

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“COMUNIDAD ZOOPLANCTÓNICA: DISTRIBUCIÓN Y ESTRUCTURA EN LA
COSTA OCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA EN EL VERANO DE 2022”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
OCEANÓLOGO

PRESENTA:

JOSÉ ALBERTO TRONCOSO TERRAZAS



ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, JUNIO DE 2023

**“COMUNIDAD ZOOPLANCTÓNICA: DISTRIBUCIÓN Y ESTRUCTURA EN LA
COSTA OCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA EN EL VERANO DE 2022”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO

PRESENTA:
JOSÉ ALBERTO TRONCOSO TERRAZAS

APROBADA POR:



Dra. Clara Maria Hereu Romero
DIRECTORA



Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre
SINODAL



M.C Victor Hugo Martínez Magaña
SINODAL

Resumen

El ecosistema pelágico del Pacífico Norte frente a las costas occidentales de Baja California (BC) se caracteriza por una alta productividad de zooplancton. Este ecosistema se encuentra en el dominio sur del Sistema de la Corriente de California (SCC), y es influenciado por procesos advectivos de la Corriente de California (CC) y surgencias costeras, lo que promueve condiciones ideales para el incremento en la productividad de zooplancton. En los últimos 10 años, el SCC ha experimentado cambios derivados a la propagación de Ondas Cálidas (OC), las cuales han incrementado su frecuencia desde el 2011, promoviendo condiciones anómalas de temperatura, salinidad y baja productividad. Asociado a este, la estructura de la comunidad de zooplancton ha variado, favoreciendo el dominio de tunicados y especies tropicales, las cuales desplazan a copépodos y eufáusidos subárticos de alto valor nutricional. Durante el 2022, la OC22 alcanzó con mayor intensidad las regiones costeras del sur del SCC, disminuyendo las surgencias costeras en las costas de California en el verano, a pesar de la presencia de La Niña, en la que se han documentado condiciones subárticas habituales y eventos de surgencias costeras más intensas. Es en este contexto que, el objetivo del siguiente trabajo es evaluar la estructura de la comunidad de zooplancton del ecosistema pelágico frente a las costas occidentales de Baja California en el verano de 2022, durante la confluencia de La Niña y la OC22. Para esto, se determinó la biomasa mediante volumen desplazado y la abundancia de los grupos taxonómicos bajo microscopio estereoscópico a 25x, y se relacionó la estructura de la comunidad con las variables hidrográficas registradas con lances de CTD en las mismas estaciones de colecta de zooplancton. La comunidad de zooplancton en BC se compuso de 24 grupos taxonómicos, de los cuales los copépodos fueron el grupo más dominante (78%). La distribución de abundancia total de zooplancton reflejó dos gradientes marcados: 1) costa-océano, en donde las máximas abundancias se concentraron en la costa y decreció hacia océano abierto, y 2) latitudinal, en donde se obtuvo que las estaciones costeras del norte de BC presentaron mayor abundancia de zooplancton a diferencia del sur. Este aspecto coincidió con la presencia de surgencias costeras en el sector costero, las cuales promovieron aguas frías y condiciones tróficas favorables para el zooplancton ($> 1 \text{ mg m}^{-3}$ de clorofila), a diferencia del sector costero en que se registraron temperaturas altas ($> 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y condiciones oligotróficas. Asociado a lo anterior, se encontraron diferencias entre las comunidades costeras y oceánicas, en el que la temperatura y la densidad fueron las variables significativas que describieron las diferencias en el grupo estaciones, aguas más densas por efecto de las surgencias costeras en la costa y aguas con mayor temperatura en el sector oceánico. Los copépodos, cladóceros y eufáusidos fueron los grupos más representativos del sector costero, mientras que los tunicados lo fueron para el sector oceánico. Sin embargo, este grupo se encontró en baja abundancia, conformando el grupo menos representativo de la comunidad de zooplancton ($< 1\% \text{ AR}$). Por lo tanto, la presencia de condiciones de La Niña contrarrestó los efectos de la OC22 en el ecosistema de BC, favoreciendo condiciones típicas de la región, y la dominancia de crustáceos en la comunidad de zooplancton.

Palabras claves: Zooplancton; Baja California; La Niña-Onda Cálida

Dedicatoria

A mi abuelo, Raymundo Terrazas, que, a pesar de ya no estar presente con nosotros, siempre me apoyó en este sueño de ser oceanólogo con su cariño y dedicación. Te quiero mucho, se que te tendré a mi lado guiándome por la vida.

A mis padres, Marcos Troncoso y Mónica Terrazas. Por su esfuerzo y compromiso para darme la oportunidad de vivir y cumplir mi sueño.

Y, al pequeño José Alberto de 10 años. Quien se atrevió a soñar con subirse a un barco y estudiar el vasto océano. Al final ese sueño se volvió una realidad.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California y a la Facultad de Ciencias Marinas, quienes me abrieron las puertas un 14 de agosto de 2017 y me formaron en el profesional que soy hoy 5 años y medio después de ingresar.

A CONACyT, por la beca otorgada a través del Proyecto “Respuestas biológicas de la comunidad fitoplanctónica a la presencia de hierro y vitamina b12 y sus implicaciones para la formación y persistencia de florecimientos algales nocivos en aguas costeras mexicanas”.

Al personal de la campaña e investigadores participantes en el crucero JCFINP/2207 y autoridades de INAPESCA por las facilidades otorgadas M. C. Víctor Martínez Magaña (INAPESCA), jefe del crucero JCFINP/2207. Dr. Aramis Olivos por el apoyo. M. C. Selene Andrade Hernández, M. C. Daniela Melissa López Calderón, M. C. Michelle Ramírez Castillo.

A mis profesores durante la carrera, por enseñarme a estudiar los diferentes aspectos del océano. En especial a Mary Carmen, Clara Hereu, Karina Lugo, Patricia Alvarado, Hiram Rivera, Rigoberto France y José Alberto Zepeda por enseñarme con tanta dedicación y amor a la carrera, además de permitirme sacar todo mi potencial al retarme constantemente. Muchísimas gracias por todo.

Al laboratorio de ECOFAN en UABC y al laboratorio de zooplancton en CICESE, por permitirme trabajar y encontrar mi pasión dentro de las distintas ramas de la oceanología, analizando muestras de zooplancton tanto de la Bahía de Todos Santos, Península de Baja California y región tropical del Pacífico mexicano. Muchas gracias Clara Hereu y Ofir Molina por enseñarme en estos dos años que me dedique a trabajar con zooplancton.

A los integrantes que los dos laboratorios por hacer que mi estancia fue mucho más divertida y agradable. Especialmente quiero agradecer a Victor Mathos por el apoyo en el laboratorio y la redacción de esta tesis. Eres y serás en el futuro un gran docente, espero seguir trabajando contigo en proyectos futuros.

Por último, y no menos importante, quiero agradecerles de todo corazón a mis queridos amigos: José Pablo Morelos Padilla, Jorge Vladimir Álvarez Montoya, Octavio Vázquez Aparicio, Rubí Galván Ramos, Eunice Cabrera Ramos, Saúl Urías Millán, Alejandra Reyes y Nayid Yamil Rivera Rivera. Muchas gracias por permitirme formar parte de una amistad tan bella que se forjó con los años. Mi experiencia en la licenciatura no habría sido la mejor experiencia escolar de mi vida sin ustedes. Gracias por las risas, los chismes, los consejos, las salidas al cine y a comer y carnes asadas en casa de Octavio, las pijamadas y noches de películas, salidas de campo, semanas de marinas y cada día que pasamos juntos en la escuela. La mejor familia que pude haber elegido en toda la vida. Sin importar cuales sean los caminos de la vida, sé que siempre puede contar con cada uno de ustedes, tanto en las buenas como en las malas. Los amo mis queridos amigos.

Índice

I.	Introducción	7
II.	Antecedentes	9
III.	Objetivo General	12
	Objetivos Particulares	12
	Hipótesis/Pregunta Problema	12
IV.	Metodología	13
	4.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	13
	4.2. COLECTA DE MUESTRAS	14
	4.3. Trabajo de laboratorio	15
	4.4. Análisis de los datos	15
V.	Resultados	18
	5.1. Condiciones hidrográficas.....	18
	5.1.1. Masas de agua	18
	5.1.2. Distribución espacial de temperatura, salinidad y clorofila.....	19
	5.1.3. Secciones verticales de temperatura, salinidad y clorofila	21
	5.2. Estructura de la comunidad de zooplancton	28
	5.2.1. Biomasa	28
	5.2.2. Abundancia total de zooplancton	29
	5.2.3. Análisis de la comunidad de zooplancton	32
	5.2.4. Distribución de grupos taxonómicos más relevantes de la comunidad de zooplancton ($A_R > 1\%$).....	38
VI.	Discusiones	43
	6.1. Distribución de biomasa y abundancia de zooplancton en el verano de 2022.....	43
	6.2. Estructura de la comunidad de zooplancton	45
VII.	Conclusiones	49
VIII.	Bibliografía	50
	Anexos	57

Lista de Figuras

Figura 2. Estaciones de colecta durante la campaña JCFINP/2207 frente a la costa occidental de Baja California (BC), México.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 3. Diagrama de temperatura conservativa (θ) versus salinidad absoluta (SA) con los datos de todos los lances de CTD realizados en la campaña de verano JCFINP/2207 frente a la costa de BC.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 4. Distribución superficial de temperatura en grados Celsius (a), salinidad (b) y clorofila en mg m^{-3} (c) a 10 m de profundidad.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 5. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Tijuana hasta 300 m de profundidad.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 6. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Punta Baja hasta 300 m de profundidad.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 7. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Punta Canoas hasta 300 m de profundidad.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 8. Distribución espacial de biomasa de zooplancton ($\text{ml } 100\text{m}^{-3}$) en el Pacífico Norte Mexicano frente estado al estado de BC en el verano de 2022.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 9. Abundancia relativa (AR) en porcentaje de los grupos taxonómicos con mayor representación de la comunidad de zooplancton durante la temporada de verano de 2022 frente a BC en el Pacífico Norte mexicano.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 10. Distribución espacial de abundancia total de zooplancton en el Pacífico Norte Mexicano frente al estado de BC en el verano de 2022.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 11. Abundancia Relativa (AR) en porcentaje de los grupos taxonómicos de zooplancton con mayor representatividad ($> 1\%$) en la comunidad costera y oceánica del Pacífico Norte frente a BC.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 12. Comparación de la AR de los taxones de zooplancton con mayor representación en la comunidad ($> 1\%$) entre las dos regiones geográficas de BC.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 13. Abundancia Relativa (AR) en porcentaje de los taxones de zooplancton con menor representación ($\text{AR} < 1\%$) en el sector costero y oceánicas del Pacífico Norte frente a BC durante el verano de 2022.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 14. Gráfica del análisis multivariado no métrico (NMDS) bidimensional en la similitud entre las estaciones **Error! Bookmark not defined.**

Figura 15. Distribución espacial de la abundancia de copépodos (a), cladóceros (b), quetognatos (c) y apendicularios (d) en el Pacífico Norte frente a la costa occidental de BC en el verano de 2022. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 16. Distribución espacial de la abundancia de sifonóforos (a), radiolarios (b), medusas (c) y huevos de peces (d) en el Pacífico Norte frente a BC en el verano de 2022. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 17. Distribución espacial de la abundancia de eufáusidos (a) y foraminíferos (b) en el Pacífico Norte frente a BC en el verano de 2022. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 18. Conglomerados basados en el índice de similitud de Bray Curtis **Error! Bookmark not defined.**

I. Introducción

El zooplancton es un elemento clave en los ecosistemas marinos (Hébert *et al.*, 2017), este grupo de metazoos se define como un eslabón central de la bomba biológica, dado su papel como intermediario en el pastoreo del fitoplancton y por ser consumido por organismos superiores (Lalli y Parsons, 1997). El zooplancton ejerce un control ecológico sobre la productividad del ecosistema, ya que el pastoreo intenso regula la concentración de clorofila (De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017), y la excreción de materia orgánica particulada es aprovechada por bacterias marinas en el proceso de remineralización de nutrientes (Turner, 2015). Así mismo, ictiofauna de importancia económica, aves y mamíferos marinos se encuentran relacionados al zooplancton y los grupos dominantes, por ser estos importantes componentes de su dieta (Ayón *et al.*, 2011; Johnston *et al.*, 2022). Por lo tanto, los cambios en los ciclos en la productividad del zooplancton permiten identificar cambios en el estado de los ecosistemas en respuesta al cambio climático (Richardson, 2008).

Los ciclos anuales del zooplancton son sensibles al cambio climático (Richardson, 2008). En latitudes medias, generalmente la sucesión de abundancia en las comunidades de zooplancton se relaciona con la estacionalidad de los florecimientos de fitoplancton, alcanzando su pico máximo de abundancia posterior a los florecimientos de primavera, cuando la columna de agua exhibe mayor mezcla y hay mayor disponibilidad de nutrientes (Friedland *et al.*, 2016). Sin embargo, se ha observado que el incremento de la temperatura puede inducir un desfase entre la productividad primaria y la productividad del zooplancton, al acelerarse los procesos fisiológicos en copépodos y otros grupos zooplanctónicos (Edwards y Richardson, 2004). Este desfase tiene implicaciones en el flujo de carbono hacia consumidores superiores, quienes dependen de un adecuado acoplamiento entre fitoplancton y zooplancton, que garantice la presencia de organismos que componen su dieta, tales como los copépodos y eufáusidos (Richardson, 2008).

La dinámica de las comunidades de zooplancton en regiones templadas ha variado en las últimas décadas en respuesta a nuevos regímenes tropicales (Batten y Welch, 2004). Diversos estudios han reportado que las poblaciones de copépodos tropicales han extendido su distribución

y abundancia hacia mayores latitudes (hemisferio norte), desplazando a especies de afinidad subártica de mayor tamaño y alto contenido lipídico (Beaugrand *et al.*, 2002; NOAA, 2023). Además, grupos que habitualmente tienen bajas abundancias, al incrementar la temperatura logran dominar las comunidades de zonas templadas, como se ha reportado para tunicados pelágicos que han incrementado su abundancia en el Océano Austral como consecuencia del aumento de temperatura y deshielo (Johnston *et al.*, 2022). Durante periodos de aumento de temperatura, las comunidades de salpas logran dominar por encima de copépodos y eufáusidos en el Pacífico Noreste (Weber *et al.*, 2021), dado que estos organismos tienen periodos cortos de vida (< 1 año) y presentan altas tasas reproductivas y de consumo (Loeb *et al.*, 1997). Este aspecto repercute en las tasas de sobrevivencia de larvas de eufáusidos, al generarse competencia por los mismos recursos alimenticios (Loeb *et al.*, 1997; Pauli *et al.*, 2021).

El Sistema de la Corriente de California (SCC) se extiende desde 25 ° hasta los 50 °N de latitud y no ha estado exenta a las fluctuaciones en las comunidades de zooplancton, como resultado de aumentos en la temperatura y cambios a regímenes tropicales (Weber *et al.*, 2021). Este sistema, al igual que otros de margen oriental, se caracteriza por albergar una alta productividad y numerosas pesquerías, por lo que ha sido ampliamente estudiada desde 1950 por el programa de investigación CalCOFI (<https://calcofi.org/>). Muchos estudios han reportado sobre la variabilidad de las comunidades a escala interanuales (por ejemplo, El Niño) e interdecadales. En el zooplancton en particular, gran parte de la variabilidad se observa como cambios en la dominancia relativa entre los taxones con rangos de distribución “norteños” con respecto a los taxones “sureños” (Mackas *et al.*, 2012).

La variabilidad del zooplancton en el SCC está influenciada por los procesos interanuales de El Niño, periodo interanual en que las características subárticas del ecosistema se interrumpen, al predominar la advección de aguas cálidas subtropicales (Durazo y Baumgartner, 2002; Lavaniegos y Ohman, 2007). Como consecuencia, se han documentado descensos abruptos en la biomasa zooplanctónica total y de los taxones, lo que genera perturbaciones a la estructura de la cadena trófica (Lavaniegos y Ohman, 2007). En los últimos 10 años (fig. 1), el SCC ha experimentado cambios derivados a la propagación de Ondas Cálidas (OC), promoviendo condiciones anómalas de temperatura, salinidad y baja productividad. En este trabajo se estudió el

efecto de estos cambios en la estructura de la comunidad de zooplancton durante el verano de 2022.

II. Antecedentes

En la región sur del SCC frente a Baja California (BC), el zooplancton ha sido ampliamente monitoreado. Los estudios iniciaron en el año de 1950, mediante el programa de investigación CalCOFI (*California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation* <https://calcofi.org/>), enfocado en evaluar el estado del ecosistema a partir del colapso de la sardina, abarcando desde California, Estados Unidos, hasta la Península de Baja California en México (PBC) (Reporte de IMECOCAL: <https://imecocal.cicese.mx/wp/>). El programa CalCOFI permitió profundizar en el conocimiento de la variabilidad del zooplancton en función a los cambios estacionales y decadales del SCC (Bograd *et al.*, 2003). Roesler (1987) documentó que la variabilidad estacional e interanual del zooplancton está asociado a los cambios en los procesos de advección de la CC, que es de norte a sur. De acuerdo con el autor, existe un marcado acoplamiento entre la región norte y sur del SCC, pero este se interrumpe cuando predomina un flujo hacia el polo sobre el flujo típico de la CC, provocando una disminución de biomasa zooplantónica al sur del SCC.

Asociado a los eventos interanuales, durante El Niño se ha reportado que poblaciones de especies tropicales incrementan su abundancia o su rango de distribución hacia latitudes más altas, tal como se reportó para eufáusidos (Brinton y Reid, 1986; Linacre y Lavaniegos, 2002; Lavaniegos y Ambriz-Arreola, 2012), copépodos (Hernández-Trujillo, 1999) y thaliaceos (Lavaniegos y Ohmna, 2003; Hereu *et al.*, 2006; Lavaniegos y Ohman, 2007), derivado de una advección hacia el polo y un incremento de la temperatura, a diferencia de años típicos cuando predominan especies templadas de la CC con dirección hacia el sur, o años Niña, donde predominan aguas frías y las especies templadas-frías son más conspicuas (Durazo y Baumgartner, 2002; Lavaniegos *et al.*, 2010).

A partir del año de 1985, el programa CalCOFI se enfocó únicamente en evaluar el SCC en la región sur de California, excluyendo la región de BC la cual conformaba anteriormente la malla histórica de muestreo del programa (Schwing *et al.*, 2002). En octubre de 1997, el programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) retomó el análisis de la CC en las costas occidentales de BC.

Lavaniegos *et al.* (2010) evaluaron la variabilidad estacional e interanual de zooplancton en la Península de Baja California, mediante un análisis histórico de los datos de CalCOFI (1951-1966) e IMECOCAL (1997-2008). De acuerdo con los autores, la sucesión estacional de los grupos del zooplancton en la región está marcada principalmente por los periodos de surgencias costeras, destacándose una sincronía entre los diferentes grupos con las surgencias de primavera y verano en la región norte de la PBC, con máximos de abundancia y biomasa en verano. Por su parte, en la región sur, se observó una mayor heterogeneidad, con grupos que alcanzan sus máximos estacionales previo a la temporada de surgencias, como el caso de salpas (en invierno). Además, los autores destacaron que, en periodos de El Niño, salpas y quetognatos dominan las comunidades. Coincidiendo con lo observado por Lavaniegos *et al.* (2002) en el periodo de El Niño 1997-1998, cuando la biomasa zooplancónica se incrementó por la dominancia de salpas, al cambiar el régimen subártico a tropical en BC.

Posteriormente, Lavaniegos *et al.* (2015) evaluaron los grupos funcionales del zooplancton de BC y la variabilidad climática en la región entre 1997-2013. Los autores concluyeron que, en el sector costero, los grupos funcionales del zooplancton responden principalmente a las surgencias costeras, con mayor abundancia de crustáceos (copépodos y eufáusidos) durante el periodo de surgencias costeras. Por otro lado, el zooplancton en el sector oceánico es influenciado por el grado de estratificación de la columna de agua, favoreciendo un incremento de tunicados durante periodos de mayor estratificación. Este aspecto se acentúa durante los periodos de El Niño y, más recientemente, en eventos de OD (Durazo y Baumgartner, 2002; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2020).

En los últimos 10 años (fig. 1), el SCC ha experimentado cambios en su régimen subártico habitual como resultado de la propagación de OC desde el Noreste del Pacífico (Weber *et al.*, 2021). Estos eventos han incrementado en frecuencia e intensidad desde 2011 (Smith, 2022). Y, a lo largo del SCC, el periodo de 2013-2016 se caracterizó por la confluencia de la OC conocida como “El Blob” y El Niño, provocando múltiples pulsos de calor desde la sección oceánica. Los pulsos entre 2014-2015, incrementaron la temperatura superficial por encima de 2 °C en la región costera (Jacox *et al.*, 2019). Para este periodo, y asociado al El Blob-El Niño, Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2020) documentaron condiciones anómalas positivas de temperatura y salinidad, estratificación y baja productividad en el norte de BC.

A diferencia de los recientes eventos de OC, la Onda Cálida de 2022 (OC22) alcanzó con mayor intensidad las regiones costeras del centro de California. Derivado de la intrusión de la OC22, se produjo una inversión en el flujo de los vientos del norte, lo que disminuyó la intensidad de las surgencias costeras durante el verano en dicha región (NOAA, 2023). Además de la presencia de la OC22, el SCC estaba influenciado por tercer año consecutivo por La Niña, siendo que La Niña se asocia históricamente con eventos intensos de surgencias costeras y anomalías negativas de temperatura a lo largo del SCC (Durazo y Baumgartner, 2002; McClatchie *et al.*, 2008).

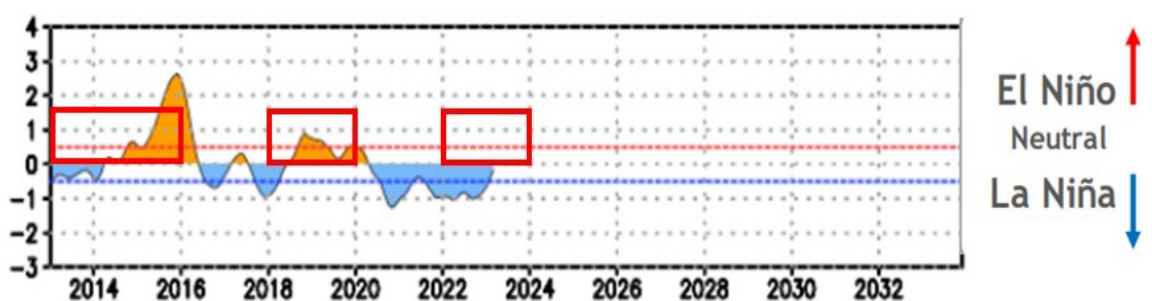


Figura 1. Evolución del índice El Niño en los últimos 10 años. Los cuadros rojos denotan la confluencia de las OC en el SCC. Imagen recuperada de la NOAA.

Si bien en sectores al norte de la PBC se han reportado la presencia de grandes abundancias de thaliaceos, en particular de pirosonas, asociado a la recurrencia de OC, surge el interrogante de cómo respondió la comunidad de zooplancton de la parte norte de la PBC durante la OC22, en conjunción con La Niña. En este contexto, se consideró el monitoreo que realiza el Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA) abarcando la misma área de estudio visitada por los programas IMECOCAL y CalCOFI y con un plan de estaciones similares para caracterizar la respuesta de las comunidades de zooplancton frente a BC bajo la influencia de la OC22 y un evento de La Niña.

III. Objetivo General

Evaluar la estructura de la comunidad de zooplancton de la región del Pacífico frente a Baja California durante la temporada de verano de 2022 (julio-agosto) bajo la confluencia de “La Niña” y la OC22.

Objetivos Particulares

- Determinar las condiciones oceanográficas de la región del Pacífico Norte frente a Baja California.
- Caracterizar la comunidad de zooplancton mediante la determinación de la abundancia de grupos taxonómicos y la biomasa.
- Relacionar la estructura de la comunidad del zooplancton con las variables hidrográficas del verano de 2022.

Hipótesis/Pregunta Problema

El periodo de La Niña contrarresta los efectos de la onda cálida durante el verano de 2022 en la región del Pacífico Norte mexicano.

IV. Metodología

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El ecosistema pelágico de las costas occidentales de BC conforma el dominio sur del SCC, un ecosistema de borde oriental que cuenta con una alta productividad biológica (Mann y Lazier, 2006). En esta región sur del SCC, el flujo de los vientos del norte promueve la advección de la CC hacia el ecuador, favoreciendo la presencia de condiciones subárticas en la capa superficial del Pacífico Norte mexicano en todo el año (aguas frías, baja salinidad y alto contenido de oxígeno disuelto) (Durazo, 2015). Así mismo, la estacionalidad en la intensidad de los vientos del norte controla la formación de surgencias costeras a lo largo de BC, las cuales se presentan con mayor intensidad durante los meses de primavera y verano al intensificarse los vientos del norte (Pérez-Bruinius *et al.*, 2007). Este aspecto induce sobre la región costera la advección vertical de aguas subsuperficiales frías, ricas en nutrientes, hacia la superficie por transporte de Ekman fuera de la costa y bombeo de Ekman, promoviendo condiciones ideales para el incremento en la productividad de fitoplancton (dominio de diatomeas) y, consecuentemente, mayor productividad de zooplancton y dominio de copépodos y eufáusidos de mayor tamaño y alto contenido lipídico (Rykaczewski y Checkley Jr., 2008; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017; NOAA, 2023).

En la región oceánica, la circulación superficial está dominada por el flujo de la CC hacia el ecuador con variabilidad anual en la actividad de mesoescala (Durazo *et al.*, 2010). Durante los meses de primavera, la CC carece de una actividad de mesoescala en su flujo por el ecosistema de BC, a diferencia del resto del año, especialmente en verano, cuando se tiene la mayor actividad de mesoescala, con la presencia de remolinos y meandros que dominan los patrones de circulación de la CC (Durazo, 2015). De acuerdo con Espinosa-Carreón *et al.* (2012), la región de BC se caracteriza por estructuras de mesoescala que causan disminución en la altura superficial del océano, como los son: El giro ciclónico en la Ensenada sur de California (30 °N), un gran giro ciclónico por Punta Eugenia (26-28 °N), el cual sirve como barrera entre el norte y sur de la PBC, permitiendo la prevalencia de condiciones subárticas en la región de BC (Durazo, 2015). Asociado a estos eventos de mesoescala, la productividad del plancton en la región puede ser catalizado por procesos advectivos desde el norte (Espinosa-Carreón *et al.*, 2012), o por advección de volúmenes altos de plancton del sector costera hacia el sector oceánico (Lluch-Belda, 2000).

4.2. COLECTA DE MUESTRAS

Durante la campaña oceanográfica JCFINP/2207 del Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA), llevada a cabo en la temporada de verano de 2022 (27 de julio al 14 de agosto), se visitaron 30 estaciones ubicadas a lo largo de siete transectos perpendiculares a la costa occidental del estado de Baja California. Se obtuvieron 28 muestras de zooplancton (fig. 2), que fueron colectadas con una red tipo Bongo con 70 cm de diámetro y 4 m de largo, equipada con dos redes de luz de malla de 333 y 505 μm , respectivamente, y con contadores de flujo Modelo 2030R (General Oceanics, Inc.) en cada red. Los lances se efectuaron de forma oblicua y la profundidad de arrastre varió entre 15.5 y 212 m, dependiendo de la profundidad del fondo en la estación.

Las muestras obtenidas de la red con luz de malla de 333 μm fueron fijadas con formaldehído diluido al 4% y neutralizado con borato de sodio y se fraccionaron a 1/10 para su subsecuente análisis en el laboratorio. Por su parte, las muestras colectadas en la red con luz de malla de 505 μm se utilizaron para determinar la biomasa del zooplancton mediante el método de volumen desplazado (Postel *et al.*, 2000). Es importante destacar que en las estaciones 53, 54, 64, 65 y 73 se presentaron una gran cantidad de organismos gelatinosos dentro de las redes, los cuales fueron desechados y no se los consideraron dentro de los cálculos de biomasa y abundancia, por lo que los datos presentados a continuación presentan un cierto sesgo para el grupo de gelatinosos.

En cada una de las estaciones se realizaron lances verticales de un perfilador de conductividad y temperatura (CTD, por sus siglas en inglés) marca Idronaut OS 320 plus, el cual fue equipado con sensores integrados y periféricos para cuantificar, adicionalmente, oxígeno disuelto (OD) y clorofila por fluorescencia. La profundidad de los lances de CTD varió con respecto a la profundidad de cada estación.

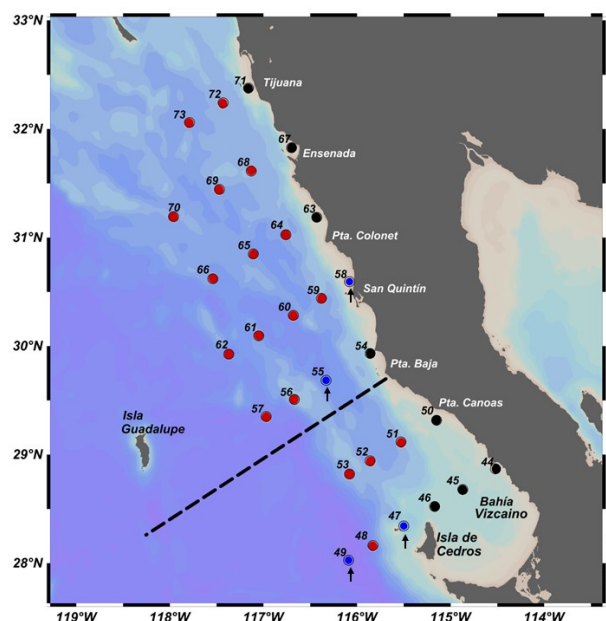


Figura 2. Estaciones de colecta durante la campaña JCFINP/2207 frente a la costa occidental de Baja California (BC), México. Las estaciones color azul y con una flecha negra son aquellas en las que únicamente se realizaron lances de CTD o que no se consideraron por falta de datos de flujómetro (estación 55 y 49). Las estaciones costeras se representan mediante los puntos negros, mientras que las estaciones oceánicas se representan con los puntos rojos. La línea punteada representa la división geográfica entre el norte y sur del estado, propuesto por Lavaniegos *et al.* (2015) para dividir las regiones de la Península de Baja California (PBC).

4.3. Trabajo de laboratorio

Las fracciones de 1/10 destinadas al conteo de los grupos para la determinación de abundancia fueron nuevamente fraccionadas entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{8}$ utilizando un separador Folsom. Posteriormente, el conteo se realizó bajo microscopio estereoscópico (Carl Zeiss Stemi 305) a 25x de aumento y, en base a la guía *A Guide to Marine Coastal Plankton and Marine Invertebrate Larvae* (Smith, 1977), se identificaron los grupos taxonómicos correspondientes.

4.4. Análisis de los datos

La abundancia total de zooplancton, abundancia de los grupos representativos y biomasa se estandarizaron por el volumen de agua de mar filtrada por la red. Éste se calculó utilizando los conteos del flujómetro al momento de entrada y salida de la red correspondiente (333 μm : abundancia total y por grupos; 505 μm : biomasa). Para el cálculo de volumen se cuantificó,

primeramente, la distancia recorrida por la red en metros, a partir de la fórmula descrita en el manual de operación del flujómetro (General Oceanics, Inc.):

$$d = \frac{(Dif_{cont.}) (C_{rot})}{999,999}$$

Donde: $Dif_{cont.}$ corresponde a la resta entre la lectura de salida menos la lectura de entrada del flujómetro y C_{rot} es la constante estándar de velocidad del rotor (26,873).

Posteriormente, el volumen (m^3) se obtuvo a partir de estimar el volumen de un cilindro con un radio (rad) de 0.35 m:

$$Vol = \pi * rad^2 * d$$

Los datos de abundancia total se expresaron en unidades de individuos por m^{-3} , la abundancia por grupos representativos en ind. por $100m^{-3}$ y la biomasa en ml por cada $100m^{-3}$. De las 28 muestras totales, 26 se utilizaron para el análisis de abundancia debido a la falta de datos del flujómetro para poder realizar la estandarización (estaciones 49 y 55), mientras que para la biomasa se utilizaron 23 muestras dado que no se realizaron mediciones de volumen desplazado en las estaciones 70, 60 y 57.

Para realizar la caracterización de las masas de agua presentes en el área de estudio durante el muestreo, así como la representación de la distribución espacial de las variables hidrográficas y biológicas, se generaron diagramas TS y mapas de distribución utilizando el programa *Ocean Data View* (ODV) versión 5.6.3 (Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2022).

Los datos obtenidos de abundancia total no presentaron distribución normal, por lo que se transformaron a logaritmos ($\log_{10}(x+1)$). Se utilizó una prueba t de student para contrastar la abundancia total y biomasa de zooplancton entre las estaciones costeras y las del sector oceánico.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis multivariado. Las diferencias en la composición de la comunidad de zooplancton se determinaron en base al índice de similitud de Bray-Curtis (Clarke y Warwick, 2001), utilizando los datos de abundancia normalizados de las

especies presentes en más de tres estaciones (se excluyó a paralarvas de pulpos y de calamar, debido a que solo se presentaron en tres estaciones). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis jerárquico de cluster para visualizar la agrupación entre las estaciones a partir de la composición de la comunidad de zooplancton (ver fig. 18 en anexos). Finalmente, se aplicó una ordenación escalada multivariada no métrica (NMDS) a los datos utilizados para el cluster, con el propósito de visualizar la agrupación de las estaciones con comunidades similares en dos dimensiones. Se obtuvo un valor de *Stress* ~0.15, el cual entra en el límite máximo aceptable para interpretar el NMDS (Clarke y Warwick, 2001). Para evaluar la diferencia significativa en el agrupamiento de la comunidad de zooplancton, se llevó a cabo un análisis de similitud de una vía (ANOSIM) para contrastar el sector costero con el oceánico y entre la región del norte con la región del sur.

Para caracterizar las condiciones ambientales en cada agrupación del NMDS, se seleccionaron las variables normalizadas de temperatura, salinidad, densidad, contenido de clorofila y oxígeno disuelto a 10 m de profundidad. Se realizaron regresiones lineales múltiples para relacionar las variables ambientales con los scores de las estaciones del NMDS. Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete *vegan* del programa R versión 4.2.0.

V. Resultados

5.1. Condiciones hidrográficas

5.1.1. Masas de agua

Las propiedades hidrográficas de la columna de agua en las costas del Pacífico de BC, se muestran en la fig. 3, al graficar los datos de temperatura conservativa versus salinidad absoluta (TEOS-10) derivados de los datos registrados de temperatura y salinidad del CTD. A partir del diagrama T-S se identificaron cuatro tipos de masas de agua durante el verano de 2022: Agua Superficial Subártica (ASA), Agua Ecuatorial del Pacífico Norte (AEPN; también conocida como Agua Ecuatorial Subsuperficial), Agua Intermedia del Pacífico Norte (AIPN) y Agua Profunda del Pacífico (APP), localizadas en tres capas: superficial (< 100 m), intermedia (100-900 m) y profunda ($> 1,000$ m). Particularmente, la capa superficial se encontró dominada por el ASA, agua característica de la Corriente de California (CC) que fluye con dirección hacia el ecuador, lo cual indica condiciones subárticas en la porción biológicamente activa de la columna de agua en el Pacífico Norte Mexicano. Estas aguas se caracterizaron por temperatura entre 21 a 10 °C y salinidad < 34.3 , además de un alto contenido de oxígeno disuelto (OD), variando la concentración entre 300 a 400 μM de O_2 por L^{-1} entre los 10-50 m de profundidad. El ASA se mantuvo presente hasta ~ 150 m de profundidad. Por debajo de esta profundidad, se localizó el AEPN (100-375 m) con características de alto contenido de sales (> 34.5) y bajo contenido de OD (50-100 μM de O_2 por L^{-1}). Esta masa de agua en particular se le asocia con el flujo de la Contra Corriente de California (CCC), la cual fluye desde el Ecuador con dirección al polo y cruza a través del talud continental de BC (Durazo, 2015). A partir de los 400 m y hasta los 900 m de profundidad, la columna de agua se vio dominada por el AIPN. Esta masa de agua se caracteriza por un alto contenido de sales (> 34.5) y un pobre contenido de OD (< 50 μM de O_2 por L^{-1}). En la capa profunda de la columna de agua ($> 1,000$ m) se localizó el APP, la cual se caracterizó por una pobre concentración de O_2 (< 30 μM de O_2 por L^{-1}), al igual que la AIPN.

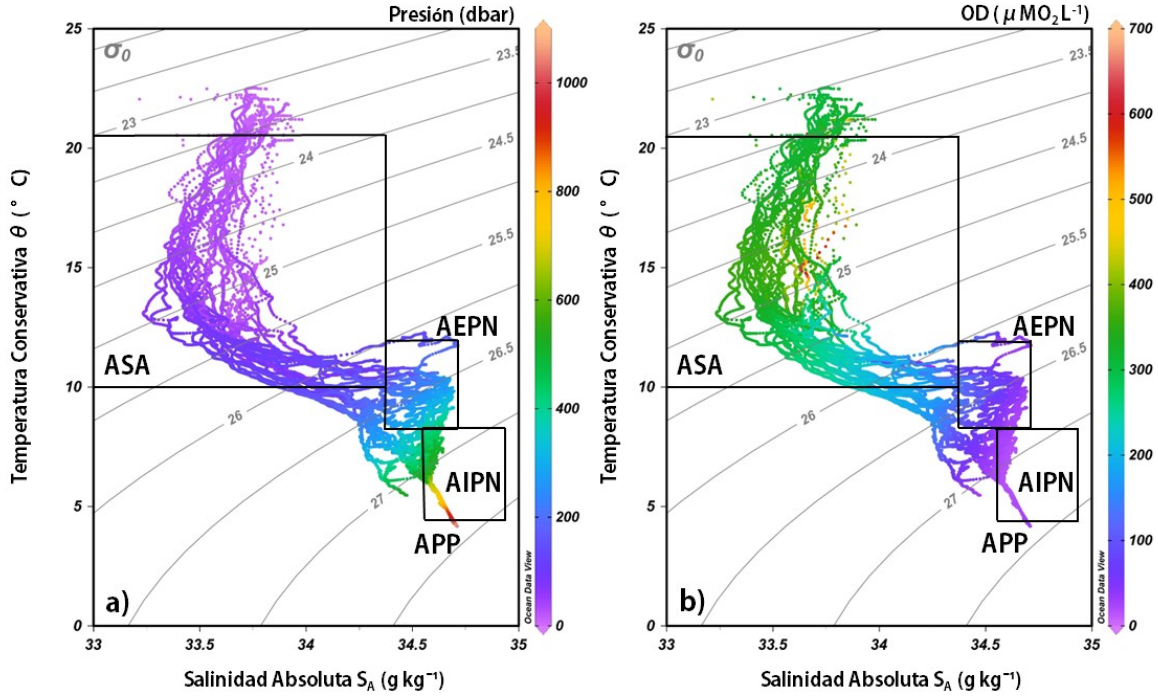


Figura 3. Diagrama de temperatura conservativa (θ) versus salinidad absoluta (S_A) con los datos de todos los lances de CTD realizados en la campaña de verano JCFINP/2207 frente a la costa de BC. En el diagrama a) se indica la presencia de las masas de agua hasta 1,100 m, y en el diagrama b) el contenido de OD en $\mu\text{M L}^{-1}$. Las cajas representan los límites de las masas de agua tanto en θ como en S_A , de acuerdo con Kurczyn *et al.* (2019). ASA: Agua Superficial Subártica; AEPN: Agua Ecuatorial del Pacífico Norte, AIPN: Agua Intermedia del Pacífico Norte; APP: Agua Profunda del Pacífico.

5.1.2. Distribución espacial de temperatura, salinidad y clorofila

La variabilidad espacial de la temperatura, salinidad y contenido de clorofila en el área de estudio se muestran en los mapas de distribución horizontal de las diferentes variables (figura 4). Para la distribución superficial se seleccionaron los datos correspondientes a 10 m de profundidad, para evitar los efectos de la alta radiación solar durante el verano en los primeros metros de la columna de agua. En términos generales, en el verano de 2022 la región del Pacífico Norte frente a BC registró una temperatura promedio de 19.675 ± 2.413 °C, salinidad de 33.563 ± 0.085 (valores correspondientes al dominio de la CC) y 1.088 ± 2.268 mg m⁻³ de contenido de clorofila.

A partir de la distribución superficial de la temperatura (fig. 4a) se identificó que las zonas costeras del Norte de BC presentaron las temperaturas más bajas de toda el área de estudio. De estas estaciones, Ensenada (referido desde ahora como BTS: Bahía de Todos Santos) y Punta Baja

registraron temperaturas $< 15^{\circ}\text{C}$, mientras que el resto fluctuó entre 15 a 16°C . Conforme se alejó de la costa, la temperatura se caracterizó por incrementar de forma paulatina hacia la región oceánica, donde vario entre los 20°C (máx. 22°C). Este patrón costa-océano de la temperatura es un indicativo de eventos de surgencias costeras. Hacia el sur de BC este patrón costa-océano, tanto las estaciones costeras como las estaciones oceánicas registraron temperaturas $> 19^{\circ}\text{C}$ (máx. 22°C).

La distribución de la salinidad superficial (fig. 4b) reflejó que toda la zona de estudio del Pacífico Norte, tanto en la parte costera como el océano abierto, estuvo dominada por agua de la CC (ASA: 33 a 34 PSU, Durazo y Baumgartner, 2002). Las estaciones costeras del norte de BC, donde se identificó la presencia de surgencias costeras, registraron concentraciones de salinidad entre los 33.5 a 33.6 PSU. A diferencia de la temperatura, las estaciones costeras del centro de BC se caracterizaron por presentar salinidades similares a las del norte, dado que fluctuaron, igualmente, entre 33.5 a 33.6. Hacia la región oceánica se apreció una variación latitudinal entre las dos regiones geográficas del estado. En el norte, conforme se alejó de la costa, se observó un incremento de salinidad de hasta 33.7 PSU en el transecto BTS. Después de esta zona, la salinidad en el océano, hacia el sur del área de estudio, no presentó cambios importantes con respecto a la costa. La salinidad se mantuvo prácticamente homogénea, entre los 33.5 a 33.6 PSU.

Con el propósito de observar el efecto de los procesos físicos de la superficie sobre la productividad primaria, se analizó la distribución espacial del contenido de clorofila-a a los 10 m de profundidad (fig. 4c). La clorofila superficial presentó un patrón latitudinal consistente con condiciones mesotróficas (0.2 a 1 mg Chla m^{-3}), como resultado de las surgencias costeras frente a las costas del Norte, las cuales propician el crecimiento de fitoplancton. Particularmente, estas zonas registraron una concentración promedio de $4.575 \pm 3.131\text{ mg m}^{-3}$, con máximas fuera de la Bahía de San Quintín ($\sim 8\text{ mg m}^{-3}$), al N de Punta Colonet ($\sim 4\text{ mg m}^{-3}$) y BTS ($\sim 3\text{ mg m}^{-3}$). En el caso contrario, aunque las estaciones costeras del sur se caracterizaron igualmente por condiciones mesotróficas, el contenido promedio de clorofila fue menor en comparación con el norte ($0.672 \pm 0.233\text{ mg m}^{-3}$). Conforme se alejó de la costa hacia el sector oceánico, las condiciones oligotróficas ($< 0.2\text{ mg m}^{-3}$) prevalecieron tanto en el sector norte como en el sur.

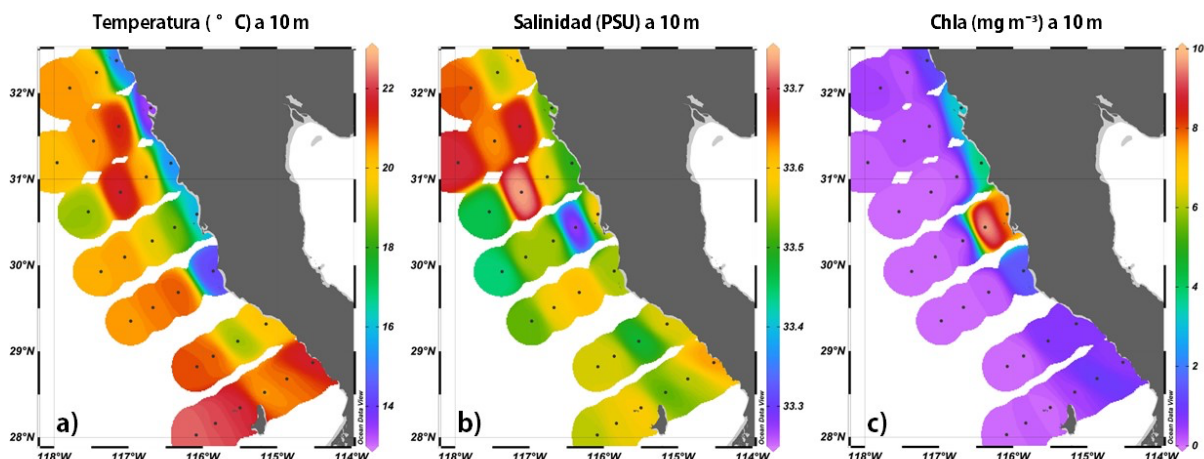


Figura 4. Distribución superficial de temperatura en grados Celsius (a), salinidad (b) y clorofila en mg m^{-3} (c) a 10 m de profundidad. El interpolado se realizó con la opción “Weighted-average gridding” del programa ODV. Los puntos negros hacen referencia las estaciones en las que se efectuaron lances de CTD en la campaña JCFINP /2207.

5.1.3. Secciones verticales de temperatura, salinidad y clorofila

Las características de temperatura, salinidad y clorofila de la columna de agua, de los siete transectos muestreados frente a BC, presentaron comportamientos similares a los mapas de distribución espacial descritos anteriormente; surgencias costeras frente a las costas del norte y aguas cálidas en el sur. Por lo tanto, para evaluar las condiciones de estratificación de la columna de agua hasta los 300 m de profundidad, se seleccionaron los transectos representativos de ambas regiones: Transecto Tijuana (Norte) y Transecto Punta Canoas (Sur), además, se incluyó Punta Baja debido a su cercanía al límite entre ambas regiones geográficas.

La capa superficial (< 100 m) a través del transecto Tijuana se caracterizó por presentar estratificación en los primeros metros como resultado de la radiación solar, variando en intensidad entre la región costera y oceánica. Particularmente, hacia la costa esta capa homogénea de agua cálida ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) se encontró en los primeros seis metros por debajo de la superficie. Por debajo de esta profundidad se identificó un cambio abrupto en la temperatura hasta alcanzar los $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (~ 10 m de profundidad). Esta particularidad se podría deber a la advección vertical de agua fría, sugerida por el ascenso de las isotermas de 16 y $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ hacia la superficie, permitiendo la presencia de agua fría subsuperficial cerca de la costa entre los 10 a 25 m de profundidad. En contraste, a partir de los 30 km fuera de la costa, la región oceánica presentó una columna de agua bien estratificada.

La isoterma de los 13 °C se ubicó por debajo de los 40 m de profundidad, lo cual señala una termoclina bien desarrollada que impidió la intrusión de aguas frías subsuperficiales en la superficie. Por debajo de la región superficial, el límite de temperatura mínima de la CC (isoterma de 10 °C) se localizó a los 100 m de profundidad (fig. 5a).

Mediante la distribución de los contornos de salinidad presentes en la figura 5b se apreció la advección de agua con mayor contenido de sales hacia la superficie cercano a la costa. A los siete metros de profundidad se reflejó un ascenso de la isohalina de 33.6, lo cual coincide con el ascenso de las isotermas de 16 y 13 °C a los 25 m de profundidad. Fuera de la costa, la salinidad no presentó variación en comparación con la costa (salinidad de 33.5) en los primeros metros. No obstante, entre los 20 a 40 m de profundidad y 30 km fuera de la costa, se observó una disminución en la salinidad y se detectó la presencia de un núcleo de baja salinidad, típico de la CC (33.3), cuyo límite máximo de salinidad se detectó hacia profundidades intermedias (100 m). Por debajo de esta, la salinidad incremento nuevamente con la profundidad.

El contenido de clorofila en el transecto Tijuana (fig. 5c) se vio influenciado por la presencia de las surgencias costeras (fig. 4a y b), por lo que el contenido de chl *a* decreció a mayor distancia de la costa. En la región costera se apreciaron condiciones mesotróficas en los primeros metros por debajo de la interfase (1 a 1.5 mg m⁻³) dentro de la capa cálida. No obstante, el máximo contenido de clorofila se registró a los 13 m (3 mg m⁻³), coincidiendo en la zona donde se produjo la advección de agua fría subsuperficial con alto contenido de sales. Conforme se alejó de la costa, y la columna presentó mayor estratificación, se registró una predominancia de condiciones oligotróficas desde la superficie (< 0.2 mg Chl *a* m⁻³) hasta 30 m de profundidad. Por debajo de esta profundidad, el contenido de clorofila aumentó entre 1 a 2 mg m⁻³, coincidiendo con agua de menor temperatura (>17 °C) y mayor contenido de sales (>33.3).

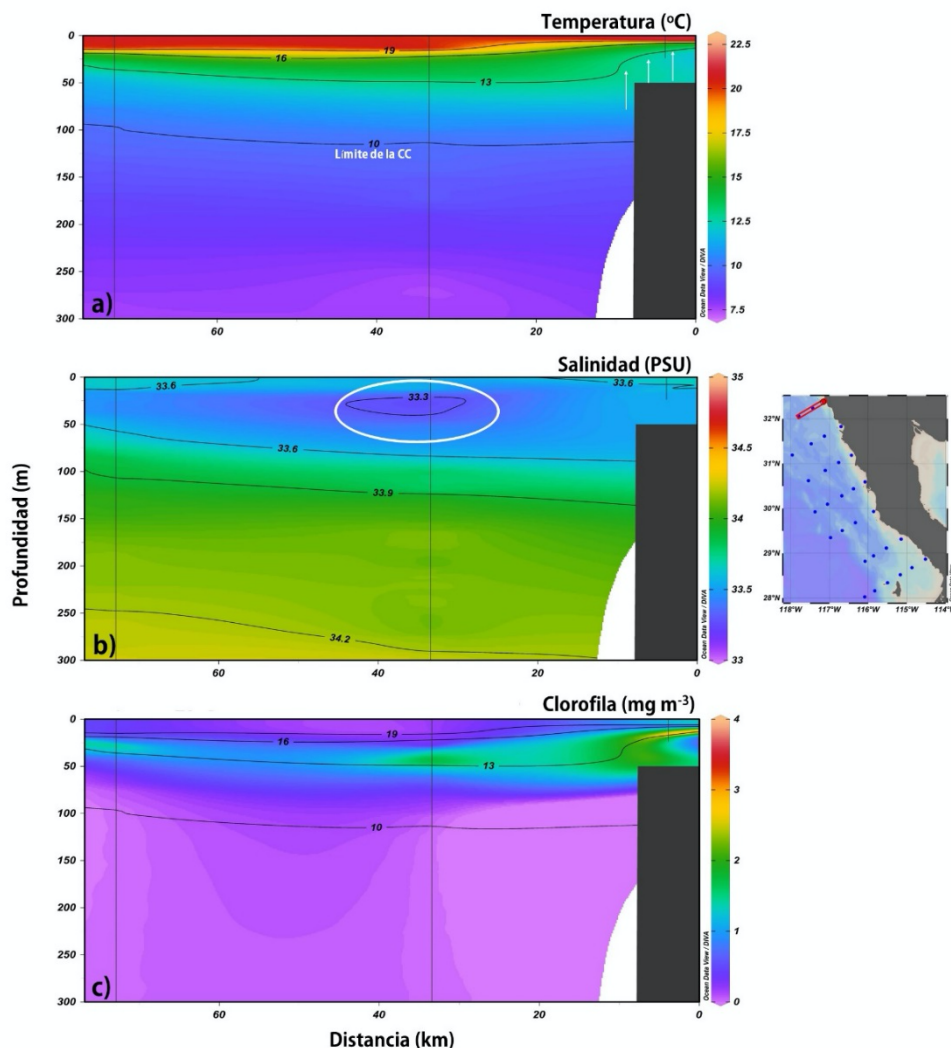


Figura 5. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Tijuana hasta 300 m de profundidad. El intervalo de los contornos de temperatura es 3.0 °C y los de salinidad cada 0.3. Las líneas negras verticales representan los lances de CTD en cada estación muestreada del transecto. Los contornos en la sección de clorofila representan la temperatura cada 3.0 °C. En la sección de temperatura se señala con flechas blancas el ascenso de la isoterma de 13 °C. En la salinidad se muestra el núcleo de baja salinidad (33.3).

En el transecto de Punta Baja (PB) se detectó, igualmente, la presencia de surgencias costeras (fig. 6a). Sin embargo, a diferencia del transecto de Tijuana, el efecto sobre la columna de agua cerca de la costa fue más evidente. Particularmente, las isotermas de los 16 y 13 °C tuvieron un comportamiento ascendente hacia la superficie, registrándose en los primeros metros

por debajo de la interfase cerca de la costa. Lo anterior sugiere un claro afloramiento de agua fría subsuperficial dentro de los primeros 25 m de profundidad, resultado de un evento de surgencias de mayor intensidad que en el caso de Tijuana, la cual favoreció condiciones homogéneas de temperatura y no de estratificación. Conforme se alejó de la costa, a partir de los 50 km de distancia, la columna de agua tendió a presentar un mayor grado de estratificación (isotermas horizontales). La radiación solar favoreció la formación de una capa cálida superficial (isoterma de 19 °C) que se extendió hasta los 25 m de profundidad. A diferencia de la costa, la columna de la región oceánica no exhibió mezcla entre los estratos superficiales y subsuperficiales, lo que sugiere una termoclina bien desarrollada.

Los contornos de salinidad a través del transecto de PB denotaron igualmente un evento de surgencias de mayor intensidad (fig 6b). Hacia la costa, la isohalina de 33.6 ascendió a los 25 m de profundidad, consecuencia del afloramiento de aguas frías subsuperficiales hacia la superficial detectado en la fig #a. En contraste, esta misma isohalina se ubicó entre 125 a 130 m de profundidad en la región oceánica. Asimismo, el límite máximo de salinidad del agua de la CC (33.9) se localizó por debajo de los 150 m de profundidad en la región oceánica. Pero, hacia la costa, este límite ascendió por encima de los 150m de profundidad. Esta particularidad podría estar asociado a la presencia del talud continental. Por otra parte, el núcleo de baja salinidad detectado en Tijuana (33.3) se encontró presente en este Transecto. En esta región el núcleo se ubicó a 100 km fuera de la costa, y con cierto incremento en sus dimensiones (máximo alcance: 25 a 100 m de profundidad).

El contenido de clorofila en PB (fig. 6c) reflejó condiciones mesotróficas desde los primeros metros frente a la costa, como consecuencia del ascenso a la superficie de aguas frías subsuperficiales con alto contenido de sales (33.6) observadas en la fig #a y b. El máximo contenido de clorofila (4 mg m^{-3}) se registró a los 5 m de profundidad. Las condiciones tróficas frente a la costa de PB reflejaron un ambiente oligotrófico ($<0.2 \text{ mg m}^{-3}$) hasta ~ 50 m de profundidad. Fuera de la costa, el contenido de clorofila reflejó condiciones oligotróficas desde los primeros metros de la superficie hasta los 50 m de profundidad, lo que refleja una columna bien estratificada y nulo recambio de nutrientes. Por debajo de los 50 m, las condiciones tróficas del océano incrementaron debido a que se registró un mayor contenido de clorofila ($1\text{-}2 \text{ mg m}^{-3}$), coincidiendo con la isoterma de 13 °C y la isohalina de 33.6.

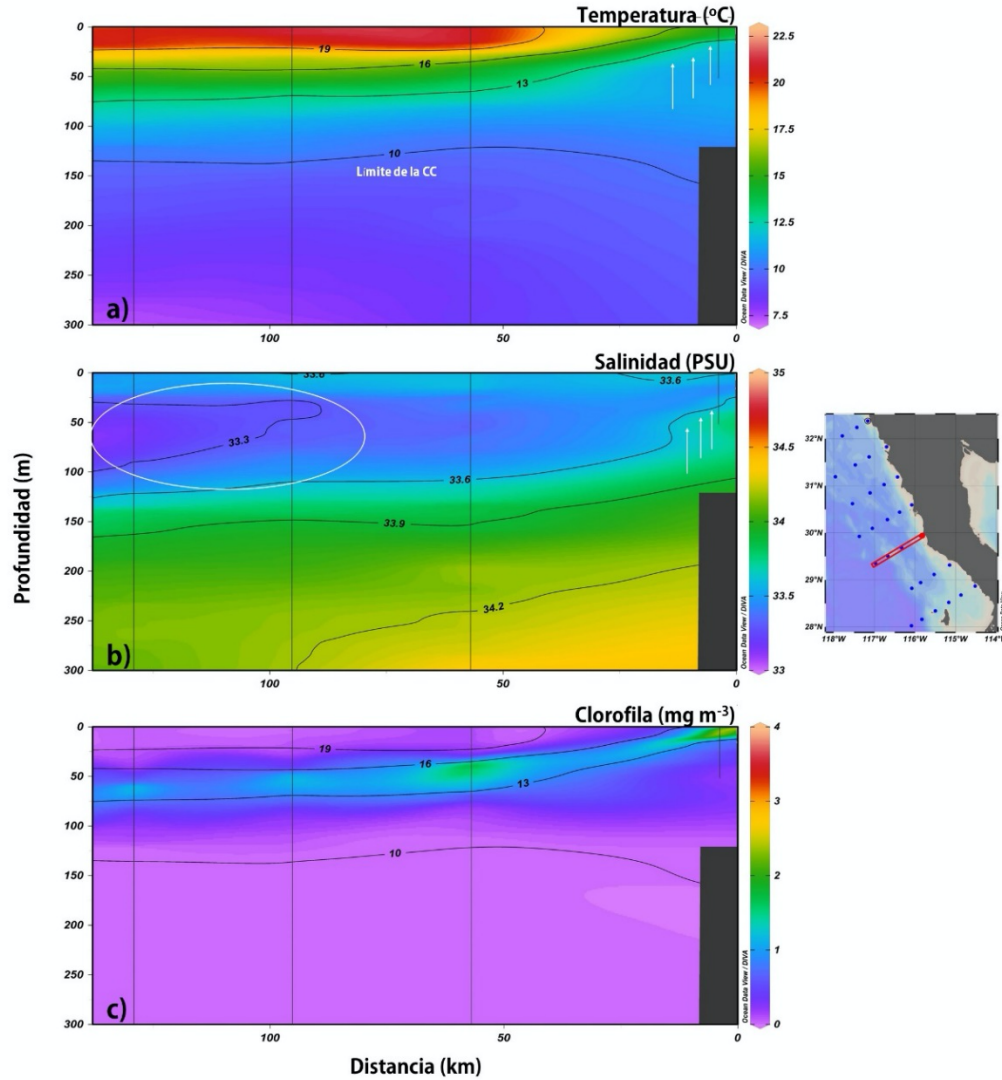


Figura 6. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Punta Baja hasta 300 m de profundidad. El intervalo de los contornos de temperatura es 3.0 °C y los de salinidad cada 0.3. Los contornos en la sección de clorofila representan la temperatura cada 3.0 °C. Las líneas negras verticales representan los lances de CTD en cada estación muestreada del transecto. En la sección de temperatura se señala con las flechas blancas el ascenso de la isoterma de 13 °C, como resultado de la surgencia costra. En la sección de salinidad se señala la isohalina de 33.6 y el núcleo de baja salinidad (33.3).

En el transecto de la región sur, Punta Canoas (PC), la columna de agua se caracterizó por su marcada estratificación tanto en la costa como en la parte oceánica. Cerca de la costa, se identificó una termoclina somera y erosionada por la advección de agua frías subsuperficial, sugerido por el ascenso de las isotermas de los 16 y 13 °C. No obstante, es posible identificar una capa homogénea cálida entre los primeros metros por debajo de la interfase. Este aspecto sugiere que el ascenso de las isotermas se podría deber a dos factores: 1) la configuración de la batimetría del fondo de PC o 2) procesos de mesoescala en la región oceánica (fig. 7a). Hacia el océano, la estratificación de la columna se observó más alejado de la costa (a 100 km de la costa) con temperaturas máximas de 22 °C en la superficie, en contraste con la parte Norte, donde la estratificación oceánica se evidenció desde los 50 km de distancia de la costa.

Los contornos de salinidad (fig. 7b) cerca de la costa denotaron el ascenso de agua subsuperficial con alto contenido de sales (33.6) por encima de los 50 m de profundidad, justo la profundidad donde se observa el ascenso de la isoterma de 13 °C (fig. 7a). Hacia la región oceánica, entre los 45 y 70 km de distancia de la costa, las isohalinas de 33.6 y 33.9 presentaron un levantamiento por encima de los 100 y 150 m respectivamente, coincidiendo con el levantamiento de las isotermas de 16 y 13 °C. Además, hacia los 80 km de distancia de la costa, se detectó nuevamente el núcleo de baja salinidad (33.3) presente en los dos transectos de la región norte. Lo anterior denota cambios en la posición del flujo principal de la CC, posiblemente dada por la formación de meandros. Estos meandros denotan el flujo aproximándose hacia la costa en la parte norte y, conforme esta se desplaza hacia latitudes bajas, se aleja de la costa y se hace más profunda (> 50 m). A diferencia del Transecto Tijuana y PB, aguas con mayor contenido de sales se ubicaron por encima de los 200 m de profundidad, destacándose un núcleo de alta salinidad (>34.5) entre los 250 y 300 m de profundidad, posiblemente indicando advección de aguas tropicales salinas de la CCC.

A pesar de los efectos de estratificación, el contenido de clorofila reflejó un ambiente mesotrófico desde los primeros metros por debajo de la interfase desde la costa hasta 70 km fuera de la costa. En la capa cálida superficial cerca de la costa, el contenido de clorofila fluctuó entre 0.4 a 0.75 mg m⁻³. A partir de los 15 m de profundidad la clorofila alcanzó su contenido máximo (~4 mg m⁻³), coincidiendo con la elevación de la isoterma de 16 °C. Fuera de la costa (> 20 km de distancia) las condiciones tróficas del sistema se mantuvieron constante con respecto con la costa,

sin embargo, el máximo de clorofila ($\sim 3 \text{ mg m}^{-3}$) se localizó por debajo de los 25 m de profundidad, y el contenido se mantuvo constante hasta los 40 m (2 mg m^{-3}) hasta la isoterma de 16°C . La región oceánica a mayor distancia de la costa ($\sim 80 \text{ km}$) presentó condiciones oligotróficas desde la interfase, justo en la región de mayor temperatura (22°C). El ambiente mantendría bajas condiciones de clorofila hasta por debajo de los 50 m de profundidad, donde se registró un aumento entre los 50 y 75 m (ambiente frío de mayor salinidad) (fig. 7c).

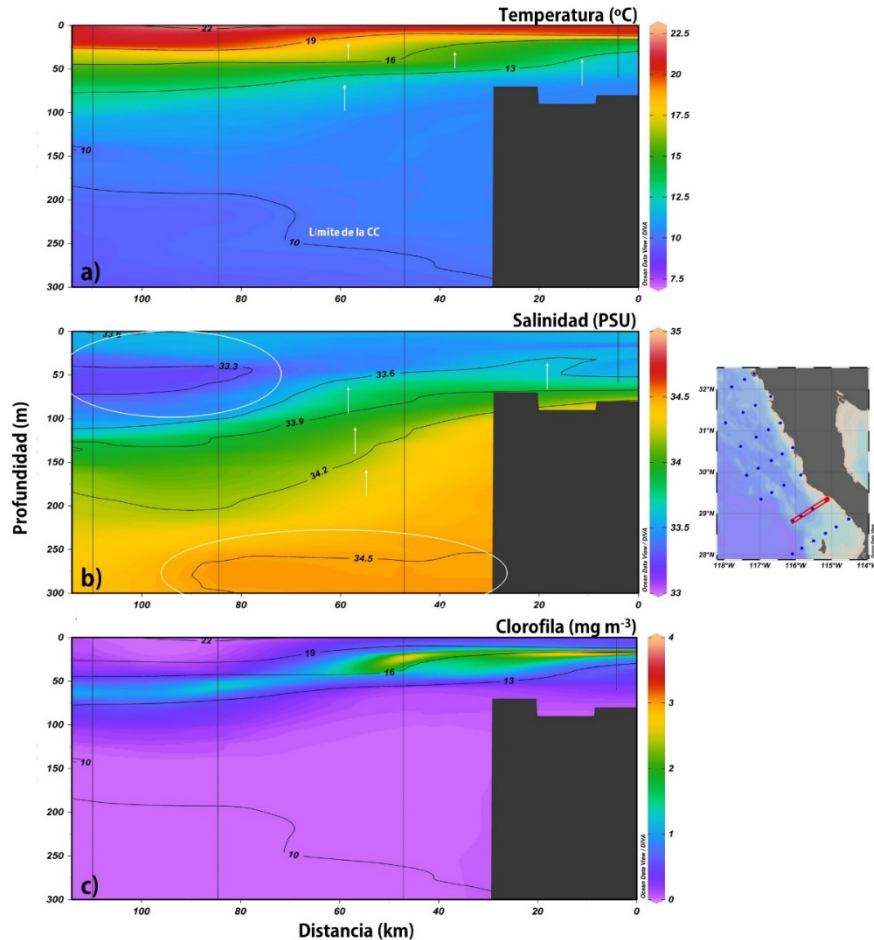


Figura 7. Secciones verticales de temperatura (a), salinidad (b) y clorofila (c) del transecto costa-océano Punta Canoas hasta 300 m de profundidad. El intervalo de los contornos de temperatura es 3.0°C y los de salinidad cada 0.3. Los contornos en el diagrama de clorofila representan a la temperatura con el mismo intervalo que en la figura #. Las líneas negras verticales representan los lances de CTD en cada estación muestreada del transecto. En la sección de temperatura se señala con las flechas blancas las oscilaciones de las isotermas tanto en la costa como en el océano. En la sección de salinidad se señaló el ascenso de las isohalinas en la región oceánica como presunto proceso de mesoescala que favoreció el ascenso de las isohalinas en la costa. Igualmente, se señaló los núcleos de baja salinidad (33.3) y alta salinidad (34.5).

5.2. Estructura de la comunidad de zooplancton

5.2.1. Biomasa

A continuación, se describe la distribución espacial de biomasa en el área de estudio (fig. 8). Es importante denotar que no se contempló la migración vertical o la evasión de la red por parte de los individuos, dado que las colectas fueron realizadas con presencia de luz. Asimismo, hubo un sesgo en la colecta de organismos gelatinosos abundantes (tal y como es descrito en la metodología). Considerando lo anterior, durante el verano de 2022 se registró una biomasa de zooplancton promedio de $42 \pm 66 \text{ ml } 100\text{m}^{-3}$ a lo largo de BC, la cual fluctuó entre 2.34-270 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$.

La distribución espacial de biomasa del zooplancton evidenció un gradiente costa-océano solamente en la región norte de BC, con altas biomásas frente a la costa (131 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$) y baja biomasa en el sector oceánico (14 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$). Los máximos valores de biomasa se registraron frente a la BTS (270 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$) y Punta Baja (200 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$). En contraste, este gradiente costa-océano no se apreció en la región sur. La biomasa presentó incrementos hacia la región oceánica en el transecto 50-53 (49 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$ océano; 20 $\text{ml } 100\text{m}^{-3}$ adyacente a Punta Canoas). Dentro de Bahía Vizcaino se registró la biomasa más baja de todas las estaciones costeras ($\sim 12 \text{ ml } 100\text{m}^{-3}$). No obstante, a pesar de las diferencias observadas en la biomasa de zooplancton entre la costa y el océano, estadísticamente no se encontró diferencias significativas entre la biomasa obtenida de las estaciones costeras y las estaciones del sector oceánico en ambas regiones geográficas ($P = 0.029$). Este aspecto podría estar asociado a la falta de los datos de los organismos gelatinosos (descrito en metodología), los cuales pudieron haber contribuido a la biomasa de zooplancton.

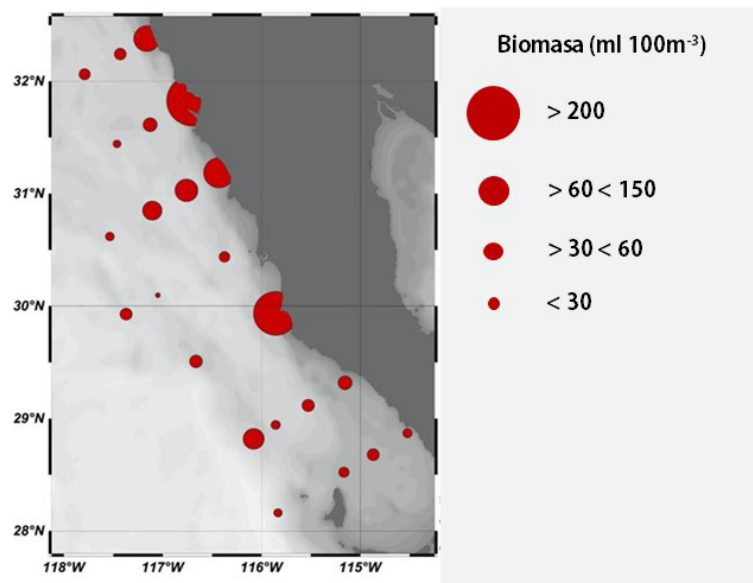


Figura 8. Distribución espacial de biomasa de zooplancton ($\text{ml } 100\text{m}^{-3}$) en el Pacífico Norte Mexicano frente estado al estado de BC en el verano de 2022.

5.2.2. Abundancia total de zooplancton

La comunidad de zooplancton se encontró compuesta por 24 grupos taxonómicos (ver tabla I y II en anexos), de los cuales el grupo dominante de la comunidad fueron los copépodos ($\sim 78\%$). Los cladóceros fueron el segundo grupo más abundante de la comunidad ($\sim 6\%$), seguido por los quetognatos ($\sim 3\%$), apendicularios, sifonóforos, radiolarios, medusas y huevos de peces (agrupando los huevos fecundados, principalmente de anchovetas; y los no fecundados) con un $\sim 2\%$ de representación por cada grupo (fig. 9). En promedio, se registró una abundancia total de $527 \pm 829 \text{ ind m}^{-3}$, con fluctuaciones entre intervalos de 34 a $2,895 \text{ ind. m}^{-3}$.

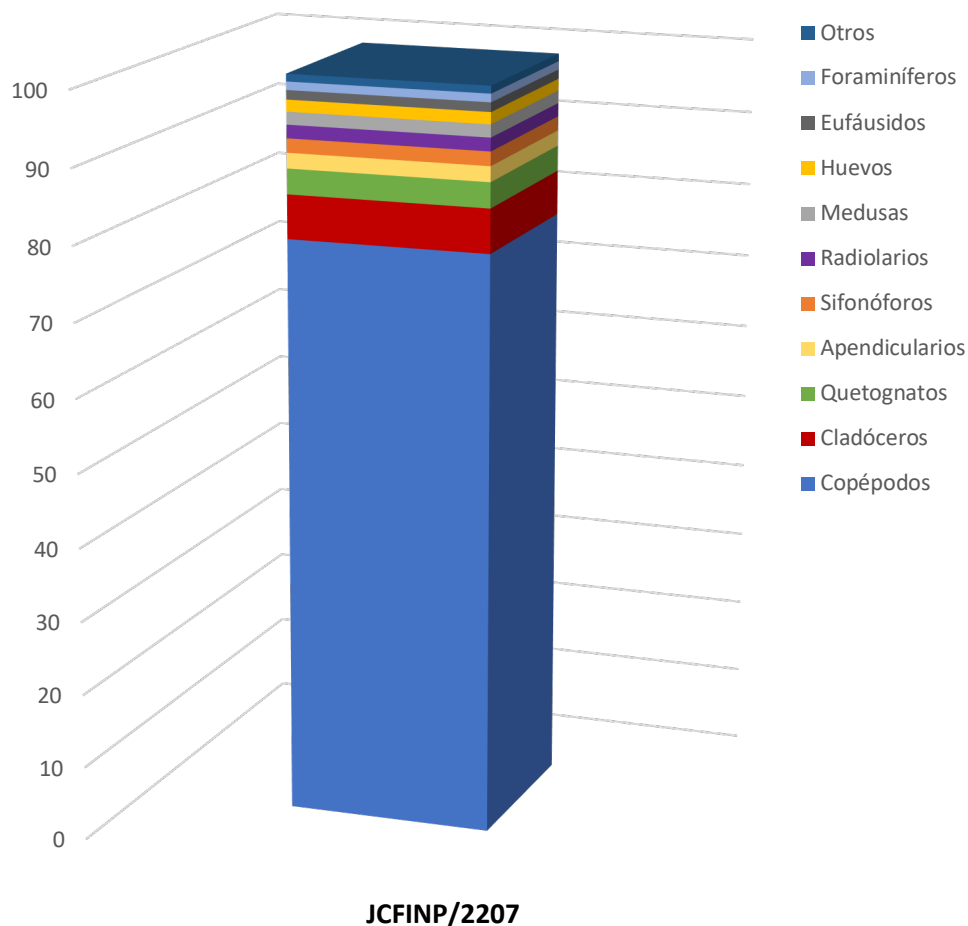


Figura 9. Abundancia relativa (AR) en porcentaje de los grupos taxonómicos con mayor representación de la comunidad de zooplancton durante la temporada de verano de 2022 frente a BC en el Pacífico Norte mexicano. La categoría de “otros” hace referencia a la sumatoria de los grupos taxonómicos con una abundancia relativa < 1% (ver tabla # en anexos).

De manera similar a la biomasa, la distribución espacial de abundancia total de zooplancton reflejó un gradiente costa-océano en ambas regiones (fig. 10), con máxima abundancia cerca de la costa y mínima en el sector oceánico ($P < 5 \times 10^{-5}$). Las mayores abundancias se concentraron primordialmente en las estaciones costeras del norte ($2,152 \pm 984$ ind. m^{-3}), con máximos de 2,894 (Punta Colonet), 2,633 (Tijuana) y 2,622 (Punta Baja) ind. m^{-3} (con excepción de BTS; 458 ind. m^{-3}). En las estaciones costeras de la región sur la abundancia, al igual que la biomasa, decayó con respecto a las del norte. Se registró una abundancia promedio de 693 ind. m^{-3} (máx. 1,073 ind. m^{-3}).

³), lo cual denota condiciones menos productivas probablemente asociadas a las características hidrográficas que prevalecieron en la parte sur, es decir, aguas más estratificadas y ausencia de surgencias costera. La región oceánica se caracterizó por abundancias de zooplancton bajas en ambas zonas geográficas de BC (123 ind. m⁻³ en el Norte; 141 ind. m⁻³ en el Sur), lo cual denotó la prevalencia de condiciones oligotróficas conforme se alejó de la costa (fig. 4 chla).

A pesar de encontrarse cierta similitud en la distribución espacial de biomasa y abundancia total, la correlación entre ambas variables fue baja ($R^2 = 0.18$). Esta pobre correlación entre biomasa y abundancia podría deberse a dos factores: 1) Mayor presencia de organismos con morfología pequeña en la red de 333 μ m, los cuales no contribuyeron a la biomasa. Por ejemplo, frente a Tijuana y Punta Colonet se registraron valores altos de abundancia, pero no se reflejó en una alta biomasa (caso contrario con BTS; baja abundancia y alta biomasa). Y 2) El uso de redes con distinta luz de malla para contrastar variables complementarias y que suelen tener una mayor correlación (ver metodología).

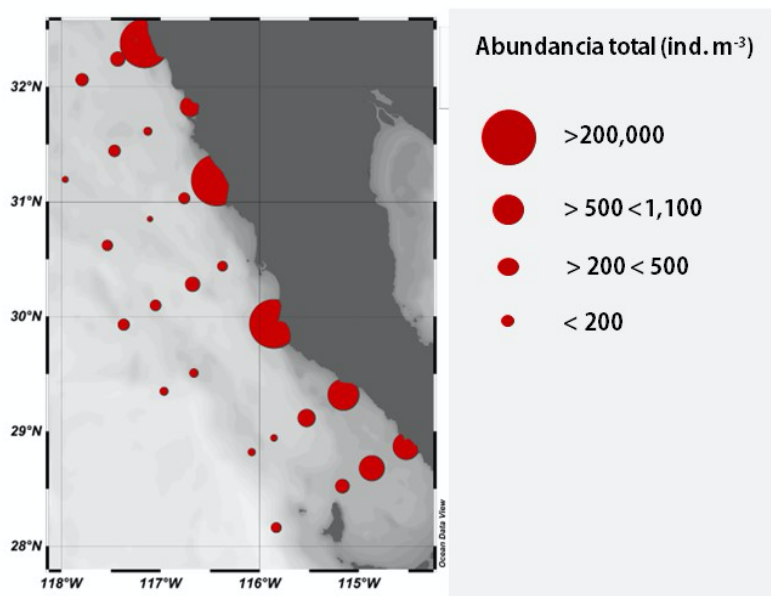


Figura 10. Distribución espacial de abundancia total de zooplancton en el Pacífico Norte Mexicano frente al estado de BC en el verano de 2022.

5.2.3. Análisis de la comunidad de zooplancton

La composición de la comunidad de zooplancton, al igual que la distribución de la abundancia total, reflejó variaciones entre los ecosistemas costeros y oceánicos del Pacífico Norte frente a BC. Los copépodos fueron el principal taxón en ambos ambientes. Sin embargo, la abundancia relativa (A_R) de este grupo en el ecosistema oceánico decayó 30% con respecto de la costa (83% costa; 53% océano). Los cladóceros (7%) y quetognatos (2%) fueron el segundo y tercer grupo con mayor representación en el ambiente costero, respectivamente. Por su parte, en el sector oceánico los quetognatos se encontraron como el segundo grupo con mayor A_R (10%), seguido de los apendicularios (8%), mientras que los cladóceros solo representaron en un 3%. En el ambiente oceánico la comunidad presentó una mayor equitatividad entre los taxones que en la costa. Por ejemplo, taxones como medusas, eufáusidos, sifonóforos, presentaron igualmente incrementos en su A_R con respecto a la costa, lo que señala mayor éxito de estos grupos en el ambiente oceánico que en la costa, donde los copépodos presentan mayor capacidad para explotar los recursos del ambiente costero y desplazar al resto de los taxones (fig. 11).

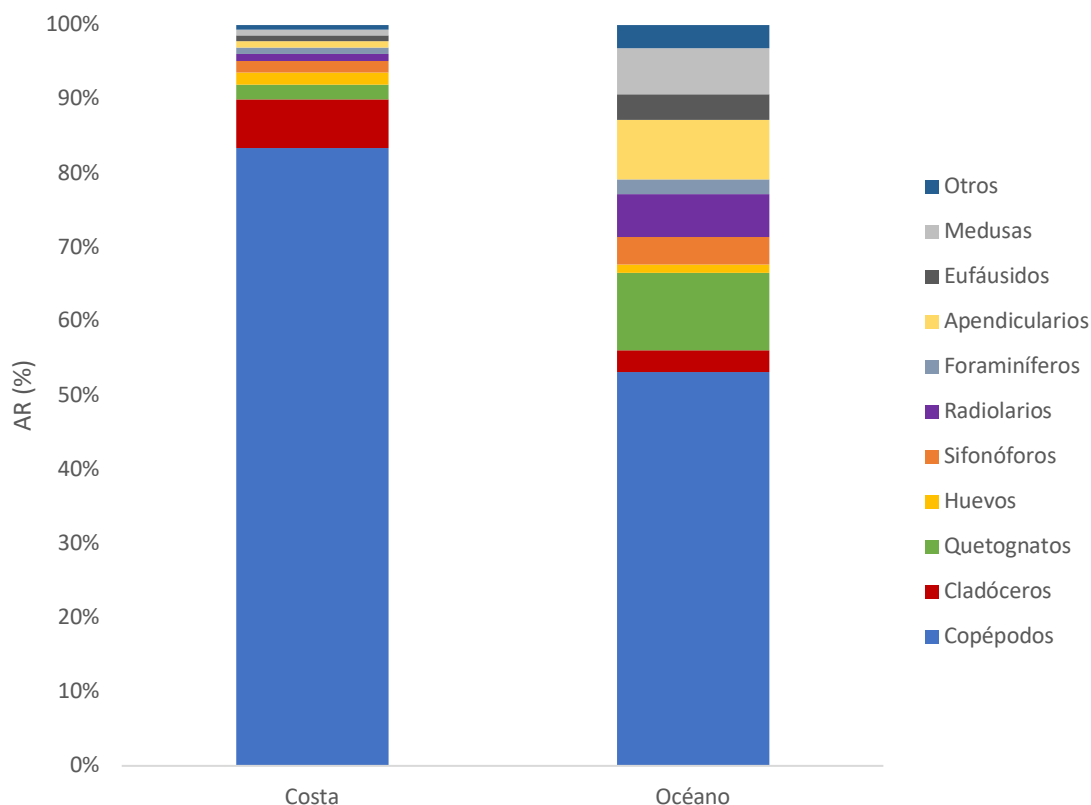


Figura 11. Abundancia Relativa (AR) en porcentaje de los grupos taxonómicos de zooplancton con mayor representatividad ($> 1\%$) en la comunidad costera y oceánica del Pacífico Norte frente a BC. La agrupación apilada se ordenó de mayor a menor A_R para los organismos de la región oceánica, pero no en el océano.

El contraste de la estructura de la comunidad de zooplancton se acentuó al comparar los ecosistemas costeros y oceánicos entre las dos regiones geográficas de BC (fig. 12). En la costa, los copépodos fueron el taxón dominante, pero su contribución a la A_R incrementó en la región costera del sur (80% y 93% en el sector costero norte y sur, respectivamente), y la A_R de los demás grupos difirió entre ambas regiones costeras. En el norte secundaron los cladóceros (9%), seguido de los huevos de peces (2%) y sifonóforos (2%), mientras que en la comunidad costera del sur le siguieron a los copépodos los quetognatos (2%) y los eufáusidos (1%). El resto de los taxones se encontró pobremente representado, con una $A_R < 0.7\%$ en ambas regiones costeras.

En la parte oceánica, la comunidad de zooplancton presentó una mayor similitud entre ambas regiones geográficas, con una mayor representatividad de los grupos menos dominantes. Los copépodos fueron el taxón dominante, pero con menor A_R respecto a la costa (50% en el norte

y 70% en el sur). Después de los copépodos, los ecosistemas oceánicos presentaron similitudes en el resto de la composición de la comunidad de zooplancton, aunque con A_R ligeramente diferentes. Los quetognatos fueron el segundo grupo más abundante (11%), seguido de apendicularios (9%), radiolarios (7%) y medusas (6%), con la diferencia que, en el sur, los sifonóforos (4%) fueron el grupo más representativo (fig. 12).

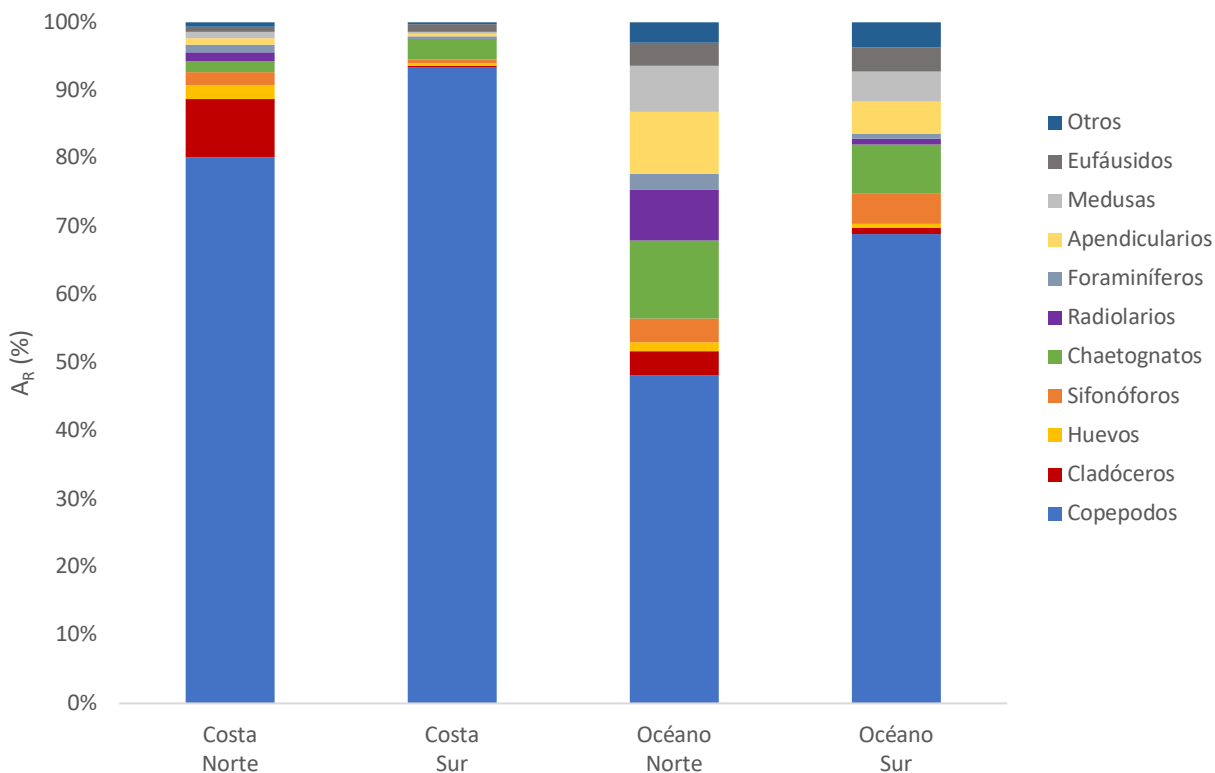


Figura 12. Comparación de la A_R de los taxones de zooplancton con mayor representación en la comunidad ($> 1\%$) entre las dos regiones geográficas de BC. Al igual que la fig. #, el orden de apilado de los taxones se realizó de acuerdo a su A_R (mayor a menor) de la región Costa Norte y se mantuvo en los demás sectores para facilitar la comparación.

En cuanto a los taxones de zooplancton con menor representación ($A_R < 1\%$), es posible denotar que los estadios larvales tanto de organismos holoplantónicos (poliquetos pelágicos) como meroplantónicos (decápodos, peces, equinodermos y percebes), registraron una mayor A_R en el sector costero a diferencia del sector oceánico. En la costa, las larvas de decápodos se distinguieron

como el grupo dominante (59%), seguido de los pterópodos (19%), ostrácodos (8%) y larvas de peces (6%). En contraste, las comunidades del sector oceánico se distinguieron igualmente por una mayor equitatividad entre los grupos. Los ostrácodos fueron el taxón más representativo (27%), secundado por pterópodos (17%), larvas de decápodos (13%) y anfípodos (13%), mientras que el resto de las larvas presentaron $A_R < 1\%$ (con la excepción de larvas de peces). Además, pastoreadores gelatinosos como las salpas exhibieron una mayor A_R en el sector oceánico que en la costa (6% en el océano; $< 1\%$ en la costa) y, en el caso de doliólidos y pirosoomas, estos se encontraron exclusivamente en el océano abierto, con A_R de 3% y 9% respectivamente (fig. 13).

Para ver con mayor detalle la distribución de los taxones de zooplancton con menor representación, en las tablas II y III en anexos se detalla la FO de los grupos en los sectores costeros y oceánicos de ambas regiones geográficas en BC.

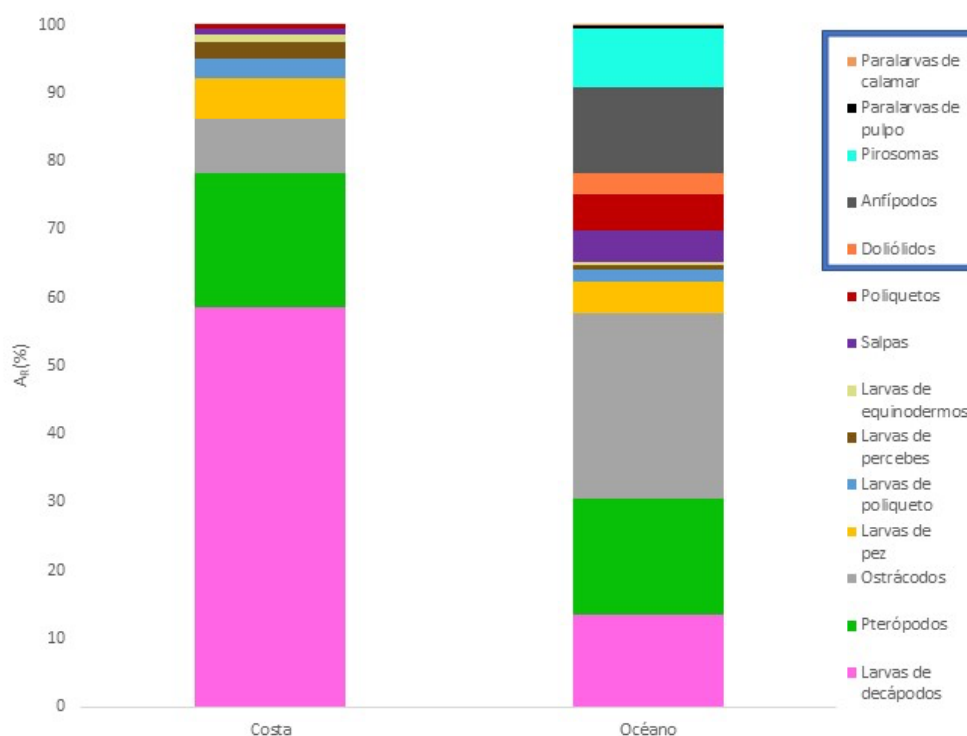


Figura 13. Abundancia Relativa (AR) en porcentaje de los taxones de zooplancton con menor representación ($AR < 1\%$) en el sector costero y oceánicas del Pacífico Norte frente a BC durante el verano de 2022. El grupo de doliólidos, anfípodos, pirosonas, paralarvas de pulpos y calamares se encontraron exclusivamente en el sector oceánico (cuadro azul). Al igual que las figuras anteriores, el orden de apilado se realizó en base a la A_R (de mayor a menor) de los taxones de la zona costera.

No obstante, a partir del dendrograma (fig. 18 de anexos) es posible visualizar que existen tres grupos definidos: grupo oceánico (agrupado tanto por las estaciones oceánicas del Norte como las del sur; Oc), grupo Costa Norte (3 de las 4 estaciones costeras del norte; CN) y grupo Costa Sur (estaciones costeras del sur más PB y dos estaciones oceánicas; CS). Por lo tanto, se consideró que la composición entre las comunidades de la CN y CS no fueron similares, tal y como muestra la abundancia relativa de los grupos más representativos entre regiones (fig. 12). La agrupación de las estaciones en el NMDS (fig. 14) evidenció diferencias en la composición de la comunidad de zooplancton (%) entre las estaciones costeras y oceánicas (ANOSIM: $R = 0.6921$, $P < 0.0001$), pero no así entre las regiones costeras del Norte con las estaciones costeras del sur (ANOSIM: $R = 0.1687$, $P = 0.065$).

Se realizó un análisis de regresión multivariado para identificar las principales variables ambientales que explican el ordenamiento de la comunidad de zooplancton descrito anteriormente. La temperatura ($r^2 = 0.618$) y densidad (0.5934) fueron las variables que presentaron una mayor correlación significativa con el ordenamiento ($P < 0.001$) (fig. #). Particularmente, el aumento de la temperatura explicó la variabilidad de la comunidad de zooplancton entre el sector costero y el sector oceánico (NMDS 1). Por su parte, aguas con menor temperatura y con mayor densidad, asociadas a los eventos de surgencias costeras, explicaron mayormente la variabilidad de la comunidad de zooplancton entre las estaciones de la CN con respecto al grupo de las estaciones de la CS (NMDS 2).

Además de las variables ambientales, se identificaron ciertos grupos taxonómicos como indicadores a las condiciones ambientales. Por ejemplo, las salpas, anfípodos, pirosoomas y ostrácodos destacaron bajo condiciones de mayor temperatura en el sector oceánico. En el caso de la CN, los cladóceros parecen ser un indicativo de las condiciones de surgencias costeras identificadas en la fig. #, a pesar de no ser los más abundantes (copépodos), mientras que en la CS fueron los eufáusidos (fig. 14).

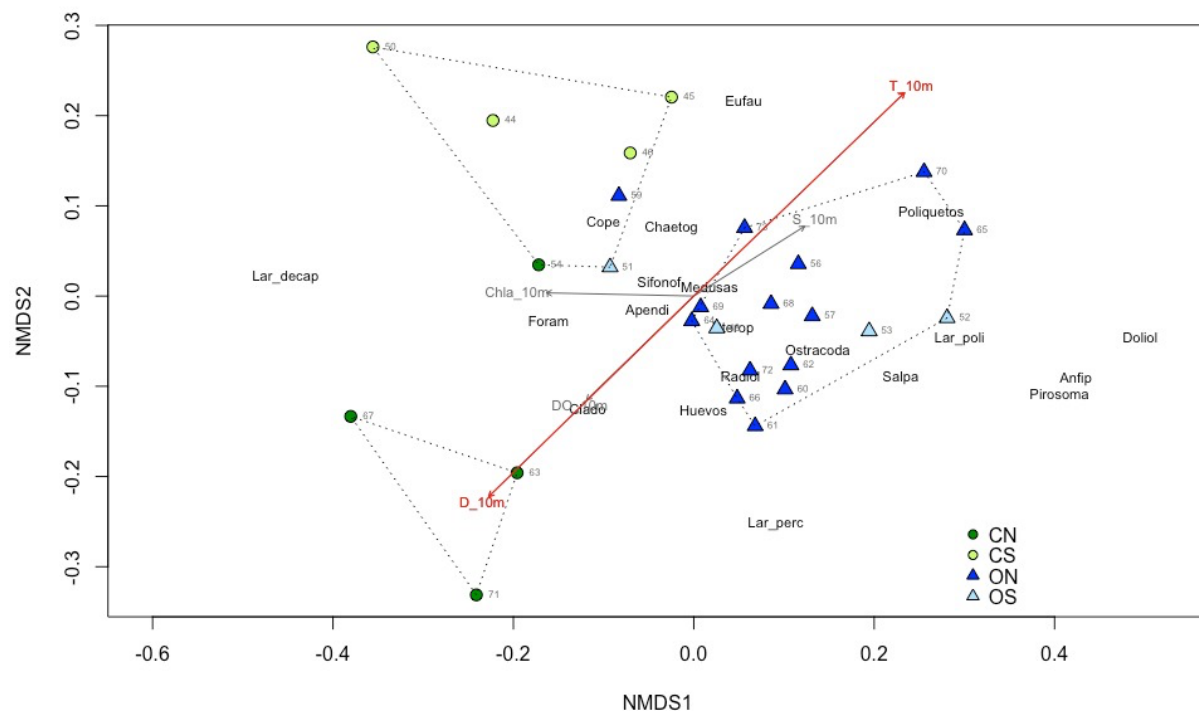


Figura 14. Gráfica del análisis multivariado no métrico (NMDS) bidimensional en la similitud entre las estaciones: Costa Norte (CN), Costa Sur (CS), Océano Norte (ON) y Océano Sur (OS), en términos de la composición de la comunidad de zooplancton (2D stress ~0.15). Las flechas expresan la dirección de aumento de las variables ambientales: temperatura (T_10m), salinidad (S_10m), clorofila (Chla_10m), densidad (D_10m) y oxígeno disuelto (DO_10m), mientras que el tamaño denota la significancia de la variable sobre la composición de la comunidad de zooplancton. T_10 (Pr = 0.001) y D_10 (Pr = 0.001) fueron las variables más significativas.

5.2.4. Distribución de grupos taxonómicos más relevantes de la comunidad de zooplancton ($A_R > 1\%$)

A continuación, se describe de forma sintetizada la distribución espacial y frecuencia de ocurrencia (FO) de los grupos taxonómicos con mayor representatividad ($A_R > 1\%$) de la comunidad de zooplancton durante el verano de 2022 (ver tabla I para promedios de abundancia y FO de estos grupos en anexos). El orden en que se describen los grupos está en concordancia con su dominancia en la comunidad (de mayor a menor A_R). Cabe mencionar que, si bien se detectó en X estaciones la presencia de ctenóforos, principalmente por la presencia de restos de partes del

cuerpo (restos de “peines”), el cálculo de abundancia de los mismos se dificulta y los datos sobre este grupo no son mostrados.

Copépodos: Los copépodos fueron el grupo más relevante de la comunidad de zooplancton (promedio de A_R 78%; y de la abundancia 41,256 ind. $100m^{-3}$) durante el verano. Se encontraron presentes en todas las estaciones y mostraron el mismo patrón observado con la distribución espacial de la abundancia total; con máximos en las estaciones costeras y mínimos conforme se alejó de la costa (fig. 15a)

Cladóceros: Se encontraron presentes en casi todas las estaciones (FO: 92%). Particularmente fueron abundantes en las estaciones costeras del norte, entre 31-32 °N, con máximos de ~ 51,374 ind. $100m^{-3}$ frente a Tijuana. Fuera de esta latitud su abundancia se mantuvo baja (< 90 ind. $100m^{-3}$) tanto en la costa como en el océano (fig. 15b)

Quetognatos: Al igual que los copépodos, los quetognatos (carnívoros) se encontraron presentes en todas las estaciones (~1,796 ind. $100m^{-3}$). Su abundancia se mantuvo con valores similares tanto en la costa como en el océano, presentando su máximo de abundancia adyacente a Punta Colonet (9,152 ind.) (fig. 15c).

Apendicularios: El grupo de los apendicularios (gelatinosos herbívoros) se encontró igualmente distribuido en todas las estaciones (~1,091 ind. $100m^{-3}$). La abundancia de los apendicularios se caracterizó de incrementar fuera de la costa o por variaciones homogéneas entre la costa y el océano. Los máximos de abundancia se registraron adyacente a Punta Colonet (~3,956 ind.) y en la estación oceánica más alejada del transecto Tijuana (3,400 ind.) (fig. 15d).

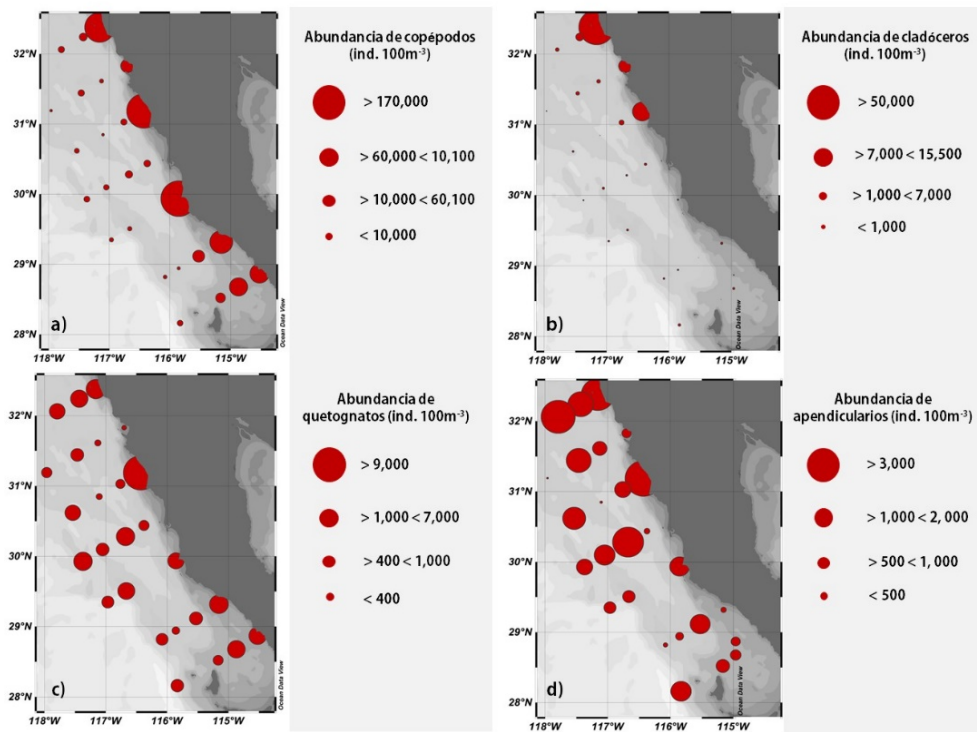


Figura 15. Distribución espacial de la abundancia de copépodos (a), cladóceros (b), quetognatos (c) y apendicularios (d) en el Pacífico Norte frente a la costa occidental de BC en el verano de 2022.

Sifonóforos: Los sifonóforos (gelatinosos carnívoros) estuvieron presentes en todas las estaciones (~ 996 ind. 100m^{-3}). La abundancia de este grupo se mantuvo alta en las regiones costeras del norte, principalmente adyacente a Punta Colonet (12,022 ind.). Hacia el sur su abundancia permaneció similar entre la costa y océano (fig. 16a)

Radiolarios: Este grupo de protistas heterotróficos, los cuales son clasificados en la categoría de microzooplankton ($< 200 \mu\text{m}$), se encontró presente en casi todas las estaciones ($\sim 92\%$). Su abundancia se mantuvo alta en las regiones costeras del norte, con máximos frente a Tijuana (7,010 ind. 100m^{-3}) y Punta Colonet (3,568 ind.). Hacia la región oceánica del Norte la abundancia se mantuvo alta, variando entre los transectos (600 a 2,000 ind.). A partir del transecto de Punta Baja su abundancia decayó por < 400 ind., con abundancia homogénea entre la costa y el océano (fig. 16b).

Medusas: Al igual que los ctenóforos, estos cnidarios (gelatinosos carnívoros) estuvieron presentes en todas las estaciones (893 ind. 100m^{-3}). La abundancia de las medusas se caracterizó por variaciones homogéneas entre costa-oceano o por incrementos hacia la región oceánica (patrón reflejado en el transecto San Quintín y Punta Canoas). La máxima abundancia de este grupo se registró en Punta Colonet con 4,887 ind 100m^{-3} (fig. 16c).

Huevos: Esta categoría engloba tanto a huevos fecundados (anchovetas) como no fecundados. La distribución de huevos se encontró en casi todas las estaciones ($\sim 92\%$). La abundancia de los huevos presentó un gradiente costa-oceano entre las latitudes 32 a 31 °N. Particularmente, frente a Tijuana se registró la máxima abundancia de huevos (16,320 huevos 100m^{-3}), donde el 100% de los huevos identificados pertenecieron a anchovetas. Al sur, la abundancia de huevos se mantuvo baja, y solo dentro de Bahía Vizcaino se encontró la zona con mayor cantidad de huevos en la región sur (~ 848 huevos 100m^{-3}) (fig. 16d).

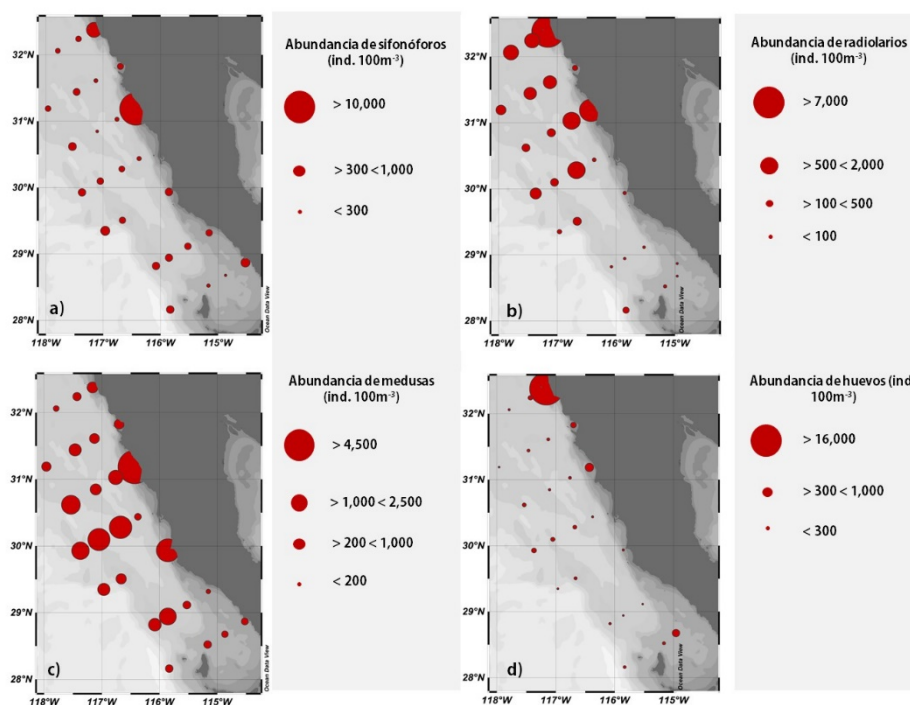


Figura 16. Distribución espacial de la abundancia de sifonóforos (a), radiolarios (b), medusas (c) y huevos de peces (d) en el Pacífico Norte frente a BC en el verano de 2022.

Eufáusidos: Estos crustáceos se encontraron presentes en casi todas las estaciones (92%). A diferencia del resto de los grupos descritos, los eufáusidos incrementaron su abundancia hacia la

región sur. En el norte, su abundancia fue relativamente baja y similar entre la costa y el océano, con un máximo frente a Punta Baja (5, 480 ind. 100m^{-3}). En el sector sur los valores más altos se encontraron en las estaciones intermedias de ambos transectos, con 1, 281 ind. 100m^{-3} en Punta Canoas y 1, 253 ind. 100m^{-3} dentro de Bahía Vizcaino (fig. 17a).

Foraminíferos: Otro grupo representativo de la comunidad de zooplancton en BC, los foraminíferos (protistas heterotróficos) se encontraron en el 92% de las estaciones muestreadas. La abundancia máxima de este grupo se encontró frente a las costas del norte, particularmente en Punta Colonet (6,050 ind. 100m^{-3}) y Tijuana (3, 447 ind.). A partir del transecto de San Quintín y hacia el sur, su abundancia se mantuvo baja y con valores similares entre la costa y el océano (fig. 17b).

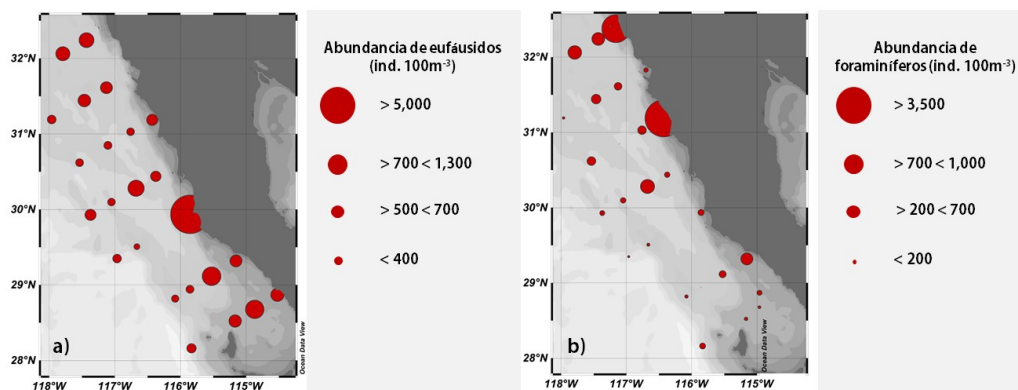


Figura 17. Distribución espacial de la abundancia de eufáusidos (a) y foraminíferos (b) en el Pacífico Norte frente a BC en el verano de 2022.

VI. Discusiones

6.1. Distribución de biomasa y abundancia de zooplancton en el verano de 2022

En el presente trabajo, los resultados obtenidos concordaron con las condiciones abióticas típicas de verano reportadas para la región de BC, con agua fría, de baja salinidad y alto contenido de OD de origen subártico (ASA), así como de un gradiente de temperatura costa-océano (decreciente hacia la costa). Este gradiente se deriva por efectos de surgencias costeras (Durazo *et al.*, 2010; Durazo, 2015), las cuales favorecen incremento en la productividad primaria y florecimiento de fitoplancton de mayor tamaño en la costa (De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017). La temperatura superficial en el verano de 2022 fue baja a lo largo de la costa de BC atribuible a surgencias costeras (fig. #), expresado mayormente en las costas del norte (13 a 16 °C), en contraste con el sector oceánico que registró temperaturas altas (20-22 °C) y mayor estratificación en la columna, aunque con agua correspondiente a la CC en la capa superficial (baja salinidad). Además, el contenido de chl *a* reflejó condiciones mesotróficas cerca de la costa, mientras que en el sector oceánico las condiciones tendieron a ser oligotróficas en toda el área de estudio. Por lo tanto, la presencia de La Niña y de surgencias costeras parecen haber contrarrestado los efectos de la intrusión de la OC de 2022 durante el periodo de muestreo, permitiendo condiciones productivas en la región costera en el ecosistema pelágico de BC.

La productividad de zooplancton en la región de BC se ha asociado a los eventos de surgencias costeras y advección de la CC, los cuales permiten el enriquecimiento en el sector costero y procesos de transporte y retención en el sector oceánico, respectivamente (Lluch-Belda, 2000). De acuerdo con Lavaniegos *et al.* (2010), quienes analizaron los patrones estacionales de biomasa y abundancia de zooplancton en la región con datos históricos de CalCOFI (1951-1966) e IMECOCAL (1997-2008), la mayor biomasa y abundancia en BC se concentran a lo largo de la costa y se sincronizan con las temporadas de surgencias costeras en primavera y verano, destacándose verano como la temporada de máxima productividad. Además, los autores registraron una tendencia bien marcada en la distribución de ambas variables, en las que la biomasa y abundancia de zooplancton se distribuyen en forma de gradiente costa-océano, con máximos valores en la costa y mínimos en el sector oceánico. La distribución de biomasa y abundancia obtenida durante el verano de 2022 es concordante con lo descrito para la región. Los mayores

valores de biomasa y abundancia total en el estudio se concentraron a lo largo del sector costero ($86.16 \text{ ml } 100\text{m}^{-3}$ y $1,423 \text{ ind m}^{-3}$), sector que se destacó por mayor disponibilidad de alimento (es decir, mayor clorofila) por efecto de las surgencias costeras. Durante los periodos de surgencias costeras, el transporte de Ekman de agua fuera de la costa fomenta la advección vertical de la nutriclina desde la subsuperficie hacia la superficie por bombeo de Ekman en la costa, lo que incrementa la concentración de nutrientes aprovechables por el fitoplancton (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010) y, subsecuentemente, se generan áreas de alta disponibilidad de alimento para el zooplancton (Messié y Chavez, 2017). Lo que provoca que los máximos de biomasa y abundancia de zooplancton en la región durante el verano de 2022 coincidan con los sitios de máxima productividad primaria.

El sector oceánico generalmente suele presentar menor productividad en contraste al sector costero (Lluch-Belda, 2000). En el presente trabajo se registró una baja productividad de zooplancton en el sector oceánico ($18.18 \text{ ml } 100\text{m}^{-3}$ y 132 ind. m^{-3}) en contraste con el sector costero, sin embargo, a diferencia de la abundancia, la biomasa de zooplancton en el verano de 2022 no decayó drásticamente conforme se alejó de la costa. En el transecto de San Quintín la biomasa se mantuvo alta tanto en la costa como en el sector oceánico, mientras que al sur de BC, la biomasa incrementó en el sector oceánico o varió ligeramente con respecto de la costa. De acuerdo con Checkley Jr. y Barth (2009), en el SCC existen procesos de mesoescala, como lo son remolinos y meandros, que generan inestabilidad en la columna e incrementan la productividad lejos de la costa. En los transectos de Tijuana, PB y PC se evidenció la presencia de alto contenido de clorofila fuera de la costa en los tres sitios, generando un máximo de clorofila profundo ($>1.5 \text{ mg m}^{-3}$) a 50 m, posiblemente asociado a filamentos de meandros de la CC, tal y como se describe en Espinosa-Carreón *et al.* (2012). De acuerdo con los autores, la intensificación de los vientos del norte en BC durante verano provoca que las corrientes geostróficas se desplacen fuera de la costa y se produzcan meandros que transportan de forma horizontal fitoplancton hacia fuera de la costa. De manera similar, Gruber *et al.* (2006), mediante modelos matemáticos, identificaron procesos advectivos horizontales de partículas, tanto de fitoplancton como de zooplancton, desde el sector costero al oceánico como resultado de meandros y remolinos en el SCC, los cuales se originan por el cúmulo de energía por la intensa fricción del viento sobre la CC en primavera y verano (Checkley Jr. y Barth, 2009). Por lo tanto, el transporte horizontal desde las regiones de alta concentración de zooplancton (costa) por procesos de mesoescala explicarían la baja variabilidad

de biomasa de zooplancton entre el sector costero y oceánico de BC. Es importante destacar que se removieron organismos gelatinosos en algunas muestras oceánicas previo a la determinación de biomasa, por lo que la biomasa en el sector oceánico pudo haber sido mayor a lo que se está reportando y permitiría visualizar de manera más claro el posible transporte horizontal por procesos de mesoescala durante el periodo de muestreo.

6.2. Estructura de la comunidad de zooplancton

Si bien la determinación de biomasa de zooplancton permite identificar tendencias en cuanto a la productividad del zooplancton con respecto a las condiciones del sistema, esta variable es susceptible a la composición de la comunidad y los grupos dominantes que la constituyen, tal y como se ilustra en Lavaniegos *et al.* (2010), por lo que es crucial determinar la abundancia de los grupos taxonómicos para tener un panorama más amplio de los efectos ambientales sobre el zooplancton. Johnston *et al.* (2022) documentaron que las variaciones observadas en la composición y la dominancia de los grupos del zooplancton típicos en el ecosistema del Océano Austral sirven como indicadores del estado del ecosistema, dado que se han registrado aumentos en la abundancia de salpas y copépodos ante el incremento de la temperatura y el deshielo en esta región. Además, los autores destacaron que analizar la composición del zooplancton a nivel comunidad ilustra interacciones tróficas y competitivas que no se observarían a nivel población. Así mismo, Lavaniegos *et al.* (2015) identificaron sucesiones en la dominancia de los grupos funcionales de zooplancton en la región de BC con la variación anual e interanual del SCC.

De las 26 muestras utilizadas en el presente trabajo se identificaron un total de 24 grupos taxonómicos en la comunidad de zooplancton de BC. En base a la A_R y FO de los organismos, los copépodos fueron el grupo más dominante, secundados por los cladóceros y quetognatos durante el verano de 2022. Lo anterior es concordante para la región de BC, donde se ha distinguido que los copépodos son el grupo más abundante, correspondiendo entre un 48 a 60% en el último informe de IMECOCAL (Lavaniegos *et al.*, 2010), aunque para este periodo del verano de 2022 su dominancia fue aún mayor (78%), mientras que la de cladóceros, que generalmente representa una pequeña parte en los grupos más representativos ($\leq 5\%$) (Lavaniegos *et al.*, 2010), en el verano de 2022 fueron el segundo grupo más abundante con 6%. En el caso de los otros grupos registrados, los quetognatos estuvieron en el tercer puesto con 3%. Este grupo suele representar una alta fracción de la comunidad de zooplancton después de los copépodos en la región, variando en el

transcurso del año entre el tercer y cuarto puesto (Lavaniegos *et al.*, 2008; Lavaniegos *et al.*, 2009; Lavaniegos *et al.*, 2010). La diferencia más notoria entre lo que se observa en el verano de 2008 (La Niña) con el verano de 2022 radicó en la baja abundancia de los eufáusidos en el presente trabajo (noveno grupo más representativo), cuando suelen estar presentes como el segundo grupo más representativo después de los copépodos. Sin embargo, su baja abundancia pudo deberse a que las colectas se realizaron en su mayoría durante el día y la evasión a la red por parte de los organismos es alta (Brinton, 1967). De acuerdo con el autor, las especies de eufáusidos presentes en el SCC tienen hábitos migratorios en la columna de agua (150-300 m) y suelen ascender a la superficie durante la noche. Además, el autor atribuyó una capacidad de evasión de la red por parte de los eufáusidos al obtener densidades de captura similares entre el día y la noche. Si bien los eufáusidos se encontraron en baja proporción, es importante denotar que el grupo se conformó en su mayoría por larvas en estadio furcilia (~80%). De acuerdo con Brinton (1979), la migración vertical de los eufáusidos varía en función a su ciclo de vida, en el que las larvas suelen localizarse en profundidades someras en comparación a los adultos, lo que explicaría la alta cantidad de larvas de eufáusidos durante el muestreo.

La variabilidad de las abundancias, la diversidad y riqueza de los grupos taxonómicos que constituyen las comunidades de zooplancton sirven como indicativos para detectar cambios interanuales, dependiendo de la escala espacial y temporal que se analice (Hernández-Trujillo *et al.*, 2010). La comunidad de zooplancton del verano de 2022 exhibió una marcada variabilidad en la equitatividad de los grupos taxonómicos más representativos ($A_R > 1\%$) entre el sector costero y el oceánico. Si bien los copépodos fueron el grupo más dominante en ambos sectores, en el sector costero se registró una mayor dominancia de este grupo respecto al resto de los integrantes de la comunidad (83% de A_R), así como una mayor cantidad de cladóceros y huevos de peces respecto al sector oceánico. Por otro lado, en el sector oceánico donde los copépodos también fueron dominantes, aunque en menor magnitud (53%), se observó una mayor equitatividad entre el resto de los grupos dominantes, con quetognatos y apendicularios aumentando su A_R con respecto a la costa, y una baja proporción de cladóceros y huevos de peces. Esta diferencia en las abundancias relativas se observó igualmente entre los grupos menos representativos del zooplancton ($A_R < 1\%$). En la costa se presentó una mayor proporción de estadios larvales del meroplancton (decápodos y peces), mientras que en el sector oceánico incrementó la A_R de salpas y otros grupos gelatinosos,

como los doliólidos y pirosoomas, siendo que ocurrieron estos dos últimos exclusivamente en el sector oceánico.

Generalmente, los crustáceos (copépodos y eufáusidos) son el grupo dominante de zooplancton en la región de BC, y se los asocia a las condiciones productivas del ecosistema. Sin embargo, se ha distinguido al grupo de tunicados (salpas, doliólidos y pirosoomas) como indicadores de aguas cálidas y de mayor estratificación durante El Niño en la región de BC (Lavaniegos *et al.*, 2010). Lavaniegos *et al.* (2002) documentaron alta biomasa de zooplancton durante el periodo de El Niño 1997-1998 en BC, a pesar de la baja concentración de clorofila y baja abundancia de copépodos. Los autores asociaron esta alta concentración de biomasa a la alta abundancia de salpas, las cuales son capaces de alimentarse de células pequeñas a diferencia de los copépodos. Asociado a lo anterior, este mismo patrón de incremento en la abundancia de tunicados durante eventos de calentamiento y estratificación ha sido documentado en otras regiones del Pacífico Norte. Pinchuck *et al.* (2021) documentaron por primera vez densos *blooms* de doliólidos (máximo de 3,847 ind. m⁻³) fuera de la costa del golfo de Alaska, derivado de la propagación de la onda cálida El Blob y El Niño entre 2014-2016. Así mismo, las pirosoomas en el SCC han incrementado su abundancia coincidiendo con las condiciones anómalas de aumento de temperatura y salinidad durante la propagación de El Blob y El Niño (2014-2016) y la onda cálida de 2019-2020 (Weber *et al.*, 2021). Al sur de la PBC, en la Bahía de Paz Coria-Montiel *et al.* (2020) reportó un aumento de presencia de organismos gelatinosos asociado al incremento de la temperatura entre los veranos de 2008 y 2009. En el presente trabajo, a partir del análisis NMDS (fig. 15) se distinguió que la temperatura fue la variable asociada a la diferenciación entre dos grupos de estaciones, las comunidades de la costa y las del sector oceánico. En las del sector oceánico las salpas y doliólidos predominaron en las estaciones con tendencia de incremento de temperatura superficial hacia el sector oceánico, junto con condiciones de mayor estratificación térmica en la columna y baja disponibilidad de alimento (bajo contenido de clorofila), aunque su abundancia fue baja y no contribuyeron en gran medida a la abundancia total de la comunidad ($A_R < 1\%$), lo que evidencia condiciones típicas del ecosistema de BC.

Además de las diferencias entre las comunidades de la costa y el océano, el diagrama NMDS reflejó variaciones entre las comunidades de la costa norte y la costa sur. En ambos sectores se obtuvieron indicadores biológicos de condiciones productivas (cladóceros en la costa norte y

eufáusidos en la costa sur). La diferencia radicó en la respuesta de la comunidad a las condiciones ambientales del verano de 2022. Tal y como se observó en el sector oceánico, el incremento en la temperatura determinó la variación entre ambas regiones geográficas de la costa de BC, particularmente incrementando en las costas del sur, a diferencia de las costas del norte caracterizadas por la presencia de surgencias costeras. La mayor temperatura en las costas del sur puede deberse a una mayor incidencia de la radiación solar en la superficie a latitudes más bajas, y la ausencia del efecto de surgencias costeras durante el muestreo en ese sector. Asociado a lo anterior, se observó un bajo contenido de clorofila en las costas del sur y disminución en la abundancia de los grupos taxonómicos, en contraste con las costas del norte que presentó abundancias superiores a un orden de magnitud (por ejemplo, 172,552 ind. m⁻³ de copépodos en las costas del norte, 64,804 ind. m⁻³ en las costas del sur). De acuerdo con Zaytsev *et al.* (2003), los vientos favorables a surgencias costeras a lo largo de BC se mantienen en primavera y verano en la región norte, y decrecen en intensidad hacia la porción sur en verano, induciendo un incremento en la temperatura superficial de esta región por periodos prolongados en esa temporada. Mancilla-Peraza *et al.* (1993) documentaron que la columna de agua en la región de Sebastián Vizcaino presenta altas temperaturas (> 21 °C) y fuerte estratificación durante el verano, debido a los periodos de relajamiento de las surgencias costeras y el incremento de calor sobre la superficie, inhibiendo la mezcla y el ascenso de aguas subsuperficiales. Por su parte, Lavaniegos *et al.* (2015) puntualizaron un descenso en la abundancia de crustáceos en la región sur de BC entre 2007-2013, asociado a cambios interanuales en la temperatura superficial del mar, afectando la productividad primaria del ecosistema al inhibirse el ascenso de la nutriclina hacia la superficie (De la Cruz-Orozco *et al.*, 2017), y, como lo evidencia la biomasa y la abundancia total (fig. 8 y 10, respectivamente), disminución de zooplancton en la región sur de BC.

VII. Conclusiones

- La presencia de la Niña contrarrestó los efectos de la OC22 en el ecosistema pelágico occidental en BC durante el periodo de muestreo del verano de 2022, al favorecer la presencia de agua subártica típica de la CC y surgencias costeras a lo largo de la costa, lo que promovió una alta productividad en este sector.
- La distribución de biomasa y abundancia total del zooplancton reflejó la variabilidad entre ambas regiones. Los mayores valores de ambas variables se concentraron a lo largo de la costa, coincidiendo con los sitios con mayor disponibilidad de alimento por efecto de las surgencias costeras, mientras que, en el sector oceánico, la biomasa y la abundancia total decayó, resultando de un ambiente cálido y de condiciones oligotróficas.
- La biomasa zooplanctónica no decayó drásticamente como en el caso de la abundancia. Este aspecto pudo resultar de un transporte horizontal por meandros de la CC, los cuales transportan tanto fitoplancton como zooplancton desde la costa hasta la región oceánica, favoreciendo el aumento en la productividad del sector oceánico.
- La estructura de la comunidad de zooplancton reflejó las condiciones típicas del ecosistema de BC en el verano de 2022, con dominancia por parte de crustáceos, principalmente por copépodos (80% A_R), tanto en el sector costero como en el sector oceánico.
- En el sector costero, las surgencias costeras promovieron condiciones tróficas favorables al zooplancton, en el que los copépodos y cladóceros fueron los grupos más dominantes.
- Por el contrario, el sector oceánico se caracterizó por presentar temperaturas altas y mayor estratificación y condiciones oligotróficas. Este aspecto se reflejó como cambios en la equitatividad entre los taxones dominantes de la comunidad, por el incremento en la abundancia relativa de grupos como tunicados y quetognatos en comparación con el sector costero.
- Asociado a lo anterior, el análisis de ordenamiento NMDS reflejó diferencias entre las comunidades costeras y oceánicas, en el que la temperatura y la densidad fueron las variables que más se correlacionaron con el agrupamiento de las muestras, con aguas más densas, por efecto de las surgencias costeras, asociadas a las estaciones costeras y aguas con mayor temperatura a las del sector oceánico.

VIII. Bibliografía

- Ayón, P., Swartzman, G., Espinoza, P., y Bertrand, A. (2011). Long-term changes in zooplankton size distribution in the Peruvian Humboldt Current System: Conditions favouring sardine or anchovy. *Marine Ecology Progress Series*, 422, 211–222. <https://doi.org/10.3354/meps08918>.
- Batten, S. D., y Welch, D. W. (2004). Changes in oceanic zooplankton populations in the north-east Pacific associated with the possible climatic regime shift of 1998/1999. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9), 863-873.
- Beaugrand, G., Reid, P. C., Ibanez, F., Lindley, J. A., y Edwards, M. (2002). Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, 296(5573), 1692-1694.
- Bograd, S. J., Checkley Jr, D. A., y Wooster, W. S. (2003). CalCOFI: a half century of physical, chemical, and biological research in the California Current System. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14-16), 2349-2353.
- Brinton, E. (1967). Vertical migration and avoidance capability of euphausiids in the California Current. *Limnology and Oceanography*, 12(3), 451-483.
- Brinton, E. (1979). Parameters relating to the distributions of planktonic organisms, especially euphausiids in the eastern tropical Pacific. *Progress in oceanography*, 8(3), 125-189.
- Brinton, E., y Reid, J. L. (1986). On the effects of interannual variations in circulation and temperature upon euphausiids of the California Current. *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 49, 25-34.
- Checkley, D. M., y 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>.
- Roesler, C. S. (1987). Zooplankton Variability in the California Current, 1951-1982. [Tesis de Maestría, Oregon State University]. Google Scholar.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. A., de León, D. A. S., y Durán-Campos, E. (2020). Zooplankton abundance during summer in the bay of la paz (Southwestern gulf of California,

- Mexico). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48(5), 794–805.
<https://doi.org/10.3856/vol48-issue5-fulltext-2515>.
- De la Cruz-Orozco, M. E., Gómez-Ocampo, E., Miranda-Bojórquez, L. E., Cepeda-Morales, J., Durazo, R., Lavaniegos, B. E., Espinosa-Carreón, T. L., Sosa-Ávalos, R., Aguirre-Hernández, E., y Gaxiola-Castro, G. (2017). Phytoplankton biomass and production off the Baja California Peninsula: 1997-2016. *Ciencias marinas*, 43(4), 217-228.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Félix-Bermúdez, A., Torres-Delgado, E. V., Durazo, R., Camacho-Ibar, V., Mejía, A., Ruiz, M. C., y Linacre, L. (2020). Impacts of the 2014–2015 Warm-Water Anomalies on Nutrients, Chlorophyll-a and Hydrographic Conditions in the Coastal Zone of Northern Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(12).
<https://doi.org/10.1029/2020JC016473>.
- Durazo, R., y Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. In *Progress in Oceanography* (Vol. 54, Issues 1–4, pp. 7–31). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1).
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A.M., Miranda, L.E., y Soto-Mardones, L.A. (2010). Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo, R. (eds.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 25-59.
- Durazo, R. (2015). Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 1173–1196.
<https://doi.org/10.1002/2014JC010405>.
- Edwards, M., y 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>.
- Espinosa-Carreón, T. L., Gaxiola-Castro, G., Beier, E., Strub, P. T., y Kurczyn, J. A. (2012). Effects of mesoscale processes on phytoplankton chlorophyll off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4). <https://doi.org/10.1029/2011JC007604>.
- Friedland, K. D., Record, N. R., Asch, R. G., Kristiansen, T., Saba, V. S., Drinkwater, K. F., Henson, S., Leaf, R. T., Morse, R. T., Morse, R. E., Johns, D. G., Large, S. I., Hjollo, S. S.,

- Nye, J. A., Alexander, M. A., y Ji, R. (2016). Seasonal phytoplankton blooms in the North Atlantic linked to the overwintering strategies of copepods. *Seasonal plankton blooms and zooplankton that diapause. Elementa: Science of the Anthropocene*, 4.
- Gaxiola-Castro, G., De la Cruz-Orozco, M. E., Nájera-Martínez, S., Martínez-Gaxiola, M. D., y Rodríguez-Gamboa, A. (2010). Nutrientes: Efecto de procesos locales y de gran escala. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo, R. (eds.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 209-227.
- Gruber, N., Frenzel, H., Doney, S. C., Marchesiello, P., McWilliams, J. C., Moisan, J. R., Oram, J. J., Plattner, G. K., y Stolzenbach, K. D. (2006). Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(9), 1483–1516. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.06.005>.
- Hébert, M. P., Beisner, B. E., y Maranger, R. (2017). Linking zooplankton communities to ecosystem functioning: toward an effect-trait framework. *Journal of Plankton Research*, 39(1), 3-12.
- Hernández-Trujillo, S. (1999). Variability of community structure of Copepoda related to El Niño 1982–83 and 1987–88 along the west coast of Baja California Peninsula, Mexico. *Fisheries Oceanography*, 8(4), 284-295.
- Hernández-Trujillo, S., Esqueda-Escárcega, G., y Palomares-García, R. (2010). Variabilidad de la abundancia de zooplancton en Bahía Magdalena Baja California Sur, México (1997-2001). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 38(3), 438–446. <https://doi.org/10.3856/vol38-issue3-fulltext-8>.
- Hereu, C. M., Lavaniegos, B. E., Gaxiola-Castro, G., y Ohman, M. D. (2006). Composition and potential grazing impact of salp assemblages off Baja California during the 1997–1999 El Niño and La Niña. *Marine Ecology Progress Series*, 318, 123-140.

- Jacox, M. G., Tommasi, D., Alexander, M. A., Hervieux, G., y 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.
- Johnston, N. M., Murphy, E. J., Atkinson, A., Constable, A. J., Cotté, C., Cox, M., Daly, K. L., Driscoll, R., Flores, H., Halfter, S., Henschke, N., Hill, S. L., Höfer, J., Hunt, B. P. V., Kawaguchi, S., Lindsay, D., Liszka, C., Loeb, V., Manno, C., y Yang, G. (2022). Status, Change, and Futures of Zooplankton in the Southern Ocean. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.624692>.
- Lalli, C. M., y Parsons, T. R. (1997). *Biological Oceanography : An Introduction*. EL SEVIER. 337 pp.
- Lavaniegos, B. E., Jiménez-Pérez, L. C., y Gaxiola-Castro, G. (2002). Plankton response to El Niño 1997-1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. In *Progress in Oceanography* 54 (1-4), 33-58. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00042-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00042-3).
- Lavaniegos, B. E., y Ohman, M. D. (2003). Long-term changes in pelagic tunicates of the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14-16), 2473-2498.
- Lavaniegos, B. E., y Ohman, M. D. (2007). Coherence of long-term variations of zooplankton in two sectors of the California Current System. *Progress in Oceanography*, 75(1), 42-69.
- Lavaniegos, B. E., Cadena-Ramírez, J. L., y García-García, P. (2008). Biomasa y estructura del zooplancton frente a la costa occidental de Baja California durante 2005 (cruceros IMECOCAL 0501, 0504, 0507, 0510). Zooplankton biomass and structure off the western coast of Baja California during 2005 (IMECOCAL cruises 0501, 0504, 0507, 0510). Informe Técnico. Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE, 59 p. (79123).
- Lavaniegos, B. E., Cadena-Ramírez, J. L., y García-García, P. (2009). Biomasa y estructura del zooplancton frente a la costa occidental de Baja California durante 2007 (cruceros IMECOCAL 0701, 0704, 0708). Zooplankton biomass and structure off the western coast of Baja California during 2007 (IMECOCAL cruises 0701, 0704, 0708). Informe Técnico. Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE, 51 p. (97050).

- Lavaniegos, B. E., Ambriz-Arreola, I., Hereu, C. M., Jiménez-Pérez, L. C., Cardena-Ramírez, J. L., y García-García, P. (2010). Variabilidad estacional e interanual del zooplancton. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo, R. (eds.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 87-129.
- Lavaniegos, B. E., Cadena-Ramírez, J. L., Molina-González, O., y García-García, P. (2010). Biomasa y estructura del zooplancton frente a la costa occidental de Baja California durante 2008 (cruceros IMECOCAL 0801, 0804, 0807, 0810). Zooplankton biomass and structure off the western coast of Baja California during 2008 (IMECOCAL cruises 0801, 0804, 0807, 0810). Informe Técnico. Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE, 54 p. (99407).
- Lavaniegos, B. E., y Ambriz-Arreola, I. (2012). Interannual variability in krill off Baja California in the period 1997–2005. *Progress in Oceanography*, 97, 164-173.
- Lavaniegos, B. E., Molina -González, O., y Murcia -Riaño, M. (2015). Zooplankton functional groups from the California current and climate variability during 1997-2013. *CICIMAR Océanides*, 30(1), 45–62. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v30i1.143>.
- Linacre, L., y Lavaniegos, B.E. (2002). Community structure of euphausiids in the southern part of the California Current during October 1997 (El Niño) and October 1999 (La Niña). *Revista Investigaciones Marinas*, 30(1), 117-118.
- Loeb, V., Siegel, V., Holm-Hansen, O., Hewitt, R., Fraser, W., Trivelpiece, W., y Trivelpiece, S. (1997). Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature*, 387(6636), 897-900.
- Lluch Belda, Daniel. (2000). *BAC : centros de actividad biológica del Pacífico mexicano*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. 366 pp.
- Mancilla-Peraza, M., Palacios-Hernandez, E., y López-Castillo, G. (1993). Hydrographic variability in Bahía Vizcaino, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 19(3), 265–284. <https://doi.org/10.7773/cm.v19i3.941>.

- Mann, K. H., y Lazier, J. R. N. (2006). *DYNAMICS OF MARINE ECOSYSTEMS BIOLOGICAL-PHYSICAL INTERACTIONS IN THE OCEAN*. Blackwell Publishing. 520 pp.
- Mackas, D. L., Greve, W., Edwards, M., Chiba, S., Tadokoro, K., Eloire, D., Mazzocchi, M. G., Batten, S., Richardson, A. J., Johnson, C., Head, E., Conversi, A., y Peluso, T. (2012). Changing zooplankton seasonality in a changing ocean: Comparing time series of zooplankton phenology. *Progress in Oceanography*, 97, 31-62.
- Mcclatchie, S., Goericke, R., y Koslow, J. A. (2008). *The state of the California Current, 2007-2008: La Niña conditions and their effects on the ecosystem Article in California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* .
<https://www.researchgate.net/publication/285900846>.
- Messié, M., y Chavez, F. P. (2017). Nutrient supply, surface currents, and plankton dynamics predict zooplankton hotspots in coastal upwelling systems. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8979-8986.
- NOAA (2023). 2022-2023 CALIFORNIA CURRENT ECOSYSTEM STATUS REPORT. NOAA California Current Integrated Ecosystem Assessment Team. 137 pp.
- Pauli, N. C., Metfies, K., Pakhomov, E. A., Neuhaus, S., Graeve, M., Wenta, P., Flintrop, C. M., Badewien, T. H., Iversen, M. H., y Meyer, B. (2021). Selective feeding in Southern Ocean key grazers—diet composition of krill and salps. *Communications biology*, 4(1), 1061.
- Pérez-Brunius, P., López, M., y Parés-Sierra, A. (2007). *UPWELLING INDICES OFF BAJA CALIFORNIA CalCOFI Rep COMPARISON OF UPWELLING INDICES OFF BAJA CALIFORNIA DERIVED FROM THREE DIFFERENT WIND DATA SOURCES* (Vol. 48).
<http://www.pfel.noaa.gov/>
- Pinchuk, A. I., Batten, S. D., y Strasburger, W. W. (2021). Doliolid (Tunicata, Thaliacea) blooms in the southeastern Gulf of Alaska as a result of the recent marine heat wave of 2014–2016. *Frontiers in Marine Science*, 8, 625486. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.625486>.
- Postel, L., Fock, H., y Hagen, W. (2000). Chapter 4. Biomass and abundance. En: Harris, R., Lenz, J., Huntley, M., Wiebe, P., y Skjoldal, H. R (eds.). *ICES ZOOPLANKTON METHODOLOGY MANUAL*. EL SEVIER. 684 pp.

- Richardson, A. J. (2008). In hot waters: zooplankton and climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 279–295. doi:10.1093/icesjms/fsn028.
- Rykaczewski, R. R., y Checkley Jr, D. M. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1965-1970.
- Schwing, F. B., Murphree, T., deWitt, L., y Green, P. M. (2002). The evolution of oceanic and atmospheric anomalies in the northeast Pacific during the El Niño and La Niña events of 1995–2001. *Progress in Oceanography*, 54(1-4), 459-491.
- 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., y 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>.
- Turner, J. T. (2015). Zooplankton fecal pellets, marine snow, phytodetritus and the ocean's biological pump. In *Progress in Oceanography* (Vol. 130, pp. 205–248). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.005>.
- Weber, E. D., Auth, T. D., Baumann-Pickering, S., Baumgartner, T. R., Bjorkstedt, E. P., Bograd, S. J., Burke, B. J., Cadena-Ramírez, J. L., Fisher, J. L., Giddings, A., Goericke, R., Gomez-Ocampo, E., Gomez-Valdes, J., Hazen, E., Hildebrand, J., Horton, C. A., Jacobson, K. C., Jacox, M. G., Jahncke, J., Kahru, M., Kudela, R. M., Lavaniegos, B. E., Leising, A., Melin, S. R., Miranda-Bojorquez, L. E., Morgan, C. A., Nickels, C. F., Orben, R. A., Porquez, J. M., Portner, E. J., Robertson, R. R., Rudnick, D. L., Sakuma, K. M., Santora, J. A., Schroeder, I. D., Snodgrass, O. E., Sydeman, W. J., Thompson, A. R., Thompson, S. A., Trickey, J. S., Villegas-Mendoza, J., Warzybok, P., Watson, W., y Zeman, S. M. (2021). State of the California Current 2019–2020: back to the future with marine heatwaves?. *Frontiers in Marine Science*, 1081.

Zaytsev, O., Cervantes-Duarte, R., Montante, O., y Gallegos-García, A. (2003). Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography*, 59(4), 489–502. <https://doi.org/10.1023/A:1025544700632>.

Anexos

Tabla I. Abundancia promedio (ind. 100m⁻³) y frecuencia de ocurrencia (FO) en porcentaje de los taxones con mayor representación ($A_R > 1\%$) en las comunidades de zooplancton del Pacífico Norte frente a la costa occidental de BC en el verano de 2022.

Taxones	Abundancia promedio (ind. 100m ⁻³)	FO (%)
Copépodos	41256	100
Cladóceros	3117	92
Quetognatos	1796	100
Huevos de peces	833	92
Ctenóforos	996	100
Radiolarios	940	96
Foraminíferos	583	92
Apendicuarios	1091	100
Eufáusidos	655	92
Medusas	893	100

Tabla II. Frecuencia de Ocurrencia (FO) en porcentaje para los grupos con menor representación en la comunidad de zooplancton ($A_R < 1\%$) en las estaciones costeras del sur y estaciones costeras del norte de BC en el verano de 2022. El símbolo X representan que el grupo estuvo presente en la estación, mientras que el símbolo - no estuvo presente el grupo.

	Costa Sur				Costa Norte				FO (%)
	44	45	46	50	54	63	67	71	
Larvas de decápodos	X	-	X	X	X	X	X	X	87.5
Pterópodos	X	X	X	-	X	X	-	X	75
Ostrácodos	-	X	X	-	X	X	-	X	62.5
Larvas de pez	-	-	-	-	-	X	X	X	37.5
Larvas de poliqueto	-	X	-	-	-	-	-	X	25
Larvas de percebes	-	-	-	-	-	X	-	-	12.5
Larvas de equinodermos	-	-	-	-	-	-	X	X	25
Salpas	-	-	-	-	-	-	X	-	12.5
Poliquetos	-	-	X	-	-	-	-	-	12.5
Doliólidos	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Amfípodos	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Pirosomas	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Paralarvas de pulpo	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Paralarvas de calamar	-	-	-	-	-	-	-	-	0

Tabla III. Frecuencia de Ocurrencia (FO) en porcentaje para los grupos con menor representación en la comunidad de zooplancton ($A_R < 1\%$) en el sector oceánico del norte y el sector oceánico del sur de BC en el verano de 2022. El símbolo X representan que el grupo estuvo presente en la estación, mientras que el símbolo - no estuvo presente el grupo.

	Océano Sur				Océano Norte														FO (%)
	48	51	52	53	56	57	59	60	61	62	64	65	66	68	69	70	72	73	
Larvas de decápodos	X	X	-	-	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X	-	-	-	55.6
Pterópodos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	44.4
Ostrácodos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	83.3
Larvas de pez	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	11.1
Larvas de poliqueto	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	X	-	-	22.2
Larvas de percebes	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-	100.0
Larvas de equinodermos	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	100.0
Salpas	X	-	X	X	-	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	55.6
Poliquetos	X	X	-	X	X	X	-	X	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X	77.8
Doliólidos	X	-	X	X	X	X	-	X	-	X	-	-	-	-	-	X	X	X	33.3
Amfípodos	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	88.9
Pirosomas	-	-	X	X	X	X	-	X		-	X	X	X	X	X	-	X	X	72.2
Paralarvas de pulpo	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	11.1
Paralarvas de calamar	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.6

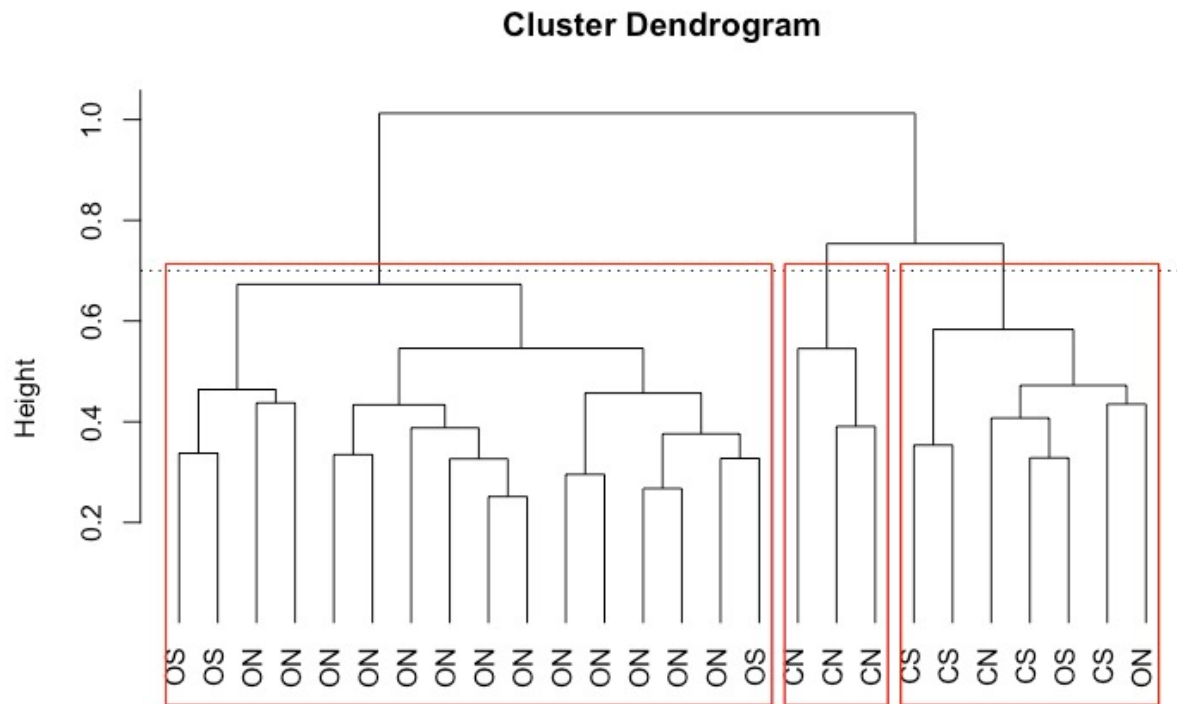


Figura 18. Conglomerados basados en el índice de similitud de Bray Curtis. Se distinguió en el dendrograma diferencias en la composición de la comunidad de zooplancton entre el sector Costero del Norte (CN) y Costa del Sur (CS) al realizar un corte a ~ 0.7 . Por su parte, las estaciones oceánicas de ambas regiones geográficas se agruparon en un solo sector, concordando con la similitud obtenida en análisis nmms de la fig. 14.