



UNIVERSIDAD ARTURO PRAT
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

PROGRAMA BIO-OCEANOGRÁFICO-PESQUERO
DE LA ZONA NORTE DE CHILE (18°S-23°S)
UNAP-CIAM

INFORME FINAL
CRUCERO BIO-OCEANOGRÁFICO DE PRIMAVERA

DICIEMBRE DE 2023

REQUIRENTE

CENTRO DE INVESTIGACION APLICADA DEL MAR (CIAM)

EJECUTOR

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIVERSIDAD ARTURO PRAT**

AUTORES

**LILIANA HERRERA CAMPOS
EDGARDO SANTANDER PULGAR**

PROFESIONALES PARTICIPANTES

**JEANNELLE JAQUE BAGINSKY
CRISTIAN AZOCAR SANTANDER
PAOLA MORENO GONZALEZ**

MUESTREADORES

**ARIEL MARTÍNEZ MUÑOZ
MILTON AVILÉS LAZCANO**

INDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN EJECUTIVO..... | 4 |
| INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| OBJETIVOS GENERALES..... | 6 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 6 |
| MATERIAL Y METODOS..... | 7 |
| RESULTADOS..... | 10 |
| Condiciones físicas y químicas..... | 10 |
| Estructura de la Comunidad Planctónica..... | 26 |
| Fitoplancton..... | 26 |
| Zooplancton..... | 35 |
| Ictioplancton..... | 40 |
| Análisis Estadístico..... | 44 |
| DISCUSION Y CONCLUSIONES..... | 52 |
| LITERATURA CITADA..... | 54 |

RESUMEN EJECUTIVO

Entre los días 4 y 8 de diciembre se realizó el crucero de primavera de 2023, con el objetivo de evaluar las condiciones oceanográficas y explorar su influencia sobre los primeros estadios de vida del recurso anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona norte de Chile (18°S-23°S).

En el área entre punta Junín (19°00'S) y Mejillones (23°00'S) se dispusieron cinco transectas perpendiculares a la costa con estaciones localizadas a 10, 20 y 40 mn de la costa. Se obtuvieron registros verticales continuos de temperatura, salinidad, densidad y oxígeno disuelto utilizando un CTDO SeaBird19V2, y muestras discretas de agua hasta 50 m y 100 m de profundidad para determinar la abundancia y biomasa del fitoplancton, y la concentración de nutrientes respectivamente. Para caracterizar la composición y abundancia del zooplancton e ictioplancton, se colectaron muestras verticales desde 60 m a superficie, utilizando una red WP-2 de 300 μm equipada con un flujómetro TSK. La información se analizó gráficamente y se realizó un análisis comparativo para evaluar la existencia de diferencias significativas entre las variables registradas durante las primaveras de 2014 a 2023.

En superficie, valores de temperatura superiores a 20°C se extendieron hasta las 10 mn de la costa. Se registraron salinidades (>35 ups) que evidenciaron la presencia del ASS hasta las 20 mn, y a 10 mn se detectó la presencia del ASAA y del AESS (<34,95 ups), evidenciando el afloramiento de agua subsuperficial. Al respecto, el transporte Ekman reveló una surgencia intensa, con valores que superaron los 1.000 $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ durante los días previos y de realización del muestreo, los que son propios de primavera cuando comienza la intensificación del afloramiento. Lo anterior se corroboró con las concentraciones superficiales de oxígeno disuelto que escasamente superaron los 3,0 $\text{mL O}_2/\text{l}$, con un mínimo de 2,9 $\text{mL O}_2/\text{L}$ en Mejillones (23°00'S), no obstante, la localización de la isoterma de 15°C y del límite superior de la ZMO, promedió los 50 y 100 m de profundidad respectivamente.

El nitrito fluctuó entre 0,06 y 3,85 μM , registrándose el máximo restringido a las 10 mn de la costa y a los 100 m frente a Chipana (20°30'S). El nitrato presentó valores extremos de 0,48 y 23,26 μM , el fosfato de 1,45 y 3,81 μM , y el silicato de 0,12 y 46,37. La distribución vertical de estos nutrientes se caracterizó por el aumento de las concentraciones con la profundidad, con valores inferiores a 5,0 μM , 2,0 μM y 10,0 μM respectivamente, en el estrato entre la superficie y los 10 m. El nitrato y el silicato presentaron el foco de máxima en Chipana (20°30'S) a 50 y 100 m respectivamente, mientras que la mayor concentración de fosfato se registró en Mejillones (23°00'S) a 100 m de profundidad.

El microfitoplancton presentó una abundancia total entre 0,1 y 1.044,6 $\text{cél}/\text{mL}$. Las diatomeas exhibieron un foco, entre la superficie y los 10 m de profundidad, frente a punta Junín (19°40'S) y a las 10 mn, que alcanzó un máximo de 1042,0 $\text{cél}/\text{mL}$ a los 10 m. Los

microflagelados, restringidos a las 10 mn y a los 10 m, exhibieron un máximo principal de 2,6 cél/mL en punta Junín (19°40'S), y un foco secundario de 2,0 cél/mL en Mejillones (23°00'S). La biomasa fitoplanctónica fluctuó entre 0,1 y 7,7 $\mu\text{g Cl-a/L}$. Este máximo coincidió con la mayor abundancia de las diatomeas en punta Junín (19°40'S), mientras que en Mejillones (23°00'S), asociada a la presencia de los flagelados, se detectaron 2,2 $\mu\text{g Cl-a/L}$. La densidad zooplanctónica fluctuó entre 33,9 y 183,8 ind/10 m². En Mejillones (23°00'S) a 20 mn se detectó la máxima concentración (183,8 ind/10 m²), y frente a Chucumata (20°30'S) a 10 mn de la costa se observó un foco secundario de 138,2 ind/10m². Los copépodos fueron dominantes con un máximo de 161,8 ind/10 m² y un aporte promedio al total de 86,1%. Este grupo dominó también el rango de tamaño entre 0,25 y 0,75 mm, que exhibió un máximo 166,0 ind/10 m² y realizó una contribución promedio al total de 90,3%.

No se detectó la presencia de huevos de anchoveta y sólo se registraron larvas en estado de pre-flexión, las que aportaron con un 2,2% a la abundancia ictioplanctónica total. Estas larvas se localizaron a 10 mn de la costa frente a punta Junín (19°40'S) y Mejillones (2300'S) con densidades de 291 y 252 larvas/10 m² respectivamente.

En comparación a las primaveras anteriores, esta ha sido la más cálida de la serie, y la salinidad alcanzó los niveles registrados en 2016, bajo la influencia de El Niño 2015-2016. De igual manera, la profundidad de la capa de mezcla y el límite superior de la ZMO, exhibieron la mayor profundidad de localización. Todos los componentes biológicos disminuyeron sus abundancias respecto del periodo 2014-2022, lo cual puede ser la respuesta a la condición cálida imperante, no obstante, hay que considerar que en este crucero no se consideraron las localidades de Arica (18°25'S) y punta Madrid (19°00'S) y se excluyeron todas las estaciones localizadas entre 1 y 5 mn de la costa, sector donde se concentran las comunidades planctónicas.

Las condiciones descritas revelaron la influencia del evento El Niño en la región. De acuerdo con lo que informó CIIFEN, en la primera semana de diciembre se observó una reducción de -0,8°C en la región El Niño 1+2, si bien este valor sigue siendo significativamente cálido, los modelos indican una tendencia a la reducción de las anomalías cálidas en esta región. El pronóstico del ENOS para el próximo trimestre (enero – marzo 2024) prevé mayores probabilidades de condiciones El Niño, con una alta posibilidad de que se mantengan por lo menos hasta abril de 2024.

INTRODUCCIÓN

El presente reporte contiene los resultados obtenidos durante el crucero de primavera de 2023, requerido por el Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM) y ejecutado por la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Aturo Prat.

OBJETIVOS GENERALES

- Comprender los mecanismos de interacción entre factores físicos, químicos y biológicos, que determinan las condiciones favorables para la reproducción y crecimiento de los principales recursos pesqueros pelágicos de la zona norte de Chile ($19^{\circ}40'S-23^{\circ}00'S$) y la sobrevivencia de sus estadios tempranos.
- Comprender el efecto de la variabilidad bio-oceanográfica sobre el comportamiento de los principales recursos de la zona norte ($19^{\circ}40'S-23^{\circ}00'S$) en sus diferentes estados de desarrollo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones oceanográficas físicas, químicas y biológicas imperantes en la zona norte de Chile ($19^{\circ}40'S-23^{\circ}00'S$) y su variabilidad espacial y temporal.
- Determinar la abundancia y distribución, espacial y temporal, de diferentes estadios de desarrollo de los principales recursos de la zona norte de Chile ($19^{\circ}40'S-23^{\circ}00'S$).
- Explorar la influencia de la variabilidad ambiental sobre los diferentes estadios de desarrollo de los principales recursos de la zona norte de Chile ($19^{\circ}40'S-23^{\circ}00'S$).

MATERIAL Y METODOS

Área de estudio

El área de estudio comprendió la zona entre punta Junín ($19^{\circ}40'S$) y Mejillones ($23^{\circ}00'S$), donde se establecieron 5 transectas perpendiculares a la costa con estaciones localizadas a 10, 20 y 40 millas náuticas (mn) de la costa (Figura 1).

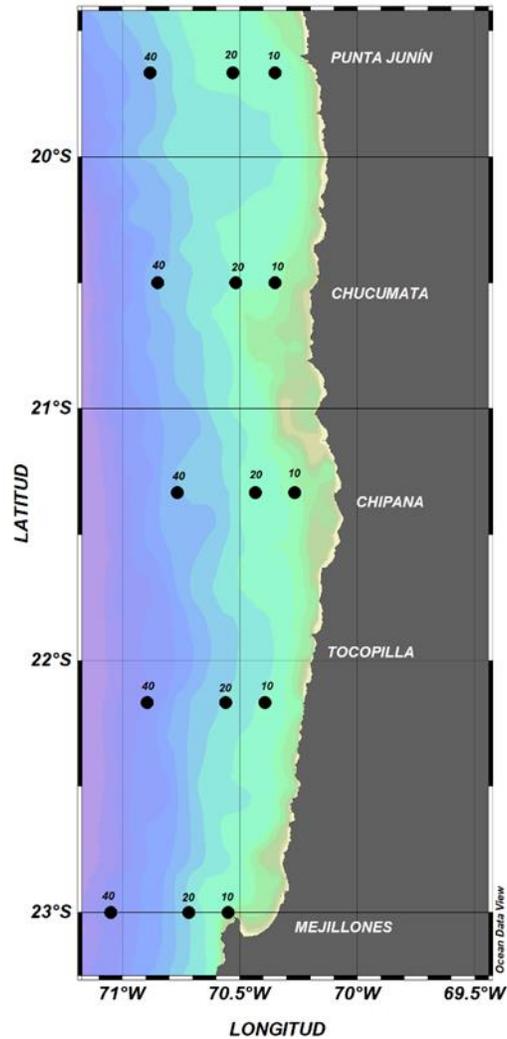


Figura 1. Área de estudio y posición de las estaciones de muestreo del crucero bio-oceanográfico realizado entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

Muestreo y registro de información

El crucero se llevó a cabo entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023 a bordo de la embarcación PAM “Relámpago”, proporcionada por la empresa pesquera CORPESCA S.A.

En cada una de las estaciones se realizaron perfiles verticales continuos de temperatura, salinidad y densidad, utilizando un CTDO SeaBird-19V2. Con el uso de botellas oceanográficas Niskin se obtuvieron muestras de agua desde 0, 5, 10, 25 y 50 m de profundidad para la medición de la abundancia y biomasa fitoplanctónicas. Para determinar la composición y abundancia del zooplancton e ictioplancton se tomaron muestras mediante arrastres verticales, entre los 60 m y la superficie, utilizando una red WP-2 de 300 μm de abertura de malla equipada con un flujómetro TSK. La determinación de los nutrientes nitrato, nitrito, fosfato y silicato se realizó en las localidades de Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°00'S), donde se obtuvieron muestras de aguas desde 0, 10, 25, 50, 75 y 100 m de profundidad.

Los nutrientes se determinaron siguiendo las metodologías descritas en Parsons *et al.* (1984). La abundancia de fitoplancton se estimó de acuerdo con la metodología propuesta en UNESCO (1978) y Villafañe & Reid (1995) y la biomasa, expresada en términos de la concentración de clorofila-a, según Parsons *et al.* (1984). Los grupos, abundancia y espectro de tamaños del zooplancton se determinaron utilizando el programa Zoolmage (Grosjean *et al.*, 2004). Los huevos y larvas de recursos pelágicos fueron separados y contados. Las abundancias se retrocalcularon de acuerdo con Horwood & Driver (1976) y las densidades fueron estandarizadas por 10 m² de superficie oceánica (Smith & Richardson, 1979).

Análisis de la información

La información de las variables físicas, químicas y biológicas fue analizada mediante gráficos de distribución horizontal y vertical, los cuales fueron elaborados utilizando el programa Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, 2022).

Para caracterizar el escenario ambiental imperante durante los días del muestreo, se identificaron las masas de agua mediante la confección de pares T-S. Para esto se consideró la información proveniente de toda la zona y aquella registrada por sectores: norte entre Arica y punta Junín (18°25'S-19°40'S), centro entre Chucumata y Chipana (20°30'S-21°20'S), y sur entre Tocopilla y Mejillones (22°10'S-23°00'S).

Se estimó, además, la profundidad de la capa de mezcla (PCM), la profundidad de localización del límite superior de la ZMO (LS_ZMO) y el transporte de Ekman (TEK). Para determinar la PCM se utilizó como proxy la ubicación de la isoterma de 15°C, y la profundidad del LS_ZMO correspondió a aquella a la cual la concentración de oxígeno disuelto fue de 1,0 mL/L. Ambas se obtuvieron mediante el programa ODV (Schlitzer, 2022).

El TEK fue calculado como:

$$M_x = \frac{\tau_y}{f}$$

donde M_x es el Transporte Ekman ($m^3/s/km$), f es el parámetro de Coriolis y τ_y es el estrés del viento (Bowden, 1983). Se trabajó con la información de vientos horarios de los aeropuertos de Arica, Iquique y Antofagasta proporcionada por la Dirección Meteorológica de Chile.

Análisis estadístico

Para comparar la información de los parámetros físicos, químicos y biológicos registrada en el presente crucero con aquella obtenida durante las primaveras de 2014 a 2022, se aplicó el análisis de varianza por rangos de Kruskal-Wallis utilizando la función `kruskal.test` de la plataforma R.

Se consideraron los datos provenientes de las estaciones coincidentes con la grilla de trabajo utilizada en el presente crucero, es decir, aquellos obtenidos a 10, 20 y 40 mn de la costa desde las localidades de punta Junín ($19^{\circ}40'S$), Chucumata ($20^{\circ}30'S$), Chipana ($21^{\circ}20'S$), Tocopilla ($22^{\circ}10'S$) y Mejillones ($23^{\circ}00'S$).

Cuando se encontraron diferencias estadísticamente significativas se realizó la prueba de comparación múltiple de rangos después de Kruskal-Wallis, empleando la función `kruskalmc`, que permite identificar el periodo que generó las diferencias. Los resultados se presentan en tablas y gráficos de cajas y bigotes.

Dado el nulo registro de huevos y el escaso hallazgo de larvas de anchoveta, no fue posible examinar la influencia de los parámetros físicos, químicos y biológicos sobre estos estadios tempranos mediante el uso de GAMs.

RESULTADOS

Condiciones físicas y químicas

Temperatura

La temperatura superficial del mar (TSM) fluctuó entre 16,6 y 22,0°C. Valores superiores a 20°C se registraron en la zona entre punta Junín (19°40'S) y Tocopilla (22°10'S) ocupando las 40 mn, abarcando hasta las 20 mn en el sector de Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°10'S). En punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S), las 10 y 20 mn estuvieron influenciadas por temperaturas inferiores a 20°C, detectándose el foco de mínima (16,6°C) a 10 mn frente a Mejillones (23°00'S), mientras que en punta Junín (19°40'S) alcanzó los 18,2°C (Figura 2A).

En la componente vertical se observó la presencia del agua cálida (>20°C) ocupando el estrato hasta los 25 m de profundidad en Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°10'S), donde se detectó su intrusión hasta las 20 mn. Por el contrario, en punta Junín (19°40'S), Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°00'S), la surgencia de aguas subsuperficiales, evidenciada por la inclinación de las isotermas a 10 mn, replegó el agua cálida a las 40 mn y a los primeros 10 m de profundidad, quedando las 10 y 20 mn ocupadas por aguas más frías que generaron los focos de mínima en Mejillones (23°00'S) (16,6°C) y en punta Junín (19°40'S) (18,2°C) (Figura 3). Lo anterior se corroboró con la localización de la isoterma de 15°C, que alcanzó valores cercanos a 20 m de profundidad a las 10 mn de la costa en punta Junín (19°40'S), Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°00'S). Hacia las estaciones más oceánicas superó los 50 m, alcanzando una profundidad máxima de 70 m frente a Mejillones a 40 mn (Figura 2B).

Salinidad

La salinidad en superficie fluctuó entre 34,74 y 35,41 ups. Coincidente con la distribución de la temperatura, valores inferiores a 35 ups se registraron entre las 10 y 20 mn en las localidades influenciadas por las aguas de menor temperatura (<20°C), detectándose el mínimo de 34,74 ups frente a Mejillones (23°00'S) a 10 mn de la costa. En el resto del área dominaron salinidades mayores a 35 ups, llegando hasta las 20 mn en Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°10'S) (Figura 2C).

Las secciones verticales de Chucumata (20°30'S) y Tocopilla (22°10'S) mostraron la presencia del agua más salina (>35 ups) ocupando el estrato hasta los 40 m de profundidad entre las 20 y las 40 mn. En punta Junín (19°40'S), Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°00'S) ésta se restringió a las 40 mn y a los primeros 25 m de debido al ascenso de aguas subsuperficiales que condujeron aguas de salinidades menores a 34,9 ups a la superficie, las que abarcaron entre 10 y 20 mn de la costa. La columna de agua bajo los 50 m de profundidad se encontró dominada por valores inferiores a 34,9 ups en todas las

localidades, observándose el típico ingreso, desde la región oceánica, de la masa de agua con salinidades menores a 34,7 ups, la que avanzó hacia las 10 mn y alcanzó la superficie en Mejillones (23°00'S), donde se detectó el mínimo de 34,74 ups (Figura 4).

Densidad

La densidad (σ_t) a nivel superficial fluctuó entre 24,4 y 25,41. Valores superiores a 25 sólo se detectaron asociados a los focos de baja temperatura y salinidad localizados en punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S), donde se observaron máximos de 25,10 y 25,41 respectivamente. El resto del área se encontró influenciada por densidades menores a 25, predominando valores entre 24,6 y 24,7, con el mínimo de 24,4 localizado en Chucumata (20°30'S) a 20 mn de la costa (Figura 2D).

Las secciones verticales mostraron la presencia de aguas con densidades inferiores a 25 ocupando el estrato entre la superficie y los 25 m de profundidad, extendiéndose entre las 10 y 40 mn con excepción de punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S). En estas localidades, las 10 mn se encontraron influenciadas por mayores valores producto del afloramiento de agua subsuperficial, que condujo a la superficie aguas más densas. Desde los 100 m de profundidad, en todas las localidades dominaron densidades mayores a 26 (Figura 5).

Diagramas T-S

Las condiciones descritas coinciden con los diagramas T-S, que revelaron la presencia del Agua Subtropical Superficial (ASS), del Agua Subantártica (ASAA) y del Agua Ecuatorial Subsoperficial (AESS). El ASS tuvo una importante influencia en toda la región, evidenciada por la distribución de las altas temperaturas y salinidades (>20°C, >35 ups). De igual manera el ASAA (<34,7 ups) mostró una alta participación en la región, especialmente entre los 50 y 100 m de profundidad y abarcando entre las 10 y 40 mn. Por otra parte, el AESS se detectó en mezcla con el ASAA bajo los 100 m (Figura 6).

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto en superficie fluctuó entre 2,9 y 4,4 mL O₂/L. Toda el área, entre las 10 y 40 mn de la costa, presentó concentraciones cercanas a 3,0 mL O₂/L. El mínimo de 2,9 mL O₂/L se detectó en Mejillones (23°00'S) a 10 mn, asociado a las aguas de surgencia. En punta Junín (19°40'S), localidad influenciada también por las aguas de afloramiento, se observó el máximo de 4,4 mL O₂/L a 10 mn de la costa (Figura 7A), el cual se debió a la actividad autotrófica, dado que coincidió con la máxima biomasa fitoplanctónica (7,7 µg Cl-a/L).

En la componente vertical, las secciones mostraron un estrato con valores superiores a 3,0 mL O₂/L que se extendió entre la superficie y los 50 m de profundidad y entre las 10 y 40 mn, haciéndose más somero a 10 mn en punta Junín (19°40'S), Chipana

(21°20'S) y Mejillones (23°00'S), localidades donde se registró el ascenso de agua subsuperficial que en Mejillones (23°00'S) condujo a la superficie concentraciones menores a 3,0 mL O₂/L. Bajo los 50 m, la columna de agua se encontró dominada por valores entre 2,5 y 1,0 mL O₂/L (Figura 8). Al respecto, el límite superior de la zona de mínima concentración de oxígeno (LS_ZMO) (1,0 mL O₂/L) se localizó, en promedio, alrededor de los 100 m, detectándose por sobre esta profundidad en punta Junín (19°40'S), Chipana (21°20'S) y Mejillones (23°00'S), con una profundidad mínima de 62,4 m en Mejillones (23°00'S) (Figura 7B).

Transporte de Ekman (TEk)

Los valores del transporte Ekman, tanto en Chucumata (20°30'S) como en Mejillones (23°00'S), revelaron un activo afloramiento, con valores que superaron los 1.000 m³/s/km durante los días previos y de realización del muestreo (Figura 9), lo que es propio de la época considerando que en la región los procesos se intensifican durante la primavera y el verano.

Nutrientes

Nitrito

La concentración de nitrito fluctuó entre 0,06 µM y 3,85 µM. En la distribución vertical, la sección de Chipana (21°20'S) mostró la presencia del foco de máxima concentración (3,85 µM) localizado a 100 m de profundidad y a 10 mn de la costa. Hacia las 20 mn y hacia los estratos más someros los valores disminuyeron, registrándose en superficie magnitudes inferiores a 1,0 µM. En Mejillones (23°00'S) toda la columna de agua se encontró dominada por concentraciones menores a 0,5 µM, excepto por un foco de 1,08 µM restringido a los 50 m y a las 20 mn de la costa (Figura 10).

Nitrato

El nitrato fluctuó entre un mínimo de 0,48 y un máximo de 23,16 µM. En la sección de Chipana (21°20'S) se evidenció el aumento de las concentraciones con la profundidad, registrándose el máximo de 23,16 µM a 50 m y a 10 mn, y un máximo secundario de 22,63 µM a los 75 m y a las 20 mn. En superficie se detectaron valores menores a los 5,0 µM. En Mejillones (23°00'S) el nitrato disminuyó, pero se mantuvo el patrón de distribución. En esta localidad el máximo alcanzó los 22,45 µM y se localizó a los 50 m y a las 10 mn. En superficie los valores fueron inferiores a 1,0 µM. En ambas secciones se observó a 10 mn la inclinación de las nutriclinas, evidenciando el ascenso de aguas profundas a través de procesos de surgencia (Figura 11).

Fosfato

Las concentraciones de fosfato presentaron valores extremos de 1,45 y 3,81 μM . Este nutriente exhibió el mismo patrón de distribución del nitrato, caracterizado por el aumento de los valores con la profundidad. El máximo se detectó a los 100 m de profundidad y a 20 mn en Mejillones (23°00'S), mientras que en Chipana (21°20'S) se registró un máximo de 3,27 μM , también a los 100 m, pero a las 10 mn de la costa. Hacia la superficie en ambas localidades los valores descendieron de 2,0 μM , excepto a 10 mn en Mejillones (23°00'S), donde el ascenso de aguas subsuperficiales, evidenciado por la inclinación de las isolíneas, llevó aguas con un contenido de fosfato superior a 2,5 μM (Figura 12).

Silicato

Las concentraciones de silicato fluctuaron entre 0,12 y 46,37 μM . Siguiendo el patrón de distribución del nitrato y del fosfato, el silicato se incrementó con la profundidad. En Chipana (21°20'S) se registró el máximo (46,37 μM) a los 100 m y a 10 mn de la costa, mientras que en Mejillones (23°00'S) la máxima concentración fue de 38,46 μM y se detectó también a los 100 m y a las 10 mn. Dado el ascenso de agua subsuperficial, en superficie a 10 mn, los valores se mantuvieron por sobre los 10,0 μM , mientras que en Mejillones (23°00'S) estuvieron por debajo de los 5,0 μM (Figura 13).

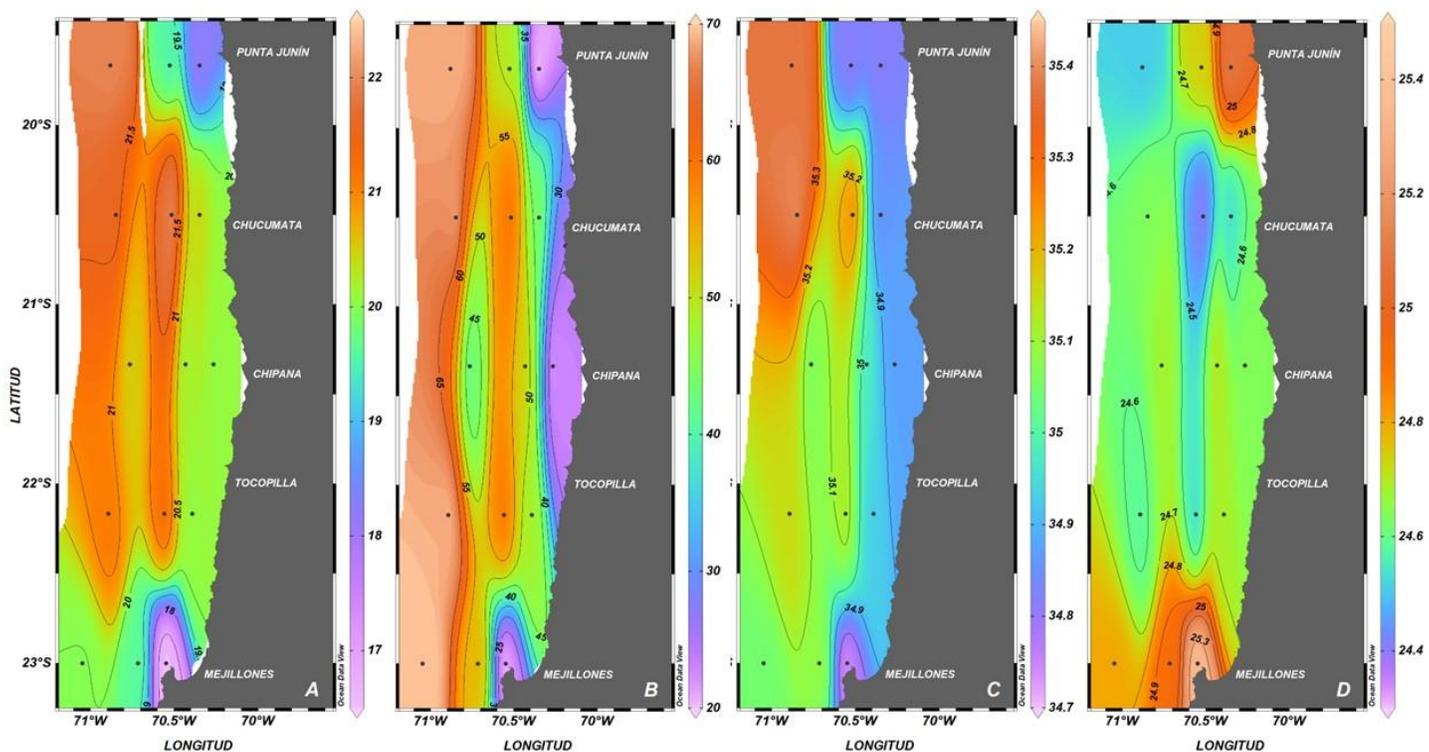


Figura 2. A: distribución superficial de Temperatura ($^{\circ}$ C), B: profundidad de localización de la isoterma de 15° C (m), C: distribución superficial de Salinidad (ups) y D: distribución superficial de Densidad (σ -t), entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

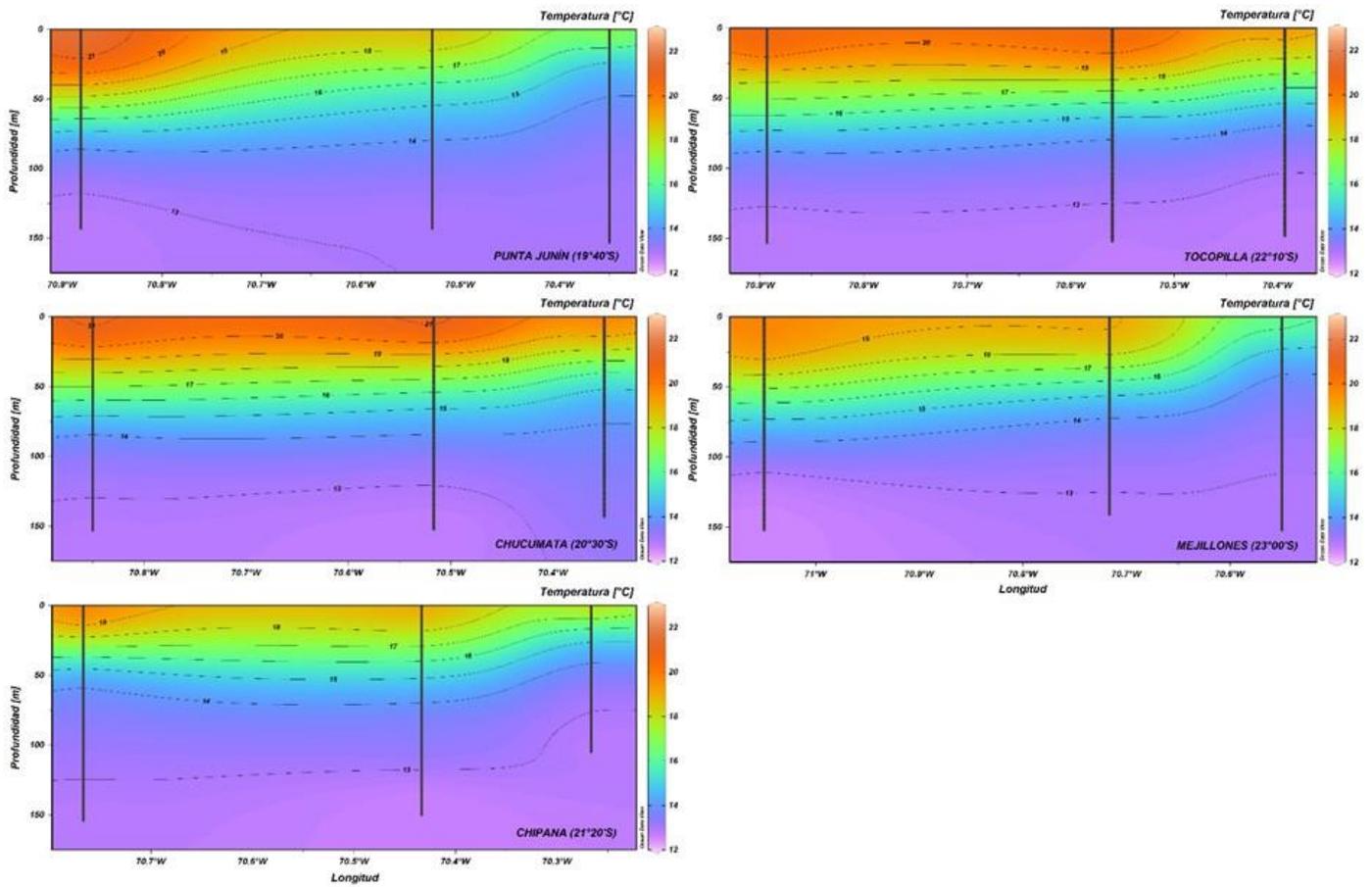


Figura 3. Distribución vertical de Temperatura (°C) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

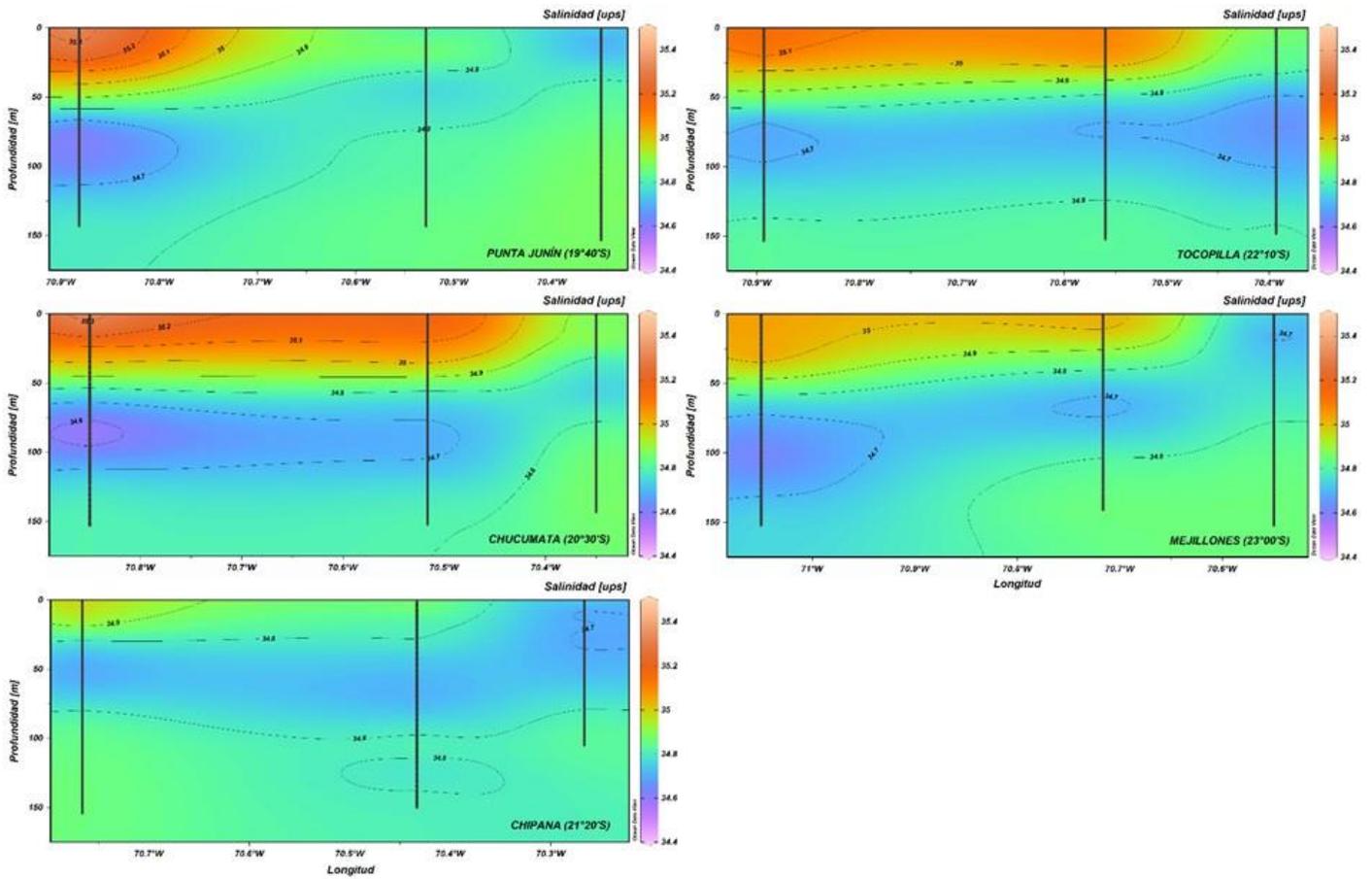


Figura 4. Distribución vertical de Salinidad (ups) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

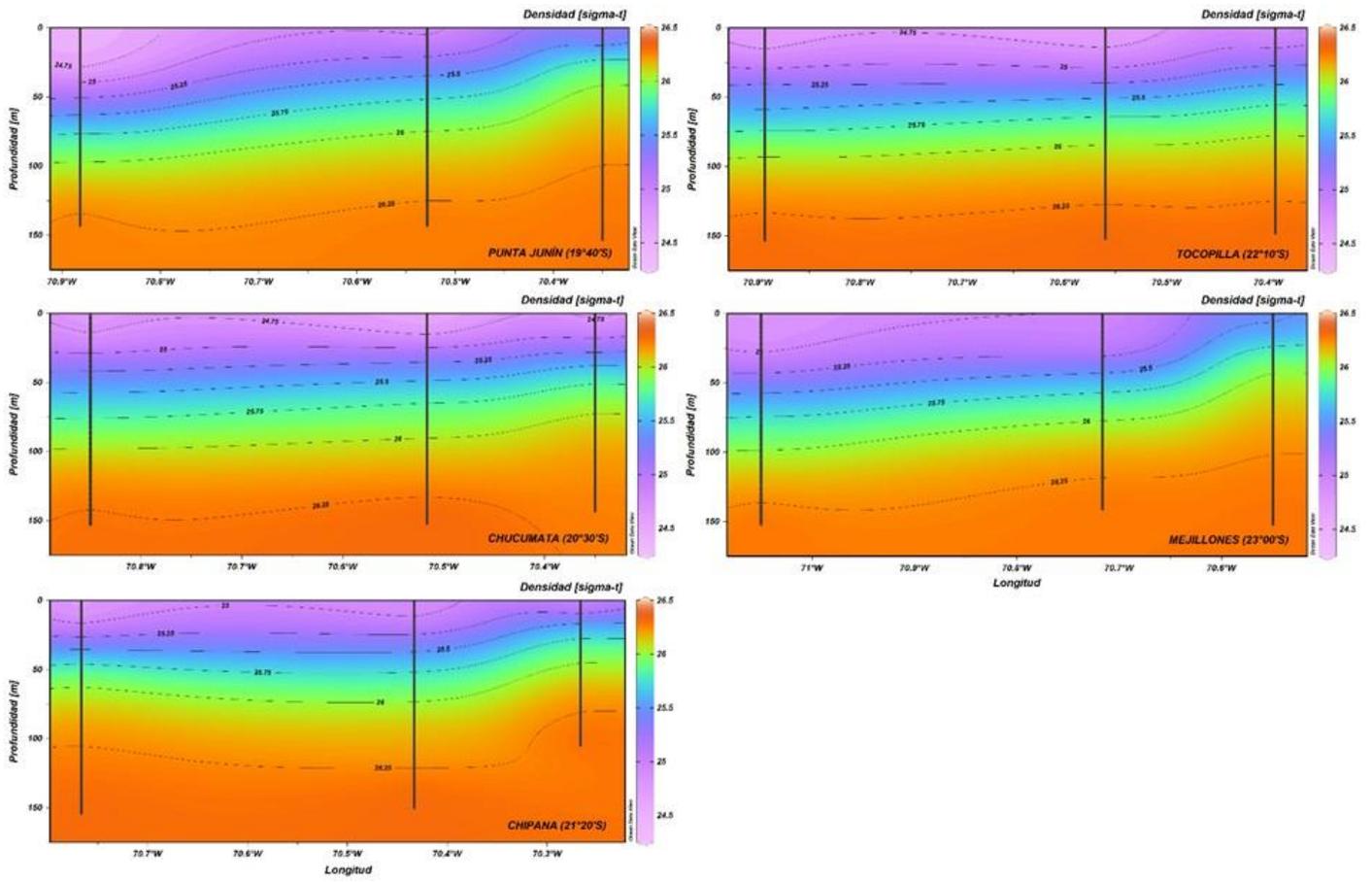


Figura 5. Distribución vertical de Densidad (σ_t) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

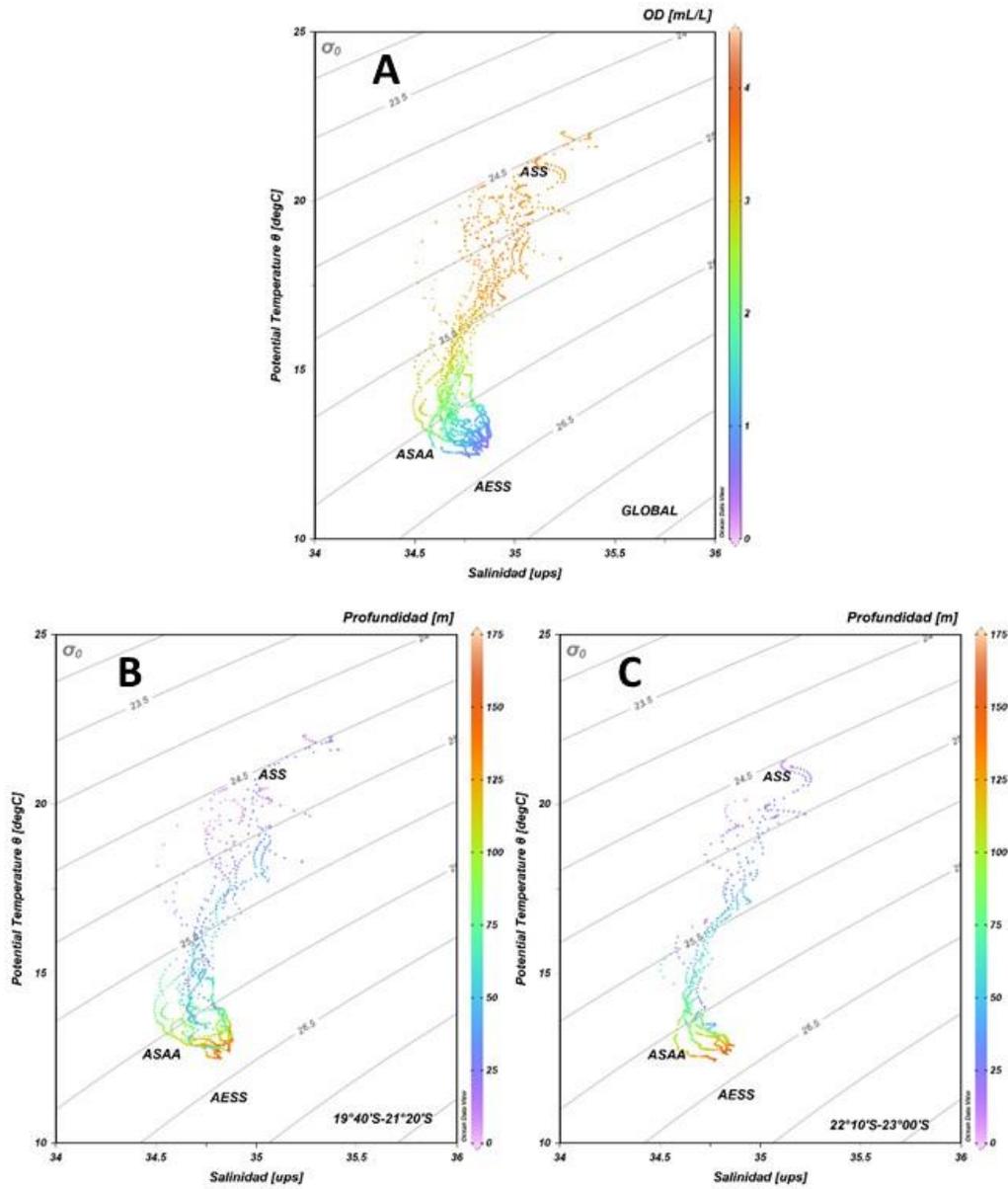


Figura 6. Diagramas Temperatura-Salinidad (T-S) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. A: global, B: sector entre punta Junín (19°40'S) y Chipana (21°20'S) C: sector entre Tocopilla (22°10'S) y Mejillones (23°00'S).

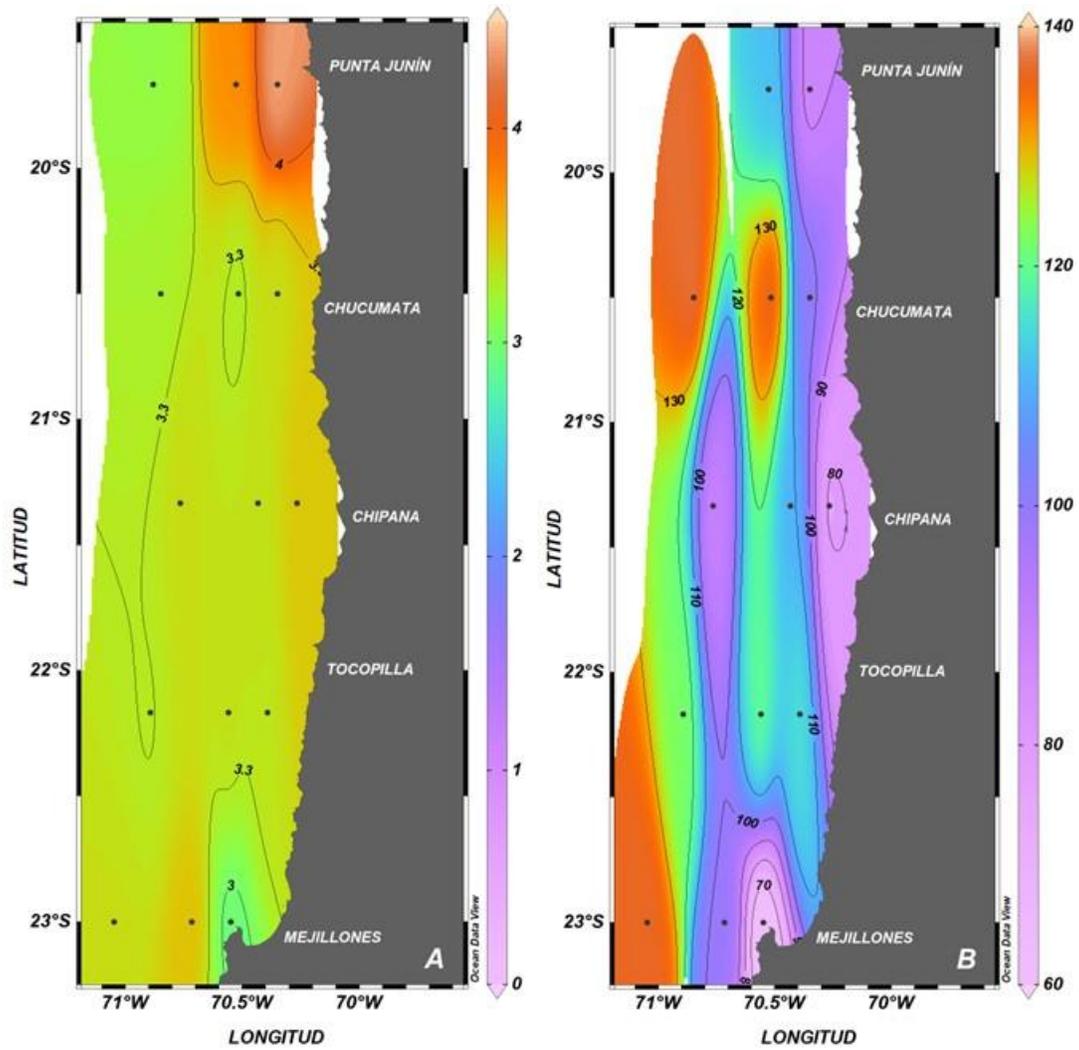


Figura 7. A: Distribución superficial de Oxígeno Disuelto (mL O₂/L) y B: profundidad de localización del LS_ZMO (m) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

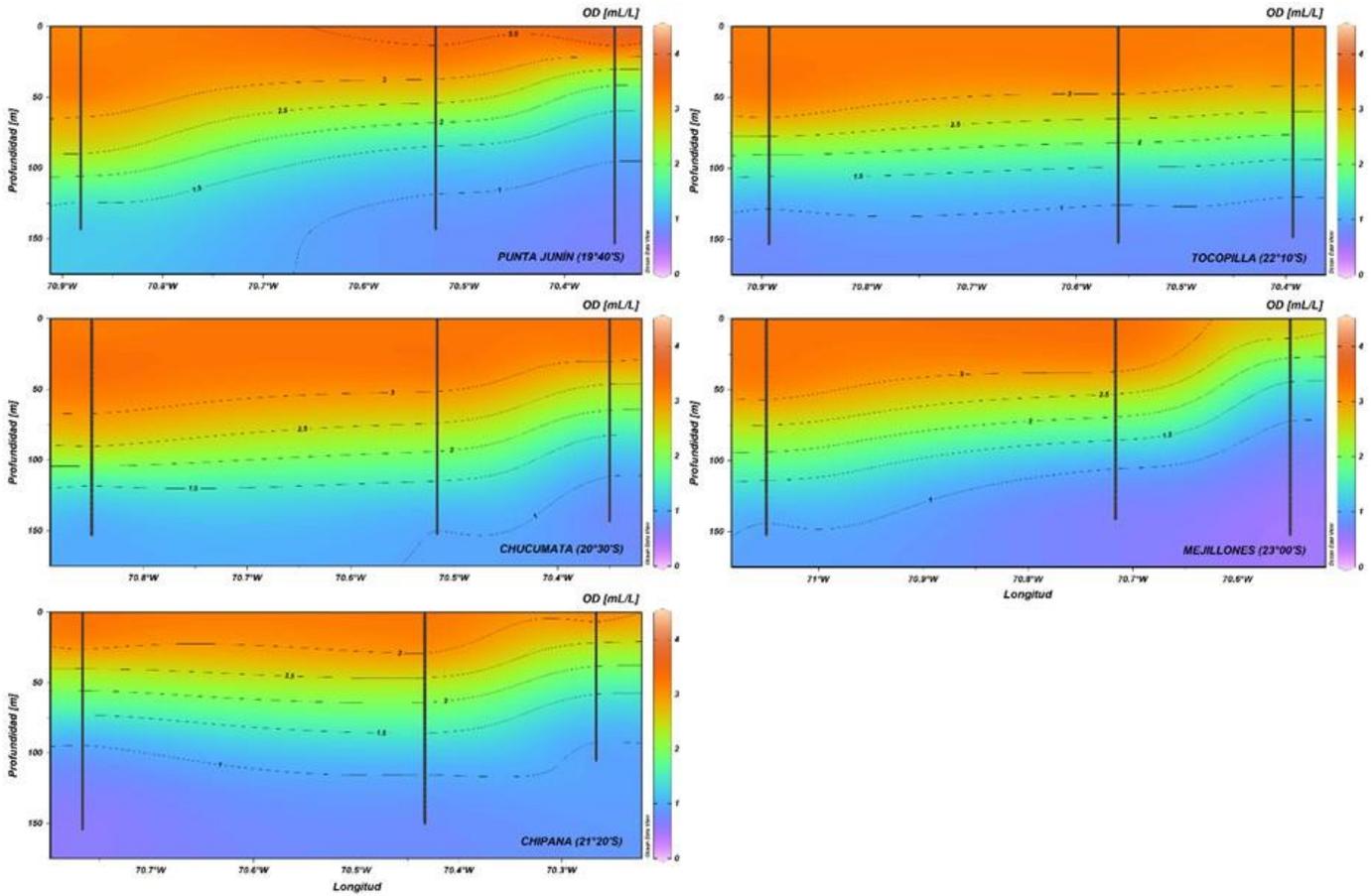


Figura 8. Distribución vertical de Oxígeno Disuelto ($\text{mL O}_2/\text{L}$) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

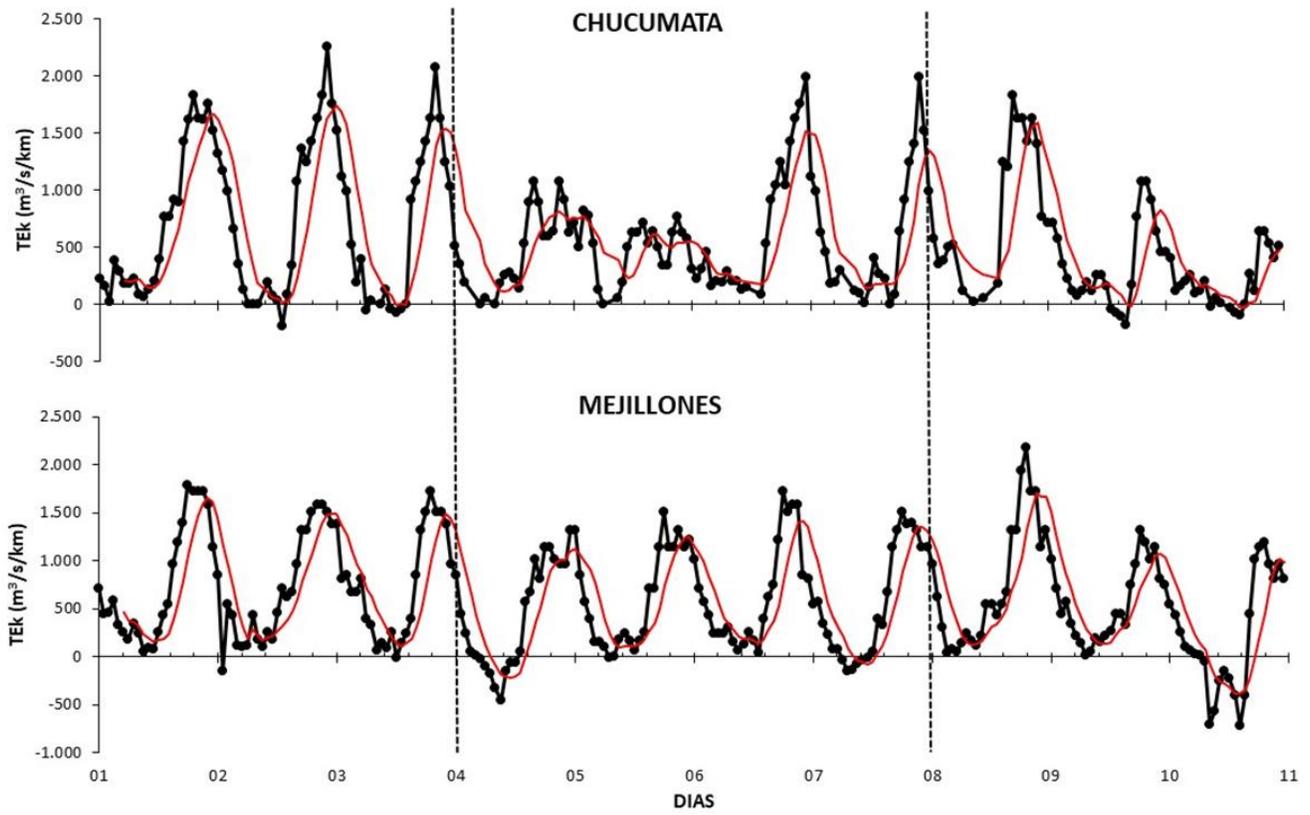


Figura 9. Transporte Ekman diario ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$) en Chucumata y Mejillones, entre los días 1 y 10 de diciembre de 2023 (entre líneas punteadas los días de realización del crucero).

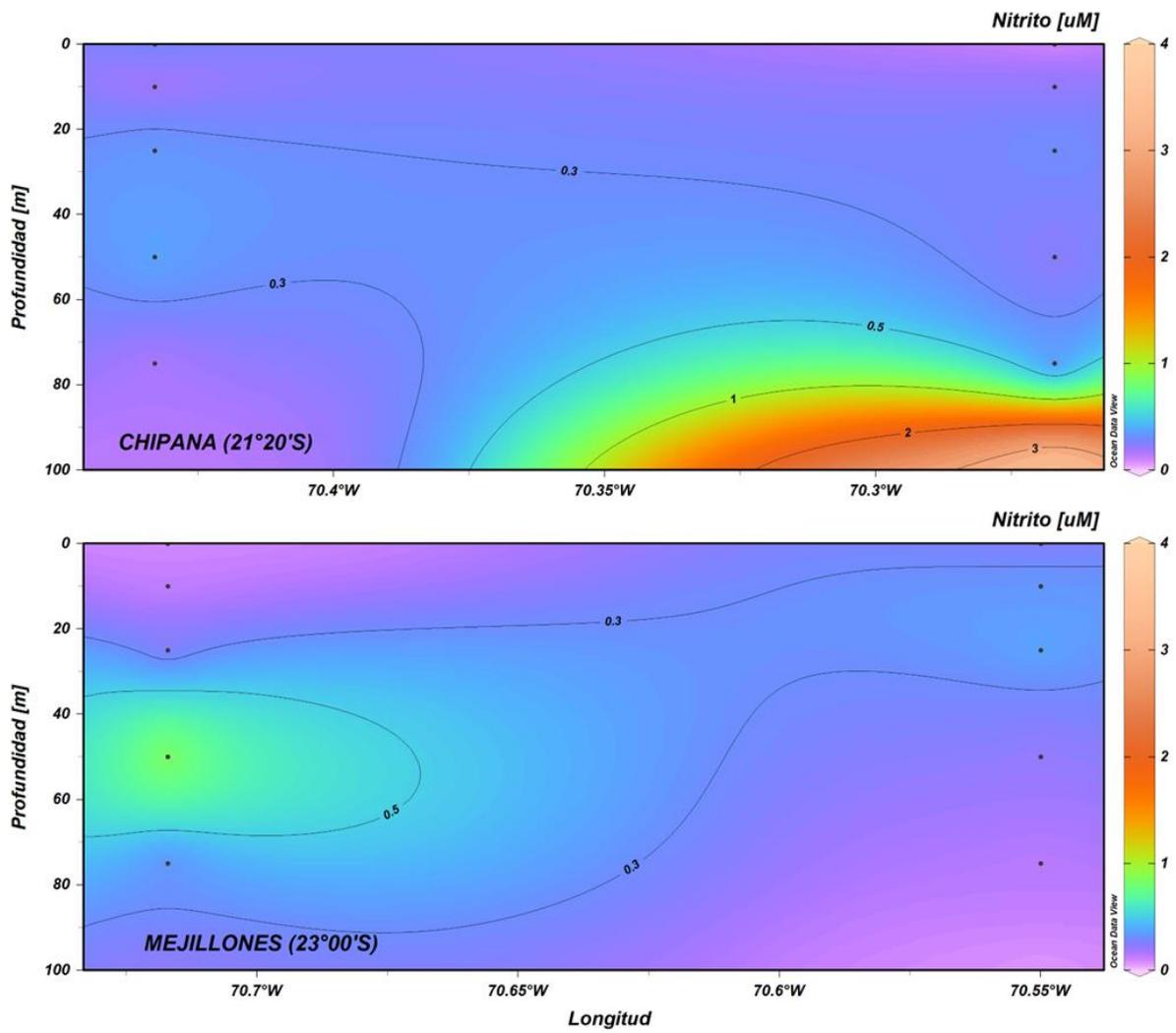


Figura 10. Distribución vertical de Nitrito (μM) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

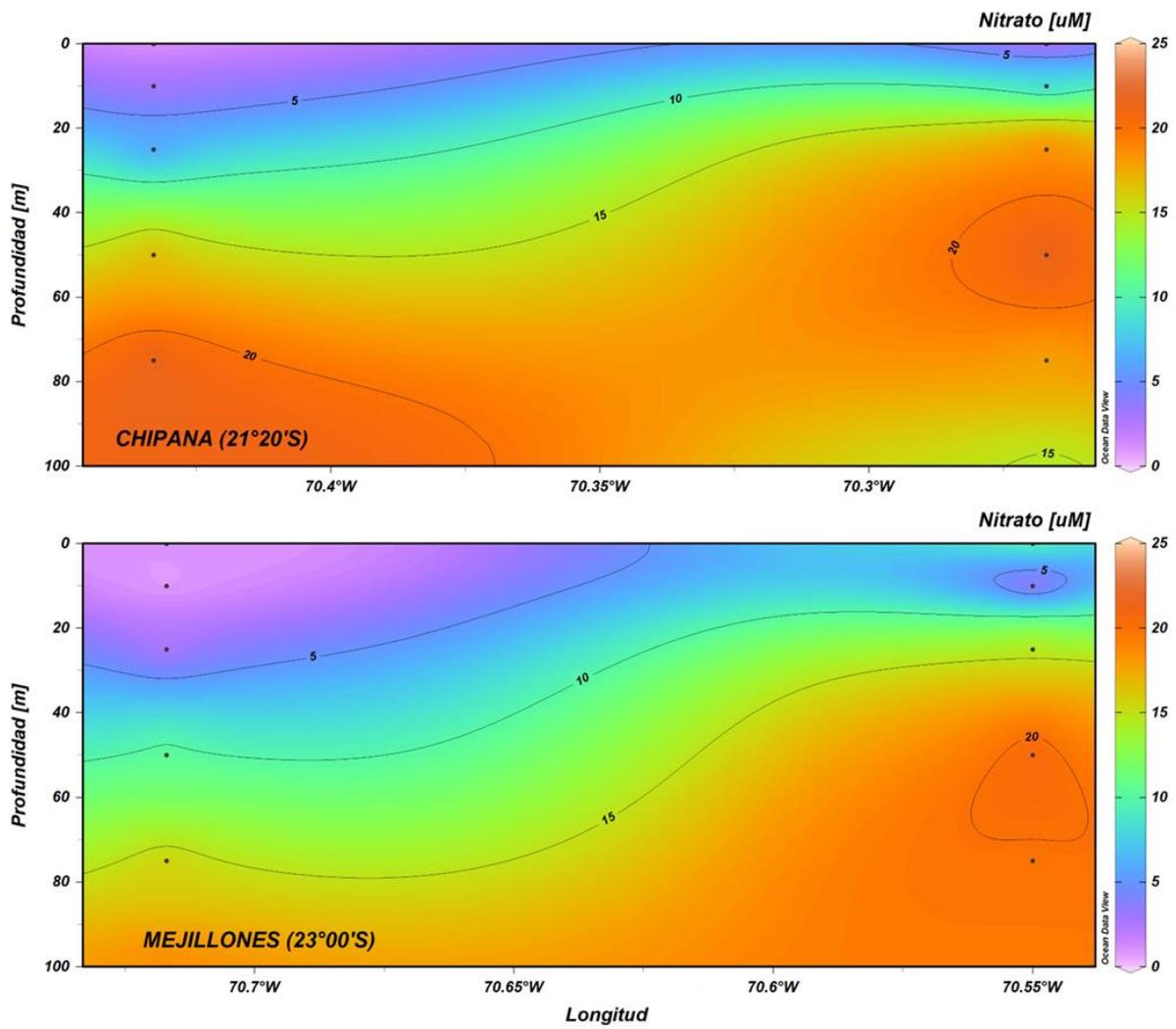


Figura 11. Distribución vertical de Nitrato (μM) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

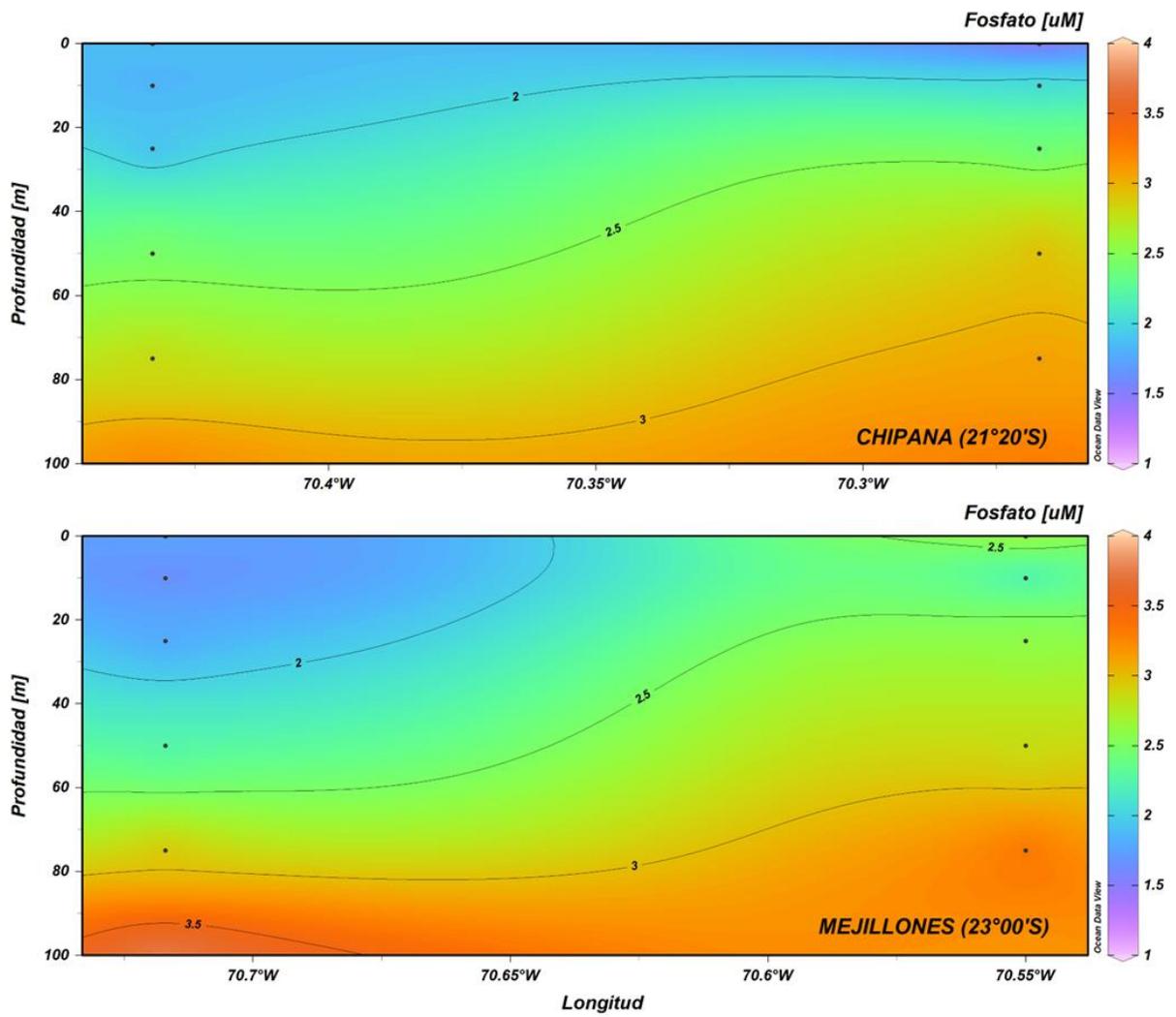


Figura 12. Distribución vertical de Fosfato (μM) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

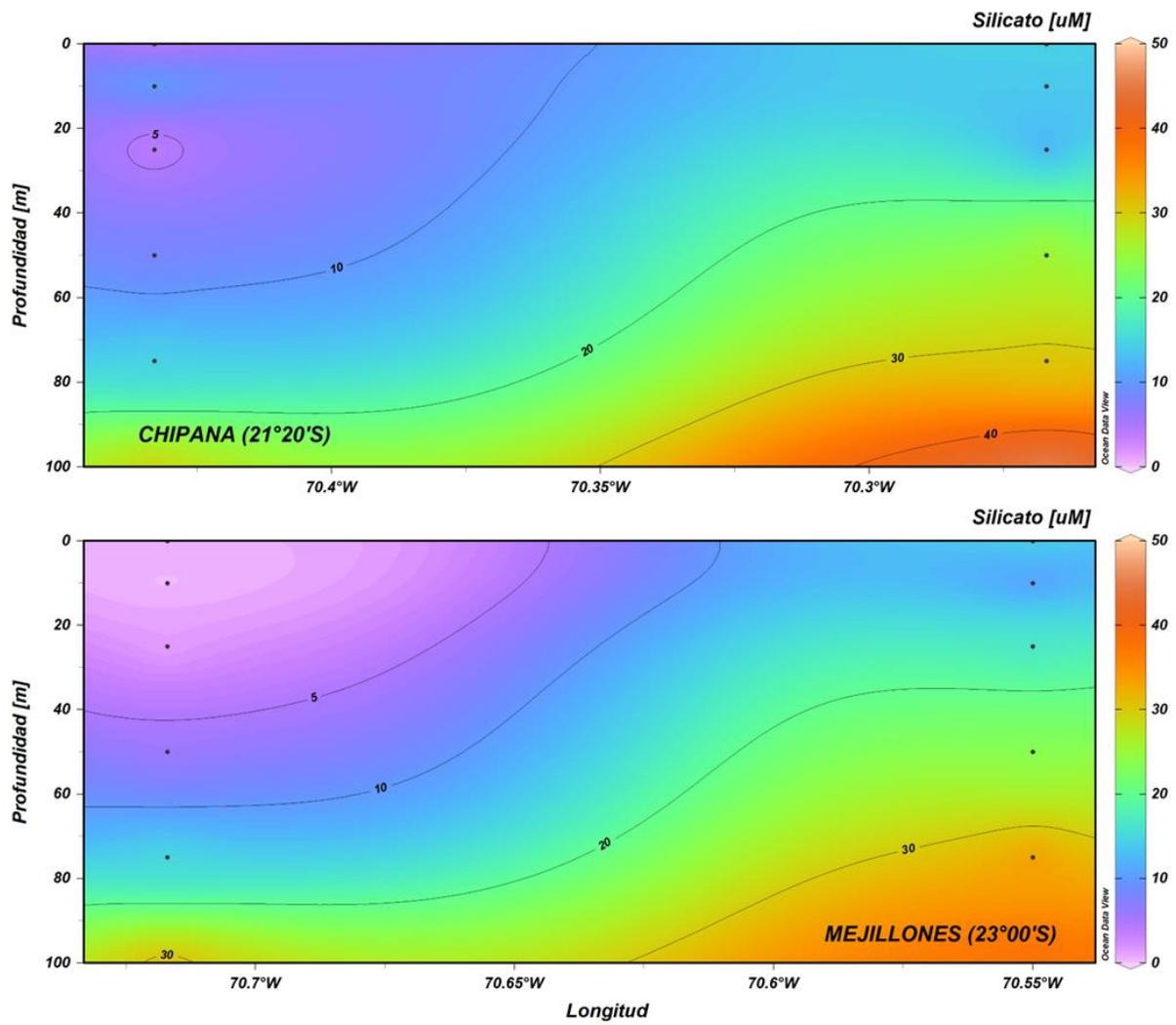


Figura 13. Distribución vertical de Silicato (μM) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

Estructura de la Comunidad Planctónica

Fitoplancton

Se identificó un total de 48 especies y géneros del microfitoplancton, de los cuales 31 pertenecieron al grupo de las diatomeas y 17 al grupo de los flageladas. Las especies de diatomeas que exhibieron las mayores abundancias (>100 cél/mL) fueron *Chaetoceros compressus* y *Thalassiosira decipiens*, junto al género *Pseudo-nitzschia*, destacando *T. decipiens* con una abundancia máxima de 488,4 cél/mL. Entre los flagelados, los dinoflagelados tecados *Dinophysis acuminata* y *Prorocentrum gracile*, y la euglenofícea *Eutreptiella marina*, exhibieron concentraciones máximas entre 1,2 y 1,6 cél/ml.

La abundancia total del microfitoplancton fluctuó entre 0,1 y 1.044,6 cél/mL. Los valores integrados entre la superficie y los 25 m de profundidad revelaron un predominio de valores inferiores a 10, cél/mL en toda el área, excepto por un foco mayor a 500 cél/mL restringido a las 10 mn frente a punta Junín (19°40'S), siendo las diatomeas responsables de más del 80% de estas abundancias. En el grupo de los flagelados predominaron valores integrados inferiores a 1,0 cél/m³ (Tabla 1).

La distribución horizontal de la abundancia de las diatomeas mostró la presencia de un foco superior a 300 cél/mL entre la superficie y los 10 m de profundidad, que se localizó frente a punta Junín (19°40'S) a 10 mn de la costa, alcanzando un máximo de 1.042,0 cél/mL a los 10 m. Hacia el sur las concentraciones descendieron de las 50,0 cél/mL, y en los estratos de 25 y 50 m no superaron las 10,0 cél/mL (Figura 14). En la componente vertical se observa el foco de máxima concentración en punta Junín (19°40'S) restringido a los primeros 10 m de profundidad y a las 10 mn, y en las otras localidades una columna de agua dominada por valores inferiores a las 10,0 cél/mL (Figura 15).

La distribución de los flagelados mostró la presencia de dos focos superiores a 2,0 cél/mL, localizados en punta Junín (19°40'S) y en Mejillones (23°00'S) y entre la superficie y los 10 m de profundidad. La abundancia máxima fue de 2,6 cél/mL y se localizó en punta Junín (19°40'S) a los 10 m y a las 10 mn, coincidente con las diatomeas, y en Mejillones (23°00'S) este grupo alcanzó las 2,0 cél/mL también a los 10 m de profundidad y a las 10 mn de la costa (Figura 16). Las secciones verticales de punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S) muestran la presencia de los focos de máxima restringidos al estrato superficial (0-10 m) y a las 10 mn, y en el resto de la columna de agua y en las otras localidades, el predominio de concentraciones menores a 1,0 (Figura 17).

La biomasa fitoplanctónica fluctuó entre 0,1 y 7,7 µg Cl-a/L. Los valores integrados, entre la superficie y los 25 m de profundidad, muestran el predominio de concentraciones menores a 1,0 µg Cl-a/m³ en toda el área, excepto frente a punta Junín a las 10 mn, donde se registró un valor integrado de 5,3 µg Cl-a/m³ (Tabla 2).

La distribución horizontal de la biomasa fitoplanctónica coincidió con el patrón descrito para ambos grupos fitoplanctónicos, observándose la presencia de concentraciones superiores a $5,0 \mu\text{g Cl-a/L}$ frente a punta Junín ($19^{\circ}40'S$) a 10 mn de la costa distribuidas entre la superficie y los 10 m de profundidad, con el máximo de $7,7 \mu\text{g Cl-a/L}$ localizado a los 10 m. En Mejillones ($23^{\circ}00'S$), a 10 mn, se registró un máximo de $2,2 \mu\text{g Cl-a/L}$ a los 5 m de profundidad. En el resto del área los valores se mantuvieron inferiores a $1,0 \mu\text{g Cl-a/L}$ (Figura 18).

En la componente vertical se observa el foco principal ($7,7 \mu\text{g Cl-a/L}$) en punta Junín ($19^{\circ}40'S$) y el secundario ($2,2 \mu\text{g Cl-a/L}$) localizado en Mejillones ($23^{\circ}00'S$) restringidos a las 10 mn y al estrato superficial (0-10 m). En las otras localidades la columna de agua se encontró dominada por valores inferiores a $1,0 \mu\text{g Cl-a/L}$ (Figura 19).

Tabla 1. Abundancia fitoplanctónica integrada (cél/m³) entre la superficie y los 25 m de profundidad y aporte porcentual (%) de diatomeas (DIATO) y microflagelados (M_FLAGE), entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. MF_TOTAL: microfitoplancton total, DC: distancia de la costa (mn).

| LOCALIDAD | DC (mn) | MF_TOTAL | DIATO | M_FLAGE | %DIATO | %M_FLAGE |
|----------------------------------|---------|----------|-------|---------|--------|----------|
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 587,8 | 586,0 | 1,8 | 99,7 | 0,3 |
| | 20 | 13,5 | 13,2 | 0,3 | 97,9 | 2,1 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | 1,7 | 1,6 | 0,0 | 97,1 | 2,9 |
| | 20 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 82,4 | 17,6 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | 1,3 | 1,3 | 0,1 | 95,5 | 4,5 |
| | 20 | 1,0 | 0,8 | 0,2 | 81,0 | 19,0 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | 0,3 | 0,3 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |
| | 20 | 0,7 | 0,6 | 0,1 | 88,9 | 11,1 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 9,0 | 8,0 | 1,0 | 88,8 | 11,2 |
| | 20 | 0,6 | 0,5 | 0,0 | 97,1 | 2,9 |

Tabla 2. Biomasa fitoplanctónica (BF) integrada (µg Cl-a/m³) entre la superficie y los 25 m de profundidad, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. DC: distancia de la costa (mn).

| LOCALIDAD | DC (mn) | BF (µg Cl-a/m ³) |
|----------------------------------|---------|------------------------------|
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 5,3 |
| | 20 | 1,3 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | 0,6 |
| | 20 | 0,2 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | 0,8 |
| | 20 | 1,0 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | 0,5 |
| | 20 | 0,2 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 1,8 |
| | 20 | 0,4 |

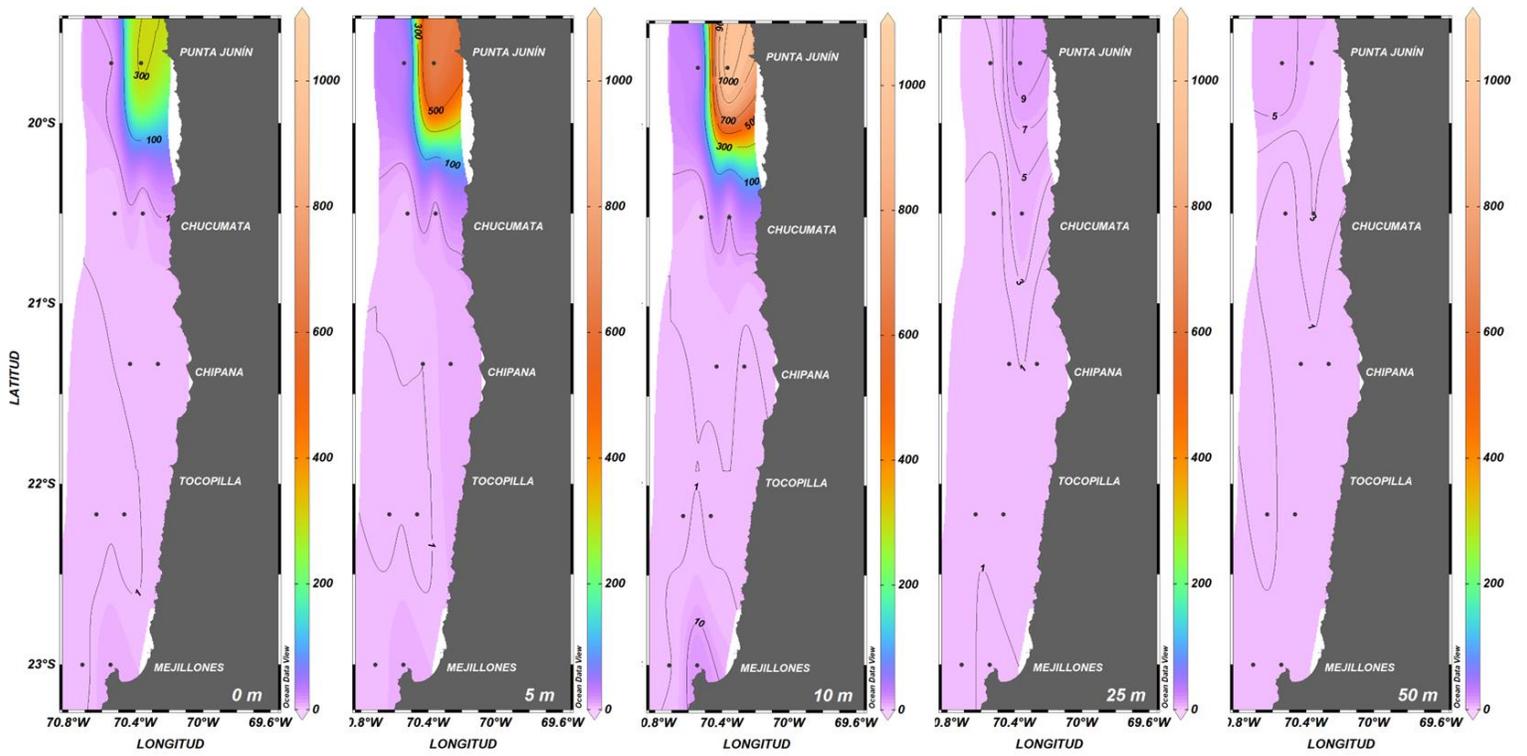


Figura 14. Distribución horizontal de la abundancia de diatomeas (cél/mL) entre la superficie y 50 m de profundidad, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

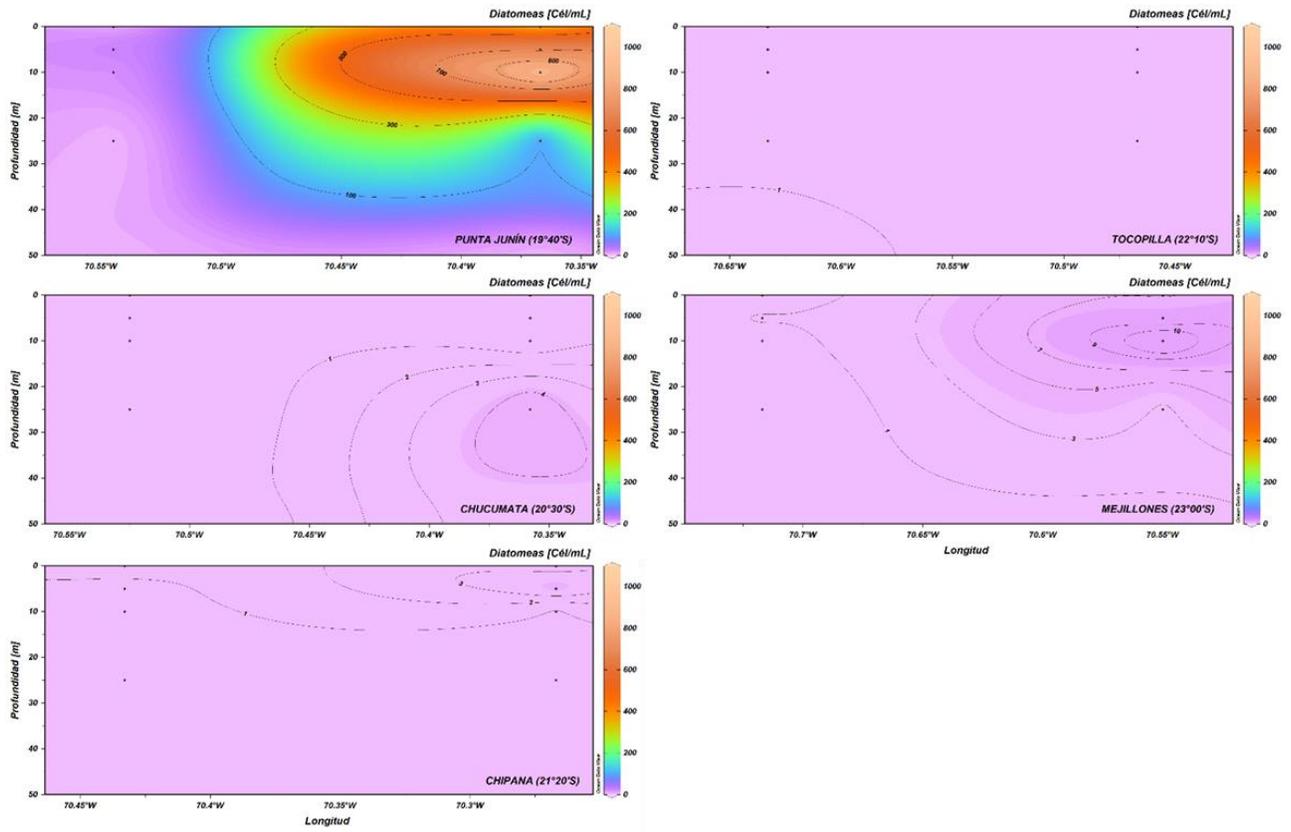


Figura 15. Distribución vertical de la abundancia (cél/mL) de diatomeas entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023

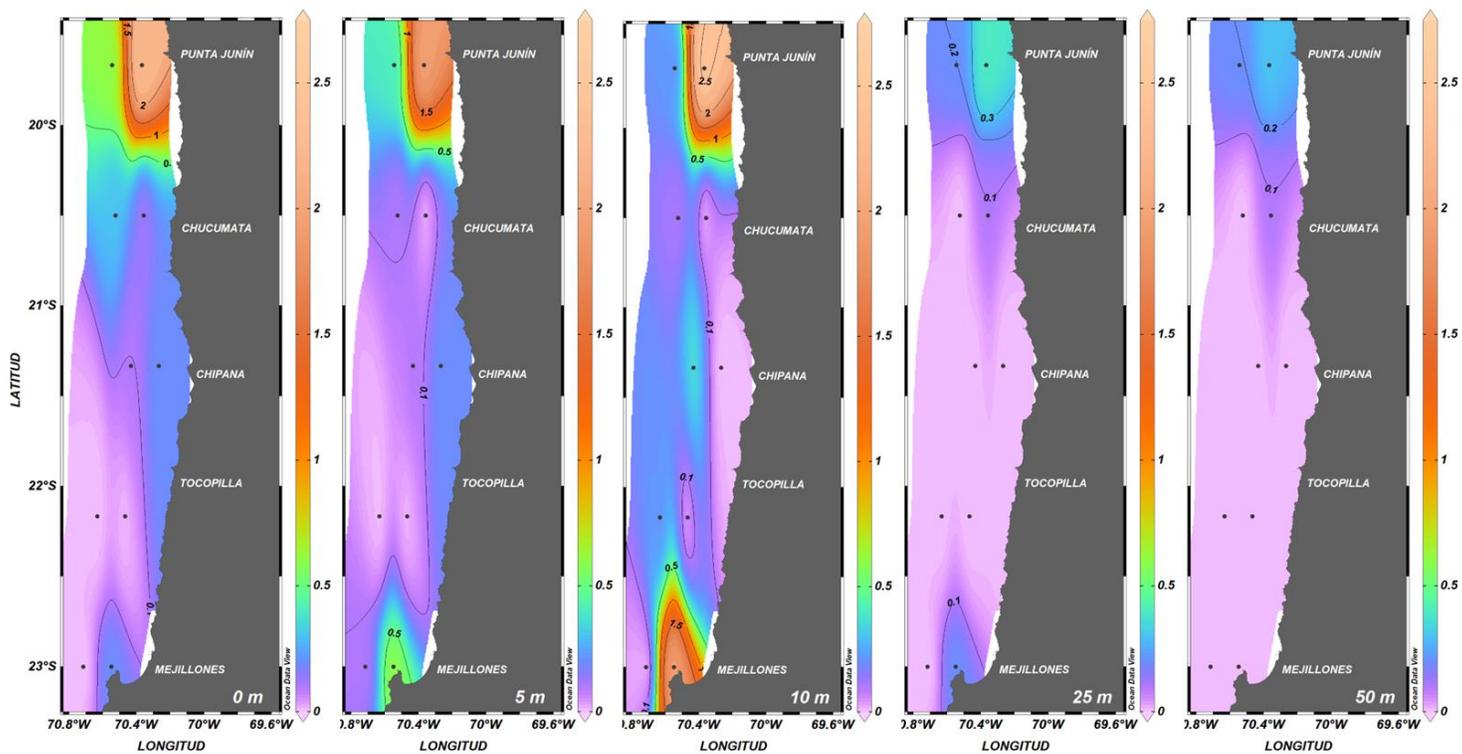


Figura 16. Distribución horizontal de la abundancia de microflagelados (cél/mL) entre la superficie y 50 m de profundidad, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

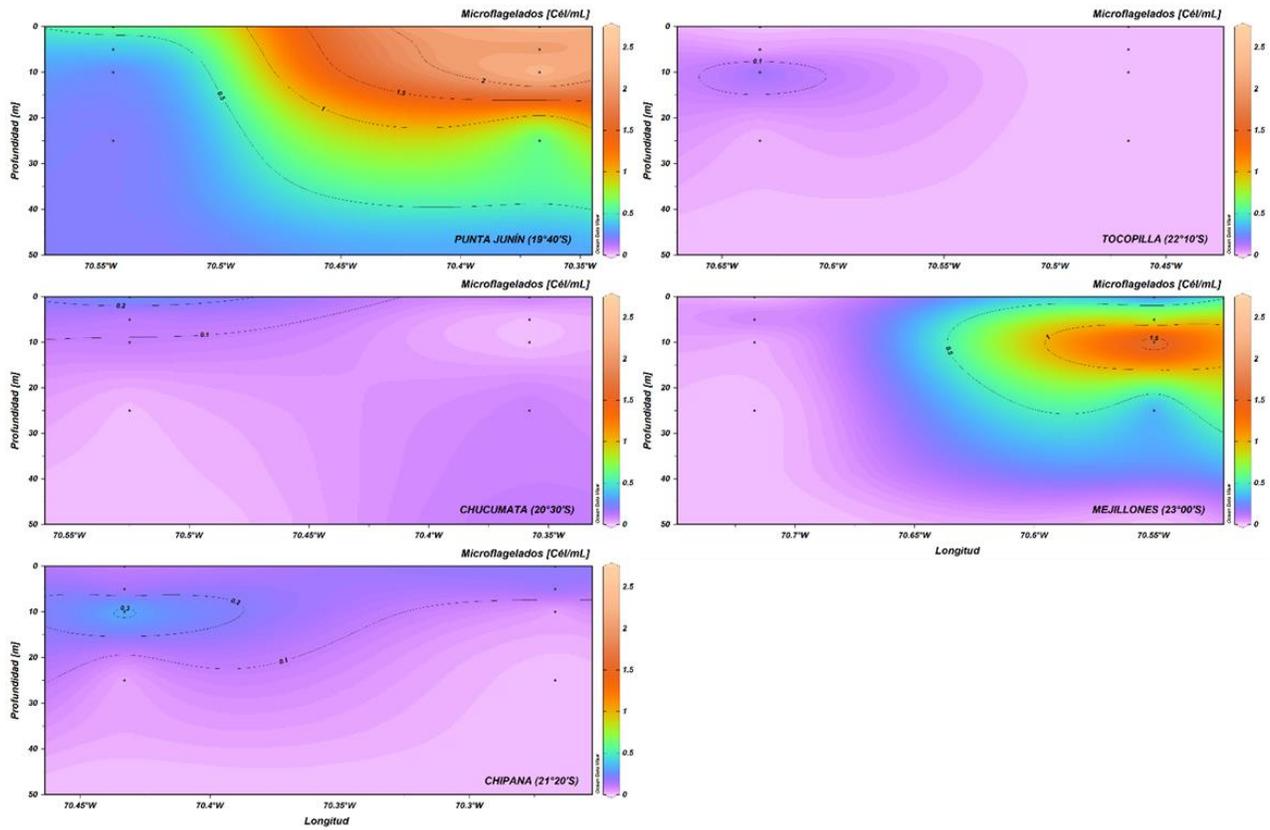


Figura 17. Distribución vertical de la abundancia (cél/mL) de microflagelados entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

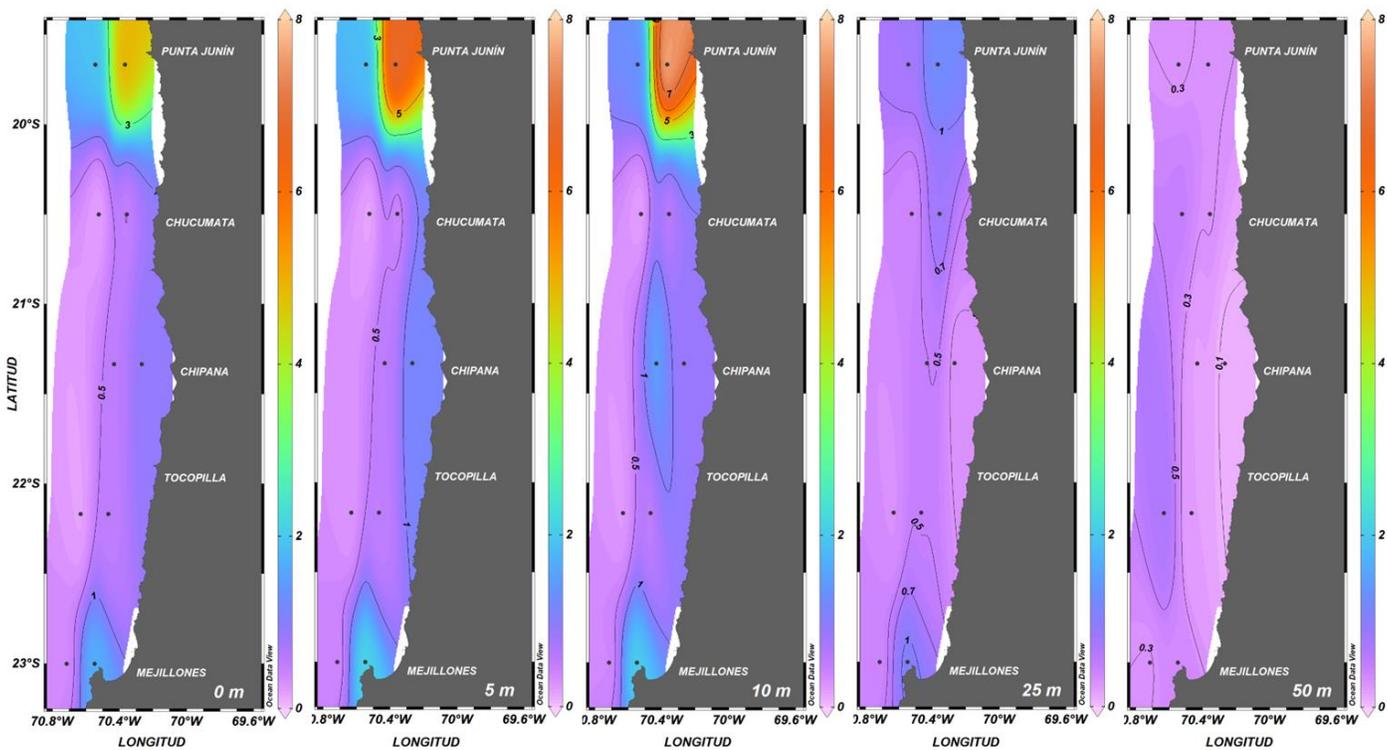


Figura 18. Distribución horizontal de la biomasa fitoplanctónica ($\mu\text{g Chl-a/L}$) entre la superficie y 50 m de profundidad, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

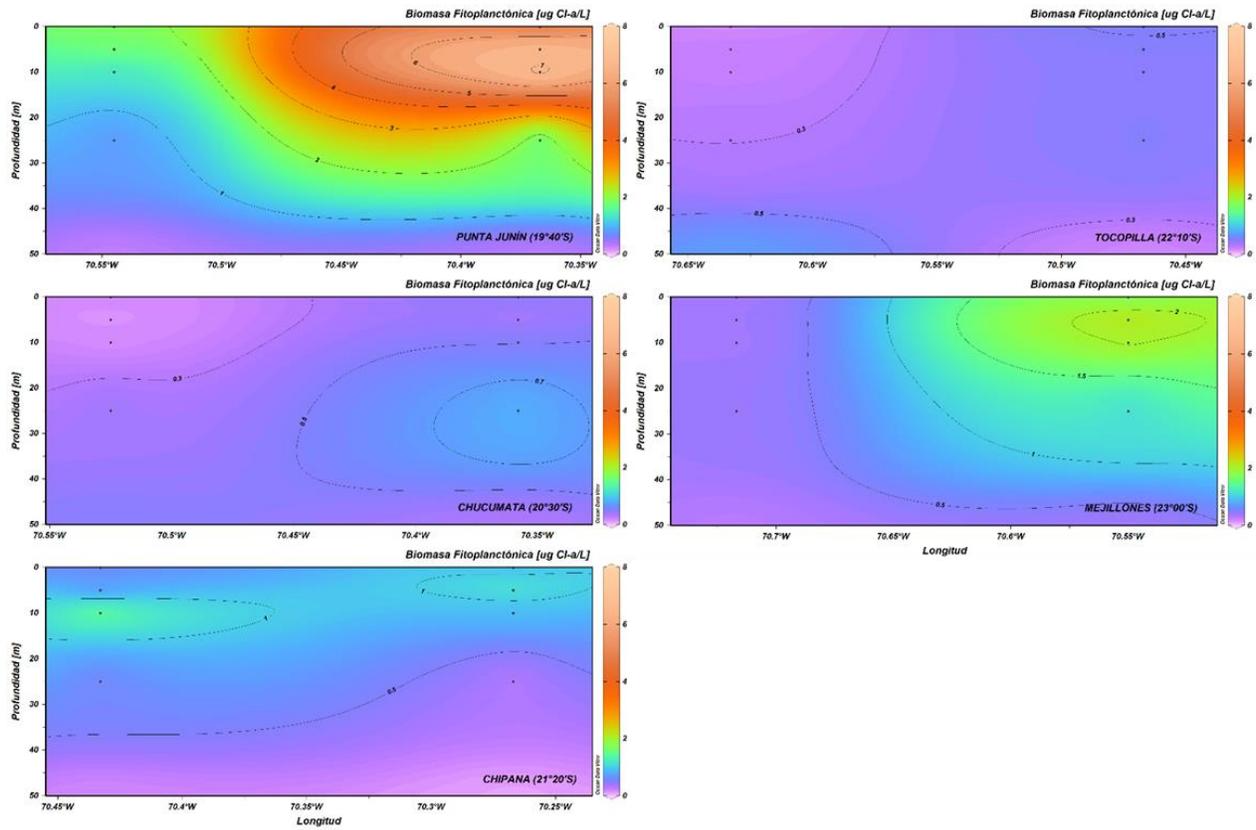


Figura 19. Distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica ($\mu\text{g C1-a/L}$) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

Zooplancton

La abundancia total del zooplancton fluctuó entre 33,9 y 183,8 ind/10 m², observándose valores superiores a 50 ind/10 m² en toda el área, distribuidos entre 10 y 40 mn (Tabla 3).

Se identificó un total de 12 grupos zooplanctónicos. El grupo Copepoda exhibió las mayores abundancias, las que fluctuaron entre 30,0 y 161,8 ind/10 m², lo que se tradujo en una contribución porcentual al total entre 75,6 y 93,3%. Los otros grupos, en conjunto, alcanzaron una densidad máxima de 22,0 ind/10 m² (Tabla 4) y, en promedio, aportaron con un 13,8% a la abundancia total.

Respecto de los tamaños, se registraron individuos entre 0,25 y 6,25 mm. Las mayores concentraciones estuvieron en el rango 0,25-0,75 mm, con valores entre 31,5 y 166,0 ind/10 m², realizando un aporte porcentual al total entre 77,9 y 95,9%. El grupo que aportó con las mayores densidades a esta categoría de tamaño fue Copepoda, con abundancias entre 29,1 y 158,2 ind/10 m², y un aporte entre el 89,0 y 95,7% (Tabla 5).

La distribución de la abundancia total del zooplancton mostró una tendencia al incremento de los valores hacia el sur del área y a la disminución hacia las 40 mn. Las mayores densidades (>100 ind/10 m²) se registraron en la forma de dos focos, uno secundario localizado frente a Chucumata (20°30'S), a 10 mn de la costa, que alcanzó los 138,2 ind/10m², y uno principal ubicado en Mejillones (23°00'S) a 20 mn que concentró la máxima densidad del grupo, 183,8 ind/10 m². En el resto del área las abundancias fluctuaron entre 30,0 y 90,0 ind/10m² (Figura 20A).

Dada la dominancia del grupo Copepoda, la distribución de su abundancia mostró el mismo patrón, registrándose el foco principal frente a Mejillones (23°00'S) a 20 mn, con un valor de 161,8 ind/10 m², y el secundario, de 121,3 ind/10 m² a 10 mn en Chucumata (20°30'S) (Figura 20B).

La abundancia del rango de tamaño 0,25-0,75 mm y la de los copépodos pertenecientes a éste exhibieron la misma distribución, detectándose en Mejillones (23°00'S) las máximas principales de 166,0 y 158,2 ind/10 m² respectivamente, y los focos secundarios en Chucumata (20°30'S), a 10 mn de la costa, de 126,4 y 118,7 ind/10 m² respectivamente (Figura 21A y 21B).

Tabla 3. Abundancia total del zooplancton (ind/10 m²) entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. DC: distancia de la costa (mn).

| LOCALIDAD | DC (mn) | Abundancia Total (ind/10 m ²) |
|------------------------------|---------|---|
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 51,3 |
| | 20 | 97,4 |
| | 40 | 33,9 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | 138,2 |
| | 20 | 43,0 |
| | 40 | 34,9 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | 53,6 |
| | 20 | 82,1 |
| | 40 | 65,2 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | 103,6 |
| | 20 | 69,0 |
| | 40 | 52,8 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 75,6 |
| | 20 | 183,8 |
| | 40 | 98,6 |

Tabla 4. Abundancia (ind/10 m²) de Copepoda (COPEP) y de otros grupos zooplanctónicos (OG), y aporte porcentual de Copepoda (AP-COP) (%), entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. DC: distancia de la costa (mn).

| LOCALIDAD | DC (mn) | COPEP (ind/10 m ²) | OG (ind/10 m ²) | AP-COP (%) |
|------------------------------|---------|--------------------------------|-----------------------------|------------|
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 47,9 | 3,4 | 93,3 |
| | 20 | 82,7 | 14,7 | 84,9 |
| | 40 | 30,0 | 3,9 | 88,4 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | 121,3 | 16,9 | 87,8 |
| | 20 | 37,6 | 5,4 | 87,4 |
| | 40 | 30,2 | 4,7 | 86,6 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | 42,2 | 11,4 | 78,8 |
| | 20 | 62,1 | 20,0 | 75,6 |
| | 40 | 57,5 | 7,7 | 88,2 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | 88,5 | 15,1 | 85,4 |
| | 20 | 60,5 | 8,5 | 87,7 |
| | 40 | 47,3 | 5,4 | 89,7 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 62,3 | 13,2 | 82,5 |
| | 20 | 161,8 | 22,0 | 88,0 |
| | 40 | 86,0 | 12,5 | 87,3 |

Tabla 5. Abundancia zooplanctónica (ind/10 m²) por rango de tamaño (mm) y aporte porcentual de Copepoda (AP-COPEP) (%) a la categoría 0,25-0,75 mm, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. DC: distancia de la costa (mn).

| LOCALIDAD | DC (mn) | RANGOS DE TAMAÑO (mm) | | | | AP-COPEP (%) 0,25-0,75 |
|--------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|
| | | 0,25-0,75 | 1,25-1,75 | 2,25-2,75 | 3,25-6,25 | |
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 48,7 | 1,8 | 0,1 | 0,2 | 95,7 |
| | 20 | 85,7 | 9,5 | 1,1 | 0,4 | 94,4 |
| | 40 | 31,5 | 1,7 | 0,1 | | 92,5 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | 126,4 | 8,0 | 2,3 | 0,6 | 93,9 |
| | 20 | 39,5 | 2,4 | 0,6 | | 92,4 |
| | 40 | 31,9 | 2,6 | 0,3 | | 92,5 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | 45,0 | 6,1 | 1,7 | 0,5 | 89,6 |
| | 20 | 63,4 | 11,2 | 5,3 | 1,5 | 92,8 |
| | 40 | 60,4 | 3,4 | 0,8 | 0,2 | 93,2 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | 91,0 | 7,7 | 3,2 | 0,9 | 94,6 |
| | 20 | 63,6 | 4,2 | 1,0 | | 93,8 |
| | 40 | 49,6 | 2,7 | 0,1 | | 93,0 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 64,6 | 8,4 | 1,3 | 0,8 | 89,0 |
| | 20 | 166,0 | 11,9 | 3,6 | 1,2 | 95,3 |
| | 40 | 89,2 | 6,5 | 2,4 | | 93,3 |

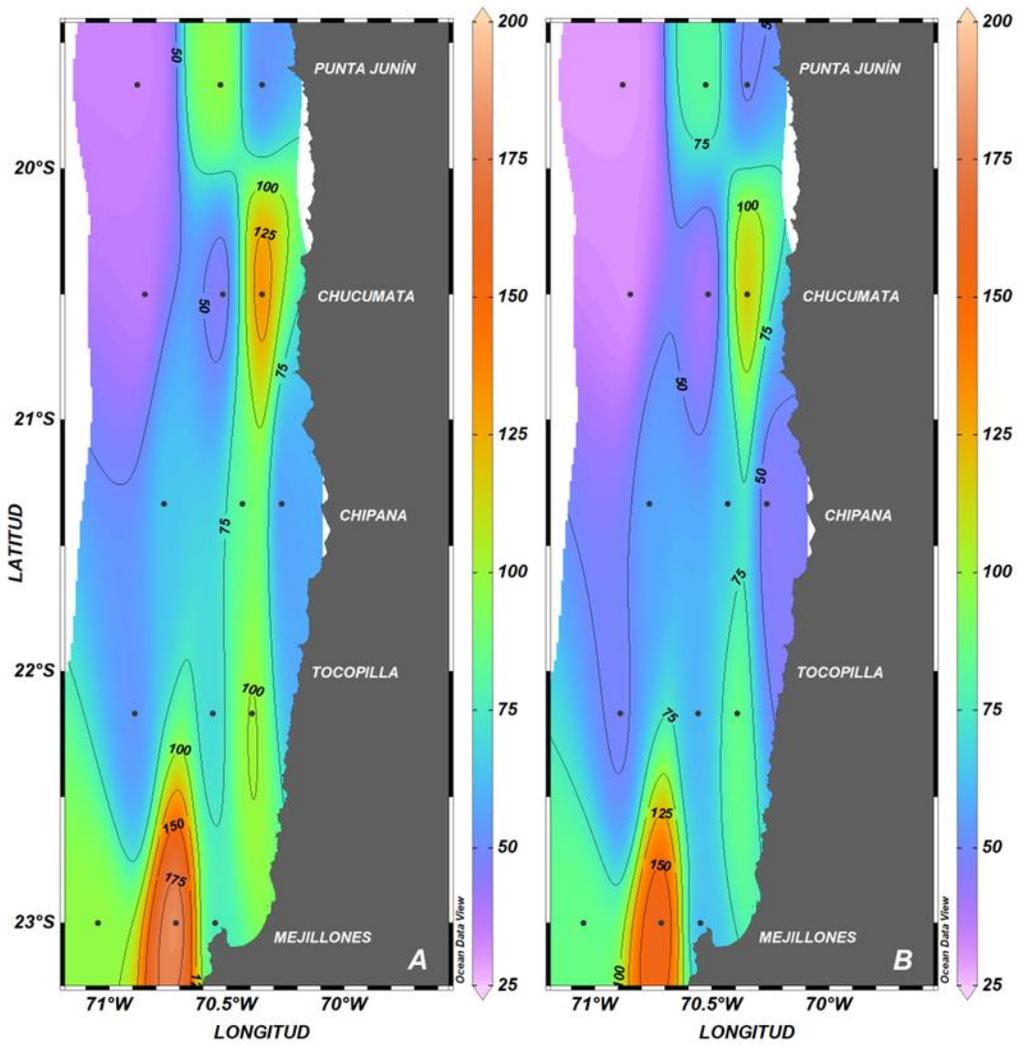


Figura 20. Distribución horizontal de la abundancia (ind/10 m²) de A: zooplancton total y B: grupo Copepoda, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

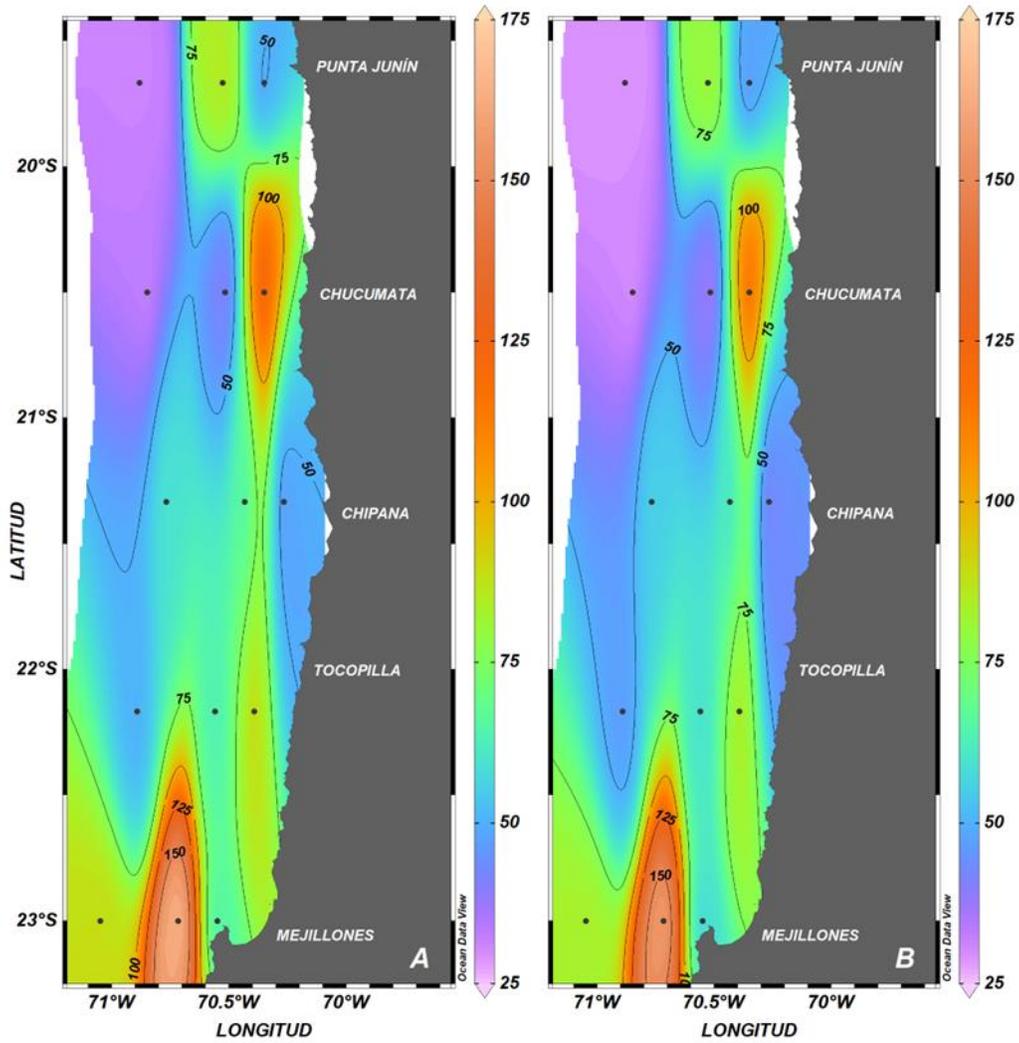


Figura 21. Distribución horizontal de la abundancia (ind/10 m²) de A: zooplancton de rango de tamaño 0,25-0,75 mm y B: grupo Copepoda perteneciente al rango de tamaño 0,25-0,75 mm, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

Ictioplancton

El análisis del componente ictioplanctónico permitió identificar un total de 10.403 huevos/10 m² y 25.047 larvas/10 m². Los estadios tempranos de *Engraulis ringens* aportaron a estos totales con un 0 y un 2,2% respectivamente. No se registró la presencia de huevos de *Engraulis ringens* y de larvas, sólo en estado de pre-flexión (Tabla 6).

Las larvas en estado de pre-flexión se localizaron a 10 mn de la costa frente a punta Junín (19°40'S) y a Mejillones (23°00'S), alcanzando una densidad de 291 y 252 larvas/10 m² respectivamente (Figura 22).

Los huevos y larvas de otras especies se encontraron distribuidos en toda el área entre las 10 y las 40 mn, observándose una mayor presencia de larvas. Ambos estadios exhibieron su máxima abundancia a 20 mn de la costa frente a Chucumata (20°30'S), las que alcanzaron los 1.987 huevos/10 m² (Figura 23A) y las 4.503 larvas/10 m² (Figura 23B).

Tabla 6. Abundancia de huevos y larvas (N°/10 m²) de anchoveta (*Engraulis ringens*) y de otras especies, entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023. Larvas Pre-Flex: larvas en pre-flexión. DC: distancia de la costa (mn), AP (%): aporte porcentual.

| Localidad | DC (mn) | <i>Engraulis ringens</i> | Otras Especies | | Totales | |
|-----------------------|---------|--------------------------|----------------|--------|---------|--------|
| | | Larvas Pre-Flex | Huevos | Larvas | Huevos | Larvas |
| punta Junín (19°40'S) | 10 | 291 | | 73 | | 363 |
| | 20 | | 739 | 517 | 739 | 517 |
| | 40 | | 1069 | 1.283 | 1.069 | 1.283 |
| Chucumata (20°30'S) | 10 | | 168 | 1.902 | 168 | 1.902 |
| | 20 | | 1987 | 4.503 | 1.987 | 4.503 |
| | 40 | | 1237 | 3.711 | 1.237 | 3.711 |
| Chipana (21°20'S) | 10 | | 264 | | 264 | |
| | 20 | | | 379 | | 379 |
| | 40 | | 1400 | 737 | 1.400 | 737 |
| Tocopilla (22°10'S) | 10 | | 497 | 781 | 497 | 781 |
| | 20 | | 1771 | 2.156 | 1.771 | 2.156 |
| | 40 | | 843 | 1.233 | 843 | 1.233 |
| Mejillones (23°00'S) | 10 | 252 | | 566 | | 818 |
| | 20 | | | 4.034 | | 4.034 |
| | 40 | | 428 | 2.632 | 428 | 2.632 |
| TOTAL | | 542 | | | 10.403 | 24.505 |
| AP (%) | | 2,2 | 100,0 | 97,8 | | |

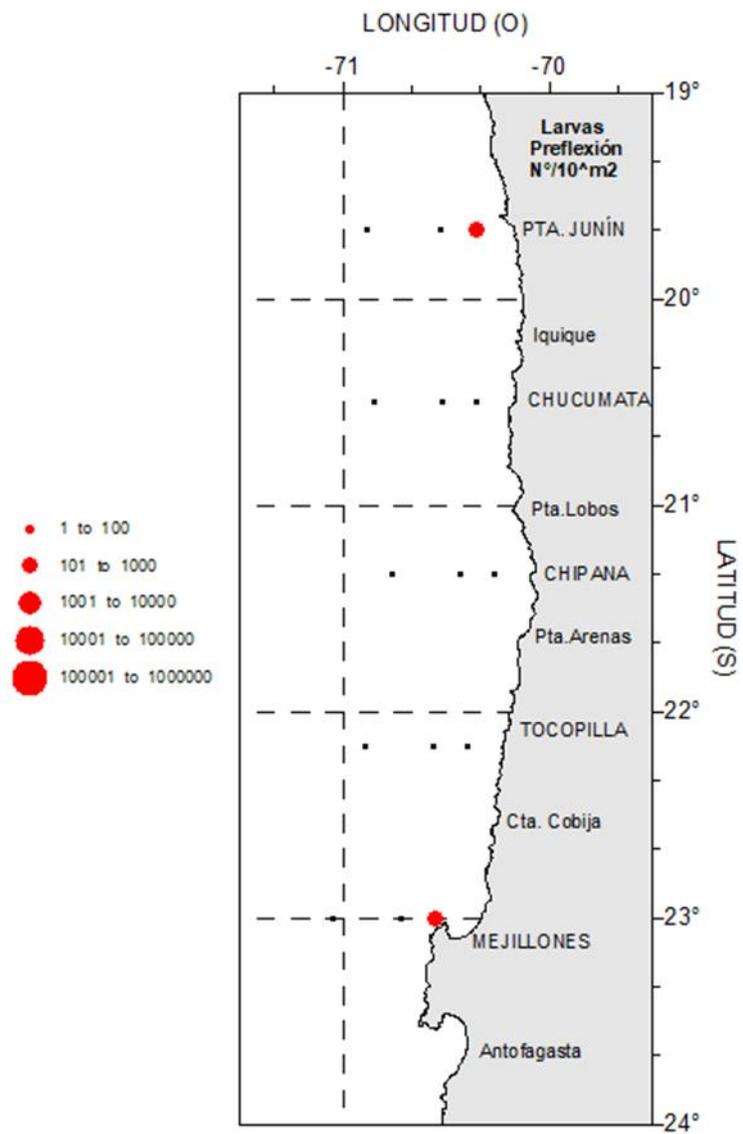


Figura 22. Distribución de la abundancia de larvas (N°/10 m²) de *Engraulis ringens* en estado pre-flexión entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

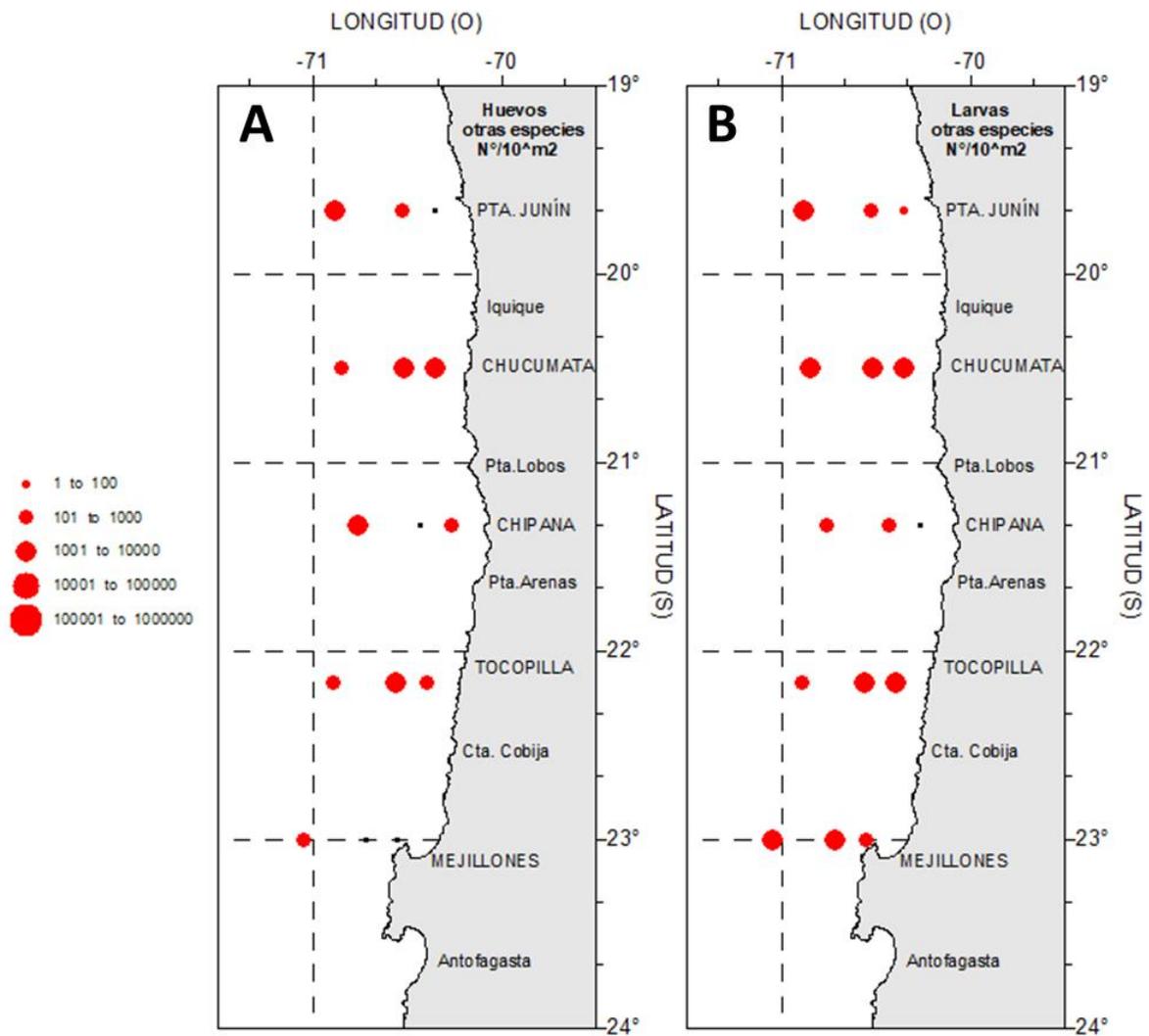


Figura 23. Distribución horizontal de la abundancia (N°/10 m²) de A: huevos y B: larvas de otras especies entre los días 4 y 8 de diciembre de 2023.

Análisis Estadístico

El análisis comparativo reveló la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre todas las variables físicas, químicas y biológicas registradas durante las primaveras de 2014 a 2023 (Tabla 7).

Poniendo énfasis en la primavera de 2023, las diferencias en la temperatura se debieron a que durante este periodo los valores fueron mayores a los de 2014, 2017 y 2021. Misma situación para la salinidad respecto de las primaveras de 2016 y 2021. En relación con la capa de mezcla, en 2023 se encontró a mayor profundidad que en los años 2016, 2017, 2019 y 2022. Por el contrario, la concentración de oxígeno disuelto descendió en comparación al periodo 2014-2016, y la posición del límite superior de la ZMO se profundizó respecto de todas las primaveras anteriores, excepto la de 2015, 2018, 2019 y 2021 (Tabla 8, Figura 24).

En el caso de las variables biológicas, el análisis de comparación múltiple de rangos reveló que las diferencias en la abundancia de diatomeas se generaron por la disminución de los valores en 2023 en comparación a la primavera de 2017, 2019 y 2021, al igual que la abundancia de microflagelados que resultó inferior a los periodos 2018-2019 y 2021-2022. La biomasa fitoplanctónica también evidenció un descenso respecto de 2014, 2015, 2019 y 2021, y la abundancia zooplanctónica disminuyó este año en comparación a 2022. En relación con los huevos de anchoveta, si bien no existió hallazgo de estos estadios, el análisis de comparación múltiple de rangos reveló un descenso sólo en comparación a 2019, y no evidenció la primavera causante de las diferencias detectadas en la abundancia de larvas (Tabla 9, Figura 25).

Tabla 7. Resultados del análisis comparativo global entre las variables físicas, químicas y biológicas registradas durante las primaveras de 2014 a 2023. K-W: estadístico de Kruskal-Wallis, NS: nivel de significancia.

| VARIABLE | K-W | Valor p | NS |
|--|------------|----------------|-----------|
| TEMPERATURA (°C) | 32,02 | 0,000 | <0,001 |
| SALINIDAD (ups) | 67,01 | 0,000 | <0,001 |
| PROFUNDIDAD CAPA MEZCLA (m) | 44,56 | 0,000 | <0,001 |
| OXÍGENO DISUELTO (mL O ₂ /L) | 86,38 | 0,000 | <0,001 |
| PROFUNDIDAD LS_ZMO (m) | 62,91 | 0,000 | <0,001 |
| ABUNDANCIA DIATOMEAS (cél/mL) | 39,03 | 0,000 | <0,001 |
| ABUNDANCIA MICROFLAGELADOS (cél/mL) | 52,52 | 0,000 | <0,001 |
| BIOMASA FITOPLANCTONICA (µg/L) | 48,31 | 0,000 | <0,001 |
| ABUNDANCIA ZOOPLANCTON (N°/10 m ²) | 79,92 | 0,000 | <0,001 |
| ABUNDANCIA HUEVOS (N°/10 m ²) | 31,42 | 0,000 | <0,001 |
| ABUNDANCIA LARVAS (N°/10 m ²) | 37,38 | 0,000 | <0,001 |

Tabla 8. Resultados de la prueba de comparación múltiple de rangos después de Kruskal-Wallis para las variables físicas y químicas registradas durante las primaveras de 2014 a 2023, que exhibieron diferencias estadísticamente significativas. dif.obs.: diferencias observadas, dif.crit.: diferencias críticas.

| Variable | Periodo | dif.obs. | dif.crit. |
|------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| TEMPERATURA (°C) | 2014-2023 | 63,51 | 63,34 |
| | 2017-2018 | 65,00 | 53,75 |
| | 2017-2023 | 82,69 | 63,34 |
| | 2018-2021 | 51,25 | 50,99 |
| | 2021-2023 | 68,94 | 61,02 |
| SALINIDAD (ups) | 2014-2021 | 54,84 | 50,99 |
| | 2015-2016 | 88,75 | 53,75 |
| | 2015-2019 | 79,84 | 56,76 |
| | 2015-2020 | 72,32 | 51,58 |
| | 2015-2021 | 90,03 | 50,99 |
| | 2015-2022 | 78,43 | 50,99 |
| | 2016-2018 | 57,66 | 53,75 |
| | 2016-2023 | 68,43 | 63,34 |
| | 2018-2021 | 58,93 | 50,99 |
| 2021-2023 | 69,71 | 61,02 | |
| PROFUNDIDAD CAPA MEZCLA (m) | 2015-2017 | 75,37 | 53,45 |
| | 2015-2019 | 67,71 | 55,47 |
| | 2015-2022 | 56,95 | 50,56 |
| | 2016-2023 | 66,31 | 60,99 |
| | 2017-2023 | 90,78 | 61,72 |
| | 2019-2023 | 83,12 | 63,47 |
| | 2022-2023 | 72,36 | 59,23 |

Continuación Tabla 8.

| Variable | Periodo | dif.obs. | dif.crit. |
|--|----------------|-----------------|------------------|
| OXÍGENO DISUELTO (mL O₂/L) | 2014-2022 | 83,01 | 45,04 |
| | 2014-2023 | 72,85 | 55,95 |
| | 2015-2022 | 79,48 | 45,04 |
| | 2015-2023 | 69,32 | 55,95 |
| | 2016-2021 | 62,66 | 45,04 |
| | 2016-2022 | 105,79 | 45,04 |
| | 2016-2023 | 95,63 | 55,95 |
| | 2018-2022 | 62,98 | 45,04 |
| | 2019-2022 | 62,91 | 47,84 |
| | 2020-2022 | 75,02 | 43,02 |
| | 2020-2023 | 64,87 | 54,34 |
| 2021-2022 | 43,13 | 42,46 | |
| PROFUNDIDAD LS_ZMO (m) | 2014-2023 | 67,19 | 54,41 |
| | 2015-2019 | 56,28 | 49,48 |
| | 2016-2023 | 67,48 | 54,41 |
| | 2018-2022 | 59,89 | 44,87 |
| | 2018-2023 | 85,94 | 54,41 |
| | 2019-2022 | 83,24 | 47,53 |
| | 2019-2023 | 109,29 | 56,63 |
| | 2020-2023 | 62,50 | 52,84 |
| | 2021-2022 | 55,18 | 42,95 |
| | 2021-2023 | 81,23 | 52,84 |

Tabla 9. Resultados de la prueba de comparación múltiple de rangos después de Kruskal-Wallis para las variables biológicas, registradas durante las primaveras de 2014 a 2023, que exhibieron diferencias estadísticamente significativas. dif.obs.: diferencias observadas, dif.crit.: diferencias críticas.

| Variable | Periodo | dif.obs. | dif.crit. |
|--|----------------|-----------------|------------------|
| ABUNDANCIA DIATOMEAS (cél/mL) | 2015-2021 | 51,81 | 49,09 |
| | 2016-2021 | 51,56 | 49,09 |
| | 2017-2023 | 68,75 | 66,47 |
| | 2018-2021 | 66,50 | 49,09 |
| | 2019-2023 | 79,19 | 68,52 |
| | 2021-2023 | 96,13 | 66,47 |
| ABUNDANCIA MICROFLAGELADOS (cél/mL) | 2014-2018 | 57,25 | 49,09 |
| | 2014-2019 | 55,77 | 51,84 |
| | 2014-2021 | 60,19 | 49,09 |
| | 2015-2018 | 51,50 | 49,09 |
| | 2015-2021 | 54,44 | 49,09 |
| | 2018-2020 | 49,28 | 49,09 |
| | 2018-2023 | 94,25 | 66,47 |
| | 2019-2023 | 92,77 | 68,52 |
| | 2020-2021 | 52,22 | 49,09 |
| | 2021-2023 | 97,19 | 66,47 |
| | 2022-2023 | 70,75 | 66,47 |
| BIOMASA FITOPLANCTÓNICA ($\mu\text{g Cl-a/L}$) | 2014-2022 | 58,50 | 49,09 |
| | 2014-2023 | 70,75 | 66,47 |
| | 2015-2020 | 58,94 | 49,09 |
| | 2015-2022 | 71,06 | 49,09 |
| | 2015-2023 | 83,31 | 66,47 |
| | 2019-2022 | 57,67 | 51,84 |
| | 2019-2023 | 69,92 | 68,52 |
| | 2021-2022 | 58,88 | 49,09 |
| 2021-2023 | 71,13 | 66,47 | |

Continuación Tabla 9.

| Variable | Periodo | dif.obs. | dif.crit. |
|---|----------------|-----------------|------------------|
| ABUNDANCIA ZOOPLANCTON (N°/10 m²) | 2014-2018 | 68,28 | 53,75 |
| | 2014-2021 | 63,77 | 50,99 |
| | 2015-2018 | 60,28 | 53,75 |
| | 2015-2021 | 55,77 | 50,99 |
| | 2016-2022 | 62,63 | 50,99 |
| | 2017-2018 | 81,44 | 53,75 |
| | 2017-2021 | 76,93 | 50,99 |
| | 2018-2020 | 61,22 | 51,58 |
| | 2018-2022 | 107,56 | 50,99 |
| | 2020-2021 | 56,71 | 48,70 |
| | 2021-2022 | 103,05 | 48,07 |
| | 2022-2023 | 70,39 | 61,02 |
| ABUNDANCIA HUEVOS (N°/10 m²) | 2019-2022 | 57,21 | 54,16 |
| | 2019-2023 | 73,96 | 65,92 |

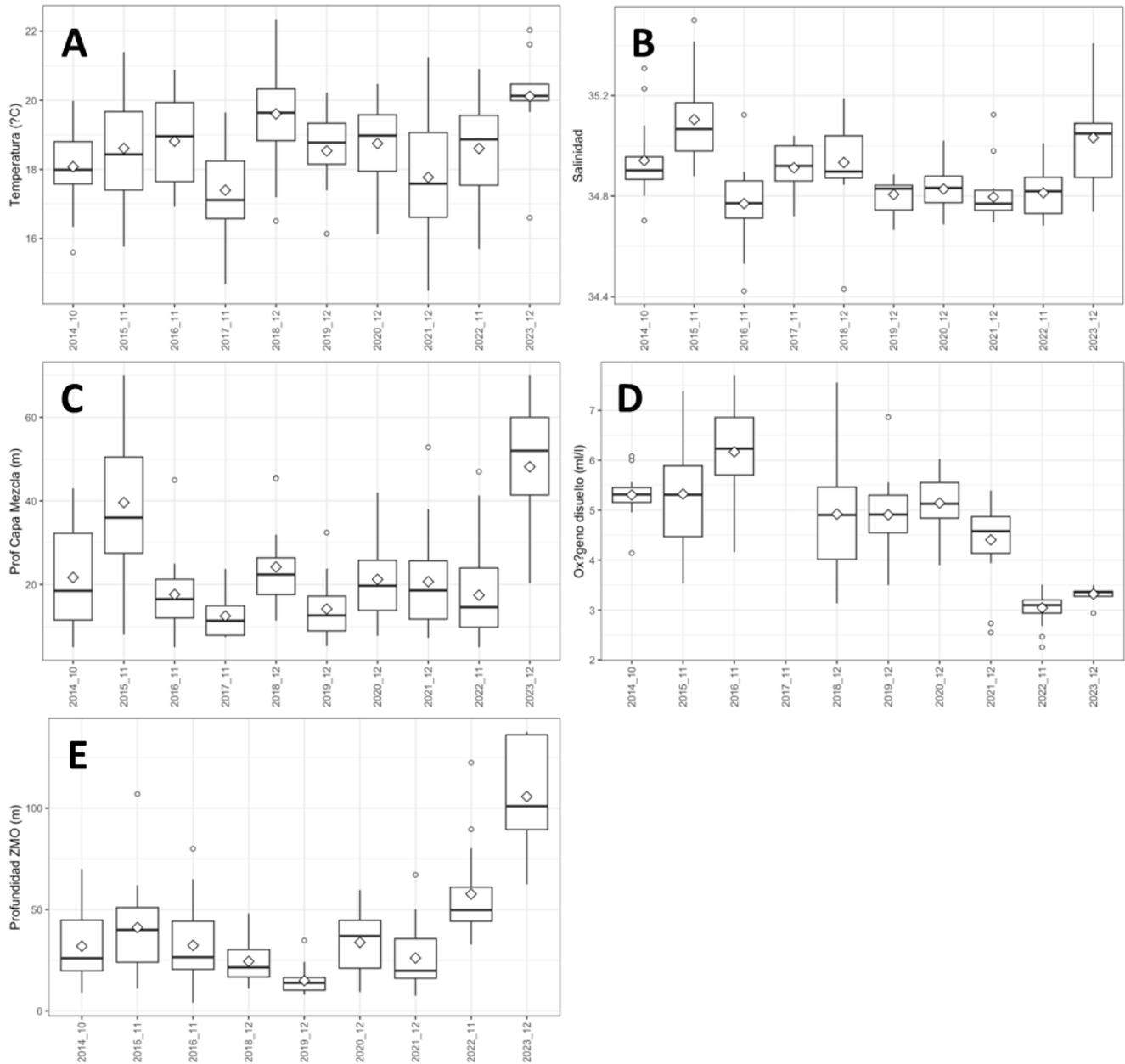


Figura 24. Gráficos de cajas y bigotes resultantes del análisis comparativo global entre la información de A: temperatura (°C), B: salinidad (ups), C: profundidad de la capa de mezcla (m), D: oxígeno disuelto (mL O₂/L) y E: profundidad del límite superior de la ZMO (m), registrada durante las primaveras de 2014 a 2023.

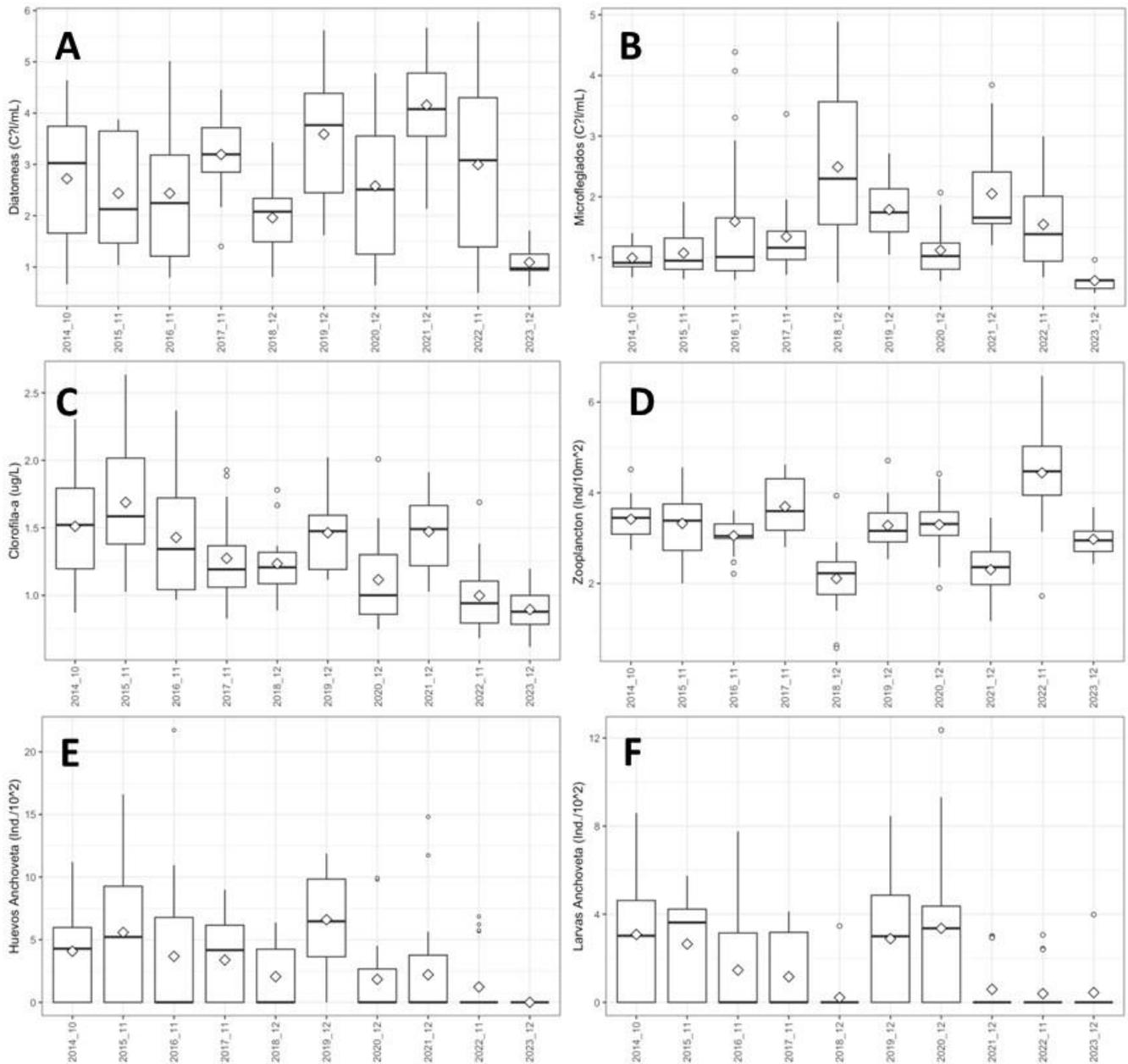


Figura 25. Gráficos de cajas y bigotes resultantes del análisis comparativo global entre la información de A: abundancia de diatomeas (cél/mL), B: abundancia de microflagelados (cél/mL), C: biomasa fitoplanctónica ($\mu\text{g Cl-a/L}$) y D: abundancia de zooplancton ($\text{N}^\circ/10 \text{ m}^2$), E: abundancia de huevos de anchoveta ($\text{N}^\circ/10 \text{ m}^2$) y F: abundancia de larvas de anchoveta ($\text{N}^\circ/10 \text{ m}^2$), registrada durante las primaveras de 2014 a 2023.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El sistema se encontró bajo una condición cálida, observándose una mayor extensión de las aguas con temperaturas superiores a 20°C, las que habitualmente ocupan la franja de las 20 y 40 mn y que esta vez dominaron la región a las 10 mn de la costa. De igual manera la salinidad mostró el dominio del ASS en la zona, aunque a las 10 mn se registró la presencia de salinidades que evidenciaron la influencia del ASAA y del AESS, especialmente en Mejillones (23°00'S), como una señal de la ocurrencia de eventos de surgencia. Al respecto, los valores del transporte Ekman, tanto en Chucumata (20°30'S) como en Mejillones (23°00'S), revelaron un activo afloramiento, con magnitudes que superaron los 1.000 m³/s/km durante los días previos y de realización del muestreo, lo que es propio de la época considerando que en la región los procesos se intensifican durante la primavera y el verano. No obstante, y tal como se observó en el otoño y en el invierno de 2023, el comportamiento de algunas variables proxy, como la profundidad de localización de la isoterma de 15°C y del límite superior de la ZMO, que promediaron los 50 y 100 m respectivamente, sugieren que los eventos de surgencia no tuvieron una importante influencia en los estratos superficiales. Sólo en punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S), restringidas a las 10 mn de la costa, se registraron cerca de los 20 m de profundidad, asociadas al ascenso de aguas más frías, menos salinas y de menor contenido de oxígeno disuelto.

Comparativamente, esta ha resultado ser la primavera con la mayor temperatura de la serie, y la salinidad alcanzó las magnitudes registradas en 2016, cuando el sistema enfrentó la presencia de El Niño 2015-2016, de igual manera, la profundidad de la capa de mezcla y el límite superior de la ZMO, se localizaron a mayor profundidad.

Respecto del componente biológico, tanto el fitoplancton como el zooplancton y los huevos y larvas de anchoveta mostraron las menores abundancias en comparación al periodo 2014-2022. Si bien este descenso puede ser la respuesta de las comunidades biológicas a la presencia de la anomalía cálida, se debe considerar que durante este crucero se excluyeron del muestreo las localidades de Arica (18°25'S) y punta Madrid (19°00'S), además de todas las estaciones ubicadas en la franja entre 1 y 5 mn de la costa, sector en el cual se concentran los componentes planctónicos asociados al escenario impuesto por los eventos de surgencia, en particular, en aquellos sitios descritos como lugares de desove y retención de los estadios tempranos de anchoveta. No obstante, dentro del componente fitoplanctónico se mantuvo el característico dominio de las diatomeas, quienes fueron responsables de los mayores valores de biomasa registrados. De igual manera, el zooplancton exhibió la dominancia del grupo Copepoda y de la fracción de tamaño entre 0,25 y 0,75 mm, y a pesar de la baja densidad de larvas de anchoveta, su presencia coincidió con las mayores abundancias tanto de diatomeas como de flagelados, en el sector de punta Junín (19°40'S) y Mejillones (23°00'S) respectivamente, sugiriendo disponibilidad de alimento.

Las condiciones descritas revelaron la influencia del evento El Niño en la región. De acuerdo con lo que informó CIIFEN, en la primera semana de diciembre se observó la reducción de las temperaturas más cálidas de lo normal en las regiones El Niño 4, 3.4 y 1+2. Esta última tuvo una reducción de $-0,8^{\circ}\text{C}$, pero estos valores siguen siendo significativamente cálidos (Figura 26). El pronóstico del ENOS para el próximo trimestre (enero – marzo 2024) prevé mayores probabilidades de condiciones El Niño, con una alta posibilidad de que se mantengan por lo menos hasta abril de 2024. No obstante, los modelos indican una tendencia a la reducción de las anomalías cálidas en la región El Niño 1+2.

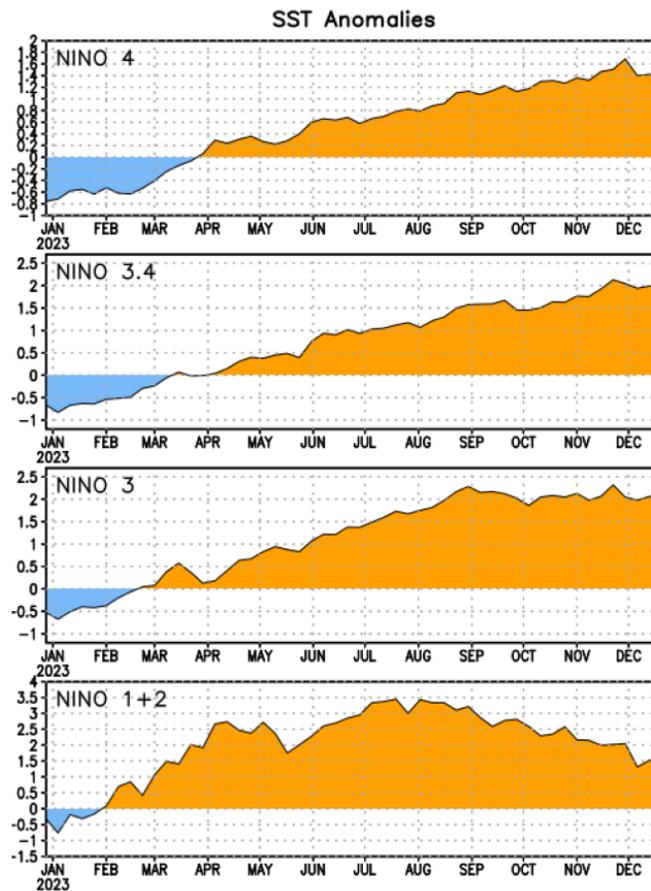


Figura 26. Anomalías de la Temperatura Superficial del Mar ($^{\circ}\text{C}$) en las regiones El Niño entre enero y el 26 de diciembre de 2023 (fuente: www.cpc.ncep.noaa.gov).

LITERATURA CITADA

Boletín CIIFEN El Niño/La Niña en América Latina diciembre de 2023. www.ciifen.org.

Bowden KF. 1983. Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood Series on Marine Science. John Wiley & Sons, New York, 302 pp.

ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions. Update prepared by: Climate Prediction Center/NCEP 26 December 2023. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>.

Grosjean P, M Picheral, C Warembourg & G Gorsky. 2004. Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. ICES Journal Marine Science, 61: 518-525.

Hasle G. 1969. An Analysis of Phytoplankton of the Pacific Southern Ocean: Abundance, Composition and Distribution during the Brategg Expedition, 1947-1948. Hvalradets skrifter, 52: 1-168.

Horwood J & R Driver. 1970. A note on a theoretical subsampling distribution of Macroplankton. J. Cons. Int. Explor. Mar., 36(3):274-276 pp.

Parsons TR, Y Maita & CM Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. 173 pp.

Schlitzer, R. 2022. Ocean Data View, <http://odv.awi.de>.

Smith PE & SL Richardson. 1979. Técnicas estándar para prospecciones de huevos y larvas de peces pelágicos. FAO, Doc. Téc. Pesca, (175): 107 pp.

UNESCO. 1978. Phytoplankton Manual. A Sournia (Ed.). Monogr. Oceanogr. Methodology, 6, 337 pp.

Villafañe VE & FMH Reid. 1995. Métodos de microscopía para la cuantificación del fitoplancton. En: Manual de Métodos Ficológicos. K Alveal, ME Ferrario, EC Oliveira y E Sar (eds.). Universidad de Concepción, Concepción. 169-185 pp.