



UCSC

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS**

Relaciones tróficas de grupos funcionales dominantes del zooplancton en la
Bahía de San Vicente utilizando ácidos grasos como biomarcadores

Por

FELIPE NICOLÁS CÁRDENAS IBÁÑEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO PROFESIONAL DE BIÓLOGO MARINO

Profesor Guía: SERGIO HERNÁN CONTRERAS QUINTANA

Profesor Coguía: RODRIGO VEAS FLORES

Concepción, Chile

2026

CONSTANCIA

Esta Memoria de Título corresponde a una Habilitación Profesional ejecutada bajo la modalidad vía académica, con dedicación exclusiva durante un semestre académico, y enfocada íntegramente en la realización del trabajo de investigación aquí expuesto. El trabajo se desarrolló en la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), bajo la guía del profesor Sergio Hernán Contreras Quintana y la co-guía del profesor Rodrigo Veas Flores.

A mis padres y a mi hermano, por su apoyo constante y por estar siempre presentes

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a mi profesor guía, Dr. Sergio Contreras, quien me acompañó y orientó desde el seminario bibliográfico hasta el desarrollo completo de esta tesis. Su constante guía académica, apoyo metodológico y confianza fueron fundamentales para mi formación científica y crecimiento como estudiante. Al proyecto ANID Fondecyt Regular 1240918 que él lidera y financió mi investigación. Asimismo, agradezco el apoyo logístico y la disponibilidad del equipamiento necesario para la ejecución de este trabajo, así como la oportunidad de desarrollar esta investigación en el Laboratorio de Ciencias Ambientales (LACA), junto a su equipo de investigadores, a quienes también extiendo mis agradecimientos por su disposición y colaboración.

Agradezco también a mi profesor coguía, Dr. Rodrigo Veas, por su apoyo y orientación desde el seminario de investigación, así como por sus valiosos comentarios y sugerencias durante el desarrollo de la tesis.

Asimismo, agradezco a la Dra. María Cristina Krautz, quien contribuyo significativamente a la obtención de muestras, permitiéndome integrarme a una salida a terreno asociada al curso optativo Ecología de Zooplancton Costero, lo que fue clave para el desarrollo de esta investigación.

Extiendo mis agradecimientos a la Facultad de Ciencias de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, por la formación académica recibida y por proporcionar las herramientas y apoyo académico necesario para mi desarrollo como biólogo marino. Agradezco a los profesores del curso Habilitación Profesional, Dra. Florence Tellier y Dr. Iván Vera, por sus comentarios, observaciones y sugerencias, los cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento y mejora de esta memoria de título. Finalmente, no puedo dejar de mencionar a las revisoras del manuscrito, Dra. Erika Jorquera y Dra. Monserrat Aldunate, cuyos comentarios al manuscrito ayudaron a mejorarlo en varios aspectos, tanto de forma como de fondo.

De igual manera, agradezco a mis compañeros de carrera, particularmente a Matihás Valdivia y Gabriel Mazo, por el trabajo colaborativo, el apoyo académico constante y el compañerismo demostrando a lo largo de toda la carrera, aspectos que fueron fundamentales durante mi proceso de formación profesional.

Finalmente, agradezco a mi familia, en particular a mi padre David Cárdenas, a mi madre Fabiola Ibáñez y a mi hermano Matías Cárdenas, por el apoyo permanente a lo largo de mi formación universitaria.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	iii
Abstract	iv
Introducción.....	1
Ecología trófica del zooplancton marino	2
Dieta y procesos digestivos de presas en zooplancton marino	2
Uso de biomarcadores lipídicos en zooplancton marino	3
Problemática	4
Hipótesis.....	6
Hipótesis General	6
Hipótesis Específicas.....	6
Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos Específicos	7
Métodos.....	8
Sitio de muestreo.....	8
Muestreo de zooplancton.....	9
<i>Separación de grupos de zooplancton dominante.....</i>	<i>9</i>
<i>Caracterización biométrica de los organismos.....</i>	<i>9</i>
Muestreo de oferta nutricional ambiental de AG.....	9
Manipulación de organismos vivos para obtener muestras biológicas para análisis de AG10	
Extracción y análisis de ácidos grasos.....	11
<i>Disgregación de muestras</i>	<i>11</i>
<i>Obtención de lípidos totales</i>	<i>11</i>
<i>Limpieza del ELT.....</i>	<i>12</i>
<i>Columna de aminopropil.....</i>	<i>12</i>
<i>Metilación de ácidos grasos</i>	<i>12</i>
<i>Obtención de perfiles lipídicos</i>	<i>13</i>
Análisis estadístico	13
<i>Análisis generales</i>	<i>13</i>
<i>Estandarización y análisis entre matrices (Oferta ambiental [OA] vs. Tejido somático y fecas) .</i>	<i>13</i>

<i>PERMANOVA y comparaciones post hoc</i>	14
<i>Análisis de Coordenadas principales (PCoA) y vectores de correlación.</i>	14
<i>Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER en PRIMER v7.0)</i>	14
Resultados	15
Tejido somático de grupos funcionales dominantes del zooplancton	15
Oferta ambiental.....	18
Fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton	20
Discusión	28
Diferencias en la composición de ácidos grasos entre los grupos funcionales (tejido somático).....	28
<i>Copépodos</i>	28
<i>Zoeas</i>	30
<i>Megalopas</i>	31
Heterogeneidad de la oferta ambiental en una bahía somera.....	33
Composición de ácidos grasos en fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton: aplicación en el análisis de relaciones tróficas.....	34
<i>Fecas de copépodos</i>	34
<i>Fecas de zoeas</i>	35
<i>Fecas de megalopas</i>	36
Comparación entre oferta ambiental vs tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton.....	37
<i>Relevancia trófica e implicancias ecológicas</i>	38
Conclusiones.....	40
Referencias bibliográficas	41
Anexo 1: Análisis estadísticos (permanova y simper).....	49
Anexo 2: Perfiles hidrográficos del sitio de muestreo en la Bahía de San vicente	56

RESUMEN

El zooplancton cumple un rol fundamental en la estructura y funcionamiento de las tramas tróficas de los ecosistemas marinos costeros, actuando como principal nexo entre los productores primarios y los niveles tróficos superiores. En particular, los copépodos y las larvas de crustáceos (zoeas y megalopas) representan grupos funcionales dominantes en zonas de alta productividad. Los ácidos grasos (AG), utilizados como biomarcadores lipídicos, permiten evaluar la dieta, los procesos de asimilación y la integración trófica en sistemas pelágicos. Sin embargo, los estudios que abordan comparativamente estos procesos en el zooplancton dominante en la zona costera del Sistema de Surgencia de Humboldt son aún escasos. El objetivo de este estudio fue determinar y comparar la concentración y el número de AG en la oferta nutricional ambiental (materia orgánica particulada $>0,7 \mu\text{m}$), así como en el tejido somático y fecas de tres grupos funcionales dominantes del zooplancton en la Bahía de San Vicente, sistema costero influenciado por surgencias. Las muestras fueron analizadas mediante cromatografía gaseosa y comparadas mediante análisis multivariados. Se detectaron diferencias significativas en la composición de AG entre los grupos funcionales. Los copépodos, representados por *Acartia (Acanthacartia) tonsa*, presentaron las mayores concentraciones de AG totales y una alta proporción de AG esenciales, evidenciando una elevada capacidad de acumulación lipídica. Las zoeas de Porcellanidae exhibieron el mayor número de AG identificados, pero bajas concentraciones totales, sugiriendo una rápida utilización de lípidos asociada al desarrollo larval. En contraste, las megalopas mostraron perfiles dominados por AG monoinsaturados y ausencia de AG esenciales, consistente con cambios ontogenéticos en la fisiología y el uso de los recursos tróficos. Asimismo, la composición de AG de la oferta ambiental muestreada de forma puntual no mostró una correspondencia directa con los perfiles registrados del zooplancton, sugiriendo procesos de selección, asimilación e integración temporal.

Palabras clave: Chile, ecología trófica, lípidos, plancton marino, tramas tróficas.

ABSTRACT

Zooplankton plays a fundamental role in the structure and functioning of food webs in coastal marine ecosystems, serving as the primary link between primary producers and higher trophic levels. In particular, copepods and crustacean larvae (zoeae and megalopae) represent dominant functional groups in highly productive areas. Fatty acids (FAs), used as lipid biomarkers, allow for the assessment of diet, assimilation processes, and trophic integration in pelagic systems. However, studies that comparatively address these processes in the dominant coastal zooplankton of the Humboldt Upwelling System remain scarce. The objective of this study was to determine and compare the concentration and number of FAs in the environmental nutritional supply (particulate material $>0.7 \mu\text{m}$), as well as in the somatic tissue and feces of three dominant zooplankton functional groups in San Vicente Bay, a coastal system influenced by upwelling. Samples were analyzed by gas chromatography and compared using multivariate analyses. Significant differences in FA composition were detected among functional groups. Copepods, represented by *Acartia (Acanthacartia) tonsa*, showed the highest total FA concentrations and a high proportion of essential FAs, indicating a strong capacity for lipid accumulation. Porcellanidae zoeae exhibited the highest number of identified FAs but low total concentrations, suggesting rapid lipid utilization associated with larval development. In contrast, megalopae displayed profiles dominated by monounsaturated FAs and an absence of essential FAs, consistent with ontogenetic changes in physiology and trophic resource use. Likewise, the FA composition of the environmental supply sampled at a single point in time did not show a direct correspondence with zooplankton FA profiles, suggesting processes of selection, assimilation, and temporal integration.

Key words: Chile, lipids, marine plankton, trophic ecology, trophic webs.

INTRODUCCIÓN

En ecosistemas marinos costeros, el zooplancton cumple un rol fundamental en la estructura y funcionamiento de las tramas tróficas, actuando como el principal nexo entre los productores primarios y los niveles tróficos superiores (Kimmerer et al. 2007; Nelson et al. 2019; Dvoretzky & Dvoretzky 2024). El zooplancton, se compone de una amplia variedad de organismos, los cuales pueden clasificarse según su ciclo de vida (Menéndez et al. 2023). Dentro de esta clasificación, se distingue al holoplancton, el cual agrupa a aquellos organismos que permanecen durante todo su ciclo de vida en el plancton, como los copépodos. Por otro lado, el meroplancton corresponde a organismos que son parte del plancton de manera temporal durante sus estadios larvales, como las zoeas y megalopas de crustáceos (García-Guerrero et al. 2006; Kasyan 2010; Weydmann-Zwolicka et al. 2021).

Ambos grupos, holoplancton y meroplancton, transfieren materia y energía a través de las redes tróficas marinas. En particular, los copépodos, como componentes dominantes del holoplancton, cumplen una función fundamental como principales consumidores primarios, ya que su dieta predominantemente herbívora los conecta directamente con los productores primarios (Hidalgo & Escribano 2001; Suárez-Morales et al. 2020; Holland et al. 2023). Además, su elevada abundancia en ecosistemas marinos los categoriza como el grupo taxonómico dominante del zooplancton (Silva-Dávila et al. 2006; Walter & Boxshall 2025). Por otra parte, las larvas de crustáceos (e.g., zoeas y megalopas) contribuyen significativamente al flujo de energía (Anger 2001; Surot 2006). Debido a su acoplamiento bentopelágico, estas larvas se desplazan entre la columna de agua y el fondo marino, actuando como movilizadoras biológicas de materia orgánica y energía entre ambos ecosistemas (Yannicelli et al. 2012; Walters et al. 2025).

La dinámica, disponibilidad y calidad nutricional del zooplancton están estrechamente condicionadas por la producción fitoplanctónica, ya que el fitoplancton constituye la base principal de las tramas tróficas y determina el tipo de alimento disponible en el sistema, condicionando la dieta de organismos de niveles tróficos superiores (Lalli & Parsons 1997; Marrec & Menden-Deuer 2024). La disponibilidad y tipo de fitoplancton no son constantes a lo largo del año, sino que se encuentran sujetos a factores ambientales (Gonçalves et al. 2012). Por

ejemplo, sistemas productivos de Chile central, como la Bahía de San Vicente, están caracterizados por una marcada estacionalidad, donde la primavera representa el periodo de la máxima productividad costera. Durante el inicio de primavera, comienza el periodo de surgencia donde la frecuencia e intensidad de los eventos de surgencia aumentan, favoreciendo el incremento de biomasa y tipo de fitoplancton, lo que impacta la nutrición y el crecimiento de los consumidores primarios (Henríquez et al. 2007).

Ecología trófica del zooplancton marino

En estudios de ecología trófica, la clasificación de los organismos en grupos funcionales ha sido tradicionalmente basada en características morfológicas, conductuales o del nicho ecológico (De Bello et al. 2021). En este sentido, para investigaciones que exploran el flujo de energía y materia a través de redes tróficas, especialmente en ecosistemas marinos, se ha propuesto adoptar definiciones funcionales vinculadas al metabolismo y fisiología de los organismos (Nef et al. 2024). Entendemos grupo funcional como una categoría ecológica que agrupa organismos con roles energéticos y metabólicos comparables y características bioquímicas específicas, como la composición y concentración de sus reservas lipídicas, más que por su taxonomía o morfología. Este enfoque encuentra respaldo en estudios que demuestran que los lípidos, particularmente ácidos grasos poliinsaturados como ácido eicosapentaenoico (EPA), ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido araquidónico (AA), cumplen funciones estructurales y energéticas y son utilizados como trazadores de procesos tróficos en sistemas pelágicos (Dalsgaard et al. 2003). Por ejemplo, investigaciones recientes han mostrado que diferentes especies de copépodos presentan diferentes perfiles lipídicos, reflejando su ecología trófica y capacidad adaptativa ante perturbaciones ambientales (Wood et al. 2023). Asimismo, estudios sobre larvas de crustáceos evidencian diferencias funcionales entre estadios como zoeas y megalopas en cuanto a contenido y utilización de lípidos y por ende requerimientos energéticos, justificando su consideración como grupos funcionales distintos (Ermolenko et al. 2025).

Dieta y procesos digestivos de presas en zooplancton marino

Las diferencias funcionales entre grupos también se reflejan en las estrategias de alimentación y digestión, las cuales están directamente vinculadas a sus necesidades energéticas

y nutricionales (Dalsgaard et al. 2003). Por ejemplo, los copépodos presentan una dieta predominantemente herbívora, constituida principalmente por diatomeas y dinoflagelados. En el caso de copépodos marinos, se ha determinado que presentan una alta tasa de ingestión y una composición de ácidos grasos que refleja estrechamente la oferta ambiental de AG (Escribano & Pérez 2010; Aguilera et al. 2011). Por otra parte, las zoeas presentan una dieta omnívora, combinando el consumo de fitoplancton y microzooplancton según la oferta ambiental (Paul et al. 1989; Lemos & Phan 2001). Esta alimentación mixta les brinda una gran plasticidad trófica y una rápida renovación de nutrientes, la cual se ha visto reflejada en su alta tasa de digestión, permitiendo sostener un rápido desarrollo larval y su supervivencia en ambientes costeros altamente variables. En contraste, las megalopas desarrollan un patrón alimenticio predominantemente carnívoro, aprovechando su mayor tamaño y estructuras bucales robustas para capturar presas, aunque también mantienen flexibilidad para consumir presas más pequeñas (Epelbaum & Borisov 2006). Esta estrategia prolonga su retención de alimento en el tracto digestivo, optimizando la asimilación de nutrientes de alta calidad, como ácidos grasos esenciales, como el EPA y DHA, los cuales son considerados esenciales debido a que los organismos zooplanctónicos presentan una capacidad limitada para sintetizarlos de novo y, por lo tanto, deben ser adquiridos a través de la dieta. Estos ácidos grasos cumplen un rol fundamental para los procesos de metamorfosis y el asentamiento (Le Vay et al. 2001; Gebauer et al. 2003; Jónasdóttir 2019).

Uso de biomarcadores lipídicos en zooplancton marino

Para el estudio de las interacciones tróficas en los ecosistemas marinos, se han utilizado como biomarcadores lipídicos los ácidos grasos, ya que mantienen su estructura molecular a través de las redes tróficas (Dalsgaard et al. 2003; Killops & Killops 2013; Libralato et al. 2014; Burian et al. 2020). El análisis de estos biomarcadores permite evaluar las preferencias dietarias y la transferencia de nutrientes entre organismos. Los ácidos grasos se clasifican en saturados (AGS), monoinsaturados (AGM) y poliinsaturados (AGP) (Peters et al. 2004; Jónasdóttir 2019) y entre estos, los AGP se caracterizan por incluir compuestos de cadena larga que algunos organismos no pueden sintetizar por sí mismos. Algunos de estos AGP se conocen como ácidos grasos esenciales (AGE) (Savineau et al. 2024). Entre los AGE, el ácido eicosapentaenoico (EPA, 20:5 ω -3) y el ácido docosahexaenoico (DHA, 22:6 ω -3) son fundamentales para el

crecimiento, la reproducción y el mantenimiento fisiológico del zooplancton (Vargas 2011; Legeżyńska et al. 2014; Jónasdóttir 2019). Además, ciertos ácidos grasos, tanto esenciales como no esenciales, pueden actuar como marcadores tróficos, ya que su origen es característico de un determinado organismo. Por ejemplo, el ácido palmitoleico (C16:1 ω -7), aunque no es esencial, es un AGM que se ha encontrado principalmente en diatomeas y permite rastrear su transferencia dentro de las tramas tróficas. De hecho, se han propuesto y utilizado de diversas razones de AG específicos, para normalizar y/o destacar diferencias entre estos AG, como una herramienta complementaria para inferir fuentes alimentarias y patrones tróficos en organismos marinos (Dalsgaard et al. 2003; Jónasdóttir 2019; Ruiz-Ruiz et al. 2021).

Problemática

Si bien la composición nutricional y las preferencias dietarias de los grupos funcionales de zooplancton han sido estudiadas a escala global, y en condiciones de laboratorio, en Chile existe una escasez de información, con estudios centrados principalmente en organismos de interés comercial y/o claves en las tramas tróficas del sistema de surgencias de Humboldt como eufáusidos y copépodos (Escribano & Pérez 2010; Fornes et al. 2010; Vargas 2011; Gutiérrez et al. 2012; Lafon et al. 2014; Riquelme-Bugueño et al. 2020). Bajo esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo determinar y comparar la concentración y el número de tipos de AG identificados en tres grupos funcionales dominantes del zooplancton costero (copépodos, zoeas y megalopas) de la Bahía de San Vicente. Asimismo, se evalúa su relación con la composición de ácidos grasos disponibles en el ambiente, como una aproximación a los procesos de transferencia y asimilación de alimento en el sistema. La Bahía de San Vicente es un buen escenario para desarrollar este enfoque, debido a que es un sistema costero altamente productivo, influenciado por procesos de surgencia estacionales que favorecen el aumento de la producción primaria en el interior de la bahía (Henríquez et al. 2007). Considerando estas condiciones, los resultados obtenidos proporcionarán información que servirán de apoyo para futuras investigaciones, especialmente aquellas que utilicen ácidos grasos para explorar relaciones tróficas en ecosistemas marinos chilenos.

TABLA 1

Marcadores tróficos y razones entre ácidos grasos utilizados en este estudio para la interpretación de preferencias dietarias.

Nombre completo	Nomenclatura	Interpretación trófica	Referencias
Ácido docosahexaenoico	C22:6 ω -3	Asociado a dinoflagelados	Dalsgaard et al. 2003; Jónasdóttir 2019
Ácido eicosapentaenoico	C20:5 ω -3	Asociado a diatomeas	Dalsgaard et al. 2003; Jónasdóttir 2019
Ácido palmitoleico	C16:1 ω -7	Asociado a diatomeas	Parrish 2013; Jónasdóttir 2019
Ácido linoleico	C18:2 ω -6	Indicador de material detrital y/o aporte terrestre	Kelly & Scheibling 2012; Parrish 2013

HIPÓTESIS

Hipótesis General

Los grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas) presentan diferencias significativas en la concentración y número de ácidos grasos identificados, diferencias que pueden ser potencialmente asociadas a sus hábitos alimenticios.

Hipótesis Específicas

H1: La concentración de ácidos grasos esenciales es mayor en los copépodos que en los otros grupos funcionales dominantes (zoeas y megalopas).

Predicción: Los copépodos, al presentar una dieta predominantemente herbívora y una alta tasa de ingestión, contendrán en sus tejidos somáticos mayores concentraciones de ácidos grasos esenciales que las zoeas y las megalopas.

H2: El número de tipos de ácidos grasos identificados en la zoeas es mayor que los otros grupos funcionales dominantes (copépodos y megalopas).

Predicción: Las zoeas, al presentar una dieta predominantemente omnívora y una alta tasa de digestión, incorporarán un mayor número de tipos de ácidos grasos en comparación con los copépodos y megalopas.

H3: La composición de ácidos grasos difiere entre el tejido somático, oferta nutricional ambiental (MOP) de AG y fecas, reflejando procesos de asimilación distinta por parte de los grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Predicción: Si la asimilación y selectividad trófica influyen en la dieta, entonces se esperan diferencias claras en la composición de ácidos grasos entre la oferta nutricional ambiental de AG, los tejidos somáticos y las fecas de los grupos funcionales.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar y comparar la concentración y número de tipos de ácidos grasos identificados en tres grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas), la oferta nutricional ambiental de AG, y sus fecas, en la Bahía de San Vicente.

Objetivos Específicos

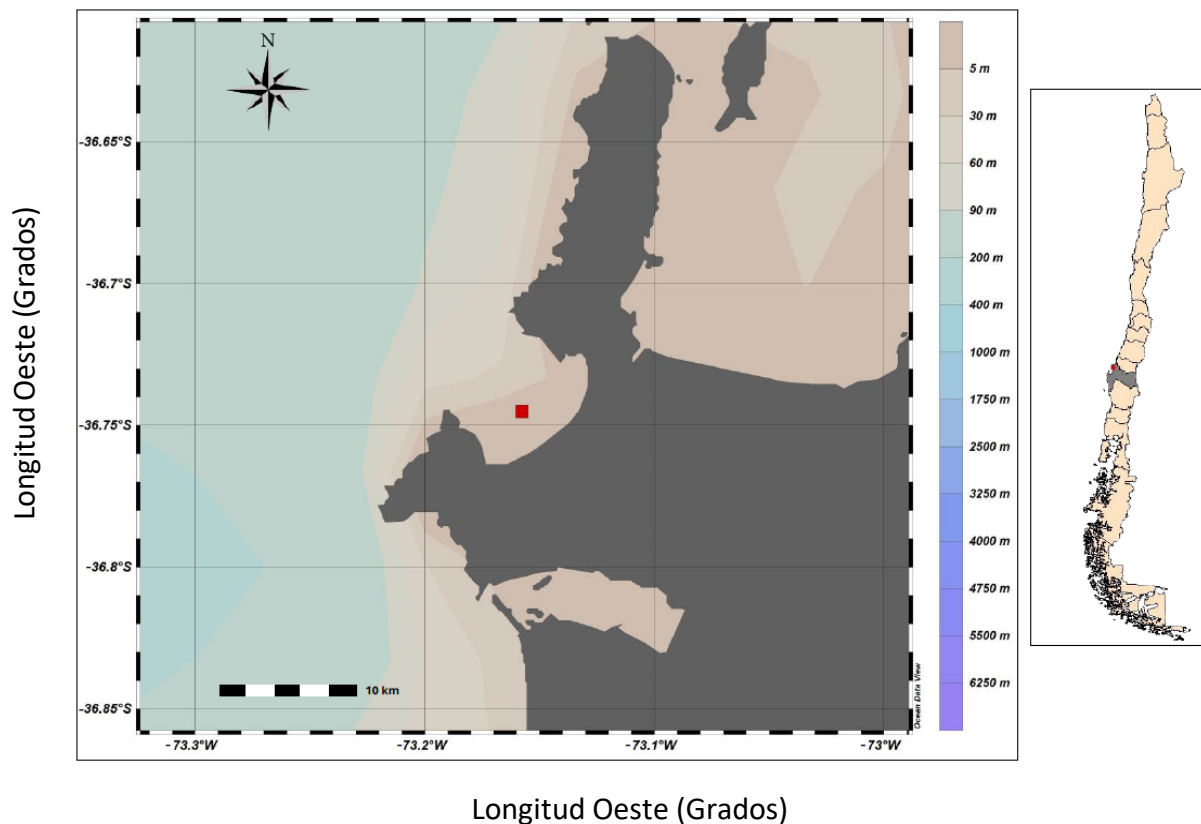
- O1: Determinar la concentración y número de ácidos grasos identificados en el tejido somático de tres grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).
- O2: Determinar la concentración y número de ácidos grasos identificados en la oferta nutricional ambiental de AG.
- O3: Determinar la concentración y número de ácidos grasos identificados en las fecas de tres grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).
- O4: Comparar un análisis estadístico multivariado para comparar las concentraciones de ácidos grasos entre oferta ambiental, tejido somático y fecas de tres grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

MÉTODOS

Sitio de muestreo

El muestreo se realizó el 7 de octubre de 2024 en la Bahía de San Vicente, ubicada en la costa centro-sur de Chile ($36^{\circ}45' S$; $73^{\circ}09' O$), esta cuenta con una superficie de $17,4 \text{ km}^2$ y una profundidad promedio de 16 m (Rudolph et al. 2002). Durante el muestreo se registraron aspectos relevantes en una bitácora, tales como la hora de zarpe (10:37 a.m.) y recalada (12:40 p.m.). Además, se anotaron las condiciones ambientales y se caracterizaron las condiciones oceanográficas de la estación de muestreo mediante un perfilador multiparamétrico YSI EXO, registrando temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (PSU) y oxígeno disuelto (mg L^{-1}) en la columna de agua.

FIGURA 1.



Área de estudio, Bahía de San Vicente, Concepción, Chile (2024). La batimetría y el borde costero fueron graficados utilizando el programa Ocean Data View

Muestreo de zooplancton

El muestreo de zooplancton se realizó en una estación fija dentro de la Bahía de San Vicente (Fig. 1). Para la recolección de los organismos zooplanctónicos, se utilizó una red bongo con un diámetro de aro de 40 cm equipada con una malla de 300 μm . Para minimizar el daño mecánico a los zooplancteres se utilizó un copo duro y se arrastró la red de forma oblicua a una profundidad de 6 m, durante 3 min a baja velocidad de navegación. Una vez finalizado el muestreo, el contenido recolectado, fue transferido a un contenedor con agua de mar superficial y transportado a la Estación de Biología Marina Abate Juan Ignacio Molina, siguiendo protocolos de manejo de zooplancton vivo (Harris 2000).

Separación de grupos de zooplancton dominante

El estudio se enfocó en tres grupos dominantes del zooplancton: copépodos, zoeas y megalopas identificados preliminarmente en las muestras recolectadas. De estos tres grupos no fue posible determinar la especie de las megalopas; en el caso de las zoeas, se logró determinar la familia, Porcellanidae, mientras que los copépodos se identificaron a nivel de especie como *Acartia (Acanthacartia) tonsa*. Aunque no se realizó un análisis exhaustivo de la riqueza específica, la literatura indica que estos grupos constituyen una proporción significativa de la comunidad zooplanctónica (Escribano et al. 2007; Aravena et al. 2009). Por lo tanto, las fracciones obtenidas representan los grupos dominantes del zooplancton en el ecosistema evaluado.

Caracterización biométrica de los organismos

En condiciones de laboratorio, se determinó el peso húmedo de 10 individuos por grupo, considerando únicamente zoeas y megalopas. En el caso de los copépodos, no se pudo realizar una cuantificación directa del peso húmedo debido a que los organismos eran muy pequeños. Por esta razón, el peso húmedo de los copépodos fue estimado a partir de valores reportados en la literatura científica (Castro et al. 2010).

Muestreo de oferta nutricional ambiental de AG

Se obtuvieron muestras de agua de mar a 0, 5 y 8 m de profundidad en triplicado (15 L de agua de mar por profundidad) utilizando una botella Niskin de 5 L. Todas las muestras fueron almacenadas en bidones de 5 L, obteniéndose un total de nueve bidones (tres por cada

profundidad). El agua de mar recolectada como oferta nutricional ambiental de AG fue filtrada utilizando una bomba peristáltica, concentrándose la biomasa en filtros de fibra de vidrio de 4,7 mm de diámetro y 0,7 μm de poro (GF/F), los cuales fueron posteriormente almacenados en placas PetriSlides® (Millipore) y liofilizados para su análisis.

Manipulación de organismos vivos para obtener muestras biológicas para análisis de AG

Con el objetivo de obtener tejido somático y pellets fecales del zooplancton dominante para el análisis de AG, se implementó un procedimiento de mantención de organismos bajo condiciones controladas.

Cada frasco de vidrio experimental, previamente combustionado a 550 °C por 4 h, fue llenado con agua de mar filtrada (GF/F de 0,7 μm). En cada frasco se depositaron cinco individuos correspondientes a un mismo grupo de zooplancton: copépodos (*Acartia* (*Acanthacartia*) *tonsa*), zoeas (Porcellanidae) y megalopas. Para cada grupo se consideraron tres replicas biológicas.

Los frascos se mantuvieron durante 24 h, dentro de una bandeja con flujo continuo de agua de mar a temperatura ambiente (~14°C), con el fin de que los organismos evacuaran su tracto digestivo y la producción de fecas.

Finalizado el periodo de acondicionamiento (8 de octubre de 2024), los organismos y las fecas fueron recolectado manualmente mediante pipetas Pasteur, transferidos a viales de vidrio pre-combustionados (20 mL), congelados y posteriormente liofilizados para su conservación y análisis posterior. Las muestras obtenidas (tejido somático y fecas) fueron utilizadas para la determinación de la concentración y el número de tipos de AG identificados en cada grupo funcional del zooplancton

TABLA 2

Resumen de tratamiento y acondicionamiento de muestras

Componente	Descripción
Unidad experimental	Frasco con 5 individuos de un mismo grupo funcional dominante del zooplancton
Grupos analizados	copépodos, zoeas y megalopas
Réplicas (r)	Tejido somático r = 3 (n=5); Fecas r = 4 (n=5)
Condiciones de acondicionamiento	24 h, ~14°C, agua de mar filtrada
VARIABLES ANALIZADAS	Concentración y número de tipos de ácidos grasos identificados en el tejido somático y fecas

Extracción y análisis de ácidos grasos

Disgregación de muestras

Todas las muestras (copépodos, zoeas, megalopas, oferta ambiental y fecas) fueron previamente liofilizadas. Las muestras que contenían organismos se disgregaron utilizando pinzas previamente lavadas tres veces con metanol (MeOH), acetona y hexano. En el caso de los filtros con el contenido de la oferta ambiental, la disgregación se realizó con un sacabocado previamente lavado con MeOH, acetona y hexano. Finalmente, las muestras de pellets fecales también se disgregaron con pinzas previamente lavadas y se depositaron en viales de vidrio precombustionados.

Obtención de lípidos totales

Para la extracción de lípidos totales (ELT), las muestras previamente tratadas fueron depositadas en viales de vidrio de 50 mL con fondo redondo y se les añadió 20 µL de estándar interno (lipid 3) de recuperación, junto con 10 mL de MeOH. Luego, fueron sometidas a un proceso de sonicación durante 10 min y después fueron centrifugadas entre 3500 y 4000 rpm dependiendo de la muestra por 15 o 10 min, el sobrenadante o extracto de lípido total (ELT), fue transferido a un vial de vidrio de 60 mL de fondo plano. Este método de extracción constó de 3 extracciones, la primera con MeOH, luego con diclorometano (DCM) y MeOH (1:1) y finalmente con DCM puro, hasta que no se observó color en el solvente. Durante el proceso de extracción de lípidos totales se incluyeron blancos analíticos para cada tipo de matriz (tejido

somático, oferta ambiental y pellets fecales), los cuales fueron sometidos a todo el procedimiento analítico en ausencia de muestra biológica. Cada mezcla de sobrenadante fue transferida a un vial de vidrio de 60 mL de fondo plano, obteniéndose así el ELT.

Limpieza del ELT

El extracto de cada muestra obtenida fue limpiado utilizando un embudo de vidrio, el cual contenía lana de vidrio y Na_2SO_4 , con el fin de eliminar trazas de H_2O y retener residuos sólidos del ELT, si los tuviere. El ELT limpio fue recolectado inicialmente en un vial de vidrio de 20 mL, el cual se utilizó únicamente como contenedor del extracto. Posteriormente, el extracto fue llevado a sequedad parcial bajo flujo suave de nitrógeno y transferido cuantitativamente a un vial de vidrio de 4 mL previamente seco y pesado. El vial de 4 mL se llevó a sequedad total y el peso neto del ELT se determinó por diferencia de peso, restando el peso del vial vacío al peso final del vial con extracto seco.

Columna de aminopropil

En esta etapa, los ELT fueron separados según su polaridad en tres fracciones distintas de lípidos mediante el uso de columnas de fase sólida de aminopropil. Previo a la separación, cada columna fue acondicionada con 8 mL de MeOH, secada con un flujo de nitrógeno y tratada nuevamente con DCM:2-propanol sin llevar a sequedad.

Entre las fracciones obtenidas, la primera fracción (F1), designada como la fracción neutra, contuvo compuestos como n-alcanos, n-alcanoles y esteroides. La segunda fracción (F2), designada como la fracción ácida, contuvo los ácidos grasos y esta se obtuvo mediante la elución de ácido acético glacial y dietil-éter (1:24), ambos previamente destilados. Esta fracción fue metilada, formando ácidos grasos metil ésteres. La tercera fracción (F3), designada como la fracción polar, contuvo fosfolípidos, y se obtuvo mediante la elución de MeOH. Todas las fracciones fueron sometidas al mismo procedimiento de concentración y secado, siendo almacenadas inicialmente en viales de vidrio de 20 mL, llevada a sequedad parcial bajo un flujo constante de nitrógeno gaseoso en un Flexi-VapTM Work Station Glas-Col® (Modelo 109A-YH-1) y posteriormente transferida a viales de 4 mL, los cuales fueron llevados a sequedad total.

Metilación de ácidos grasos

La fracción F2 (en vial de 4 mL) se le añadieron 500 μL de trifluoruro de boro y fue sometida a una temperatura constante de 60°C durante 20 min. La reacción se detuvo con 500

μL de una solución saturada de agua en DCM y se realizaron dos extracciones sucesivas con 500 μL y 1 mL de DCM, alcanzando un volumen final de 1500 μL . Cada extracción fue agitada en vórtex, permitiendo la separación de la fase orgánica en el fondo del vial. Posteriormente, las muestras se llevaron a sequedad total, bajo flujo continuo de nitrógeno gaseoso y se re-suspendieron en Etilacetato como patrón interno con una concentración conocida (50 μL), ajustado al volumen según la masa del ELT. Finalmente, las soluciones fueron transferidas con pipeta Pasteur corta a viales de 2 mL con inserto de vidrio para su posterior análisis, junto con un su correspondiente estándar y blanco.

Obtención de perfiles lipídicos

Las muestras del tejido somático de los grupos funcionales dominantes del zooplancton se prepararon para el análisis mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (DIL). Se inyectaron a 2 μL de cada muestra, volumen seleccionado debido a la baja concentración de ácidos grasos presente en este tipo de matriz.

Las muestras de oferta ambiental y de los pellets fecales de los grupos funcionales dominantes del zooplancton, fueron analizadas mediante cromatografía de masas (GC-MS), inyectándose igualmente 2 μL de cada muestra, con el fin de asegurar una adecuada sensibilidad analítica para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos.

Análisis estadístico

Análisis generales

Para evaluar diferencias en la composición de ácidos grasos entre distintas matrices y grupos funcionales, se aplicaron análisis multivariados basados en distancias ecológicas utilizando el programa PRIMER-7 y PERMANOVA+.

Estandarización y análisis entre matrices (Oferta ambiental [OA] vs. Tejido somático y fecas)

Como se compararon oferta ambiental (OA) con tejido somático y fecas, las concentraciones de ácidos grasos se estandarizaron por su total en porcentaje debido a que estas matrices están expresadas en distintas unidades. Posteriormente se aplicó una transformación a raíz cuarta y se construyó una matriz de semejanza utilizando el índice de Bray-Curtis. En cambio, en el análisis realizado dentro de cada matriz por separado (OA, solo tejido somático o solo fecas), los datos no fueron estandarizados, sino que únicamente se utilizaron directamente

en sus unidades originales, aplicando igualmente la transformación a raíz cuarta y la semejanza Bray-Curtis.

PERMANOVA y comparaciones post hoc

A partir de estas matrices, se realizó un PERMANOVA (Permutational Multivariate Analysis of Variance) con 999 permutaciones y un diseño de un factor fijo (con 7 niveles), para evaluar si existían diferencias globales en la composición de ácidos grasos. En los casos donde el número efectivo de permutaciones era bajo, se utilizó el valor $p(\text{MC})$ (Monte Carlo) como referencia principal, debido a que entrega una estimación más robusta de la significancia cuando las permutaciones posibles son limitadas. Además, cuando el PERMANOVA general indicaba diferencias significativas, se aplicó una prueba post hoc pareado para identificar entre qué grupos ocurrían dichas diferencias.

Análisis de Coordenadas principales (PCoA) y vectores de correlación.

Para visualizar los patrones de ordenamiento, se realizó un Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en las matrices de Bray-Curtis previamente calculadas. En estos gráficos se proyectaron vectores de correlación ($r > 0,7$), los cuales representan la asociación entre ácidos grasos individuales y los ejes PCO1 y PCO2. Adicionalmente se realizó un segundo PCoA basado únicamente en la presencia/ausencia de moléculas de ácidos grasos. Para ello, los datos se transformaron a formato binario y se generó una matriz de semejanza utilizando el índice de Jaccard.

Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER en PRIMER v7.0)

Se utilizó la rutina de Similitud Porcentual (SIMPER en PRIMER v7.0) para identificar los ácidos grasos que caracterizaron cada grupo estudiado, y cuáles de éstos contribuyeron en mayor proporción a la similitud intragrupo (Clarke & Warwick, 2001; Clarke & Gorley 2006).

RESULTADOS

Tejido somático de grupos funcionales dominantes del zooplancton

En el tejido somático, los copépodos presentaron la mayor concentración total de AG, con $1,18 \pm 0,21$ ng individuo⁻¹ (media \pm DE; n = 3), en comparación con las megalopas, que presentaron $0,77 \pm 0,61$ ng individuo⁻¹ (n = 3) y las zoeas, que registraron una concentración de AGTs, con $0,79 \pm 0,10$ ng individuo⁻¹ (n = 3). En relación con el total de ácidos grasos saturados (Σ AGS), los copépodos registraron la concentración más alta $0,61 \pm 0,07$ ng individuo⁻¹ promedio. Respecto al total de ácidos grasos monoinsaturados (Σ AGM), las megalopas presentaron la mayor concentración $0,70 \pm 0,55$ ng individuo⁻¹ promedio. En cuanto al total de ácidos grasos poliinsaturados (Σ AGP), los copépodos registraron la concentración más alta $0,48 \pm 0,28$ ng individuo⁻¹ promedio.

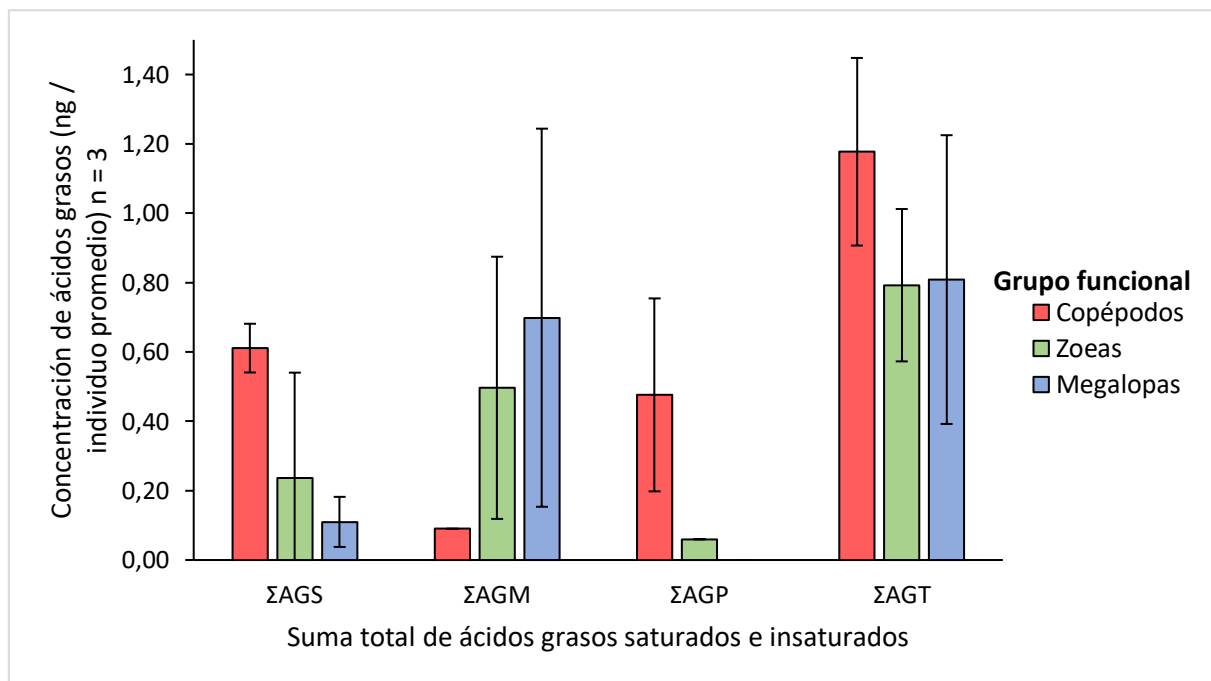


FIGURA 2.

Suma total de la concentración promedio de ácidos grasos saturados (Σ AGS), monoinsaturados (Σ AGM), poliinsaturados (Σ AGP) y totales (Σ AGT), en el tejido somático de cada grupo funcional dominante del zooplancton, (n=3).

TABLA 3

Concentración de ácidos grasos identificados por individuo promedio (ng individuo⁻¹) en el tejido somático de grupos funcionales dominantes del zooplancton n = 5 con 3 réplicas por grupo. Las filas sombreadas en gris indican ácidos grasos de origen fitoplanctónico y/o esenciales (ω -3 y ω -6); ND = No hay datos.

Ácido graso	Nomenclatura	Grupos de zooplancton dominante		
		Copépodos	Zoeas	Megalopas
Ácido mirístico	C14:0	0,002 ± 0,00	0,002 ± 0,00	ND
Ácido palmítico	C16:0	0,604 ± 0,07	0,177 ± 0,30	ND
Ácido heptadecanoico	C17:0	0,005 ± 0,01	0,011 ± 0,02	ND
Ácido esteárico	C18:0	ND	0,009 ± 0,02	ND
Ácido araquídico	C20:0	ND	0,036 ± 0,06	0,076 ± 0,06
ΣAGS		0,61	0,24	0,08
Ácido miristoleico	C14:1 ω -5	ND	0,006 ± 0,01	0,098 ± 0,08
cis-10-Ácido pentadecanoico	C15:1 ω -5	ND	0,002 ± 0,00	ND
Ácido palmitoleico	C16:1 ω -7	0,005 ± 0,01	0,410 ± 0,36	0,374 ± 0,26
cis-10-Ácido heptadecanoico	C17:1 ω -7	ND	0,007 ± 0,01	ND
Ácido elaidico	C18:1 ω -9t	ND	0,031 ± 0,03	0,219 ± 0,19
Ácido oleico	C18:1 ω -9c	0,023 ± 0,04	0,042 ± 0,05	0,007 ± 0,04
Ácido eicosenoico	C20:1 ω -9	ND	ND	ND
ΣAGM		0,03	0,50	0,70
Ácido linolelaídico (trans)	C18:2 ω -6t	ND	0,010 ± 0,02	ND
Ácido linoleico	C18:2 ω -6c	0,476 ± 0,28	ND	ND
Ácido alfa-linoléico + γ -linoléico	C18:3 ω -3 + C18:3 ω -6	ND	0,009 ± 0,02	ND
ΣAGP		0,48	0,02	ND
ΣAGT		1,12	0,75	0,77

Considerando los AGS (Tabla 3), el ácido palmítico (C16:0) fue el más abundante con una concentración en copépodos de 0,60 ng individuo⁻¹ promedio (n=3) y valores menores en zoeas con 0,18 ng individuo⁻¹ promedio, mientras que estuvo ausente en megalopas, las cuales presentaron una concentración más alta de ácido araquídico (C20:0). Entre los AGM (Tabla 3), destacó con alta concentración el ácido palmitoleico (C16:1 ω -7) en zoeas y megalopas con una concentración de 0,41 y 0,37 ng individuo⁻¹ promedio respectivamente. En el grupo de los AGP (Tabla 3), el ácido linoleico (C18:2 ω -6) considerado un ácido graso esencial, se detectó exclusivamente en copépodos con una concentración de 0,48 ng individuo⁻¹ promedio, mientras que en las zoeas está presente en bajas concentraciones ácido linoleico trans y ácido alfa-linoléico + γ -linoléico (C18:2 T9 ω -6 y C18:3 ω -3 + C18:3 ω -6 respectivamente). Por último, las megalopas no presentaron AGP detectables.

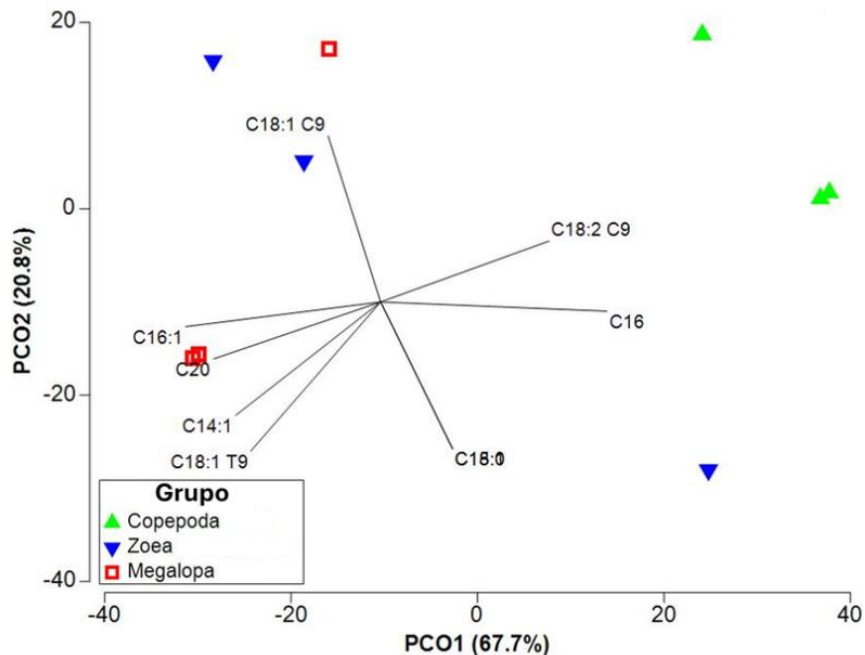


FIGURA 3.

Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de la composición de AG (ng individuo⁻¹ promedio) n = 5, 3 réplicas por grupo, en el tejido somático de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copéodos, zoeas y megalopas).

Los ejes PCO1 y PCO2 explican el 88,5% de la variabilidad de los datos. Los vectores corresponden a los coeficientes de correlación de Pearson (r) mayores a 0,7 entre las concentraciones de ácidos grasos específicos y ambos ejes. Se observan agrupamientos en el plano, donde, en términos de composición multivariada de ácidos grasos, los copéodos se diferencian de las megalopas (PERMANOVA, p = 0,087; Pair-Wise Comparison, p(MC) = 0,003), mientras que las zoeas muestran una mayor dispersión, superponiéndose tanto con copéodos como megalopas. Estos datos también son coherentes con el análisis SIMPER (Anexo 1; Tabla 6A ,7A y 8A), donde copéodos y megalopas presentaron valores altos de similitud interna, mientras que las zoeas mostraron el menor promedio de similitud, consistente con su mayor dispersión observada en el análisis PCO. Asimismo, la similitud intragrupo de las zoeas estuvo explicada por AG compartidos con copéodos y megalopas, principalmente C16:0 y C16:1 ω-7 respectivamente.

Oferta ambiental

En la oferta ambiental, las mayores concentraciones de ácidos grasos totales (AGT) se registraron a 5 y 8 m de profundidad, con valores de $2,54 \pm 0,84 \text{ ng L}^{-1}$ (media \pm DE; $r = 3$) y $2,57 \pm 0,71 \text{ ng L}^{-1}$ ($r = 2$) respectivamente. En contraste, la menor concentración se observó a los 0 m, con $1,66 \pm 0,22 \text{ ng L}^{-1}$ promedio ($r = 3$). En cuanto a los grupos de ácidos grasos, la sumatoria de ácidos grasos saturados (Σ AGS) presentó su mayor valor a los 8 m ($1,58 \pm 0,70 \text{ ng L}^{-1}$). En el caso de los ácidos grasos monoinsaturados (Σ AGM) su mayor concentración se registró a los 5 m ($0,85 \pm 0,30 \text{ ng L}^{-1}$), mientras que los poliinsaturados (Σ AGP) presentaron su mayor concentración a los 8 m ($0,29 \pm 0,17 \text{ ng L}^{-1}$).

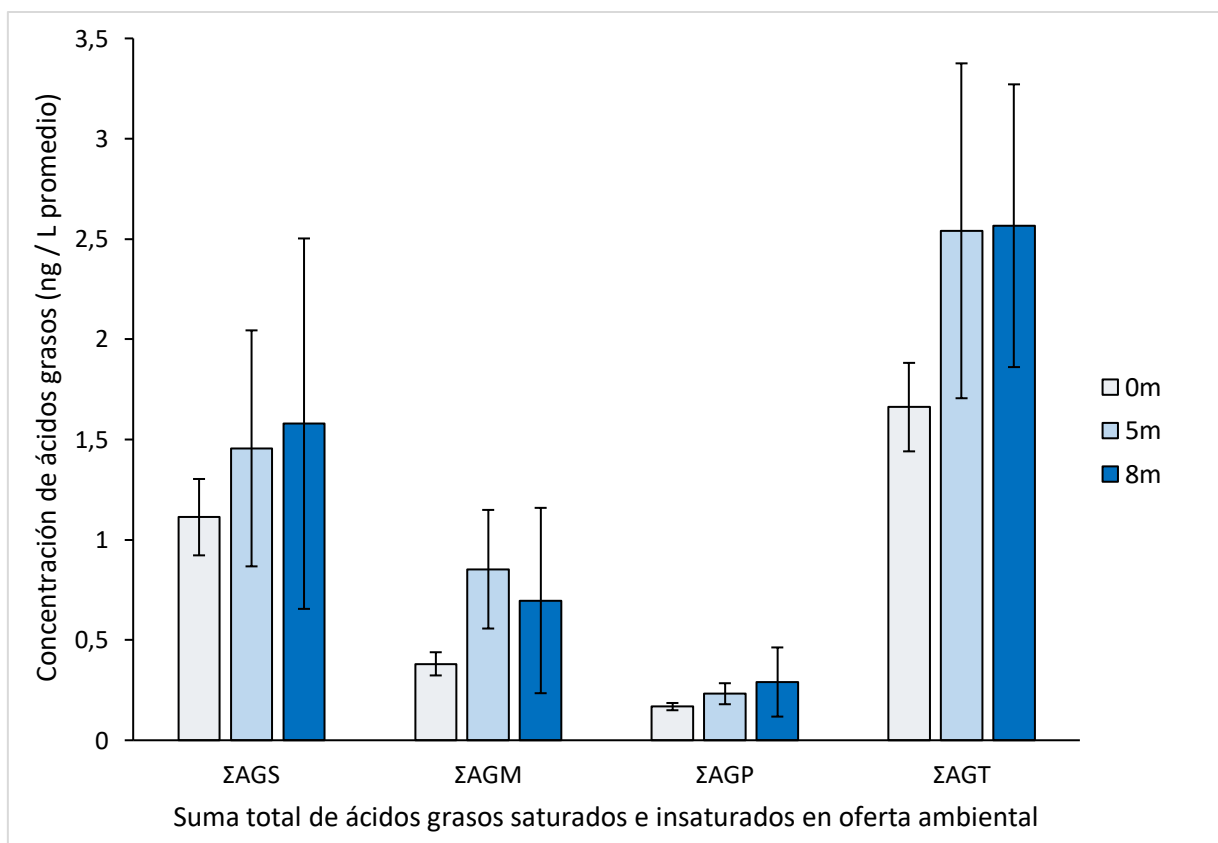


FIGURA 4.

Suma total promedio de concentración de ácidos grasos saturados (Σ AGS), monoinsaturados (Σ AGM), poliinsaturados (Σ AGP) y totales (Σ AGT), en la oferta ambiental a distintas profundidades (0 m, 5 m y 8 m).

TABLA 4

Concentración de ácidos grasos identificados por ng L^{-1} promedio en la oferta ambiental a distintas profundidades (0 m, 5 m y 8 m). Las filas sombreadas en gris indican ácidos grasos de origen fitoplanctónico y/o esenciales (ω -3 y ω -6); ND = No hay datos.

Ácido graso	Nomenclatura	Profundidad		
		0 m	5 m	8 m
Ácido láurico	C12:0	0,004 ± 0,00	0,016 ± 0,01	ND
Ácido tridecanoico	C13:0	ND	0,010 ± 0,02	ND
Ácido mirístico	C14:0	0,143 ± 0,14	0,147 ± 0,08	0,137 ± 0,00
Ácido pentadecanoico	C15:0	0,038 ± 0,04	0,075 ± 0,03	0,060 ± 0,06
Ácido palmítico	C16:0	0,637 ± 0,71	0,888 ± 0,34	0,923 ± 0,00
Ácido heptadecanoico	C17:0	0,016 ± 0,02	0,026 ± 0,01	0,012 ± 0,01
Ácido esteárico	C18:0	0,260 ± 0,31	0,270 ± 0,15	0,419 ± 0,26
Ácido araquídico	C20:0	0,006 ± 0,01	0,010 ± 0,01	0,012 ± 0,01
Ácido behénico	C22:0	0,008 ± 0,01	0,014 ± 0,00	0,015 ± 0,01
ΣAGS		1,11	1,46	1,58
Ácido miristoleico	C14:1 ω -5	ND	ND	0,000 ± 0,05
Ácido cis-10-pentadecenoico	C15:1 ω -5	ND	ND	0,000 ± 0,03
Ácido palmitoleico	C16:1 ω -7	0,113 ± 0,11	0,330 ± 0,09	0,198 ± 0,47
Ácido cis-10-heptadecenoico	C17:1 ω -7	0,005 ± 0,01	0,030 ± 0,01	0,000 ± 0,01
Ácido eláidico (trans)	C18:1 ω -9t	0,259 ± 0,26	0,401 ± 0,11	0,498 ± 0,15
Ácido oleico	C18:1 ω -9c	ND	0,063 ± 0,11	ND
Ácido cis-11-eicosenoico	C20:1 ω -9	ND	0,012 ± 0,01	ND
Ácido erúxico	C22:1 ω -9	0,003 ± 0,00	0,018 ± 0,02	ND
ΣAGM		0,38	0,85	0,70
Ácido linolelaídico (trans)	C18:2 ω -6t	0,067 ± 0,01	0,142 ± 0,03	0,157 ± 0,00
Ácido linoleico	C18:2 ω -6c	0,080 ± 0,01	0,036 ± 0,06	0,134 ± 0,03
Ácido α -linolénico + γ -linolénico	C18:3 ω -3 + C18:3 ω -6	ND	0,008 ± 0,01	0,000 ± 0,04
Ácido eicosapentaenoico (EPA)	C20:5 ω -3	0,021 ± 0,02	0,038 ± 0,01	ND
Ácido docosadienoico	C22:2 ω -6	ND	ND	0,001 ± 0,00
Ácido docosahexaenoico (DHA)	C22:6 ω -3	ND	0,009 ± 0,01	ND
ΣAGP		0,17	0,23	0,29
ΣAGT		1,66	2,54	2,57

Se identificó un total de 22 AG en la oferta ambiental teniendo en consideración todas las profundidades (Tabla 4). A los 0 m de profundidad se identificaron 15 AG, a los 5 m se identificaron 20 AG y a los 8 m se identificaron 11 AG. Entre los AG de origen fitoplanctónico, el C16:7 ω -7 presentó su mayor concentración a los 5 m (0,33 ng L^{-1}). En esta misma profundidad también se registraron los valores más altos de C20:5 ω -3 y C22:6 ω -6, con 0,04 ng L^{-1} y 0,009 ng L^{-1} respectivamente.

En cuanto a los ácidos grasos esenciales, el C18:2 ω -6t mostró sus concentraciones máximas a los 5 y 8 m (0,14 y 0,16 ng L⁻¹), mientras que el C18:2 ω -6c alcanzó su valor más alto a los 8 m (0,13 ng L⁻¹). Por último, el C18:3 ω -3 + C18:3 ω -6 registraron su mayor concentración a los 5 m (0,008 ng L⁻¹).

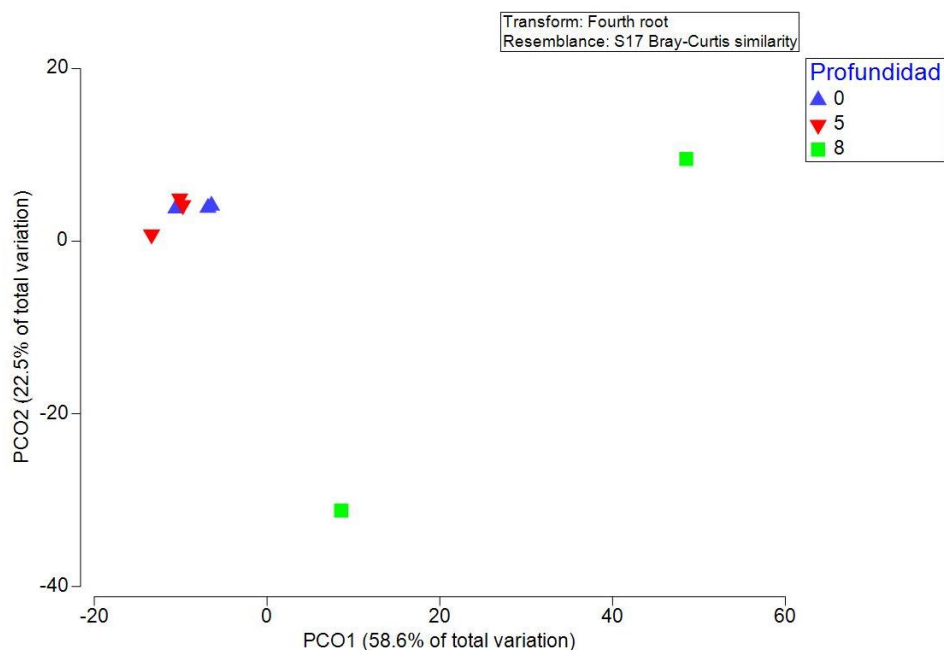


FIGURA 5.

Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de la composición de AG (ng L⁻¹) de la oferta ambiental en la Bahía de San Vicente, Concepción a diferentes profundidades (0, 5 y 8 m).

Los ejes PCO1 y PCO2 explican en conjunto el 81,1% de la variabilidad de los datos (Figura 5). En el plano se observa que las muestras de 0 m y 5 m tienden a agruparse y a solaparse entre sí, indicando una concentración de AG similar entre ambas profundidades. En contraste, las muestras de 8 m presentan una mayor dispersión y se separan del resto, lo que sugiere diferencias en su composición multivariada de ácidos grasos en comparación con las otras profundidades.

Fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton

En términos de AGT en las fecas de los grupos funcionales dominantes del zooplancton (Figura 6), estos se registraron en mayor concentración en las megalopas, con un valor de 0,35

$\pm 0,34$ ng individuo⁻¹ (media \pm DE; n = 4). En comparación, los copépodos y las zoeas presentaron concentraciones relativamente similares de AGT, siendo estas de $0,25 \pm 0,09$ ng/individuo promedio y $0,20 \pm 0,13$ ng individuo⁻¹ (media \pm DE; n = 4), respectivamente. En relación con el total de ácidos grasos saturados (Σ AGS), las megalopas registraron la concentración más alta $0,34 \pm 0,33$ ng individuo⁻¹ promedio. Respecto al total de ácidos grasos monoinsaturados (Σ AGM), las megalopas presentaron la mayor concentración $0,014 \pm 0,01$ ng/individuo promedio. En cuanto al total de ácidos grasos poliinsaturados (Σ AGP), las zoeas registraron la concentración más alta $0,003 \pm 0,002$ ng individuo⁻¹ promedio.

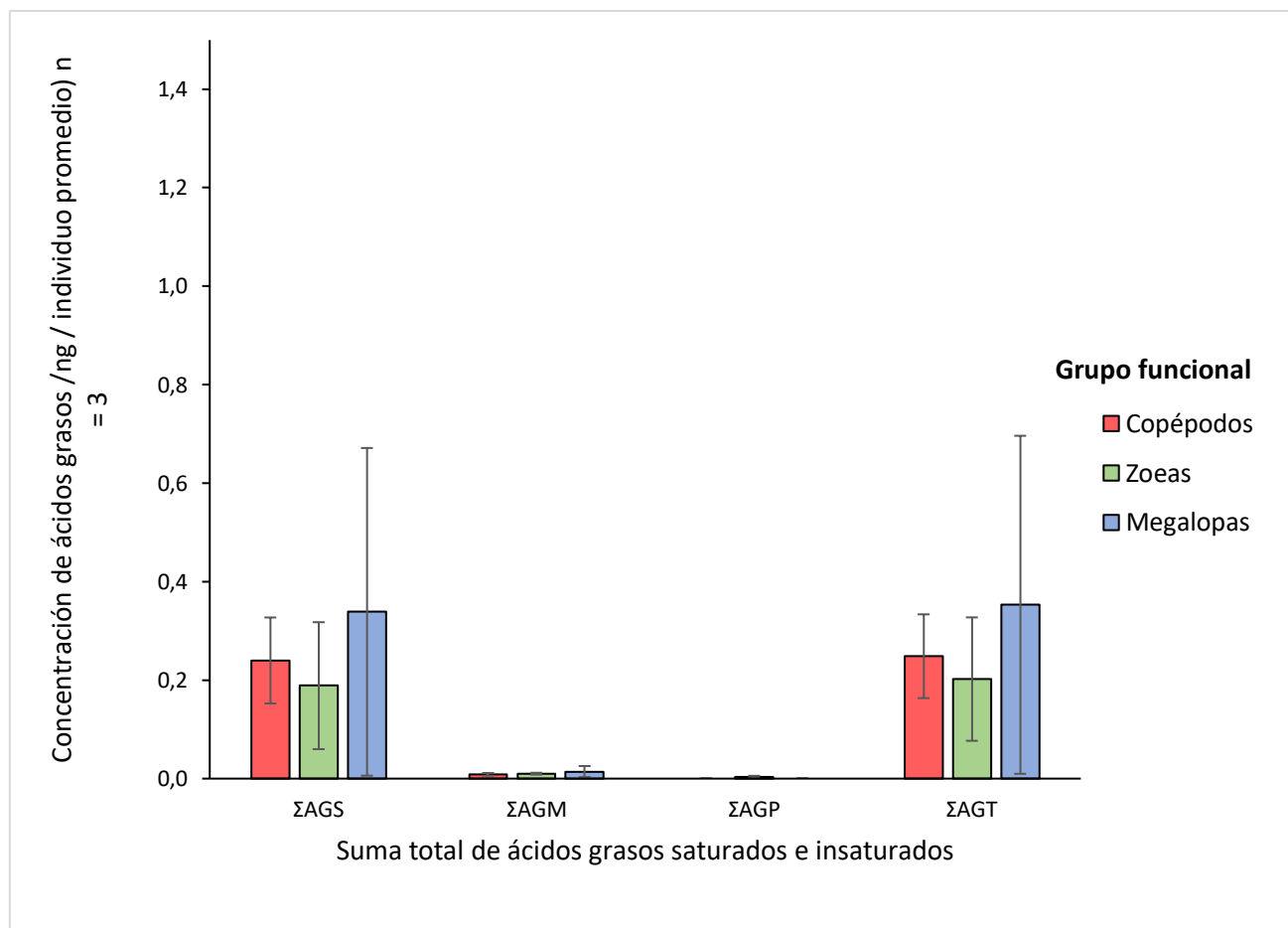


FIGURA 6.

Suma total de concentración de ácidos grasos saturados (Σ AGS), monoinsaturados (Σ AGM), poliinsaturados (Σ AGP) y totales (Σ AGT), en las fecas de cada grupo funcional dominante del zooplancton (n=4).

TABLA 5

Concentración de ácidos grasos identificados por individuo promedio (ng individuo⁻¹ promedio) en las fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (n= 4), cinco individuos por grupo. Las filas sombreadas en gris indican ácidos grasos de origen fitoplanctónico y/o esenciales (ω -3 y ω -6); ND = No hay datos.

Ácido graso	Nomenclatura	Grupos de zooplancton dominante		
		Copépodos	Zoeas	Megalopas
Ácido palmítico	C16:0	0,132 ± 0,056	0,116 ± 0,081	0,188 ± 0,181
Ácido esteárico	C18:0	0,108 ± 0,038	0,073 ± 0,049	0,150 ± 0,151
ΣAGS		0,24	0,19	0,34
Ácido palmitoleico	C16:1 ω -7	0,004 ± 0,003	0,004 ± 0,000	0,005 ± 0,003
Ácido eláidico	C18:1 ω -9t	0,004 ± 0,003	0,006 ± 0,002	0,010 ± 0,010
Ácido oleico	C18:1 ω -9c	0,001 ± 0,002	ND	ND
ΣAGM		0,01	0,01	0,01
Ácido linolelaídico (trans)	C18:2 ω -6t	ND	0,003 ± ND	ND
ΣAGP		ND	0,003	ND
ΣAGT		0,25	0,20	0,35

En cuanto a ácidos grasos identificados en las fecas de los distintos grupos funcionales dominantes del zooplancton (Tabla 5), se detectaron 5 tipos de AG en copépodos y zoeas, mientras que las megalopas presentaron 4 tipos. Entre estos AG, el C16: ω -7 estuvo presente en las fecas de todos los grupos funcionales, registrando su mayor concentración en las megalopas (0,005 ng individuo⁻¹ promedio). Por otra parte, el C18:2 ω -6t se detectó exclusivamente en las fecas de la zoeas, con una concentración de 0,003 ng/individuo promedio.

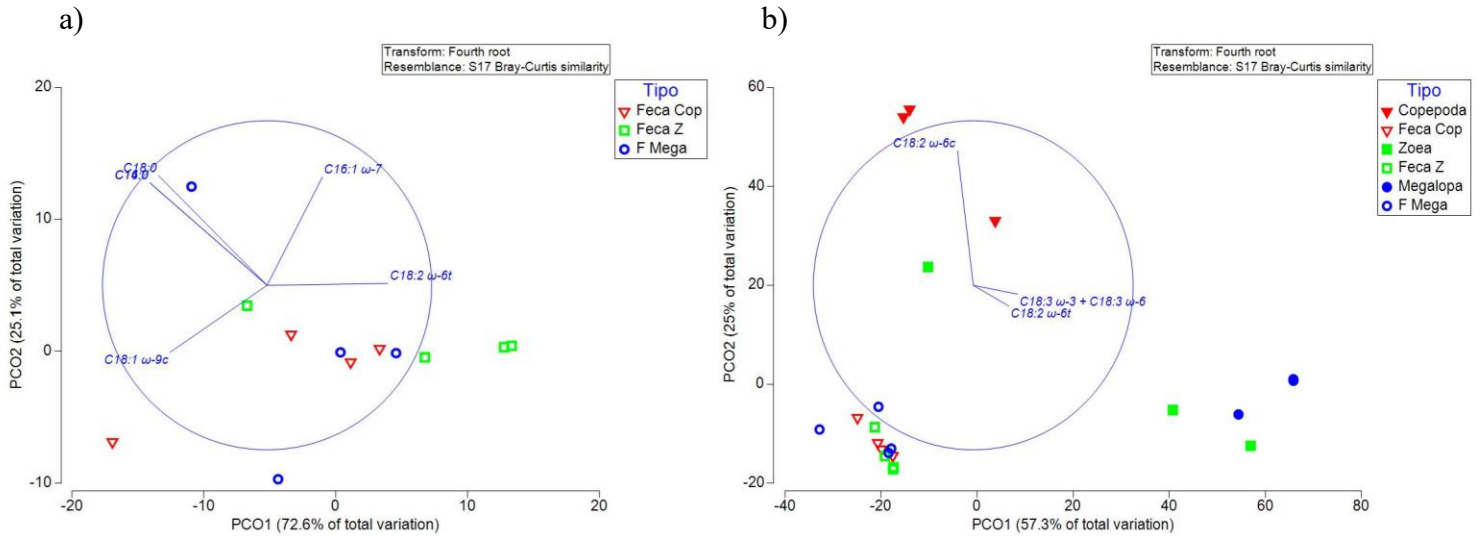


FIGURA 7.

Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de la composición de AG (ng individuo⁻¹ promedio) n = 4, cinco individuos por grupo, en fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas). a) Fecas. b) Fecas y Tejido somático.

Los ejes PCO1 y PCO2 de la Figura 7a explican en conjunto el 97,7% de la variabilidad de los datos. En el plano se observa que las fecas de los grupos funcionales dominantes del zooplancton no forman agrupamientos claramente separados, sino que presentan un solapamiento considerable entre ellas. Esta distribución indica que la composición multivariada de ácidos grasos en las fecas es similar entre los grupos funcionales dominantes del zooplancton. Esta tendencia coincide con los resultados del PERMANOVA ($P(\text{perm}) = 0,217$; $P(\text{MC}) = 0.221$), con un valor $p < 0.05$, por lo cual no se detectaron diferencias significativas entre los grupos. Estos resultados también son consistentes con el análisis SIMPER (Anexo 1; Tabla 6B, 7B y 8B), donde las fecas de los distintos grupos funcionales del zooplancton presentaron valores altos de similitud intragrupo, coherentes con el solapamiento observado en el análisis PCO. En todos los tipos de fecas, la similitud intragrupo estuvo explicada principalmente por los mismos AG, C14:0, C16:0 y C18:0, los cuales aportaron el mayor porcentaje a la similitud promedio.

En la Figura 7b los ejes PCO1 y PCO2 explican en conjunto el 82,3% de la variabilidad de los datos, mostrando una clara separación de ácidos grasos entre los grupos. El PERMANOVA confirmó diferencias significativas ($P(\text{MC}) = 0,001 < 0.05$). El análisis post hoc

indicó que estas diferencias ocurren principalmente entre copépodos y fecas, así como entre copépodos y megalopas. En cambio, las zoeas no mostraron diferencias significativas con otros grupos, ni tampoco hubo diferencias entre los distintos tipos de fecas.

TABLA 6

Resumen de ácidos grasos esenciales y de origen fitoplanctónico en la oferta ambiental, tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton; ND = No hay datos.

Ácido graso	Oferta ambiental (ng L ⁻¹)			Grupos funcionales dominantes del zooplancton (ng individuo ⁻¹ promedio)					
	0m (p)	5m (p)	8m (p)	Copépodos (t)	Zoeas (t)	Megalopas (t)	Copépodos (f)	Zoeas (f)	Megalopas (f)
C16:1 ω-7	0,11	0,33	0,20	0,01	0,41	0,37	0,004	0,004	0,005
C18:2 ω-6t	0,07	0,14	0,16	ND	0,01	ND	ND	0,003	ND
C18:2 ω-6c	0,08	0,04	0,13	0,48	ND	ND	ND	ND	ND
C18:3 ω-3 + C18:3 ω-6	0,00	0,01	0,00	ND	0,01	ND	ND	ND	ND
C20:5 ω-3	0,02	0,04	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C22:6 ω-3	0,00	0,01	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Abreviaciones	p = Profundidad			t = Tejido somático			f = Fecas		

En términos de ácidos grasos esenciales y de origen fitoplanctónico (Tabla 6), el C16:1 ω-7 se registró en todas las matrices analizadas: oferta ambiental, tejido somático y fecas de los grupos funcionales dominantes del zooplancton. El ácido C18:2 ω-6t también estuvo presente en las tres matrices, detectándose en la oferta ambiental, en el tejido somático y fecas de las zoeas.

Por otra parte, el C18:2 ω-6c se registró solo en la oferta ambiental y en el tejido somático de los copépodos. El C18:3 ω-3 + C18:3 ω-6 se detectó exclusivamente en la oferta ambiental a los 5 m de profundidad y en el tejido somático de las zoeas. Finalmente, los ácidos C20:5 ω-3 y C22:6 ω-3 se registraron únicamente en la oferta ambiental: el primero entre los 0 y 5 m, y el segundo solo a los 5 m.

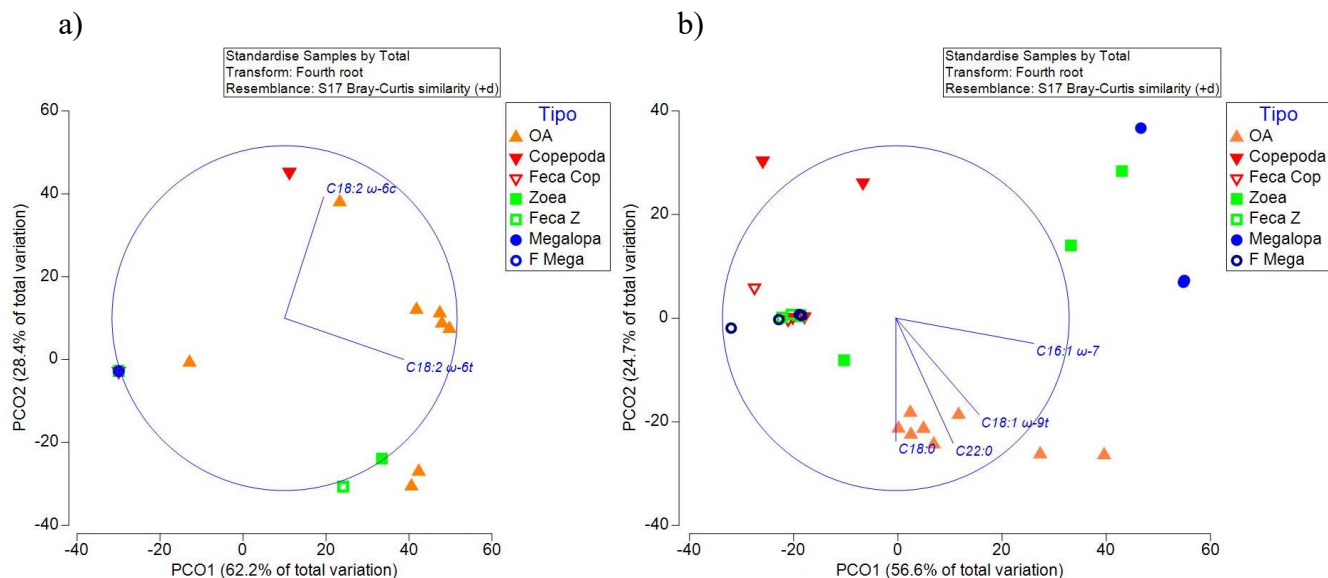


FIGURA 8.

Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) concentración de AG en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (Copépodos, zoeas y megalopas). a) AG esenciales. b) AG no esenciales.

En la Figura 8 (paneles a y b), los ejes PCO1 y PCO2 explican gran parte de variabilidad de los datos (Fig. 2a: 90,6% total, Fig.2b: 81,3% total). En ambos casos se observan tendencias de separación entre la oferta ambiental (OA) y los grupos funcionales, aunque también se observan áreas de traslape, especialmente entre fecas y megalopas.

Esta tendencia coincide con los resultados del PERMANOVA, donde hay diferencias significativas en la composición entre grupos ($P(\text{perm}) = 0,001$; $P(\text{MC}) = 0,001$). Para determinar entre que grupos ocurrían estas diferencias, se realizó un análisis post hoc, donde la mayoría de las comparaciones fueron significativas ($P(\text{MC}) < 0,05$). Sin embargo, algunos pares no mostraron diferencias significativas ($P(\text{MC}) > 0,05$), principalmente las comparaciones que incluyeron a las Zoeas y el par Feca Copépodos - Feca Zoeas.

En conjunto, los análisis de PCoA y PERMANOVA evidencian un patrón consistente: la mayoría de los grupos difiere en su composición de ácidos grasos, mientras que algunos, como las fecas de copépodos y zoeas, así como las megalopas, presentan mayor similitud entre sí.

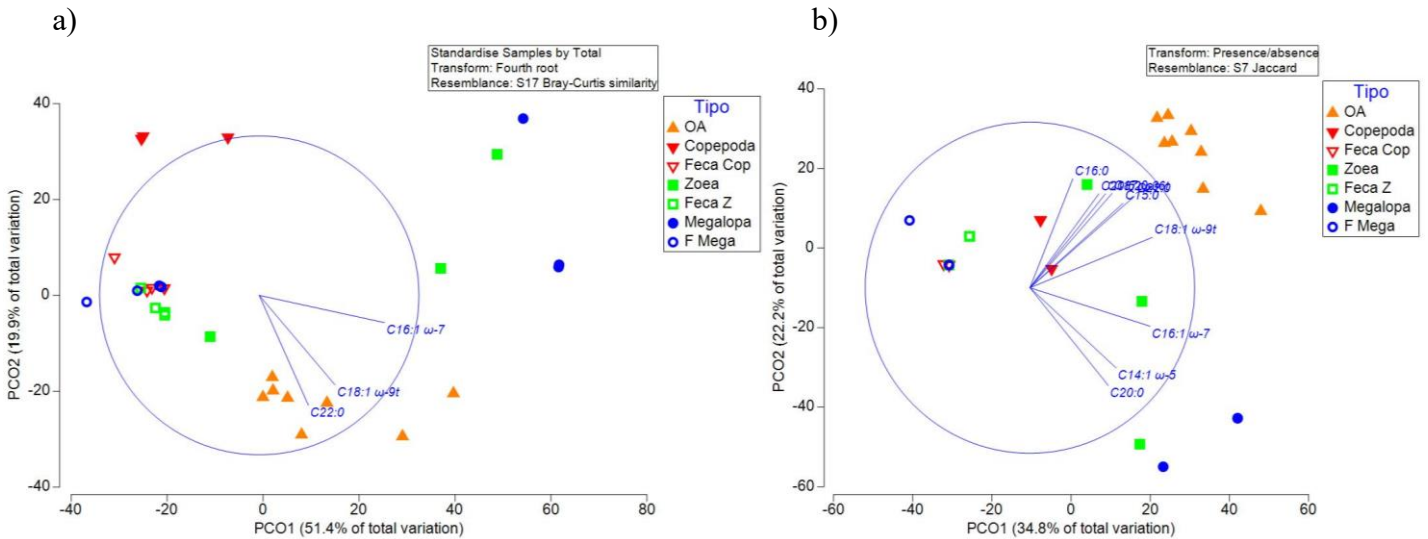


FIGURA 9.

Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de AGT en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (Copépodos, zoeas y megalopas). a) Concentración de AGT estandarizada en porcentaje (%). b) Moléculas de ácidos grasos identificados (presencia/ausencia)

En la Figura 9a, los ejes PCO1 y PCO2 explican el 70,3% de la variabilidad de los datos. Se observan patrones de separación entre la oferta ambiental, los tejidos y las fecas de los grupos funcionales. Estas diferencias fueron corroboradas por el PERMANOVA ($P(\text{MC}) = 0,001$). El análisis post hoc mostró que la mayoría de los grupos difieren significativamente ($P(\text{MC}) < 0,05$), especialmente OA, Copépodos, Megalopas y las fecas. Solo algunos pares, principalmente los relacionados con Zoeas y el contraste Feca Copépodos - Feca Zoeas, no mostraron diferencias significativas. En conjunto, la figura evidencia que la composición porcentual de ácidos grasos varía entre la mayoría de los grupos.

En la Figura 9b, los ejes PCO1 y PCO2 explican el 57% de la variación, mostrando nuevamente diferencias entre la oferta ambiental, los tejidos y los distintos grupos funcionales. En este caso, la separación es aún más pronunciada, especialmente entre OA, zoeas y megalopas, lo que indica diferencias en la presencia/ausencia de moléculas de ácidos grasos.

DISCUSIÓN

Diferencias en la composición de ácidos grasos entre los grupos funcionales (tejido somático)

Existen diferencias significativas en la composición de AG del tejido somático entre los grupos funcionales analizados, evidencia de que cada uno de ellos tiene estrategias tróficas y metabólicas distintivas, coherente con los patrones observados en el análisis PCO y respaldadas por el análisis SIMPER. A diferencia de los copépodos, que forma parte del holoplancton, (Bisinicu et al. 2024), las zoeas y megalopas corresponden a estadios larvales transitorios de crustáceos decápodos, formando parte de un ciclo de vida complejo con fases pelágicas y bentónicas bien diferenciadas (Anger 2001). Durante estas fases pelágicas, especialmente en larvas planctotróficas, el crecimiento, la duración del desarrollo y el éxito de la metamorfosis están condicionados principalmente por la disponibilidad, calidad y variabilidad temporal del alimento en la columna de agua, lo que se traduce en diferencias en la asimilación, utilización y retención de ácidos grasos en tejido somático (Howard & Hentschel 2005). En este contexto, la interpretación de la composición lipídica en zoeas y megalopas debe considerar su condición ontogenética transitoria y las altas demandas energéticas asociadas al desarrollo larval temprano planctotrófico, en contraste con los patrones observados en copépodos.

Copépodos

Los copépodos pertenecientes a la especie *Acartia (Acanthacartia) tonsa*, a pesar de ser el grupo funcional más pequeño en el presente estudio (2-5 veces menor que las zoeas y 8-15 veces menor que las megalopas, según la literatura (García-Guerrero et al. 2006; Holmes-Hackerd et al. 2023), presentaron la mayor concentración de AGT en su tejido somático, junto con altas concentraciones de AGS y ácidos grasos esenciales en comparación con los otros grupos funcionales (Tabla 3).

Este patrón es consistente con lo descrito por Escribano & Pérez (2010), quienes documentaron que los copépodos dominantes (*Acartia tonsa* y *Centropages brachiatus*) en ecosistemas de surgencia presentan una alta capacidad de acumulación lipídica debido a su dieta basada en nanoplancton y picoplancton, ricos en AGM y AGP. Del mismo modo, la buena

condición nutricional registrada en los copépodos es coherente con los altos niveles de disponibilidad de alimento característicos de los periodos de surgencia en la zona costera centro-sur de Chile (Escribano & Schneider 2007). Esta interpretación también es coherente con los resultados del estudio experimental realizado por Werbrouck *et al.* (2016), donde demostraron que especies como *Acartia (Acanthacartia) tonsa* incrementan rápidamente sus reservas lipídicas bajo condiciones de alta oferta alimentaria.

No obstante, al analizar en detalle los marcadores tróficos (Tabla 3), los copépodos presentan bajas concentraciones de ácidos grasos característicos de diatomeas, particularmente C16:1 ω -7. Este resultado sugiere que, a pesar de las altas concentraciones de AGT en el tejido somático, la contribución directa del fitoplancton diatomáceo a la dieta no sería el principal factor que explique la acumulación de AG observada.

Un resultado interesante, fue la detección del ácido graso C18:2 ω -6, reconocido en la literatura como un marcador trófico asociado a detrito terrestre, lo cual cobra bastante relevancia considerando que el área de estudio corresponde a una bahía con influencia estuarina cercana. Si bien el muestreo se realizó a una distancia aproximada de 2 km desde la desembocadura del estuario, la detección de este marcador sugiere que los flujos de materia orgánica de origen continental pueden extender su influencia trófica dentro de la bahía. Esta interpretación es coherente con lo reportado por Gonçalves *et al.* (2012), quienes demostraron mediante perfiles de ácidos grasos que las especies de copépodos estuarinos, incluyendo *Acartia (A) tonsa*, presentan dietas predominantemente omnívoras, integrando fuentes tróficas tanto autótrofas como heterótrofas, así como material de origen continental. En dicho estudio, las altas concentraciones de C18:2 ω -6 fueron interpretadas como evidencia de consumo de detrito terrestre o algas verdes.

Bajo este contexto, las altas concentraciones de AGT observadas en *Acartia (Acanthacartia) tonsa* no responderían exclusivamente a una dieta fitoplanctónica, sino que reflejarían una estrategia trófica flexible, característica de ambientes estuarinos y de bahía. Por lo tanto, esta plasticidad trófica permitirá a *A. tonsa* mantener elevadas reservas de AG incluso en escenarios donde los marcadores clásicos de diatomeas son escasos, como se puede observar en la Tabla 4, referente a la oferta ambiental. En conjunto, estos resultados refuerzan la idea de que la composición de ácidos grasos en los copépodos no solo refleja la disponibilidad del

fitoplancton, sino también la integración de múltiples fuentes tróficas, especialmente en sistemas costeros con influencia estuarina como es el caso de Bahía San Vicente donde el estero Lengua se encuentra alojado en su cabeza y la desembocadura del río Bio-bio (el más ancho de Chile) influenciando desde el sur junto con la corriente superficial dominante (Vergara et al. 2023). Así, la presencia de marcadores continentales y la baja contribución relativa de diatomeas apoyan una interpretación omnívora de la dieta de *Acartia (Acanthacartia) tonsa*, en concordancia con estudios previos realizados en estuarios templados, y destacan la importancia de considerar el contexto ambiental y la conectividad terrestre-marina en el análisis de redes tróficas costeras.

Zoeas

Las zoeas de la familia Porcellanidae, correspondientes a un estadio larval planctotrófico presentaron el mayor número de tipos de ácidos grasos identificados en su tejido somático (12), lo cual sugiere que estos organismos tienen una mayor flexibilidad metabólica y una dieta predominantemente omnívora que se conforma por una amplia variedad de fuentes alimenticias. Cabe mencionar que estas, a su vez, presentaron la menor concentración de AGT (0,75 ng individuo⁻¹ promedio), sobre todo en el caso de los ácidos grasos esenciales (0,02 ng individuo⁻¹ promedio), por lo que, este patrón podría estar relacionado con su alta demanda energética asociada a su desarrollo larval temprano, donde necesitan maximizar su ingesta de alimento para garantizar su crecimiento y su posterior transición hacia estadios larvales más avanzados (Anger 2001).

Este comportamiento fisiológico concuerda con la evidencia experimental de Levine & Sulkin (1984) quienes demostraron que los primeros estadios zoeales del decápodo *Eurypanopeus depressus* requieren cantidades elevadas de AGP para sostener procesos críticos como el crecimiento y la diferenciación celular. Debido a esta elevada demanda, dichos AGP son utilizados de manera inmediata, evitando su acumulación en los tejidos, lo que se traduce en concentraciones reducidas de AGP aun cuando existen diversas fuentes de alimento. En concordancia con este patrón, en nuestro estudio las zoeas de Porcellanidae presentaron únicamente dos tipos de AGP (C18:2 ω -6t y C18:3 ω -3 + C18:3 ω -6), los cuales se encontraron en bajas concentraciones (0,010 ng individuo⁻¹ promedio y 0,009 ng individuo⁻¹ promedio, respectivamente). Estas bajas concentraciones apoyan la interpretación de utilización rápida de estos compuestos para sostener el desarrollo larval, en lugar de almacenarlos.

Posteriormente, Shaber & Sulkin (2007) reforzaron esta interpretación al evidenciar que tanto larvas tempranas como estadios zoeales avanzados continúan ingiriendo microalgas incluso cuando su estado nutricional es favorable. Este comportamiento refleja una alimentación omnívora y poco selectiva que se mantiene durante todo el desarrollo zoeal, posiblemente como una estrategia para asegurar la adquisición continua de compuestos esenciales presentes en el fitoplancton, entre ellos los AGP de cadena larga requeridos para el desarrollo. En conjunto, el alto número de ácidos grasos identificados en las zoeas de Porcellanidae y la baja concentración de AGT observada en nuestros estudios concuerdan con el marco fisiológico propuesto por ambos estudios (Levine & Sulkin 1984; Shaber & Sulkin 2007) este sentido, la variedad de ácidos grasos reflejaría la amplitud de fuentes tróficas utilizadas, mientras que las reducidas concentraciones de AGT y más concretamente AGP evidencian una utilización intensiva de compuestos esenciales para sostener las altas demandas metabólicas propias del desarrollo larval temprano.

Megalopas

Las megalopas presentaron un perfil de ácidos grasos claramente diferenciado respecto a los copépodos y las zoeas. En términos generales, la concentración de AGT fue inferior a la observada en copépodos, aunque relativamente similar a la registrada en zoeas (Tabla 3). Este contenido lipídico se caracterizó por una dominancia de AGM y ausencia de AGP, lo que sugiere una especialización metabólica propia de este estadio larval avanzado (Anger 1998).

Este resultado es parcialmente consistente con lo descrito por Hiltunen et al. (2024) quienes señalan que la composición lipídica de las megalopas refleja tanto procesos ontogenéticos como la calidad del alimento disponible durante el desarrollo pelágico. Si bien en dicho estudio las megalopas de *Metacarcinus magister* presentaron mayores proporciones de ácidos grasos esenciales, los autores destacan que estas reservas disminuyen significativamente bajo escenarios de baja calidad alimentaria, particularmente cuando la comunidad planctónica está dominada por presas pobres en lípidos. En este sentido, la ausencia de AGP observada en el presente estudio podría ser atribuido a condiciones alimentarias contrastantes o una utilización intensiva de estos compuestos durante etapas avanzadas del desarrollo larval.

Al analizar en mayor detalle los marcadores tróficos, se observa la presencia del ácido graso C16:1 ω -7, reconocido como un marcador característico de diatomeas, así como del C18:1

ω -9t, asociado en la literatura a organismos carnívoros o a dietas predominantemente heterotróficas (Dalsgaard et al. 2003; Gonçalves et al. 2012). Esta combinación permite inferir una alimentación menos dependiente de fitoplancton y mayor contribución de presas heterotróficas. A diferencia de las zoeas, que presentan una alimentación más generalista para satisfacer sus elevadas demandas metabólicas, las megalopas, al encontrarse en la última fase larval y poseer mayor capacidad de locomoción y captura, podrían exhibir una mayor selectividad alimentaria.

En este contexto, la literatura evidencia que las estrategias tróficas de las megalopas pueden ser altamente variables entre taxa. Por un lado, (Shaber & Sulkin 2007) demostraron experimentalmente que las megalopas de la especie *Fabia subquadrata* mantienen una alimentación activa y oportunista, ingiriendo dinoflagelados y otros componentes del plancton, lo que indica que la estrategia planctotrófica no necesariamente se interrumpe tras los estadios zoeales. Este comportamiento podría explicar perfiles lipídicos dominados por AGM, especialmente cuando la dieta se orienta hacia presas heterotróficas. Por otro lado, existe ejemplos contrastantes de megalopas con desarrollo secundariamente lecitotrófico, en las cuales la alimentación externa se encuentra reducida o ausente. Beder et al. (2018) describió que en la especie *Paralithodes camtschaticus* las megalopas dependen completamente de las reservas lipídicas acumuladas durante los estadios larvales, presentando una intensa utilización de triacilglicéridos como fuente energética y una retención proporcional de ácidos grasos esenciales de cadena larga. Este patrón contrasta con los resultados obtenidos, donde no se evidenció acumulación de AGP.

En conjunto, estos resultados sugieren que las megalopas analizadas presentan una alimentación más selectiva, que los otros dos grupos estudiados, pero con una menor capacidad de acumulación de ácidos grasos esenciales. Esta condición podría reflejar una transición funcional entre una fase predominantemente planctotrófica y etapas posteriores del ciclo de vida, en las que las reservas lipídicas comienzan a destinarse prioritariamente a procesos de metamorfosis y asentamiento bentónico.

Heterogeneidad de la oferta ambiental en una bahía somera

La oferta ambiental de ácidos grasos mostró una marcada variación vertical en la columna de agua (Tabla 4). A los 5 m de profundidad se registró el mayor número de ácidos grasos identificados, con un total de 20, mientras que las mayores concentraciones de AGT se observaron a 5 y 8 m. Asimismo, las mayores concentraciones de ácidos grasos de origen fitoplanctónico (C16:7 ω -7, C20:5 ω -3 y C22:6 ω -6) se concentraron en el estrato subsuperficial (5 m), disminuyendo hacia mayores profundidades. En contraste, el estrato más profundo (8 m) presentó un menor número de ácidos grasos identificados, evidenciando una diferenciación vertical tanto en número como en concentración de ácidos grasos.

La composición de ácidos grasos identificados a 0 m y 5 m fue relativamente similar entre sí, mientras que el estrato de 8 m se diferenció de las otras dos profundidades (Figura 5). Esta separación se expresó además en una mayor dispersión de las muestras correspondientes a 8 m, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en la composición de ácidos grasos a esa profundidad. En conjunto, estos patrones indican que la oferta ambiental no es homogénea en la columna de agua, lo que constituye un marco relevante para interpretar la relación entre la disponibilidad de alimento y los perfiles lipídicos observados en los organismos zooplanctónicos.

Los patrones de heterogeneidad vertical observados en la oferta ambiental son consistentes con lo descrito en la literatura para sistemas costeros influenciados por procesos de surgencia, donde la distribución del material particulado y su composición lipídica varían tanto en función de la profundidad como de la fase del evento de surgencia (Cañavate et al. 2019; McLaskey et al. 2022). En nuestro estudio la heterogeneidad vertical observada en la oferta nutricional ambiental de AG se interpreta a partir del contexto oceanográfico del sistema, considerando las condiciones hidrográficas registradas durante el muestreo realizado a inicios de octubre (Anexo 2), las cuales no se evalúan como factores que regulen directamente la presencia de los ácidos grasos, sino como indicadores del estado del sistema de surgencia y de potencial disponibilidad de producción primaria (Jónasdóttir 2019; Riquelme-Bugueño et al. 2020).

Los registros obtenidos en este estudio evidenciaron una disminución progresiva de la temperatura desde 11,4 °C en superficie hasta 10,8 °C a 9 m de profundidad, acompañada por un marcado descenso del oxígeno disuelto (5,8 a 3,3 mg / L⁻¹) y un aumento gradual de la

salinidad, patrones ampliamente reconocidos como indicativos de la intrusión incipiente de aguas subsuperficiales en sistemas de surgencia costera del centro-sur de Chile (Pinochet et al. 2019; Aguirre et al. 2021). En este marco, las condiciones ambientales no determinan la presencia de los ácidos grasos per se, sino que permiten inferir la existencia de escenarios más o menos favorables para la surgencia, las cuales condicionan la productividad primaria y la abundancia del fitoplancton, reflejándose en una mayor o menor señal de ácidos grasos característicos de origen fitoplanctónico (Dalsgaard et al. 2003; Cañavate et al. 2019).

Particularmente, en la zona de surgencia frente a Concepción, diversos estudios han documentado que el mes de octubre corresponde, a escala estacional, a un periodo característicamente activo de surgencia (Escribano & Schneider 2007; Aguirre et al. 2021). Sin embargo, se ha demostrado que las mayores concentraciones de ácidos grasos de origen fitoplanctónico particularmente aquellos asociados a diatomeas como C16:7 ω -7 y C20:5 ω -3, no se registran necesariamente al inicio del evento, sino hacia su fase más intensa, generalmente avanzada la segunda quincena del mes (Gutiérrez et al. 2012). En este contexto, el desfase temporal descrito en la literatura entre la señal física de la surgencia y la acumulación de biomarcadores lipídicos de origen fitoplanctónico permite explicar que, en nuestro estudio realizado a inicios de octubre, las concentraciones de estos compuestos hayan sido relativamente moderadas, aun cuando el muestreo se efectuó durante un periodo estacionalmente reconocido como de surgencia activa.

Composición de ácidos grasos en fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton: aplicación en el análisis de relaciones tróficas.

Fecas de copépodos

En las fecas de los copépodos de la especie *Acartia (Acanthacartia) tonsa* se detectaron cinco tipos de ácidos grasos (Tabla 5), evidenciando una composición relativamente diversa. El ácido graso C16:7 ω -7 estuvo presente en este grupo, lo que sugiere la evacuación de material de origen fitoplanctónico y la ausencia de ácidos grasos esenciales. Desde un punto de vista estadístico, al comparar la composición de AG de las fecas con la del tejido de los copépodos se detectaron diferencias significativas, lo que indica procesos de asimilación diferencial de los lípidos ingeridos.

Este patrón es consistente con lo descrito por Tiselius et al. (2012) quienes demostraron que *Acartia (Acanthacartia) tonsa* retiene de manera eficiente los ácidos grasos esenciales, como EPA y DHA, en su tejido somático, mientras que los pellets fecales se caracterizan por un empobrecimiento de estos compuestos y un enriquecimiento relativo de AGS y AGM. La presencia de C16:7 ω -7 en las fecas y la ausencia de ácidos grasos esenciales en nuestro estudio refuerzan la idea de que los copépodos actúan como filtro trófico de alta eficiencia, reteniendo los lípidos de mayor calidad nutricional.

No obstante, estudios previos como el de Turner (1984) han demostrado que, bajo condiciones de alta disponibilidad alimentaria y en contextos de ingestión reciente, los pellets fecales pueden reflejar fielmente la composición del alimento ingerido, conservando señales dietarias de corto plazo. En este sentido, la utilidad de las fecas como proxy trófico dependería fuertemente del contexto ambiental y del balance entre ingestión, asimilación y egestión, lo que permite interpretar que, si bien los copépodos retienen los ácidos grasos esenciales, las fecas aún conservan información relevante sobre la fracción consumida.

Fecas de zoeas

En las fecas de las zoeas de la familia Porcellanidae se identificaron cinco tipos de ácidos grasos (Tabla 5). Al igual que en los copépodos, el C16:7 ω -7 estuvo presente, reflejando la evacuación de material fitoplanctónico. Adicionalmente, el ácido graso C18:2 ω -6t fue detectado exclusivamente en las fecas de zoeas, lo que sugiere diferencias en la fracción alimentaria ingerida o en los procesos de asimilación y egestión respecto de los otros grupos funcionales. No obstante, no se observaron diferencias significativas al comparar estadísticamente las fecas de las zoeas con las de los otros grupos funcionales ni con su tejido somático. Esta ausencia de diferencias significativas y patrón lipídico relativamente heterogéneo observado en las fecas de zoeas puede interpretarse asociado a su comportamiento alimenticio. Estudios experimentales han demostrado que las zoeas no actúan como consumidores pasivos, sino que presentan mecanismos de selección alimentaria que influyen tanto en la ingestión como en la fracción del alimento finalmente incorporada al organismo (Hinz et al. 2001). Asimismo, se ha descrito que durante el desarrollo larval de decápodos existen estrategias metabólicas orientadas al ahorro de energía, asociadas a variaciones en la actividad, en las tasas de excreción y en el uso diferencial de fuentes metabólicas de energía (Anger 2001; Kattner et al. 2007). En este contexto, y de acuerdo con lo descrito para larvas de decápodos en la literatura, la

composición de las fecas de las zoeas de Porcellanidae podría estar influenciada por procesos digestivos rápidos y una elevada plasticidad trófica propios de esta etapa ontogenética, lo que contribuiría a una señal lipídica variable y poco diferenciada al comparar las fecas de las zoeas con las de los otros grupos funcionales y entre el tejido somático de los otros grupos funcionales.

Fecas de megalopas

En contraste, con los otros grupos funcionales, en las fecas de las megalopas se registraron cuatro tipos de ácidos grasos (Tabla 5). El ácido graso C16:7 ω -7 estuvo presente en las fecas de este grupo y registró su mayor concentración relativa, lo que sugiere una mayor evacuación de compuestos de origen fitoplanctónico en este estadio larval (Dalsgaard et al. 2003). Por lo que su presencia en las fecas indicaría que, pese a que las megalopas presentan una dieta predominantemente carnívora, existe una incorporación indirecta de material fitoplanctónico a través del consumo de presas zooplanctónicas.

Este patrón es consistente con lo descrito para estadios larvales avanzados de decápodos, donde ocurre un cambio ontogenético hacia hábitos carnívoros, acompañado por una mayor dependencia de presas heterotróficas y una menor asimilación directa de compuestos de origen primario (Anger 2001; Kattner et al. 2007). En este contexto, la señal lipídica observada en las fecas de las megalopas podría reflejar procesos de transferencia trófica, en los cuales los ácidos grasos de origen fitoplanctónico son transportados a lo largo de la red trófica pero no necesariamente incorporados de forma eficiente al tejido somático.

Desde el punto de vista estadístico, no se detectaron diferencias significativas al comparar la composición de las fecas entre los grupos funcionales, lo cual es coherente con el patrón de solapamiento observado en el análisis PCO y con los altos porcentajes de similitud intragrupo, los cuales fueron explicados por los mismos AG que aportaron el mayor porcentaje a la similitud promedio. Sin embargo, al contrastar la composición de las fecas con la de los tejidos de los grupos funcionales correspondientes, se observaron diferencias significativas, particularmente entre las fecas de las megalopas y el tejido somático de los copépodos. Esta diferencia sugiere una separación funcional entre los compartimientos de ingestión y asimilación, donde las fecas reflejan de manera más directa la dieta reciente, mientras que el tejido somático integra procesos selectivos de retención y metabolismo lipídico (Lee et al. 2006; Kattner et al. 2007).

La evidencia presentada sugiere que las fecas de las megalopas constituyen un comportamiento clave para detectar señales de origen fitoplanctónico que no quedan necesariamente registradas en los tejidos, particularmente en estadios ontogenéticos con dietas carnívoras. Esto resalta la importancia de considerar simultáneamente fecas y tejido somático para interpretar adecuadamente los procesos de transferencia y asimilación de lípidos durante el desarrollo larval de decápodos.

Comparación entre oferta ambiental vs tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton.

Los análisis multivariados evidenciaron diferencias significativas en la composición de ácidos grasos entre la oferta nutricional ambiental, el tejido somático y las fecas de los grupos funcionales analizados, como se observa en la Figura 9. Ambos enfoques, basados en composición porcentual y en presencia/ausencia de ácidos grasos, separó claramente la oferta ambiental de los perfiles lipídicos del tejido y de las fecas, patrón que fue corroborado mediante un PERMANOVA. Estos resultados indican que la señal lipídica presente en la columna de agua durante el muestreo no se refleja directamente en los compartimientos biológicos, sugiriendo un desacople entre la oferta ambiental instantánea y la señal integrada en los organismos.

Este patrón contrasta con lo reportado por Escribano & Pérez (2010) para la Bahía de Concepción, quienes observaron una alta similitud entre la composición de ácidos grasos del alimento natural y la del tejido somático de copépodos dominantes, incluyendo *Acartia (Acanthacartia) tonsa*. En dicho estudio, la dominancia compartida de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados esenciales en la oferta ambiental y en los copépodos fue interpretada como evidencia de una transferencia trófica conservativa, con una baja selectividad alimentaria bajo condiciones de una oferta relativamente homogénea, dominada por nano- y picoplancton. En este sentido, nuestros resultados no contradicen este marco conceptual, sino que sugieren que dicha correspondencia entre la oferta ambiental y los perfiles lipídicos de los consumidores puede verse modulada por la naturaleza puntual de la señal ambiental muestreada y por enfoques metodológicos que distinguen entre ácidos grasos recientemente ingeridos y aquellos efectivamente asimilados en el tejido somático.

En el presente trabajo, los organismos fueron sometidos a un periodo de 24-hrs para evacuación de su tubo digestivo, previo a su preservación para los análisis, con el objetivo de

reducir la contribución de ácidos grasos asociados al contenido digestivo y enfatizar aquellos que son efectivamente incorporados al tejido somático. Este enfoque permite aislar con mayor claridad la señal de asimilación. En el estudio de Escribano & Pérez (2010) no se menciona si los organismos fueron analizados previa evacuación de su tracto digestivo, por cuanto, si asumimos que este paso metodológico no lo realizaron, entonces es probable que los perfiles lipídicos que obtuvieron integrarían tanto la fracción asimilada como la recientemente ingerida. Esta diferencia metodológica podría contribuir a explicar la menor similitud observada entre la oferta ambiental, los tejidos y fecas de los grupos funcionales en el presente estudio.

Finalmente, la separación observada entre la oferta ambiental, el tejido somático y las fecas sugiere que la integración temporal de los ácidos grasos juega un rol clave en la estructura de los perfiles lipídicos. Mientras la oferta ambiental representa una condición puntual, el tejido somático refleja una señal integrada en el tiempo, y las fecas expresan la dieta reciente modulada por procesos digestivos. En conjunto, estos resultados amplían la interpretación propuesta por Escribano & Pérez (2010), destacando que la relación entre oferta ambiental y consumidores puede ser dinámica y dependiente de la escala espacio temporal considerada, especialmente en sistemas costeros influenciados por surgencias.

Relevancia trófica e implicancias ecológicas

Desde una perspectiva trófica, las diferencias observadas entre la oferta ambiental, el tejido somático y las fecas tienen implicaciones directas para la calidad nutricional del zooplancton y su rol en las tramas tróficas costeras. La composición de ácidos grasos del tejido somático determina el valor nutricional de estos organismos como presas para niveles tróficos superiores, incluyendo larvas de peces de interés comercial, cuyo crecimiento, supervivencia y éxito de reclutamiento dependen fuertemente de una dieta de alta calidad nutricional durante etapas tempranas del desarrollo (Costalago et al. 2020). En este contexto, el desacople observado entre la oferta ambiental instantánea y la señal integrada en los consumidores sugiere que la calidad trófica del zooplancton no puede inferirse únicamente a partir de la composición del fitoplancton muestreado en un momento dado, sino que refleja procesos de asimilación y retención que operan a escalas temporales más largas. Estos resultados refuerzan la importancia de incorporar indicadores biogeoquímicos en organismos clave del zooplancton para evaluar la transferencia de energía en sistemas de surgencias, aportando información relevante para

enfoques de gestión pesquera con base ecosistémica, donde la variabilidad en la calidad del alimento puede influir directamente en la dinámica poblacional de recursos explotados.

CONCLUSIONES

1. La composición de ácidos grasos del tejido somático difiere significativamente entre los grupos funcionales dominantes del zooplancton, reflejando estrategias tróficas y metabólicas contrastantes asociadas a su historia de vida y preferencias dietarias. Los copépodos mostraron una alta capacidad de acumulación lipídica, mientras que las zoeas y megalopas evidenciaron perfiles consistentes con altas demandas energéticas y procesos ontogenéticos propios del desarrollo larval.
2. *Acartia (Acanthacartia) tonsa* presentó una elevada capacidad de acumulación y retención de ácidos grasos esenciales, integrando múltiples fuentes tróficas, lo que sugiere una estrategia omnívora y flexible característica de sistemas costeros con influencia estuarina.
3. La oferta ambiental de ácidos grasos muestreada de forma puntual no se refleja directamente en los compuestos efectivamente asimilados por los organismos zooplanctónicos, lo que se interpreta como un desacople entre la señal de la oferta ambiental y la señal integrada en los consumidores.
4. Los resultados confirman la existencia de relaciones tróficas entre los grupos funcionales dominantes del zooplancton en la Bahía de San Vicente, las cuales son dinámicas y mediadas por procesos de selección, asimilación e integración temporal de los ácidos grasos, más que por una correspondencia directa con la oferta ambiental instantánea

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera VM, Donoso K, Escribano R (2011) Reproductive performance of small-sized dominant copepods with a highly variable food resource in the coastal upwelling system off the Chilean Humboldt Current. *Marine Biology Research* 7(3): 235-249. DOI: 10.1080/17451000.2010.499437.
- Aguirre C, Garreaud R, Belmar L, Farías L, Ramajo L, Barrera F (2021) High-Frequency Variability of the Surface Ocean Properties Off Central Chile During the Upwelling Season. *Frontiers in Marine Science* 8: 702051. DOI: 10.3389/fmars.2021.702051.
- Anger K (1998) Patterns of growth and chemical composition in decapod crustacean larvae. *Invertebrate Reproduction & Development* 33(2-3): 159-176. DOI: 10.1080/07924259.1998.9652629.
- Anger K (2001) *The Biology of Decapod Crustacean Larvae Vol. 14*. A. A. Balkema Publishers, Lisse, Netherlands. 420 pp.
- Aravena G, Villate F, Uriarte I, Iriarte A, Ibáñez B (2009) Response of *Acartia* populations to environmental variability and effects of invasive congeners in the estuary of Bilbao, Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 83(4): 621-628. DOI: 10.1016/j.ecss.2009.05.013.
- Beder AM, Copeman LA, Eckert GL (2018) The effects of dietary essential fatty acids on the condition, stress response, and survival of the larvae of the red king crab *Paralithodes camtschaticus* Tilesius, 1815 (Decapoda: Anomura: Lithodidae). *Journal of Crustacean Biology* 38(6): 1-11. DOI: 10.1093/jcbiol/ruy085.
- Bisinicu E, Harcota G, Coatu V, Lazar L (2024) Validating an in-house method for assessing effluent discharge toxicity using *Acartia tonsa* in the Black Sea. *Applied Sciences* 14(21): 9861. DOI: 10.3390/app14219861.
- Burian A, Nielsen JM, Hansen T, Bermudez R, Winder M (2020) The potential of fatty acid isotopes to trace trophic transfer in aquatic food-webs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 375(1804): 20190652. DOI: 10.1098/rstb.2019.0652.
- Cañavate J-P, Van Bergeijk S, Giráldez I, González-Ortegón E, Vilas C (2019) Fatty acids to quantify phytoplankton functional groups and their spatiotemporal dynamics in a highly turbid estuary. *Estuaries and Coasts* 42(8): 1971-1990. DOI: 10.1007/s12237-019-00629-8.
- Castro L, Claramunt G, González H, Krautz M, Llanos-Rivera A, Méndez J, Schneider W, Soto S (2010) Fatty acids in eggs of anchoveta *Engraulis ringens* during two contrasting winter spawning seasons. *Marine Ecology Progress Series* 420: 193-205. DOI: 10.3354/meps08819.

- Costalago D, Forster I, Nemcek N, Neville C, Perry RI, Young K, Hunt BPV (2020) Seasonal and spatial dynamics of the planktonic trophic biomarkers in the Strait of Georgia (northeast Pacific) and implications for fish. *Scientific Reports* 10(1): 8517. DOI: 10.1038/s41598-020-65557-1.
- Dalsgaard J, St. John M, Kattner G, Müller-Navarra D, Hagen W (2003) Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Advances in Marine Biology* 46: 225-340. DOI: 10.1016/S0065-2881(03)46005-7.
- De Bello F, Carmona CP, Dias ATC, Götzenberger L, Moretti M, Berg MP (2021) *Handbook of Trait-Based Ecology: From Theory to R Tools*. 1.^a Ed. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781108628426.
- Dvoretzky VG, Dvoretzky AG (2024) Marine copepod assemblages in the Arctic: The effect of frontal zones on biomass and productivity. *Marine Environmental Research* 193: 106250. DOI: 10.1016/j.marenvres.2023.106250.
- Epelbaum A, Borisov R (2006) Feeding behaviour and functional morphology of the feeding appendages of red king crab *Paralithodes camtschaticus* larvae. *Marine Biology Research* 2(2): 77-88. DOI: 10.1080/17451000600672529.
- Ermolenko E, Sikorskaya T, Grigorchuk V, Gevorgyan T, Rodkina S, Bizikashvili E, Maslennikov S (2025) Patterns of variations in lipid molecular profile during larval development of red king crab, *Paralithodes camtschaticus*, and Japanese mitten crab, *Eriocheir japonica*. *Scientific Reports* 15(1): 1737. DOI: 10.1038/s41598-025-85901-7.
- Escribano R, Pérez CS (2010) Variability in fatty acids of two marine copepods upon changing food supply in the coastal upwelling zone off Chile: importance of the picoplankton and nanoplankton fractions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 90(2): 301-313. DOI: 10.1017/S002531540999083X.
- Escribano R, Schneider W (2007) The structure and functioning of the coastal upwelling system off central/southern Chile. *Progress in Oceanography* 75(3): 343-347. DOI: 10.1016/j.pocean.2007.08.020.
- Escribano R, Hidalgo P, González H, Giesecke R, Riquelme-Bugueño R, Manríquez K (2007) Seasonal and inter-annual variation of mesozooplankton in the coastal upwelling zone off central-southern Chile. *Progress in Oceanography* 75(3): 470-485. DOI: 10.1016/j.pocean.2007.08.027.
- Fornes PA, Broitman BR, Escobar M, Báez P (2010) Composición de ácidos grasos en huevos y adultos de *Tigriopus angulatus* (Copepoda: Harpacticoida). *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 45(3): 489-495. DOI: 10.4067/S0718-19572010000300013.
- García-Guerrero MU, Rodríguez A, Hendrickx ME (2006) Larval development of the eastern Pacific anomuran crab *Porcellana cancrisocialis* (Crustacea: Decapoda: Anomura: Porcellanidae) described from laboratory reared material. *Journal of the Marine*

- Biological Association of the United Kingdom 86(5): 1123-1132. DOI: 10.1017/S002531540601410X.
- Gebauer P, Paschke K, Anger K (2003) Delayed metamorphosis in decapod crustaceans: evidence and consequences. *Revista Chilena de Historia Natural* 76(2): 169-175. DOI: 10.4067/S0716-078X2003000200004.
- Gonçalves AMM, Azeiteiro UM, Pardal MA, De Troch M (2012) Fatty acid profiling reveals seasonal and spatial shifts in zooplankton diet in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 109: 70-80. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.05.020.
- Gutiérrez MH, Pantoja S, Lange CB (2012) Biogeochemical significance of fatty acid distribution in the coastal upwelling ecosystem off Concepción (36°S), Chile. *Organic Geochemistry* 49: 56-67. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2012.05.010.
- Guzmán-Rivas F, Quispe-Machaca M, Lazo J, Ortega JC, Mora S, Barriá Martínez P, Urzúa Á (2025) Fatty acid profiles of highly migratory resources from the Southeastern Pacific Ocean, Chile: a potential tool for biochemical and nutritional traceability. *PeerJ* 13: e19101. DOI: 10.7717/peerj.19101.
- Harris R (2000) *ICES Zooplankton Methodology Manual*. Academic Press, San Diego, Calif. London. 684 pp.
- Henríquez LA, Daneri G, Muñoz CA, Montero P, Veas R, Palma AT (2007) Primary production and phytoplanktonic biomass in shallow marine environments of central Chile: Effect of coastal geomorphology. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73(1-2): 137-147. DOI: 10.1016/j.ecss.2006.12.013.
- Hidalgo P, Escribano R (2001) Succession of pelagic copepod species in coastal waters off northern Chile: the influence of the 1997–98 El Niño. En: Lopes RM, Reid JW, Rocha CEF (Eds.) *Copepoda: Developments in Ecology, Biology and Systematics* (pp. 153-160). Springer Netherlands, Dordrecht. DOI: 10.1007/0-306-47537-5_13.
- Hiltunen M, Thomas M, Shanks AL, Galloway AWE (2024) Ocean conditions influence the quality of recruiting benthic marine invertebrate larvae—Insights from fatty acids. *Limnology and Oceanography* 69(11): 2748-2759. DOI: 10.1002/lno.12702.
- Hinz S, Sulkin S, Strom S, Testermann J (2001) Discrimination in ingestion of protistan prey by larval crabs. *Marine Ecology Progress Series* 222: 155-162. DOI: 10.3354/meps222155.
- Holland MM, Louchart A, Artigas LF, Ostle C, Atkinson A, Rombouts I, Graves CA, Devlin M, Heyden B, Machairopoulou M, Bresnan E, Schilder J, Jakobsen HH, Lloyd-Hartley H, Tett P, Best M, Goberville E, McQuatters-Gollop A (2023) Major declines in NE Atlantic plankton contrast with more stable populations in the rapidly warming North Sea. *Science of The Total Environment* 898: 165505. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165505.

- Holmes-Hackerd M, Sasaki M, Dam HG (2023) Naupliar exposure to acute warming does not affect ontogenetic patterns in respiration, body size, or development time in the cosmopolitan copepod *Acartia tonsa*. *PLOS ONE* 18(4): e0282380. DOI: 10.1371/journal.pone.0282380.
- Howard SC, Hentschel BT (2005) Effects of short-term food variability on the plasticity of age and size at metamorphosis of porcelain crab larvae. *Limnology and Oceanography* 50(6): 1960-1971. DOI: 10.4319/lo.2005.50.6.1960.
- Jónasdóttir SH (2019) Fatty acid profiles and production in marine phytoplankton. *Marine Drugs* 17(3): 151. DOI: 10.3390/md17030151.
- Kasyan VV (2010) Holoplankton of ship ballast water in the Port of Vladivostok. *Russian Journal of Marine Biology* 36(3): 167-175. DOI: 10.1134/S1063074010030028.
- Kattner G, Hagen W, Lee RF, Campbell R, Deibel D, Falk-Petersen S, Graeve M, Hansen BW, Hirche HJ, Jónasdóttir SH, Madsen ML, Mayzaud P, Müller-Navarra D, Nichols PD, Paffenhöfer G-A, Pond D, Saito H, Stübing D, Virtue P (2007) Perspectives on marine zooplankton lipids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64(11): 1628-1639. DOI: 10.1139/f07-122.
- Kelly J, Scheibling R (2012) Fatty acids as dietary tracers in benthic food webs. *Marine Ecology Progress Series* 446: 1-22. DOI: 10.3354/meps09559.
- Killops SD, Killops VJ (2013) *Introduction to Organic Geochemistry*. 2nd Ed. John Wiley & Sons. 673 pp.
- Kimmerer W, Hirst A, Hopcroft R, McKinnon A (2007) Estimating juvenile copepod growth rates: corrections, inter-comparisons and recommendations. *Marine Ecology Progress Series* 336: 187-202. DOI: 10.3354/meps336187.
- Lafon A, Silva N, Vargas CA (2014) Contribution of allochthonous organic carbon across the Serrano River Basin and the adjacent fjord system in Southern Chilean Patagonia: Insights from the combined use of stable isotope and fatty acid biomarkers. *Progress in Oceanography* 129: 98-113. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.03.004.
- Lalli CM, Parsons TR (1997) *Biological Oceanography: An Introduction*. 2nd ed. Butterworth Heinemann, Oxford [England].
- Le Vay L, Jones DA, Puello-Cruz AC, Sangha RS, Ngamphongsai C (2001) Digestion in relation to feeding strategies exhibited by crustacean larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 128(3): 621-628. DOI: 10.1016/S1095-6433(00)00339-1.
- Lee R, Hagen W, Kattner G (2006) Lipid storage in marine zooplankton. *Marine Ecology Progress Series* 307: 273-306. DOI: 10.3354/meps307273.

- Legeżyńska J, Kędra M, Walkusz W (2014) Identifying trophic relationships within the high Arctic benthic community: how much can fatty acids tell? *Marine Biology* 161(4): 821-836. DOI: 10.1007/s00227-013-2380-8.
- Lemos D, Phan VN (2001) Energy partitioning into growth, respiration, excretion and exuvia during larval development of the shrimp *Farfantepenaeus paulensis*. *Aquaculture* 199(1-2): 131-143. DOI: 10.1016/S0044-8486(01)00523-3.
- Levine DM, Sulkin SD (1984) Nutritional significance of long-chain polyunsaturated fatty acids to the zoeal development of the brachyuran crab, *Eurypanopeus depressus* (Smith). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 81(3): 211-223. DOI: 10.1016/0022-0981(84)90141-2.
- Libralato S, Pranovi F, Stergiou K, Link J (2014) Trophodynamics in marine ecology: 70 years after Lindeman. *Marine Ecology Progress Series* 512: 1-7. DOI: 10.3354/meps11033.
- Marrec P, Menden-Deuer S (2024) Changes in phytoplankton size–structure alter trophic transfer in a temperate, coastal planktonic food web. *Limnology and Oceanography Letters* 9(5): 624-633. DOI: 10.1002/lol2.10410.
- McLaskey AK, Forster I, Del Bel Belluz J, Hunt BPV (2022) A high-resolution time series of particulate matter fatty acids reveals temporal dynamics of the composition and quality available to zooplankton in a temperate coastal ocean. *Progress in Oceanography* 206: 102843. DOI: 10.1016/j.pocan.2022.102843.
- Menéndez MC, Baleani CA, Acha EM, Piccolo MC (2023) Holoplankton and meroplankton communities in surf zone waters of a temperate SW Atlantic sandy beach: Seasonal patterns. *Marine Ecology* 44(4): e12750. DOI: 10.1111/maec.12750.
- Nef C, Pierella Karlusich JJ, Bowler C (2024) From nets to networks: tools for deciphering phytoplankton metabolic interactions within communities and their global significance. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 379(1909): 20230172. DOI: 10.1098/rstb.2023.0172.
- Nelson RJ, Young KV, Williams WJ (2019) Marine zooplankton of Coronation Gulf and Bathurst Inlet, Nunavut, Canada. *Continental Shelf Research* 191: 104003. DOI: 10.1016/j.csr.2019.104003.
- Pardo LM, Véliz D, Wehrtmann IS, Anger K (1997) Efecto de períodos de ayuno en el crecimiento de la zoea I de *Petrolisthes violaceus* (Guérin, 1831) (Decapoda: Anomura: Porcellanidae). *Investigaciones Marinas* 25: 255-262. DOI: 10.4067/S0717-71781997002500018.
- Parrish CC (2013) Lipids in Marine Ecosystems. *ISRN Oceanography* 2013: 1-16. DOI: 10.5402/2013/604045.

- Paul AJ, Paul JM, Coyle KO (1989) Energy sources for first-feeding zoeae of king crab *Paralithodes camtschatica* (Tilesius) (Decapoda, Lithodidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 130(1): 55-69. DOI: 10.1016/0022-0981(89)90018-X.
- Peters KE, Walters CC, Moldowan JM (2004) *The Biomarker Guide*. 2nd Ed. Vol. 1. Cambridge University Press.
- Pinochet A, Garcés-Vargas J, Lara C, Olgúin F (2019) Seasonal Variability of Upwelling off Central-Southern Chile. *Remote Sensing* 11(15): 1737. DOI: 10.3390/rs11151737.
- Quispe-Machaca M, Guzmán-Rivas F, Barría Martínez P, Ibáñez C, Urzúa Á (2025) Fatty acid biomarkers reveal the interaction between two highly migratory species in the Southern Humboldt System: the swordfish and its prey, the jumbo squid. *PeerJ* 13: e19129. DOI: 10.7717/peerj.19129.
- Riquelme-Bugueño R, Pantoja-Gutiérrez S, Jorquera E, Anabalón V, Srain B, Schneider W (2020) Fatty acid composition in the endemic Humboldt Current krill, *Euphausia mucronata* (Crustacea, Euphausiacea) in relation to the phytoplankton community and oceanographic variability off Dichato coast in central Chile. *Progress in Oceanography* 188: 102425. DOI: 10.1016/j.pocean.2020.102425.
- Rudolph A, Ahumada R, Pérez C (2002) Dissolved oxygen content as an index of water quality in San Vicente Bay, Chile (36 degrees 45'S). *Environmental Monitoring and Assessment* 78(1): 89-100. DOI: doi:%2010.1023/a:1016140819487.%20PMID:%2012197642.
- Ruiz-Ruiz PA, Contreras S, Urzúa Á, Quiroga E, Rebolledo L (2021) Fatty acid biomarkers in three species inhabiting a high latitude Patagonian fjord (Yendegaia Fjord, Chile). *Polar Biology* 44(1): 147-162. DOI: 10.1007/s00300-020-02788-y.
- Savineau EL-R, Cook KB, Blackbird SJ, Stowasser G, Kiriakoulakis K, Preece C, Fielding S, Belcher AC, Wolff GA, Tarling GA, Mayor DJ (2024) Investigating the physiological ecology of mesopelagic zooplankton in the Scotia sea (Southern ocean) using lipid and stable isotope signatures. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 208: 104317. DOI: 10.1016/j.dsr.2024.104317.
- Shaber K, Sulkin S (2007) Feeding on dinoflagellates by intermediate and late stage crab zoeae raised in the laboratory and collected from the field. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 340(2): 149-159. DOI: 10.1016/j.jembe.2006.09.011.
- Silva-Dávila RD, Palomares-García R, Zavala-Norzagaray A, Escobedo-Urías DC (2006) Ciclo anual de los grupos dominantes del zooplancton en Navachiste, Sinaloa. *Contribuciones al Estudio de los Crustáceos del Pacífico Este* 4(1): 25.
- Stevens C, Sahota R, Galbraith M, Venello T, Bazinet A, Hennekes M, Yongblah K, Juniper S (2022) Total lipid and fatty acid composition of mesozooplankton functional group members in the NE Pacific over a range of productivity regimes. *Marine Ecology Progress Series* 687: 43-64. DOI: 10.3354/meps14004.

- Suárez-Morales E, Gutiérrez-Aguirre MA, Gómez S, Perbiche-Neves G, Previattelli D, Da Rocha CEF, Mercado-Salas NF, Marques TM, Cruz-Quintana Y, Dos Santos-Silva EN, Santana-Piñeros AM (2020) Class Copepoda. En: Rogers DC, Damborenea C, James T (Eds.) Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates Vol. 5 (pp. 663-796). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-804225-0.00021-6.
- Surot A (2006) Cambios fisiológicos y bioquímicos durante el desarrollo temprano de *Lithodes santolla* (Molina, 1782) (Decapoda: Lithodidae) y *Petrolisthes laevigatus* (Guérin, 1835) (Decapoda: Porcellanidae): una comparación dentro del infraorden Anomura. Título de Biólogo Marino. Universidad Austral de Chile, Valdivia - Chile. 76 pp.
- Tiselius P, Hansen B, Calliari D (2012) Fatty acid transformation in zooplankton: from seston to benthos. Marine Ecology Progress Series 446: 131-144. DOI: 10.3354/meps09479.
- Turner JT (1984) Zooplankton feeding ecology: Contents of fecal pellets of the copepods *Acartia tonsa* and *Labidocera aestiva* from continental shelf waters near the mouth of the Mississippi River. Marine Ecology 5(3): 265-282. DOI: 10.1111/j.1439-0485.1984.tb00125.x.
- Vargas CA (2011) Allochthonous subsidies of organic matter across a lake–river–fjord landscape in the Chilean Patagonia. Implications for marine zooplankton in inner fjord areas. Continental Shelf Research 31: 187-201. DOI: 10.1016/j.csr.2010.06.016.
- Vergara OA, Echevin V, Sobarzo M, Sepúlveda HH, Castro L, Soto-Mendoza S (2023) Impacts of the freshwater discharge on hydrodynamical patterns in the Gulf of Arauco (central-southern Chile) using a high-resolution circulation model. Journal of Marine Systems 240: 103862. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2023.103862.
- Von Weissenberg E, Ruhanen H, Holopainen M, Käkälä R, Engström-Öst J (2024) Fatty acid profiles reveal dietary variability of a large calanoid copepod *Limnocalanus macrurus* in the northern Baltic Sea. Frontiers in Marine Science 11: 1340349. DOI: 10.3389/fmars.2024.1340349.
- Walter TC, Boxshall G (2025) World of Copepods Database. World Register of Marine Species. DOI: 10.14284/356.
- Walters A, Kopp D, Cresson P, Robert M (2025) Cross-ecosystem trophic structure and benthic–pelagic coupling: Effects of depth, body size, and feeding guild. Limnology and Oceanography 70: 617-633. DOI: 10.1002/lno.12794.
- Werbrouck E, Tiselius P, Van Gansbeke D, Cervin G, Vanreusel A, De Troch M (2016) Temperature impact on the trophic transfer of fatty acids in the congeneric copepods *Acartia tonsa* and *Acartia clausi*. Journal of Sea Research 112: 41-48. DOI: 10.1016/j.seares.2016.03.001.
- Weydmann-Zwolicka A, Balazy P, Kuklinski P, Søreide JE, Patuła W, Ronowicz M (2021) Meroplankton seasonal dynamics in the high Arctic fjord: Comparison of different

sampling methods. *Progress in Oceanography* 190: 102484. DOI: 10.1016/j.pocean.2020.102484.

Wood PL, Wood MD, Kunigelis SC (2023) Pilot lipidomics study of copepods: investigation of potential lipid-based biomarkers for the early detection and quantification of the biological effects of climate change on the oceanic food chain. *Life* 13(12): 2335. DOI: 10.3390/life13122335.

Yannicelli B, Castro L, Parada C, Schneider W, Colas F, Donoso D (2012) Distribution of *Pleuroncodes monodon* larvae over the continental shelf of south-central Chile: Field and modeling evidence for partial local retention and transport. *Progress in Oceanography* 92-95: 206-227. DOI: 10.1016/j.pocean.2011.07.005.

ANEXO 1: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS (PERMANOVA Y SIMPER)

TABLA 1A.

PERMANOVA – Concentración de ácidos grasos (ng / individuo promedio) n = 4, cinco individuos por grupo, en fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Source	df	SS	MS	Pseudo-F		Unique	
					P(perm)	perms	P(MC)
Ti	2	323.71	161.85	1.5842	0.217	906	0.221
Res	9	919.52	102.17				
Total	11	1243.2					

TABLA 2A.

PERMANOVA – Concentraciones de ácidos grasos (ng / individuo promedio) en tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Source	df	SS	MS	Pseudo-F		Unique	
					P(perm)	perms	P(MC)
Ti	5	29058	5811.6	8.6602	0.001	998	0.001
Res	15	10066	671.07				
Total	20	39124					

TABLA 2B.

PERMANOVA post hoc – Concentraciones de ácidos grasos (ng / individuo promedio) en tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Groups	t	Unique		
		P(perm)	perms	P(MC)
Copepoda, Zoea	1.8226	0.208	10	0.104
Copepoda, Megalopa	3.8144	0.085	10	0.008
Copepoda, Feca Cop	5.4138	0.031	35	0.001
Copepoda, Feca Z	5.7949	0.029	35	0.001
Copepoda, F Mega	5.2441	0.023	35	0.003
Zoea, Megalopa	0.92129	0.495	10	0.467
Zoea, Feca Cop	1.9338	0.028	35	0.064
Zoea, Feca Z	1.898	0.024	35	0.072
Zoea, F Mega	1.9943	0.028	35	0.052
Megalopa, Feca Cop	4.7035	0.03	35	0.003
Megalopa, Feca Z	4.6983	0.026	35	0.002
Megalopa, F Mega	4.7253	0.033	35	0.001
Feca Cop, Feca Z	1.6198	0.144	35	0.133
Feca Cop, F Mega	0.37766	0.843	35	0.865
Feca Z, F Mega	1.4901	0.185	35	0.169

TABLA 3A.

PERMANOVA – Concentraciones de ácidos grasos esenciales estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	Unique		
					P(perm)	perms	P(MC)
Ti	6	29745	4957.4	6.6093	0.001	999	0.001
Res	22	16501	750.06				
Total	28	46246					

TABLA 3B.

PERMANOVA post hoc – Concentraciones de ácidos grasos esenciales estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Groups	t	Unique		
		P(perm)	perms	P(MC)
OA, Copepoda	2.0321	0.04	93	0.031
OA, Zoea	1.7703	0.031	129	0.054
OA, Megalopa	2.8952	0.009	93	0.003
OA, Feca Cop	3.3739	0.002	152	0.001
OA, Feca Z	1.7301	0.032	233	0.043
OA, F Mega	3.3739	0.001	151	0.002
Copepoda, Zoea	2.4461	0.08	3	0.032
Copepoda, Megalopa	Denominator is 0			
Copepoda, Feca Cop	Denominator is 0			
Copepoda, Feca Z	3.7281	0.052	4	0.006
Copepoda, F Mega	Denominator is 0			
Zoea, Megalopa	1	1	1	0.415
Zoea, Feca Cop	1.1952	0.426	2	0.288
Zoea, Feca Z	0.94331	0.522	7	0.411
Zoea, F Mega	1.1952	0.453	2	0.26
Megalopa, Feca Cop	Denominator is 0			
Megalopa, Feca Z	2.5355	0.1006	3	0.052
Megalopa, F Mega	Denominator is 0			
Feca Cop, Feca Z	3	0.135	2	0.036
Feca Cop, F Mega	Denominator is 0			
Feca Z, F Mega	3	0.137	2	0.021

TABLA 4A.

PERMANOVA – Concentraciones de ácidos grasos no esenciales estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	Unique		
					P(perm)	perms	P(MC)
Ti	6	27883	4647.1	11.147	0.001	998	0.001
Res	22	9171.6	416.89				
Total	28	37054					

TABLA 4B.

PERMANOVA post hoc – Concentraciones de ácidos grasos esenciales estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Groups	t	Unique		
		P(perm)	perms	P(MC)
OA, Copepoda	4.6478	0.005	129	0.001
OA, Zoea	1.852	0.052	165	0.057
OA, Megalopa	4.324	0.007	165	0.001
OA, Feca Cop	4.3958	0.002	438	0.001
OA, Feca Z	4.3152	0.001	416	0.002
OA, F Mega	4.4731	0.003	427	0.001
Copepoda, Zoea	1.5018	0.197	7	0.155
Copepoda, Megalopa	4.1125	0.099	7	0.003
Copepoda, Feca Cop	3.563	0.028	25	0.004
Copepoda, Feca Z	3.7404	0.042	25	0.006
Copepoda, F Mega	3.693	0.029	25	0.007
Zoea, Megalopa	1.0612	0.517	10	0.353
Zoea, Feca Cop	1.9781	0.022	35	0.066
Zoea, Feca Z	2.0032	0.033	35	0.069
Zoea, F Mega	2.0948	0.02	35	0.06
Megalopa, Feca Cop	6.7466	0.024	35	0.001
Megalopa, Feca Z	6.9683	0.025	35	0.001
Megalopa, F Mega	7.1335	0.031	35	0.002
Feca Cop, Feca Z	0.72442	0.881	35	0.494
Feca Cop, F Mega	Negative			
Feca Z, F Mega	1.0395	0.385	35	0.334

TABLA 5A

PERMANOVA – Concentraciones de ácidos grasos estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	Unique		
					P(perm)	perms	P (MC)
Ti	6	38059	6343.1	11.335	0.001	999	0.001
Res	22	12311	559.58				
Total	28	50369					

TABLA 5B

PERMANOVA post hoc – Concentraciones de ácidos grasos estandarizado (%) en oferta ambiental (OA), tejido somático y fecas de grupos funcionales dominantes del zooplancton (copépodos, zoeas y megalopas).

Groups	t	Unique		
		P(perm)	perms	P(MC)
OA, Copepoda	4.3235	0.002	165	0.001
OA, Zoea	1.6986	0.05	165	0.063
OA, Megalopa	3.975	0.009	165	0.001
OA, Feca Cop	4.1368	0.002	428	0.001
OA, Feca Z	3.8071	0.006	419	0.001
OA, F Mega	4.2023	0.004	421	0.001
Copepoda, Zoea	1.8353	0.163	10	0.092
Copepoda, Megalopa	4.9186	0.098	10	0.005
Copepoda, Feca Cop	5.4474	0.031	35	0.002
Copepoda, Feca Z	5.9425	0.033	35	0.001
Copepoda, F Mega	5.8155	0.018	35	0.001
Zoea, Megalopa	1.0809	0.51	10	0.317
Zoea, Feca Cop	1.9483	0.025	35	0.071
Zoea, Feca Z	1.896	0.036	35	0.08
Zoea, F Mega	2.0632	0.031	35	0.07
Megalopa, Feca Cop	6.7201	0.027	35	0.001
Megalopa, Feca Z	6.8291	0.031	35	0.001
Megalopa, F Mega	7.1193	0.029	35	0.001
Feca Cop, Feca Z	1.9062	0.12	35	0.08
Feca Cop, F Mega	Negative			
Feca Z, F Mega	2.3983	0.095	35	0.042

TABLA 6A

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en el tejido somático de copépodos.

Group Copepoda					
Average similarity: 74.40					
Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C16:0	0.88	40.48	4.63	54.41	54.41
C18:2 ω-6c	0.81	33.92	5.54	45.59	100.00

TABLA 6B

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en las fecas de copéodos.

Group Feca Cop
Average similarity: 87.74

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C14:0	0.60	27.45	30.04	31.28	31.28
C16:0	0.60	27.45	30.04	31.28	62.57
C18:0	0.57	26.42	26.76	30.11	92.67

TABLA 7A

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en el tejido somático de zoeas.

Group Zoea
Average similarity: 26.63

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C16:1 ω -7	0.59	9.02	0.58	33.87	33.87
C18:1 ω -9c	0.33	4.47	0.58	16.80	50.67
C18:1 ω -9t	0.30	4.39	0.58	16.50	67.17
C16:0	0.39	3.27	0.58	12.29	79.46

TABLA 7B

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en las fecas de zoeas.

Group Feca Z
Average similarity: 89.41

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C14:0	0.56	24.41	22.84	27.30	27.30
C16:0	0.56	24.41	22.84	27.30	54.61
C18:0	0.51	22.28	36.84	24.91	79.52

TABLA 8A

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en el tejido somático de megalopas.

Group Megalopa
Average similarity: 58.90

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C16:1 ω -7	0.72	24.46	4.84	41.53	41.53
C14:1 ω -5	0.53	19.04	12.92	32.32	73.85

TABLA 8B

Análisis SIMPER de la similitud intragrupo de ácidos grasos en las fecas de zoeas.

Group F Mega
Average similarity: 85.83

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
C14:0	0.63	27.33	8.74	31.84	31.84
C16:0	0.63	27.33	8.74	31.84	63.68
C18:0	0.58	24.89	8.70	29.00	92.68

ANEXO 2: PERFILES HIDROGRÁFICOS DEL SITIO DE MUESTREO EN LA BAHÍA DE SAN VICENTE

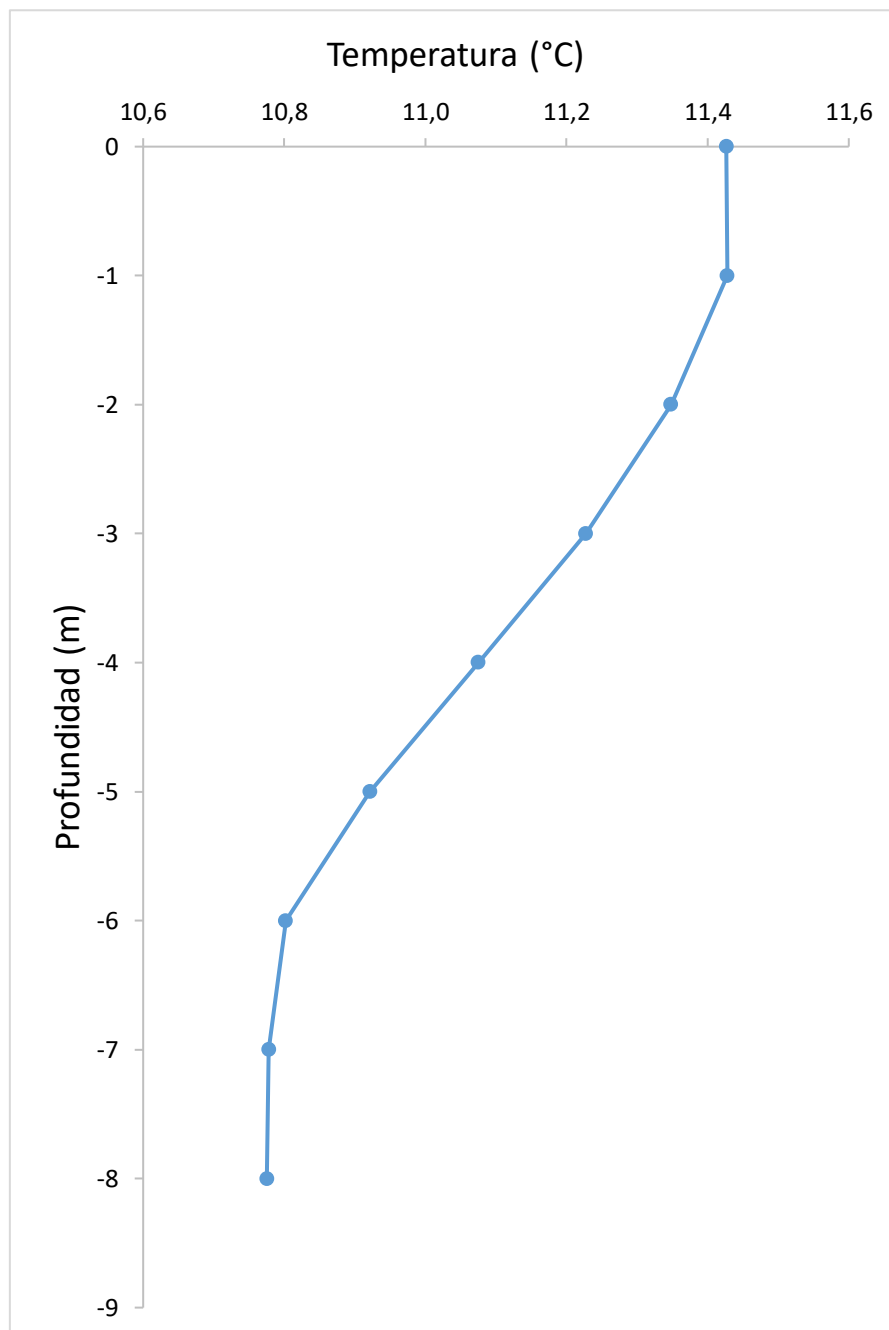


FIGURA 10.

Perfil hidrológico vertical de temperatura (°C) en la Bahía de San Vicente (7 de octubre)

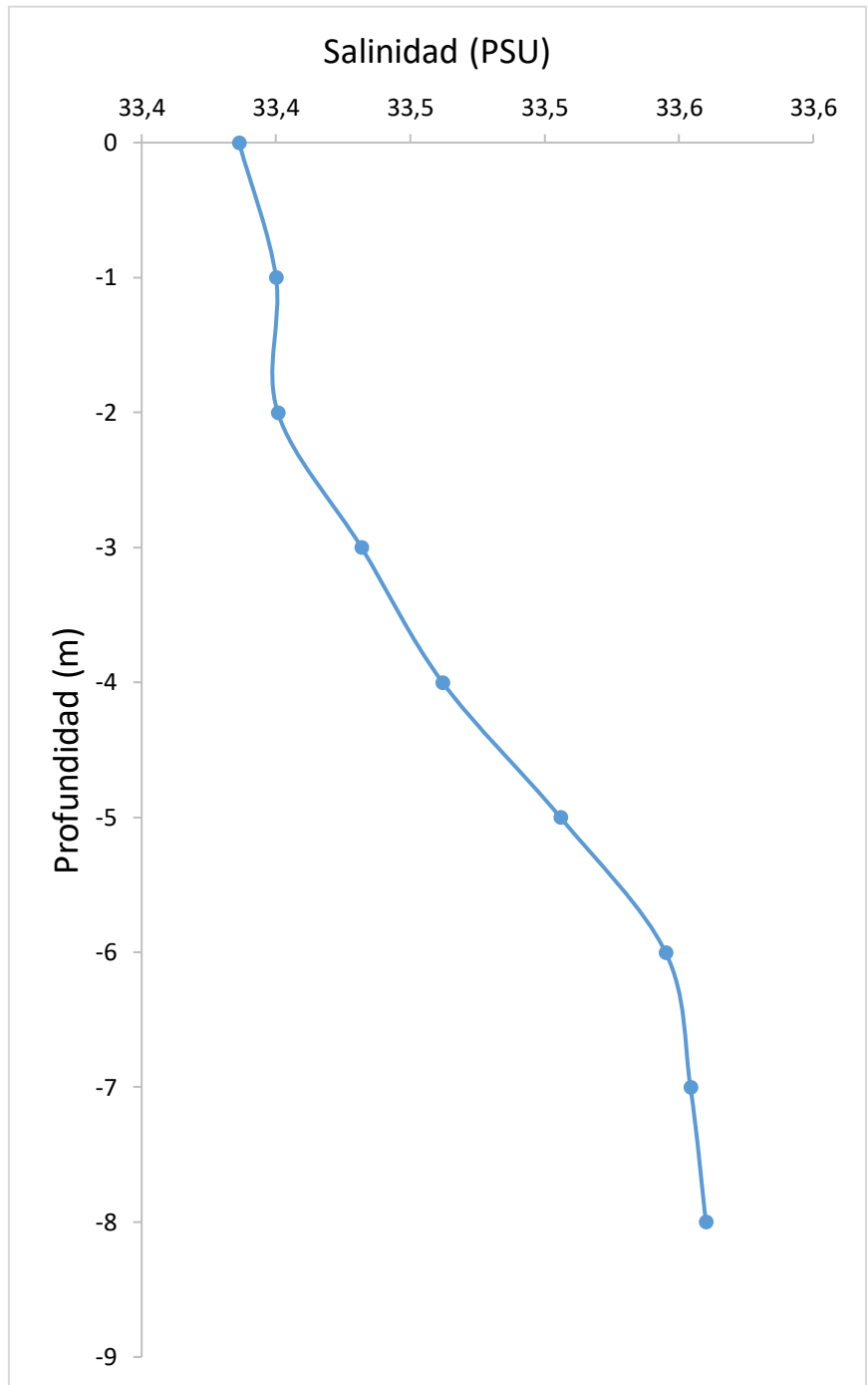


FIGURA 11.

Perfil hidrográfico vertical de salinidad (PSU) en la Bahía de San Vicente (7 de octubre)

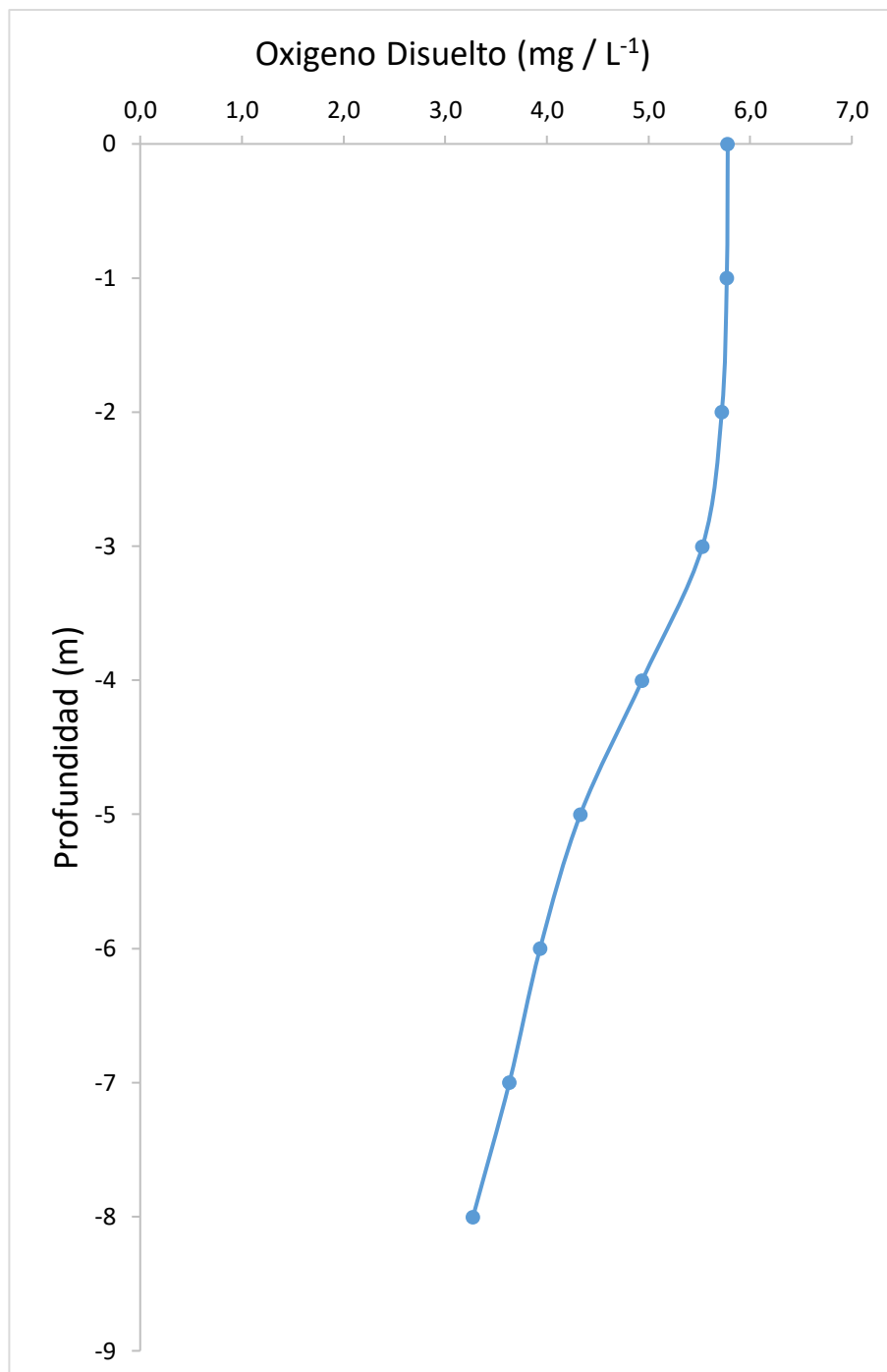


FIGURA 12.

Perfil hidrográfico vertical de oxígeno disuelto (mg / L⁻¹) en la Bahía de San Vicente (7 de octubre)