

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

VALIDACIÓN DEL USO DE ACÚSTICA MULTIFRECUENCIA COMO
COMPLEMENTO A LA CUANTIFICACIÓN DE ZOOPLANCTON MARINO EN LA
COSTA DEL NORTE DE CHILE (18°S - 23°S)

Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Por

María Carolina Zúñiga Astudillo

Valparaíso, 2017

Comisión de Titulación

Profesor Guía: Dr. Sergio Palma González _____

Profesor: Dr. Antonio Canepa Oneto _____

Profesor: Francisco Leiva Dietz _____

AUTORIZACIÓN DE USO

Al presentar este Trabajo de Titulación como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este documento sólo con fines académicos.

María Carolina Zúñiga Astudillo

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) por su acogida durante el proceso del trabajo de titulación.

Al profesor Dr. Sergio Palma por haber aceptado ser mi profesor guía y apoyarme durante el desarrollo de este trabajo.

A Francisco Leiva y Antonio Canepa por aceptar ser parte de mi Comisión y apoyarme durante el proceso de este trabajo.

Al proyecto “Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas en la XV y II región” efectuado entre el 16 de octubre y 1 de noviembre de 2015, cuya ejecución permitió el desarrollo de esta investigación.

Al personal y tripulación del buque Abate Molina, que gracias a ellos se obtuvieron los datos y muestras para el desarrollo de este trabajo.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional durante todo mi proceso académico.

A Carlos Pineda, un pilar fundamental en mi vida y en todo este proceso.

A mis cuatro amores perrunos por todo su amor incondicional.

INDICE

Comisión de Titulación.....	ii
AUTORIZACIÓN DE USO	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	5
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Área de estudio	7
Obtención de los datos oceanográficos.....	8
Análisis de la biomasa zooplanctónica	9
Información acústica para clasificar los organismos zooplantónicos	10
Análisis estadístico	13
RESULTADOS	14
Distribución vertical de las características oceanográficas.....	14
Distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica	15
Análisis de componentes principales.....	27
Análisis estadístico	28
DISCUSIÓN	29
Condiciones oceanográficas	29
Distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica	31
Métodos de estimación de biomasa	33
CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS.....	36
ANEXOS	43

RESUMEN

Se realizó un estudio de la biomasa zooplanctónica, mediante tres métodos: manual, programa zooimage y acústica bifrecuencia en la zona comprendida entre 18°S y 23°S. Se determinó la distribución vertical de las características oceanográficas y la distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica. La clorofila-*a* se relacionó positivamente con las estaciones costeras, mientras que la biomasa presentó una relación positiva con el oxígeno disuelto y la temperatura. Entre ambos estratos (10-25 y 25-50 m) los valores para el método manual fluctuaron entre 8,56 y 1994 mL 1000 m⁻³, para el análisis con software zooimage fluctuaron entre 0,46 y 7655 mL 1000 m⁻³ y para el método acústico fluctuaron entre 754 y 12737518 mL 1000 m⁻³. Se observó una clara sobre-estimación de los datos de acústica, con respecto a los otros dos métodos empleados, los que se asociaron a elementos ajenos a zooplancton (sólidos en suspensión, basura etc.). El test estadístico empleado indicó diferencias significativas entre el método acústico y manual, acústico y zooimage y los tres métodos antes mencionados. Por lo tanto mientras no se mejoren los métodos de estimación, mediante zooimage y acústica se recomienda continuar con el método tradicional de la estimación de biomasa zooplanctónica.

ABSTRACT

A study of zooplankton biomass was carried out using three methods: manual, zooimage software and bifrequency acoustic in the area between 18°-23°. The vertical distribution of oceanographic characteristics and the horizontal distribution of zooplanktonic biomass were determined. Chlorophyll-*a* was positively related to coastal stations, while biomass was positively related to dissolved oxygen and temperature. The values for the manual method ranged from 8.56 to 1994 mL 1000 m⁻³ for both strata (10-25 and 25-50 m) for analysis with zooimage software ranging from 0.46 to 7655 mL 1000 m⁻³ And for the acoustic method they fluctuated between 754 and 12737518 mL 1000 m⁻³. A clear overestimation of the acoustic data was observed, with respect to the other two methods

used, which were associated with elements other than zooplankton (suspended solids, litter, etc.). The statistical test employed indicated significant differences between acoustic and manual, acoustic and zoimage methods and the three methods mentioned above. Therefore as long as the estimation methods are not improved, by means of zoimage and acoustic it is recommended to continue with the traditional method of zooplankton biomass estimation.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) se caracteriza por ser un ecosistema marino con alta productividad biológica, con valores de $\sim 2200 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y valores cercanos a $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en captura de peces, mientras que en un sistema similar, como California tiene valores de productividad primaria de $1300 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Chávez *et al.*, 2008).

La alta productividad biológica de la zona se desarrolla en una estrecha banda a lo largo de la costa, ya que la zona norte de Chile se caracteriza por presentar una costa rectilínea, con una plataforma continental estrecha (Fonseca & Farías, 1987), que permite que el viento en dirección al Ecuador esté presente durante casi todo el año permitiendo que los procesos de surgencia costera se desarrollen frecuentemente, particularmente en primavera y verano (Hormazábal *et al.*, 2001).

Además, la alta productividad biológica se ve favorecida por eventos de surgencia costera y el ascenso de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) que se caracteriza por baja temperatura, bajo contenido de oxígeno disuelto y alta concentración de nutrientes (Silva *et al.*, 2009). También en esta zona, interactúa el Agua Subtropical (AST), que se caracteriza por altas temperaturas y altos valores de salinidad, el Agua Subantártica (ASA) con temperaturas moderadas y salinidad relativamente baja, y el Agua Intermedia Antártica (AIA) con bajos valores de salinidad y bajas temperaturas, que se encuentra a profundidades $>700 \text{ m}$ (Silva *et al.*, 2009). El ascenso del AESS, mediante los eventos surgencia costera, se encuentran asociados a la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), con valores $<1 \text{ mL L}^{-1}$, cercana a los 100 m de profundidad, produciendo limitaciones a la migración vertical de numerosas especies zooplanctónicas (Apablaza & Palma, 2006).

Este ecosistema se caracteriza por una cadena trófica corta (Medina *et al.*, 2007) con el fitoplancton como productor primario y el zooplancton ubicado en el segundo nivel trófico, debido a su depredación sobre el fitoplancton. Luego se ubican los peces pelágicos (sardina y anchoveta) consumidores de zooplancton y finalmente los peces carnívoros (caballa y jurel). La biomasa zooplanctónica (BZ) suele ser muy alta en esta zona

alcanzando valores de 87.318 ton km⁻² anuales (Medina *et al.*, 2007). Por lo tanto el zooplancton juega un rol crucial en los ciclos biogeoquímicos de los océanos ya que canaliza el carbono fijado por el fitoplancton y lo transfiere a los siguientes niveles tróficos (Escribano & Castro, 2004).

Los organismos zooplanctónicos son de variada forma y consistencia, se pueden encontrar en distintos niveles tróficos entre sí. Sin embargo, existen algunas especies denominadas especies claves, que debido a su alta abundancia controlan la mayor parte de la producción primaria y secundaria. Entre los organismos filtradores más numerosos y diversos se encuentran copépodos, eufáusidos, larvas de crustáceos decápodos, salpas y apendicularias, mientras que entre los organismos carnívoros se encuentran quetognatos, medusas, sifonóforos, anfípodos y ctenóforos que también podrían considerarse dentro del grupo de especies claves (Palma & Apablaza, 2004).

Los métodos tradicionales para la obtención de información cuantitativa de zooplancton han sido el muestreo mediante uso de redes WP-2, Bongo y Multinet principalmente. Sin embargo, es posible obtener información de zooplancton a través de prospecciones acústicas (Greenlaw, 1979), que también se han utilizado históricamente para evaluar poblaciones de peces, donde la presencia de zooplancton es considerado como ruido y por lo tanto, ha sido eliminada (Ballón *et al.*, 2011).

La evaluación acústica para estimar biomasa de peces permite una recolección simultánea de datos cuantitativos y cualitativos de diversas comunidades en el ecosistema, que van desde el zooplancton hasta peces depredadores. Si este registro de datos acústicos se realiza en las frecuencias de 38 khz y 120 khz es posible distinguir el macrozooplancton (Greenlaw, 1979). Este método se basa principalmente en considerar al zooplancton como un objeto acústico, cuya energía incidente es dispersada generando una onda secundaria que se propaga en todas direcciones. La energía reflejada de regreso a la fuente de sonido se dice que está retrodispersada y su intensidad representa una función compleja del tamaño y forma de los organismos (Greenlaw, 1979).

Si se conoce la proporción de la energía incidente que es retrodispersada por un solo organismo, es posible estimar la abundancia de un conjunto de organismos que tengan características similares, como tamaño, forma y consistencia. De esta manera se utiliza un método alternativo, no invasivo, para la estimación de zooplancton marino (Greenlaw, 1975). Actualmente, se reconocen tres grandes categorías para clasificar al plancton según sus características acústicas.

- a) “Fluid-like” (como fluidos ó FL), por ejemplo eufáusidos y camarones, cuyo cuerpo es aproximadamente cilíndrico, con el largo del cuerpo más extenso que su grosor, con tejido blando, poco dispersante del sonido. El cuerpo entero contribuye a formar el eco.
- b) “Hard elastic shelled” (caparazón dura y elástica ó ES), por ejemplo gasterópodos. Poseen un tejido blando rodeado por una cubierta dura excepto un agujero pequeño (la abertura opercular). Pueden tener apéndices suaves externos. El eco proviene de los órganos externos duros.
- c) “Gas-bearing” (que contienen gas ó GB), por ejemplo algunos sifonóforos tienen un cuerpo gelatinoso que en su extremo superior tiene un flotador con una burbuja de gas. La burbuja produce un eco fuerte, pero la contribución del cuerpo también puede ser importante si la relación entre el volumen “cuerpo/gas” es pequeña.

Cada uno de estos tres grupos de zooplancton es detectable en un rango diferente de frecuencias. Los ‘ES’ presentan un patrón muy uniforme, donde el coeficiente de dispersión (σ) aumenta con la frecuencia. Los ‘FL’ aumentan su σ hasta cierto punto donde el patrón se vuelve caótico hasta que se estabiliza. Los ‘GB’ aumentan su σ hasta cierta frecuencia para luego descender y estabilizarse aunque el espectro de frecuencias es variable según el grupo analizado (Fig. 1) (Ballón *et al.*, 2011)

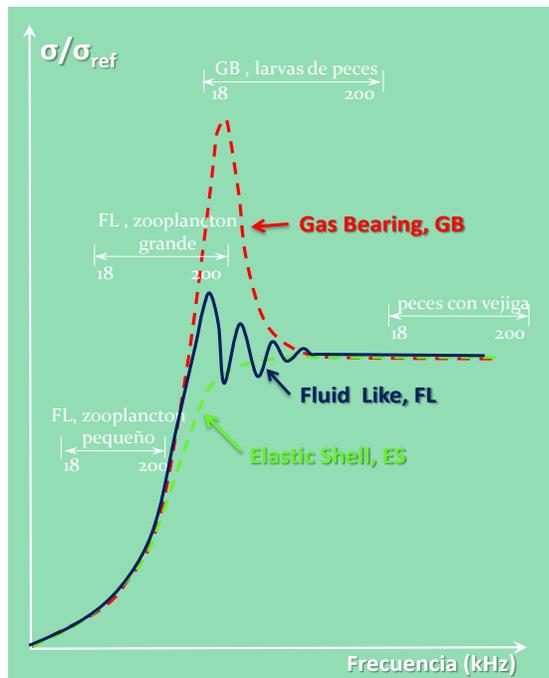


Figura 1. Respuesta acústica de peces y distintos grupos de zooplancton (Ballón, 2010)

Estas diferencias son utilizadas para separar unos grupos de otros cuando se aplican análisis acústicos de multifrecuencia. Para ello se requiere contar con ecogramas digitales de al menos dos frecuencias y un software especializado.

Actualmente, el grupo de Evaluaciones Directas del Instituto de Fomento Pesquero se encuentra implementando la utilización de la multifrecuencia para ser aplicada en la estimación de la biomasa zooplantónica en aguas chilenas. Estos algoritmos ya fueron validados frente a la costa de Perú (Ballón *et al.*, 2011), sin embargo no existen antecedentes para zooplancton de aguas chilenas.

HIPÓTESIS

El método de acústica multifrecuencia es válido como método alternativo para la estimación de la biomasa zooplanctónica, siempre que exista alta correlación entre las estimaciones de biomasa mediante métodos acústicos y métodos tradicionales de muestreo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Validar el uso de acústica multifrecuencia como herramienta complementaria al muestreo de biomasa zooplanctónica, evaluando el grado de asociación entre las muestras de zooplancton obtenidas mediante prospecciones acústicas y redes estratificadas frente a la zona norte de Chile, entre Arica y Antofagasta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar las condiciones oceanográficas de la zona de estudio.
- b) Caracterizar la distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica entre Arica y Antofagasta mediante bureta de autoenrrace (manual), procesamiento de imágenes (programa Zooimage) y acústica multifrecuencia.
- c) Relacionar las características oceanográficas con las variaciones de la biomasa zooplanctónica.
- d) Comparar los resultados de biomasa zooplanctónica obtenidos por los algoritmos multifrecuencia, aquellos obtenidos mediante arrastres estratificados de redes de zooplancton y los obtenidos mediante el programa zooimage.
- e) Evaluar si la acústica multifrecuencia puede ser utilizada para reemplazar la determinación de biomasa zooplanctónica complementando los resultados con muestreos de redes de zooplancton.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio abarcó desde Arica a Antofagasta, Chile ($18^{\circ}23'S$ - $23^{\circ}58'S$, Fig. 2), donde se desarrolló un crucero oceanográfico con el B/C Abate Molina en el marco del proyecto “Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas entre la XV y II Regiones” (MOBIO) entre el 16 de octubre y el 1 de noviembre del año 2015. En esta zona se efectuaron cinco transectas (T) latitudinales, con estaciones localizadas a 1, 5, 10, 20, 30, 40, 55, 70, 85 y 100 mn de la costa, exceptuando la Transecta 1, cuyo límite oceánico fue hasta 70 mn, y seis intertransectas (IT) longitudinales cuatro de ellas a 1 mn y dos de ellas a

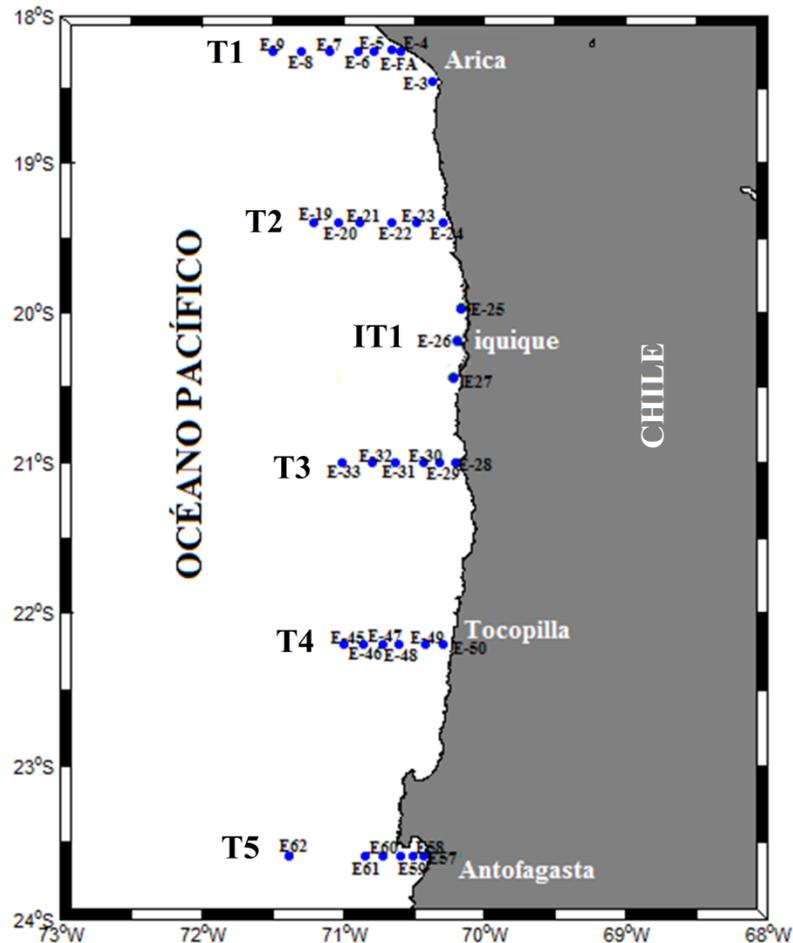


Figura 2. Estaciones de muestreo de zooplancton entre Arica y Antofagasta. T: Transectas, IT: Intertransecta.

100 mn de distancia de la costa. Además, se analizaron tres estaciones costeras de vigilancia localizadas a 2 mn de distancia frente Arica (E-FA, 18°23'S, 70°65'W), Iquique (E-FI, 20°11'S, 70°21'W) y Antofagasta (E-FM, 23°01'S, 70°31'W) constituyendo un total de 69 estaciones oceanográficas. Para este trabajo se consideró solamente las estaciones correspondientes a las transectas latitudinales y una intertransecta.

Tabla 1. Información para cada transecta en 2015

Transecta/intertransecta	Estación	Latitud	Longitud
Transecta 1 (T1)	E-4 a E-11	18°25'S	70°58'-71°95'W
Transecta 2 (T2)	E-15 a E-24	19°40'S	72°13'-70°28'W
Transecta 3 (T3)	E-28 a E-37	21°00'S	70°20'-71°97'W
Transecta 4 (T4)	E-41 a E-50	22°20'S	71°97'-70°29'W
Transecta 5 (T5)	E-54 a E- 63	23°58'S	70°43'-72°20'W
Intertransecta 1 (IT1)	E-25 a E-27	20°05'20°40'S	70°08'-70°18'W

Obtención de los datos oceanográficos

En cada una de las estaciones de muestreo se obtuvo registros verticales de temperatura (°C), salinidad, oxígeno disuelto (mL L^{-1}) y fluorescencia (Volt) hasta una profundidad máxima de 500 m, mediante un perfilador continuo CTD, Sea Bird, SBE 911 operado en tiempo real. Adicionalmente, se utilizó un sistema de muestro vertical con una Roseta Sea Bird, equipado con 12 botellas Niskin con capacidad de 5 L, para obtener muestras de agua de mar a profundidades estándares de 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 500 m para análisis de clorofila-*a* y oxígeno disuelto. En el caso de la clorofila-*a* solo se tomaron muestras a 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75 y 100 m que fueron filtradas *in situ* con un sistema de filtrado múltiple, con filtros de fibra de vidrio (MFS, GF/75) de 25 mm de diámetro y tamaño de poro de 0,7 μm , filtrándose un volumen estandarizado de 50 mL y luego los filtros se almacenaron en nitrógeno líquido. El análisis de estas muestras se efectuó en el laboratorio húmedo de IFOP de forma pasiva con una solución acuosa de acetona al 90% v/v durante 24 h y a -20°C aproximadamente. La lectura de las muestras se realizó

mediante la técnica fluorimétrica a baja luminosidad con y sin acidificación siguiendo lo señalado por Parsons *et al.* (1984). Se utilizó un fluorómetro digital Turner Designs, modelo 10AU calibrado con una muestra estándar pura de clorofila-*a* de Sigma Chemicals.

La información del CTD, se procesó siguiendo el procedimiento estándar recomendado por el fabricante (Seabird). Los datos de CTD fueron promediados cada 1 m de profundidad y se mostraron mediante transectas perpendiculares a la costa. Además, se elaboraron perfiles verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila-*a*, para cada una de las transectas mediante el programa Ocean Data View 4, para la caracterización en las condiciones oceanográficas en la zona de estudio.

Análisis de la biomasa zooplanctónica

En cada una de las estaciones oceanográficas, se efectuó un muestreo vertical estratificado mediante una red WP-2 con sistema de cierre, realizado en tres estratos de profundidad: 0-10, 10-25 y 25-50 m las muestras se fijaron con formalina al 5% neutralizada con tetraborato de sodio. Para este estudio, sólo se consideraron los estratos de 10-25 y 25-50 m.

Una vez en el laboratorio, las muestras zooplanctónicas fueron sometidas al análisis de biomasa de acuerdo al método volumétrico indicado Postel *et al.* (2000), mediante un aforo calibrado a un volumen determinado y una bureta de autoenrase (error $\pm 0,05$ mL). La muestra de zooplancton se depositó en el aforo y luego se agregó agua con una bureta; este procedimiento se realizó dos veces por muestra y se registró el volumen utilizado en cada caso, promediando ambos valores para obtener un valor final. Posteriormente, las muestras fueron separadas con un submuestreador Folsom para obtener una alícuota representativa, luego la alícuota fue contabilizada según el grupo taxonómico correspondiente y se registró en una planilla Excel. Posteriormente, la alícuota fue teñida con rosa de Bengala al 1% por 1 h aproximadamente y luego se escaneó a 800 dpi para obtener el registro digital de cada alícuota.

Con cada imagen registrada se hizo el conteo digital mediante el programa Zooimage 1.2-0, utilizando una planilla Excel con cada estación, volumen de agua filtrado, alícuota y alícuota Zooimage (1/alícuota). Este programa permite tener una cuantificación de zooplancton ya sea por grupo taxonómico o por biomasa, a través de la forma y tamaño, midiendo el diámetro circular (en mm) de cada uno de los organismos, asociándolos a una esfera.

Información acústica para clasificar los organismos zooplanctónicos

El muestreo acústico fue grabado mediante la ecosonda científica Simrad EK 60, donde se tomaron grabaciones acústicas a cuatro frecuencias (18, 38, 120 y 200 kHz). El procesamiento de la información acústica, fue realizado por el ingeniero acústico Leonardo Parada, mediante el módulo de variables virtuales de Echoview 7.1 para ello se basó en el algoritmo desarrollado por Ballón *et al.* (2011) (Fig. 2), el que consistía en primera instancia eliminar el ruido de superficie, fondo y el asociado a la absorción acústica. Para este caso, solo se consideró dos frecuencias de retrodispersión 38 y 120 kHz, una vez obtenidos los ecogramas a dichas frecuencias, se procedió a sobreponer ambos ecogramas, sumando la fuerza media de retrodispersión de volumen (MVBS, en inglés, mean volumen backscatter), de esta manera se mejora el contraste entre peces y zooplancton, una vez sumado ambos ecogramas, se obtiene un dato 1 y un dato 2, el valor umbral de estas datas es de -135 dB.

Del dato 1 (> -135 dB) se hace la resta de los ecogramas 120 y 38 kHz, si el producto es < 2 el resultado se considera como “peces”, de lo contrario si el producto es > 2 el resultado es considerado como “no peces”. Para el presente estudio no se utilizó este filtro, ya que se consideró que no había peces.

Del dato 2 (< -135 dB) se realiza la misma resta, si el producto es > 0 , el resultado se considera como fluid like, de lo contrario es considerado blue-noise (ó ruido azul donde encierra todo aquello que no es fluid-like).

Para estimar el radio de la esfera, el número de organismos insonificados y posteriormente la biomasa de fluid like se aplicó el método basado en la diferencia de Sv (en inglés, volumen backscattering strength) entre frecuencias de Greenwal (1979) y posteriormente la determinación del radio de la esfera, utilizando el modelo de fluid-sphere de Johnson (1977), como lo indica:

$$(Ka)^4 = (2/3)*[(r^4 - R) / (r^2 - R) / (r^2(R - 1))]$$

Donde $k = 2\pi f/c$, a = radio de la esfera (en metros), c = velocidad del sonido (en m/s), asumiendo un valor 1509 m/s; $f_m = (f_{120} * f_{38})^{0.5}$ (en Hz), $r = f_{120}/f_{38}$ y $R = 10^{(Sv(120) - (Sv(38))/10)}$.

Así, la determinación de σ_{bs} (backscattering cross-section) de la esfera, se estima según Greenlaw (1979)

$$\sigma_{bs} = [(1-gh^2) / (3gh^2) + (1-g) / (1+2g)]^2 * a^2 * [2(ka)^4 / (2+3(ka)^4)]$$

Donde g es el contraste de densidad entre la esfera y entorno, h el contraste de velocidad. Es importante mencionar que Mitson *et al.* (1996) postuló que para obtener estimaciones más seguras, se debe trabajar entre 2 y 19 dB, ya que bajo 2 dB la estimación se sobreestima y sobre 19 dB, la estimación se subestima.

Para el cálculo de números de individuos por unidad de volumen (ind m^{-3}) se utilizó la siguiente ecuación:

$$Nf = 10^{(Sv(f) - TS)/10} \quad \text{donde } TS = 10 \log_{10}(\sigma_{bs})$$

Finalmente, el biovolumen de fluid-like se calculó multiplicando la densidad del organismo (ind m^{-3}) por el volumen (cm^3) de la esfera de radio a .

Historical bifrequency acoustic data

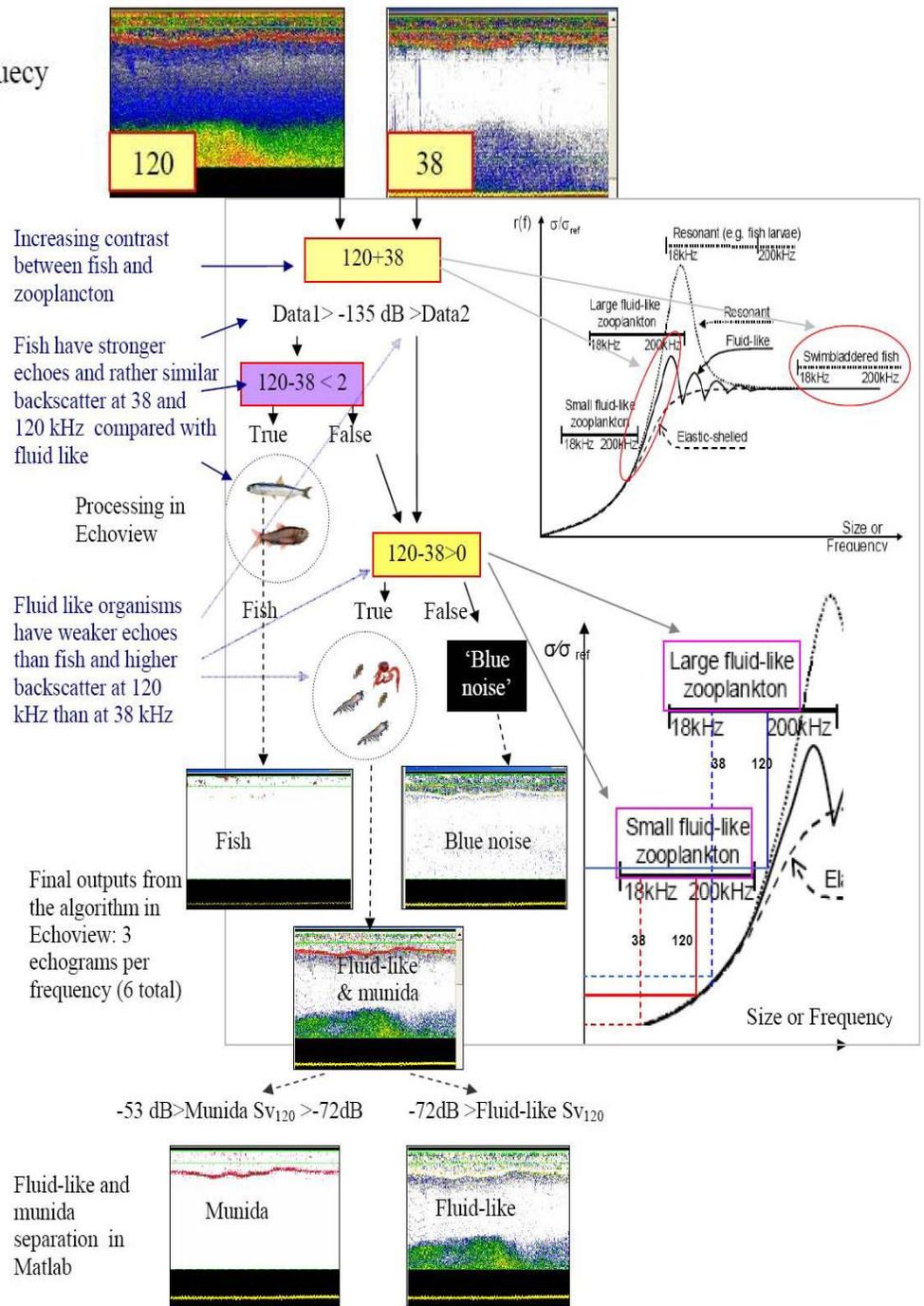


Figura 3. Algoritmo bifrecuencia implementado por Ballón *et al.* (2011).

Análisis estadístico

Se utilizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), para relacionar las variables ambientales y biológicas en las estaciones de estudio. El ACP se basa en tomar un conjunto de datos y transformarlos en un nuevo conjunto (componentes principales) que se encuentran correlacionados entre sí. Los datos se ordenan según la varianza y los componentes principales se expresan como una combinación lineal de las variables originales, este análisis permite representar los datos a lo largo de un número reducido de ejes ortogonales e identificar las principales tendencias de cada conjunto de datos (Pepin *et al.*, 2015), ubicando las variables ambientales y biológicas por separado.

Considerando la cantidad de datos de la columna de agua de cada estación, se utilizó la regla trapezoidal para integrar los parámetros ambientales descritos por Jolliffe (2002).

$$\sum ((a + b)/2) * (Z_2 - Z_1)) \dots + ((a + b)/2) * (Z_{(n+1)} - Z_n)) \quad \text{donde:}$$

- a y b es un mismo parámetro ambiental, pero a diferentes profundidades (*e.g.*, salinidad, temperatura, etc.).
- Z_2 y Z_1 profundidades respectivas de b y a.
- Z_n es el valor enésimo de la profundidad en la serie, con respecto a la variable ambiental.

Para determinar diferencias significativas entre los métodos de estimación de biomasa empleados y validar el método acústico se utilizó un análisis de Kruskal-Wallis con un 95% de confianza, mediante el programa Past 3.

Los gráficos de caja fueron realizados en el programa Past 3. Dada la diferencia en el orden de magnitud entre los datos obtenidos mediante el método acústico, manual y zooimage, solo para la graficación se utilizó la transformación en los datos de la forma: $\ln(x + 1)$ donde x corresponde a la biomasa zooplanctónica.

RESULTADOS

Distribución vertical de las características oceanográficas

Las distribución vertical de las características oceanográficas de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila-*a* para la T1, indicaron que los valores de temperatura fluctuaron entre 19°C en superficie y 8°C en profundidad. La salinidad presentó valores máximos en superficie de 35,2 y mínimos en profundidad de 34,6. Los valores de oxígeno disuelto fueron de 5,5 mL L⁻¹ en superficie, disminuyendo hasta 50 m de profundidad, luego determinaron valores de 0 mL L⁻¹ dando lugar a una ZMO, esta capa se determinó hasta 450 m, en todas las transectas. La clorofila-*a* presentó valores bastante bajos, del orden de 1 µg L⁻¹ desde la superficie hasta 50 m (Fig. 4).

Las características oceanográficas fueron similares para la T2, la temperatura y salinidad fluctuaron de 8 a 18°C y 34,6 a 35,2 respectivamente. El oxígeno disuelto presentó un máximo en superficie de 5 mL L⁻¹ y mínimos de 0 mL L⁻¹ cerca de 100 m de profundidad. La clorofila-*a* aumentó su valor máximo con respecto a la T1 del orden de 4 µg L⁻¹ y mínimos de 0 µg L⁻¹ (Fig. 5).

En la T3 se observó el mismo patrón de distribución respecto a las características oceanográficas, con valores que fluctuaron entre 8 y 18°C en temperatura, 34,6 y 35,2 en salinidad, 0 y 5,5 mL L⁻¹ en oxígeno disuelto y 0 y 6 µg L⁻¹ en clorofila-*a* (Fig. 6).

Las características oceanográficas para T4, indicaron en temperatura un máximo de 17°C en superficie y un mínimo de 8°C en profundidad. La salinidad en superficie fue de 34,9 y disminuyó a un mínimo de 34,6 en profundidad. El oxígeno disuelto presentó valores de 6 mL L⁻¹ y mínimos de 0 mL L⁻¹. La clorofila-*a*, en esta zona, presentó los mayores valores de todas las transectas con máximos sobre 13 µg L⁻¹ y mínimos de 0 µg L⁻¹ (Fig. 7).

Para la T5 la temperatura presentó máximos de 17°C y mínimos de 8°C. La salinidad presentó máximos de 34,9 en superficie y mínimos de 34,6 en profundidad. El oxígeno disuelto presentó máximos de 6 mL L⁻¹ y mínimos de 0 mL L⁻¹ en profundidad. Los valores

de clorofila-*a* fluctuaron entre 6 y 0 $\mu\text{g L}^{-1}$ en superficie y profundidad respectivamente (Fig. 8).

Las características oceanográficas de la IT1 presentaron valores de temperatura entre 14 y 16°C; salinidad entre 34,9 y 35; oxígeno disuelto entre 0 y 4 mL L^{-1} y clorofila-*a* entre 0 y 5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 9).

Distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica

La distribución horizontal de la biomasa de zooplancton en el estrato 10-25 m obtenida mediante el método manual, mostró en términos generales que la biomasa fue bastante baja, ya que en la mayoría de las estaciones se observaron valores $<500 \text{ mL } 1000 \text{ m}^{-3}$, con algunos focos de mayor biomasa en las estaciones 27 y 45, cuyo valores de biomasa fueron 1000 y 2000 $\text{mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ (Fig. 10a). Los valores de biomasa zooplanctónica obtenida mediante zooimage, se vieron claramente sobreestimados, con valores muy variables, con máximos costeros en el sector norte (Fig. 10b). La biomasa obtenida mediante el método acústico, mostró una notoria sobreestimación de los datos de biomasa con respecto a los obtenidos en los dos métodos anteriores, con valores $>2000 \text{ mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ en la mayoría de las estaciones, exceptuando la estación 29, donde la de biomasa fue de 1000-2000 $\text{mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ (Fig. 10c).

La Figura 12a representa los valores de biomasa zooplanctónica en el estrato 10-25 m obtenidos por el método manual y acústico mediante un gráfico de caja, mostró que el método manual presentó una distribución más acotada respecto al método acústico, la que se puede observar en los límites superiores e inferiores de cada caja. El método manual, presentó la mayoría de sus valores bajo la mediana, mientras que el método acústico presentó la mayoría de sus valores sobre la mediana. El valor mínimo para el método manual y acústico fue de 2, 88 y 7,29 (valores reales 17,93 y 1463 $\text{mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ respectivamente), mientras que los valores máximos fueron de 7,01 y 14,66 (valores reales 1115,42 y 2329573 $\text{mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ respectivamente).

La distribución horizontal de biomasa de zooplancton en el estrato 25-50 m. obtenida mediante el método manual, presentó bajos valores en términos generales y similar a la distribución observada en el estrato 10-25 (Fig. 10a) con valores máximos entre 1000 y 2000 mL 1000 m⁻³ en la estación 45. La biomasa obtenida mediante zooimage presentó una mayor variabilidad respecto el método manual, donde destacó la estación 45, con un valor >2000 mL 1000 m⁻³ (Fig.11b). Mientras que la biomasa obtenida mediante el método acústico mostró valores >2000 mL 1000 m⁻³, excepto en las estaciones 28 y 29 con valores en los rangos 1000-2000 y 500-1000 mL 1000 m⁻³ respectivamente (Fig. 11c).

Mientras que el método acústico presentó una mayor distribución de datos respecto al método manual, lo que se puede observar en los límites superiores e inferiores (Fig. 12b). Respecto a la mediana, el método manual presentó la mayoría de sus datos bajo la mediana, mientras que el método acústico tuvo la mayoría de sus valores sobre la mediana. Los valores mínimos para el método manual y acústico fue de 2,14 y 6,62 respectivamente (valores reales, 8,56 y 754, 46 mL 1000 m⁻³); mientras que los valores máximos para ambos métodos fueron de 7,59 en el método manual y 16,36 en el método acústico (valores reales 1994,36 y 12737518,49 mL 1000 m⁻³ respectivamente).

La Figura 12c representa la distribución de biomasa zooplanctónica para el método de zooimage y acústico mediante un gráfico de caja, que mostró que los datos obtenidos mediante el programa zooimage abarcó gran parte de los datos dentro de la caja, obteniendo límites superiores e inferiores pequeños, a diferencia de la distribución de los datos acústicos, donde se observó un límite superior e inferior mayor, indicando que la mayoría de los datos se encuentran dentro del primer y tercer cuartil. Respecto a la mediana de los datos, en el caso de los datos de zooimage, la mediana se observó bastante centrada, mientras que los datos acústicos presentó la mayoría de sus datos bajo la mediana, indicando que la mayoría de los datos estaban bajo el 50% de los datos. Los valores mínimos para los datos obtenidos mediante zooimage y el método acústico fueron 5,22 y 7,94 (valores reales 185,08 y 2821,73 mL 1000 m⁻³ respectivamente), mientras que los valores

máximos fueron de 8,60 para el método de zooimage y 11,80 para el método acústico (valores reales 5445,51 y 134276 mL 1000 m⁻³ respectivamente).

El estrato 25-50 (Fig. 12d) presentó una distribución bastante distinta respecto al estrato 10-25 m, con cajas pequeñas y límites superiores e inferiores mayores en los dos conjuntos de datos (zooimage y acústica), es decir la mayoría de los datos se encontraron fuera de los cuartiles 1 y 3 (Q1 y Q3).

Los valores mínimos para el método zooimage y acústico fueron de 5,23 y 8,088 (valores reales 187,65 y 3253,74 mL 1000m⁻³ respectivamente), mientras que los valores máximos fueron de 7,89 y 11,88 (valores reales 144304,98 mL 1000 m⁻³ respectivamente).

La Figura 12e, mostró el gráfico de caja para los tres métodos empleados en este estudio para el estrato 10-25 m, donde se observaron las diferencias entre las estimaciones de biomasa en los tres métodos, donde el método acústico presentó los valores mayores de estimación y el método manual los valores menores de estimación, existiendo una diferencia importante entre ellos. Los datos obtenidos mediante el programa zooimage, presentan una aparente coincidencia en algunos datos con el método manual y acústico. El método manual presentó gran parte de sus datos sobre la mediana y con un límite inferior pequeño, además presenta una distribución de datos pequeña. El método acústico, presentó una distribución de datos más amplia, con amplios límites superiores e inferiores, con la mayoría de los datos bajo la mediana. El método de zooimage presentó una distribución amplia, sin embargo los límites superiores e inferiores son pequeños, esto quiere decir que gran parte de sus datos están sobre el 25% (primer cuartil) y bajo el 75% (tercer cuartil).

El estrato 25-50 m (Fig. 12f) mostró que en los tres casos hubo una gran distribución de los datos, ya que en los tres métodos se observaron amplios límites superiores e inferiores, excepto el método manual, cuyo límite inferior fue bastante pequeño, esto indica que la mayoría de los datos se encontró fuera del primer y tercer cuartil. El método manual presentó la mayoría de sus datos sobre la mediana, el método de zooimage, presentó poco más de la mitad de los datos sobre la mediana, mientras que el método acústico, presentó poco más de la mitad de sus datos bajo la mediana.

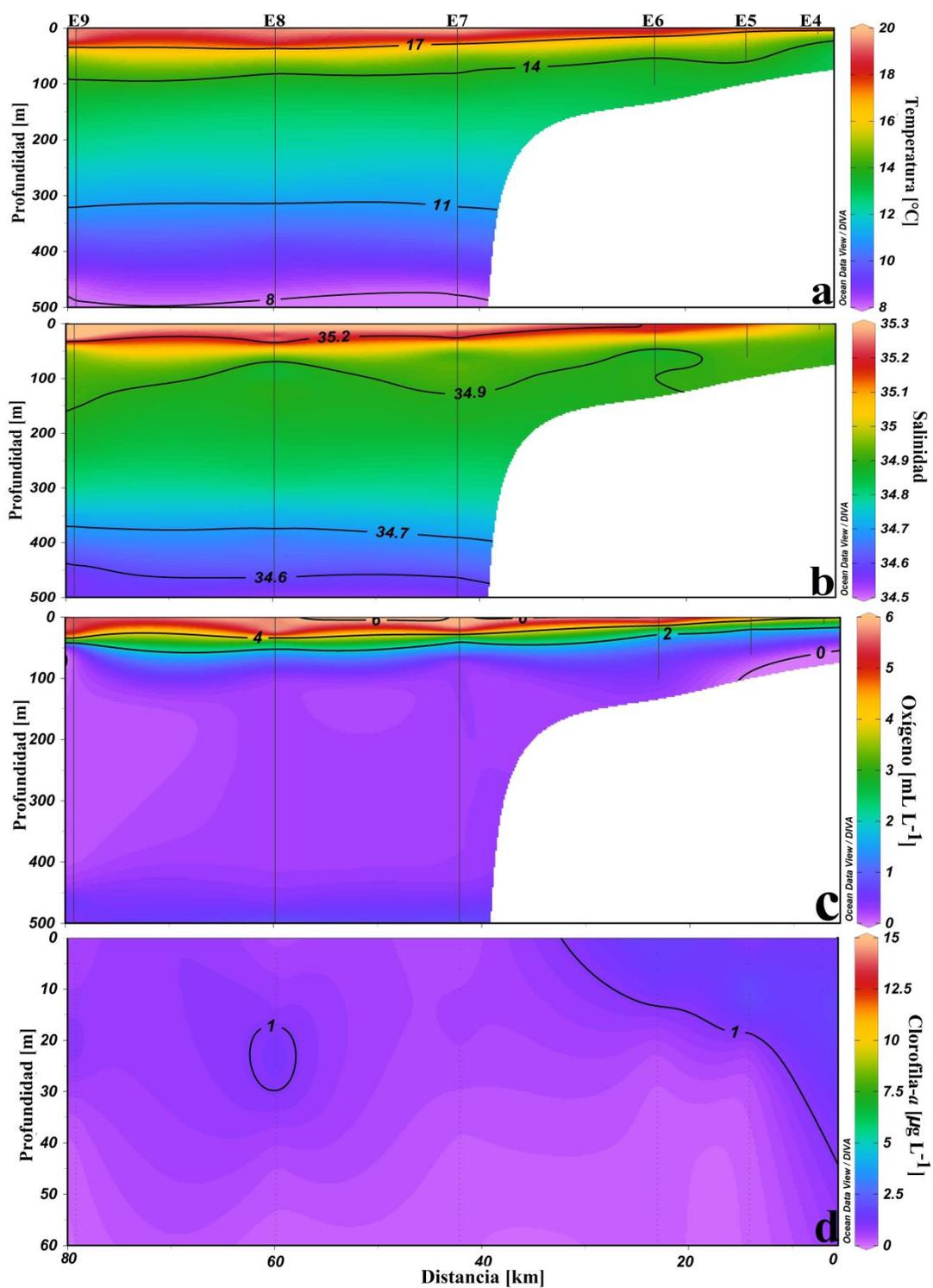


Figura 4. Distribución vertical de las características oceanográficas en la T1. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-*a*.

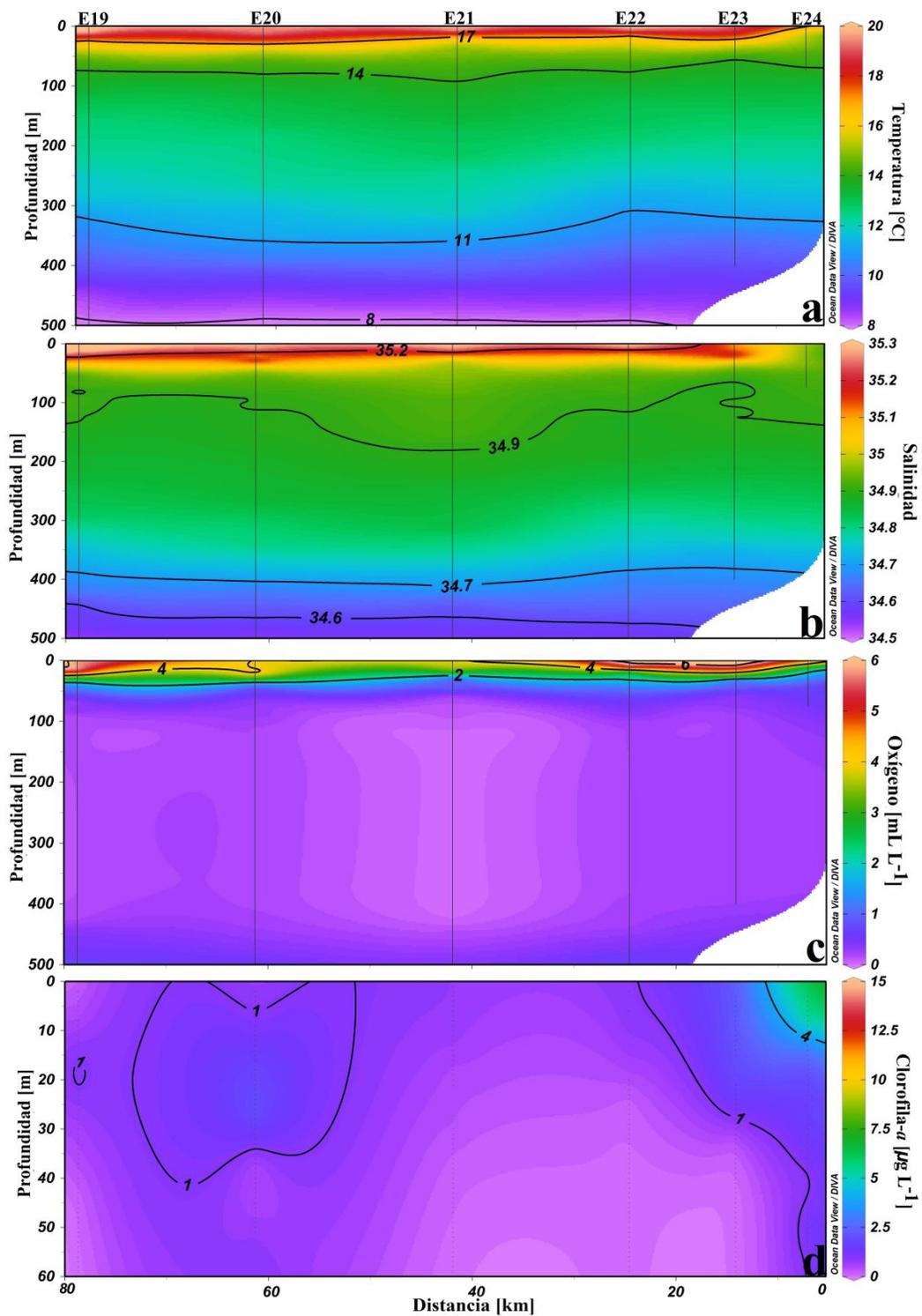


Figura 5. Distribución vertical de las características oceanográficas en la T2. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-a.

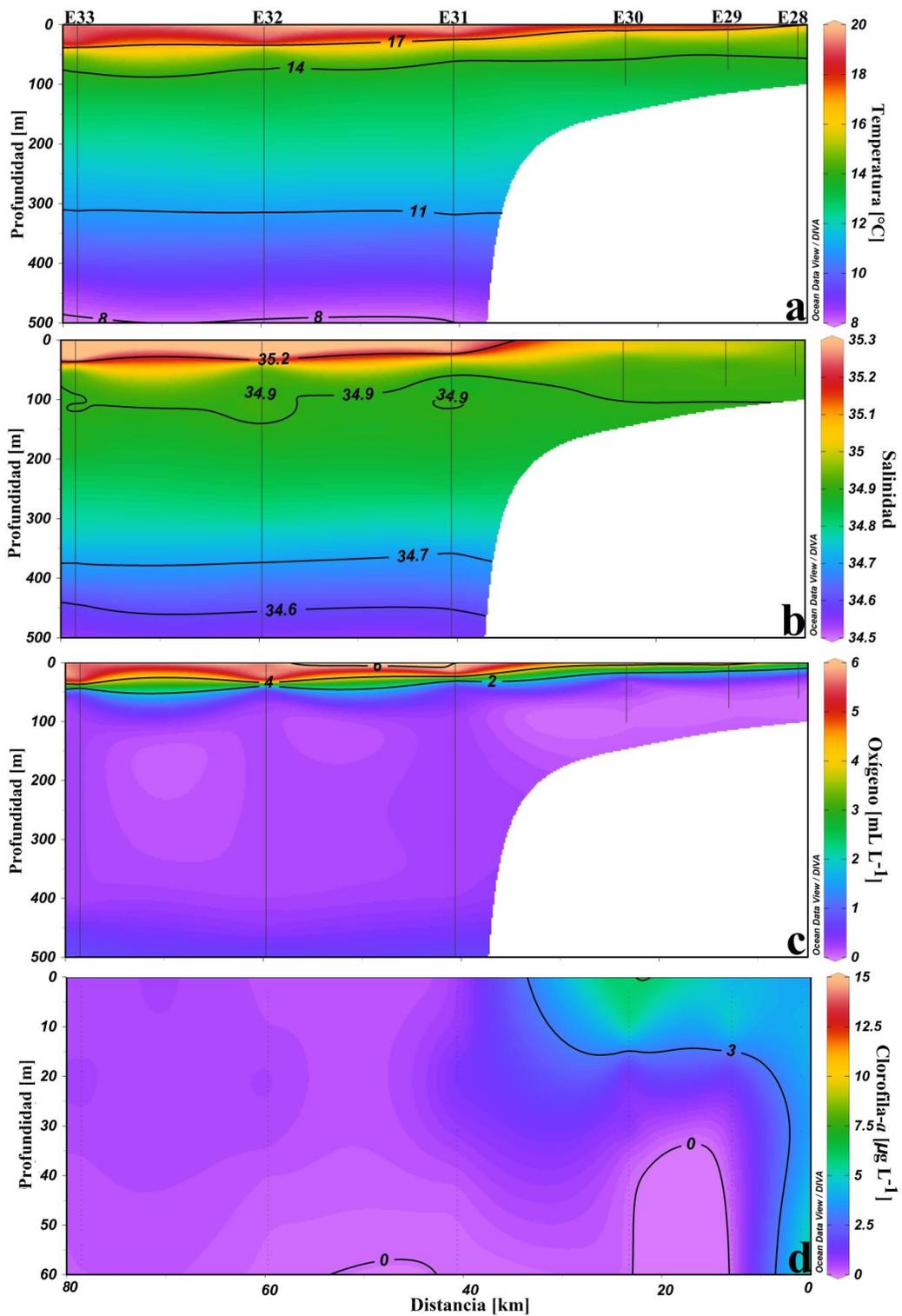


Figura 6. Distribución vertical de las características oceanográficas en la T3. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-a.

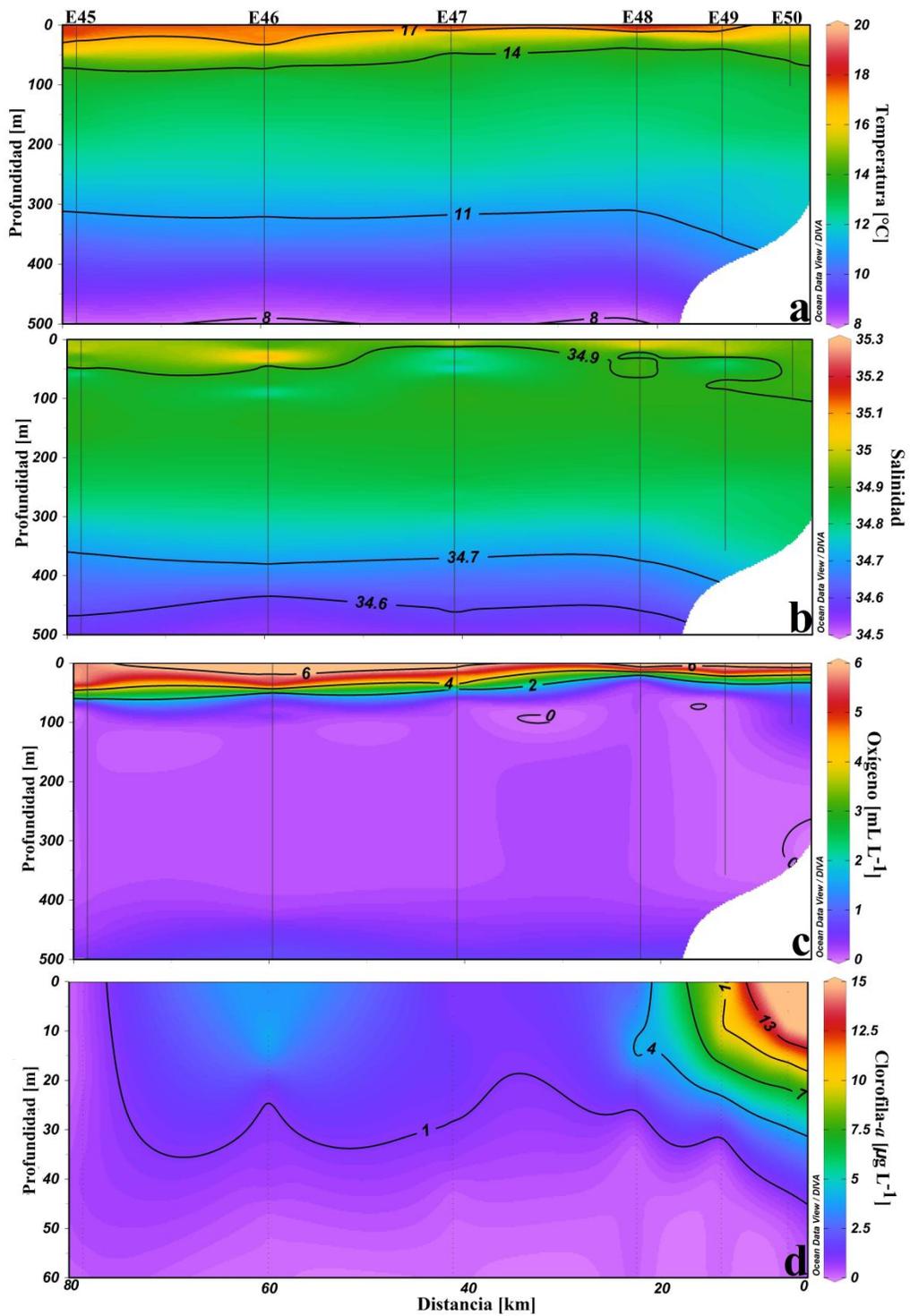


Figura 7. Distribución vertical de las características oceanográficas en la T4. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-a.

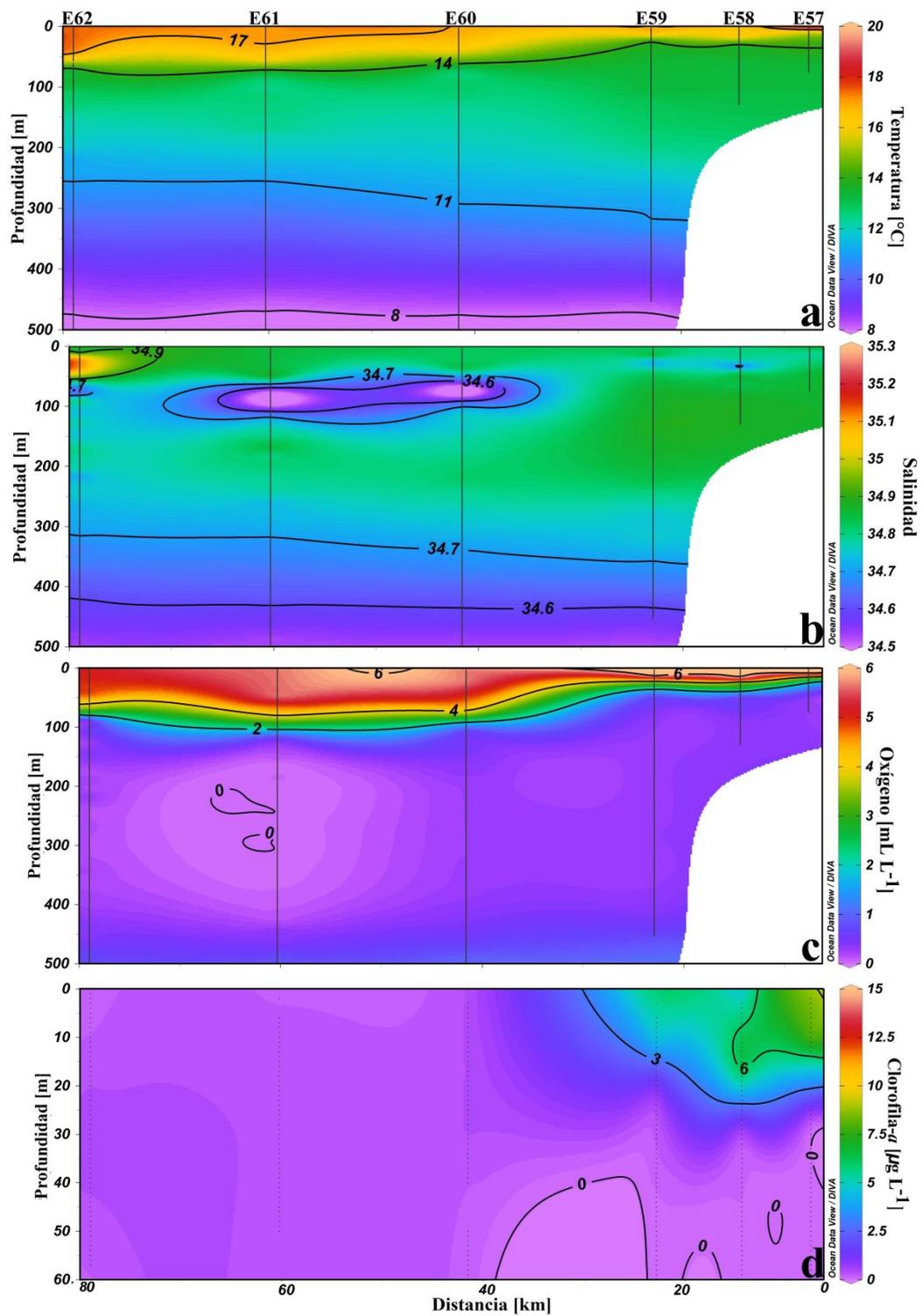


Figura 8. Distribución vertical de las características oceanográficas en la T5. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-a.

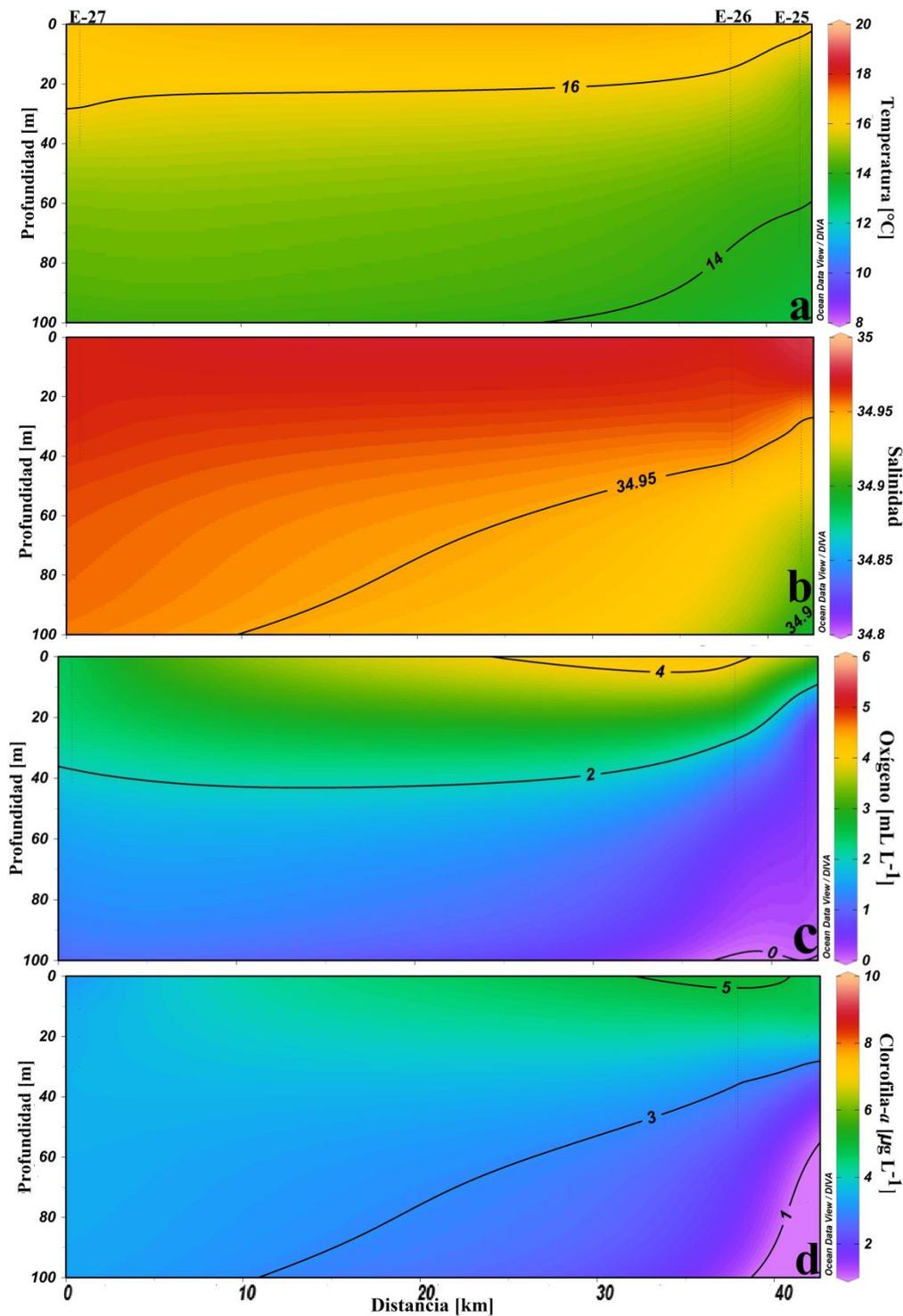


Figura 9. Distribución vertical de las características oceanográficas en la IT1. a) Temperatura, b) salinidad, c) oxígeno disuelto, d) clorofila-a.

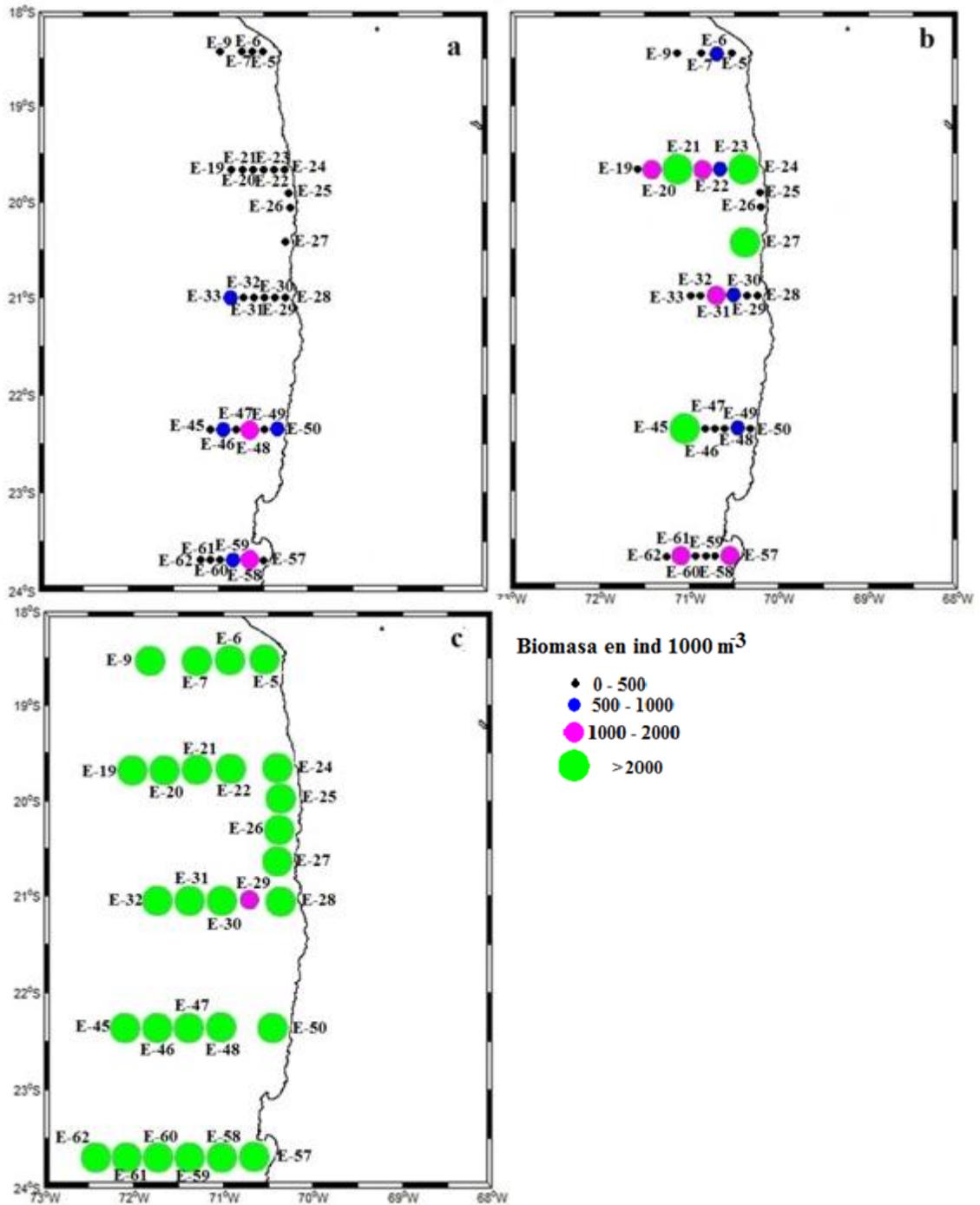


Figura 10. Distribución horizontal de biomasa zooplanctónica en el estrato 10-25 m. a) Biomasa obtenida mediante el método de manual, b) biomasa obtenida mediante el programa zooimage, c) biomasa obtenida mediante el método acústico.

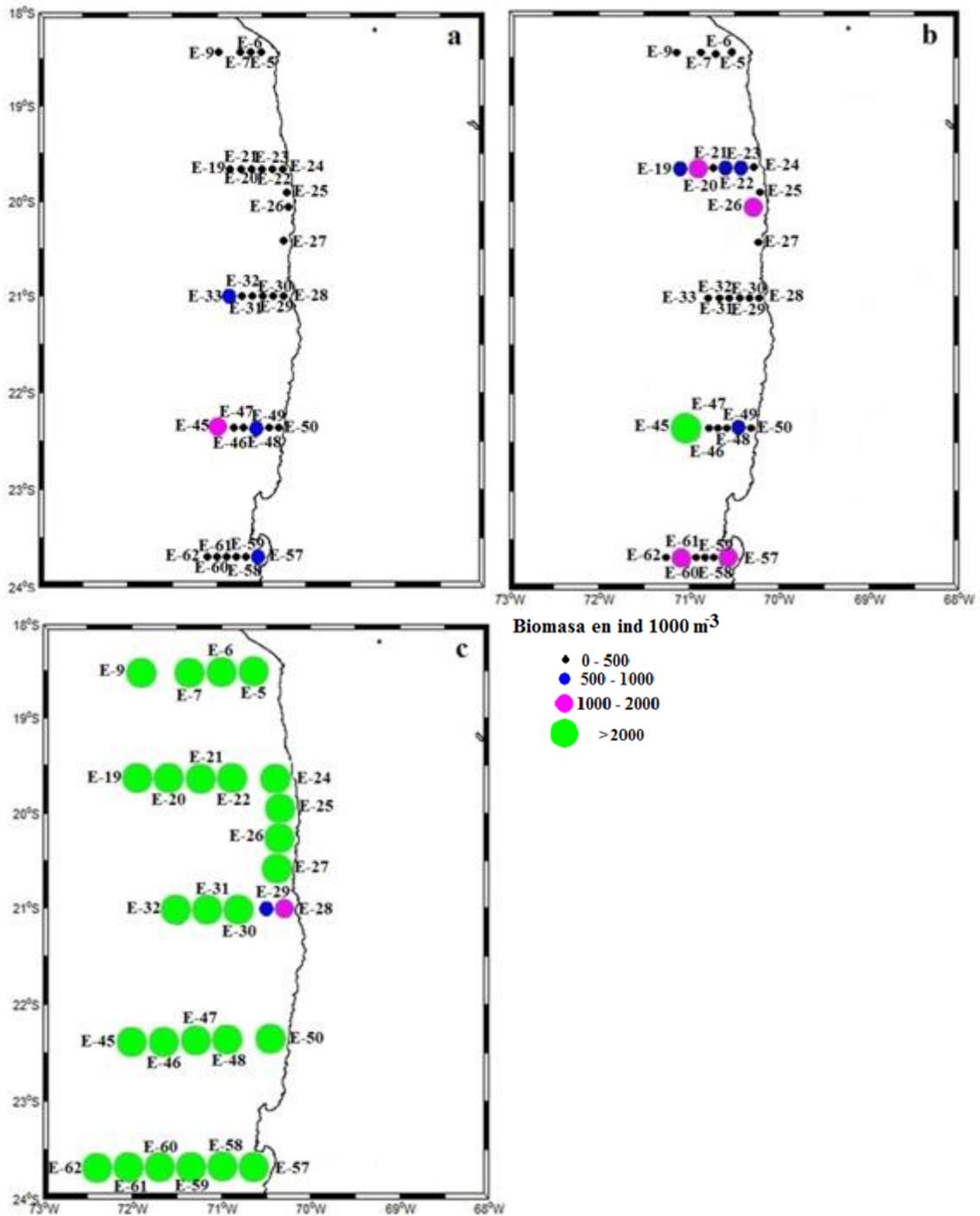


Figura 11. Distribución horizontal de biomasa zooplanctónica en el estrato 25-50 m. a) Biomasa obtenida mediante el método de manual, b) biomasa obtenida mediante software zoimage, c) biomasa obtenida mediante el método acústico.

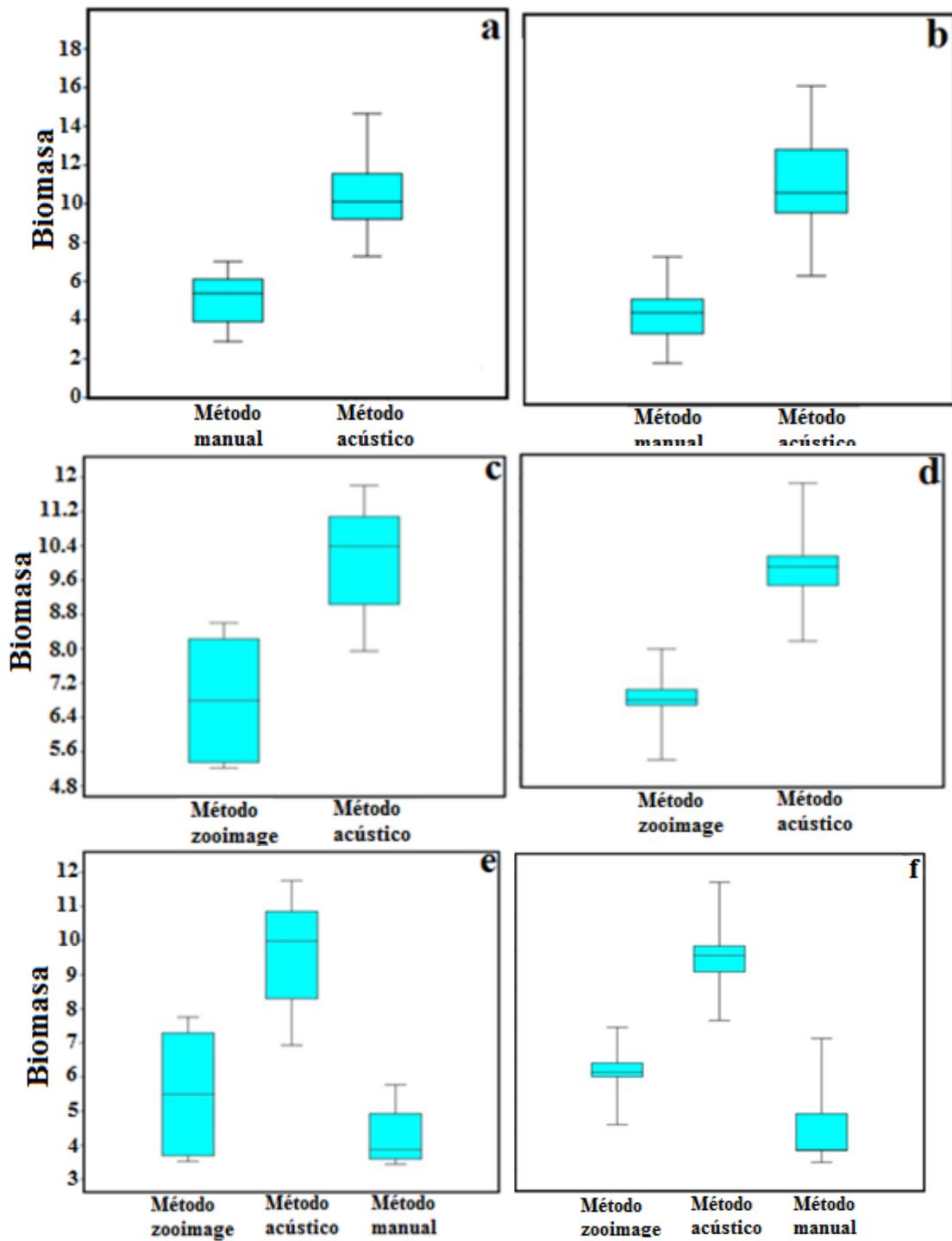


Figura 12. Gráfico de caja de la biomasa. a) Método manual vs acústico, estrato 10-25 m. b) estrato 25-50 m, c) método zooimage vs acústico, estrato 10-25 m, d) estrato 25-50 m, e) método zooimage vs acústico vs manual, 10-25m, f) estrato 25-50 m.

Análisis de componentes principales

Los resultados del análisis de componentes principales entre la biomasa zooplanctónica obtenida mediante el método volumétrico, características oceanográficas y las estaciones de muestreo (Fig. 11), mostró que la suma de los dos primeros componentes explicó el 70,973% de la varianza, donde el componente 1 aportó un 40,07% y el componente 2 aportó un 30,9%. La Tabla 2 representa la correlación de las variables de estudio con los 2 componentes principales, donde la clorofila-*a* presentó una mayor correlación negativa con el componente 1 y la salinidad presentó una mayor correlación con el componente 2.

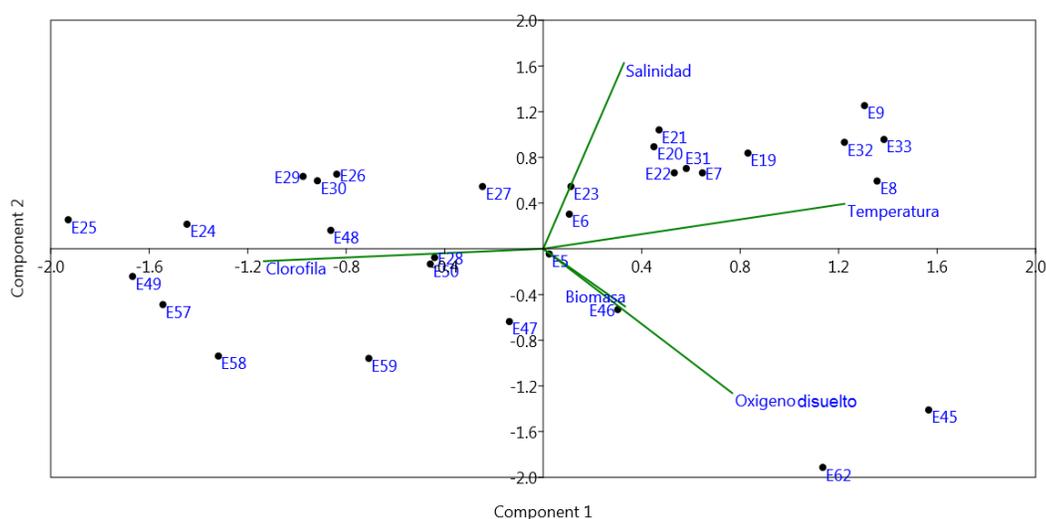


Figura 13. Análisis de componentes principales entre las variables oceanográficas (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) y biológicas (clorofila-*a* y biomasa zooplanctónica).

Tabla 2. Correlación de las variables oceanográficas y biológicas con el componente 1 y 2. En rojo se indican las variables con mayor correlación

	PC 1	PC 2
Temperatura	0,64543	0,18227
Salinidad	0,17295	0,75321
Oxígeno	0,40515	-0,58513
Clorofila- <i>a</i>	-0,59881	-0,05032
Biomasa	0,17546	-0,23353

Análisis estadístico

La Tabla 3, indica el valor- P para el método acústico y el método manual; método acústico y zooimage; método manual, acústico y zooimage obtenido mediante un test estadístico de Kruskal-Wallis, para los dos estratos (10-25; 25-50 m). Como se observa en la Tabla 3, el método acústico vs manual en ambos estratos presentó un valor de P muy bajo $1,65E-10$ para el estrato 10-25 y $1,33E-10$ para el estrato 25-50 m, muy por debajo de 0,05, indicando que en ambos casos hay diferencias significativas. Mientras que el método acústico vs zooimage presentó valores P , bastante mayores que los métodos descritos anteriormente con 0,004 en el estrato 10-25 m y 0,009 en el estrato 25-50 m. Sin embargo ambos valores están por debajo de 0,05, indicando que existen diferencias significativas. Los tres métodos empleados, tuvieron un valor P similar al método acústico vs zooimage donde el estrato 10-25 m tuvo un valor de 0,001 y el estrato 25-50 m 0,005, indicando que existen diferencias significativas entre los tres métodos empleados.

Tabla 3. Test estadístico de Kruskal-Wallis entre biomasa obtenida mediante el método acústico y el método manual; método acústico y zooimage y método manual, acústico y zooimage.

Métodos	Valor- P	
	Estrato 10-25 m	Estrato 25-50 m
Acústico vs manual	1,65E-10	1,33E-10
Acústico vs zooimage	0,004041	0,009023
Manual, acústico y zooimage	0,001421	0,005248

DISCUSIÓN

Condiciones oceanográficas

La temperatura en la zona de estudio presentó máximos cercanos a 19°C en superficie y mínimos de 8°C en profundidad en las primeras tres transectas, mientras que en las transectas 4 y 5 la temperatura superficial disminuyó a ~17°C. Desde febrero de 2015 comenzó a desarrollarse un evento de El Niño, aumentando la temperatura superficial del mar (Angulo, 2016). Además, Anónimo (2015) indica que durante años de El Niño la temperatura superficial del mar puede alcanzar 19,5°C en Arica, 18°C en Antofagasta e Iquique en octubre mientras que en años sin El Niño para la misma época disminuye ~2°C (Pizarro *et al.*, 1994), quienes determinaron para Arica, Iquique y Antofagasta valores de 15-16°C. Palma & Apablaza (2004) también determinaron valores de temperatura superficial del mar en la zona de Mejillones de 12-16°C en octubre de 2000. Estos resultados también coinciden con lo señalado por Cerda *et al.* (2010) para la zona de Mejillones, que registraron valores de 15-16°C. La IT1 presentó los menores valores de temperatura superficial respecto a las demás transectas, con máximos de ~16°C que coinciden con lo descrito para la costa frente a Iquique por Pizarro *et al.* (1994)

El gradiente de temperatura en la columna de agua y principalmente en superficie, se explica principalmente por dos factores, el primer factor está relacionado con la radiación solar durante la época de muestreo y el segundo factor, está asociado a la Contracorriente Perú-Chile, que transporta aguas más cálidas y mas salinas hacia esta zona, característica de la masa de agua AST (Silva *et al.*, 2009).

El rango de salinidad fluctuó entre 34,5 y 35,3. En las tres primeras transectas se determinó una salinidad superficial de 35,2 a 35,3 en los primeros 40 m de profundidad, principalmente en la zona oceánica, valores que corresponden a la AST, caracterizada por mayores valores de temperatura y salinidad (Silva *et al.*, 2009). Bajo esta capa se determinaron salinidades de 34,9 correspondientes a AESS, con alta salinidad y baja concentración de oxígeno disuelto, asociados a la ZMO (Silva *et al.*, 2009) que se extiende

entre 100 y 300 m de profundidad. En las transectas 4 y 5 se determinó una mayor influencia de AESS y ausencia de la AST, coincidiendo con Pizarro & Cifuentes (2016). Además en estas transectas se observan algunas isohalinas de 34,6-34,7 cerca de 100 m (relativamente superficial) en una zona donde domina la AESS y que correspondería a la AIA que se está mezclando con la AESS. En este caso se reconocen la presencia tres masas de agua que se encuentran en la zona de estudio, lo que coincide con lo señalado por varios autores (Palma & Apablaza, 2004; Apablaza & Palma, 2006; Cerda *et al.*, 2010; Guíñez *et al.*, 2010). En el caso de la IT1, considerando que solo se analizó los primeros 100 m, la salinidad para las tres estaciones fluctuó levemente (34,9-35,0).

La distribución vertical de oxígeno disuelto fue similar en las 5 transectas, con altos valores en la capa superficial (5-6 mL L⁻¹) propios de la zona donde ocurre el mayor intercambio de oxígeno (interacción océano-atmósfera y actividad fotosintética; que se extiende desde la superficie hasta 25 m en la costa y hasta ~50 m en la zona oceánica. En las transectas 3 y 5 se observó una capa oxigenada más gruesa. En todas las transectas, se determinó una oxiclina sobre los 100 m con una ZMO muy somera. La IT1 presentó una distribución similar a las demás transectas, pero con máximos superficiales menores, de 4 mL L⁻¹ y mínimos cercanos a 0 mL L⁻¹ alcanzando hasta 100 m, que evidencian la presencia de la ZMO. La ZMO es característica en la zona norte de Chile, pues se extiende desde el sur de Perú hasta la zona central de Chile (Guíñez *et al.*, 2010). Además es muy extensa, pues se distribuye entre 100 y 400 m aproximadamente. Este estrato de profundidad contiene altas concentraciones de materia orgánica que es degradada aeróbicamente (Ulloa & Pantoja, 2009) a los cuales se le agrega la escasa ventilación existente en esta zona (Chavez *et al.*, 2008). Además, los frecuentes eventos de surgencia de la zona, favorecen el ingreso de la AESS a las capas más superficiales, causando una ZMO más somera (Apablaza & Palma, 2006; Pizarro & Cifuentes, 2016).

Los perfiles verticales de clorofila-*a*, se realizaron solo hasta 60 m, ya que la clorofila-*a* se concentra principalmente en la capa fótica, excepto en la IT1, donde se determinó hasta 100 m de profundidad. Las transectas 1 y 2 presentaron bajos valores de clorofila-*a*, con

máximos de $1 \mu\text{g L}^{-1}$ en la transecta 1, $4\text{-}5 \mu\text{g L}^{-1}$ en las transectas 2 y 3; mientras que en la transecta 4, se observaron máximos de clorofila-*a* cercanos a $15 \mu\text{g L}^{-1}$ y en la transecta 5 máximos cercanos a $6 \mu\text{g L}^{-1}$. La IT1, presentó valores similares a la transecta 3, con máximos de $5 \mu\text{g L}^{-1}$. Los altos valores de clorofila-*a* en la costa y superficie se deben a la presencia de fitoplancton distribuidos en las capas superficiales (Palestino & Mansilla, 2004). Es importante destacar que Marín *et al.* (1993) determinaron que durante un evento intenso de surgencia (octubre, 1990) la clorofila-*a* se mantuvo con valores de 0,8 y $1,4 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que durante el periodo de relajación del viento alcanzó máximos de $10,0 \mu\text{g L}^{-1}$, valores similares a los resultados obtenidos en este estudio.

Distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica

La distribución horizontal de la biomasa zooplanctónica fue en general bastante baja, con valores de biomasa $<500 \text{ mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ en la mayoría de las estaciones, particularmente en las transectas 2, 3 y 5. En la transecta 1, se obtuvo un foco de alta biomasa (estación 5) con valores de $1000\text{-}2000 \text{ mL } 1000 \text{ m}^{-3}$ al igual que en la estación 27 (IT1). Mientras que en la transecta 4, la estación 45 presentó los mayores valores de biomasa ($> 2000 \text{ mL } 1000 \text{ m}^{-3}$). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Angulo (2016), quien señala una disminución de la biomasa zooplanctónica principalmente en Arica e Iquique. Los focos de alta biomasa en las estaciones costeras, son coherentes con lo descrito históricamente por varios autores (Escribano *et al.*, 2000; Oliva, 2005; Herrera & Santander, 2014) que asocian la distribución de zooplancton con la disponibilidad de fitoplancton. Sin embargo, se determinó un foco de biomasa en una estación más alejada de la costa (estación 45) que podría estar asociado al transporte de Ekman, ya que mediante procesos advectivos los organismos son transportados fuera de la costa, asociados a eventos de surgencia costera (Palma & Apablaza, 2004; Páramo *et al.*, 2011). De acuerdo al desarrollo del evento de El Niño durante el año 2015, Arones-Flores & Ayón-Dejo (2002), Oliva (2005), Bances *et al.* (2007) y Angulo (2016) indicaron que las comunidades planctónicas se vieron afectadas por estos eventos cálidos, disminuyendo en consecuencia la biomasa zooplanctónica.

Si se analiza los resultados de distribución espacial de biomasa zooplanctónica obtenidas mediante el programa zooimage (Figs. 10b, 11b), se observa que las estimaciones de biomasa aparecen sobreestimadas en la mayoría de las estaciones. Esto se debería a que, este método ocupa imágenes en 2D que tiene algunas limitaciones, pues algunos organismos de mayor tamaño pueden sobreestimar los valores de biomasa obtenidos mediante del programa zooimage (Medellín-Mora & Escribano, 2013). Sin embargo este programa, presenta una ventaja sobre el método manual, dado que es más rápido y permite obtener información del tamaño del zooplancton y si se le entrega un buen entrenamiento, permitiría obtener información espacial y temporal del zooplancton, independiente del tamaño de la muestra (Manríquez *et al.*, 2009). Angulo (2016), determinó para la zona de Arica, Iquique y Antofagasta, organismos zooplanctónicos de mayor tamaño, algunos grupos podrían haber influido en los resultados obtenidos en zooimage.

El análisis de componentes principales se realizó solo en los primeros 100 m y se encontró que la suma de los dos primeros componentes explicó el 70,97% de la varianza. En la Figura 12 se observa una relación positiva entre la clorofila-*a* y las estaciones costeras, esto es coherente si se considera que la clorofila-*a* tiene sus máximos en la costa y disminuye hacia el océano. A su vez la clorofila presentó una relación negativa con la biomasa, temperatura y salinidad, debido posiblemente a que los mayores valores clorofila-*a* se encontraron en las estaciones costeras, mientras que la biomasa zooplanctónica, en general fue baja y sus máximos valores se determinaron en estaciones más oceánicas, situación que se podría atribuir al transporte de Ekman (Gili *et al.*, 1988). La temperatura y oxígeno disuelto están asociados positivamente, lo que es coherente si se considera que el ACP fue realizado hasta 100 m, pues desde 0-100 m se observó una disminución tanto de temperatura como de oxígeno disuelto. Esto se explicaría si se basa en el supuesto que la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura son el resultado de procesos físicos, como por ejemplo, transporte de masas de agua (Marín & Olivares, 1999). En los perfiles verticales de temperatura (Figs. 4a-9a) se observó un aumento de temperatura en el gradiente costa-océano, lo que explicaría la relación positiva entre temperatura y biomasa, lo mismo ocurrió con la salinidad, donde sus mayores valores se determinaron en las

estaciones más oceánicas. Ponce & León (2015) señalan que el aumento en la temperatura superficial del mar, producido por El Niño genera una termoclina que impide que los nutrientes asciendan a la superficie ocasionando una disminución de organismos planctónicos. Bajo este análisis se concluye que, para los primeros 100 m, la biomasa zooplanctónica depende principalmente de la proximidad de la costa y consecuentemente de la concentración de clorofila-*a* superficial (que se encuentra en mayor concentración en la zona costera), mientras que la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, responden a procesos físicos y proximidad a la costa.

Métodos de estimación de biomasa

Los resultados de la estimación de la biomasa de zooplancton, mediante el método acústico, comparada con el método manual, mostraron una alta sobreestimación de los resultados, en ambos estratos, con respecto a los otros dos métodos. Si se observa la distribución horizontal de biomasa zooplanctónica obtenida mediante el método acústico (Figs. 10 y 11 c) se observa que la mayoría de las estaciones muestran valores mayores de 2000 mL 1000 m⁻³ en ambos estratos, exceptuando la estación 29 en el estrato 10-25 m cuya biomasa fluctuó entre 1000 y 2000 mL 1000 m⁻³ y las estaciones 28 y 29 en el estrato de 25-50 m cuyos valores fluctuaron entre 500-1000 y 1000-2000 mL 1000 m⁻³ respectivamente. Si se observa la distribución horizontal (Figs. 10c, 11c) y los gráficos de cajas (Fig. 12) correspondientes a la biomasa de zooplancton, se observó que la mayoría de los datos obtenidos mediante el método acústico son superiores a los datos obtenidos mediante el método manual. Ésta sobreestimación de la biomasa, se debería al tamaño del área que abarca cada método, mientras las redes de zooplancton abarcan un área pequeña de muestreo, el ecosonda abarca un área mucho más grande (Greenlaw, 1979). Sin embargo, comparando ambos métodos (manual y acústico), se observó que el orden de magnitud en la sobreestimación varía para cada estación. Esta situación podría asociarse a la composición del zooplancton de cada estación, ya que como indica Ballón *et al.* (2011), un copépodo o eufáusidos (agrupados como fluid-like), no responde acústicamente a un pterópodo (agrupado como elastic-shell) o un sifonóforo con burbuja de gas (agrupado gas

bearing), además es importante destacar que la respuesta acústica de cada individuo de zooplancton dependen altamente de la frecuencia acústica, tamaño, forma y orientación de éste (Stanton *et al.*, 1996) por lo que es necesario tener la información de abundancia de zooplancton para conocer su composición y determinar qué tipo de organismos o táxas producen diferencias en su respuesta acústica.

La sobreestimación de los datos mediante el método acústico, era esperable y coincide con lo descrito por varios autores, como Stanton *et al.* (1994), Mitson *et al.* (1996), Watkins & Birerly (2002), Alvarez *et al.* (2003) y Ballón *et al.* (2011) quienes en su mayoría, asocian esta situación a posibles elementos que no corresponden a zooplancton propiamente tal. Sin embargo Alvarez *et al.* (2003) sugiere que sus datos sobreestimados fueron justamente aquellos que se encontraban más cerca del fondo. Sin embargo, también hay autores cuyos datos fueron subestimados, como De Robertis (2001), Korneliussen & Ona (2003) y Holbrook *et al.* (2006).

De acuerdo a los datos obtenidos mediante el método acústico *versus* los datos obtenidos mediante el software zooimage (Figs. 12c y 12d) es posible determinar un cierto grado de coincidencia entre ambos métodos, principalmente en el estrato 25-50 m. Sin embargo, es importante destacar que en este caso, solo se compararon siete estaciones en el estrato 10-25 m y seis estaciones en el estrato 25-50 m dado que el algoritmo descrito por Ballón *et al.* (2011), utilizado en este estudio no permite la estimación acústica de zooplancton para individuos con diámetros <4 mm y >12 mm, ya que se sobreestima y subestima respectivamente. Por lo tanto, se consideraron las estaciones que tenían información en ese rango de tamaño de diámetro. Si bien fue posible realizar los gráficos y test estadísticos correspondientes, esta condición afecta la credibilidad del algoritmo empleado.

El test estadístico, Kruskal-Wallis aplicado al método acústico *versus* el método manual para ambos estratos presentó valores de $1,65E-10$ para el estrato 10-25 m y $1,33E-$

10 para el estrato 25-50 m, ambos valores son $\ll 0,05$ lo que indica que para ambos estratos los métodos tienen estadísticamente diferencias significativas.

El mismo test estadístico fue aplicado al método acústico versus el método de zooimage, dando como resultado para el estrato 10-25 m un valor de $P = 0,004$ y para el estrato de 25-50 m un valor $P = 0,009$ dando ambos valores $\ll 0,05$ lo que indica que existen diferencias significativas en ambos estratos para los dos métodos empleados.

Estas diferencias significativas entre el método acústico/manual y método acústico/zooimage y el bajo valor de P podría estar asociado a la importante diferencia en la magnitud de los datos obtenidos mediante el método acústico con los obtenidos mediante el método manual y zooimage, ya que el valor de P depende principalmente de la magnitud de la diferencia que se quiere probar y el tamaño de la muestra (Manterola *et al.*, 2008).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- 1) Las estaciones costeras se relacionan positivamente con la clorofila-*a*, pero ambos parámetros no se relacionaron positivamente con la biomasa zooplanctónica por el transporte de Ekman.
- 2) La biomasa zooplanctónica, se relacionó positivamente con la temperatura y oxígeno disuelto en la columna de agua analizada.
- 3) El método acústico es una muy buena herramienta para complementar la estimación de biomasa zooplanctónica, sin embargo es necesario efectuar mejoras en cuanto al algoritmo ya que no considera organismos <4 mm dejando afuera muchos microcrustáceos abundantes en el norte de Chile, por lo tanto sería importante incluir en estos estudios la composición taxonómica de zooplancton.
- 4) Este método sería de bastante utilidad en condiciones meteorológicas difíciles, donde no sea posible la utilización de redes de zooplancton.
- 5) Es importante destacar la utilidad del programa zooimage, ya que también se consideró como un buen complemento en la estimación de biomasa zooplanctónica.
- 6) Mientras no se mejoren los métodos de estimación, mediante zooimage y acústica se recomienda continuar con el método tradicional de la estimación de biomasa zooplanctónica

REFERENCIAS

Álvarez G., H. Mianzan & A. Madirolas. 2003. Acoustic characterization of gelatinous-plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf. *ICES J. Mar. Sci.*, 60: 650-657.

Angulo J. 2016. Plancton. Informe de Avance 2, Monitoreo de las condiciones bio-oceanográficas entre la XV y II Regiones, año 2015, pp. 15-18.

Anónimo. 2015. Fenómeno de El Niño, manifestación en el mar chileno. [http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h734.html]. Revisado: 17 septiembre 2016.

Apablaza, P. & S. Palma. 2006. Efecto de la zona de mínimo oxígeno sobre la migración vertical de zooplancton gelatinoso en la bahía de Mejillones. *Invest. Mar.*, 34(2): 81-95.

Aronés-Flores, K. & P. Ayón-Dejo. 2002. Effects of El Niño 1997-1998 on copepod community structure at San José coastal station (Peru). *Invest. Mar.*, 30(1): 104-105.

Ballón, M. 2010. Acoustic study of macrozooplankton off Peru: biomass estimation, spatial patterns, impact of physical forcing and effect on forage fish distribution. Tesis doctoral de ecología. Universidad de Montpellier, 178 pp.

Ballón, M., A. Bertrand, A. Lebourges-Dhaussy, M. Gutierrez, P. Ayón, D. Grados & F. Gerlotto. 2011. Is there enough zooplankton to feed forage fish populations off Peru? An acoustic (positive) answer. *Prog. Oceanogr.*, 91: 360-381.

Bances, S., W. Carbajal & W. García. 2007. Monitoreo a través de balsa biológica en las islas Lobos de Afuera, Lambayeque, septiembre-diciembre del 2006. *Inf. Inst. Mar Perú*, pp: 3-14.

Bernal, A. & S. Zea. 2000. Estructura de la comunidad de zooplancton en condiciones de descarga continental y de afloramiento costero en Santa Marta, Caribe colombiano. Bol. Invest. Mar. Cost., 29: 3-26.

Cerda, M., B. Knoppers, J. Valdes, A. Fettah Siffedine, L. Ortlieb & E. Sabadini-Santos. 2010. Variación espacial y temporal de las masas de agua, nutrientes y sedimentación de la materia orgánica e inorgánica en la bahía de Mejillones del sur (23°S), Chile. Rev. Chil. Hist. Nat. 83: 409-420.

Chavez F., A. Bertrand, R. Guevara, P. Soler & J. Csirke. 2008. El sistema del norte de la Corriente de Humboldt, historia breve, estatus actual y una vista hacia el futuro. Prog. Oceanogr., 79: 2-4.

De Robertis A. 2001. Validation of acoustic echo counting for studies of zooplankton behavior. ICES J. Mar. Sci., 58: 543-561.

Escribano, R. & L. Castro. 2004. Plancton y productividad. En: C. Werlinger (ed.). Biología Marina y Oceanografía: conceptos y procesos. Consejo Nacional del Libro y la Lectura, Universidad de Concepción, Concepción, pp. 289-312.

Escribano, R., V. Marin & C. Irribarren. 2000. Distribution of *Euphausia nuczonata* at the upwelling are of Peninsula Mejillones, northern Chile: the influence of the oxygen minimum layer. Sci. Mar., 64(1): 69-77.

Escribano, R. & P. Hidalgo. 2001. Circulación inducida por el viento en la bahía de Antofagasta, norte de Chile (23°S). Rev. Biol. Mar. Oceanogr., 36(1): 43-60.

Fonseca, T. & M. Farías. 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. Invest. Pesq., Chile, 34: 33-46.

Gili, J.M., F. Pagès, A. Sabatés & J.D. Ros. 1988. Small-scale distribution of a cnidarian population in the western Mediterranean. *J. Plankton Res.*, 10(3): 385-401.

Greenlaw, C. 1979. Acoustical estimation of zooplankton populations. *Limnol. Oceanogr.*, 24: 226-242.

Guíñez, M., J. Valdés & A. Siffedine. 2010. Variabilidad espacial y temporal de la materia orgánica sedimentaria, asociada a la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO), en un ambiente costero del norte de la Corriente de Humboldt, bahía de Mejillones, Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 38(2): 242-253.

Herrera, L. & E. Santander. 2014. Programa bio-oceanográfico-pesquero de la zona norte de Chile (18°S-23°S). UNAP CIAM, pp. 47-52.

Holbrook B., T. Hrabik, D. Branstrator, D. Yule & J. Stockwell. 2006. Hydroacoustic estimation of zooplankton biomass at two shoal complexes in the Apostle Islands Region of Lake Superior. *J. Great Lakes Res.*, 32:680-696.

Jolliffe, I. 2002. *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, New York, pp. 29-59.

Johnson, R. K. 1977. Sound scattering from a fluid sphere re-visited. *J. Acoust. Soc. Am.*, 61: 375-377.

Letelier J., L. Soto, S. Salinas, L. Vincenti, R. Pavez & M. Arriagada. 2012. Influencia de la península de Mejillones en la variabilidad oceanográfica anual e interanual frente al norte de Chile. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 47(3): 513-526.

Korneliussen, R. & E. Ona. 2003. Synthetic echograms generated from the relative frequency response. *ICES J. Mar. Sci.*, 60: 636-640.

Manríquez, K., R. Escribano & P. Hidalgo. 2009. The influence of coastal upwelling on the mesozooplankton community structure in the coastal zone off Central/Southern Chile as assessed by automated image analysis. *J. Plankton Res.*, 31(9): 1075-1088.

Manterola C., V. Pineda & Grupo Mincir. 2008. El valor de “p” y la “significación estadística”. Aspectos generales y su valor en la práctica clínica. *Rev. Chil. Cirugía.*, 60(1): 86-89.

Marín, V., L. Rodríguez, L. Vallejo, J. Fuenteseca & E. Oyarce. 1993. Efectos de la surgencia costera sobre la productividad primaria primaveral de la Bahía Mejillones del sur (Antofagasta, Chile). *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 66: 479-491.

Marín, V. & G. Olivares. 1999. Estacionalidad de la productividad primaria en Bahía Mejillones del Sur (Chile): una aproximación proceso-funcional. *Rev. Chil. Hist. Nat.*, 72: 629-641.

Medellín-Mora, J. & R. Escribano. 2013. Análisis automático de zooplancton utilizando imágenes digitalizadas: estado del conocimiento y perspectivas en Latinoamérica. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 41(1): 29-41

Medina, M., H. Arancibia & S. Neira. 2007. Un modelo trófico preliminar del ecosistema pelágico del norte de Chile (18°20’S-24°00’S). *Invest. Mar.*, 35(1): 25-38.

Mitson R., Y. Simard & C. Goss. 1996. Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations. *ICES J. Mar. Sci.*, 53: 209-215.

Oliva E. 2005. Zooplancton y su relación con eventos El Niño en la zona norte de Chile. [<http://www.uanyof.cl/Riben/EOLIVA>]. Revisado: 25 Agosto 2016.

Palma S. & P. Apablaza. 2004. Abundancia estacional y distribución vertical del zooplancton gelatinoso carnívoro en un área de surgencia en el norte del Sistema de la Corriente de Humboldt. *Invest. Mar.*, 32(1): 49-70.

Páramo J., M. Correa & S. Núñez. 2011. Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en La Guajira, Caribe colombiano. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 46(3): 421-430.

Pepin, P., C. Johnson, M. Harvey, B. Casault, J. Chassé, E. Colbourne, P. Galbraith, D. Hebert, G. Lazin, G. Maillet, S. Plourde & M. Starr. 2015. A multivariate evaluation of environmental effects on zooplankton community structure in the western North Atlantic. *Prog. Oceanogr.*, 134: 197-220.

Pizarro, O., S. Hormazábal, A. González & E. Yáñez. 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Invest. Mar.*, 22: 85-101.

Plastino, E. & A. Mansilla. 2004. Luz y fotosíntesis. En: C. Werlinger (ed.). *Biología Marina y Oceanografía: conceptos y procesos*. Consejo Nacional del Libro y la Lectura, Universidad de Concepción, Concepción, pp. 229-242.

Ponce, I. & J. León. 2015. Ese efecto de El Niño del que nadie habla: su impacto en la biodiversidad. [<http://gkillcity.com/articulos/el-mirador-politico/ese-efecto-el-nino-del-que-nadie-habla-su-impacto-la-biodiversidad>]. Revisado: 26 Agosto 2016.

Postel, L., H. Fock & W. Hagen. 2000. Biomass and abundance. *ICES Zooplankton Methodology Manual*, 67: 106-216.

Silva, N., N. Rojas & A. Fedele. 2009. Water masses in the Humboldt Current System: properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Res. II*, 56: 1004-1020.

Stanton, T., P. Wiebe, D. Chu, M. Benfield, L. Scanlon, L. Martin & R. Eastwood. 1994. On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES J. Mar. Sci.*, 51: 505-512.

Stanton, T., D. Chu & P. Biebe. 1996. Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups. *ICES J. Mar. Sci.*, 53: 289-295.

Ulloa, O. & S. Pantoja. 2009. The oxygen minimum zone of the Eastern South Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 56: 987-991.

Watkins J. & A. Brierly. 2002. Verification of the acoustic techniques used to identify Antarctic krill. *ICES J. Mar. Sci.*, 59: 1326-11336.

ANEXOS

Anexo1. Datos de biomasa obtenida mediante los tres métodos empleados. Estrato 10-25

AÑO 2015			mL 1000 m ⁻³	mL 1000 m ⁻³	mL 1000 m ⁻³
Estación	Latitud	Longitud	Biomasa_zoo	Biomasa_acust	Biomasa_man
5	18,417	70,417	441,03	254755,17	255,62
6	18,417	70,500	853,62	1337238,15	177,27
7	18,417	70,683	23,41	328726,61	17,93
9	18,417	71,033	92,75	5370,69	47,11
19	19,667	70,883	160,22	104396,09	48,4
20	19,667	70,717	1997,02	2821,73	456,11
21	19,667	70,533	5638,38	32424,78	243,12
22	19,667	70,367	1459,01	105516,82	413,07
24	19,667	70,200	2876,87	12854,64	191,42
25	20,333	70,133	277,03	21531,6	216,76
26	20,300	70,167	173,55	69951,58	52,23
27	20,667	70,300	2501,08	7391,16	438,51
28	21,000	70,183	149,26	1463,43	34,75
29	21,000	70,250	55,14	24577,58	50,04
30	21,000	70,350	569,75	9916,77	400,26
31	21,000	70,517	1703,76	30967,77	433,51
32	21,000	70,70	1154,53	2329573,96	47,6
45	22,333	70,967	812,69	20714,71	172,99
46	22,333	70,783	1035,99	11090,15	698,14
47	22,333	70,600	511,21	21489,24	451,42
48	22,333	70,417	2795,27	8404,43	1115,42
50	22,333	70,267	724,59	20062,15	755,39
57	23,667	70,433	1716,47	5271,22	222,65
58	23,667	70,500	1060,53	64999,36	1092,24
59	23,667	70,583	7655,75	134276,53	565,29
60	23,667	70,767	589,99	24469,59	67,33
61	23,667	70,950	161,49	70914,55	29,5
62	23,667	71,133	622,95	36319,88	195,31

Anexo 2. Datos de biomasa obtenida mediante los tres métodos empleados. Estrato 25-50

AÑO 2015			mL 1000 m ⁻³	mL 1000 m ⁻³	mL 1000 m ⁻³
Estación	Latitud	Longitud	Biomasa_zooi	Biomasa_acust	Biomasa_man
5	18,417	70,417	10,84	12737518,49	127,56
6	18,417	70,500	17,3	374800,32	95,8
7	18,417	70,683	0,54	7265877,38	11,26
9	18,417	71,033	1,81	15503,68	9,56
19	19,667	70,883	774,87	144304,99	93,85
20	19,667	70,717	1418,21	19346,49	252,63
21	19,667	70,533	374,27	12339,65	91,86
22	19,667	70,367	895,19	22396,24	118,49
24	19,667	70,200	39,37	3853723,03	19,61
25	20,333	70,133	117,46	3485651,95	226,76
26	20,300	70,167	1348,34	3253,75	66,79
27	20,667	70,300	336,46	5295,29	344,71
28	21,000	70,183	127,34	1311,65	54,68
29	21,000	70,250	204,83	754,46	38,84
30	21,000	70,350	166,06	71591,9	34,13
31	21,000	70,517	11,62	9640,32	206,9
32	21,000	70,700	1,17	949124,36	8,56
45	22,333	70,967	2713,41	25056,12	1994,38
46	22,333	70,783	21,83	67199,83	203,73
47	22,333	70,600	115,9	487899,25	113,62
48	22,333	70,417	57,29	53315,06	557,03
50	22,333	70,267	54,22	46182,85	205,45
57	23,667	70,433	1203,87	1723080,43	548,51
58	23,667	70,005	4,01	85061,7	50,97
59	23,667	70,583	81,33	341594,69	231,16
60	23,667	70,767	27,72	35170,77	35,26
61	23,667	70,95	1108,06	48852,98	170,88
62	23,667	71,133	0,46	18997,37	199,94