MAGÍSTER EN OCEANOGRAFÍA

TESIS

Variación estival de las condiciones meteorológicas y oceanográficas y su impacto en la comunidad fitoplanctónica en Bahía Chile, Isla Greenwich, Antártica

SUSANA XIMENA RODRÍGUEZ MARCONI

Viña del mar 2018

COMISIÓN DE TESIS

Profesor guía:
Director de Tesis: Dr. Italo Masotti (Facultad de Ciencias del mar y Recursos Naturales, Universidad de Valparaíso)

Co-directora: Dra. Beatriz Díez (Departamento de Genética Molecular y Microbiología, Pontificia Universidad Católica de Chile)

Profesor: Dr. Eduardo Quiroga (Escuela de Ciencias del mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)

Dedicado a mi familia y Emilia

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Italo Masotti, profesor guía de esta tesis, por la buena acogida en su laboratorio y buena disposición a la enseñanza y el apoyo de esta tesis.

A la profesora Beatriz Diez, por la buena acogida en su laboratorio y su buena disposición a apoyar esta tesis.

Al profesor Eduardo Quiroga por su buena disposición y ayuda con el análisis de datos.

Al Laboratorio de Oceanografía Biológica y Biogeoquímica de la Facultad de Ciencias del mar y de Recursos Naturales de la Universidad de Valparaíso, y al Laboratorio de Ecología Microbiana de Sistemas Extremos, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por su ayuda y apoyo durante la ejecución de esta tesis.

Al Centro meteorológico de Valparaíso, Armada de Chile, por su buena disposición a facilitar datos meteorológicos.

A mi familia por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

Comisión de tesis i
Dedicatoria ii
Agradecimientos iii
Índice iv
Resumen v
Abstract vi

INTRODUCCIÓN 1

HIPÓTESIS 7

OBJETIVOS 7

MATERIALES Y MÉTODOS 8

- **Área de estudio** 8
- **Datos de satélite** 8
- **Variables meteorológicas en Bahía Chile** 10
- **Datos bio-oceanográficos en la Bahía Chile** 10
- **Obtención de muestras para extracción de ADN y secuenciación masiva de genes 16S rRNA (cloroplastidiales)** 11
- **Análisis de datos** 12

RESULTADOS 14

- **Variación estival de las condiciones meteorológicas y oceanográficas superficiales: desde la Península Antártica hasta la Bahía Chile** 14
- **Variación estival de la biomasa, diversidad y composición, y del fitoplancton en la Bahía Chile.** 20
- **Relaciones entre las condiciones meteorológicas y oceanográficas y su influencia en la biomasa, diversidad y composicióndel fitoplancton en la Bahía Chile** 24

DISCUSIÓN 27

- **Diferencias en las condiciones meteorológicas y oceanográficas superficiales en la Península Antártica y Bahía Chile.** 27
- **Biomasa, diversidad y composición taxonómica de las comunidades fitoplanctónicas en Bahía Chile** 29
- **Influencia de variables ambientales sobre la comunidad fitoplanctónica en Bahía Chile** 32

CONCLUSIÓN 34

REFERENCIAS 35

ANEXO 1: FIGURAS Y TABLAS SUPLEMENTARIAS 39

RESUMEN

El Océano Austral y en especial la Península Antártica es una de las áreas más sensibles al cambio climático en nuestro planeta. Sus dinámicas están fuertemente afectadas por una marcada estacionalidad, formación y retroceso de hielo marino, y condiciones meteorológicas consideradas como extremas. Las comunidades de fitoplancton son la base de la trama trófica en este ecosistema y su variación está fuertemente influenciada por estas condiciones ambientales. A pesar de su importancia, datos detallados de composición y diversidad de fitoplancton junto a su respuesta a variables meteorológicas y oceanográficas publicados para esta zona son escasos. El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la variación estival, tanto temporal como espacial, del viento, temperatura superficial del mar en la Península Antártica y la Bahía Chile, y determinar su influencia en la biomasa, diversidad y composición del fitoplancton marino. Para esto, se llevó a cabo un análisis multiescala de datos satelitales de temperatura, viento, cobertura de hielo y concentración de clorofila en los veranos 2013, 2014 y 2016. Además, se estudiaron datos meteorológicos y de concentración de clorofila-a tomados *in situ* en la Bahía Chile. Junto con esto, se analizaron datos de secuenciación de masiva de 16S rRNA cloroplastidial para explorar la influencia de los datos meteorológicos y oceanográficos sobre variación en la composición y diversidad del fitoplancton. Se encontró que en 2013 la temperatura fue superior y la cobertura y hielo previa más baja que en los otros dos verano. La concentración de clorofila fue muy baja en el verano 2013, mientras que mostró valores acordes a lo reportado en los otros dos veranos, con un incremento que reflejó el desarrollo de florecimientos de fitoplancton durante los periodos de muestreo. Estos resultados sugieren que la biomasa de fitoplancton está influenciada por la variación en la temperatura y la cobertura de hielo en el invierno previo a cada verano. Los taxa fitoplanctónicos dominantes fueron Bacillariophyta, Haptophyta y Cryptophyta, los que mostraron variaciones en su abundancia relativa que parecen estar relacionada con la variación en la intensidad del viento a escala de días, lo que sugiere que las fluctuaciones de viento tienen una influencia a corto plazo sobre la variación del fitoplancton en la Bahía Chile. El presente estudio contribuye a la descripción detallada de la composición fitoplanctónica mediante secuenciación masiva de amplicones realizada por primera vez en la Bahía Chile y aporta al conocimiento de las dinámicas fitoplanctónicas en respuesta a variables ambientales en el ambiente antártico.

ABSTRACT

The Austral Ocean, and especially the Antarctic Peninsula is known to be one of the most sensitive areas to climate change in the Earth. The dynamics in this area are strongly influenced by its marked seasonality, formation and retreat of sea ice and extreme meteorological conditions. Phytoplankton communities are the base of the trophic web in this ecosystem and their variation is strongly affected by these environmental conditions. Despite their importance, detailed data about phytoplankton community composition and diversity, and their response to oceanographic and meteorological variation are scarce for this ecosystem. The goal of the present work was to study the summer variation, both spatially and temporally, of wind intensity and sea surface temperature in Chile Bay and the Antarctic Peninsula, and determinate their influence on community composition, diversity and biomass of marine phytoplankton. For this, a multiscale analysis was performed with satellite data of sea surface temperature, wind intensity, sea ice coverage and chlorophyll-a concentration during summers 2013, 2014 and 2016. Also, meteorological data and *in situ* chlorophyll-a concentration were studied. To analyse phytoplanktonic community composition and diversity, high throughput sequencing data of chloroplastidial 16S rRNA was analyzed. In 2013, both air and sea surface temperature were higher and sea ice coverage was lower than in the other two summers. Chlorophyll-a concentration was very low in 2013, while in 2014 and 2016 the values were according to previously reported values, and increased during the sampling period, suggesting the formation of phytoplankton blooms. The results suggests that phytoplankton biomass is influenced by the variation in temperature and sea ice coverage previous to each summer. Dominant phytoplanktonic taxa were Bacillariophyta, Haptophyta and Cryptophyta, and they displayed a variation in their relative abundances that seemed to be related to wind intensity variation at the daily temporal scale, which suggests that wind fluctuation has a short-term influence on phytoplankton variation in Chile Bay. The present study subscribes a detailed description of community composition by tag sequencing for the first time in Chile Bay, and contributes to the knowledge of phytoplankton dynamics in response to environmental variation in the Antarctic ecosystem.

INTRODUCCIÓN

El Océano Austral juega un rol crucial en el secuestro de carbono desde la atmósfera (Huntley et al., 1991; Sabine et al., 2004), y como importante regulador de temperatura a nivel global debido a la Corriente Circumpolar Antártica (Sun et al., 2000). Esta influencia sobre el clima a gran escala, ha hecho que los cambios que ocurren en la Antártica hayan tomado gran relevancia e interés creciente en las últimas décadas. Dentro de este ecosistema, la Península Antártica (fig. 1) ha sido una de las regiones más susceptibles al cambio climático global (Turner et al., 2005; Steig et al., 2009), mostrando incluso un incremento de temperatura cercana a los 3°C desde 1951 a 2005 en su sector oeste (Meredith et al., 2005).

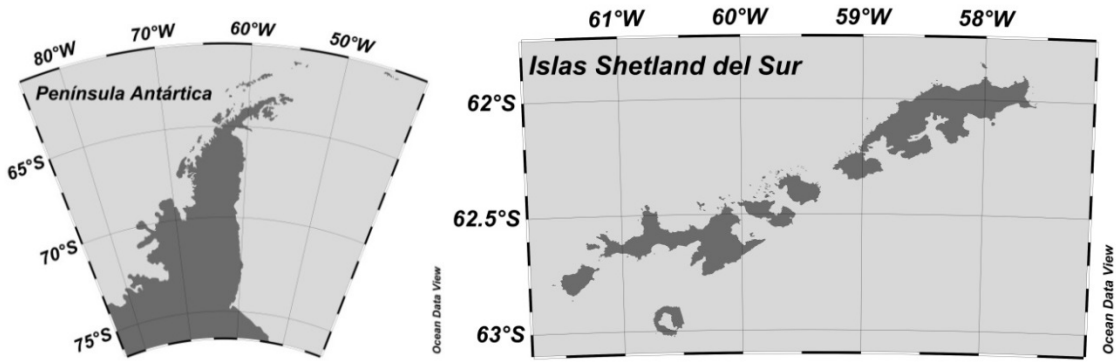

Figura 1: Península Antártica y ubicación de las Islas Shetland del sur.

La Península Antártica está sometida a variaciones ambientales consideradas como extremas, con una fuerte estacionalidad en la duración del día, observándose días de 21 horas de luz en el verano mientras que por el contrario de sólo 2 horas en el invierno. Esto tiene un efecto directo en la radiación que incide sobre la superficie y consecuentemente en la formación y derretimiento de hielo marino. Además, hay otras condiciones meteorológicas consideradas extremas tales como bajas temperaturas y fuertes vientos (King et al., 2003; Ducklow et al., 2013), aspectos que son considerados como los principales forzantes de las condiciones oceanográficas. En el caso de la temperatura, en específico la temperatura superficial del mar influye en la mantención de la estabilidad de la columna de agua durante el verano, contribuyendo en la rapidez del derretimiento del hielo marino. Por su parte el viento, muestra una correlación significativa, es decir, una coincidencia en su variación con aspectos como la estabilidad de la columna de agua (N2 en Tabla 1), y la concentración de clorofila-a (Tabla 1), tal y como se demuestra en un estudio de 19 años realizado en la Bahía Potter, Isla Rey Jorge (Schloss et al., 2012). Es decir, la temperatura y el viento han mostrado tener una influencia sobre las condiciones de la columna de agua, y en consecuencia sobre los organismos que viven ahí.

Tabla 1: Resultados de correlaciones entre variables ambientales en Bahía Potter, Isla Rey Jorge, Antártica. Correlaciones positivas se muestran en negrita. (Schloss et al., 2012).

Independent variable	Dependent variable	E1 – surface waters			E1 – deep waters			E2 – surface waters			E2 – deep waters		
		n	Kendall's τ	p	n	Kendall's τ	p	N	Kendall's τ	p	n	Kendall's τ	p
Air temperature	Sea water temperature	16	0.12	0.26	16	0.32	**p<0.05**	16	0.38	**p<0.05**	16	0.55	**p<0.01**
	Salinity	16	−0.50	**p<0.01**	16	−0.35	**p<0.05**	16	−0.33	**p<0.1**	16	−0.45	**p<0.05**
	N2	16	0.22	0.12	-	-	-	16	−0.05	0.39		-	-
	TSPM	16	0.22	0.12	16	0.27	**p<0.1 (0.07)**	16	0.33	**p<0.05**	16	0.08	0.33
	Chl-*a*	16	−0.07	0.36	16	−0.23	0.10	16	0.15	0.21	16	0.13	0.24
Wind speed	Sea water temperature	16	0.35	**p<0.05**	16	0.18	0.16	16	0.28	**p<0.1 (0.06)**	16	0.48	**p<0.01**
	Salinity	16	−0.30	**p<0.1 (0.05)**	16	−0.05	0.39	16	0.03	0.43	15	−0.05	0.40
	N2	16	0.25	**p<0.1 (0.09)**	-	-	-	16	-0.45	**<0.01**	-	-	-
	TSPM	16	0.25	**p<0.1 (0.09)**	16	0.50	**p<0.01**	16	0.53	**<0.01**	16	0.55	**p<0.01**
	Chl-*a*	16	−0.23	0.10	16	−0.40	**p<0.05**	16	−0.08	0.33	16	−0.13	0.24
Sea water temperature	Salinity	16	0.08	0.33	16	−0.23	0.10	16	−0.22	0.12	-	-	p<0.05
	N2	16	0.27	**p<0.1 (0.07)**	16	0.63	**p<00.1**	16	0.13	0.24	16	−0.10	0.29
	TPM	16	0.17	0.18	16	0.15	0.21	16	0.25	**p<0.1 (0.09)**	16	0.23	0.10
	Chl-*a*	16	0.25	**p<0.1 (0.09)**	16	**0.02**	**0.46**	16	−0.20	0.14	16	0.12	0.26
Salinity	N2	16	−0.42	**p<0.05**	16	−0.17	0.18	16	−0.48	**p<0.01**	16	−0.20	0.15
	TSPM	16	−0.22	0.12	16	−0.08	0.33	16	0.27	**p<0.1 (0.07)**	16	0.22	0.13
	Chl-*a*	16	0.13	0.24	16	0.32	**p<0.05**	16	−0.12	0.26	16	−0.30	**p<0.1 (0.06)**
N2	TSPM	16	−0.07	0.36	16	0.12	0.26	16	-0.52	**p<0.05**	16	−0.60	**p<0.01**
	Chl-*a*	16	0.15	0.21	16	0.08	0.33	16	0.01	0.50	16	−0.18	0.16
TSPM	Chl-*a*	16	−0.05	0.39	16	−0.43	**p<0.05**	16	0.05	0.39	16	0.02	0.46

En el ecosistema marino antártico, se ha demostrado que los organismos son afectados significativamente por los cambios en la columna de agua, extensión de hielo marino en el invierno (Atkinson et al., 2004) o la temperatura (Peck et al., 2004). En especial, los productores primarios, particularmente el fitoplancton, presentan una alta sensibilidad ante variables ambientales como la radiación solar, temperatura, estratificación de la columna de agua, extensión de hielo marino y viento (Ducklow et al., 2007; Garibotti et al., 2005; Montes-Hugo et al., 2009; Schloss et al., 2012; Gonçalves-Araujo et al., 2014).

El fitoplancton y condiciones favorables a su crecimiento en el ecosistema antártico

El fitoplancton, constituido por los microorganismos fotosintéticos que viven mayoritariamente en la capa superficial de la columna de agua, juega un rol crucial en los ecosistemas marinos al ser la base de la trama trófica, y tener un rol predominante en la productividad y los ciclos biogeoquímicos del océano (Falkowski et al., 2008). En este contexto, el fitoplancton de las aguas del Océano Austral, es responsable de más del 15% de la producción primaria global (Huntley et al., 1991). En específico, su biomasa está mayormente favorecida en zonas costeras (Garibotti et al., 2003) y en el periodo de verano o estival (Clarke et al., 2008) como se explicará a continuación.

La entrada de agua dulce, principalmente en el periodo estival, procedente del derretimiento del hielo marino y glaciares, así como de las precipitaciones, además de ingresar micronutrientes necesarios para el crecimiento fitoplanctónico (Dierssen et al., 2002), genera una bajada en salinidad. El agua menos salada tiene menor densidad, lo que genera que ésta se quede en la superficie de la columna de agua, generando una marcada estratificación (Piquet et al., 2011), que produce que la columna de agua se mantenga estable en su estructura. La estabilidad de la columna de agua, es un factor muy importante

para el crecimiento del fitoplancton, se ha observado un incremento en la biomasa fitoplanctónica medida como concentración de clorofila asociada a un evento previo de estabilidad en la columna de agua (fig. 2) (Piquet et al., 2011).

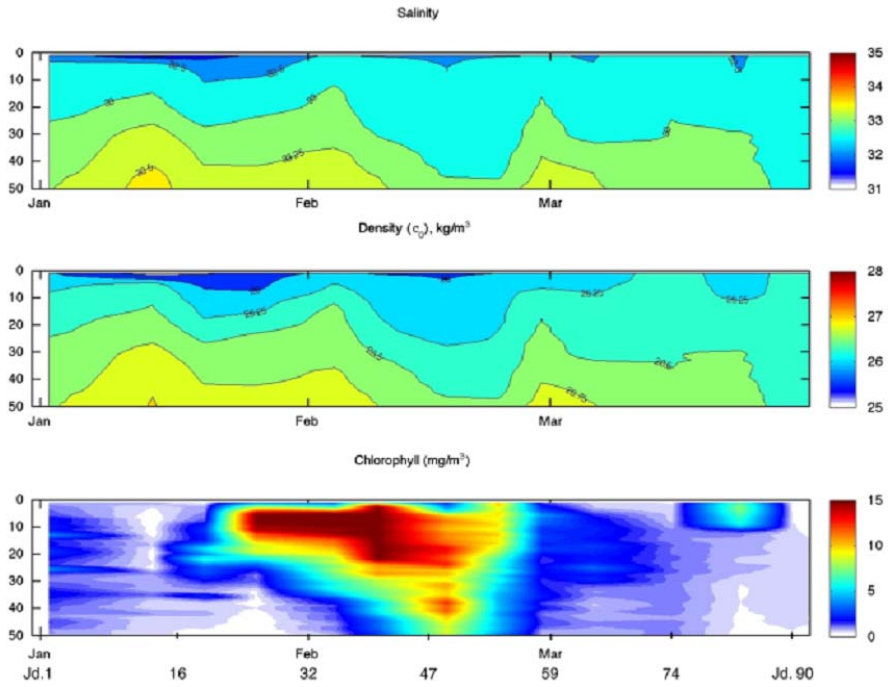

Figura 2: Perfiles de Salinidad, densidad (kg m^{-3}) y concentración de clorofila (mg m^{-3}), respectivamente, en la Bahía Ryder desde enero a abril de 1998 (Piquet et al., 2011).

Un factor importante en la mantención de esta estratificación y estabilidad de la columna de agua es el viento. Se ha mostrado una relación entre la intensidad del viento y la profundidad de la capa de mezcla en Antártica, como se observa en la figura 3 (Rozema et al., 2017). La estratificación y el viento pueden ser considerados como factores importantes en las diferencias de composición de la comunidad fitoplanctónica (figura 4). De hecho, se ha reportado que la alternancia de periodos de turbulencia y estratificación promueve la generación de floraciones fitoplanctónicas (Piquet et al., 2011), y genera también una alternancia entre distintos grupos fitoplanctónicos (Egas et al., 2017).

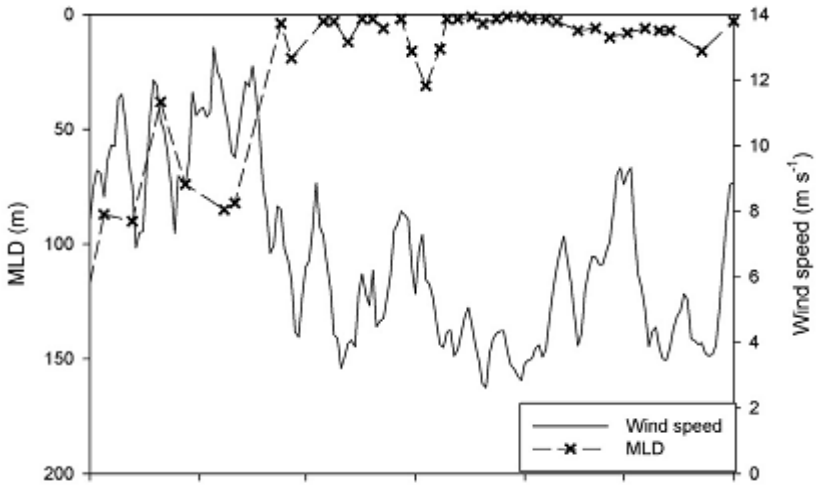

Figura 3: Relación entre la velocidad del viento (Wind speed) y la profundidad de la capa de mezcla (MLD) en Bahía Margarita, Antártica (Rozema et al., 2017).

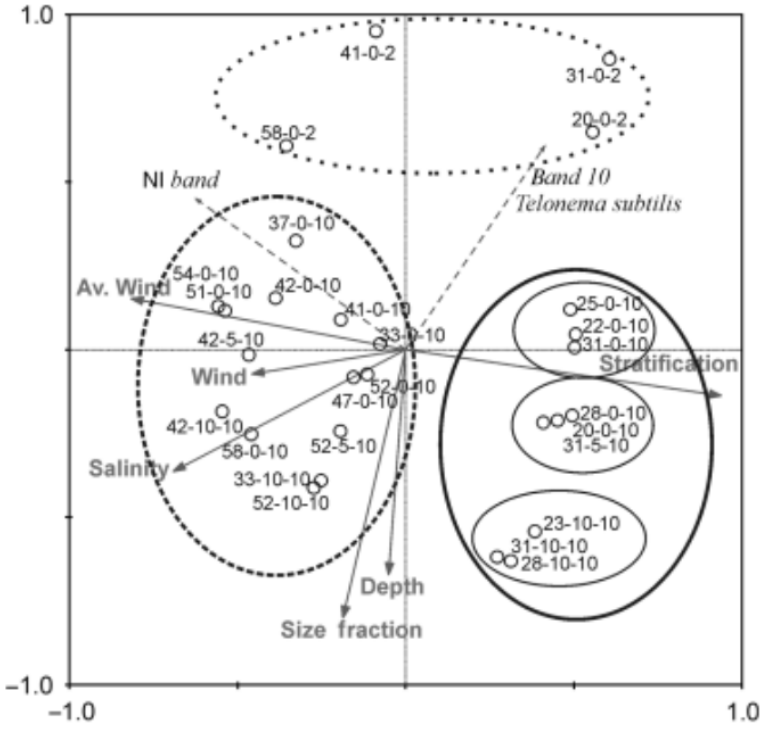

Figura 4: Gráfico RDA generado a partir de análisis de DGGE de secuencias 18S rRNA obtenidas de muestras de Bahía Ryder, Antártica. Las flechas grises indican variables ambientales. Los círculos pequeños indican las muestras y sus agrupamientos son descritos por elipses (Piquet et al., 2011).

Otro de los factores relevantes en el crecimiento del fitoplancton en general es la disponibilidad de macronutrientes (principalmente nitrato y fosfato) disueltos en el agua. Las aguas de la corriente circumpolar Antártica se consideran como ricas en nutrientes

(Levitus et al., 1993; García-Muñoz et al., 2014), por lo que en este ecosistema la disponibilidad de macronutrientes no es un factor limitante para el crecimiento del fitoplancton, aunque estos pueden disminuir debido a un alto consumo en la capa superficial. Su disponibilidad también puede estar influenciada por el viento, el cual al inducir la mezcla puede aportar nutrientes nuevamente a la capa superficial de la columna de agua, por ejemplo los micronutrientes de origen terrígeno que se agotan más rápidamente.

Diversidad y composición del fitoplancton en la Antártica

La caracterización de las comunidades fitoplanctónicas se ha llevado a cabo tradicionalmente con las llamadas técnicas "clásicas" de microscopía y análisis de pigmentos. El fitoplancton presente en el ecosistema antártico no ha sido la excepción a esto. Por ejemplo, se describió mediante análisis de pigmentos que la comunidad fitoplanctónica antártica está compuesta principalmente por diatomeas y haptófitas, seguidas por criptófitas y dinoflagelados en menor medida (García-Muñoz et al., 2013). Landatea y colaboradores en 2017 describe mediante microscopía la comunidad de microfitoplancton presente en la Bahía Chile (Landaeta et al., 2017). No obstante, el empleo de estas técnicas tiene como limitación que sólo logra describir los grandes grupos sin entregar mayor resolución en la composición taxonómica, en el caso de los pigmentos, o solo de ciertos grupos del microfitoplancton (diatomeas o dinoflagelados) usando técnicas de microscopía.

El desarrollo de técnicas moleculares como el fingerprinting ha permitido obtener mayor resolución taxonómica y descripción de fracciones de tamaño menores (Díez et al., 2001, 2004, Piquet et al., 2011, Egas et al., 2016). Sin embargo, este tipo de técnicas tiene como limitación que la cobertura de diversidad obtenida puede ser deficiente debido al bajo número de secuencias en relación al esfuerzo de muestreo.
Más recientemente, las tecnologías de secuenciación masiva han permitido superar este obstáculo, permitiendo el análisis de un elevado número de muestras al mismo tiempo y números de secuencias del orden de miles a millones por muestra (Shokralla et al., 2012), lo que permite una descripción más profunda de las comunidades fitoplanctónicas. La técnica mayormente utilizada en la caracterización de la composición taxonómica de comunidades microbianas es la secuenciación de amplicones, o fragmentos específicos de ADN en que los más comúnmente utilizados son los genes de las subunidades ribosomales. Este tipo de técnicas son de gran utilidad para la generación de bases de datos de composición fitoplanctónica en el océano, en especial en un ecosistema vulnerable como la Península Antártica. Sin embargo, hasta el momento, estas técnicas se ha llevado a cabo en sólo tres ocasiones en la Península Antártica (Luo et al., 2015; Moreno-Pino et al., 2016, Alcaman-Arias et al., 2018), por lo que este tipo de datos se considera aun deficiente para

el enriquecimiento de bases de datos de comunidades fitoplanctónicas, y por lo tanto para la generación de modelos predictivos robustos en este frágil ambiente.

Dinámica del fitoplancton en el ecosistema costero antártico

El fitoplancton, al ser la base de la trama trófica antártica puede tener efectos a nivel ecosistémico. Por ejemplo, variaciones de temperatura pueden generar un cambio en la estructura comunitaria del fitoplancton, lo que tendría un efecto en la composición comunitaria del zoopolancton y como consecuencia en niveles tróficos superiores (Moline et al., 2004).

A su vez, condiciones meteorológicas y oceanográficas como el viento y la estabilidad en la columna de agua parecen tener influencia sobre su crecimiento (Vernet et al., 2008; Piquet et al., 2011; Schloss et al., 2012; Rozema et al., 2016). Sin embargo, no se ha descrito si estas variables como el viento o la temperatura del agua siguen patrones a nivel local, es decir, si están influenciados por dinámicas propias de las bahías, o bien sus fluctuaciones siguen patrones regionales de la Península Antártica. Una manera de estudiar esta relación entre escalas espaciales, es el uso de imágenes satelitales, especialmente en una zona extrema como la Antártica, donde el acceso a realizar campañas de muestreo es limitada. El estudio de la Península Antártica se ha llevado a cabo mediante imágenes satelitales con anterioridad (Gonçalves-Araujo et al., 2015), con el objetivo de estudiar variabilidad espacial e interanual de la concentración de clorofila-a, sin embargo no se relacionaron distintas escalas espaciales en la Península Antártica.

La Bahía Chile, ubicada en la Isla Greenwich, Islas Shetland del sur, es una bahía abierta hacia el noreste y con influencia glaciar, donde además se ha realizado monitoreo meteorológico desde 2008, lo que la convierte en un sitio de estudio ideal para mejorar el conocimiento de las relaciones entre las variables meteorológicas, oceanográficas y las comunidades de fitoplancton.

Por esta razón se propone estudiar la variación estival de las condiciones de viento, temperatura y clorofila superficiales en la Península Antártica y en particular de la Bahía Chile, y su influencia en la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton usando datos satelitales y series de tiempo meteorológicas, además de muestreos bio-oceanográficos y la caracterización de la comunidad fitoplanctónica usando técnicas moleculares de secuenciación masiva de amplicones por primera vez en esta Bahía.

HIPÓTESIS

La variación estival de la biomasa, diversidad y composición del fitoplancton en la Bahía Chile en la Antártica responde principalmente a las fluctuaciones en la intensidad del viento.

OBJETIVOS

General

Estudiar la variación estival, tanto temporal como espacial, del viento, temperatura superficial del mar en la Península Antártica, y determinar su influencia en la Bahía Chile de la biomasa, diversidad y composición del fitoplancton.

Específicos

1. Describir la variación estival, tanto temporal como espacial, de las condiciones viento, temperatura del mar y biomasa superficiales (concentración de clorofila) en la Península Antártica y su relación con las observadas a escala local en las Islas Shetland y la Bahía Chile.

2. Estudiar la variación estival de la biomasa, diversidad y composición del fitoplancton en la Bahía Chile usando observaciones bio-oceanográficas y técnicas moleculares de secuenciación masiva para caracterizar la comunidad fitoplanctónica.

3. Determinar las relaciones entre las condiciones meteorológicas y oceanográficas, y su influencia en la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile.

METODOLOGÍA

Con el objeto de describir la variación estival, tanto temporal como espacial, de las condiciones de viento, temperatura superficial del mar y concentración de clorofila superficial en la Península Antártica y su relación con las observadas en la Bahía Chile. (*objetivo específico 1*) se utilizaron bases históricas de datos satelitales y meteorológicos colectados para los periodos enero-marzo de 2013, 2014 y 2016 y diciembre de 2015.

Área de estudio

Se aplicó un análisis multiescala para comparar los patrones de variación de viento, temperatura y concentración de clorofila superficiales tanto en la región de la Península (escala regional) como a escala local. En la escala regional, se consideró el área norte de la Península antártica y el área de las Islas Shetland del sur (fig. 5a, área completa y recuadro continuo, respectivamente). En la escala local, se estudió el área circundante de la Isla Greenwich (fig. 5a, recuadro segmentado y fig. 5b, área completa), así como también el sector de la Bahía Chile (fig. 5b, recuadro segmentado), y las cercanías de los puntos de muestreo bio-oceanográfico (P1, P2 y P3) (fig. 5b).

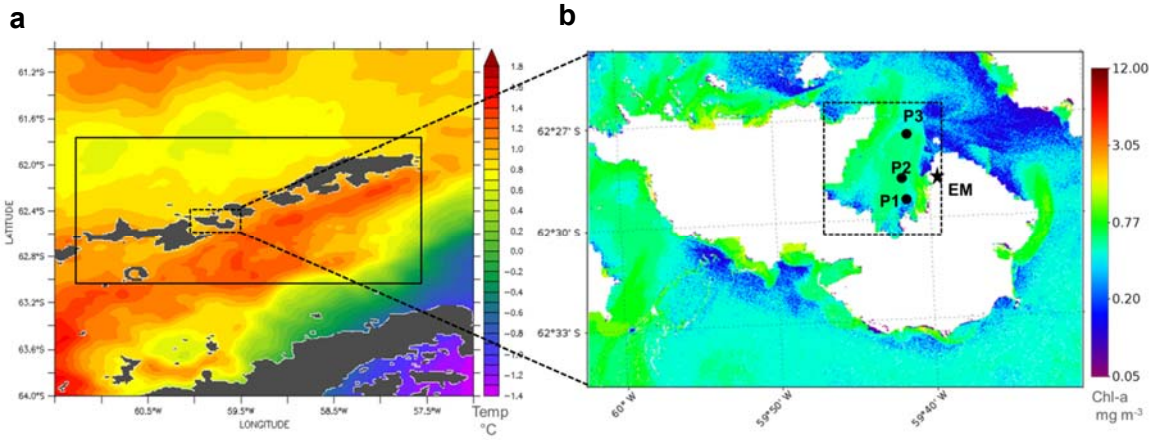

Figura 5: Escalas espaciales consideradas en este estudio. El panel a muestra una imagen de temperatura superficial del mar (MUR), donde se ilustra el valor promedio de enero 2013. El panel b muestra como ejemplo una imagen de alta resolución Landsat 8 de la concentración de clorofila-a superficial del 1 de marzo de 2015. Se especifican los puntos de muestreo (círculos P1, P2 y P3), y la ubicación de la estación meteorológica (estrella).

Datos de satélite

Para describir las condiciones de viento en el área norte de la Península Antártica y en las Islas Shetland del Sur (fig. 5a), se utilizaron imágenes de viento satelital obtenidas por el sensor ASCAT (Advanced Scatteromenter). Estas imágenes fueron obtenidas desde el sitio web de IFREMER (http://cersat.ifremer.fr/), y contienen datos ya procesados de viento

superficial a escala diaria y resolución de 25 km. Se extrajeron los promedios diarios de intensidad y dirección del viento y se calculó el estrés del viento usando la siguiente fórmula:

$$T_x = C_D \rho_a W_x |W|$$

$$T_y = C_D \rho_a W_y |W|$$

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}$$

Donde:
ρ_a=densidad del aire en kg m^{-3}
W=intensidad del viento en m s^{-1}, en su componente este-oeste (W_x) y norte-sur (W_y)
C_D= coeficiente de arrastre, calculado como se muestra a continuación (Yelland & Taylor, 1996; Pérez-Santos et al., 2010):

$1000C_D = 0{,}29 + 3{,}1|W| + 7{,}7|W|^2$, para $|W| \leq 6$ m s^{-1}
$1000C_D = 0{,}6 + 0{,}07|W|$, para $6 \leq |W| \leq 26$ m s^{-1}

(1)

Para estudiar las variaciones de biomasa fitoplanctónica (medida como concentración de clorofila-a) en área norte de la Península Antártica y en las Islas Shetland del Sur (fig. 5a), se utilizaron imágenes del satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Las imágenes se obtuvieron desde la base de datos perteneciente al Laboratorio de Oceanografía Biológica y Biogeoquímica de la Facultad de Ciencias del mar y de Recursos Naturales de la Universidad de Valparaíso, y fueron obtenidas desde el servidor de datos NASA Ocean Color (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov). Estas imágenes corresponden a síntesis de 8 días y poseen una resolución espacial de 4 km x 4 km. De éstas se obtuvieron los valores promedio de clorofila-a en las dos escalas espaciales mayores (fig. 5a) para los veranos 2013, 2014 y 2016.

Para estudiar la variación de temperatura del agua en las distintas escalas espaciales se usaron imágenes diarias de alta resolución de temperatura superficial del mar (MUR, Multi-scale Ultra-high Resolution). Los datos se descargaron de la base de datos Opendap (https://opendap.jpl.nasa.gov/opendap/allData/ghrsst/data/GDS2/L4/GLOB/JPL/MUR/v4.1/) y contienen datos diarios con resolución espacial de ~1 km de temperatura superficial del mar obtenidos usando más de 10 sensores satelitales de temperatura. Se extrajo un promedio diario en las distintas escalas espaciales de la temperatura superficial del mar entre enero y marzo de 2013, 2014 y 2016.

Con el objetivo de comparar la cobertura de hielo en los inviernos previos a los tres veranos estudiados, como condicionante de las condiciones del verano siguiente, se utilizó también la cobertura de hielo de las imágenes MUR. Se cuantificó el número de pixeles con al

menos un 15% de cobertura, con una frecuencia de 7 días entre los meses de septiembre y noviembre previos a cada verano.

Además, con el objeto de caracterizar con mayor detalle los principales patrones de distribución de biomasa dentro de la Bahía Chile (e.g figura 5b) y alrededores de la Isla Greenwich, se usarán imágenes de alta resolución espacial (30 m) de los satélites Landsat 7 y 8. Estas imágenes contienen información obtenida por un sensor de color (OLI), que obtiene 9 bandas de información de distintas longitudes de onda, a partir de las cuales se puede obtener la concentración de clorofila superficial. Se descargaron imágenes desde el sitio web de la USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/) abarcando periodo estival (diciembre a marzo) entre los años 2013 y 2016, donde que se pueda observar al menos un 50% de la bahía (considerando cobertura de nubes). De cada imagen se obtuvo la concentración de clorofila-a dentro de la bahía y alrededor de la isla.

Variables meteorológicas en Bahía Chile

Se utilizaron datos meteorológicos históricos de la Armada de Chile. Las condiciones meteorológicas en Bahía Chile fueron registradas cada 3 horas por la Armada de Chile en la Base Naval Antártica Arturo Prat (fig. 5b, punto EM). La temperatura se midió con un sensor de temperatura y humedad Vaisala HMP45D. La velocidad y dirección del viento fue registrada con un anemómetro Vaisala Wind Set WA15. La precipitación fue medida con un pluviómetro (5.4000.00.000 Rain gauge, THIES CLIMA Germany). La temperatura del agua fue medida en la orilla de la bahía con un sensor QMT110. Se calcularon los promedios diarios de temperatura, precipitación intensidad de rachas y estrés del viento (fórmula (1)). Estas variables fueron comparadas entre los distintos veranos estudiados y y con las distintas escalas espaciales mostradas en la figura 5.

Datos bio-oceanográficos en la Bahía Chile

Para estudiar la variabilidad estival de la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile (*objetivo específico 2*)**,** se utilizaron datos obtenidos durante 3 campañas antárticas, apoyadas por el Instituto Antártico Chileno. Se analizaron muestras que fueron tomadas en tres puntos en la Bahía Chile (P1: 62°29'21''S, 59°40'606¨W, P2: 62°28'58''S, 59°40'77''W, P3: 62°27'04''S, 59°40'60''W) (fig. 5b) entre las fechas indicadas en la tabla 2.

Los datos oceanográficos que se utilizaron pertenecen a la base de datos de los proyectos INACH10-15 y DPI20140044/CONICYT y corresponden a concentración de clorofila-a y temperatura del agua en el punto de muestreo. Además, se usaron conteos directos del microfitoplancton (principalmente de diatomeas y dinoflagelados) por microscopía óptica obtenidos en el periodo de muestreo 2014 dentro del contexto del proyecto INACH RT_04_13.

Tabla 2: Fecha y ubicación de la obtención de muestras de agua en la Bahía Chile, Islas Greenwich, Antártica. Además, número de muestras de ADN analizadas para cada verano y la metadata asociada a cada set de muestras, donde Chl: concentración en clorofila, T°: temperatura del agua de mar durante el muestreo y Fito: conteo directo de fitoplancton

Año	Fechas de muestreo	Puntos muestreados	Número de muestras de ADN analizadas	Metadata asociada
2013	29 enero – 14 febrero	P3	5	Chl, T°
2014	09 febrero – 08 marzo	P3	10	Chl, T°, Fito
2015	05 diciembre – 13 diciembre	P1, P2, P3	6	Chl, T°
2016	18 febrero – 04 marzo	P1, P2, P3	10	Chl, T°

Obtención de muestras para extracción de ADN y secuenciación masiva de genes 16S rRNA (cloroplastidiales)

Muestras de agua superficiales de 8L aproximadamente fueron tomadas en los puntos indicados en la Tabla 2. El agua fue prefiltrada a través de una malla 200 µm para excluir zooplancton y partículas superiores, y luego se filtró con una bomba peristáltica a través de filtros de 0,22µm. Los filtros fueron congelados hasta su posterior procesamiento. A cada filtro se realizó una extracción de ácidos nucleicos mediante lisis química (lisozima, proteinasa-K) y mecánica, y una posterior extracción con fenol:cloroformo y precipitación con alcohol isopropílico y etílico (ver Massana et al., 1997). El material obtenido se cuantificó usando un Nanodrop para evaluar su limpieza y mediante el fluorometro Qubit™ para determinar la concentración de ácidos nucleicos de doble hebra, o ADN.

Las muestras de ADN se utilizaron como templado para la generación de amplicones de la región V4 del gen 16S rRNA y para su posterior secuenciación en la plataforma de secuenciación masiva Illumina. Desde las muestras correspondientes a 2013 y 2014 se secuenció la región V4 del 16S rRNA usando los partidores 515F y 806R. En cambio la región secuenciada para las muestras de diciembre 2015 y febrero 2016 fue una versión más larga de la región V4, con los partidores 515F y 926R.

Las secuencias obtenidas fueron procesadas en el programa de procesamiento de datos de secuenciación Mothur (Schloss et al., 2009). El procesamiento inició con el ensamble y separación por muestra de las secuencias. Esto fue seguido por un filtrado de las secuencias por calidad, realizando la eliminación de partidores, remoción de secuencias muy cortas, con nucleótidos ambiguos o presencia de homopolímeros superiores a 8 pares de bases. Una vez que las secuencias fueron filtradas, se generó un alineamiento de éstas, usando un alineamiento de referencia generado por la base de datos Silva v128 (Quast et al., 2013).

Posteriormente, se removieron secuencias quimera para luego proceder a la asignación taxonómica de las secuencias usando la base de datos antes mencionada. A partir del resultado obtenido, se filtraron sólo las secuencias de 16S rRNA correspondientes a cloroplastos, que representan a la comunidad fitoplanctónica. Con esas secuencias, se realizó un agrupamiento, para generar Unidades Taxonómicas Operacionales (OTU, por su sigla en inglés), es decir, secuencias con una similitud del 97%, para obtener la riqueza y abundancia relativa de la comunidad. Luego se realizó una asignación taxonómica de las OTUs obtenidas, para identificar los grupos fitoplanctónicos presentes en cada muestra, mediante la anotación con la base de datos Phytoref (Decelle et al., 2015). A partir de los datos obtenidos, se calculó y comparó entre muestras el número de secuencias asignadas a cada grupo taxonómico, el número de OTUs y el índice de diversidad de Shannon.

Análisis de datos

Para determinar las relaciones entre las condiciones meteorológicas y oceanográficas, y su influencia en la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile (*objetivo específico 3*) se aplicaron análisis que se describen a continuación.

Se correlacionaron series de datos de promedio diario de stress de viento y temperatura superficial del mar obtenidos a partir de datos *in situ* con las obtenidas a partir de promedios diarios en las distintas escalas espaciales desde las imágenes satelitales. Previo a esto, se calcularon las estadísticas básicas (mínimo, máximo, promedio, desviación estándar), se aplicó el test de normalidad de Shapiro wilk, y luego una correlación de Pearson en caso de haber distribución normal o Spearman en caso que no haber distribución normal en los datos.

Además de comparar entre escalas espaciales, se realizaron pruebas pareadas entre los datos de los distintos veranos, comparando stress del viento, precipitaciones, temperatura del aire y temperatura superficial del mar entre los veranos en el punto de muestreo. Se aplicó un test ANOVA de una vía en caso de que los datos se distribuyeran normalmente o Kruskal-Walis en caso contrario, con test a posteriori de Tukey y MannWhitney respectivamente para explorar diferencias pareadas. Se llevó a cabo el mismo análisis con los datos de concentración de clorofila-a obtenidos del sensor MODIS, y entre los índices de diversidad obtenidos desde los datos de secuenciación.

Para describir gráficamente la composición taxonómica del fitoplancton, se transformó el número de secuencias correspondiente a cada taxa a valor porcentual, y se confeccionó un gráfico de barras utilizando los valores de abundancia relativa superiores a 0,5% promedio.

Para evaluar las diferencias en las variables ambientales entre los tres veranos estudiados, se aplicó un análisis de componentes principales. Se consideraron el stress del viento, temperatura (agua y aire), cobertura de hielo en el invierno anterior y clorofila durante el

muestreo, además del stress del viento, velocidad de rachas promedio y precipitaciones totales en los 15 días previos al muestreo.

Finalmente, para evaluar la relación entre de variables ambientales y la composición taxonómica de las comunidades de fitoplancton se aplicó un análisis de correspondencia canónica utilizando los datos ambientales ya mencionados para el análisis de componentes principales, y la abundancia relativa de los 100 OTUs más abundantes en cada set de datos.

RESULTADOS

Variación estival de las condiciones meteorológicas y oceanográficas superficiales: desde la Península Antártica hasta la Bahía Chile

Se llevó a cabo un análisis multiescala con imágenes satelitales de temperatura superficial del mar, viento y clorofila para evaluar si existe relación entre las dinámica en las condiciones meteorológicas en la escala regional (Península Antártica) como en la local (Bahía Chile), Las áreas estudiadas comprenden un rango desde unos pocos metros cuadrados (punto de muestreo *in situ* en Bahía Chile, Isla Greenwich) hasta alrededor de 70 mil km cuadrados (área norte de la Península Antártica) como ejemplifica la figura 6, donde se muestran las escalas utilizadas y sus áreas en m^2 (fig. 6).

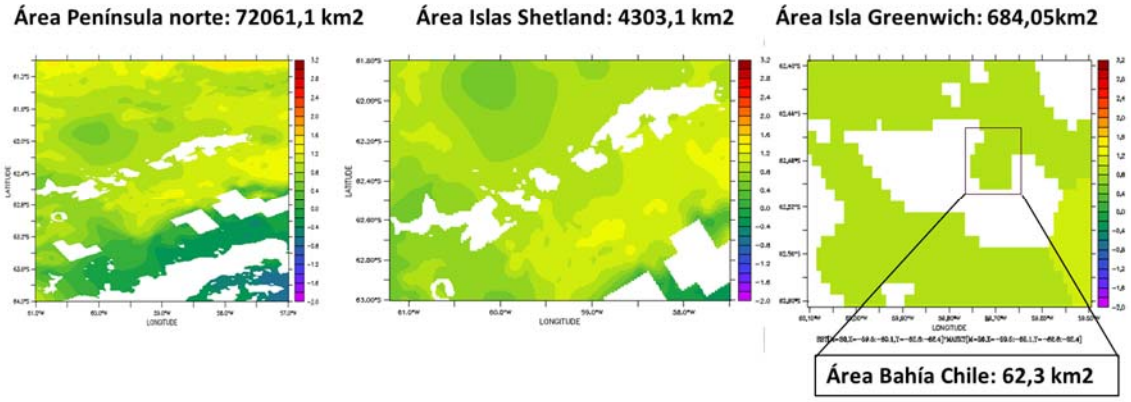

Figura 6: Áreas del análisis multiescala. Imágenes de temperatura superficial del mar (MUR) que muestran las distintas escalas utilizadas y su área en kilómetros cuadrados.

Se compararon los promedios diarios de TSM y estrés del viento entre los distintos veranos (fig. 7). Al comparar la TSM entre los veranos, se observa que el verano 2013 tuvo temperaturas significativamente mayores a 2014 y 2016 (fig. 7*a*), en la escala de las Islas Shetland del Sur (test Kruskal-Wallis, $p<0,001$; test Mann-Whitney, 2013-2014 $p>0,001$; 2013-2016 $p>0,001$; 2014.2016 $p=0,21$) (fig. 7a). Con respecto al estrés del viento (fig. 7*b*), el análisis pareado muestra que no hubo diferencias significativas entre los tres veranos, en la escala de las Islas Shetland (test Kruskal-Wallis, $p=0,71$).

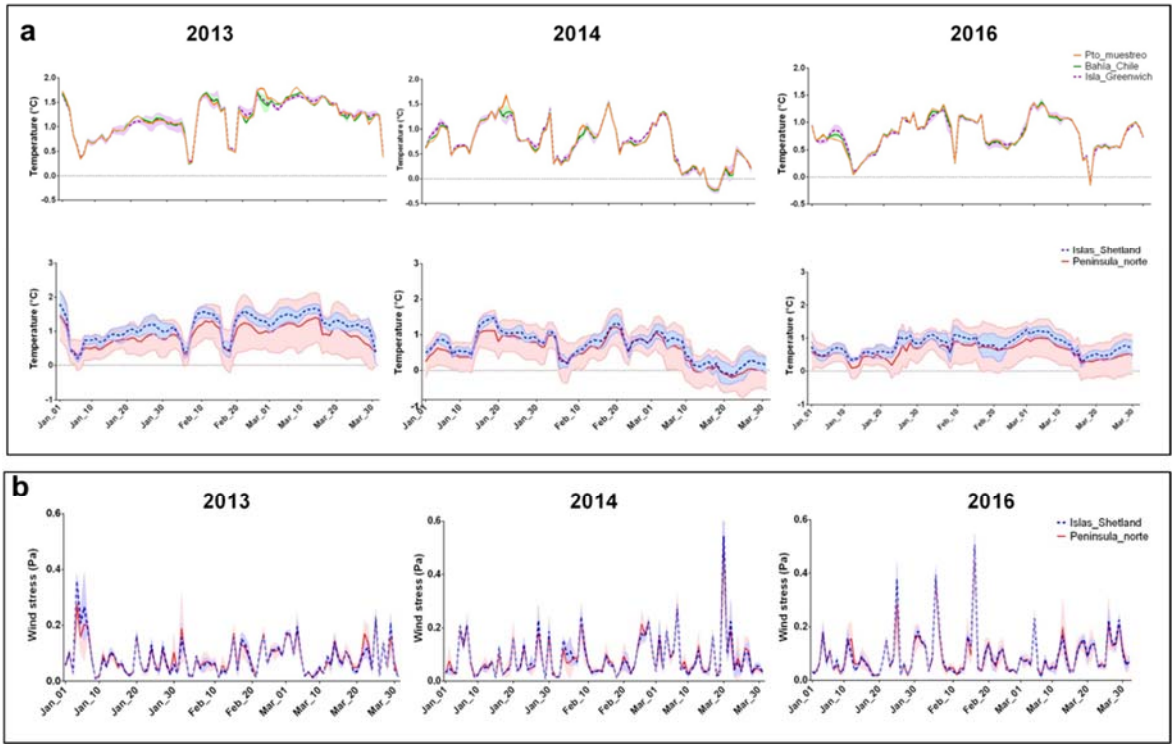

Figura 7: Variación de temperatura superficial del mar y estrés del viento. Se muestra un promedio diario de la temperatura superficial del mar (a) promedio para cada escala espacial estudiada, y estrés del viento en las dos escalas mayores (b), durante los tres veranos estudiados. La zona sombreada muestra la desviación estándar.

Se evaluó si existe una relación entre las distintas escalas espaciales, desde el punto de muestreo hasta el área de la Península norte. Los resultados muestran que las distintas escalas espaciales presentan correlación positiva significativa (tabla 3) en los datos de TSM, obtenidos desde las imágenes satelitales. Sin embargo, no presenta correlación con la temperatura del aire medida *in situ* en la Isla Greenwich (tabla 3). El estrés del viento presenta correlación positiva significativa (tabla 3) entre las distintas escalas espaciales (satelital), y también se correlaciona significativamente con el medido *in situ* (tabla 3), es decir, existiría similitud o coherencia entre la variación de temperatura y viento a la escala regional y local en la zona de la Península Antártica.

Tabla 3: Análisis multiescala de temperatura y viento. Correlación entre temperatura superficial del mar (SW Temp) y del aire y stress del viento satelital e in situ. Sólo se muestran valores de p significativos (<0,05) en rojo, y sus coeficientes de correlación asociados en azul. PM: Punto de muestreo, BC: Bahía Chile, IG: Isla Greenwich, IS: Islas Shetland, PN: Península norte.

	SW Temp PM	SW Temp BC	SW Temp IG	SW Temp IS	SW Temp PN	Temp In situ(aire)	Viento IS	Viento PN	Viento In situ
2013 (Spearman test)									
SW Temp PM		1,38E-30	6,39E-26	9,97E-15	1,31E-11	-	-	-	-
SW Temp BC	0,988		1,54E-27	1,50E-16	8,88E-13	-	-	-	-
SW Temp IG	0,979	0,983		1,07E-16	1,30E-12	-	-	-	-
SW Temp IS	0,907	0,927	0,929		2,76E-20	-	-	-	-
SW Temp PN	0,856	0,878	0,875	0,956		-	-	-	-
Temp In situ(aire)	-	-	-	-	-		-	-	-
Viento IS	-	-	-	-	-	-		1,48E-24	2,89E-05
Viento PN	-	-	-	-	-	-	0,975		1,22E-05
Viento In situ	-	-	-	-	-	-	0,630	0,652	
2014 (Spearman test)									
SW Temp PM		3,73E-28	4,09E-23	1,44E-09	1,10E-08	-	-	-	-
SW Temp BC	0,984		2,90E-31	2,07E-09	2,57E-08	-	-	-	-
SW Temp IG	0,970	0,989		2,21E-09	1,78E-08	-	-	-	-
SW Temp IS	0,808	0,803	0,803		3,96E-22	2,37E-02	-	-	-
SW Temp PN	0,782	0,769	0,775	0,965		-	-	-	-
Temp In situ(aire)	-	-	-	-	-		-	-	-
Viento IS	-	-	-	-	-	-		5,17E-22	7,58E-07
Viento PN	-	-	-	-	-	-	0,965		1,27E-05
Viento Insitu	-	-	-	-	-	-	0,712	0,651	
2016 (spearman test)									
SW Temp PM		9,34E-95	2,93E-66	2,94E-28	6,30E-20	4,74E-05	-	-	-
SW Temp BC	0,994		1,78E-82	1,36E-28	1,54E-19	4,77E-05	-	-	-
SW Temp IG	0,979	0,990		9,19E-31	2,27E-20	7,92E-05	-	-	-
SW Temp IS	0,854	0,857	0,873		1,45E-44	0,0054659	-	-	-
SW Temp PN	0,771	0,765	0,776	0,937		0,0057149	-	-	-
Temp In situ(aire)	-	-	-	-	-		-	-	0,03754
Viento IS	-	-	-	-	-	-		3,08E-62	9,86E-13
Viento PN	-	-	-	-	-	-	0,977		7,35E-12
Viento Insitu	-	-	-	-	-	-	0,661	0,641	

Con el objetivo de explorar uno de los factores condicionantes para la meteorología y la estabilidad de la columna de agua en el verano, se cuantificó la cobertura de hielo en la Península Antártica durante los inviernos previos a cada verano estudiado. La cobertura de hielo previa al verano 2013 muestra una diferencia significativa con los otros dos inviernos (test Kruskal-Wallis p>0,001; test Mann-Whitney 2013-2014 p=0,04; 2014-2016 p=0,07; 2013-2016 p<0,001). Se observó que la cobertura de hielo en este invierno fue menor y su derretimiento comenzó más temprano que previo a 2014 y 2016 (fig. 8).

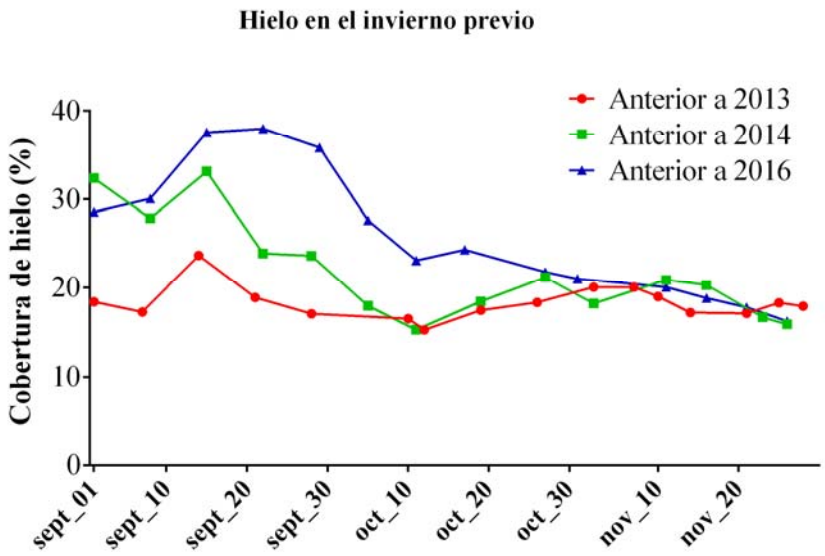

Figura 8: Cobertura de hielo en el invierno anterior. El gráfico muestra el porcentaje de superficie cubierta con al menos 15% de hielo en el área de la Península norte. Los datos fueron obtenidos a partir del componente cobertura de hielo de las imágenes satelitales MUR.

Al analizar la variación en las condiciones meteorológicas registradas en la estación localizada en Base Prat en la Bahía Chile, se observa que en el verano 2013 hubo mayor temperatura, menos rachas de viento y precipitaciones. Este verano también presentó menor fluctuación en las condiciones de temperatura y viento. Los datos muestran que los veranos 2014 y 2016 tuvieron mayor intensidad de rachas y más precipitaciones. Además, se observó mayor fluctuación en las condiciones, en especial considerando las condiciones previas al periodo de muestreo (fig. 9).

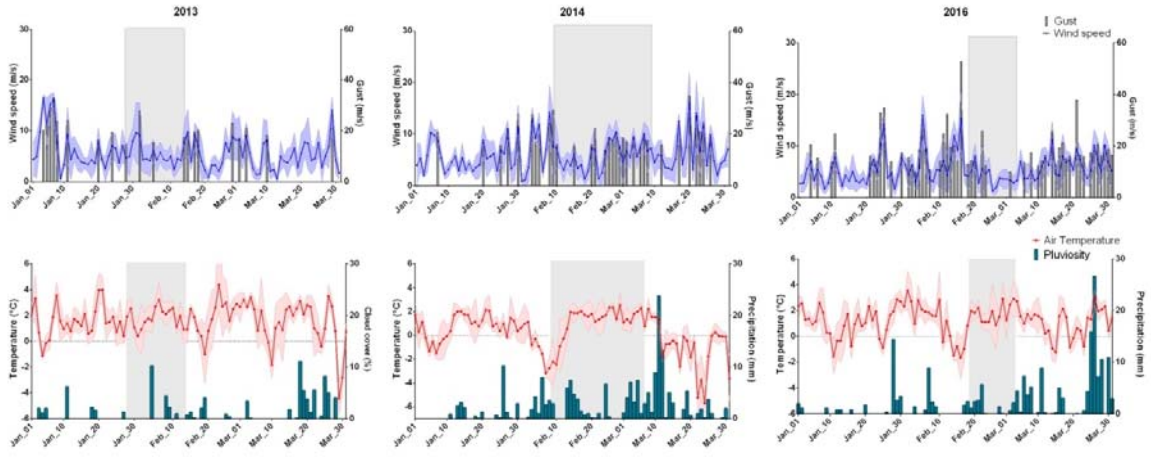

Figura 9: Variación en las condiciones meteorológicas en Base Prat. Variación de intensidad de viento, rachas, temperatura del aire y precipitación durante los veranos estudiados. Las líneas indican promedios diarios de intensidad de viento y temperatura respectivamente y la zona

sombreada es la desviación estándar. Las barras representan intensidad promedio diaria de rachas, y total diario de precipitaciones.

Cuando se comparan las condiciones promedio de cada verano se observa que la temperatura fue distinta entre los tres veranos estudiados. La precipitación fue significativamente menor en 2013 que en los otros dos veranos (aproximadamente la mitad) (test Kruskal-Wallis p=0,004; test Mann-Whitney 2013-2014 p<0,001; 2014-2016 p=0,19; 2013-2016 p=0,002). Las rachas de viento fueron menores en 2013 que en los otros dos veranos (test Kruskal-Wallis p>0,001; test Mann-Whitney 2013-2014 p<0,001; 2014-2016 p=0,3; 2013-2016 p<0,001). Otras condiciones, como la coberura nubosa, intensidad y estrés del viento, no presentaron diferencias significativas (fig. 10). En la tabla S1 se detalla la estadística básica de estas condiciones en cada verano, incluyendo el verano 2017 como un indicador de la variedad de condiciones que se pueden encontrar en los veranos australes.

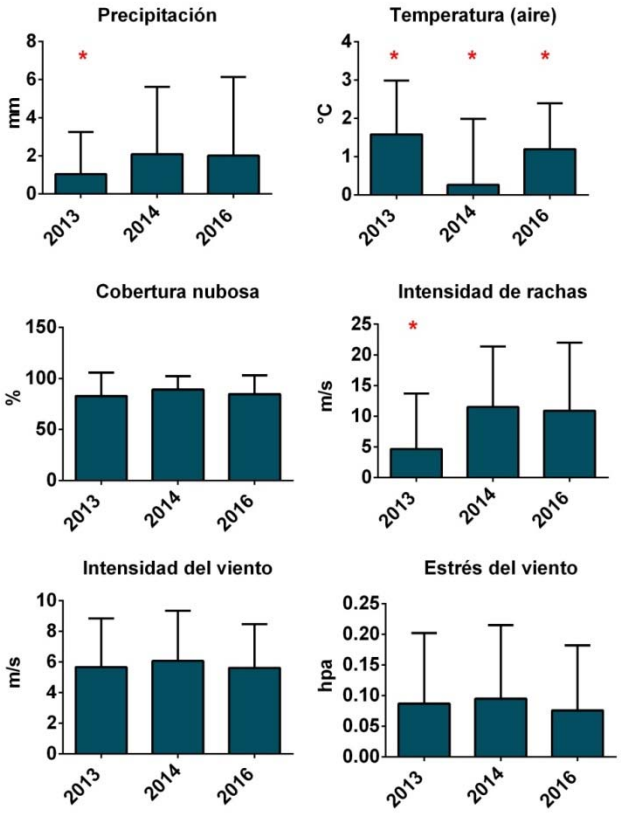

Figura 10: Análisis pareados condiciones meteorológicas en Bahía Chile. Promedio y desviación estándar de condiciones meteorológicas en los veranos estudiados. Los asteriscos muestras diferencias significativas entre los veranos.

Respecto a las condiciones bio-oceanográficas, la biomasa del fitoplancton expresada como concentración de clorofila-a obtenida desde datos del sensor MODIS, se mantuvo

constantemente baja en el verano 2013. En 2014 las concentraciones fueron similares, sin embargo, hubo un periodo de aumento al final del verano, que coincidió con el final del periodo de muestreo de ese año (fig. 10a). En el verano 2016 se observó una mayor concentración de clorofila que en años anteriores, especialmente en el periodo febrero-marzo (fig. 10a). El verano 2016 tuvo diferencias significativas con los otros dos veranos en términos de biomasa, tanto en el área de las Islas Shetland como en la Península Antártica (test ANOVA p>0,001; test Tukey 2013-2014 p=0,9; 2014-2016 p<0,001, 2013-2016 p<0,001, área Península norte, valores muy similares para área Islas Shetland) (fig. 10b).

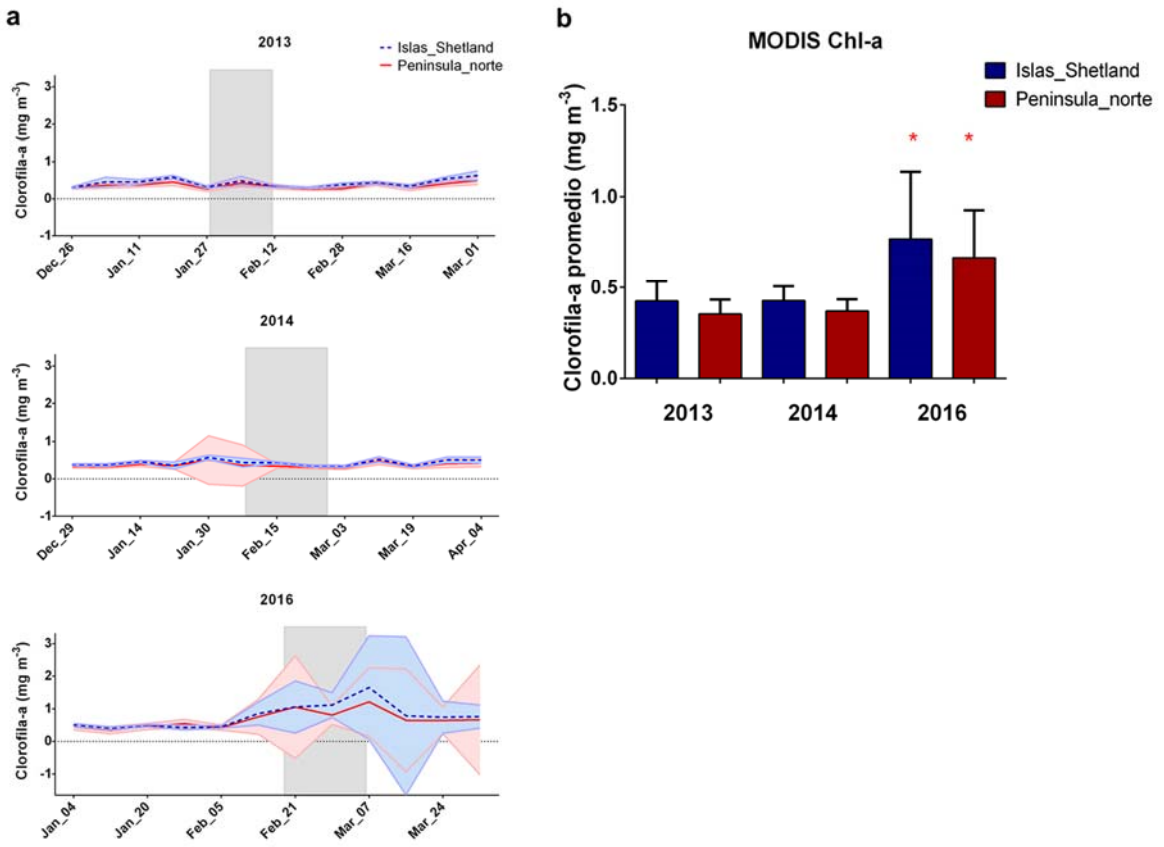

Figura 10: Concentración de clorofila medida por el satélite MODIS. El panel *a* muestra la variación de la concentración de clorofila (líneas) y su desviación estándar (área sombreada) en los tres veranos estudiados tanto en la zona de las Islas Shetland como en el área de la Península Antártica norte. Las zonas grises muestran los periodos de muestreo. El gráfico *b* muestra el promedio de concentración de clorofila promedio de cada verano. Los asteriscos representan diferencias significativas con respecto a los otros veranos.

Los valores presentados a partir de los datos del sensor MODIS fueron obtenidos desde valores promedio, y como se observa en la figura 10a , presentan variabilidad espacial con respecto a la media, lo que sugiere una distribución heterogénea en la concentración de

clorofila. Con el objetivo de explorar si existe homogeneidad dentro de la Bahía Chile y alrededores de la Isla Greenwich, se exploró la distribución de clorofila-a mediante imágenes satelitales de alta resolución Landsat. Las imágenes muestran que el aumento de biomasa en la Bahía Chile puede ocurrir de manera heterogénea en el interior de la bahía con respecto a alrededor de la Isla Greenwich. La figura 11 muestra que a principios de diciembre del 2013 la clorofila era baja dentro de la bahía con respecto a la zona alrededor de la isla. En cambio, a principios de febrero la situación parece ser la contraria, con mayor clorofila dentro de la bahía en comparación con aguas afuera. Debido a la alta cobertura nubosa que se presenta en la zona, durante la ejecución de este trabajo no fue posible obtener más imágenes para corroborar esta afirmación, sin embargo las presentadas aquí sugieren que puede haber un factor local afectando el aumento de la biomasa fitoplanctónica dentro de la bahía (fig. 11).

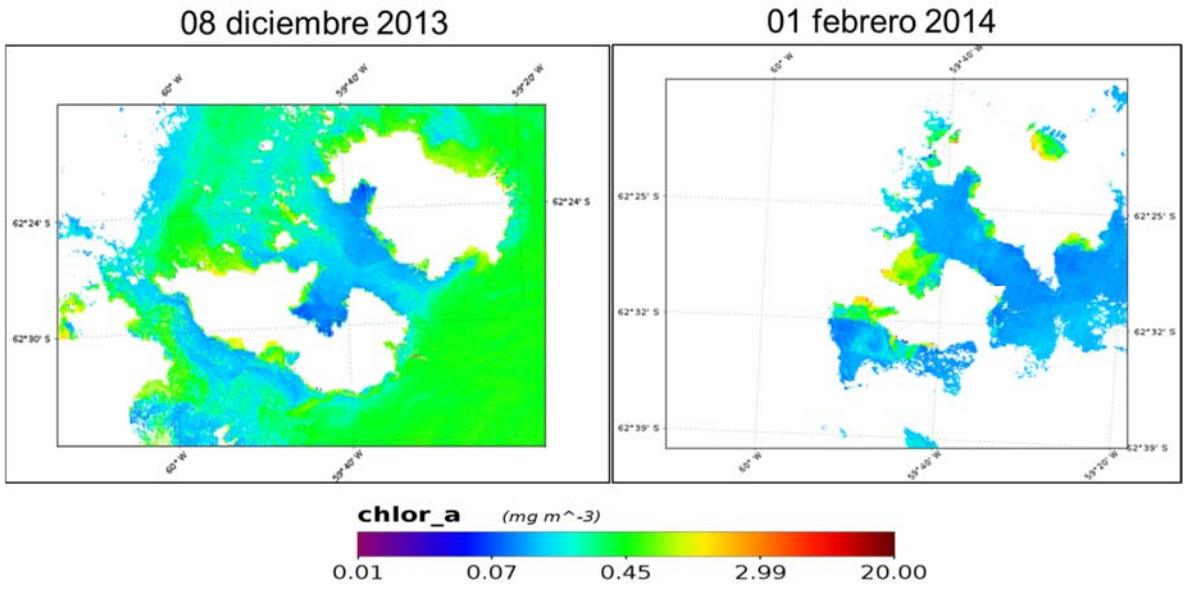

Fig 11: Variación en la distribución de biomasa en la Isla Greenwich. Las figuras muestran imágenes satelitales de alta resolución Landsat de concentración de clorofila en la zona de la Isla Greenwich y dentro de la Bahía Chile en dos fechas distintas del verano 2014.

Variación estival de la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile.

La biomasa representada como concentración de clorofila-a fue muy baja en el periodo de muestreo 2013, no superando los 0,04 mg m^{-3}. En el periodo 2014, la clorofila mostró un aumento, variando desde 0,19 a 2,38 mg m^{-3}. En el periodo de muestreo 2014, la concentración de clorofila se situó en un rango similar al verano 2016, el cual mostró un

aumento desde 1,01 a 3,87 mg m^{-3}en el mismo punto de muestreo. Como dato adicional en el periodo de muestreo 2017 los rangos fueron similares al periodo 2014 y 2016, registrando una bajada de la concentración de clorofila-a hacia el final del mes de febrero (fig. S1). El análisis estadístico mostró que la biomasa cuantificada en 2013 fue significativamente menor a los otros dos veranos (test Kruskal-Wallis p>0,001; test Mann-Whitney 2013-2014 p=0,001; 2014-2016 p=0,14; 2013-2016 p<0,001).

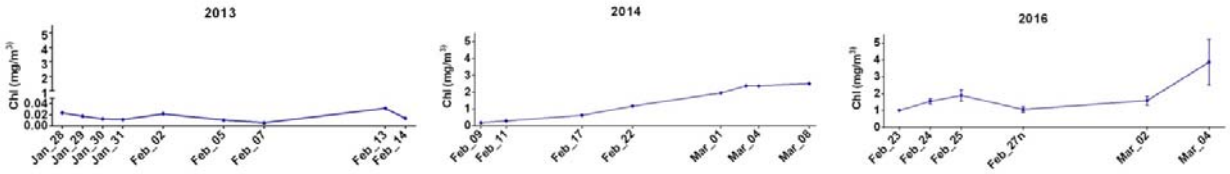

Figura 12: Concentración de clorofila en Bahía Chile. Se muestra la concentración de clorofila total en el punto P3 durante los muestreos en Bahía Chile en los veranos 2013, 2014 y 2016.

Cuando se analiza la diversidad, los valores de cobertura muestran valores superiores a 0,9 para todas las muestras, es decir la secuenciación logró describir al menos un 90% de los taxa presentes en la comunidad fitoplanctónica. El número de OTUs fue significativamente menor en 2013 que 2014 (test ANOVA, p<0,001). Con respecto a 2016, la diferencia de metodología de secuenciación asociada a este set de datos hace que éstos no sean comparables en términos numéricos.

Estudiando la diversidad en función de la riqueza de taxa fitoplanctónicos, en 2013 se encontraron 11 familias, mientras 19 y 18 en 2014 y 2016 respectivamente.

El porcentaje de secuencias de eucariontes fotosintéticos con respecto al total de la comunidad microbiana fue menor a 0,3% en 2013, y fluctuó entre 3,3 y 59% en 2014 y 2016 (tabla S2). El análisis estadístico indica que los porcentajes de secuencias eucariontes fotosintéticos en 2013 fueron significativamente menores que en los otros dos veranos (test ANOVA p=0,015; test Tukey 2013-2014 p=0,012; 2014-2016 p=0,2; 2013-2016 p=0,008), en concordancia con los valores de biomasa encontrados.

Al comparar las comunidades fitoplanctónicas muestreadas en diciembre 2015 con las de febrero 2016, se encontraron diferencias significativas en el número de OTUs, siendo mayor la riqueza en el mes de diciembre (test ANOVA, p<0,001).

En cuanto a la composición taxonómica a partir de las secuencias de 16S rRNA Cloroplastidial, la comunidad estuvo principalmente dominada por las familias Bacillariophyta, seguida por Haptophyta y Cryptophyta (fig. 13). La figura 13 muestra la composición taxonómica a nivel de familia en los tres veranos estudiados. La abundancia relativa de secuencias asignadas al grupo Bacillariophyta fue en promedio 51% en 2013, 73% en 2014 y 61% en 2016. En el verano 2013 (con baja biomasa) existió una proporción

mayor de secuencias asignadas a la clase Haptophyta, principlamente de miembros afiliados a la familia Prymnesiophyceae (28,7% promedio), así como criptófitas de la familia Cyptophyceae (8,5% promedio) con respecto al periodo de muestreo 2014 (con mayor biomasa), donde se obtuvieron en promedio 11% de Prymnesiophyceae y 5,6% de Cryptophyceae. En el periodo de muestreo 2016, se observó una proporción similar a la del 2014 de estos grupos, con una mayor proporción además de miembros del grupo Dictyocophyceae, en comparación a los otros veranos. Sin embargo, bacilariofitas siempre fueron predominantes. Un grupo que no presenta una abundancia relativa predominante pero que está presente en todas las muestras es la familia Pelagomonadaceae, promediando cerca de 4% de la abundancia relativa de secuencias (fig. 13).

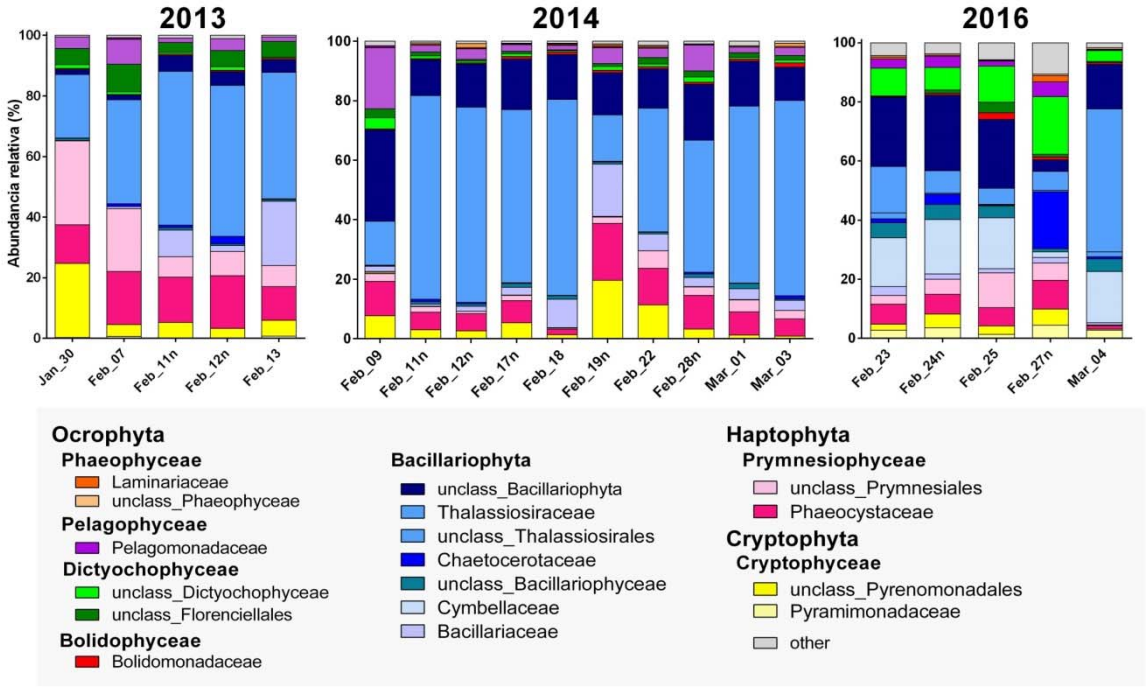

Figura 13: Composición taxónomica de la comunidad fitoplanctónica. Los gráficos muestran la composición taxonómica de fitoplancton a partir de la secuenciación de 16S rRNA cloroplastidial a nivel taxonómica de familia en el mes de febrero de cada verano. Se muestra la abundancia relativa en porcentaje. En letra negrita se indica a qué taxa pertenecen las familias.

También se comparó la variación en la composición a través del verano entre diciembre 2015 y febrero 2016, y se observó que en diciembre hubo una dominancia de secuencias asignadas a Cryptophyta (38% de abundancia relativa promedio), disminuyendo a alrededor de 2% durante el periodo de febrero, y siendo reemplazadas por Bacillariophyta, que pasaron de 28% a 61% de abundancia relativa promedio.

Por otro lado, se compararon tres puntos de muestreo dentro de la bahía para estudiar la variación espacial. Los resultados muestran que no existen diferencias a nivel de composición taxonómica entre los tres puntos de muestreo en 2015 y 2016 (fig. 14).

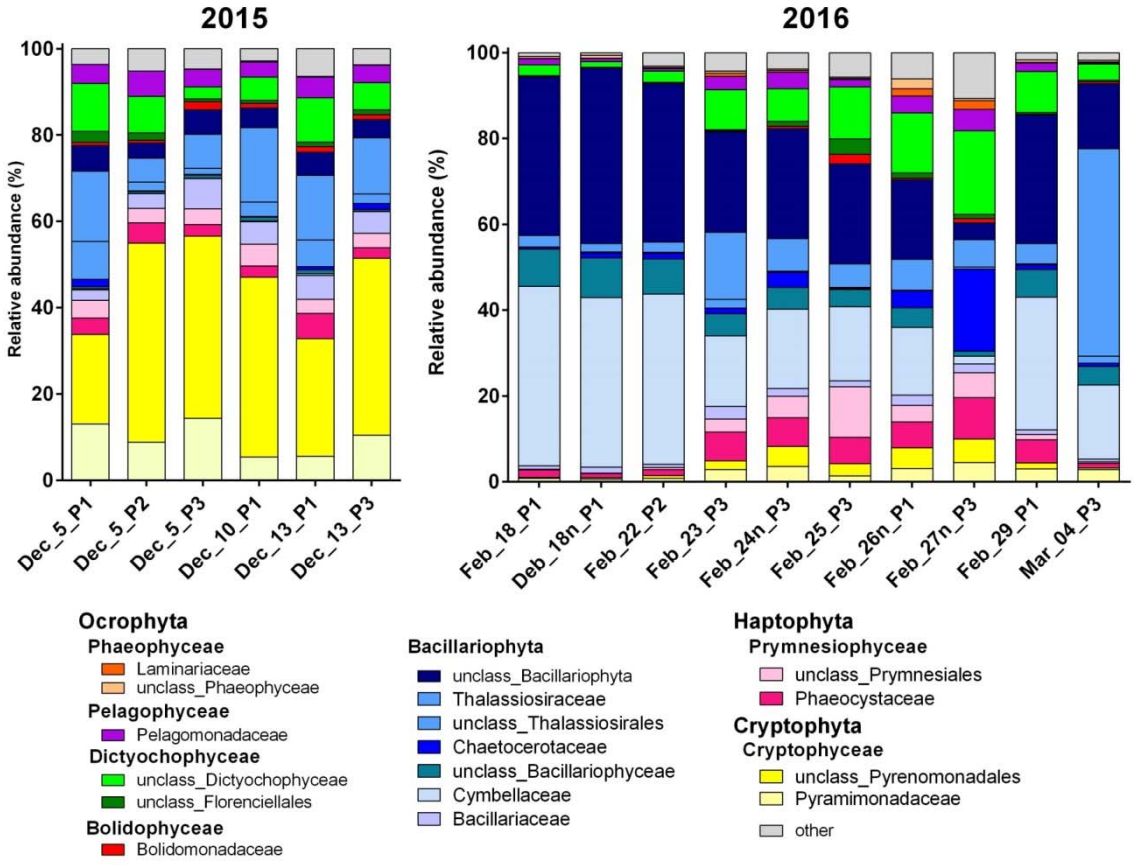

Figura 14: Composición taxónomica de la comunidad fitoplanctónica durante el diciembre 2015 y verano 2016. Los gráficos muestran la composición taxonómica de fitoplancton a partir de la secuenciación de 16S rRNA cloroplastidial a nivel taxonómica de familia en los meses de diciembre 2015 y febrero 2016 en tres puntos de la Bahía Chile. Se muestra la abundancia relativa en porcentaje. En letra negrita se indica a qué taxa pertenecen las familias.

En el verano 2014 se estudió mediante microscopía la composición y abundancia de diatomeas (familia dominante durante febrero en los tres veranos). La tendencia general fue al aumento de abundancia conforme avanzó el periodo de muestreo. Los valores se encontraron en el orden de las miles de células por litro. Los géneros dominantes fueron *Thalassiosira*, *Pseudo-nitzschia*, y *Chateoceros*, este último especialmente en los días de marzo, cuando las abundancias aumentaron hasta el orden de cientos de miles de células por litro (fig. 15).

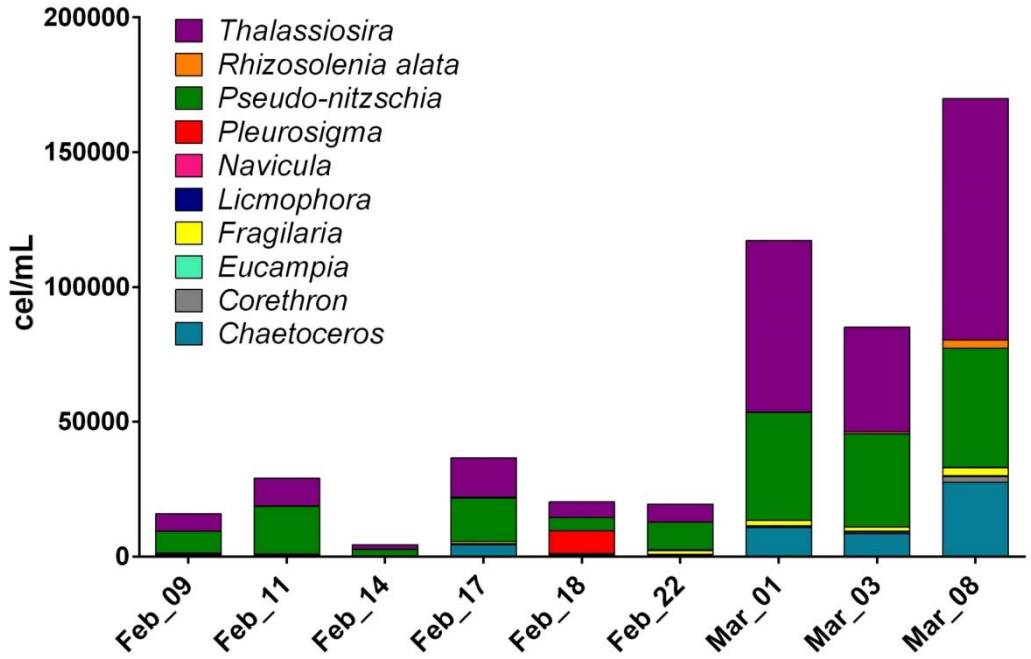

Figura 15: Diatomeas en el verano 2014. Se muestra la abundancia y composición a nivel de género en diatomeas (Bacillariophyta) durante el muestreo del verano 2014. Los datos fueron obtenidos mediante conteo directo al microscopio.

Relaciones entre las condiciones meteorológicas y oceanográficas y su influencia en la composición, diversidad y biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile.

De acuerdo al análisis de componentes principales, los datos de los tres veranos se agrupan de acuerdo a sus variables ambientales. El verano 2013 fue el más distinto de los 3 analizados. Las diferencias del verano 2013 pueden ser atribuidas principalmente a la temperatura del agua de mar, que fue en promedio mayor a los otros dos veranos. En el caso de 2014, su diferencia se puede atribuir mayoritariamente a la cobertura de hielo en el invierno anterior y la concentración de clorofila-a. En el caso de 2016, las diferencias fueron atribuidas principalmente al stress y rachas de viento así como a las precipitaciones en el periodo previo al muestreo (fig. 16).

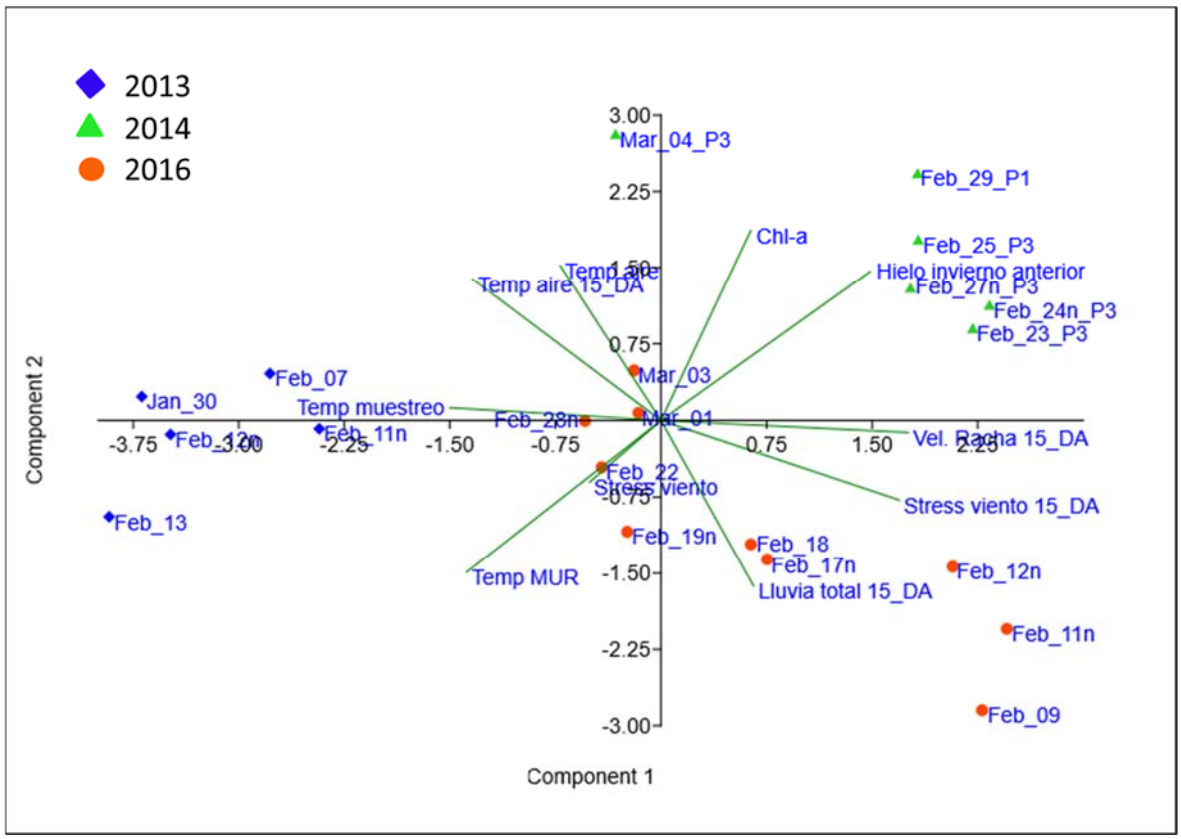

Figura 16: Análisis de componentes principales. Se muestra un gráfico de análisis de componentes principales comparando las variables ambientales entre los tres veranos estudiados. Se consideraron el stress del viento, temperatura (agua y aire), cobertura de hielo en el invierno anterior y clorofila durante el muestreo, además del stress del viento, velocidad de rachas promedio y precipitaciones totales en los 15 días previos al muestreo.

Considerando que hubo una diferencia en la metodología utilizada para secuenciar el gen 16S rRNA entre los set de muestras del 2013-14 y 2015-16, se utilizó el primer set de datos para hacer un análisis de correspondencia canónica y comparar la composición taxonómica de los 100 OTUs más abundantes en este set de datos. Se observó una diferencia entre la composición taxonómica del fitoplancton en los dos veranos. Según el análisis, existen diferencias en composición taxonómica a nivel de OTUs entre las muestras de los dos veranos analizados. La temperatura (aire, superficial del mar MUR y durante el muestreo), explicaría en mayor medida las diferencias en el verano 2013. Las diferencias de la composición taxonómica en la comunidad fitoplanctónica del verano 2014 se explican en mayor medida por las precipitaciones, la cobertura de hielo en el invierno anterior, el estrés y rachas de viento en el periodo previo al muestreo y la concentración de clorofila (fig. 17).

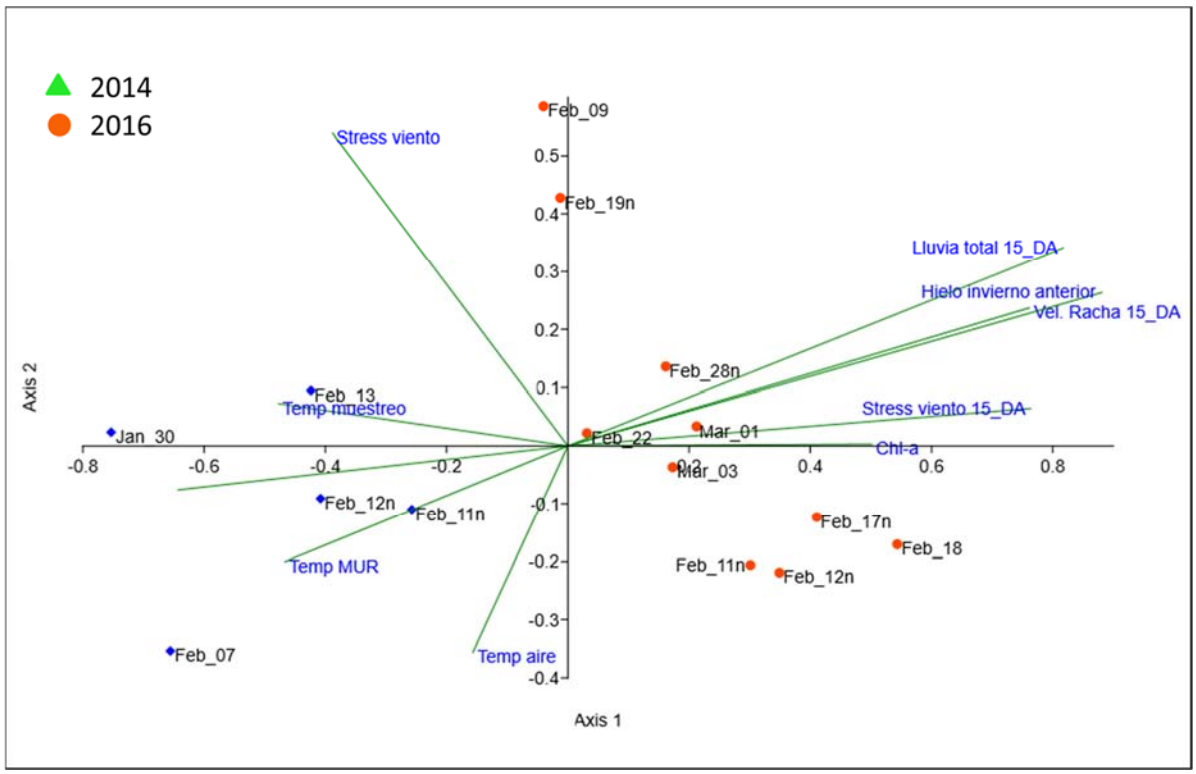

Figura 17: Análisis de correspondencia canónica. La figura muestra este análisis realizado a partir de los 100 OTUs más abundantes, previa transformación a raíz cuadrada. Los factores ambientales considerados fueron el stress del viento, temperatura (agua y aire), cobertura de hielo en el invierno anterior y clorofila durante el muestreo, además del stress del viento, velocidad de rachas promedio y precipitaciones totales en los 15 días previos al muestreo.

DISCUSIÓN

Diferencias en las condiciones meteorológicas y oceanográficas superficiales en la Península Antártica y Bahía Chile.

El análisis multiescala de las condiciones de temperatura y stress del viento en la zona de las Islas Shetland del Sur y la Península antártica muestra que para ambos factores ambientales existieron patrones de variación consistentes entre las distintas escalas espaciales estudiadas (ver tabla 3). Además, hubo correlación significativa ($R>0,63$; $p<0,05$, tabla 3) en la mayoría de los casos con los datos obtenidos *in situ* en la estación meteorológica localizada en Base Prat. Los resultados sugieren que existe coherencia en los patrones de variación entre la escala regional de la zona norte de la Península Antártica y la escala local, es decir, las Islas Shetland del Sur y en específico la zona de la Isla Greenwich. Esto concuerda con datos publicados con anterioridad, que muestran una fuerte consistencia en datos de derretimiento de hielo obtenidos desde QSCAT entre distintas zonas de la Península Antártica (Barrand et al., 2013). El mismo estudio analizó datos meteorológicos en 6 distintas estaciones de medición a lo largo de la Península Antártica demostrando una correlación positiva fuerte entre datos de temperatura tomados en las estaciones Bellinghausen, Esperanza, Marambio, Faraday, Marsh y Rothera, todas ubicadas en distintas áreas en la Península Antártica Oeste (Barrand et al., 2013). Del mismo modo, los datos presentados en el presente trabajo sugieren homogeneidad en las condiciones meteorológicas a lo largo de la Península Antártica.

Esta similitud u homogeneidad también fue observada en los resultados obtenidos desde los datos de satélite, que correlacionan positivamente con los obtenidos mediante la estación meteorológica localizada en Base Prat. En estudios previos se ha mostrado que una combinación entre datos de satélite y datos tomados in situ proveen un medio satisfactorio para evaluar variabilidad espacial, estacional e interanual de larga escala en la Antártica (Comiso, 2000; Barrand et al., 2013). Esto está en concordancia con nuestros resultados, y demuestra que las herramientas satelitales son un buen método para acceder a algunos datos meteorológicos cuando los datos de estaciones fijas no están disponibles. Además, los datos satelitales son una herramienta poderosa cuando se trata de zonas remotas como es la Península Antártica, donde la obtención de datos no es siempre accesible. En el caso del presente estudio, el objetivo se utilizó un gran volumen de datos satelitales como una herramienta que entregó las condiciones sinópticas ambientales que posiblemente influyeron en las comunidades fitoplanctónicas a través de cada verano. Por ejemplo, las dinámicas del hielo en la Península Antártica es una de sus características más importantes y tiene estrecha relación con las fluctuaciones meteorológicas en esta zona. Los cambios de temperatura en esta región están correlacionados con la extensión de hielo marino, especialmente en invierno (Weatherly et al., 1991), y el hielo marino, debido a su albedo, restringe la energía solar absorbida por el océano, reduciendo el intercambio del calor entre

el océano y la atmósfera (King, 1994). En el presente estudio se exploró la variación en la cobertura de hielo en la zona norte de la Península Antártica en los inviernos anteriores a los veranos estudiados mediante data satelital (fig. 8). Los datos muestran que a mayor cobertura de hielo, el derretimiento comenzó más tarde en la primavera, probablemente porque un mayor volumen de hielo demora más en derretirse. Por otra parte, hubo menor cobertura de hielo previo al verano 2013, que fue más cálido que los otros. Además de su relación con las condiciones meteorológicas como la temperatura y la radiación, tanto la extensión del hielo marino como el inicio de su derretimiento han sido descritos como factores importantes en el desarrollo del fitoplancton en la Península Antártica (Venables et al., 2013). El derretimiento anual del hielo marino incorpora agua dulce al sistema y permite el ingreso de la luz, desencadenando grandes florecimientos fitoplanctónicos (Ducklow 2013). La variabilidad interanual en la distribución de los florecimientos se asocia con el inicio de éstos, lo que guarda relación con variaciones en el inicio del derretimiento del hielo marino (Garibotti et al., 2005, Venables et al., 2013). En consecuencia estos estudios sugieren que la cobertura de hielo del invierno es un factor relevante para el desarrollo del fitoplancton.

En este sentido, de acuerdo a los datos del sensor MODIS, la clorofila tanto en las Islas Shetland del Sur como en la Península Antártica tuvo niveles establemente bajos durante el verano 2013, lo cual coincide con una baja cobertura de hielo en el invierno anterior. En 2014 se registró un leve aumento en la clorofila entre fin de enero y comienzos de febrero, y en 2016 se registró un aumento de concentración considerable hacia fines de febrero y marzo. Esas diferencias, tanto en el comienzo como en la magnitud del aumento de la concentración de clorofila, coinciden con las diferencias en la cobertura de hielo y el inicio del derretimiento en el invierno previo a los veranos de estudio. Es decir, cuando hubo menor cobertura de hielo (previo a 2013) hubo menor concentración de clorofila y no se registró un aumento notorio en ésta. Cuando hubo mayor cobertura y el retroceso del hielo comenzó más tarde (previo a 2016), el incremento de clorofila comenzó también más tarde (comparado con 2014) y la magnitud del incremento en la concentración de clorofila fue significativamente superior. Por lo tanto, sin olvidar el sesgo que genera el bajo volumen de datos, se puede sugerir que existe una relación entre la cobertura y tiempo de retroceso del hielo marino con la generación de florecimientos fitoplanctónicos en el verano austral.

El análisis de datos meteorológicos tomados en la Base Prat mostró diferencias de temperatura significativas entre los tres veranos, siendo 2013 el que presentó la mayor temperatura promedio y menor fluctuación (menor desviación estándar). El 2014 presentó menor temperatura promedio y mayor fluctuación. Las anomalías en la temperatura superficial del mar en verano están relacionadas con la intensidad del viento, pues al haber mayor viento habrá mayor mezcla de agua fría hacia la superficie y viceversa (Martinson et al., 2008). A pesar de que en el presente estudio ni la intensidad ni el estrés del viento fueron distintos entre años, sí hubo diferencias significativas en la intensidad de las rachas.

El viento tiene una influencia considerable en la estratificación de la columna de agua, en que a mayor intensidad de viento, la capa de mezcla es más profunda (Piquet et al., 2011, Rozema et al., 2016).

Otras de las variables meteorológicas que pudieron influir sobre la comunidad fitoplanctónica marina en estos veranos, es la precipitación. Según nuestros resultados, junto con las diferencias en temperatura y viento, se encontró que la precipitación fue mayor en 2014 y 2016. Las precipitaciones en la Península Antártica, junto con el derretimiento glaciar, contribuyen incluso en más volumen al Océano Austral que el hielo marino (1 – 2%) (Meredith et al., 2008, Meredith et al., 2010), por lo que también contribuyen a la estratificación de la columna de agua durante el verano. Por otra parte, las precipitaciones arrastran micronutrientes esenciales para el crecimiento fitoplanctónico (i.e. hierro) cerca de zonas costeras como las Islas Shetland del Sur (Dierssen et al., 2002). Por estas razones, las precipitaciones son también un elemento relevante que pudo influir sobre el fitoplancton antártico en los veranos estudiados.

Biomasa, diversidad y composición taxonómica de las comunidades fitoplanctónicas en Bahía Chile

El método más ampliamente utilizado para estimar la biomasa fitoplantónica en el ambiente marino es la cuantificación de la concentración de clorofila-a. Este es un pigmento presente en todas las células fitoplanctónicas, y por lo tanto su detección indica la presencia de fitoplancton en una muestra de agua. Según los resultados del presente estudio, la concentración de clorofila en la Bahía Chile durante el periodo de muestreo 2013 estuvo muy por debajo de lo reportado en la zona costera superficial antártica (0,5 – 7 mg m-3; Schloss et al., 2002; Garibotti et al., 2003; Clarke et al., 2008; Piquet et al., 2011; Mendes et al., 2012; Goncalvez-Araujo et al., 2014). Los veranos 2014 y 2016, en cambio, presentaron valores más acordes con lo reportado en estudios previos, concordando además con los datos de concentración de clorofila-a satelital. Sin embargo, los valores de clorofila satelital para el verano 2013 promediaron cerca de 0,5 mg m^{-3} de clorofila en superficie, manteniéndose constante durante el verano, mientras que los valores medidos *in situ* promediaron bajo los 0,05 mg m^{-3}.

En este estudio se proponen dos explicaciones probables para esta marcada diferencia en la clorofila medida durante el verano 2013. Una posibilidad es que dada la baja cobertura de hielo en el invierno anterior y las altas temperaturas, el crecimiento de fitoplancton haya sido más bajo de lo común y además haya comenzado y decaído anticipadamente, por lo que el muestreo se realizó después de un decaimiento drástico en la biomasa. Otra explicación posible es que la mayoría del fitoplancton (que ya estaba en baja abundancia) se haya encontrado a mayor profundidad que la muestreada. Como ya fue descrito anteriormente, la cobertura de hielo y la precipitación son factores relevantes en la generación de una capa de mezcla somera. Estos dos factores estuvieron disminuidos en el

verano 2013, por lo que es probable que, de haber capa de mezcla, ésta haya sido más profunda que en 2014 y 2016, generando que el fitoplancton se encontrara a más profundidad que la muestreada para ese año. Se ha reportado en trabajo previos que en ausencia de una capa de mezcla o cuando esta es más profunda el fitoplancton se distribuye hasta mayor profundidad y la concentración de pigmentos medida es inferior en la parte superior de la columna de agua (Mendes et al., 2013). Es importante mencionar además, que la clorofila no parece distribuirse homogéneamente en la Bahía Chile ni alrededor de la Isla Greenwich (fig. 11), por lo que también es una posibilidad que la mayor parte de la biomasa fitoplanctónica se haya encontrado en un sector distinto al punto de muestreo.

Además de la concentración de clorofila, este estudio presenta datos de secuenciación de 16S rRNA cloroplastidial para caracterizar la comunidad fitoplanctónica en la Bahía Chile. Considerando las diferencias en metodología para la obtención de las secuencias para los diferentes años muestreados, y por consiguiente los índices de diversidad, estos pueden ser comparados sólo entre los veranos 2013 y 2014 o dentro de un mismo verano (diciembre 2015 y febrero 2016). Se encontraron diferencias significativas en la diversidad alfa (n° de OTUs) entre los veranos 2013 y 2014, sugiriendo que las diferencias en biomasa tendrían relación con la riqueza (número de grupos diferentes) presente en la columna de agua. No existen datos de riqueza de 16S rRNA cloroplastidial previamente reportados en la Antártica, pero el número de OTUs aquí reportado es concordante con datos publicados para secuencias de 18S rRNA de fitoplancton en aguas de la Isla Rey Jorge (Luo et al., 2015).

Los porcentajes de secuencias de eucariontes con respecto al total son consistentes con los valores de biomasa ya descritos, de hecho, se encontró una correlación entre el porcentaje de secuencias de 16S rRNA cloroplastidial y la concentración de clorofila-a en las muestras (R: 0,63; p: 0,002). Esto último indica que el porcentaje de secuencias 16S rRNA cloroplastidial puede ser una buena aproximación a la biomasa fitoplanctónica, lo que ha sido anteriormente mostrado en otros ambientes (Nedham & Fuhrman, 2016). El rango de proporción de secuencias cloroplastidiales con respecto a secuencias de bacterias encontrado para 2014 concuerda con lo reportado en un estudio anterior, donde 6,3 – 44,3 % de las secuencias de 16S rRNA correspondieron a secuencias cloroplastidiales en la zona costera de la Isla Rey Jorge (Zeng et al., 2014). Al comparar los índices de diversidad dentro de un mismo verano, tampoco se obtienen diferencias significativas, lo que indica que a pesar de variar la composición del fitoplancton a través del verano, tanto la cantidad de OTUs presentes como su distribución se mantendría constante.

En cuanto a la composición taxonómica de la comunidad fitoplanctónica en Bahía Chile, se observa que los grupos presentes concuerdan con lo reportado anteriormente en zonas costeras de la Península Antártica (Garibotti et al., 2005; Mendes et al., 2012; Goncalvez-Araujo et al., 2014; Zeng et al., 2014; Moreno-Pino et al., 2016; Egas et al., 2017). El grupo fitoplanctónico con mayor abundancia relativa dentro del conjunto de datos fue

Bacillariophyta. Este taxón está compuesto principalmente por diatomeas, organismos cuyas células están cubiertas de sílice, y caracterizados por su rápido crecimiento en condiciones de altos nutrientes y estabilidad en la columna de agua (Treguer & Jaqces. 1992). Se ha descrito que los incrementos de biomasa fitoplanctónica en zonas costeras antárticas durante el verano austral son principalmente atribuidos a las diatomeas, que llegan a representar hasta un 90% de la concentración de clorofila (Mendes et al., 2012). En este estudio, los veranos 2014 y 2016 presentaron un dominancia de diatomeas en su composición taxonómica (fig. 13). La caracterización de la comunidad de diatomeas durante el verano 2014 indicó que los géneros dominantes fueron *Thalassiosira* y *Pseudo-nitzchia*, y que su abundancia aumentó en al menos dos órdenes de magnitud a medida que avanzó el verano, confirmando que hubo un florecimiento de este grupo durante el periodo de muestreo. Otro grupo fitoplanctónico perteneciente a la misma categoría taxonómica de las diatomeas (División Ochrophyta) y que estuvo representado en los datos del presente estudio fue Dictiocophyceae. Este grupo también conocido como silicoflagelados también ha sido descrito como miembro de la comunidad fitoplanctónica en la Península Antártica (Moreno-Pino et al., 2016, Landaeta et al., 2017), y parece ser un miembro importante de la comunidad fitoplanctónica asociada al hielo marino (Pearson et al., 2015). Sin embargo, sus dinámicas no han sido bien estudiadas en este ambiente.

Los otros dos grupos que dominaron la composición taxonómica de fitoplancton en este estudio fueron Haptophyta y Cryptophyta (fig. 13). El grupo Haptophyta es otro miembro relevante de las comunidades fitoplanctónicas antárticas (Luo et al., 2015; Moreno-Pino et al., 2016). En especial, el género *Phaeocystis*, perteneciente al grupo Primnesiophyta, forma grandes florecimientos en zonas de hielo marino estacional y zonas costeras antárticas (DiTullio et al., 2000). El grupo Cryptophyta corresponde a una clase de flagelados de tamaño pequeño que también son frecuentemente encontrados en el ambiente marino antártico, (Mendes et al., 2013; Luo et al., 2015; Moreno-Pino et al., 2016) y además se han encontrado dominando la zona de borde de hielo marino (Wright & van den Enden, 2000). Estos dos grupos fitoplanctónicos cuyo tamaño fluctúa entre los 5 y 12 µm, estuvieron altamente representandos en el presente estudio, en especial en el verano 2013 y en el periodo de diciembre de 2015, donde representaron hasta un 46% de la abundancia relativa promedio, lo cual concuerda con el derretimiento de hielo más reciente en la Bahía. Como ha sido descrito en los estudios previos ya mencionados, estos grupos forman parte de la comunidad fitoplanctónica antártica de forma permanente pero su abundancia relativa disminuye en verano durante el periodo de florecimiento de diatomeas.

El presente estudio contribuye a la descripción detallada de las comunidades fitoplanctónicas en la Bahía Chile, donde estudios previos de secuenciación masiva de amplicones eran inexistentes, y en las Islas Shetland del Sur, donde sólo hay dos trabajos previos de este tipo publicados (Luo et al., 2015; Moreno-Pino et al., 2016).

Influencia de variables ambientales sobre la comunidad fitoplanctónica en Bahía Chile

La influencia de la temperatura, el viento y la cobertura de hielo, entre otros, sobre la composición taxonómica, diversidad y biomasa de la comunidad fitoplanctónica puede ser tratada desde dos puntos de vista: la variación interanual, y la variación local, como se describe a continuación.

Con respecto a la variación interanual, como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, la principal diferencia a nivel biológico entre los tres veranos estudiados fue la concentración de clorofila-a, la cual es un indicador de biomasa fitoplanctónica. Para hacer esta discusión más sencilla se compararán los veranos 2013 y 2014 (considerando que hubo similitud de 2014 y 2016).

El verano 2013 presentó muy baja concentración de clorofila durante todo el periodo de muestreo, en concordancia con el bajo porcentaje de secuencias de 16S cloroplastidial y las imágenes satelitales de clorofila. La composición taxonómica del fitoplancton durante ese verano presentó las características habituales de periodos de productividad baja o media en este ambiente (Mendes et al., 2013). La diversidad alfa fue menor en este verano, sugiriendo que la baja biomasa también trae consigo una menor diversidad al menos considerando la riqueza como índice.

Por otra parte, el verano 2014 estuvo representado por una biomasa fitoplanctónica acorde a lo reportado en zonas costeras antárticas durante el verano (Clarke et al., 2008; Piquet et al., 2011; Mendes et al., 2012; Goncalvez-Araujo et al., 2014), con un aumento en la concentración de clorofila coincidente con el aumento de la abundancia de diatomeas, por lo tanto un florecimiento estas microalgas.

Las principales diferencias ambientales encontradas entre estos dos veranos fueron la temperatura y la cobertura de hielo en el invierno previo (fig. 16). Los resultados sugieren que en el verano 2013, la baja cobertura de hielo en el invierno anterior, en conjunto con la alta temperatura podrían haber promovido una capa de mezcla más profunda, donde la baja intensidad del viento no indujo la mezcla suficiente para el florecimiento de diatomeas. En cambio en 2014, la situación contraria derivó en una marcada estratificación, lo que en conjunto con mayores eventos de mezcla gracias al viento generó las condiciones ideales para el florecimiento de diatomeas, tal como ocurrió también en 2016.

Se ha reportado que los florecimientos fitoplantónicos son reducidos luego de inviernos con hielo reducido, debido a la menor estabilidad en la columna de agua, que parece reducir la disponibilidad de hierro debido a mayor mezcla vertical (Venables et al., 2013), lo que concuerda con lo presentado en este estudio. Otro estudio que comparó veranos con distintas temperatura en la Isla Rey Jorge indicó que en el verano 2010, que fue más frío que los dos anteriores, la concentración de clorofila fue superior a los veranos más cálidos

(Luo et al., 2015), lo que también concuerda con los resultados presentados aquí. El mismo estudio, sin embargo, indicó un incremento en la abundancia relativa de las criptófitas en el verano 2010, lo cual contrasta con los resultados presentados en este trabajo. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la composición fitoplanctónica en el estudio mencionado fue descrita mediante análisis de pigmentos, lo que podría limitar las comparaciones con el presente con respecto a composición taxonómica.

Además, un estudio que modeló la respuesta de los grupos fitoplanctónicos a un aumento de temperatura indicó que las criptófitas y haptófitas se verían beneficiadas ante un incremento en la temperatura en la Península Antártica (Moline et al., 2004), lo que coincide con los datos presentados aquí. Estos contrastes entre estudios reafirman la necesidad de enriquecer las bases de datos de comunidad fitoplanctónica en la Península Antártica para generar modelos robustos de predicción de cambios en respuesta a un escenario de cambio climático. En conjunto, los datos presentados sugieren que a nivel interanual los principales factores afectando la biomasa fitoplanctónica serían la temperatura y la cobertura de hielo marino, cuya importancia, como ya fue mencionado, tiene que ver con la estabilidad en la columna de agua inducida por una mayor entrada de agua dulce al sistema.

Por otra parte, es posible analizar la variación en la composición fitoplanctónica a escala temporal local en Bahía Chile. La figura 13 muestra que también existe una variación a corto plazo (días) en la comunidad fitoplantónica. Las variaciones a corto plazo suelen estar asociadas a variación en la estabilidad de la columna de agua (Piquet et al., 2011; Egas et al., 217).

En el caso del presente estudio, se observa por ejemplo que en el periodo 2014, la muestra del 19 de febrero en la noche muestra menor abundancia relativa de diatomeas y mayor cantidad de haptófitas. Como ha sido descrito anteriormente, en ausencia de viento existe mayor estabilidad en la columna de agua, lo que favorece a flagelados como haptófitas y criptófitas, mientras que perjudica a diatomeas, que no son motiles y tienden a hundirse. Cuando hay eventos puntuales de viento que inducen mezcla en la columna de agua, las diatomeas se ven favorecidas (Egas et al., 2016). La figura 15 muestras que en los primeros días de marzo se registró el mayor incremento en la abundancia de diatomeas, lo cual coincide con eventos de viento moderado que siguieron un periodo de menor intensidad de rachas (fig. 10). Desafortunadamente, en este estudio no se muestran datos de estabilidad de la columna de agua para acreditar esta situación, pero el viento ha demostrado tener relación con la profundidad de la capa de mezcla durante el verano antártico (Rozema et al., 2016). El aumento fitoplanctónico y favorecimiento de las diatomeas en respuesta a una alternancia de evento de estabilidad y mezcla ha sido reportado en estudios previos (Piquet et al., 2011; Egas et al., 2017). Estos resultados sugieren que las fluctuaciones de viento, a pesar de no tener un efecto directo sobre la variación interanual de la biomasa fitoplanctonica, si parecen tener una influencia sobre la variación en la composición

taxonómica y la biomasa del fitoplancton en la Bahía Chile en el corto plazo, es decir en la escala temporal de días. Esta situación es similar a descripciones anteriores de las dinámicas fitoplanctónicas en Bahía Ryder (Piquet et al., 2011) y Bahía Fildes (Egas et al., 2017). Los presentes resultados constituyen un aporte al conocimiento de las dinámicas fitoplanctónicas en Bahía Chile, incluyendo además la influencia de dinámicas meteorológicas sobre las variaciones aquí descritas.

CONCLUSIÓN

Los resultados presentados en este estudio sugieren que las variables oceanográficas y meteorológicas afectan de forma diferenciada a la comunidad fitoplanctónica, dependiendo de la escala temporal que se analice.

Dadas las diferencias encontradas tanto en la cobertura de hielo del invierno previo como en la concentración de clorofila en los veranos estudiados, se sugiere que existe una relación entre la cobertura y tiempo de retroceso del hielo marino y la generación de florecimientos fitoplanctónicos de verano en la Península Antártica. Por lo tanto, la variación de las comunidades fitoplanctónicas a escala interanual, parece responder a la variación en la temperatura y la cobertura de hielo marino observada en el invierno previo.

En cuanto a la influencia del viento, los resultados del presente estudio sugieren que las fluctuaciones del viento tienen influencia sobre la variación en la diversidad y composición taxonómica de fitoplancton en la Bahía Chile en periodo estival, y su efecto parece actuar en la escala temporal de días. Considerando esto, la hipótesis de trabajo puede aceptarse parcialmente, ya que el viento tendría influencia sobre la composición y diversidad pero no sobre la biomasa presente en el verano austral.

El presente estudio contribuye a la descripción detallada por primera vez mediante secuenciación de amplicones de las comunidades fitoplanctónicas en la Bahía Chile, y en las Islas Shetlands del Sur, donde sólo hay dos trabajos publicados (Luo et al., 2015; Moreno-Pino et al., 2016), y aporta al conocimiento de las dinámicas fitoplanctónicas en respuesta a variables ambientales en la Península Antártica.

REFERENCIAS

Alcamán-Arias, M. E., Farías, L., Verdugo, J., Alarcón-Schumacher, T., & Díez, B. 2018. Microbial activity during a coastal phytoplankton bloom on the Western Antarctic Peninsula in late summer. FEMS Microbiology Letters.

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., & Rothery, P. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. Nature, 432(7013), 100-103

Barrand, N. E., Vaughan, D. G., Steiner, N., Tedesco, M., Kuipers Munneke, P., Van Den Broeke, M. R., & Hosking, J. S. 2013. Trends in Antarctic Peninsula surface melting conditions from observations and regional climate modeling. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(1), 315–330.

Clarke, A., Meredith, M. P., Wallace, M. I., Brandon, M. A., & Thomas, D. N. 2008. Seasonal and interannual variability in temperature, chlorophyll and macronutrients in northern Marguerite Bay, Antarctica. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 55(18–19), 1988–2006.

Comiso, J. C. 2000. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from In Situ and satellite infrared measurements. Journal of Climate, 13(10), 1674–1696.

Decelle, J., Romac, S., Stern, R. F., Bendif, E. M., Zingone, A., Audic, S., Guiry M. D., Guillou, L., Tessier, D., Le Gall, F., Gourvil, P., Dos Santos, A., Probert, I., Vaulot, D. & Gourvil, P. 2015. PhytoREF: a reference database of the plastidial 16S rRNA gene of photosynthetic eukaryotes with curated taxonomy. Molecular ecology resources, 15(6), 1435-1445.

Dierssen, H. M., Smith, R. C., & Vernet, M. 2002. Glacial meltwater dynamics in coastal waters west of the Antarctic peninsula. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(4), 1790–1795.

DiTullio, G. R., Grebmeier, J. M., Arrigo, K. R., Lizotte, M. P., Robinson, D. H., Leventer, A., ... & Dunbar, R. B. 2000. Rapid and early export of Phaeocystis antarctica blooms in the Ross Sea, Antarctica. Nature, 404(6778), 595.

Ducklow, H. W., Baker, K., Martinson, D. G., Quetin, L. B., Ross, R. M., Smith, R. C., Stammerjohn, S. E., Vernet, M. & Fraser, W. 2007. Marine pelagic ecosystems: the west Antarctic Peninsula. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 362(1477), 67-94.

Ducklow, H. W., Fraser, W. R., Meredith, M. P., Stammerjohn, S. E., Doney, S. C., Martinson, D. G., Sailley, S. F., Schofield O. M., Steinberg, D. K., Venables H. J. & Amsler, C. D. 2013. West Antarctic Peninsula: an ice-dependent coastal marine ecosystem in transition. Oceanography, 26(3), 190-203.

Egas, C., Henríquez-Castillo, C., Delherbe, N., Molina, E., Dos Santos, A. L., Lavin, P., De la Iglesia, R., Vaulot, D. & Trefault, N. 2017. Short timescale dynamics of phytoplankton in Fildes Bay, Antarctica. Antarctic Science, 29(3), 217-228.

Falkowski, P. G., Fenchel, T., & Delong, E. F. 2008. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. Science, 320(5879), 1034-1039.

Garibotti, I. A., Vernet, M., Ferrario, M. E., Smith, R. C., Ross, R. M., & Quetin, L. B. 2003. Phytoplankton spatial distribution patterns along the western Antarctic Peninsula (Southern Ocean), 261, 21–39.

Garibotti, I. A., Vernet, M., & Ferrario, M. E. 2005. Annually recurrent phytoplanktonic assemblages during summer in the seasonal ice zone west of the Antarctic Peninsula (Southern Ocean). Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 52(10), 1823-1841.

García-Muñoz, C., Sobrino, C., Lubián, L. M., García, C. M., Martínez-García, S., & Sangrà, P. 2014. Factors controlling phytoplankton physiological state around the South Shetland Islands (Antarctica). Marine Ecology Progress Series, 498, 55-71.

Gonçalves-Araujo, R., de Souza, M. S., Tavano, V. M., & Garcia, C. A. E. 2015. Influence of oceanographic features on spatial and interannual variability of phytoplankton in the Bransfield Strait, Antarctica. Journal of Marine Systems, 142, 1-15.

Tréguer, P., & Jacques, G. 1992. Review Dynamics of nutrients and phytoplankton, and fluxes of carbon, nitrogen and silicon in the Antarctic Ocean. In Weddell Sea Ecology (pp. 149-162). Springer, Berlin, Heidelberg.

King, J. C. 1994. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. International journal of climatology, 14(4), 357-369.

King, J. C., Turner, J., Marshall, G. J., Connolley, W. M., & Lachlan-Cope, T. A. 2003. Antarctic Peninsula climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records (pp. 17-30). American Geophysical Union.

Huntley, M. E., Lopez, M. D. G., & Karl, D. M. 1991. Top predators in the Southern Ocean: A major leak in the biological carbon pump. Science 253(5015), 64-66.

Landaeta, M. F., Vera-Duarte, J., Manríquez, K., Marcovich, N., Latorre-Melín, L., López-Berger, V., Letelier, J., Alvarado-Niño, M., Masotti, I. & La Mesa, M. 2017. Trophic plasticity of larval notothenioid fish Harpagiferantarcticus in shallow waters from the South Shetland Islands, Antarctica. Polar Biology, 40(4), 837-851.

Levitus, S., Conkright, M. E., Reid, J. L., Najjar, R. G., & Mantyla, A. 1993. Distribution of nitrate, phosphate and silicate in the world oceans. Progress in Oceanography, 31(3), 245-273.

Luo, W., Li, H., Gao, S., Yu, Y., Lin, L., & Zeng, Y. 2016. Molecular diversity of microbial eukaryotes in sea water from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. Polar Biology, 39(4), 605-616.

Martinson, D. G., Stammerjohn, S. E., Iannuzzi, R. A., Smith, R. C., & Vernet, M. 2008. Western Antarctic Peninsula physical oceanography and spatio-temporal variability. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 55(18–19), 1964–1987.

Massana, R., Murray, A. E., Preston, C. M., & DeLong, E. F. 1997. Vertical distribution and phylogenetic characterization of marine planktonic Archaea in the Santa Barbara Channel. Applied and environmental microbiology, 63(1), 50-56.

Mendes, C. R. B., de Souza, M. S., García, V. M. T., Leal, M. C., Brotas, V., & Garcia, C. A. E. 2012. Dynamics of phytoplankton communities during late summer around the tip of the Antarctic Peninsula. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 65, 1-14.

Mendes, C. R. B., Tavano, V. M., Leal, M. C., de Souza, M. S., Brotas, V., & Garcia, C. A. E. 2013. Shifts in the dominance between diatoms and cryptophytes during three late summers in the Bransfield Strait (Antarctic Peninsula). Polar Biology, 36(4), 537-547.

Meredith, M. P., & King, J. C. 2005. Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. Geophysical Research Letters, 32(19).

Meredith, M. P., Brandon, M. A., Wallace, M. I., Clarke, A., Leng, M. J., Renfrew, I. A., … King, J. C. 2008. Variability in the freshwater balance of northern Marguerite Bay, Antarctic Peninsula: Results from δ18O. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 55(3–4), 309–322.

Moline, M. A., Claustre, H., Frazer, T. K., Schofield, O., & Vernet, M. 2004. Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. Global Change Biology, 10(12), 1973-1980.

Montes-Hugo, M., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E., & Schofield, O. 2009. Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula. Science, 323(5920), 1470-1473.

Moreno-Pino, M., De la Iglesia, R., Valdivia, N., Henríquez-Castilo, C., Galán, A., Díez, B., & Trefault, N. 2016. Variation in coastal Antarctic microbial community composition at sub-mesoscale: spatial distance or environmental filtering?. FEMS microbiology ecology, 92(7), fiw088.

Peck, L. S., Webb, K. E., & Bailey, D. M. 2004. Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species. Functional Ecology, 18(5), 625-630

Pérez-Santos, I., Schneider, W., Sobarzo, M., Montoya-Sánchez, R., Valle-Levinson, A., & Garcés-Vargas, J. 2010. Surface wind variability and its implications for the Yucatan basin-Caribbean Sea dynamics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 115(C10).

Piquet, A. M. T., Bolhuis, H., Meredith, M. P., & Buma, A. G. 2011. Shifts in coastal Antarctic marine microbial communities during and after melt water-related surface stratification. FEMS microbiology ecology, 76(3), 413-427.

Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Peplies J., Glöckner F. O. 2013 The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools. Nucl. Acids Res. 41 (D1): D590-D596.

Rozema, P. D., Biggs, T., Sprong, P. A., Buma, A. G., Venables, H. J., Evans, C., Meredith, M. & Bolhuis, H. 2017. Summer microbial community composition governed by upper-ocean stratification and nutrient availability in northern Marguerite Bay, Antarctica. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 139, 151-166.

Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong C. S., Wallace, Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T., Kozyr, A., Ono, T. & Rios, A. F. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO_2. Science, 305(5682), 367-371.

Schloss, P. D., Westcott, S. L., Ryabin, T., Hall, J. R., Hartmann, M., Hollister, E. B., Lesniewski, R. A., Oakley B. B., Parks, D. H., Robinson, C. J., Sahl, J. W., Stres, B., Thallinger, G. G., Van Horn, D. J. & Weber C. F. 2009. Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. Applied and environmental microbiology, 75(23), 7537-7541.

Schloss, I. R., Abele, D., Moreau, S., Demers, S., Bers, A. V., González, O., & Ferreyra, G. A. 2012. Response of phytoplankton dynamics to 19-year (1991–2009) climate trends in Potter Cove (Antarctica). Journal of Marine systems, 92(1), 53-66.

Steig, E. J., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M. E., Comiso, J. C., & Shindell, D. T. (2009). Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. Nature, 457(7228), 459-462.

Sun, C., & Watts, D. R. 2002. Heat flux carried by the Antarctic Circumpolar Current mean flow. Journal of Geophysical Research: Oceans, 107(C9).

Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carleton, A. M., Jones, P. D., Lagun, V., Reid, P. A. & Iagovkina, S. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. International journal of Climatology, 25(3), 279-294.

Venables, H. J., Clarke, A., & Meredith, M. P. 2013. Wintertime controls on summer stratification and productivity at the western Antarctic Peninsula. Limnology and Oceanography, 58(3), 1035–1047.

Vernet, M., Martinson, D., Iannuzzi, R., Stammerjohn, S., Kozlowski, W., Sines, K., Smith, R. & Garibotti, I. 2008. Primary production within the sea-ice zone west of the Antarctic Peninsula: I—Sea ice, summer mixed layer, and irradiance. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 55(18), 2068-2085.

Weatherly, J. W., Walsh, J. E., & Zwally, H. J. 1991. Antarctic sea ice variations and seasonal air temperature relationships. Journal of Geophysical Research: Oceans, 96(C8), 15119-15130.

Wright, S. W., & van den Enden, R. L. 2000. Phytoplankton community structure and stocks in the East Antarctic marginal ice zone (BROKE survey, January–March 1996) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigment signatures. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 47(12-13), 2363-2400.

Yelland, M., & Taylor, P. K. 1996. Wind stress measurements from the open ocean. Journal of Physical Oceanography, 26(4), 541-558.

Zeng, Y. X., Zhang, F., He, J. F., Lee, S. H., Qiao, Z. Y., Yu, Y., & Li, H. R. 2013. Bacterioplankton community structure in the Arctic waters as revealed by pyrosequencing of 16S rRNA genes. Antonie Van Leeuwenhoek, 103(6), 1309-1319.

ANEXO 1: FIGURAS Y TABLAS SUPLEMENTARIAS

Tabla S1: Estadística básica de las condiciones meteorológicas medidas in situ en Bahía Chile. Se muestra el valor mínimo, máximo, suma total (sólo para precipitaciones), promedio y desviación estándar (SD) para las condiciones meteorológicas de los tres veranos estudiados, y se incluyen datos de 2017 como información adicional.

	Precipitación (mm)	**Temperatura (aire) °C**	**Cobertura nubosa (%)**	**Intensidad de rachas (m/s)**	**Intensidad del viendo (m/s)**	**Estrés del viento (hpa)**
2013						
Min	0,0	-4,450	0,0	0,0	0,50	0,001
Max	11,1	4,40	100	32,900	16,40	0,575
Total	93,9					
Promedio	1,043	1,581	82,847	4,635	5,651	0,087
SD	2,206	1,408	22,985	9,046	3,196	0,115
2014						
Min	0,0	-5,730	31,30	0,000	0,840	0,0
Max	23,7	2,530	107,80	34,880	16,140	0,7
Total	188,3					
Promedio	2,092	0,266	89,104	11,49499	6,064	0,095
SD	3,529	1,720	13,248	9,878942	3,262	0,120
2016						
Min	0,0	-1,650	15,630	0,0	1,410	0,002
Max	26,6	3,550	100	52,760	15,950	0,622
Total	181,1					
Promedio	2,012	1,196	84,701	10,909	5,604	0,076
SD	4,122	1,198	18,302	11,108	2,869	0,106
2017						
Min	0	-3,075	7,813	0,0	1,540	0,003

Max	10,5	3,688	100	33,500	15,560	0,509
Total	137					
Promedio	1,5222	1,666	88,199	8,532	5,133	0,073
SD	2,275	1,518	17,026	9,328	2,893	0,088

Tabla S2: Índices de diversidad y proporción de secuencias. La tabla muestra, por cada muestra y para cada set de muestreo, la cobertura obtenida en la secuencación del gen 16s rRNA Cloroplastidial, el números de Unidades taxonómicas operacionales (OTU), el índice de Shannon no paramétrico y el porcentaje de secuencias cloroplastidiales con respecto al total de secuencias de 16s rRNA. Los valores fueron calculados en el software Mothur.

Muestra	Cobertura	% Secuencias Cloroplastidiales	N° OTUS
2013			
Jan_30	0,98	0,15	43
Feb_07	0,98	0,23	45
Feb_11n	0,97	0,26	72
Feb_12n	0,97	0,25	67
Feb_13	0,98	0,08	48
2014			
Feb_09	0,98	6,42	83
Feb_11n	0,98	59,35	350
Feb_12n	0,97	35,74	255
Feb_17n	0,98	28,34	226
Feb_18	0,98	28,68	144
Feb_19n	0,97	4,16	69
Feb_22	0,97	14,07	91
Feb_28n	0,97	9,92	124
Mar_01	0,97	9,53	81
Mar_03	0,98	35,59	138
2016			
Feb_18_P1	0,95	31,15	187
Feb_18n_P1	0,95	33,33	188
Feb_22_P2	0,94	22,06	249
Feb_23_P3	0,93	15,71	194
Feb_24n_P3	0,92	8,39	204
Feb_25_P3	0,94	6,25	121
Feb_26n_P1	0,92	7,82	195
Feb_27n_P3	0,93	6,43	131
Feb_29_P1	0,93	19,1	252
Mar_04_P3	0,95	3,31	100

Dec 2015			
Dec_5_P1	0,93	44,29	333
Dec_5_P2	0,93	35,2	310
Dec_5_P3	0,93	34,6	239
Dec_10_P1	0,94	38,38	389
Dec_13_P1	0,92	36,07	317
Dec_13_P3	0,93	27,99	320

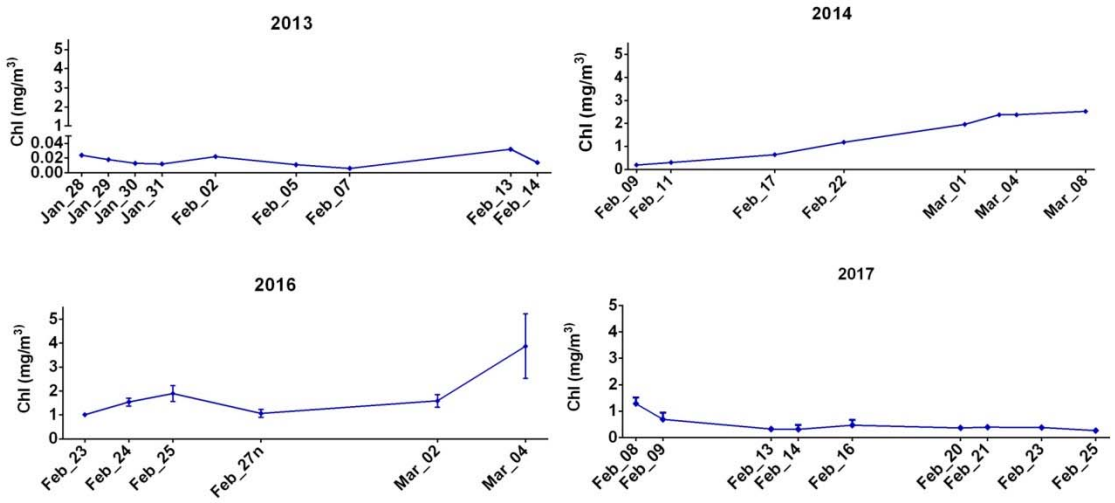

Figura S1: Concentración de clorofila en la Bahía Chile incluyendo el verano 2017. Se muestra la concentración de clorofila total en el punto P3 durante los muestreos en Bahía Chile en los veranos 2013, 2014, 2016 y 2017.