



COMPOSICIÓN Y ABUNDANCIA DEL ZOOPLANCTON EN LA SENTINA DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA EN CALDERA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Composition and abundance of zooplankton in the bilge of the seawater intake of a desalination plant in Caldera, Region of Atacama, Chile

J.M. Alonso Vega^{1,2*}, Luis Caillaux¹, Marcelo Valdebenito¹ & Jorge Bravo³

¹Centro de Estudios Avanzados en Ambientes Marinos, CEAMAR, Eduardo de la Barra 210, La Serena, Chile. ²Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Casilla 117, Coquimbo, Chile. ³Gerencia de Medio Ambiente, Minera Candelaria, Lundin Mining Corporation, Copiapó, Chile.

*Autor correspondiente/corresponding author: Correo electrónico/E-mail: avega@ceamar.cl

RESUMEN

En el norte de Chile, la desalinización se proyecta como una solución estratégica para satisfacer la demanda de agua dulce por parte de la industria y para el consumo humano. Tomando en cuenta el volumen de agua requerido en el proceso de desalinización, se han implementado sistemas de captación de agua de mar enfocados a disminuir la succión y arrastre de organismos que habitan aguas litorales, tales como el zooplancton. En este contexto se realizó un estudio para determinar la composición y abundancia del zooplancton arrastrado hasta la sentina del sistema de captación de agua en la Planta desalinizadora de la Compañía Minera Candelaria (~27°S), y fue comparado con una estación referencial ubicada en las cercanías de la Planta, en el muelle de puerto Padrones (ca. 100 m). Se realizaron muestreos mensuales (por la mañana y por la tarde) entre mayo 2018 y enero 2019 donde se pudo cuantificar una comunidad zooplanctónica conformada por 34 taxa. Los copépodos dominaron en términos numéricos el holoplancton, mientras que el meroplancton estuvo compuesto principalmente por estadios larvales de cirripedios, moluscos y decápodos y el ictioplancton por larvas y huevos de peces pelágicos. La sentina tuvo una menor riqueza de especies y diversidad en comparación con la estación referencial ubicada en el muelle. Los análisis multivariados de ordenación evidenciaron que la composición y abundancia del zooplancton difiere significativamente en otoño y verano, y son semejantes en invierno y primavera. Estudios de este tipo contribuyen al conocimiento del efecto de los sistemas de captación de aguas en los patrones ecológicos del zooplancton costero. Además, esta información es fundamental al momento de evaluar los impactos y/o al elaborar programas de vigilancia del ambiente marino.

Palabras clave: Desalinización, zooplancton, norte de Chile, captación de agua de mar.

ABSTRACT

In northern Chile, desalination is projected as a strategic solution to satisfy the demand of fresh water for the industry and human consumption. Taking into consideration the volume of water used by the desalination process, intake seawater systems have been implemented focused on reducing the drag and suction of organisms that live in the coastal waters, such as zooplankton. In this context, a study was conducted to determine the zooplankton composition and abundance in the bilge water intake of the Candelaria Mining Company (~27°S) desalination plant and these were compared with a reference station located in the nearby Puerto Padrones berth (ca. 100 m). Monthly sampling, carried out (in the morning and afternoon) between May 2018 and January 2019, revealed a zooplanktonic community composed of 34 taxa. Copepods were the numerically dominant holoplankton, while meroplankton was mainly composed of larval stages of barnacles, mollusks and decapods, and ichthyoplankton by pelagic fish larvae and eggs. Sampling of the bilge water revealed a lower species richness and diversity compared to samples collected at the berth. Furthermore, a multivariate management analysis showed that the zooplankton composition and abundance differed significantly in autumn and summer, and was similar in winter and spring. Studies of this type represent a contribution to the knowledge of the effect of water intake systems on the ecological patterns of coastal zooplankton. Moreover, this information is useful when it comes to impact assessments and/or designing environmental monitoring programs.

Key word: Desalination, zooplankton, northern Chile, seawater intake.

INTRODUCCIÓN

El comienzo del circuito operativo de cualquier planta desalinizadora ubicada en el litoral es el sistema de captación de agua de mar (Mannan et al. 2019). Un impacto ambiental inherente a este sistema es el arrastre y succión de organismos planctónicos durante la captación de agua, y posterior mortalidad por el tratamiento que se realiza al agua de mar a través del circuito operativo antes del proceso de desalinización (i.e., cloración, remoción de sólidos suspendidos) (Lattermann 2010, INODÚ 2017).

Conocer la composición y abundancia del ensamble zooplanctónico succionado y arrastrado por el sistema de captación es una necesidad actual debido al potencial impacto producido en el ecosistema marino costero, y por sus implicancias en la eficiencia operativa de este tipo de industria (Lattermann 2010, Mannan et al. 2019). Debido a lo anterior, en plantas desalinizadoras es un requisito previo

a su operación, diseñar estrategias de monitoreo y control de organismos succionados durante la captación de agua y arrastrados hacia el circuito operativo (Lattermann & Hopner 2008, Rajagopal & Jenner 2012). Bajo el supuesto de alta productividad primaria y secundaria del sistema marino costero (Acuña et al. 1989), se ha sugerido un efecto mínimo en los organismos planctónicos que habitan en el entorno del circuito operativo, particularmente donde se ubica el sistema de captación y de descarga de aguas (Roberts et al. 2010, INODÚ 2017). Actualmente, independiente de la estrategia de monitoreo y control que se considere, todavía hay incertidumbre en la estimación de la magnitud del impacto, particularmente en la composición y abundancia del zooplankton en el entorno geográfico local donde está ubicada la planta desalinizadora (INODÚ 2017).

El zooplankton es un importante componente trófico en la columna de agua del ecosistema marino costero de la corriente de

Humboldt (Thiel et al. 2007); ya que vinculan las tramas tróficas costeras con las oceánicas (Tutasi & Escribano 2020), así como también la producción primaria con los niveles tróficos más altos (e.g., peces pelágicos) (Acuña et al. 1989). Además, se ha reconocido que el zooplancton es importante para el flujo vertical de partículas en la columna de agua (González et al. 1998, Thiel et al. 2007). Tomando en consideración el rol ecológico que cumple el zooplancton en los ecosistemas costeros, resulta útil como indicador de perturbaciones antropogénicas en áreas litorales (Gorokhova et al. 2016, Serranito et al. 2016).

Una actividad básica para determinar la respuesta del zooplancton costero al atrapamiento y succión del sistema de captación de una planta desalinizadora es la estimación de la abundancia y descripción de la composición del ensamble zooplanctónico a escala local. Para obtener este tipo de información es necesario diseñar un experimento observacional cuantitativo adecuado que establezca el potencial impacto que produce la demanda de agua de mar de una desaladora sobre el ensamble zooplanctónico que habita en la columna de agua del entorno. Frecuentemente, los potenciales impactos de este tipo de actividad industrial han sido establecidos indirectamente a través de análisis estadísticos (i.e. Pérdida de Adultos Equivalentes), intentando estimar la relación entre el zooplancton y las especies bentónicas o pelágicas de interés comercial (ARCADIS 2010, INODÚ 2017); no obstante, es necesario evaluar empíricamente este supuesto.

El presente estudio describe la composición y abundancia del zooplancton encontrado en la sentina del sistema de captación de aguas de la planta desalinizadora de Minera Candelaria y la compara con la registrada en el entorno marino costero aledaño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio de la composición y abundancia del zooplancton fue realizado en la sentina del sistema de captación de agua de mar de la planta desalinizadora de la Compañía Minera Candelaria (27°03'07,44" S, 70°50'29,05" O) (Fig. 1). En este sistema, la captación de agua de mar es directa y submarina, generando un impacto mínimo durante la operación (ARCADIS 2010), debido a las medidas de mitigación contra el atrapamiento y arrastre de organismos marinos en la columna de agua (e.g., torre de captación de aguas a más de 20 m de profundidad, mallas de protección, corriente de captación de baja velocidad) (Le Roux 2010, Maliva & Missimer 2015). La estación referencial o de contraste fue ubicada en el muelle de Puerto Punta Padrones (27°03'04,90" S; 70°50'25,89" O), aproximadamente a 50 m de la bocatoma del sistema de captación de aguas (Fig. 1).



FIGURA 1. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO (SENTINA Y MUELLE) Y DE LA TORRE DE CAPTACIÓN DE AGUAS DE LA PLANTA DESALINIZADORA EN EL AREA DE ESTUDIO (IMAGEN GOOGLE EARTH).

Location of the sampling sites (bilge and pier) and the tower of seawater intake of the desalination plant in the study area (Google Earth image).

Metodología

Las muestras de zooplankton fueron obtenidas mensualmente desde la sentina y el muelle, entre mayo del 2018 y enero del 2019, en un día de la última semana del mes durante el amanecer (06 a 08 h, am) y el atardecer (19 a 21 h, pm), considerando la variabilidad inherente de la distribución y abundancia del zooplankton en la columna de agua. Las muestras fueron tomadas usando una red cilíndrica cónica con una abertura de boca de 30 cm de diámetro y de 202 μm de trama, considerando los protocolos de pesca planctónica, estandarización y fijación de muestras (UNESCO 1968, Palma & Kaiser 1993, Robinson et al. 1996). El volumen de agua filtrada por la red planctónica fue estimado con un flujómetro mecánico MF 315 Trioms Technology PTE Ltd., estandarizando la abundancia obtenida a 100 m³. El arrastre de la red fue de tipo vertical desde el fondo hasta la superficie de la columna de agua. Así, el arrastre de la red en la sentina fue desde los 6 m de profundidad, que corresponde a la profundidad del pozo, hasta la superficie; mientras que, en el sector muelle, el arrastre de la red abarcó la columna de agua entre 20 m de profundidad y la superficie, tomando dos muestras en cada muestreo. Las muestras fueron etiquetadas y preservadas con formalina tamponada al 5%; posteriormente, en laboratorio fueron analizadas en completitud, separando y clasificando los individuos taxonómicamente usando como referencia a Boltovskoy (1999), Palma & Kaiser (1993) y Aravena & Palma (2002). En cada muestreo mensual fueron analizadas cuatro muestras en la sentina y cuatro en el muelle.

La composición y abundancia del zooplankton en la sentina y el muelle fue caracterizada usando la constancia numérica (porcentaje de estaciones con presencia de cada taxa) y la dominancia numérica de las espe-

cies (porcentaje de la abundancia total de individuos de cada taxa) (Bodenheimer 1955). También se usaron distintos índices comunitarios estimados con el software PRIMER v7 (Clarke & Gorley 2015), tales como: riqueza de especies (S), abundancia (N), índice de Shannon-Wiener (H') e índice de Simpson (λ'). Para realizar los análisis estadísticos, los muestreos mensuales del zooplankton fueron agrupados por estación del año.

Para comparar los índices comunitarios entre sitios y estaciones del año se utilizó análisis de varianza (ANDEVA de dos vías). El sitio de muestreo (sentina, muelle) y la estación del año (otoño, invierno, primavera, verano) fueron los factores principales en el ANDEVA, mientras que los índices comunitarios (riqueza de especies, abundancia, índices de diversidad) fueron las variables respuesta. Previo al análisis se comprobó la homogeneidad de las varianzas mediante el test de Bartlett; y cuando fue necesario los datos fueron transformados aplicando $\log(x+1)$. Los grupos homogéneos fueron detectados usando la prueba de Tukey (Sokal & Rohlf 1981).

La composición y abundancia del zooplankton de la sentina y del muelle fue comparada estacionalmente con análisis multivariado de ordenación, usando el software PRIMER v7 (Clarke & Gorley 2015). Previo al análisis, los datos fueron transformados usando la ecuación $\log(x+1)$ para normalizar la varianza (Clarke et al. 2006). La estructura del ensamble zooplankton en la sentina y el muelle fue representada gráficamente usando escalamiento no métrico multidimensional (nMDS). Para detectar diferencias entre sitios de muestreo en cada estación del año, se aplicó análisis de similitud (ANOSIM). El ANOSIM es una prueba no paramétrica basada en permutaciones (equivalente al análisis de varianza de una vía), que caracteriza un rango de valores promedio de medidas de di-

similaridad de Bray-Curtis de la abundancia entre y en las muestras (Clarke et al. 2006). El estadístico R varía entre -1 y +1, donde el cero representa la hipótesis nula sin diferencias al comparar entre sentina y muelle. Para identificar las especies que más contribuyen a las diferencias en la estructura del zooplankton entre sitios de muestreo se efectuó un Análisis de Similitud Porcentual (SIMPER) (Clarke & Gorley 2015).

RESULTADOS

El zooplankton succionado y arrastrado hasta la sentina del sistema de captación de aguas de la planta desalinizadora estuvo constituido por 30 taxa (13 órdenes, 18 clases y 27 familias). En cambio, el zooplankton en el mar circundante a la bocatoma de agua en el sector del muelle de puerto Padrones estuvo constituido por 33 taxa (13 órdenes, 18 clases y 25 familias) (Tabla 1). Un taxa (i.e., *Conchoecia* sp.) fue registrado sólo en la sentina, mientras que cuatro taxa (i.e., *Caprella equilibra*, zoea de *Pinnixa transversalis*, *Thalia democrática*, larva de *S. bentincki*) sólo en el muelle.

Del total de taxa registrados, considerando la sentina y la estación referencial, 17 fueron holoplanctónicos, 13 meroplanctónicos, y 4 corresponden a ictioplancton (Tabla 1). El holoplancton, tanto en la sentina como en el muelle, estuvo dominado numéricamente por copépodos (*Calanus chilensis*, *Oithona* sp.); mientras que, el meroplancton por estadios larvales de cirripedios (i.e., cipris, nauplios). El ictioplancton estuvo constituido por huevos y larvas de dos peces pelágicos clupeidos (i.e., anchoveta, sardina común).

Los taxa más representativos del zooplankton en la sentina fueron los copépodos (*C. chilensis*, *Oithona* sp.), el poliqueto *Tomopteris* sp., el anfípodo *Melita*

sp., y larvas cipris y nauplios de cirripedios, que en conjunto contuvieron el 80% de la abundancia total; mientras que en el muelle se repitieron los copépodos y las larvas de cirripedios, y junto con *Oikopleura albicans* y *Evadne nordmanni* representaron el 74% de la abundancia total (Tabla 1). El resto de los taxa registrados tuvieron una menor representatividad, con valores por debajo del 2,9% en la sentina y del 4,7% en el muelle, respectivamente.

Los índices de diversidad del ensamble zooplanctónico tuvieron diferencias significativas entre sitios de muestreo y estaciones del año (Tabla 2, Fig. 2). La riqueza de especies en la sentina fue menor que en el muelle, mientras que la abundancia no varió entre sitios de muestreo, aunque en ambos casos fue significativamente mayor en verano (Tabla 2, Fig. 2). Los índices de diversidad en la sentina también tuvieron un valor más bajo que en el muelle, pero con un aumento significativo en invierno y primavera (Tabla 2, Fig. 2).

El análisis de similitud (ANOSIM) y de ordenamiento multidimensional (nMDS) mostró que la composición y abundancia del zooplankton varió significativamente entre sitios y entre estaciones del año (Tabla 3, Fig. 3), con diferencias mínimas entre ensambles ($R < 0,25$). Estacionalmente, la estructura de las comunidades del zooplankton en la sentina difirió significativamente de la encontrada en el muelle en los muestreos de otoño y verano; en cambio, en invierno y primavera, el zooplankton registrado en la sentina fue semejante al encontrado en el muelle, con algunas diferencias en composición y abundancia (Tabla 3, Fig. 3).

El análisis de similitud porcentual (SIMPER) mostró una mayor similitud en la composición y abundancia del zooplankton en el muelle (49,0%) que en la sentina (44,4%), con una disimilitud entre ambos sitios de muestreo de 51,9%.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Especie/taxa	Sentina		Muelle		
					Cons (%)	Frec (%)	Cons (%)	Frec (%)	
Cnidaria	Hydrozoa	Anthoathecata	Proboscidiactylidae	<i>Proboscidiactyla flavicirrata</i>	1	36	2,3	69	1,9
Cnidaria	Hydrozoa	Leptothecata	Phialellidae	<i>Phialella quadrata</i>	1	31	1,6	61	2,7
Cnidaria	Hydrozoa	Siphonophorae	Sphaeronectidae	<i>Sphaeronectes koellikeri</i>	1	3	0,5	6	0,4
Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Tomopteridae	<i>Tomopteris</i> sp.	1	69	7,3	61	3,2
Annelida	Polychaeta	Phyllodocida	Syllidae	<i>Syllida</i> indet.	2	E	1,5	36	0,2
Arthropoda	Brachiopoda	Cladocera	Podonidae	<i>Evadne nordmanni</i>	1	28	2,1	75	6,5
Arthropoda	Copepoda	Calanoida	Calanidae	<i>Calanus chilensis</i>	1	92	35,6	100	35,1
Arthropoda	Copepoda	Cyclopoidea	Oithonidae	<i>Oithona</i> sp.	1	67	10,4	83	10,3
Arthropoda	Maxillopoda	Sessilia	Cirripedia	<i>Cirripedia indet.</i>	2	F	4,3	78	5,3
Arthropoda	Maxillopoda	Sessilia	Cirripedia	<i>Cirripedia indet.</i>	2	G	9,9	78	8,3
Arthropoda	Ostracoda	Halocyprida	Halocyprididae	<i>Conchoecia</i> sp.	1	11	0,2	0	0,0
Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Gammaridae	<i>Melita</i> sp.	1	75	12,2	42	4,7
Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Hyperiidae	<i>Hyperia</i> sp.	1	3	0,1	11	0,8
Arthropoda	Malacostraca	Amphipoda	Caprellidae	<i>Caprella equilibra</i>	2	0	0,0	8	0,1
Arthropoda	Malacostraca	Isopoda	Cirrolanidae	<i>Cirrolana</i> sp.	1	14	0,4	6	0,0
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Hippidae	<i>Emerita analoga</i>	2	A	0,2	8	0,1
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Platyxanthidae	<i>Homalaspis plana</i>	2	A	0,4	64	2,5
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Grapsidae	<i>Leptograpsus variegatus</i>	2	A	0,2	25	0,5
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Portunidae	<i>Ovalipes punctatus</i>	2	A	0,2	22	0,2
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Paguridae	<i>Pagurus</i> sp.	2	A	0,1	36	0,6
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Pinnotheridae	<i>Pinnixa transversalis</i>	2	A	0,0	19	0,4
Arthropoda	Malacostraca	Decapoda	Munidiidae	<i>Pleuconcodes monodon</i>	2	A	0,1	28	0,4
Mollusca	Gastropoda	Neogastropoda	Muricidae	<i>Concholepa concholepa</i>	2	B	1,4	11	0,7
Mollusca	Mytilidae	Mytilida	Mytilidae	<i>Mytilus</i> sp.	2	B	1,6	19	0,6
Bryozoa	Stenolaemata	Cyclostomatida	Tubuliporidae	<i>Tubulipora</i> sp.	1	H	0,7	50	0,5
Chaetognatha	Sagittioidea	Aphragmophora	Sagittidae	<i>Flaccisagitta enflata</i>	1	3	0,1	14	0,2
Chordata	Thaliacea	Salpida	Salpidae	<i>Thalia democratica</i>	1	0	0,0	6	0,0
Chordata	Appendicularia	Copelata	Oikopleuridae	<i>Oikopleura albicans</i>	1	39	1,5	75	8,4
Chordata	Appendicularia	Copelata	Oikopleuridae	<i>Oikopleura fusiformis</i>	1	19	1,0	42	0,8
Chordata	Appendicularia	Copelata	Oikopleuridae	<i>Oikopleura longicauda</i>	1	25	0,8	42	0,6
Chordata	Actinopterygii	Clupeiformes	Clupeidae	<i>Strangomera bentincki</i>	3	C	0,3	53	0,7
Chordata	Actinopterygii	Clupeiformes	Clupeidae	<i>Strangomera bentincki</i>	3	D	0,0	3	0,0
Chordata	Actinopterygii	Clupeiformes	Engraulidae	<i>Engraulis ringens</i>	3	C	2,9	67	2,3
Chordata	Actinopterygii	Clupeiformes	Engraulidae	<i>Engraulis ringens</i>	3	D	0,2	50	0,6

TABLA 1. COMPOSICIÓN TAXONÓMICA, CONSTANCIA (%) Y DOMINANCIA (%) DEL ZOOPLANKTON EN LA SENTINA Y EN EL MUELLE. (1. HOLOPLANKTON, 2. MEROPLANKTON, 3. ICTIOPLANKTON, A. ZOEAE/MEGALOPA, B. VELIGER DE MOLUSCOS, C. HUEVOS DE PECES, D. LARVAS DE PECES, E. ESTOLÓN DE POLIQUETOS, F. CIPRIS CIRRIPEDIOS, G. NAUPLIO CIRRIPEDIOS Y H. LARVA CIFONAUTA).

Taxonomic composition, constancy (%) and dominance (%) of zooplankton in the study area, in the bilge and in the pier. (1. Holoplankton, 2. Meroplankton, 3. Ichthyoplankton, A. Zoea/Megalopa, B. Mollusk veliger, C. Fish eggs, D. Fish larvae, E. Polydchaete stolon, F. Barnacle cypris and G. Barnacle nauplius, H. Cyfonaunt larvae).

Descriptor	Factor	GL	CM	Valor F	Valor P	Prueba de Tukey
Riqueza de especies	Sitio (S)	1	0,685	56,058	0,000	Mue > Sen
	Estación (E)	3	0,261	21,328	0,000	Ver > (Pri = Inv = Oto)
	S x E	3	0,045	3,657	0,017	
Abundancia	Sitio (S)	1	0,007	0,096	0,758	Mue = Sen
	Estación (E)	3	0,955	12,195	0,000	Ver > (Oto = Pri = Inv)
	S x E	3	0,162	2,064	0,114	
Diversidad H'	Sitio (S)	1	0,008	32,314	0,000	Mue > Sen
	Estación (E)	3	0,005	20,448	0,000	(Inv = Pri) > (Ver = Oto)
	S x E	3	0,001	5,424	0,002	
Diversidad λ'	Sitio (S)	1	0,008	32,314	0,000	Mue > Sen
	Estación (E)	3	0,005	20,448	0,000	(Inv = Pri) > (Ver = Oto)
	S x E	3	0,001	5,424	0,002	

TABLA 2. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANDEVA) USANDO EL SITIO (SENTINA, MUELLE) Y ESTACIÓN (OTOÑO, INVIERNO, PRIMAVERA, VERANO) COMO FACTORES PARA EVALUAR LA HIPÓTESIS QUE LA ESTRUCTURA DEL ZOOPLANCTON ES MODIFICADA POR EL SITIO Y LA ESTACIÓN. EL VALOR P DESTACADO EN NEGRITA INDICA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS.

Analysis of Variance (ANOVA) using the site (bilge, pier) and season (autumn, winter, spring, summer) as the factor to evaluate the hypothesis that the zooplankton structure is modified by the site and the season of the year. The P value highlighted in bold indicates significant differences.

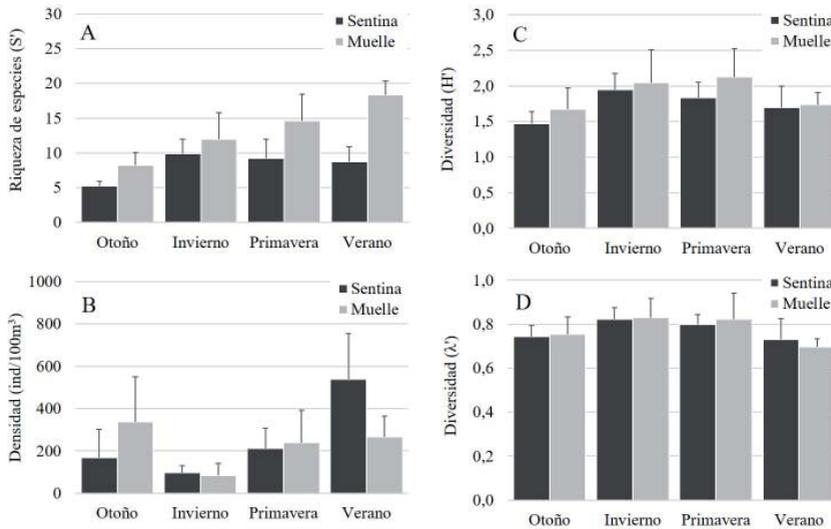


FIGURA 2. VARIACIÓN ESTACIONAL DE LA RIQUEZA DE ESPECIES (A), ABUNDANCIA ESTANDARIZADA (B), ÍNDICE DE DIVERSIDAD DE SHANNON-WIENER H' (C), E ÍNDICE DE DIVERSIDAD DE SIMPSON λ' PARA EL ZOOPLANCTON ENCONTRADO EN LA SENTINA Y EN EL MUELLE. LA LINEA SOBRE LA BARRA REPRESENTA UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.

Seasonal variation of species richness (A), standardized abundance (B), Shannon-Wiener H' diversity index and Simpson λ' diversity index for assemble of zooplankton found in the bilge and the pier. The line on the bar denote the standard deviation.

Comparación	Estadístico R	Nivel de significancia (%)
Sentina vs Muelle	0,365	0,01
Otoño - Invierno - Primavera -Verano	0,114	0,01
Otoño Sentina vs Muelle	0,528	0,02
Invierno Sentina vs Muelle	0,060	22,8
Primavera Sentina vs Muelle	0,095	6,1
Verano Sentina vs Muelle	0,864	0,02

TABLA 3. ANÁLISIS DE SIMILITUD (ANOSIM) COMPARANDO EL ZOOPLANKTON EN SENTINA Y MUELLE POR ESTACIÓN DEL AÑO. EL NIVEL DE SIGNIFICANCIA PORCENTUAL DESTACADO EN NEGRITA INDICA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS.

Analysis of Similarity (ANOSIM) comparing the zooplankton in the bilge and the pier by season. The percentage significance level highlighted in bold indicates significant differences.

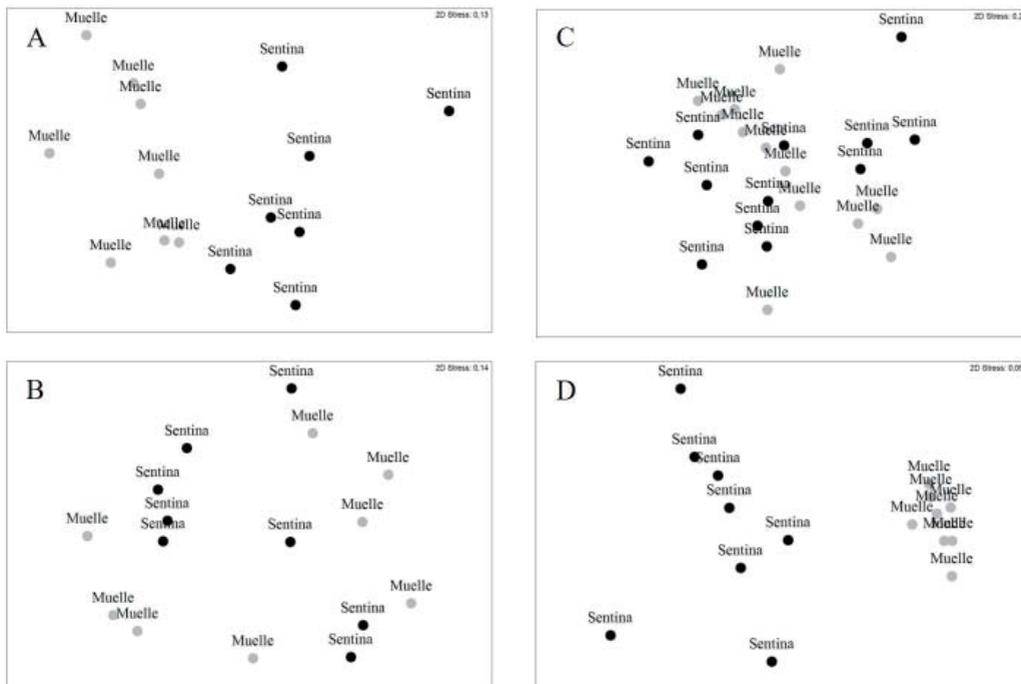


FIGURA 3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA (NMDS) DE LA SIMILITUD ENTRE LOS ENSAMBLES DEL ZOOPLANKTON ENCONTRADO EN LA SENTINA Y EL MUELLE EN OTOÑO (A), INVIERNO (B), PRIMAVERA (C), Y VERANO (D).

Graphical representation (nMDS) of the similarity between the assemblages of zooplankton found at bilge and pier in autumn (A), winter (B), spring (C) and summer (D).

Al comparar la estructura de las comunidades del zooplancton entre sentina y muelle por estación del año, se detectó una mayor disimilitud en otoño (67,1%) que en invierno (50,8%), primavera (48,3%), y verano (45,8%).

Los taxa que más contribuyeron a las diferencias en abundancia del zooplancton en la sentina respecto al muelle variaron de acuerdo a la estación del año (Tabla 4). En otoño, seis taxa holoplanctónicos fueron los que más contribuyeron a la disimilitud entre sitios, de los cuales *Melita* sp. y *Tomopteris* sp. fueron más abundantes en la sentina, y los otros (*C. chilensis*, *E. nordmanni*, *P. quadrata*, *O. albicans*) en el muelle (Tabla 4). En invierno, la disimilitud también estuvo determinada por nueve taxa, de los cuales tres taxa holoplanctónicas (*Tomopteris* sp., *O. albicans*, larva cifonauta de *Tubulipora* sp.) y tres taxa meroplanctónicas (larvas cypriis y nauplios de cirripedios, larvas de mitílidos) fueron más abundantes en la sentina y tres taxa holoplanctónicas (*Oithona* sp., *P. flavicirrata*, *E. nordmanni*) en el muelle (Tabla 4). En primavera, la disimilitud estuvo determinada por nueve taxa, de los cuales dos taxa holoplanctónicos (*Melita* sp., *P. flavicirrata*) fueron más abundantes en la sentina, mientras que los otros taxa holoplanctónicos (*Tomopteris* sp., *E. nordmanni*, *Oithona* sp.), meroplanctónicos (larvas cypriis y nauplios de cirripedios, larvas zoea de *Homalaspis plana*) e ictioplancton (huevos de *E. ringens*) en el muelle (Tabla 4). La disimilitud durante verano estuvo determinada por ocho taxa, de los cuales tres taxa holoplanctónicos (*Melita* sp., *Tomopteris* sp., *P. quadrata*), uno meroplanctónico (larvas nauplios de cirripedios), y huevos de *E. ringens* fueron más abundantes en la sentina, y tres taxa (larvas de *H. plana*, larvas de *Pagurus* sp., *E. nordmanni*) estuvieron presentes solo en el muelle (Tabla 4).

DISCUSIÓN

La composición y abundancia del zooplancton en la sentina del sistema de captación de aguas de la planta desalinizadora fue menor a la registrada en el mar circundante a la bocatoma de agua en el sector del muelle de puerto Padrones, con cambios estacionales en ambos sitios de muestreo. La diversidad del zooplancton aumentó en invierno y primavera; mientras que, la estructura de la comunidad zooplanctónica de la sentina difirió significativamente de la encontrada en el muelle en otoño y verano, pero fue similar en invierno y primavera.

La fracción del zooplancton encontrado en la columna de agua que es succionado y atrapado por el sistema de captación de aguas hacia el circuito operativo podría tener implicancias en la eficiencia operativa de la planta desalinizadora (Lattermann 2010, Mannan et al. 2019). En general, las plantas desalinizadoras contemplan estrategias de monitoreo y control de organismos arrastrados durante la captación de agua y succionado hacia el circuito operativo (Lattermann & Hopner 2008, Rajagopal & Jenner 2012). Una estrategia para evitar la succión de organismos que fue implementada en el diseño del sistema de captación de la desalinizadora de la Compañía Minera Candelaria es la facilitación del paso de agua de mar a la sentina mediante gravedad, disminuyendo la velocidad de ingreso (ARCADIS 2010) y, por lo tanto, la probabilidad de succionar organismos planctónicos (Le Roux 2010, Maliva & Missimer 2015). Complementariamente, la bocatoma desde donde ingresa el agua de mar al circuito operativo se encuentra a 28 metros de profundidad de manera de disminuir la probabilidad de succionar larvas y otros componentes del zooplancton; bajo el supuesto que los organismos zooplanctónicos presentan una mayor concentración en los estratos su-

Especie	Otoño			Invierno			Primavera			Verano		
	X Sen	X Mue	X Dis %Cont	X Sen	X Mue	X Dis %Cont	X Sen	X Mue	X Dis %Cont	X Sen	X Mue	X Dis %Cont
<i>Calanus chilensis</i>	1	2,01	4,37 5,52 8,24	0,84	0,89	2,63 5,18	1,74	2,45	3,06 6,33	0,00	1,87	3,00 6,56
<i>Evadne nordmanni</i>	1	0,00	1,93 4,27 6,37				2,51	2,00	3,38 7,01	2,95	0,00	4,72 10,31
<i>Melita</i> sp.	1	3,84	1,20 7,10 10,58	2,01	1,76	3,20 6,30						
<i>Oikopleura albicans</i>	1	0,93	4,02 7,54 11,25	1,83	1,96	3,15 6,22	2,86	3,06	2,50 5,17			
<i>Oithona</i> sp.	1	0,00	2,25 4,98 7,42							1,65	0,48	2,43 5,32
<i>Phialella quadrata</i>	1			1,09	1,35	2,97 5,84	1,70	1,20	2,86 5,93			
<i>Proboscoidactyla flavicirrata</i>	1	2,10	0,16 4,96 7,39	1,66	0,89	3,33 6,56	1,16	2,11	3,12 6,45	3,44	1,74	2,73 5,96
<i>Tomopteris</i> sp.	1			0,83	0,68	2,25 4,43						
<i>Tubulipora</i> sp.	1			1,86	1,35	3,50 6,90	1,34	2,21	3,03 6,28	3,40	3,28	2,20 4,81
<i>Cirripedia (cipris)</i>	2			1,60	1,03	3,31 6,52	2,42	2,60	2,94 6,09			
<i>Cirripedia (nauplios)</i>	2						0,48	1,36	2,22 4,60	0,00	1,86	3,04 6,63
<i>Homalaspis plana</i>	2											
Mytilidae	2			1,15	0,09	3,00 5,91						
<i>Pagurus</i> sp.	2						0,79	2,16	3,09 6,40	0,00	1,52	2,43 5,30
<i>Engraulis ringens</i> (huevos)	3									2,62	1,39	2,49 5,45
Total			51,25			53,86			54,26			50,34

TABLA 4. SIMILITUD PORCENTUAL (SIMPER) DE LAS ESPECIES QUE APORTAN DIFERENCIAS EN EL ZOOPLANKTON ENCONTRADO EN LA SENTINA Y EL MUELLE POR ESTACIÓN DEL AÑO. EL PORCENTAJE DE CORTE ENTRE PARES DE COMPARACIONES FUE MAYOR AL 50%. X SEN: ABUNDANCIA PROMEDIO EN LA SENTINA; X MUE: ABUNDANCIA PROMEDIO EN EL MUELLE; X DIS: DISIMILITUD PROMEDIO; % CONT: CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE DISIMILITUD GENERAL SEGÚN SITIO DE MUESTREO (SENTINA VS MUELLE). (1. HOLOPLANCTON, 2. MEROPLANCTON, 3. ICTIOPLANCTON).

Similarity Percentage (SIMPER) of the species that bring differences in the zooplankton found in the bilge and the pier by season of the year. The cutoff percentage between pairs of comparisons was higher than 50%. X Sen: average abundance in the bilge; X Mue: average abundance in the pier; X Dis: average dissimilarity; % Cont: percentage contribution of general dissimilarity according the sampling site (bilge vs pier). (1. Holoplankton, 2. Meroplankton, 3. Ichthyoplankton).

periores de la columna de agua (Montecino & Lange 2009, Torreblanca et al. 2016). Aunque lo anterior requiere de más estudios (e.g., aplicando muestreos estratificados, utilizando simultáneamente distintos tipos de redes para aumentar la representatividad de taxa en el zooplancton), estas medidas de mitigación podrían explicar la menor riqueza y diversidad registrada dentro de la sentina respecto a lo encontrado en la columna de agua en el muelle.

La composición y abundancia del zooplancton circundante al sistema de captación y, por tanto, arrastrado a la sentina durante el período de estudio es semejante a lo previamente descrito para el ecosistema temperado costero de la corriente de Humboldt (e.g., Torreblanca et al. 2016). Tomando en cuenta la alta productividad de este ecosistema en la costa (Thiel et al. 2007), se ha sugerido un efecto mínimo en los organismos planctónicos que habitan en el entorno del circuito operativo, particularmente donde se ubica el sistema de captación de aguas (Roberts et al. 2010, INODÚ 2017). El supuesto de alta productividad local se sustenta en que los copépodos costeros *C. chilensis* y *Oithona* sp. fueron el grupo más representativo en abundancia del holoplancton en la sentina y en el muelle. Los copépodos son el grupo dominante del zooplancton en áreas costeras con alta productividad primaria en la columna de agua debido a que presentan altas tasas de crecimiento poblacional (Thiel et al. 2007, Escribano et al. 2012); por lo que, algunas especies han sido propuestas como indicadores de productividad costera, por ejemplo *C. chilensis* en áreas de surgencia del norte de Chile (Escribano 1998, Escribano & McLaren 1999).

Los estadios de desarrollo nauplio y larva cipris de cirripedios fueron el grupo más representativo en abundancia del meroplancton

en la sentina y en el muelle, y son un componente típico de la biota incrustante del norte de Chile, con una mayor disponibilidad de larvas en invierno y primavera (Lagos et al. 2008). La presencia de larvas de cirripedios y de mitílidos en la sentina podría indicar el desarrollo de una comunidad incrustante en la infraestructura del sistema de captación de aguas (Manríquez et al. 2014). El establecimiento de biota incrustante en el sistema de captación de aguas podría tener implicancias en la eficiencia operativa de la planta desalinizadora (Lattermann 2010, Mannan et al. 2019). Sin embargo, hay varios métodos de control de la biota incrustante que son aplicados a través del circuito de desalinización y en el sistema de captación de agua (Lattermann & Hopner 2008, Rajagopal & Jenner 2012).

Los taxa que determinaron diferencias entre la sentina y el muelle son registros incidentales de especies que frecuentemente son encontrados en los ensamblajes zooplanctónicos costeros de Caldera y de localidades cercanas (Aravena & Palma 2002, Torreblanca et al. 2016, Mujica et al. 2016, Rivera et al. 2019). En general, el sistema de captación de aguas arrastra principalmente copépodos a la sentina, que tienen altas tasas de reproducción y crecimiento poblacional (Escribano et al. 2012); en cambio, especies meroplanctónicas con larvas que demoran semanas a meses en completar su desarrollo fueron menos frecuentes, lo cual sugiere un efecto menor del sistema de captación sobre el ensamblaje zooplanctónico costero. La variabilidad estacional en la composición y abundancia del zooplancton detectada en la sentina y en el muelle parece estar determinada principalmente por los procesos de surgencia costera (Torreblanca et al. 2016, Rivera et al. 2019). En el norte de Chile, la surgencia costera ocurre durante todo el año, pero aumenta en frecuencia e intensidad durante primavera y

verano (Lagos et al. 2008), produciendo un incremento en la biodiversidad y abundancia del zooplancton en la costa (Thiel et al. 2007, Torreblanca et al. 2016, Rivera et al. 2019). Además, el zooplancton vincula las tramas tróficas costeras con las oceánicas, la producción primaria (e.g., fitoplancton) con los niveles tróficos superiores (e.g., peces pelágicos), y el flujo vertical de partículas en la columna de agua (González et al. 1998, Mujica et al. 2016, Tutasi & Escribano 2020), generando procesos ecológicos dinámicos en el espacio (e.g., sentina vs muelle) y en el tiempo (e.g., estaciones del año), que requieren de estudio

La caracterización del zooplancton costero utiliza simultáneamente distintos tipos de redes para capturar la máxima diversidad y abundancia de organismos en la columna de agua (UNESCO 1968). Por ejemplo, para describir la dinámica estacional del zooplancton en bahía Totoralillo norte en la Región de Coquimbo (Torreblanca et al. 2016), se utilizó una red epineustónica para capturar el plancton en el estrato superficial de la columna de agua (0-5 m) (Disalvo 1988), y una red bongo en el estrato subsuperficial de la columna de agua (5-10 m) (Palma & Kaiser 1993), ambas remolcadas por una embarcación; junto con una red WP-2 para capturar el plancton en el estrato inferior de la columna de agua (>10 m de profundidad), que fue arrastrada verticalmente en un punto fijo de muestreo (Torreblanca et al. 2016). Considerando la restricción de espacio en el desagüe de la sentina del sistema de captación de aguas de la planta desalinizadora, en este estudio sólo se utilizó la red de arrastre vertical en un punto fijo para obtener las muestras de plancton en la sentina y en el muelle. Por lo tanto, este estudio debería tener una subrepresentación de la composición y abundancia del zooplancton costero en comparación con lo encontrado en la sentina. Este inconveniente metodológico es un aspecto que debe ser tomado en cuenta

en futuros estudios.

La interacción entre los procesos ecológicos del zooplancton y el uso industrial del borde costero requiere ser profundizado a través de, por ejemplo, un monitoreo continuo como el realizado en este estudio, pero a largo plazo. Continuar con el monitoreo de la composición y abundancia del zooplancton en la sentina del sistema de captación de agua, contrastándolo con el zooplancton encontrado en el entorno costero, es una oportunidad que, a largo plazo, podría ayudar a construir un indicador ecológico de calidad de aguas marinas costeras o un estimador empírico de mortalidad de larvas de especies de interés económico arrastradas por el sistema de captación (Lattermann 2010, INODÚ 2017); así como para detectar especies invasoras planctónicas (de Oliveira et al. 2018). Estudios de este tipo también contribuyen al conocimiento del efecto de los sistemas de captación de aguas en los patrones ecológicos del zooplancton costero. Además, esta información es útil al momento de evaluar los impactos y/o al elaborar programas de vigilancia del medio ambiente marino.

AGRADECIMIENTOS

CEAMAR agradece el financiamiento de Minera Candelaria para el desarrollo de este estudio, la ayuda en terreno de I. Quiroz, C. Varela y E. Peñalver, y la ayuda en gabinete de N. Piaget y R. Valdebenito. Los autores agradecen los constructivos comentarios al manuscrito de MSc. María Loreto Torreblanca (www.caliptopis.cl) y del Dr. Álvaro Palma (www.fisioaqua.cl).

LITERATURA CITADA

- ACUÑA E, J MORAGA & E URIBE (1989) La zona de Coquimbo: un sistema nerítico de surgencia de alta productividad. *Revista de la Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS) (Número Especial)*: 145-157.
- ARAVENA G & S PALMA (2002) Identificación taxonómica de las apendicularias capturadas en aguas epipelágicas de la zona norte de Chile (Tunicata, Appendicularia). *Revista chilena de Historia Natural* 75(2): 307-325.
- ARCADIS (2010) Estudio de Impacto Ambiental Planta Desalinizadora de Minera Candelaria: Línea Base Medio Marino. 241 pp.
- BODENHEIMER F (1955) *Précis d'écologie animale*. Editorial Payot, París.
- BOLTOVSKOY D (1999) South Atlantic zooplankton. Backhuys Publishers, Leiden 1.627 pp.
- CLARKE KR & RN GORLEY (2015) Getting started with PRIMER v7. PRIMER-E, Plymouth 296 pp.
- CLARKE KR, PJ SOMERFIELD & MG CHAPMAN (2006) On resemblance measures for ecological studies, including taxonomic dissimilarities and a zero-adjusted Bray-Curtis coefficient for denuded assemblages. *Journal Experimental Marine Biology and Ecology* 330: 55-80.
- DE OLIVEIRA SOARES M, CC CAMPOS, NMO SANTOS, H DE SOUSA BARROSO, EMT MOTA, MOB DE MENEZES, S ROSSI & TM GARCIA (2018) Marine bioinvasions: Differences in tropical copepod communities between inside and outside a port. *Journal of Sea Research* 134: 42-48.
- DISALVO LH (1988) Observations on the larval and postmetamorphic life of *Concholepas concholepas* (Bruguière, 1789) in laboratory culture. *Veliger* 30: 358-368
- ESCRIBANO R (1998) Population dynamics of *Calanus chilensis* from northern Chile. *Fisheries Oceanography* 7(3-4): 245-251.
- ESCRIBANO R & IA MCLAREN (1999) Production of *Calanus chilensis* in the upwelling area of Antofagasta, northern Chile. *Marine Ecology Progress Series* 177: 147-156.
- ESCRIBANO R, P HIDALGO, M FUENTES & K DONOSO (2012) Zooplankton time series in the coastal zone off Chile: Variation in upwelling and responses of the copepod community. *Progress in Oceanography* 97-100: 174-186.
- GOROKHOVA E, M LEHTINIEMI, L POSTEL, G RUBENE, C AMID, J LESUTIENE, L UUSITALO, S STRAKE & N DEMERECKIENE (2016) Indicator Properties of Baltic Zooplankton for Classification of Environmental Status within Marine Strategy Framework Directive. *PLoS ONE* 11(7): e0158326.
- INODÚ (2017) Implementación de la metodología de estimación del impacto por succión de recursos hidrobiológicos para proyectos sometidos al SEIA. Proyecto FIPA 2016-53. 77 pp.
- LAGOS NA, JC CASTILLA & BR BROITMAN (2008) Spatial environmental correlates of intertidal recruitment: a test using barnacles in northern Chile. *Ecological Monographs* 78(2): 245-261.
- LATTERMANN S (2010) Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants. CRC Press/Balkema, Leiden 273 pp
- LATTERMANN S & T HÖPNER (2008) Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220: 1-15.
- LE ROUX M (2010) Investigation of marine components of large direct seawater intake and brine discharge systems for desalination plants, towards development of a general design approach. MSc thesis, University of Stellenbosch, South Africa 154 pp.
- MANRÍQUEZ PH, E FICA, V ORTIZ & JC CASTILLA (2014) Bio-incrustantes marinos en el canal de Chacao, Chile: un estudio sobre potenciales interacciones con estructuras manufacturadas por el hombre. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 49(2): 243-265.
- MALIVA RG & TM MISSIMER (2015) Well Intake Systems for SWRO Systems: Design and Limitations. En: Missimer TM, B Jones & RG Maliva (eds) *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities Innovations and Environmental Impacts*. Chap-

- ter 8: 147-162, Springer, Fort Myers 544 pp.
- MANNAN M, M ALHAJA, AN MABROUKA & SG AL-GHAMBIA (2019) Examining the life-cycle environmental impacts of desalination: A case study in the State of Qatar. *Desalination* 452: 238-246
- MONTECINO V & CB LANGE (2009) The Humboldt Current System: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. *Progress in Oceanography* 83: 65-79.
- MUJICAA, ML NAVA, K MATSUDA & A VARGAS (2016) Distribución y abundancia de huevos de *Engraulis ringens* en la zona centro-norte de Chile (25,0°-31,5°S) en febrero 2008-2014. *Latin American Journal of Aquatic Research* 44(1): 65-75.
- PALMA S & K KAISER (1993) Plancton marino de aguas chilenas. Ediciones Universitarias de Valparaíso, Valparaíso 151 pp.
- RAJAGOPAL S & HA JENNER (2012) Biofouling in Cooling Water Intake Systems: Ecological Aspects. In: S Rajagopal, H Jenner & V Venugopalan (eds) *Operational and Environmental Consequences of Large Industrial Cooling Water Systems*: 13-32. Springer, Boston 477 pp.
- RIVERA J, G GUZMÁN & S PALMA (2019) Cross-shelf distribution of decapod larvae in a coastal upwelling zone of northern Chile: some oceanographic implications. *Continental Shelf Research* 181: 50-71.
- ROBERTS, DA, EL JOHNSTON & NA KNOTT (2010) Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research* 44(18): 5.117-5.128.
- ROBINSON CLK, DE HAY, J BOOTH & J TRUSCOTT (1996) *Standard Methods for Sampling Resources and Habitats in Coastal Subtidal Regions of British Columbia: Part 2 - Review of Sampling with Preliminary Recommendations*. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences XII 119 pp.
- SERRANITO B, A AUBERT, L STEMMANN, N ROSSI & JL JAMET (2016). Proposition of indicators of anthropogenic pressure in the Bay of Toulon (Mediterranean Sea) based on zooplankton time-series. *Continental Shelf Research* 121: 3-12.
- SOKAL RR & J ROHLF (1981) *Biometry*. WH Freeman and Co, San Francisco, 776 pp.
- THIEL M, EC MACAYA, E ACUÑA, WE ARNTZ, H BASTIAS, K BROKORDT, PA CAMUS, JC CASTILLA, L CASTRO, M CORTÉS, CP DUMONT, R ESCRIBANO, M FERNÁNDEZ, JA FAJARDO, CF GAYMER, I GÁMEZ, AE GONZÁLEZ, H GONZÁLEZ, PA HAYE, JE ILLANES, JL IRIARTE, DA LANCELLOTTI, G LUNA-JORQUERA, C LUXORO, PH MANRÍQUEZ, V MARÍN, P MUÑOZ, SA NAVARRETE, E PÁREZ, E POULIN, J SELLANES, H SEPÚLVEDA, W STOTZ, F TALA, A THOMAS, CA VARGAS, JA VÁSQUEZ & JMA VEGA (2007) The Humboldt Current system of northern and central Chile. Oceanographic processes, Ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 45: 195-344.
- TORREBLANCA ML, I PÉREZ-SANTOS, B SAN MARTÍN, E VARAS, R ZILLERUELO, R RIQUELME-BUGUEÑO, & AT PALMA (2016) Dinámicas estacionales del zooplankton en una bahía de la zona norte de Chile expuesta a condiciones de surgencias. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 51(2): 273-291.
- TUTASI P & R ESCRIBANO (2020) Zooplankton diel vertical migration and downward C flux into the oxygen minimum zone in the highly productive upwelling region off northern Chile. *Biogeosciences* 17(2): 455-473.
- UNESCO (1968) *Zooplankton sampling, Monographs on Oceanographic Methodology*. UNESCO, Paris, 174 pp.

Recibido 20/8/2020; aceptado 9/11/2020.