entre zonas (costera y oceánica) y entre campañas (JCFINP2306 y JCFINP2405). La abundancia fue expresada en individuos por metro cúbico (ind/m^3), y los resultados se representaron gráficamente mediante diagramas de caja. Este análisis permitió identificar diferencias preliminares en los patrones espacio-temporales de abundancia, que posteriormente se evaluaron con mayor detalle en los análisis multivariados.

4.13.4 Análisis de varianza multivariado (PERMANOVA)

Se utilizó un análisis PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance) para cuantificar la varianza explicada por la zona de muestreo y el crucero en la estructura de la comunidad zooplanctónica. El análisis se realizó mediante la función `adonis2()` del paquete `vegan` (v2.6-4; Oksanen et al., 2022), en R (R Core Team, 2023), con la misma matriz de Bray-Curtis. Se reportaron los valores de F , R^2 y el nivel de significancia (p) para cada factor, evaluando cuál variable explicaba un mayor porcentaje de la variabilidad total.

4.13.5 Análisis de diversidad taxonómica

Se calcularon los índices de diversidad de Shannon y Simpson para cada muestra a partir de las abundancias taxonómicas. Posteriormente, se realizó un análisis de correlación de Pearson para determinar el grado de asociación entre ambos índices y decidir cuál sería utilizado para las comparaciones. Se optó por el índice de Shannon por su mayor sensibilidad a la riqueza y equidad. La diversidad fue comparada visualmente entre zonas y cruceros mediante diagramas de caja.

4.13.6 Análisis de contribución taxonómica (SIMPER)

Para identificar los grupos taxonómicos responsables de las diferencias entre zonas, se aplicó un análisis SIMPER (Similarity Percentage Analysis), el cual descompone la disimilitud total

(Bray-Curtis) entre grupos en contribuciones individuales por taxón. El análisis se llevó a cabo con la función `simper()` del paquete `vegan` (v2.6-4; Oksanen et al., 2022), en R (R Core Team, 2023). Se reportaron las contribuciones promedio, desviaciones estándar, razones promedio/SD y valores de p por permutaciones para identificar los grupos más determinantes en la diferenciación ecológica.

5 Resultados

5.1 Distribución espacial de la abundancia de zooplancton

La distribución espacial de la abundancia total de zooplancton, expresada en individuos por metro cúbico (ind/m^3), presentó una notable variabilidad entre los años de muestreo (Figura 2). En el crucero realizado en 2023, los valores de abundancia oscilaron entre 28.76 y 1902.1 ind/m^3 , con un promedio de $537.4 \pm 536.44 \text{ ind}/\text{m}^3$ y una mediana de 250.25 ind/m^3 . Las mayores concentraciones se registraron en estaciones localizadas frente a Ensenada y la región de Punta Canoas.

Para el año 2024, la abundancia varió entre 25.7 y 2772.6 ind/m^3 , con un promedio de $685.6 \pm 666.4 \text{ ind}/\text{m}^3$ y una mediana de 439.05 ind/m^3 . Las estaciones con mayores valores de abundancia se ubicaron en el transecto ubicado entre Punta Colonet y San Quintín.

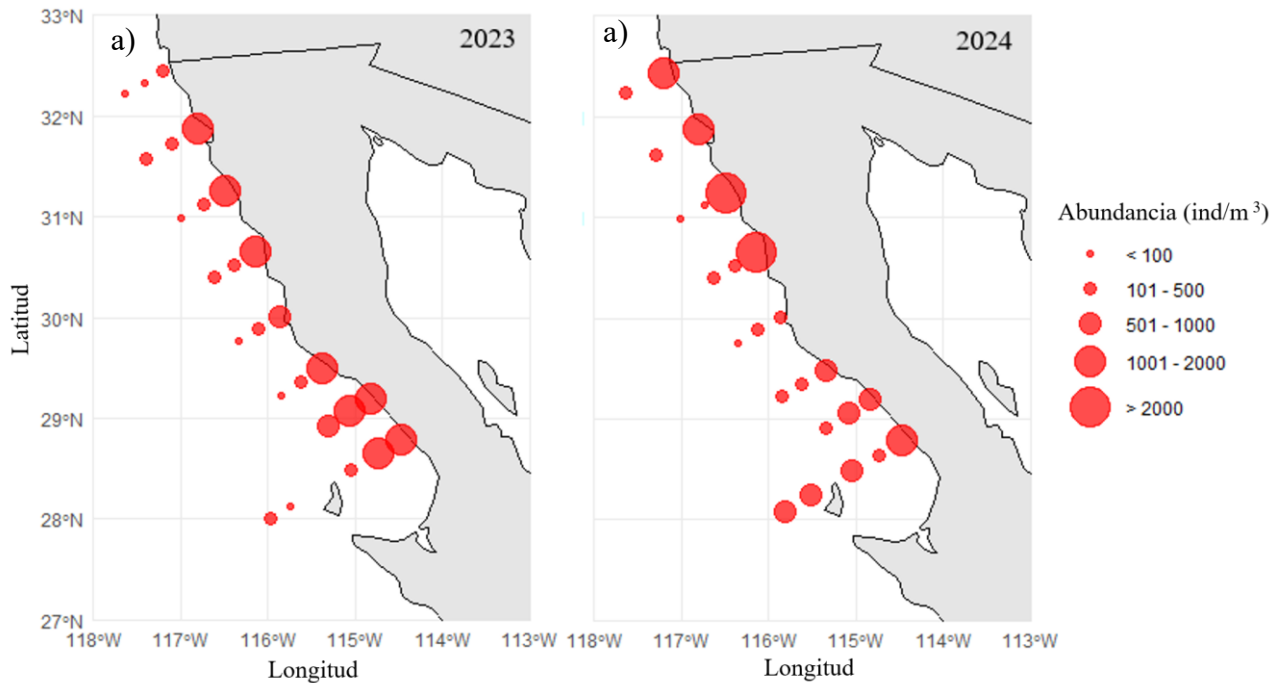


Figura 2. Distribución espacial de la abundancia zooplanctónica (ind/m³) durante julio del 2023 (a) y junio del 2024 (b).

En ambas campañas, los mapas de distribución muestran que las mayores abundancias se concentraron en estaciones costeras, mientras que las estaciones oceánicas presentaron valores menores. Los tamaños de los símbolos en los mapas representan proporcionalmente los valores registrados por estación, permitiendo visualizar las diferencias en la magnitud de abundancia entre sitios.

5.2 Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica

La distribución de biomasa zooplanctónica estimada mediante el método volumétrico para la red de 333 μm mostró una alta variabilidad espacial durante ambos periodos de muestreo (Figura 3a).

Durante julio de 2023, la biomasa osciló entre 48.89 y 1150.0 ml/1000 m³, con un promedio de 321.0 ± 296.59 ml/1000 m³. El valor mínimo se registró en la estación 67, ubicada frente a Ensenada en una muestra oceánica, mientras que el máximo se presentó en la estación 59, en una muestra costera situada entre los transectos de Punta Colonet y San Quintín.

En el muestreo de junio de 2024 (Figura. 3b), se observaron valores de biomasa similares en términos de rango y variabilidad. El valor mínimo fue de 26.59 ml/1000 m³, registrado en la estación 47, una muestra oceánica localizada frente a Punta Baja. El valor máximo fue de 1244.61 ml/1000 m³, correspondiente a la estación 54, una muestra costera situada frente a Ensenada. El promedio general fue de 354.83 ± 343.902 ml/1000 m³.

En ambos años se observó una tendencia a mayores valores de biomasa en estaciones costeras, especialmente en la región central del transecto. Las estaciones oceánicas, en general, presentaron valores más bajos y homogéneos. Estas diferencias reflejan la influencia de procesos oceanográficos locales en la concentración y distribución del zooplancton.

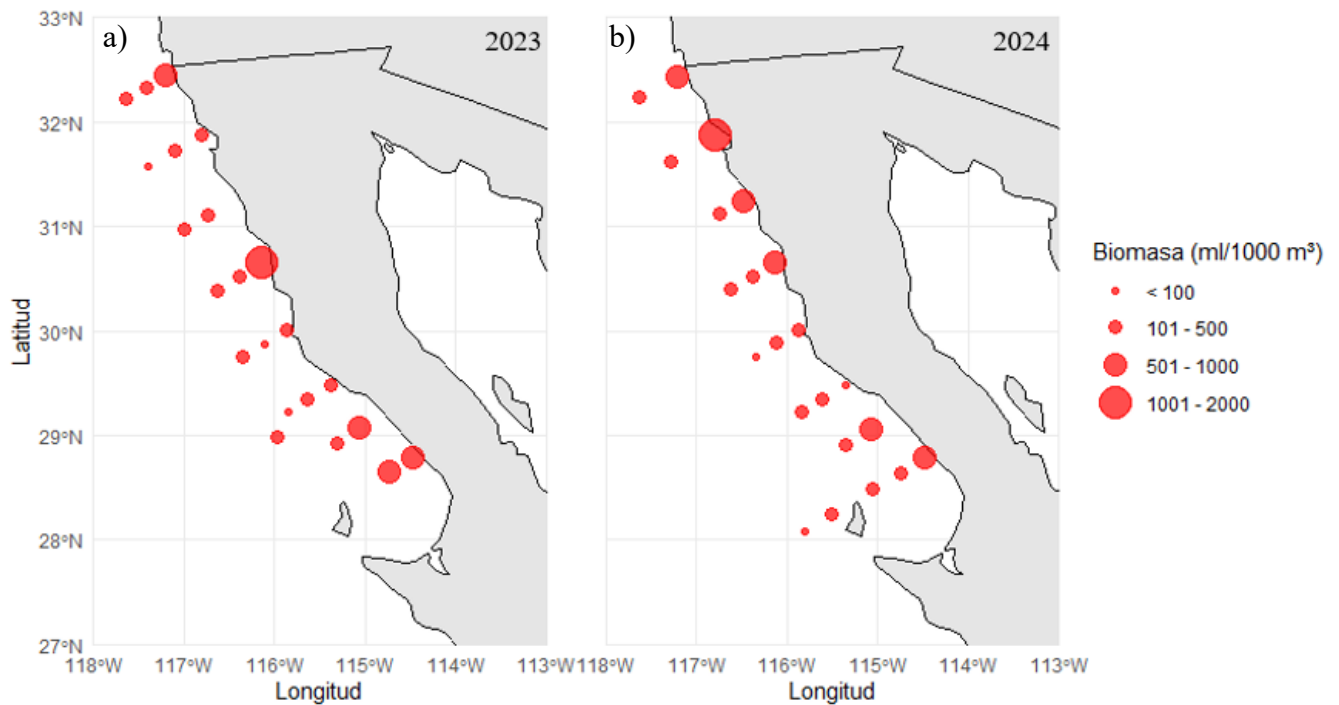


Figura 3. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica (ml/1000 m³) estimada con la red de 333 µm durante julio del 2023 (a) y junio del 2024 (b).

5.2.1 Comparación de biomasa zooplanctónica entre redes de 333 µm y 505 µm

Se compararon los valores de biomasa zooplanctónica estimados a partir de muestras recolectadas con redes de 333 µm y 505 µm de luz de malla en 22 estaciones coincidentes del crucero JCFINP2405. La biomasa fue calculada mediante el método volumétrico y expresada en mililitros por cada 1000 m³ de agua filtrada (ml/1000 m³).

La red de 505 μm registró valores de biomasa que oscilaron entre 276.3 y 2141.5 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$, con una mediana de 601.3 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$ y un promedio de 716.2 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$. En contraste, la red de 300 μm presentó un rango de biomasa de 26.59 a 1244.61 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$, con una mediana de 224.78 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$ y un promedio de 364.89 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$.

La distribución espacial de la biomasa estimada con ambas redes muestra un patrón geográfico similar a lo largo del área de estudio, con variaciones en la magnitud entre estaciones (Figura 4). En ambos casos, las mayores concentraciones de biomasa se localizaron en estaciones costeras, particularmente frente a Ensenada, Punta Colonet y Punta Baja. La red de 505 μm presentó una mayor cantidad de estaciones con biomasa en los rangos superiores (501–1000 y $>2000 \text{ ml}/1000 \text{ m}^3$), mientras que en la red de 333 μm predominan los valores en los rangos intermedios (101–500 $\text{ml}/1000 \text{ m}^3$).

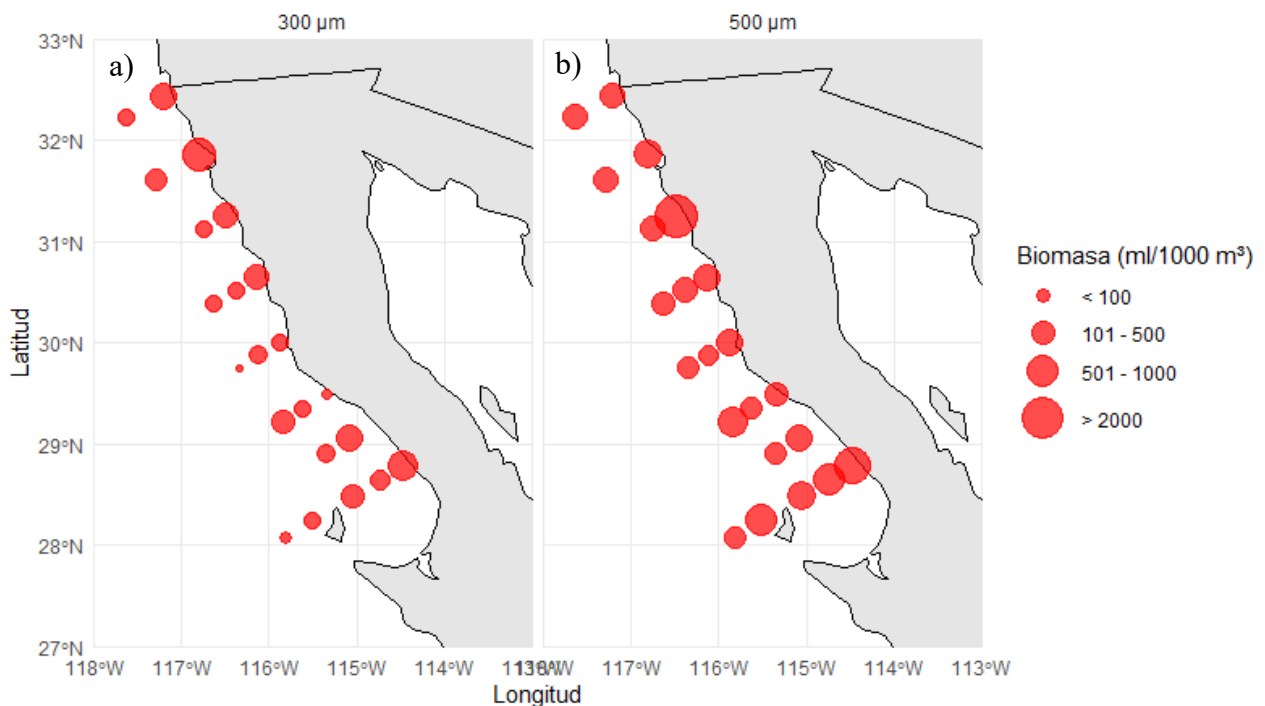


Figura 4. Distribución espacial de la biomasa zooplanctónica ($\text{ml}/1000 \text{ m}^3$) estimada mediante el método volumétrico a partir de muestras recolectadas con redes de 333 μm (a) y 505 μm (b) en 22 estaciones del crucero JCFINP2405.

El histograma de la diferencia relativa de biomasa entre la red de 333 μm y la de 505 μm (Figura 5) muestra que la mayoría de las estaciones presentaron valores negativos, lo que indica que en esos casos la biomasa estimada con la red de 333 μm fue menor en comparación

con la red de 505 μm . Las diferencias relativas oscilaron principalmente entre -100% y 0% , con una mayor frecuencia de estaciones en el rango de -75% a -25% . Solo unas pocas estaciones presentaron diferencias positivas, superando el 0% . La línea discontinua vertical en 0% señala el umbral de igualdad entre ambas estimaciones

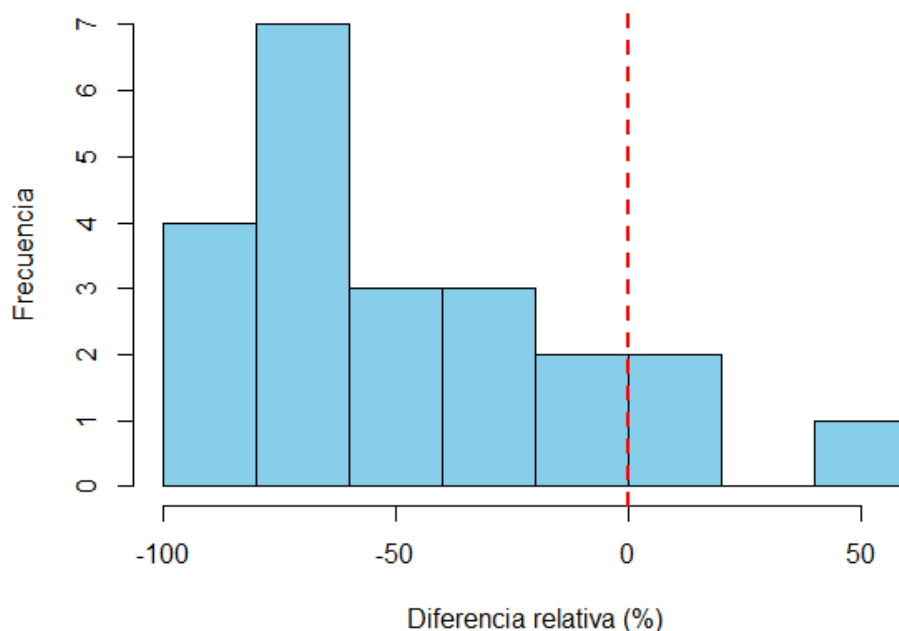


Figura 5. Histograma de la diferencia relativa (%) entre la biomasa estimada con la red de 333 μm y la red de 505 μm en 22 estaciones del crucero JCFINP2405.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran una tendencia general con mayores valores de biomasa zooplanctónica obtenidos con la red de 505 μm que con la red de 300 μm en la mayoría de las estaciones analizadas. Esta diferencia se reflejó tanto en las estadísticas descriptivas como en la representación espacial y gráfica de los datos, lo que proporciona un punto de partida para discutir las implicaciones metodológicas y ecológicas de esta comparación

5.3 Composición relativa de la comunidad zooplanctónica

La composición relativa de la comunidad zooplanctónica mostró diferencias notables entre sectores (costero y oceánico) y entre los años de estudio (Figura 6). En el verano de 2023, se identificaron 33 grupos taxonómicos. Los copépodos fueron el grupo dominante tanto en el sector costero como en el oceánico, con una representación relativa de 67.12 % y 64 %,

respectivamente. Los tunicados spendicularias ocuparon el segundo lugar en ambos sectores (8.71 % en el costero y 6.51 % en el oceánico), seguidas por eufáusidos (7.78 % en el costero y 6.42 % en el oceánico). Otros grupos relevantes incluyeron cladóceros (6.22 % en el costero y 1.88 % en el oceánico), chaetognatos (2.77 % y 0.08 %, respectivamente) y salpas (2.24 % en el costero y 0.97 % en el oceánico). La categoría "Otros", que incluye taxones con representación relativa menor al 1 %, alcanzó 2 % en el sector costero y 2 % en el oceánico.

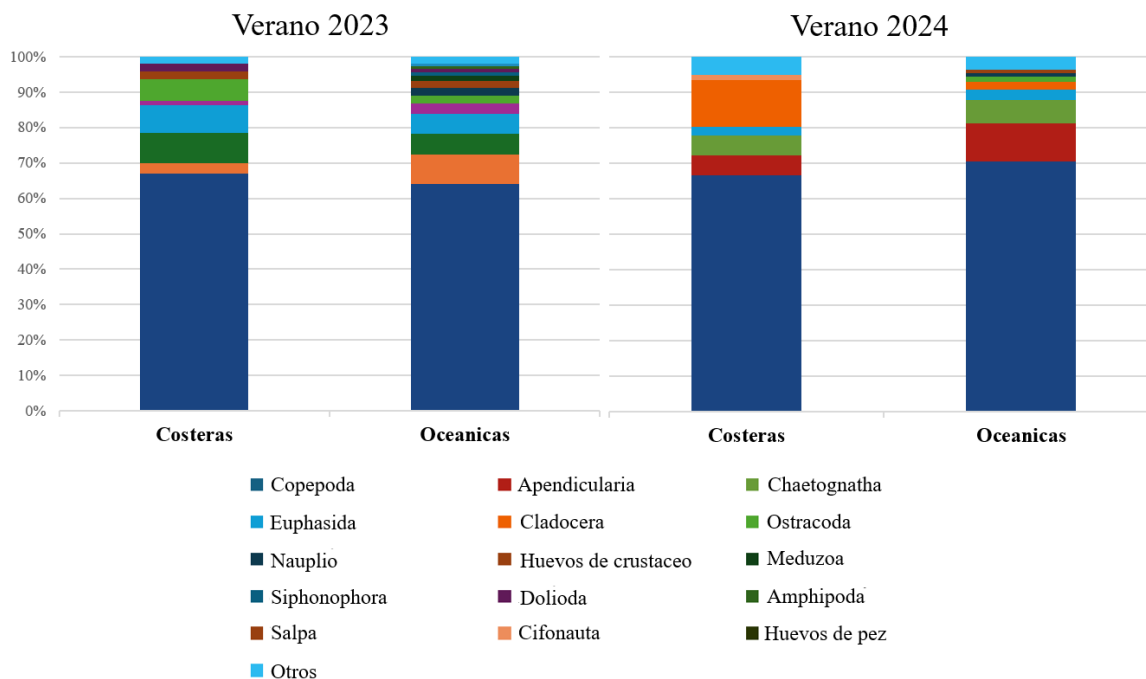


Figura 6. Composición relativa de los principales grupos taxonómicos del zooplankton en porcentaje, comparando zonas costera y oceánica durante los cruceros de verano de 2023 y 2024.

En el verano de 2024, la comunidad zooplantónica se conformó por 38 grupos taxonómicos. En el sector costero, los copépodos representaron el 66 % del total, seguidos por cladóceros (13 %), apendicularias y chaetognatos (ambos con 6 %), y eufáusidos (2 %). En el sector oceánico, los copépodos alcanzaron una participación del 67.76 %, mientras que apendicularias representaron el 10.41 %, chaetognatos el 6.36 %, eufáusidos el 2.71 % y cladóceros el 2.16 %. Otros grupos como nauplios, ostrácodos, huevos de crustáceos, medusas y larvas cifoanautas estuvieron presentes con una contribución menor al 1 %. La categoría "Otros" representó el 5 % en el sector costero y 3.40 % en el oceánico.

El número total de grupos taxonómicos identificados fue mayor en 2024 que en 2023, lo cual refleja un incremento en la riqueza de la comunidad zooplanctónica entre ambos años. Las diferencias en la proporción relativa de los principales grupos entre sectores y entre años se muestran en los gráficos de barras apiladas (Figura.6), evidenciando variaciones en la estructura comunitaria.

5.4 Evolución mensual de la temperatura superficial del mar

La Figura 7 muestra la evolución de la TSM de satélite durante los meses anterior, durante y posterior al periodo de muestreo zooplanctónico en los años 2023 y 2024, en la costa occidental del Pacífico mexicano, frente a la península de Baja California.

En 2023 (fila superior), la TSM mostró un incremento progresivo de junio a agosto. En junio, las temperaturas oscilaron entre 16 y 22 °C en la mayoría del área de interés, con aguas más cálidas (>24 °C) al sur de la región. Durante julio, mes en que se realizó el muestreo, se observó una extensión de la región cálida hacia el norte, entre los 23 y 28 °N y con temperaturas superiores a 26 °C. En agosto, las temperaturas cálidas se mantuvieron en la misma región del mes de julio, con núcleos cálidos extendiéndose al sur de Punta Eugenia alcanzando casi 30 °C. Sin embargo, aunque la TSM de la región oceánica al norte de Punta Eugenia alcanza temperaturas mayores a 20°C, es posible notar una franja costera de TMS menor a los 20°C, tanto en julio como en agosto.

En 2024 (fila inferior), el patrón térmico fue notablemente distinto, principalmente porque la de TSM fueron menores que en el 2023. En mayo, mes previo al muestreo, las TSM alcanzaron valores entre 14 y 20 °C en toda la región. Durante junio, mes del muestreo, las condiciones térmicas se mantuvieron relativamente homogéneas, con valores entre 16 y 22 °C a lo largo de la franja costera y oceánica. En julio, las temperaturas aumentaron ligeramente en el sector sur, aunque sin alcanzar los niveles registrados en el mismo periodo de 2023.

Estas diferencias mensuales reflejan un contraste en la intensidad del calentamiento superficial entre ambos años, particularmente durante los meses de junio y julio, y sugieren una menor influencia de condiciones cálidas extremas durante el muestreo de 2024 en comparación con 2023.

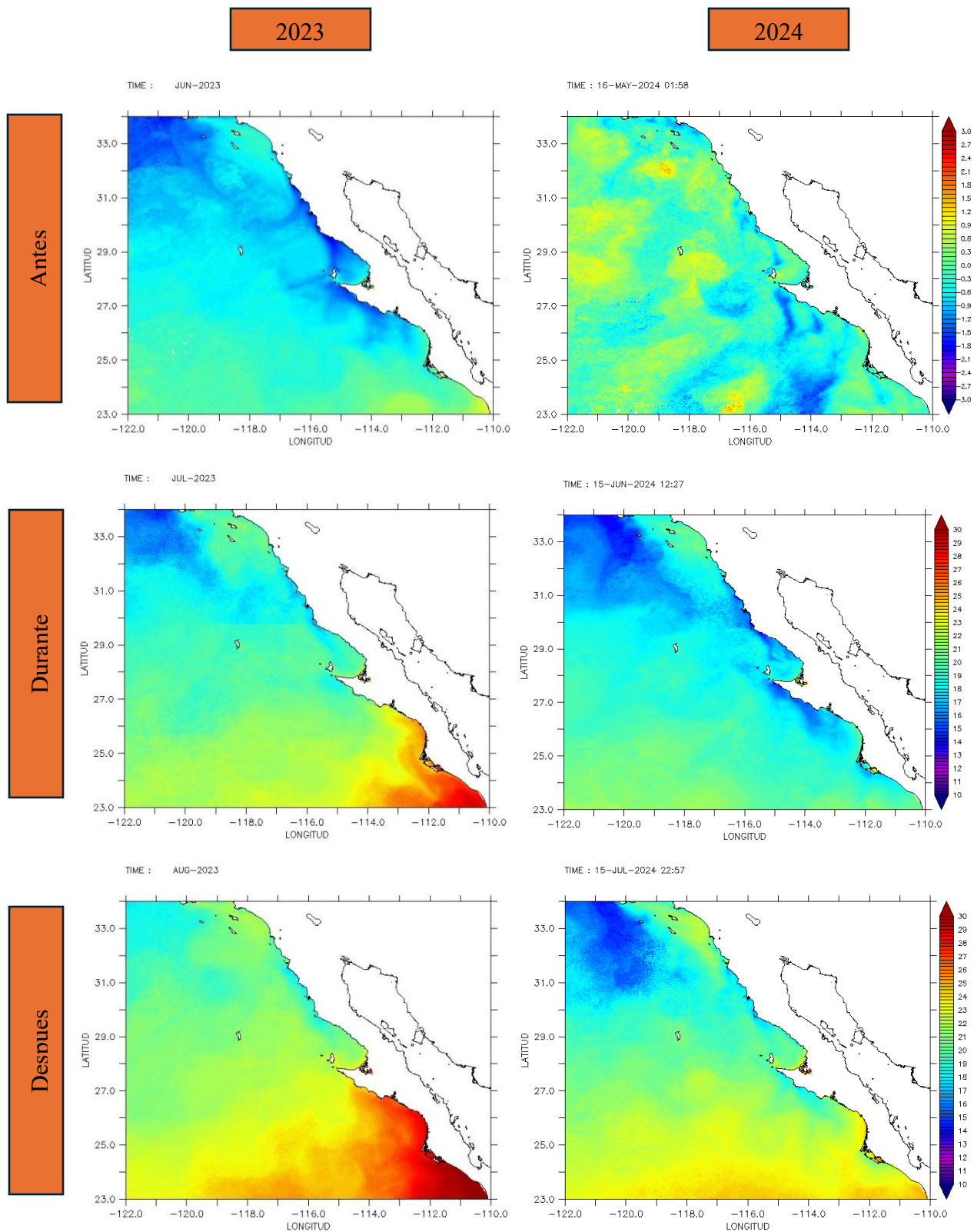


Figura 7. Mapas de temperatura superficial del mar (°C) antes, durante y después de los meses de muestreo en los veranos de 2023 (izquierda) y 2024 (derecha) en la región frente a Baja California.

5.5 Anomalías térmicas mensuales

La Figura 8 muestra la distribución espacial de las anomalías térmicas superficiales para los meses anteriores, durante y posteriores al muestreo zooplanctónico realizado en 2023 y 2024. Las anomalías están expresadas en grados Celsius y fueron calculadas restando el valor de TSM la climatología mensual correspondiente.

En 2023 (fila superior), las condiciones previas al muestreo (junio) estuvieron caracterizadas por anomalías positivas moderadas en el sector norte del PNBC, con valores que alcanzaron hasta $+1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente a las costas de Baja California (entre 28 a $34\text{ }^{\circ}\text{N}$). Durante julio, mes del muestreo, se observaron anomalías positivas más intensas, especialmente en la región sur, donde se registraron valores superiores a $+2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo de la franja costera entre los 25° y 27°N . En agosto, las anomalías cálidas persistieron en el sector sur, mientras que el sector norte mostró valores cercanos a la media o incluso ligeramente negativos

En 2024 (fila inferior), las anomalías térmicas mostraron un predominio de condiciones frías en el sector sur de la región de estudio. En mayo, mes previo al muestreo, se observaron anomalías negativas generalizadas, con valores inferiores a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ especialmente en la franja costera y oceánica al sur de los 28°N , alcanzando hasta $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en algunas zonas aisladas del suroeste. En contraste, el sector norte presentó valores cercanos a la media o ligeramente positivos, con anomalías que oscilaron entre $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Durante junio, mes del muestreo, el patrón térmico se mantuvo con anomalías negativas más intensas en el sur de la región, mientras que la franja norte continuó con condiciones térmicas cercanas al promedio, e incluso con algunos núcleos de anomalías positivas en áreas oceánicas al noroeste.

Para julio, mes posterior al muestreo, se observó una intensificación de las anomalías negativas en el sector oceánico norte, con una amplia zona que presentó valores por debajo de $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En contraste, la franja costera norte mostró una zona con anomalías ligeramente positivas, cercanas a $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hacia el sur, se registró un parche de anomalías negativas en la región costera, con valores entre $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el resto del sector sur presentó condiciones más cercanas a la media climática.

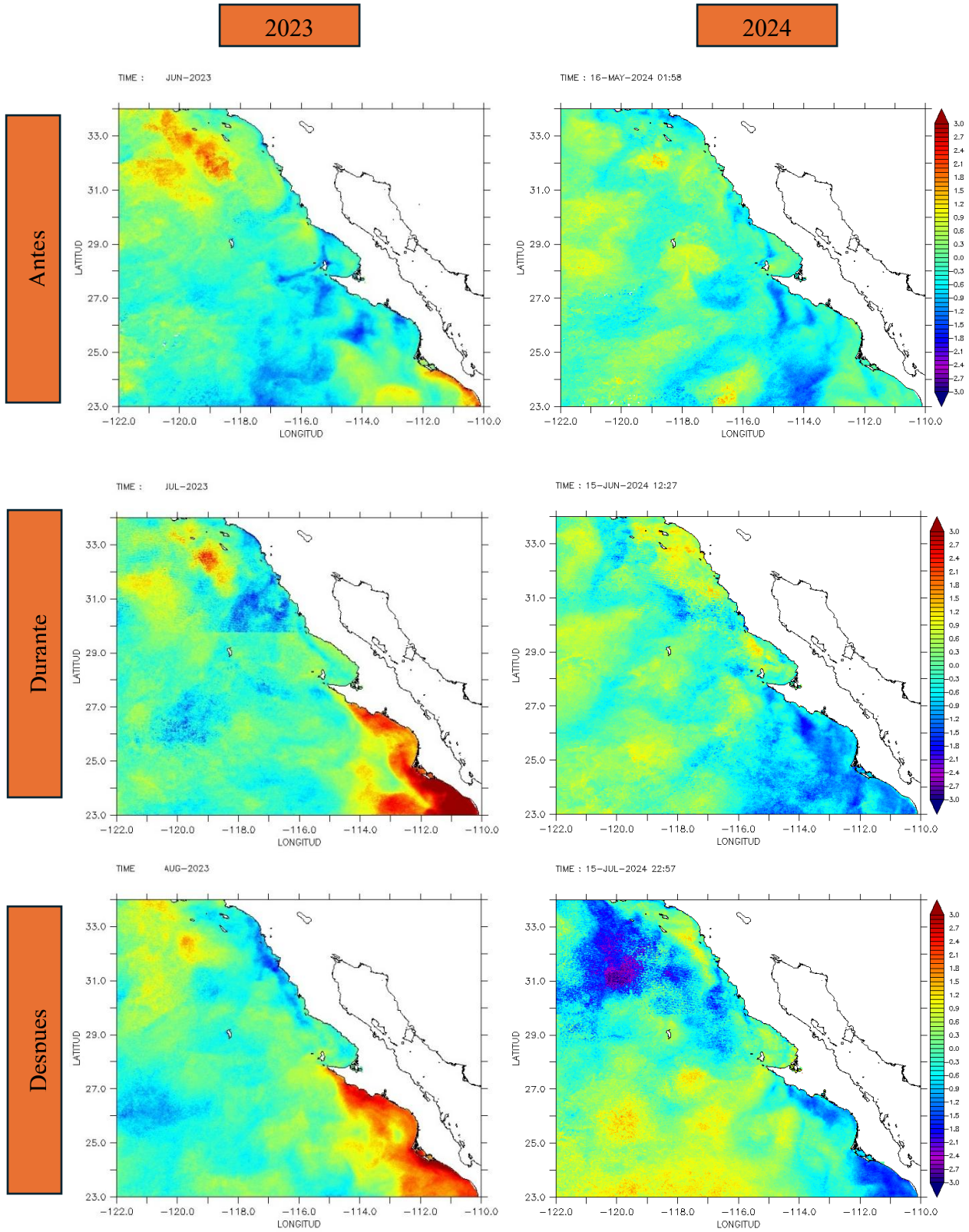


Figura 8. Anomalías de temperatura superficial del mar (°C) antes, durante y después del periodo de muestreo en los veranos de 2023 y 2024 frente a Baja California.

5.6 Temperatura superficial en el área de estudio durante los cruceros

La Figura 9 presenta la distribución espacial de la TSM registrada en el área de muestreo durante los cruceros correspondientes a julio de 2023 y junio de 2024. En ambos casos, las temperaturas corresponden a los valores interpolados a partir de las mediciones realizadas en las estaciones oceanográficas.

Durante el verano del 2023 (Figura. 9, izquierda), la TSM varió entre 13.99 °C y 19.3 °C, con una temperatura media de 16.56 ± 1.62 °C. Las temperaturas más elevadas se registraron en el extremo costero del transecto frente a la región de Tijuana-Ensenada, mientras que las temperaturas más bajas se observaron hacia el sur, en las estaciones cercanas a Punta Canoas y al suroeste de Isla Cedros.

En el verano del 2024 (Figura. 9, derecha), la temperatura superficial fue en general menor en comparación con 2023. Se registró un rango entre 12.47 °C y 17.12 °C, con una media de 15.51 ± 1.33 °C. Las temperaturas más bajas se concentraron en la región centro-sur del área de estudio, particularmente en las estaciones costeras y oceánicas adyacentes a Punta Baja y Punta Canoas.

En términos generales, los datos reflejan una disminución tanto en la temperatura media como en el valor máximo de TSM durante 2024 en comparación con 2023, lo que es consistente con las anomalías térmicas negativas observadas en la región durante ese periodo.

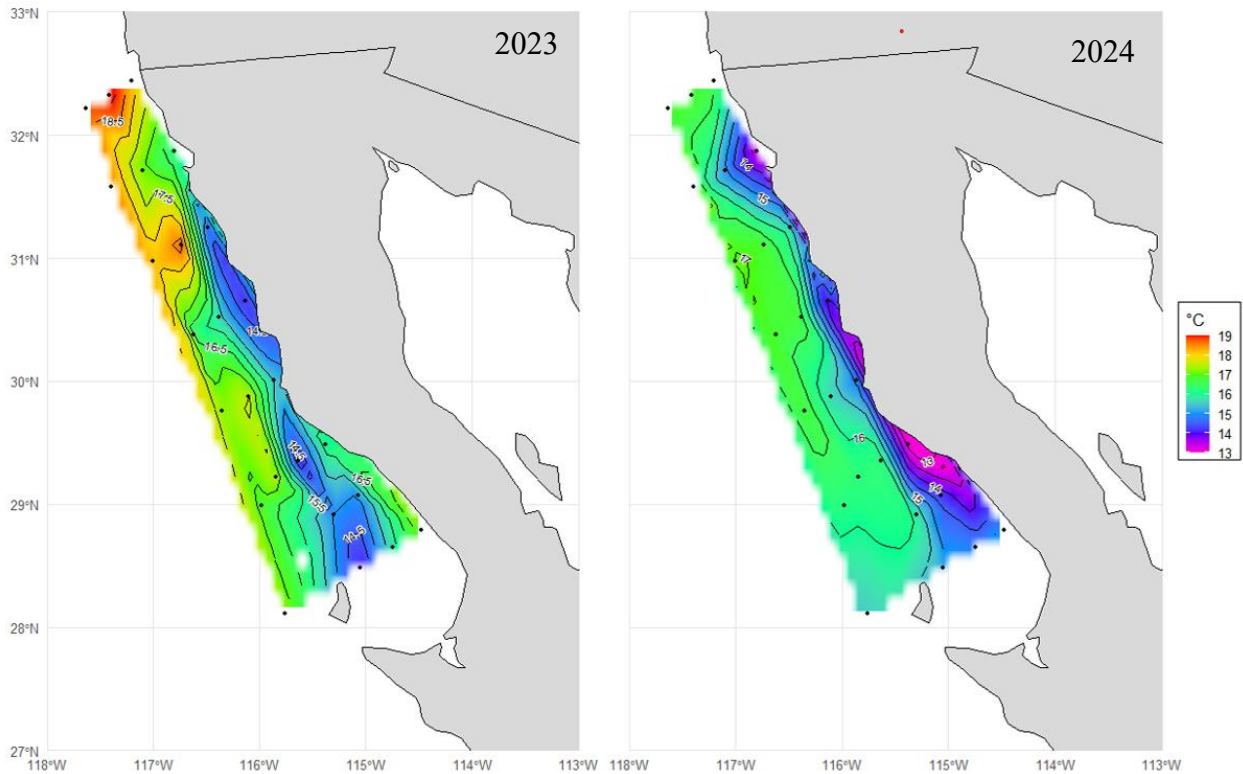


Figura 9. Distribución superficial de temperatura (°C) frente a la costa occidental de Baja California durante los veranos de 2023 (izquierda) y 2024 (derecha).

5.7 Distribución superficial de clorofila-a

La Figura 10 muestra la distribución espacial de la concentración de clorofila-a superficial (mg m^{-3}) registrada durante el crucero JCFINP2306, realizado en junio de 2023 frente a la costa occidental de Baja California. Las concentraciones oscilaron entre 0.01 y 8.25 mg m^{-3} , con una media de $1.61 \pm 2.07 \text{ mg m}^{-3}$.

Los valores más elevados se concentraron en la región adyacente a Punta Colonet, en donde se identificó un núcleo costero con concentraciones superiores a 6 mg m^{-3} . Hacia el sur, los valores también fueron relativamente altos en las estaciones próximas a Punta Baja, aunque con una cobertura espacial reducida. La franja oceánica presentó valores homogéneos y bajos ($<1 \text{ mg m}^{-3}$), mientras que las estaciones ubicadas en la región norte del transecto mostraron concentraciones intermedias, con un ligero gradiente costa-océano.

La distribución observada refleja la presencia de zonas productivas localizadas, posiblemente asociadas a procesos de surgencia costera que favorecieron el enriquecimiento de nutrientes en sectores específicos del área de estudio.

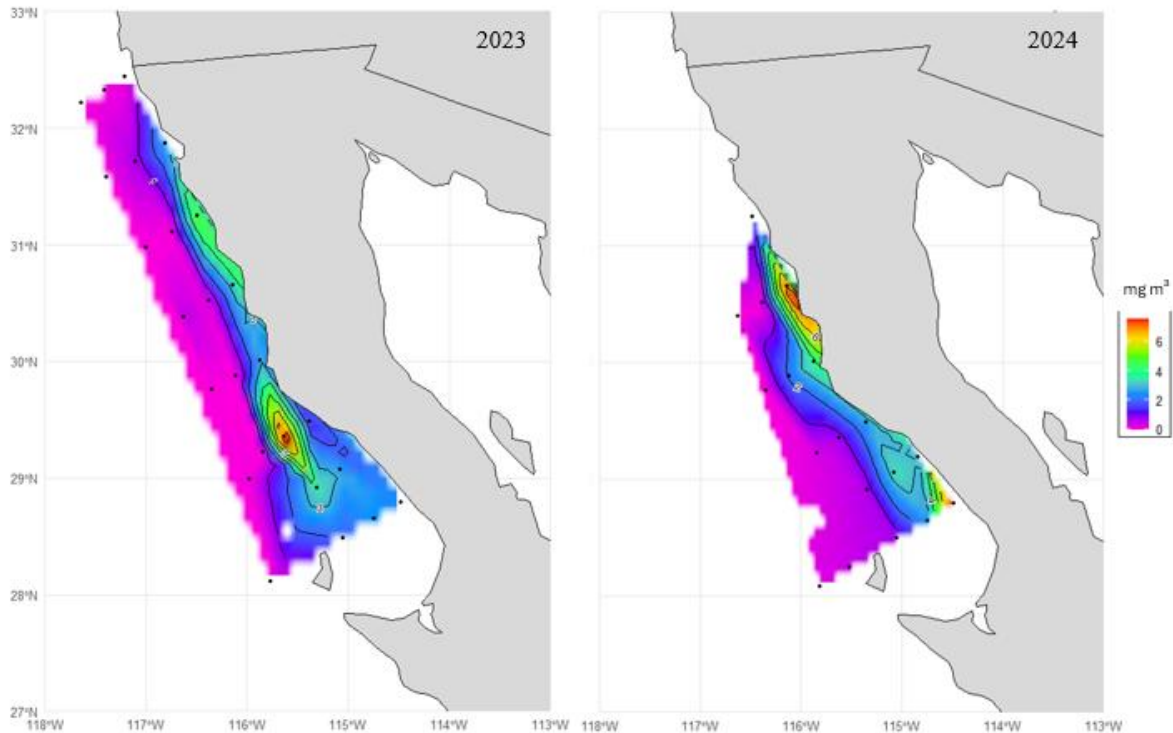


Figura 10. Distribución superficial de clorofila-a (mg m^{-3}) frente a la costa occidental de Baja California durante los veranos de 2023 (izquierda) y 2024 (derecha).

En el verano del 2024, las concentraciones variaron entre 0.28 y 8.12 mg m^{-3} , con un promedio general de $2.14 \pm 2.50 \text{ mg m}^{-3}$. Los valores registrados corresponden a las estaciones 38 a 45, ya que no se contó con datos de los dos transectos finales. Las mayores concentraciones se observaron nuevamente en estaciones costeras, particularmente en la región comprendida entre Punta Colonet y Punta Baja, donde se alcanzaron valores superiores a 6 mg m^{-3} . En contraste, las estaciones oceánicas presentaron valores considerablemente menores.

En ambos años se observó un patrón costero de altas concentraciones de clorofila superficial. El patrón espacial, así como las diferencias entre los dos veranos estarían asociados posiblemente a eventos de surgencia local característicos de la temporada y a otros procesos de mesoescala, como lo sugieren las condiciones térmicas superficiales.

5.8 Correlaciones entre variables ambientales y biológicas

Durante el verano de 2023 (cruce JCFINP2306), se realizaron análisis de correlación de Pearson para evaluar las relaciones entre temperatura superficial (promedio de los primeros 10 m), clorofila-a, abundancia y biomasa zooplanctónica (Figura. 11). Se observaron varias correlaciones significativas que evidencian interacciones clave entre el ambiente físico y las variables biológicas.

Se registró una correlación negativa fuerte y significativa entre temperatura y concentración de clorofila-a ($R = -0.77$, $p = 2.4e-05$), lo cual indica que las estaciones más frías presentaron mayores niveles de pigmento, probablemente asociados a procesos de surgencia. Igualmente, la temperatura se correlacionó negativamente con la abundancia zooplanctónica ($R = -0.51$, $p = 0.016$), lo que sugiere una disminución de organismos en condiciones más cálidas.

En cuanto a las relaciones biológicas, se identificó una correlación positiva y significativa entre la abundancia de zooplancton y la concentración de clorofila-a ($R = 0.44$, $p = 0.039$), lo cual refuerza la asociación entre productividad primaria y presencia de consumidores. Asimismo, la abundancia y la biomasa zooplanctónica también mostraron una correlación positiva significativa ($R = 0.46$, $p = 0.033$), lo que valida la correspondencia entre el número de individuos y la masa desplazada.

La relación entre temperatura y biomasa zooplanctónica mostró una tendencia negativa ($R = -0.41$, $p = 0.061$), aunque no fue estadísticamente significativa al nivel de 0.05. Finalmente, se observó una correlación positiva significativa entre biomasa y clorofila-a ($R = 0.44$, $p = 0.043$), destacando nuevamente la conexión entre condiciones tróficas y estructura zooplanctónica.

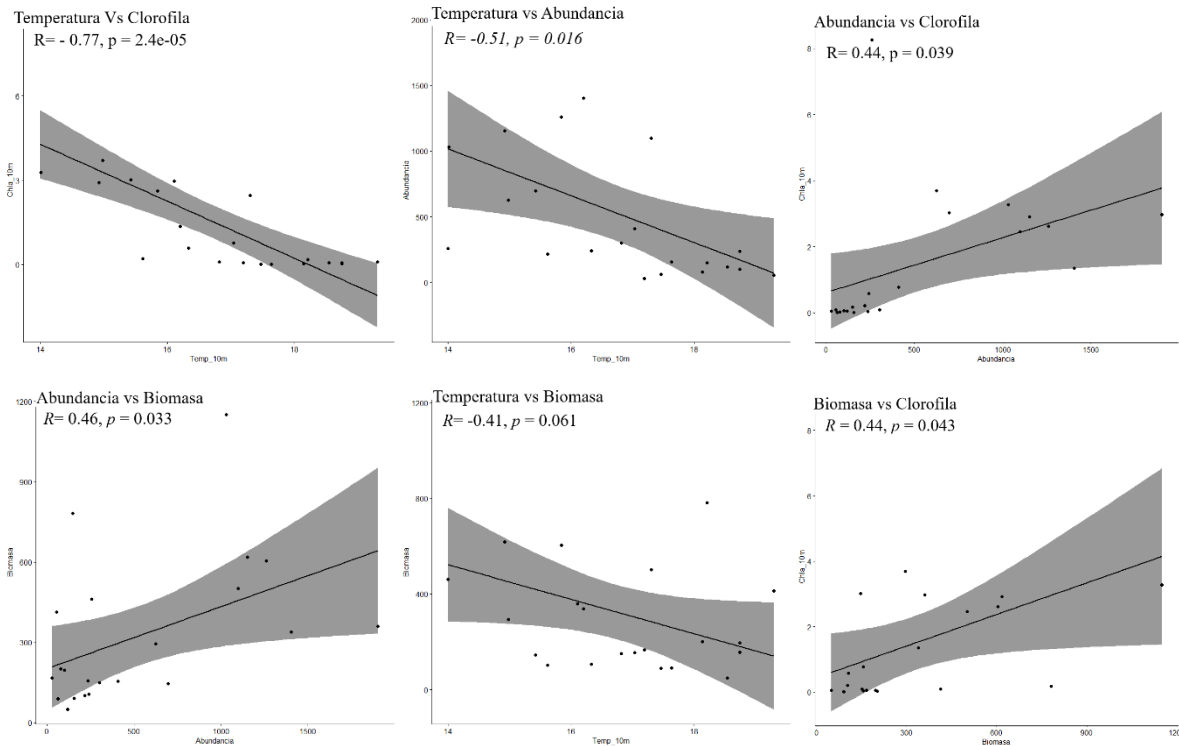


Figura 11. Correlaciones entre temperatura, clorofila-a, abundancia y biomasa de zooplancton superficial para el crucero JCFINP2306. Se indican los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R) y su significancia (p).

Durante el verano de 2024 (crucero JCFINP2405), los análisis de correlación de Pearson también evidenciaron relaciones significativas entre las variables físicas (temperatura superficial), biológicas (abundancia y biomasa) y tróficas (clorofila-a) (Figura. 12).

Al igual que en el año anterior, se observó una correlación negativa significativa entre la temperatura superficial y la concentración de clorofila-a ($R = -0.61$, $p = 0.0078$), lo que indica una menor biomasa fitoplanctónica en condiciones más cálidas. La abundancia zooplanctónica también se correlacionó negativamente con la temperatura ($R = -0.52$, $p = 0.027$), reforzando el patrón observado en 2023.

A diferencia del año anterior, la relación entre abundancia de zooplancton y clorofila-a fue más fuerte y significativa ($R = 0.64$, $p = 0.0044$), lo que sugiere un mayor acoplamiento de la comunidad zooplanctónica respecto a la productividad primaria durante este periodo.

También se observó una correlación positiva entre abundancia y biomasa ($R = 0.44$, $p = 0.065$), aunque esta fue marginalmente significativa.

Destaca la correlación negativa entre temperatura y biomasa ($R = -0.65$, $p = 0.0034$), más fuerte y significativa que la registrada en 2023. Esto sugiere que las estaciones con temperaturas más bajas estuvieron asociadas a una mayor concentración de biomasa zooplanctónica. Finalmente, se detectó una correlación positiva significativa entre biomasa y clorofila-a ($R = 0.55$, $p = 0.018$), lo que reafirma la relación directa entre productividad primaria y contenido zooplanctónico en la columna de agua.

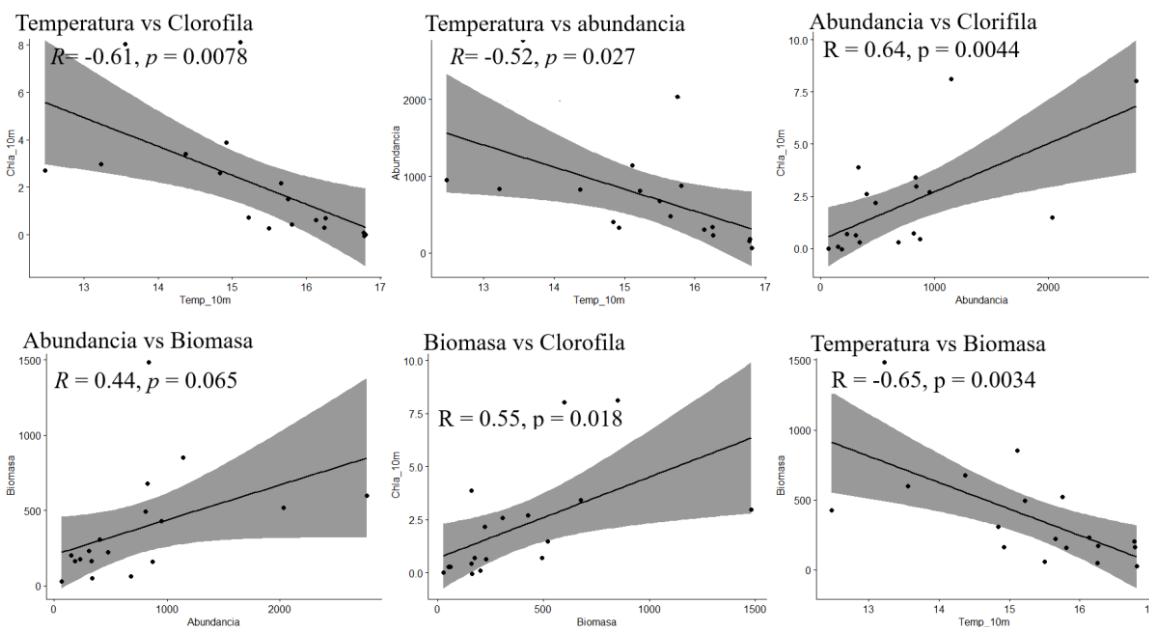


Figura 12. Correlaciones entre temperatura, clorofila-a, abundancia y biomasa de zooplancton superficial para el crucero JCFINP2405. Se indican los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R) y su significancia (p).

5.9 Análisis estadístico de la estructura comunitaria del zooplancton

La comparación de la abundancia zooplanctónica entre zonas (costera y oceánica) y entre cruceros (campaña 2023 y 2024) mostró diferencias claras en su distribución (Figura. 13). En general, las estaciones costeras presentaron mayores valores de abundancia que las oceánicas en ambos años. En la zona costera, las abundancias fueron relativamente similares entre campañas, aunque ligeramente superiores en el verano de 2023. En cambio, en la zona oceánica se observó un aumento notorio de abundancia durante 2024 en comparación con

2023, acompañado de una mayor dispersión de los datos. Este patrón sugiere una mayor variabilidad interanual en la región oceánica y posibles diferencias en la respuesta del zooplancton a las condiciones ambientales entre zonas.

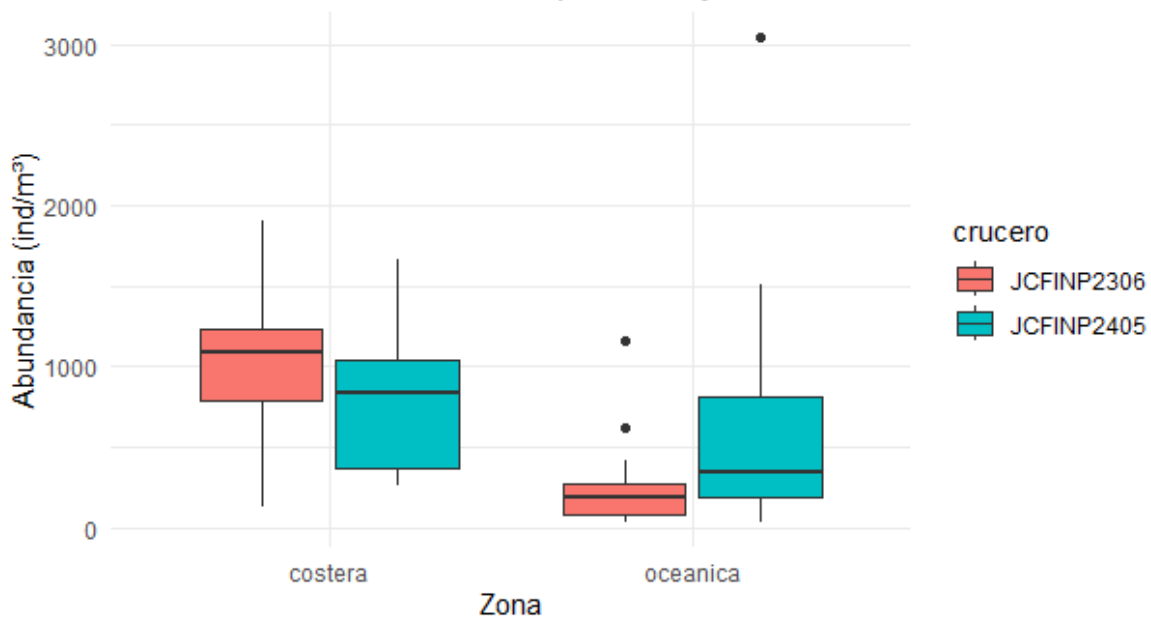


Figura 13. Distribución de la abundancia zooplanctónica (ind/m³) según zona (costera y oceánica) y crucero (JCFINP2306 y JCFINP2405). Se muestran las medianas, rangos intercuartílicos y valores atípicos para cada combinación

5.9.1 Análisis de ordenación (NMDS)

El análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) reveló una separación parcial en la composición de la comunidad zooplanctónica entre las zonas costera y oceánica, así como entre los dos cruceros (Figura. 14). La ordenación bidimensional ($k = 2$) presentó un valor de *stress* de 0.17, considerado aceptable. Las muestras correspondientes a la zona costera tendieron a agruparse en el espacio multivariado, mientras que las de la zona oceánica mostraron mayor dispersión. Las muestras del crucero JCFINP2405 ocuparon una región más diferenciada en el gráfico en comparación con las del JCFINP2306.



Figura 14. Análisis NMDS de la composición zooplanctónica. Colores indican zona (cochera/oceanica); símbolos indican crucero.

5.9.2 Prueba de significancia entre grupos (ANOSIM)

Los resultados del análisis ANOSIM indicaron diferencias estadísticamente significativas en la composición de la comunidad zooplanctónica entre zonas ($R = 0.2188$, $p = 0.001$) y entre cruceros ($R = 0.1131$, $p = 0.003$) (Tabla 3). El valor de R fue mayor entre zonas, lo que sugiere que esta variable contribuyó en mayor medida a la diferenciación de las comunidades.

Tabla 1. Resultados del análisis ANOSIM para zona y crucero.

Comparación	R	p-valor
Zona	0.2188	0.001
Crucero	0.1131	0.003

5.9.3 Análisis de varianza multivariado (PERMANOVA)

El análisis PERMANOVA confirmó que tanto la zona como el crucero explicaron proporciones significativas de la variabilidad en la estructura comunitaria (Tabla 4). La zona explicó un 15.6 % de la variabilidad total ($R^2 = 0.156$, $F = 9.18$, $p = 0.001$), mientras que el crucero explicó un 4.7 % ($R^2 = 0.047$, $F = 2.75$, $p = 0.017$). El 80 % restante correspondió a variación no explicada por estos factores, posiblemente asociada a otros gradientes ambientales o procesos estocásticos.

Tabla 2. Resultados del análisis PERMANOVA con matriz de Bray-Curtis.

Factor	Df	SumofSqs	R2	F	p-valor
Zona	1	0.6954	0.156	9.18	0.001
Crucero	1	0.2081	0.047	2.75	0.017
Residual	47	3.5622	0.800	-	-
Total	49	4.4523	1.000		

5.9.4 Diversidad taxonómica

Se observó una alta correlación positiva entre los índices de Shannon y Simpson ($r = 0.94$, $p < 0.001$), lo que justificó el uso exclusivo del índice de Shannon para representar la diversidad. La diversidad fue mayor en la zona oceánica en ambos cruceros, aunque las diferencias fueron más marcadas durante el JCFINP2405. En la comparación entre años, se observó una ligera disminución de la diversidad en 2024 en la zona costera, mientras que en la zona oceánica se mantuvieron valores similares (Figura. 15).

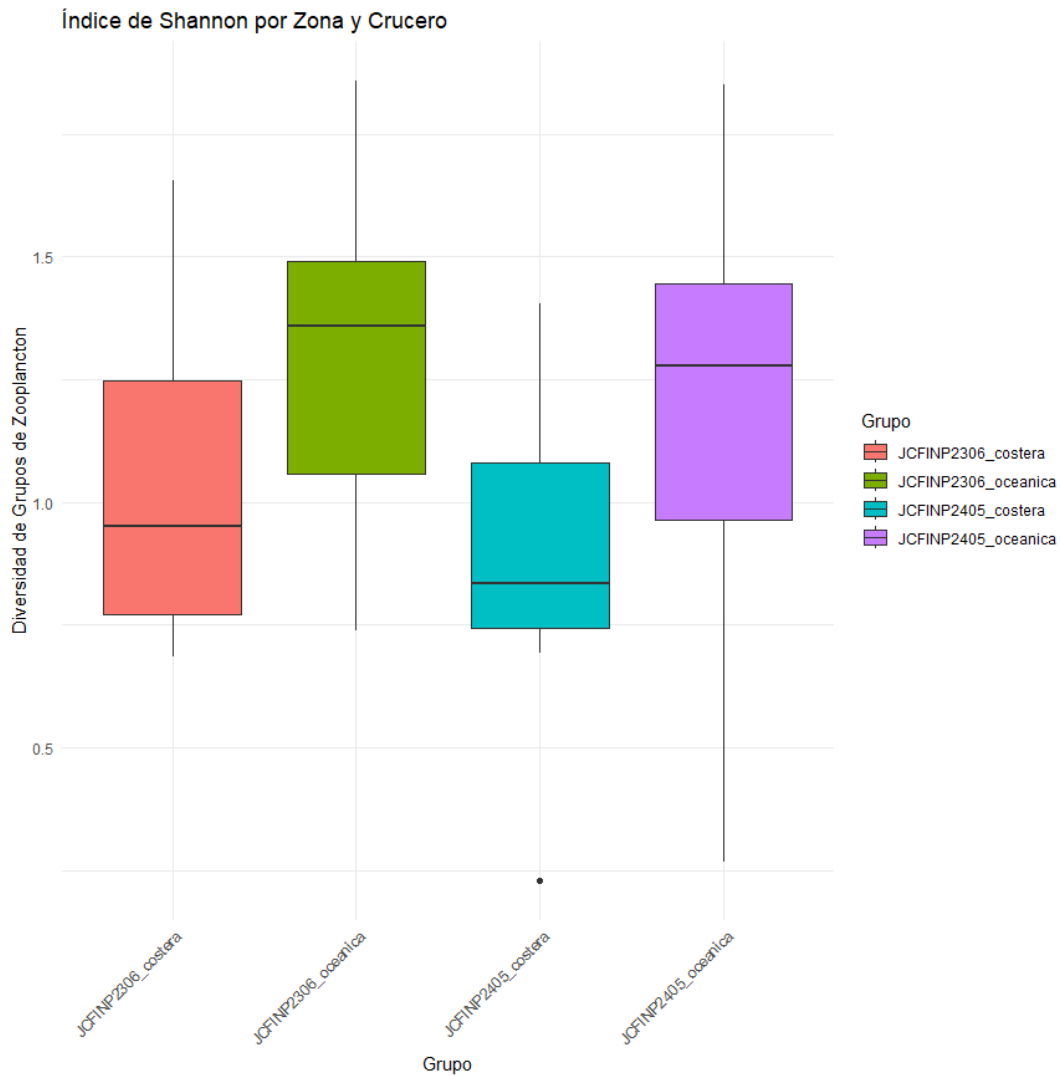


Figura 15. Comparación de la diversidad (índice de Shannon) entre zonas y cruceros. Las líneas horizontales indican la mediana.

5.9.5 Contribución de grupos taxonómicos (SIMPER)

El análisis SIMPER permitió identificar los grupos taxonómicos que más contribuyeron a la disimilitud en la composición zooplanctónica entre las zonas costera y oceánica (Tabla 5). Los resultados indicaron que los copépodos fueron el grupo con mayor contribución promedio (0.4265), representando aproximadamente el 64.2 % de la disimilitud total entre grupos ($p = 0.001$). Este taxón presentó una abundancia promedio de 744.8 ind/m³ en la zona oceánica frente a 218.2 ind/m³ en la zona costera.

Los cladóceros y eufáusidos fueron los siguientes grupos más relevantes, con contribuciones del 6.96 % y 4.32 %, respectivamente. Mientras que los cladóceros fueron más abundantes en la zona costera (158.3 ind/m³ frente a 11.2 ind/m³), los eufáusidos mostraron mayor representación en la zona oceánica. Apendicularias también presentaron una contribución importante (3.91 %), con un patrón similar al de los cladóceros, al ser más frecuentes en la franja costera.

En conjunto, los cuatro principales grupos (copépodos, cladóceros, eufáusidos y apendicularias) explicaron aproximadamente el 90 % de la disimilitud total observada. El valor de la razón promedio/desviación estándar (ratio) permitió identificar a los cladóceros (ratio = 0.44) como un grupo con contribución diferencial más consistente, seguido por los copépodos (1.84).

En contraste, otros taxones como larvas de pez, cirripedios, ostrácodos, anfípodos y mysidáceos mostraron contribuciones bajas (< 1 %) y carecieron de significancia estadística ($p > 0.05$), por lo que no se consideran determinantes en la diferenciación entre zonas.

Tabla 3. Resultados del análisis SIMPER entre zonas costera y oceánica. Se muestran los taxones con mayor contribución promedio a la disimilitud total, desviación estándar (SD), razón promedio/SD, abundancia promedio en cada grupo (ava = zona oceánica, avb = zona costera), contribución acumulada (cumsum) y nivel de significancia (p-valor)

	average	sd	ratio	Ava	avb	cumsum	P
Copepoda	0.42650	0.23077	1.84820	744.800	218.200	0.642	0.001
Cladóceras	0.06960	0.15641	0.44510	158.300	11.1600	0.747	0.017
Euphasida	0.04320	0.06757	0.63950	52.700	23.4900	0.812	0.286
Apendicularia	0.03910	0.05225	0.74920	58.000	19.8200	0.871	0.722
Chaetognatha	0.03080	0.03775	0.81720	54.2000	17.0700	0.917	0.741
Cifonauta	0.01640	0.02727	0.60280	29.4000	2.19000	0.942	0.001
Siphonophora	0.00770	0.00974	0.79130	10.700	2.3100	0.953	0.197
Nauplio	0.0058	0.01129	0.51490	7.2000	1.6400	0.962	0.183
Huevos Crustáceos	0.00400	0.01370	0.29150	5.3000	1.0400	0.968	0.597
Huevos pez	0.00380	0.00685	0.55120	3.8000	2.1500	0.974	0.996

Meduzoa	0.00200	0.00297	0.66710	1.3000	1.7700	0.977	1.000
Pirosoma	0.00170	0.00493	0.34870	0.1000	1.5600	0.979	1.000
Salpidae	0.00170	0.00295	0.56670	0.5000	1.4600	0.982	1.000
Doliida	0.00170	0.00273	0.60650	1.8000	1.1000	0.984	1.000
Ostracoda	0.00160	0.00182	0.87640	0.4000	1.7900	0.987	0.998
Mysis	0.00150	0.00159	0.92360	1.7000	0.7700	0.989	0.997
Brachyura	0.00120	0.00117	1.00410	1.7000	0.1900	0.991	0.001
Polychaeta	0.00090	0.00118	0.76060	1.0000	0.4900	0.992	0.998
Cirripedia	0.00080	0.00089	0.88790	1.1000	0.2900	0.993	0.931
Larva pez	0.00050	0.00086	0.60800	0.5000	0.3100	0.994	0.999
Amphipoda	0.00050	0.00075	0.68580	0.1000	0.4800	0.995	1.000

6 Discusión

6.1 Variación espacio-temporal de la temperatura superficial del mar

6.1.1 Panorama regional del Pacífico frente a la península de Baja California

El análisis de la TSM en la costa occidental del Pacífico mexicano frente a la península de Baja California permitió identificar contrastes térmicos significativos entre los años 2023 y 2024, especialmente durante los meses de verano, los cuales coincidieron con los periodos de muestreo zooplanctónico. En 2023, las condiciones térmicas mostraron un patrón de calentamiento progresivo de junio a agosto, con temperaturas que superaron los 26 °C en la franja costera sur durante julio, y alcanzaron más de 28 °C en agosto. Este comportamiento es indicativo de una intensificación térmica atípica para la región norte del sistema de la Corriente de California.

Estas condiciones cálidas fueron acompañadas por anomalías térmicas positivas superiores a +2.5 °C entre los 25° y 27°N, lo que sugiere la presencia de una Onda Cálida Marina activa. Según los criterios propuestos por Hobday et al. (2016) y retomados por Wyatt et al. (2022), las OCMs se caracterizan por desviaciones positivas de la TSM persistentes y extensas. La presencia de anomalías de esta magnitud durante el verano de 2023 respalda la ocurrencia de

un evento OCM regional, posiblemente asociado con mecanismos similares a los documentados durante el evento de 2014–2015 conocido como el “warm blob” (Bond et al., 2015; Wyatt et al., 2022).

A nivel regional, la costa occidental de Baja California presenta una marcada estacionalidad térmica, influenciada tanto por procesos locales como por forzamientos de gran escala. Estudios como el de Durazo (2015) han documentado cómo la variabilidad interanual en la TSM, asociada a eventos El Niño–La Niña, afecta la estratificación de la columna de agua, la profundidad de la nutriclina y la intensidad de la surgencia costera. Estas variaciones determinan la cantidad de nutrientes en la zona donde llega la luz, lo que a su vez regula la productividad y la estructura del ecosistema pelágico. En años cálidos, como 2023, se espera un debilitamiento del afloramiento y una reducción en la productividad biológica, mientras que años fríos tienden a favorecer condiciones más ricas y estructuradas ecológicamente.

En contraste, el patrón térmico observado en 2024 fue marcadamente más frío. Desde mayo, y durante todo el periodo de muestreo, las temperaturas fueron menores que las de 2023, y se registraron anomalías negativas de hasta $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la región sur. Estas condiciones sugieren un enfriamiento regional en el periodo de estudio, posiblemente asociado a procesos de afloramiento costero, consistentes con un retorno a condiciones más típicas del sistema de la Corriente de California.

Investigaciones como la de Wyatt et al. (2022) han evidenciado que las OCMs en el Pacífico nororiental se caracterizan por un aumento generalizado de la TSM y una disminución en el aporte superficial de nutrientes, factores que pueden modificar la estructura y productividad de los ecosistemas pelágicos. En el presente estudio, la variabilidad térmica registrada en 2023 y 2024 sugiere que tales condiciones podrían haber tenido implicaciones diferenciales sobre la comunidad zooplanctónica en cada año, lo que será discutido más adelante. Esta evidencia refuerza la importancia de contextualizar los muestreos biológicos dentro del marco de la variabilidad física regional y de los eventos extremos como las OCMs, cuya recurrencia y duración se espera que incrementen en las próximas décadas (Frölicher & Laufkötter, 2018; Xu et al., 2021).

6.1.2 Temperatura superficial en el área de estudio frente al estado de Baja California

La evaluación local de la temperatura superficial del mar (TSM) durante los cruceros de julio de 2023 y junio de 2024 reveló patrones térmicos contrastantes entre ambos años, en concordancia con la señal térmica regional previamente discutida. Durante 2023, la TSM mostró un gradiente latitudinal bien definido, con temperaturas más elevadas (hasta 19.3 °C) en el extremo norte del transecto costero, frente a Tijuana y Ensenada, y valores mínimos (~14 °C) hacia el sur, particularmente en estaciones cercanas a Punta Canoas y al suroeste de Isla Cedros. Esta distribución térmica produjo un promedio regional de 16.56 ± 1.62 °C, reflejando condiciones cálidas moderadas pero espacialmente heterogéneas.

En contraste, durante el crucero de 2024, se observaron temperaturas superficiales consistentemente más bajas, con un rango entre 12.47 °C y 17.12 °C, y una media de 15.51 ± 1.33 °C. Las temperaturas más bajas se concentraron en la región centro-sur del transecto, particularmente en las estaciones costeras y oceánicas aledañas a Punta Baja y Punta Canoas. Este enfriamiento generalizado no solo implica una disminución de ~1 °C en la media regional con respecto a 2023, sino que también sugiere una menor influencia de masas de agua cálida anómalas en el área de estudio durante ese año.

Estos resultados son consistentes con los patrones de anomalías térmicas de satélite, que resultaron negativos observados a escala regional para el verano de 2024. Además, la disminución en la dispersión térmica y en las temperaturas máximas podría reflejar una intensificación del afloramiento costero, un proceso típico del sistema de la Corriente de California en primavera y verano. Este proceso genera enfriamiento superficial y favorece el ingreso de aguas subsuperficiales más frías y ricas en nutrientes, como se ha documentado en estudios previos para la región (Durazo, 2015; Espinosa-Carreón et al., 2020).

Asimismo, trabajos como el de Durazo y Baumgartner (2002) muestran que eventos como *El Niño 1997–1998* provocaron un incremento pronunciado de la temperatura y salinidad en la capa superior del océano frente a Baja California, debido al arribo de aguas cálidas y salinas provenientes del suroeste (Subtropical Surface Water). Dichos eventos modificaron profundamente la estructura vertical y horizontal de la columna de agua, y desplazaron hacia

mar abierto las masas de agua típicas del sistema de la Corriente de California. En contraste, las condiciones de 2024 mostraron un patrón opuesto, con enfriamiento térmico y un probable incremento en la intensidad del afloramiento, lo que apunta a una fase más alineada con eventos tipo La Niña, semejante a la reportada en 1999.

Como se mencionó anteriormente, el análisis comparativo revela que 2023 presentó un incremento anómalo en la temperatura superficial del mar, posiblemente asociado a una OCM. En contraste, las condiciones observadas en 2024 reflejan un retorno a un escenario más característico del sistema costero frente al norte de Baja California. La variabilidad interanual de la TSM desempeña un papel fundamental en la comprensión de los cambios en la estructura del ecosistema pelágico, ya que pequeñas variaciones térmicas pueden impactar la circulación vertical, modificar la disponibilidad de nutrientes y, en consecuencia, influir en la productividad biológica superficial (Checkley & Barth, 2009; Wyatt et al., 2022).

6.2 Variación espacio-temporal en la abundancia y biomasa zooplanctónica

La abundancia y biomasa zooplanctónica mostraron una marcada variación espacio-temporal entre los veranos de 2023 y 2024, tanto a escala regional como zonal (costera vs oceánica). En términos generales, se observaron mayores valores promedio de biomasa en 2024 (354.83 ± 296.59 ml/1000 m³) en comparación con 2023 (321.0 ± 296.59 ml/1000 m³), mientras que la abundancia fue mayor en 2024 (685.6 ± 666.4 ind/m³) que en 2023 (537.4 ± 536.4 ind/m³). Esta diferencia sugiere una recuperación parcial de la comunidad zooplanctónica entre campañas, posiblemente vinculada a la reducción de la intensidad térmica observada en 2024.

A nivel espacial, los valores más elevados de biomasa y abundancia se registraron predominantemente en estaciones costeras, en especial aquellas ubicadas frente a Ensenada y Punta Colonet, donde también se detectaron las mayores concentraciones de clorofila-a. Este patrón refleja la influencia de procesos de surgencia costera, los cuales favorecen una alta productividad primaria que se traduce en una mayor disponibilidad de alimento para los organismos zooplanctónicos (Bakun, 1996; Dvoretzky et al., 2025). Por el contrario, las estaciones oceánicas presentaron valores considerablemente menores y más homogéneos,

tanto en biomasa como en abundancia, lo cual podría estar asociado a la estratificación térmica y a la menor disponibilidad de nutrientes característicos de esas áreas.

De manera similar, Troncoso-Terrazas et al. (2024) reportaron durante el verano de 2022 una diferencia notable entre sectores costeros y oceánicos frente a la costa occidental de Baja California, con mayores valores de biomasa y abundancia en el litoral norte, así como una fuerte presencia de copépodos y cladóceros en zonas influenciadas por surgencia. Sus observaciones, obtenidas con metodología comparable gracias a la implementación de redes Bongo de 333, coinciden con los patrones identificados en este estudio para el verano de 2024, lo que sugiere cierta recurrencia espacial en la distribución del zooplancton bajo condiciones frías.

Durante el verano de 2023, la presencia de una OCM de moderada a fuerte intensidad en la región coincidió con una reducción generalizada de la abundancia en estaciones oceánicas y con una mayor heterogeneidad espacial. Este patrón es consistente con lo reportado por Aceves-Medina et al. (2023), quienes documentaron una disminución de hasta el 77 % en la biomasa zooplanctónica durante eventos de OCM en el Pacífico nororiental. Según los autores, las condiciones cálidas inducen un hundimiento de la nutriclina, lo que limita el ascenso de nutrientes y, en consecuencia, disminuye la productividad primaria y secundaria. En el presente estudio, esta dinámica pudo haber contribuido a la disminución de copépodos herbívoros y de otros grupos claves en las zonas más cálidas y estratificadas.

El incremento de la biomasa promedio en 2024, en conjunto con la disminución de la TSM y la persistencia de clorofila en zonas costeras, podría indicar una leve recuperación trófica del sistema. No obstante, las altas desviaciones estándar en ambos años reflejan una gran variabilidad espacial, lo que sugiere que las respuestas biológicas no fueron homogéneas y estuvieron moduladas por factores locales como la intensidad de la surgencia, la topografía costera o la advección de masas de agua.

Estos resultados ponen de manifiesto la sensibilidad del zooplancton a las condiciones térmicas superficiales, y su valor como bioindicador de cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas pelágicos. En este sentido, el análisis conjunto de abundancia y biomasa permite no solo cuantificar la respuesta numérica de la comunidad,

sino también estimar su relevancia funcional en términos de transferencia de energía en la red trófica.

6.3 Composición de la comunidad zooplanctónica

La estructura taxonómica de la comunidad zooplanctónica mostró patrones consistentes en cuanto a dominancia, pero con diferencias notables en la riqueza y en la proporción relativa de ciertos grupos entre los sectores costero y oceánico y entre los años evaluados. Los copépodos fueron el grupo dominante en todos los casos, representando más del 64 % de la comunidad tanto en 2023 como en 2024, en ambos sectores. Esta dominancia coincide con lo ampliamente documentado en la literatura para el sistema de la Corriente de California, donde los copépodos constituyen el componente estructural principal del zooplancton debido a su diversidad, abundancia y rol clave en las redes tróficas pelágicas (Lavaniegos & Ambriz-Arreola, 2012; Palomares-García et al., 2013). De manera similar, Troncoso-Terrazas et al. (2024) reportaron una composición dominada por copépodos (78 %) frente a la costa occidental de Baja California durante el verano de 2022, seguidos por cladóceros y chaetognatos, en un patrón casi idéntico al observado en este estudio.

Aunque la dominancia se mantuvo constante, se registraron cambios relevantes en los grupos secundario. En 2023, los grupos más abundantes después de los copépodos fueron apendicularias, eufáusidos, cladóceros y chaetognatos, con diferencias marcadas entre sectores. Por ejemplo, los cladóceros representaron un 6.22 % en el sector costero, pero solo 1.88 % en el oceánico. En 2024, se registró un incremento en la riqueza taxonómica total (38 grupos frente a 33 en 2023), acompañado de una mayor proporción de cladóceros y chaetognatos, particularmente en el sector costero. Este aumento en la diversidad puede estar vinculado con las condiciones térmicas más frías y posiblemente más estables observadas ese año, las cuales podrían haber favorecido el desarrollo de grupos asociados con aguas más productivas o con mayor disponibilidad de microhábitats.

En términos ecológicos, la presencia elevada de cladóceros en el crucero JCFINP2405 podría reflejar una mayor productividad superficial, ya que este grupo suele proliferar bajo condiciones de alta disponibilidad de alimento y aguas frías, como se ha reportado en estudios en la región (Gómez-Gutiérrez et al., 2005; Aceves-Medina et al., 2023). La mayor proporción de apendicularias y chaetognatos en 2024 también sugiere un posible ajuste de la

comunidad a un régimen más estructurado y estable, favorecido por el afloramiento observado durante ese periodo. Las apendicularias, al alimentarse eficientemente de partículas pequeñas, suelen incrementar su abundancia en ambientes donde predomina la producción primaria de tamaño pequeño, mientras que los chaetognatos, como predadores mesozooplancónicos, podrían verse favorecidos por una mayor disponibilidad de copépodos y cladóceros como presas. Troncoso-Terrazas et al. (2023) también observaron una mayor proporción relativa de tunicados y chaetognatos en sectores oceánicos, con cladóceros como taxón indicador de surgencias en el norte de Baja California, lo que respalda los resultados obtenidos aquí para 2024.

Cabe destacar que la categoría "Otros" aumentó ligeramente su proporción en 2024, especialmente en el sector costero, lo que podría estar relacionado con una mayor heterogeneidad ambiental o una expansión del nicho ecológico disponible. Este patrón es coherente con lo planteado por Aceves-Medina et al. (2023), quienes reportaron un aumento en la diversidad zooplanctónica durante periodos fríos asociados a eventos de La Niña, vinculados con la intensificación del afloramiento y el ingreso de aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes.

En conjunto, los resultados sugieren que, si bien los copépodos mantuvieron su papel central en la comunidad, la estructura zooplanctónica fue sensible a los cambios térmicos interanuales. La riqueza y la representación relativa de ciertos grupos parecieron responder a la combinación de condiciones físicas dominantes, como el calentamiento superficial en 2023 (posiblemente asociado a una Onda Cálida Marina), frente a un régimen más frío y potencialmente más productivo en 2024. Estos patrones destacan la importancia de la variabilidad climática como modulador de la estructura del zooplancton en esta región de transición ecológica del Pacífico oriental

6.4 Posibles efectos de señales térmicas extremas sobre la comunidad

zooplanctónica

Los resultados obtenidos en esta investigación reflejan un evidente contraste térmico entre los veranos de 2023 y 2024, que se vio acompañado por cambios en la estructura de la comunidad zooplanctónica frente a la costa occidental de Baja California. Durante 2023, se

observaron anomalías térmicas positivas superiores a $+2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la franja costera sur, junto con un patrón de calentamiento progresivo desde junio hasta agosto. Si bien no se aplicó un análisis formal bajo la definición operativa propuesta por Hobday et al. (2016), las condiciones térmicas registradas durante ese periodo presentan características compatibles con un evento de Onda Cálida Marina, tales como desviaciones positivas sostenidas de la TSM y expansión de núcleos cálidos.

Bajo condiciones térmicas extremas, la comunidad zooplanctónica mostró una menor riqueza taxonómica en 2023, con el registro de 33 grupos, en comparación con los 38 observados en 2024. Además, se evidenció una mayor dominancia de organismos tolerantes a ambientes cálidos y oligotróficos, como los copépodos y las apendicularias. Por el contrario, disminuyó la proporción de cladóceros y eufáusidos, típicamente vinculados a aguas frías y de alta productividad. Esta configuración sugiere que, en 2023, la comunidad pudo haber estado sometida a estrés térmico, con una posible reducción en la disponibilidad de nutrientes y en la presencia de hábitats adecuados para los grupos más sensibles

Durante 2024, en cambio, las condiciones térmicas fueron más frías y estables, con temperaturas promedio más bajas y anomalías negativas generalizadas. Estas condiciones estuvieron acompañadas de un aumento en la riqueza de grupos, así como de una mayor participación relativa de cladóceros y chaetognatos. La presencia de estos grupos puede interpretarse como una respuesta ecológica a un ambiente más favorable, posiblemente asociado con afloramiento costero, mayor productividad y mayor disponibilidad de microhábitats. Este patrón ha sido previamente documentado para la región en años fríos o de transición (Palomares-García et al., 2013; Lavaniegos & Ambriz-Arreola, 2012).

Además, reportes recientes del NOAA (2024) indican que el noreste del Pacífico experimentó en 2023 una de las más extensas y prolongadas OCMs desde el inicio de los registros satelitales. Este evento, que se formó en mayo en el océano abierto, se expandió hacia la costa durante el verano, alcanzando su máxima extensión (~ 7.5 millones de km^2) a finales de agosto. Aunque no penetró tan profundamente ni fue tan duradero como *The Blob* (2014–2016), se documentaron intrusiones significativas en zonas costeras del Pacífico norte, incluyendo el sur de California, asociadas con la relajación de los vientos de afloramiento. De hecho, se reportó un evento cálido costero de corta duración, pero sustancial frente al sur

de California en mayo y junio de 2023, coincidente con el periodo de muestreo zooplanctónico del presente estudio. Estos resultados refuerzan la interpretación de que las condiciones térmicas observadas en la región de Baja California en verano de 2023 representan una señal compatible con la influencia de una OCM tanto por su expresión superficial como por su sincronía espacio-temporal con los eventos descritos a escala de cuenca.

De manera complementaria, el más reciente informe del NOAA (2025) señala que durante 2024 también se desarrolló una extensa OCM en el noreste del Pacífico, independiente del evento El Niño que dominó los primeros meses del año. Esta OCM se formó en abril mar adentro (> 1000 km de la costa), creció durante el verano y alcanzó su máxima extensión (~ 6 millones de km^2) el 3 de septiembre, posicionándose como la sexta más extensa y la quinta más prolongada desde que se tiene registro. Similar al evento de 2023, esta ola de calor también generó intrusiones térmicas costeras durante el verano y otoño, asociadas a la relajación de los vientos de afloramiento.

Sin embargo, los resultados de este estudio indican que dichas intrusiones no afectaron de forma significativa la región costera del norte de Baja California durante junio de 2024, lo cual se refleja en la presencia de anomalías térmicas negativas, una mayor estabilidad térmica y una estructura zooplanctónica más diversa. Cabe señalar que el análisis de anomalías térmicas en este estudio se basó en promedios mensuales, lo cual podría haber atenuado la señal de eventos térmicos breves pero intensos, como aquellos detectados por NOAA mediante métricas de alta resolución (diarias o de 5 días) bajo el enfoque de Hobday et al. (2016). Esto sugiere que la expresión costera de las OCMs puede estar modulada no solo por su intensidad y duración, sino también por la interacción con procesos locales como el afloramiento costero, que actuaría como un amortiguador frente a la propagación de eventos cálidos desde mar abierto hacia la plataforma continental.

Si bien los resultados no permiten afirmar la ocurrencia de una OCM bajo criterios cuantitativos estrictos, sí evidencian una serie de señales térmicas compatibles con este tipo de eventos, así como posibles efectos ecológicos sobre la estructura del zooplancton. Estudios recientes han documentado que las OCMs pueden generar cambios rápidos y profundos en la biodiversidad, productividad y redes tróficas pelágicas (Wyatt et al., 2022;

Oliver et al., 2021). En ese sentido, los patrones registrados en este estudio refuerzan la necesidad de monitorear este tipo de señales y sus consecuencias biológicas en el marco de un escenario climático cambiante.

6.5 Relación entre variables ambientales y respuesta zooplanctónica

Los resultados obtenidos en ambas campañas evidencian que la temperatura superficial del mar se relaciona inversamente con la productividad primaria (clorofila-a), la abundancia y la biomasa zooplanctónica, lo cual concuerda con el comportamiento típico de sistemas de surgencia como el de la Corriente de California. Las correlaciones negativas y significativas entre temperatura y clorofila-a observadas en 2023 ($R = -0.77$) y 2024 ($R = -0.61$) reflejan un enfriamiento de la capa superficial asociado al ascenso de aguas ricas en nutrientes, lo que favorece la proliferación fitoplanctónica.

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Sarmiento-Lezcano et al. (2024), quienes documentaron que durante eventos de enfriamiento superficial en la costa occidental de Baja California se observan aumentos sustanciales en la concentración de clorofila-a, particularmente en zonas de alta turbulencia asociadas a surgencias. Además, dichos autores destacan que la productividad primaria no solo responde a la temperatura superficial, sino también a la intensidad de la mezcla vertical, un factor que podría explicar parte de la variabilidad observada entre las dos campañas estudiadas.

Asimismo, las correlaciones negativas entre temperatura y abundancia de zooplancton (2023: $R = -0.51$; 2024: $R = -0.52$) sugieren que una mayor concentración de organismos planctónicos se asocia a condiciones más frías también. El incremento en la disponibilidad trófica (mayor fitoplancton en aguas más frías) o la migración activa de especies hacia zonas más productivas podrían explicar, en parte, esta asociación.

En 2024, la correlación positiva entre clorofila-a y abundancia fue más fuerte ($R = 0.64$) que en 2023 ($R = 0.44$), lo que sugiere un mayor acoplamiento de la comunidad zooplanctónica a la productividad fitoplanctónica durante ese periodo. Esta variación podría asociarse a un entorno menos alterado o a una mayor estabilidad en la columna de agua, es decir, se favorecería una respuesta trófica más directa, en concordancia con lo planteado por

Sarmiento-Lezcano et al. (2024) al analizar la respuesta del microfitoplancton en diferentes escenarios térmicos.

La inclusión de la biomasa como variable permitió reforzar estos patrones. En 2024, se observó una correlación negativa significativa entre temperatura y biomasa ($R = -0.65$), en comparación con una tendencia no significativa en 2023 ($R = -0.41$). Este contraste sugiere que durante el segundo año las condiciones más frías favorecieron no solo una mayor abundancia, sino también una mayor densidad o tamaño promedio de los organismos presentes.

Las correlaciones positivas entre biomasa zooplanctónica y clorofila-a (2023: $R = 0.44$; 2024: $R = 0.55$) reafirman el vínculo funcional entre la productividad primaria y la estructura zooplanctónica, y resaltan la utilidad de la clorofila-a como un buen predictor de disponibilidad trófica en sistemas costeros de surgencia.

7 Conclusiones

El presente estudio se documentó cómo la comunidad zooplanctónica del norte de Baja California respondió de forma diferenciada a condiciones térmicas contrastantes durante dos veranos consecutivos. En 2023, bajo condiciones compatibles con una Onda Cálida Marina, se observó una reducción en la diversidad taxonómica y una mayor dominancia de copépodos y apendicularias, organismos típicos de aguas cálidas y oligotróficas. En 2024, con un régimen térmico más frío y estable, se registró un aumento en la diversidad y una mayor representación de cladóceros y chaetognatos, lo cual sugiere una recuperación funcional del sistema.

Las correlaciones negativas entre temperatura, clorofila-a, abundancia y biomasa zooplanctónica refuerzan el papel regulador de los procesos de afloramiento en este ecosistema de surgencia. La clorofila-a demostró ser un indicador efectivo de productividad y se relacionó significativamente con la estructura zooplanctónica. Este estudio demuestra que el uso combinado de datos satelitales, mediciones in situ y análisis comunitarios permite identificar señales tempranas de eventos térmicos extremos y evaluar sus implicaciones biológicas. Se enfatiza la necesidad de continuar con programas de monitoreo a largo plazo que integren estas herramientas para anticipar cambios en la

biodiversidad planctónica y sustentar estrategias de conservación en regiones vulnerables como la Corriente de California.

Futuros estudios deberían incorporar análisis de series temporales más largas y eventos de corta duración, para validar la expresión local de las OCM mediante criterios cuantitativos y su relación con niveles tróficos superiores.

8 Bibliografía

- Aceves-Medina, G., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Moreno-Alcántara, M., Sarmiento-Lezcano, A. N., & La Rosa-Izquierdo, Y. I. (2023). Revisión sobre el efecto de los eventos ambientales extremos frío-cálido 2010–2016 en el zooplancton marino de la costa occidental de la península de Baja California. En A. Pérez Morales (Coord.), *Investigaciones marinas y costeras del Pacífico mexicano* (pp. 93–110). Universidad de Colima.
- Akima, H., Gebhardt, A., Petzoldt, T., & Maechler, M. (2023). *akima: Interpolation of irregularly spaced data* (Version 0.6-2.3) [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=akima>
- Amaya, D. J., Alexander, M. A., Capotondi, A., Deser, C., Karnauskas, K. B., Miller, A. J., & Mantua, N. J. (2021). Are long-term changes in mixed layer depth influencing North Pacific marine heatwaves? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *102*(4), E682–E698. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0144.1>
- Ambriz-Arreola, I., Gómez-Gutiérrez, J., Franco-Gordo, M. C., Lavaniegos, B. E., & Godínez-Domínguez, E. (2012). Influence of coastal upwelling–downwelling variability on tropical euphausiid abundance and community structure in the inshore Mexican central Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, *451*, 119–136. <https://doi.org/10.3354/meps09607>
- Bakun, A. (1996). Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics. San Diego, California, University of California Sea Grant CIBNOR.
- Brown, M. V., Ostrowski, M., Messer, L. F., Bramucci, A., van de Kamp, J., Smith, M. C., Bissett, A., Seymour, J., Hobday, A. J., & Bodrossy, L. (2023). A marine heatwave drives significant shifts in pelagic microbiology. *Communications Biology*, *6*, Article 370. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05702-4>
- Carrasco Flores, D. I. (2023). Principales forzantes de las olas de calor marinas en el Pacífico Sur Oriental [Tesis de Magíster en Ciencias con Mención en Oceanografía]. Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/10787>

- Checkley, D. M., & Barth, J. A. (2009). Patterns and processes in the California Current System. *Progress in Oceanography*, 83(1–4), 49–64.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028>
- Dickey, T., & Bidigare, R. R. (2005). Interdisciplinary oceanographic observations: The wave of the future. *Sci. Mar.*, 69, 23-42.
- Drinkwater, K.F., (2005). The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change. *ICES J. Mar. Sci.* 62, 1327-1337.
- Durazo, R., & Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress in Oceanography*, 54(1–4), 7–31.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1)
- Durazo, R. (2015). Seasonal and interannual variability in the oceanic ecosystem off Baja California: 2002–2012. *Progress in Oceanography*, 137, 12–30.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.014>
- Dvoretzky, V. G., & Dvoretzky, A. G. (2025). Effects of water temperature on zooplankton abundance and biomass in the southwestern Barents Sea: Implications for Arctic monitoring and management. *Ocean and Coastal Management*, 261, 107506.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107506>
- Edwards, M., & Richardson, A. J. (2004). Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430(7002), 881-884.
<https://doi.org/10.1038/nature02808>.
- Feddern, M. L., Ward, E. J., Litzow, M. A., Hunsicker, M. E., Jacox, M. G., Schroeder, I. D., Satterthwaite, W. H., Cunningham, C. J., Bond, N. A., Malick, M. J., & Burke, B. J. (2025). Quantifying time-dependent climate and ecosystem relationships in the California Current System. *Geophysical Research Letters*, 52(2), e2024GL113431.
<https://doi.org/10.1029/2024GL113431>
- Frölicher, T. L., Fischer, E. M., & Gruber, N. (2018). Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560, 360-366.

- Harvey, C., Leising, A., Tolimieri, N., Williams, G., Ainsworth, J., Andrews, K., ... & Bjorkstedt, E. (2023). 2022-2023 California Current Ecosystem Status Report.
- Herrera Rivero, I. (2014). The use of AARS activity as a proxy for zooplankton and ichthyoplankton growth rates. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Hobday, A. J., Oliver, E. C. J., Sen Gupta, A., Benthuisen, J. A., Burrows, M. T., et al. (2018). Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography*, 31(2), 162-173.
- Holbrook, N. J., Scannell, H. A., Gupta, A. S., Benthuisen, J. A., Feng, M., et al. (2019). A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nat. Commun.*, 10, 2624.
- Jacox, M.G., Hazen, E.L., Zaba, K.D., Rudnick, D.L., Edwards, C.A., Moore, A.M., Bograd, S.J., (2016). Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California Current System: early assessment and comparison to past events. *Geophys. Res. Lett.* 43 (13), 7072–7080. <https://doi.org/10.1002/2016GL069716>
- Jacox, M. G., Tommasi, D., Alexander, M. A., Hervieux, G., & Stock, C. A. (2019). Predicting the evolution of the 2014-2016 California Current System marine heatwave from an ensemble of coupled global climate forecasts. *Frontiers in Marine Science*, 6, 497.
- Lavaniegos, B. E. (2014). Crustáceos planctónicos como indicadores de variabilidad climática y corrientes marinas. En C. A. González Zuñiga, A. Vallarino, J. C. Pérez Jiménez, & A. M. Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 147-159). El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).
- La Rosa-Izquierdo, Y. I., Hernández-Trujillo, S., & Aceves-Medina, G. (2022). Changes in the structure of the epipelagic copepod community on the western coast of the Baja California Peninsula before and during El Niño 2015. *Marine Biodiversity*, 52, Article 64. <https://doi.org/10.1007/s12526-022-01297-x>
- Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2021). The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*, 129, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>

- Longhurst, A. (1985). The structure and evolution of plankton communities. *Progr. Oceanogr.*, 15, 1-35.
- Lynn, R. J., & Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The Seasonal Variability of its Physical Characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92(C12), 12,947-12,966.
- Meunier, C. L., Schmidt, J., Ahme, A., Balkoni, A., Berg, K., Blum, L., Boersma, M., Brüwer, J. D., Fuchs, B. M., Gimenez, L., Guignard, M., Rick, J., Rock, B., Schulze-Hillen, R., Stibor, H., Stockenreiter, M., Tautz, S., Weber, F., Wichels, A., ... Kirstein, I. V. (2025). Plankton communities today and tomorrow—Potential impacts of multiple global change drivers and marine heatwaves. *Limnology and Oceanography*, 9999, 1–17. <https://doi.org/10.1002/lno.70042>
- NOAA. (2023). *2022–2023 California Current ecosystem status report*. NOAA California Current Integrated Ecosystem Assessment Team. Pacific Fishery Management Council.
- NOAA. (2024). *2023–2024 California Current ecosystem status report*. NOAA California Current Integrated Ecosystem Assessment Team. Pacific Fishery Management Council. <https://doi.org/10.25923/vxen-pf76>
- NOAA. (2025). *2024–2025 California Current ecosystem status report*. NOAA California Current Integrated Ecosystem Assessment Team. Pacific Fishery Management Council. <https://doi.org/10.25923/9t48-pb48>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., & Wagner, H. (2022). *vegan: Community Ecology Package (Version 2.6-4)* [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Oliver, E. C. J., 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. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>.

- Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., et al. (2018). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat. Commun.*, 9, 1324. DOI: 10.1038/s41467-018-03732-9
- Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.3.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Raymont, J. (1983). *Plankton and Productivity in the Oceans. Vol.2. Zooplankton*. Pergamon. Oxford.
- Sarmiento-Lezcano, A. N., Aceves-Medina, G., Villalobos, H., & Hernández-Trujillo, S. (2024). Composition and distribution of the zooplankton community along the west coast of Baja California peninsula and its relationships with the environment variables. *Journal of Marine Systems*, 242, 103940. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2023.103940>.
- Schaeffer, A., & Roughan, M. (2017). Subsurface intensification of marine heatwaves off southeastern Australia: The role of stratification and local winds. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 5025-5033.
- Sherman, K., Kane, J., Murawski, S., Overholtz, W., Solow, A., 2002. 6 The U.S. Northeast shelf large marine ecosystem: zooplankton trends in fish biomass recovery. *Large Mar. Ecosyst.* 10, 195–215. [https://doi.org/10.1016/S1570-0461\(02\)80058-1](https://doi.org/10.1016/S1570-0461(02)80058-1)
- Sieburth, J. McN., Smetacek, V., & Lenz, J. (1978). Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 1256-1263.
- Smith, D. L. (1977). *A Guide to Marine Coastal Plankton and Marine Invertebrate Larvae*. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 161 pp.
- Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., King, N. G., Moore, P. J., Sen Gupta, A., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2023). Biological Impacts of Marine

- Heatwaves. In *Annual Review of Marine Science* (Vol. 15, pp. 119-145). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437>.
- South, A. (2017). *rnaturalearth: World map data from Natural Earth* (Version 0.1.0) [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=rnaturalearth>
- Thompson, A. R., Schroeder, I. D., Bograd, S. J., Hazen, E. L., Jacox, M. G., Leising, A., Wells, B. K., Largier, J. L., Fisher, J. L., & Jacobson, K. C. (2019). State of the California current 2018-19: A novel anchovy regime and a new marine heat wave? *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report*, 60, 1–60.
- Thompson, A. R., Swalethorp, R., Alksne, M., Santora, J. A., Hazen, E. L., Leising, A., Satterthwaite, E., Sydeman, W. J., Anderson, C. R., Auth, T. D., Baumann-Pickering, S., Bograd, S. J., Bjorkstedt, E. P., Bowlin, N. M., Burke, B. J., Daly, E. A., Dewar, H., Field, J. C., Fisher, J. L., Garfield, N., ... Wells, B. K. (2024). *State of the California Current Ecosystem report in 2022: A tale of two La Niñas*. *Frontiers in Marine Science*, 11, Article 1294101. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1294101>
- Troncoso-Terrazas, J. A., Ruiz-de la Torre, M. C., Martínez-Magaña, V. H., Morales-Gutiérrez, S., Andrade-Hernández, S., & Hereu, C. M. (2024). Comunidad zooplanctónica: distribución y estructura en la costa occidental de Baja California en el verano de 2022. En J. R. Polanco-Ruiz, J. B. Felipe-Valencia, J. R. Romero-Velázquez, & E. V. Pérez-Flores (Eds.), *Exploración científica en territorio mexicano a bordo del buque de investigación Dr. Jorge Carranza Fraser: 10 años generando conocimiento de nuestros mares y sus recursos pesqueros* (pp. 100–114). Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS). ISBN: 978-607-8274-30-7
- Weber, E. D., Auth, T. D., Baumann-Pickering, S., Baumgartner, T. R., Bjorkstedt, E. P., Bograd, S. J., ... & Zeman, S. M. (2021). State of the California Current 2019–2020: Back to the Future With Marine Heatwaves? *Frontiers in Marine Science*, 8, 709454. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.709454>.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer. <https://ggplot2.tidyverse.org/>

Zaba, K. D., & Rudnick, D. L. (2016). The 2014-2015 warming anomaly in the Southern California Current System observed by underwater gliders. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1241-1248. <https://doi.org/10.1002/2015gl067550>.

Zhan, W., Feng, M., Zhang, Y., Shen, X., Zhan, H., & He, Q. (2024). Reduced and smaller phytoplankton during marine heatwaves in eastern boundary upwelling systems. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 105. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01805-w>