




Flujos de sedimento glaciomarino en pequeñas bahías de la costa de Danco, península Antártica

Glacimarine sediment flows in small bays on the Danco Coast, Antarctic Peninsula

Cristian Rodrigo^{1*}, Andrés Varas-Gómez², César Grisales³, Diana Quintana-Saavedra⁴ y Ricardo Molares⁴

 0000-0003-3523-9698

1. Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello. Viña del Mar, Chile. cristian.rodrigo@unab.cl
 2. Instituto de Fomento Pesquero, Departamento de Oceanografía y Medio Ambiente, Valparaíso, Chile. andres.varas@ifop.cl
 3. Comisión Colombiana del Océano (CCO), Bogotá, Colombia. d.estrategico@cco.gov.co
 4. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Dirección General Marítima. Cartagena de Indias, Colombia. diana.quintana@dimar.mil.co, jefcioh@dimar.mil.co
- * Autor de correspondencia.

RESUMEN

El calentamiento atmosférico global y el aumento de las temperaturas oceánicas pueden contribuir a la aceleración del derretimiento de los glaciares e influir en la generación y en las características físicas de flujos de sedimentos en bahías y fiordos de la península Antártica. Durante la Primera Expedición Científica de Colombia a la Antártica, llevada a cabo entre enero y febrero de 2015, se midieron variables hidrográficas (temperatura, salinidad, presión y turbidez) en la columna de agua, desde muy cerca del frente glaciar principal hacia costa afuera, en cinco bahías de la costa de Danco, península Antártica occidental. Se identificaron plumas de sedimento glaciomarino provenientes del glaciar de marea en todas las bahías; sin embargo, con extensiones espaciales variables así también en la concentración de sedimentos, siendo aquellas de la zona central de la costa de Danco, las más extensas y concentradas. Por comparación con años anteriores, en este trabajo se registró en promedio mayores concentraciones de partículas. El mayor flujo de sedimentos glaciomarinos se podría asociar con un mayor derretimiento glaciar, entre otros posibles factores.

PALABRAS CLAVES: Ambiente glaciomarino, Plumas de sedimentos, Turbidez, Variables oceanográficas, Glaciar de marea.

ABSTRACT

Global atmospheric warming and rising ocean temperatures can contribute to the acceleration of glacier melting and influence the generation and physical characteristics of sediment flows in bays and fjords of the Antarctic Peninsula. During the First Scientific Expedition of Colombia to the Antarctic, carried out between January and February 2015, hydrographic variables (temperature, salinity, pressure and turbidity) were measured in the water column, from very close to the main glacier front towards the offshore, on 5 bays of the Danco Coast, Western Antarctic Peninsula. Glacimarine sediment plumes from the tidewater glacier were identified in all bays, however, with varying spatial extensions as well as the concentration of sediments, being those of the central area of the Danco Coast, the most extensive and concentrated. By comparison with previous years, in this work higher average particle concentrations were recorded. The greater flow of glacimarine sediments could be associated with greater glacial melting, among other possible factors.

KEYWORDS: Glacimarine environment, Sediment plume, Turbidity, Oceanographic Variable, Tidewater Glacier.

INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones climáticas durante los períodos de calentamiento atmosférico y oceánico han alterado los patrones dinámicos de los glaciares y, como resultado, se han observado pérdidas significativas de las reservas de hielo a pequeña y gran escala en los ambientes glaciomarineros de la península Antártica durante los últimos años (Hogg *et al.*, 2017). La región de la península Antártica es considerada una zona sensible ante el cambio climático (Turner *et al.*, 2005) y se espera que los efectos de esos cambios sean más notables. La costa de Danco corresponde a una zona de transición entre un clima subpolar a uno polar (Griffith y Anderson, 1989; Anderson y Domack, 1991), por lo que se podría esperar una mayor sensibilidad ante los cambios. La estacionalidad de la península Antártica subpolar modula el derretimiento de los glaciares, siendo primavera-verano cuando se observan las tasas más altas de derretimiento y, con ello, una mayor descarga de sedimentos en la zona costera, situación contraria al período de otoño-invierno (Domack e Ishman, 1993; Domack y McClennen, 1996). Por lo tanto, un avance de la zona subpolar hacia el sur podría tener un impacto sobre el comportamiento glaciar de la zona de transición y polar, y en la producción de sedimentos glaciomarineros.

La formación de agua de origen glacial que se mueve y se extiende fuera de la costa transportando sedimentos, se conoce como “pluma de sedimentos” y se caracteriza por ser un cuerpo de agua fría, en ocasiones de alta densidad (Domack e Ishman, 1993; Domack y Williams, 1990; Domack *et al.*, 1994). La importancia de estas plumas es que contribuyen a elucidar la dinámica glaciomarina costera y, a su vez, dan pistas sobre la evolución climática de la región (Domack e Ishman, 1993; Yoo *et al.*, 2015), considerando también que una mayor concentración de partículas puede asociarse a un mayor derretimiento glacial (Yoo *et al.*, 2015; Rodrigo *et al.*, 2016). Además, el agua cargada con sedimentos puede afectar la productividad biológica marina y los organismos bentónicos del fondo (Dierssen *et al.*, 2002; Marín *et al.*, 2013). Por lo tanto, en este trabajo se pretende contribuir al estudio del comportamiento glaciar moderno bajo un ambiente de cambio climático acelerado, a través de la identificación y caracterización de las plumas de sedimentos que provienen de los glaciares de marea, complementando así el estudio de Rodrigo *et al.* (2016) asociado a pequeñas bahías y fiordos de la costa de Danco.

INTRODUCTION

Climatic fluctuations during periods of atmospheric and oceanic warming have altered the dynamic patterns of glaciers and, as a result, significant losses of small and large-scale ice reserves have been observed in the glaciomarine environments of the Antarctic Peninsula during recent years (Hogg *et al.*, 2017). The region of the Antarctic Peninsula is considered a sensitive area to climate change (Turner *et al.*, 2005), and the effects of these changes are expected to be more noticeable. The Danco Coast corresponds to a transition zone between a subpolar to a polar climate (Anderson and Domack, 1991; Griffith and Anderson, 1989), so a greater sensitivity to changes could be expected. The seasonality of the subpolar Antarctic peninsula modulates the melting of glaciers, being spring-summer where the highest melting rates are observed and, with it, a greater discharge of sediments in the coastal area, a situation contrary to the autumn-winter period (Domack and Ishman, 1993; Domack and McClennen, 1996). Therefore, an advance of the subpolar zone towards the south could have an impact on the glacial behavior of the transition and polar zone, and the production of glaciomarine sediments.

The formation of water of glacial origin that moves and extends off the coast carrying sediments, is known as a “sediment plume” and is characterized by being a body of cold water, sometimes of high density (Domack and Ishman, 1993; Domack and Williams, 1990; Domack *et al.*, 1994). The importance of these plumes is that they contribute to elucidate the coastal glaciomarine dynamics and, in turn, provide clues about the climatic evolution of the region (Domack and Ishman, 1993; Yoo *et al.*, 2015), also considering that a higher concentration of particles may be associated with greater glacial melt (Yoo *et al.*, 2015; Rodrigo *et al.*, 2016). Also, sediment-laden water can affect marine biological productivity and bottom benthic organisms (Dierssen *et al.*, 2002; Marín *et al.*, 2013). Therefore, this work is intended to contribute to the study of modern glacial behavior under an environment of accelerated climate change, through the identification and characterization of the sediment plumes that come from tidal glaciers, thus complementing the study of Rodrigo *et al.* (2016) associated with small bays and fjords of the Danco Coast.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La costa de Danco está ubicada en el costado occidental de la península Antártica, entre las bahías de Guesalaga y Flandres (Figura 1) (según cartas SHOA N°15300 y 15400). En esta costa se localizan una serie de fiordos que conforman bahías de gran tamaño como: Hughes, Charlotte, Wilhelmina, Andvord y Flandres, pero además se encuentran otras menores, que pueden ser parte de las mayores o presentarse aisladas. Son de interés para este trabajo: Duarte, Eckener, Frei (Recess), Wilhelmina (bahía pequeña central sin nombre) y Paraíso (Paradise) (Figura 1), donde un glaciar principal toma contacto con el agua de mar (glaciar de marea).

Las aguas de las bahías de la costa de Danco están conectadas con las del estrecho de Gerlaché. A modo general, el estrecho recibe aguas de dos sectores principalmente: desde el mar de Bellingshausen y desde el estrecho de Bransfield. Desde el sector sur, es decir por el mar de Bellingshausen, ingresa agua que es relativamente

MATERIALS AND METHODS

Study area

The Danco Coast is located on the western side of the Antarctic Peninsula, between the bays of Guesalaga and Flandres (Figure 1) (according to SHOA charts No. 15300 and 15400). On this coast, there are a series of fjords that make up large bays such as Hughes, Charlotte, Wilhelmina, Andvord, and Flandres, but there are also other smaller ones, which can be part of the larger ones or appear isolated. They are of interest for this work: Duarte, Eckener, Frei (Recess), Wilhelmina (small central bay with no name), and Paraíso (Paradise) (Figure 1), where the main glacier comes into contact with seawater (glacier tidal).

The waters of the bays on the Danco Coast are connected to those of the Gerlaché Strait. In general, the strait receives water from two main sectors: from the Bellingshausen Sea and the Bransfield Strait. From the southern sector, that is, through the Bellingshausen Sea, water enters that is relatively warm and less saline

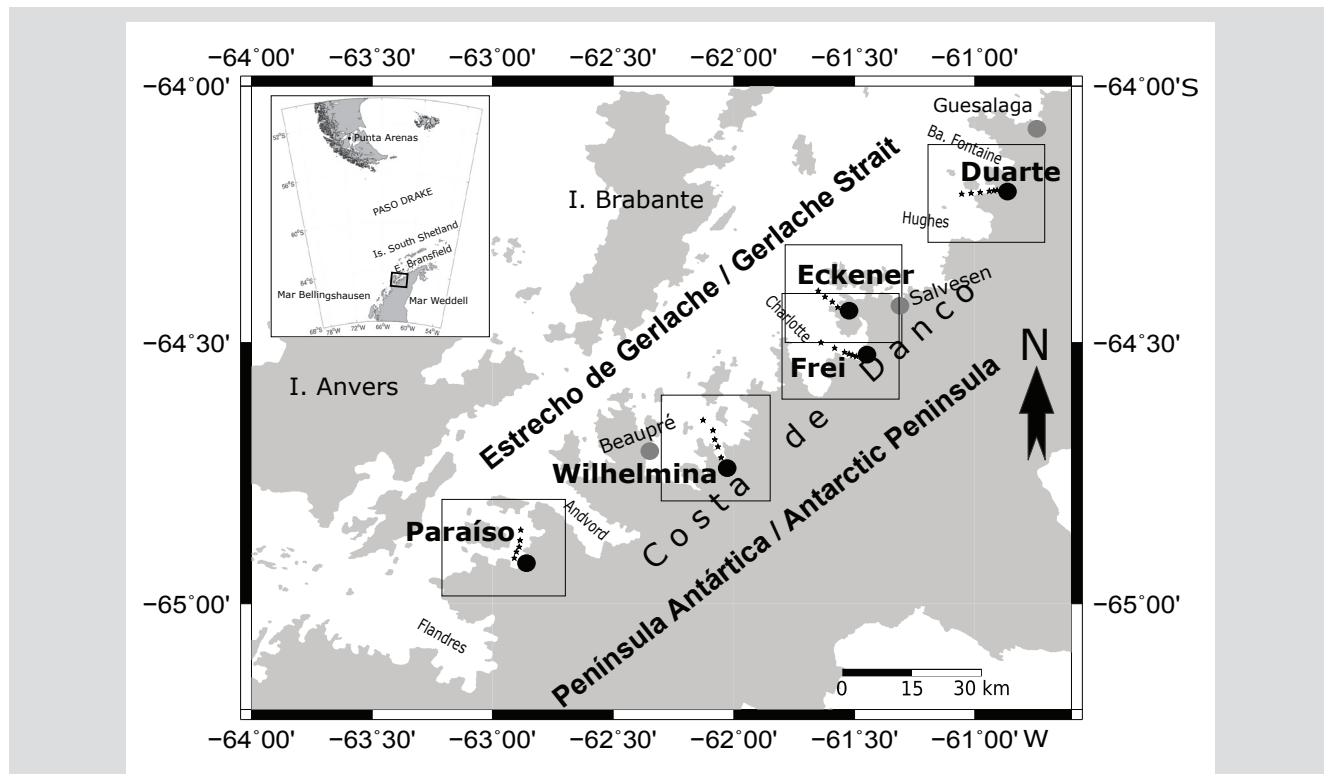


Figura 1. Área de estudio y la costa de Danco en la península Antártica. En los recuadros y nombres con letras negras, las bahías estudiadas en este trabajo. Con estrellas se indican las posiciones de las estaciones oceanográficas realizadas durante la Primera Expedición Científica de Colombia a la Antártica, entre enero y febrero de 2015.

Figure 1. Study area and the Danco Coast on the Antarctic Peninsula. In the boxes and names in bold letters, the bays studied in this work. Stars indicate the positions of the oceanographic stations carried out during the First Colombian Scientific Expedition to the Antarctic, between January and February 2015.

cálida y menos salina con respecto al estrecho y, desde el sector norte, hay un aporte de aguas que fluyen desde el mar de Weddell, que son modificadas en el estrecho de Bransfield; estas son frías y más salinas con respecto a las de Gerlaché (Sangrá *et al.*, 2011). Los flujos superficiales predominantes del estrecho de Gerlaché se asemejan bastante a los patrones de flujo del Bransfield, en el cual, ambos están compuestos por: un flujo en dirección norte hacia las islas Shetland del Sur, un flujo menor en dirección oeste, y un flujo en dirección noreste hacia el margen continental de la península Antártica (Zhou *et al.*, 2002). Sería este último el que tendría una mayor influencia sobre las bahías y fiordos de la costa de Danco. Sin embargo, los patrones de circulación superficial y profunda del sector del estrecho de Gerlaché son complejos, esto es principalmente debido a la geomorfología que existe (islas, canales, fiordos, bahías, *sill* y pasos someros entre otros); pero es posible identificar dos tipos de circulación: una barotrópica en superficie y otra baroclínica que se da entre 200 y 400 m de profundidad (García *et al.*, 2002; Sangrá *et al.*, 2011). Luego, la típica columna de agua del estrecho consiste en una capa superficial compuesta por Aguas Transicionales Zonal con Influencia del Mar de Bellingshausen (TBW) y por una capa profunda (alcanzando el fondo) llamada Aguas Transicionales Zonal con Influencia del Mar de Weddell (TWW). Esta última es condicionada por intrusiones del Agua Circumpolar Profunda (CDW) la cual podría esperarse que penetre desde el oeste. Además, se espera que TBW posea aguas más frías y dulces que el estrecho de Bransfield, debido a la influencia de agua dulce que ingresa desde los glaciares locales (García *et al.*, 2002). De manera ocasional, en el sector suroeste del estrecho de Gerlaché son detectadas propiedades características del Agua Superficial Antártica (AASW); sin embargo, esta posee menor salinidad que su análoga situada en el este del Mar de Bellingshausen.

Adquisición de datos y procesamiento

Durante la Primera Expedición Científica de Colombia a la Antártica, efectuada entre el 17 de enero y el 1 de febrero de 2015 a bordo del buque de la Armada de Colombia ARC “20 de Julio”, se procedió a efectuar mediciones hidrográficas (temperatura, salinidad, presión y turbidez), ingresando a cinco bahías de la costa de Danco, península Antártica (Figura 1) con una embarcación menor del buque (bote tipo Defender), intentando aproximarse lo más posible al frente del glaciar principal de cada bahía (Tabla 1). Las mediciones se efectuaron con un perfilador SBE 19 Plus V2 CTD-T, hasta una profundidad máxima de ~100 m.

concerning the strait and, from the northern sector, there is a contribution of waters that flow from the Weddell Sea, which are modified in the Bransfield Strait, these are cold and more saline than those of Gerlaché (Sangrá *et al.*, 2011). The predominant surface flows of the Gerlaché Strait closely resemble the flow patterns of the Bransfield, in which both are composed of: a flow in a north direction towards the South Shetland Islands, a minor flow in the west direction, and a flow in the Northeast direction towards the continental margin of the Antarctic Peninsula (Zhou *et al.*, 2002). It would be the latter that would have the greatest influence on the bays and fjords of the Danco Coast. However, the superficial and deep circulation patterns of the Gerlaché Strait sector are complex, this is mainly due to the geomorphology that exists (islands, channels, fjords, bays, sill, and shallow passes, among others), but it is possible to identify two types of circulation: a barotropic on the surface and another baroclinic that occurs between 200 to 400 m depth (García *et al.*, 2002; Sangrá *et al.*, 2011). Then, the typical water column of the strait consists of a surface layer composed of Zonal Transitional Waters with Influence of the Bellingshausen Sea (TBW) and a deep layer (reaching the bottom) called Zonal Transitional Waters with Influence of the Weddell Sea (TWW). The latter is conditioned by intrusions from the Circumpolar Deep Water (CDW) which could be expected to penetrate from the west. Also, TBW is expected to have cooler and fresher waters than the Bransfield Strait, due to the influence of freshwater that enters from local glaciers (García *et al.*, 2002). Occasionally, in the southwest sector of the Gerlaché Strait, characteristic properties of Antarctic Surface Water (AASW) are detected, however, it has lower salinity than its analog located in the east of the Bellingshausen Sea.

Data acquisition and processing

During Colombia's First Scientific Expedition to Antarctica, carried out between January 17 and February 1, 2015, aboard the Colombian Navy ship ARC “20 de Julio”, hydrographic measurements (temperature, salinity, pressure, and turbidity), entering 5 bays off the Danco Coast, Antarctic Peninsula (Figure 1) with a smaller vessel of the ship (Defender type boat), trying to get as close as possible to the front of the main glacier in each bay (Table 1). Measurements were made with an SBE 19 Plus V2 CTD-T profiler, up to a maximum depth of ~ 100 m.

Turbidity measurements were obtained using an ECO NTU sensor (0-1000 NTU) with a sensitivity of

Las mediciones de turbidez se obtuvieron mediante un sensor ECO NTU (0-1000 NTU) con una sensibilidad de 0,02 NTU. Para comparar y discutir estos resultados con otros trabajos que utilizaron metodologías diferentes para determinar la concentración de partículas, los valores de NTU se transformaron a mg/l de acuerdo con el procedimiento descrito en Rodrigo *et al.* (2016), quienes usaron muestras de agua obtenidas durante este crucero. La ecuación resultante de dicha metodología se muestra a continuación:

$$[TSS] = 3.84 \text{ NTU} + 2.61 \text{ (1)}$$

Donde, [TSS]: Concentración de sólidos suspendidos totales en mg/l; NTU: Unidades de turbidez nefelométrica.

Los datos hidrográficos y de turbidez en la columna de agua anómalos, se eliminaron manualmente. Para determinar la marea durante las mediciones se utilizó el Tide Model Driver 1.2 (TMD) (Padman, 2005), corroborado con mediciones *in situ* de un mareógrafo instalado en la base Gabriel González Videla en bahía Paraíso (Molares, 2015).

0.02 NTU. To compare and discuss these results with other works that used different methodologies to determine the concentration of particles, the NTU values were transformed to mg / l according to the procedure described in Rodrigo *et al.* (2016), who used water samples obtained during this cruise. The equation resulting from the said methodology is shown below:

$$[TSS] = 3.84 \text{ NTU} + 2.61 \text{ (1)}$$

Where [TSS]: Concentration of total suspended solids in mg / l; NTU: Nephelometric Turbidity Units.

The anomalous hydrographic and turbidity data in the water column were removed manually. To determine the tide during the measurements, the Tide Model Driver 1.2 (TMD) (Padman, 2005) was used, corroborated with *in situ* measurements of a tide gauge installed at the Gabriel González Videla base in Bahía Paraíso (Molares, 2015).

Tabla 1. Ubicación geográfica de las estaciones oceanográficas en las bahías, durante la Primera Expedición Científica Antártica de Colombia, 2015.

Table 1. Geographic locations of the oceanographic stations in the bays, during the First Antarctic Scientific Expedition of Colombia, 2015.

Lugar / Places	Estaciones / Stations	Fecha / Date	Latitud / Latitude (°S)	Longitud / Longitude (°W)	Profundidad / Depth (m)
Bahía Duarte / Duarte Bay	A	05/02/2015	64.205	60.909	130
	B	05/02/2015	64.205	60.923	192
	C	05/02/2015	64.206	60.941	200
	D	05/02/2015	64.209	60.979	250
	E	05/02/2015	64.210	61.016	200
	F	05/02/2015	64.212	61.055	230
Bahía Frei / Frei (Recess) Bay	A	04/02/2015	64.527	61.492	328
	B	04/02/2015	64.524	61.507	180
	C	04/02/2015	64.522	61.522	90
	D	04/02/2015	64.519	61.541	134
	E	04/02/2015	64.511	61.582	115
	F	04/02/2015	64.500	61.638	136
Bahía Wilhelmina / Wilhelmina Bay	A	29/01/2015	64.722	62.053	142
	B	29/01/2015	64.700	62.066	200
	C	29/01/2015	64.686	62.079	450
	D	29/01/2015	64.669	62.087	462
	E	29/01/2015	64.656	62.100	460
Bahía Eckener / Eckener Bay	A	18/01/2015	64.432	61.568	120
	B	18/01/2015	64.421	61.592	147
	C	18/01/2015	64.412	61.622	225
	D	18/01/2015	64.401	61.651	285
Bahía Paraíso / Paradise Bay	A	21/01/2015	64.902	62.910	240
	B	21/01/2015	64.895	62.897	240
	C	21/01/2015	64.891	62.890	240
	D	21/01/2015	64.880	62.886	282
	E	21/01/2015	64.860	62.880	233

RESULTADOS

Características oceanográficas de las bahías

Ensenada Duarte

Las mediciones hidrográficas fueron realizadas durante la marea vaciante. Se encontró que los valores superficiales de temperatura oscilaron entre un mínimo de $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sector intermedio de la sección y un máximo de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el sector más cercano y lejano a la bahía (Figura 2a). Estos sectores superficiales más fríos también se asociaron a menores valores de salinidad (Figura 2b). Las temperaturas más altas (entre $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) se ubicaron en una capa superficial hasta los $\sim 20\text{ m}$ de profundidad y se asociaron a bajos valores de salinidad ($< 33,5$) y densidad ($< 1027,5\text{ kg/m}^3$) (Figura 2a,b,c). Por otra parte,

RESULTS

Oceanographic characteristics of the bays

Ensenada Duarte

Hydrographic measurements were made during the low tide. It was found that the surface temperature values oscillated between a minimum of $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the intermediate sector of the section and a maximum of $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, in the sector closest and furthest from the bay (Figure 2a). These colder surface sectors were also associated with lower salinity values (Figure 2b). The highest temperatures (between $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) were located in a superficial layer up to $\sim 20\text{ m}$ deep and were associated with low values of salinity (< 33.5) and density ($< 1027.5\text{ kg/m}^3$) (Figure 2a, b, c). On the other

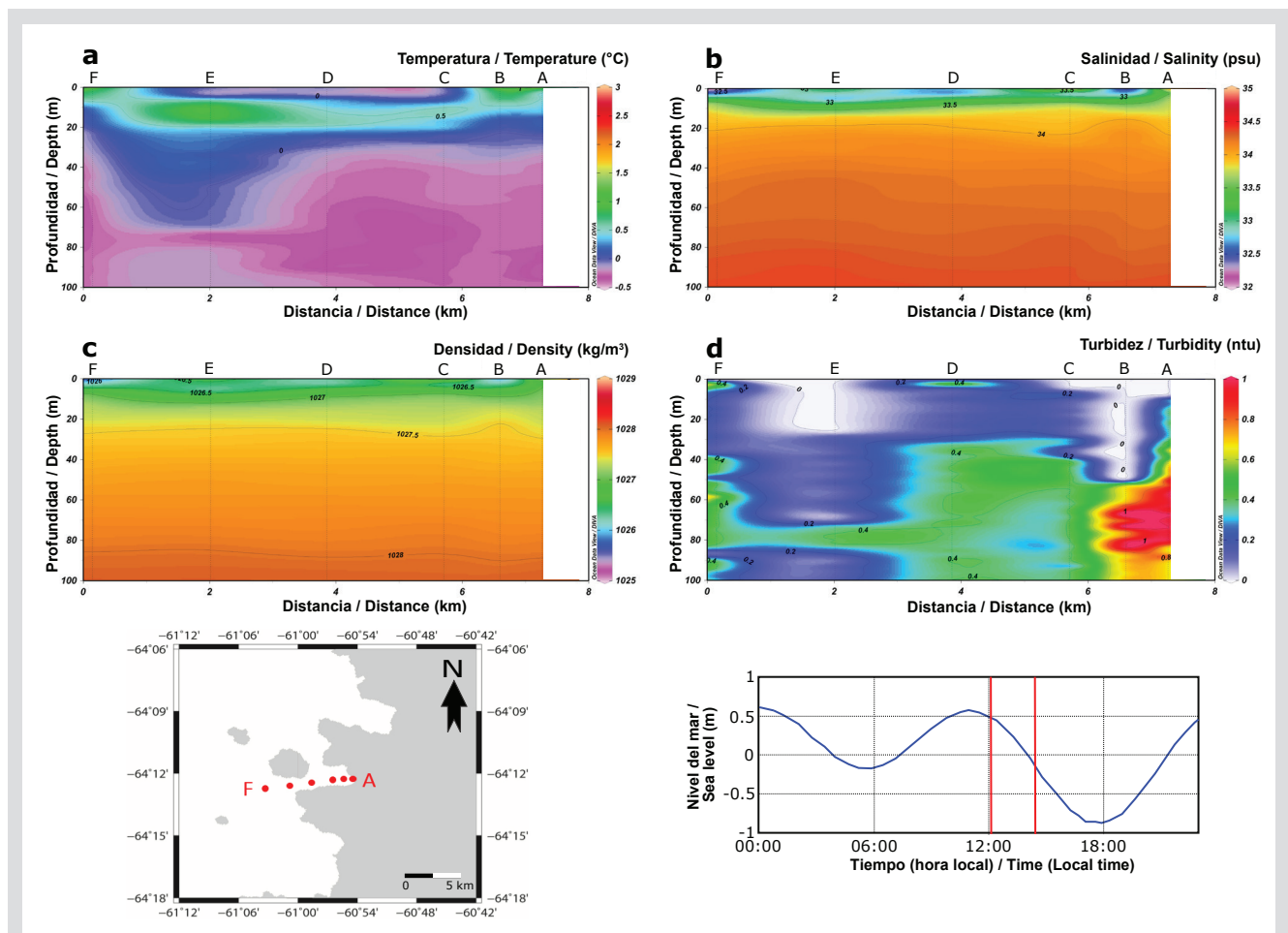


Figura 2. Secciones oceanográficas para la bahía Duarte. **a.** temperatura vs. profundidad. **b.** salinidad vs. profundidad. **c.** densidad vs. profundidad. **d.** turbidez vs. profundidad. Se indica además la localización e identificación de las estaciones oceanográficas en el mapa del costado izquierdo inferior y las variaciones del nivel del mar durante el período de mediciones (entre barras rojas), al costado derecho inferior.

Figure 2. Oceanographic sections for Duarte Bay. **a.** temperature vs. depth. **b.** salinity vs. depth. **c.** density vs. depth. **d.** turbidity vs. depth. The location and identification of oceanographic stations are also indicated on the map on the lower left side and the variations in sea level during the measurement period (between red bars), on the lower right side.

temperaturas superficiales más frías (entre $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) se encontraron entre las estaciones C y E, donde justo se encuentra la entrada de un canal en la costa norte (Figura 2 mapa). La distribución de temperaturas entre 20 y 40 m de profundidad siguió un patrón distinto al nivel superficial, caracterizándose por presentar menores temperaturas en las cercanías del frente glaciar (entre $-0,3$ y $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que las mayores temperaturas se observaron en el sector más lejano a la bahía (entre $-0,2$ y $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Bajo 40 m de profundidad las variables de densidad y salinidad aumentaron gradualmente, sin embargo, altos valores de turbidez se observaron en las estaciones más próximas al frente del glaciar (entre estaciones A y D, figura 2d), de los cuales sus máximos ($> 1\text{ NTU}$) se localizaron muy cerca del glaciar, formando una pluma turbia que se interestratificó generando una capa nefeloide intermedia entre 60 y 80 m de profundidad.

Eckener

Las mediciones hidrográficas fueron realizadas durante la marea vaciante-bajamar. Se encontró que los valores superficiales de temperatura oscilaron entre un mínimo de $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, en las cercanías del glaciar (estación A), y un máximo de $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sector más lejano a la bahía (Figura 3a). Estas se asociaron a bajos valores de salinidad (< 34) y de densidad ($< 1027,5\text{ kg/m}^3$) (Figura 3b, 3c), que presentaron un gradiente inclinado con menores valores hacia la estación A, que también se asociaron a mayores valores de turbidez ($> 0,5\text{ NTU}$). La distribución de temperatura bajo el nivel de 20 m tuvo un patrón similar al nivel superficial, caracterizándose por presentar menores temperaturas en las cercanías del glaciar (entre $-0,1$ y $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), estando su núcleo entre 60 y 80 m de profundidad. La distribución de turbidez mostró distintos despegues de capas nefeloides intermedias (entre 40 y 80 m) que se correlacionaron también con despegues de agua de menor temperatura procedentes del frente glaciar (figura 3d).

Bahía Frei

Las mediciones hidrográficas fueron realizadas durante la marea pleamar-vaciantes. Se encontró que los valores superficiales de temperatura oscilaron entre un mínimo de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las cercanías de la costa y un máximo de $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sector más lejano al frente del glaciar (Figura 4a). Las temperaturas más altas (entre $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) se distribuyeron con una forma de lengua, señalando un ingreso de aguas superficiales más cálidas desde el estrecho hacia el glaciar (entre las estaciones B y F). Por otra parte,

hand, cooler surface temperatures (between $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) were found between stations C and E, where the entrance to a canal is located on the north coast (Figure 2 map). The distribution of temperatures between 20 and 40 m deep, followed a different pattern to the surface level, characterized by lower temperatures in the vicinity of the glacier front (between $-0,3$ and $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), while the higher temperatures were observed in the sector furthest from the bay (between $-0,2$ and $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Below 40 m depth, the density and salinity variables increased gradually, however, high turbidity values were observed in the stations closest to the front of the glacier (between stations A and D, Figure 2d), of which their maximum ($> 1\text{ NTU}$) was located very close to the glacier, forming a cloudy plume that interestratified, generating an intermediate nepheloid layer between 60 and 80 m deep.

Eckener

The hydrographic measurements were made during the ebb tide-low tide. It was found that the surface temperature values oscillated between a minimum of $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, in the vicinity of the glacier (station A), and a maximum of $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the sector furthest from the bay (Figure 3a). These were associated with low salinity values (< 34) and density ($< 1027,5\text{ kg/m}^3$) (Figure 3b, c), which presented a steep gradient with lower values towards station A, which were also associated with higher values of turbidity ($> 0,5\text{ NTU}$). The temperature distribution below the 20 m level had a similar pattern to the surface level, characterized by lower temperatures in the vicinity of the glacier (between $-0,1$ and $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), its core being between 60 and 80 m of depth. The turbidity distribution showed different detachments of intermediate nepheloid layers (between 40 and 80 m) that were also correlated with detachments of lower temperature water from the glacier front (Figure 3d).

Frei (Recess) Bay

The hydrographic measurements were made during the high tide-discharge tide. It was found that the surface temperature values ranged between a minimum of $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ near the coast and a maximum of $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the sector furthest from the front of the glacier (Figure 4a). The highest temperatures (between $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) were distributed with a tongue shape, indicating an inflow of warmer surface waters from the strait towards the glacier (between stations B and F). On the other hand, colder temperatures (between $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) were found between stations A and B, indicating a flow of water from

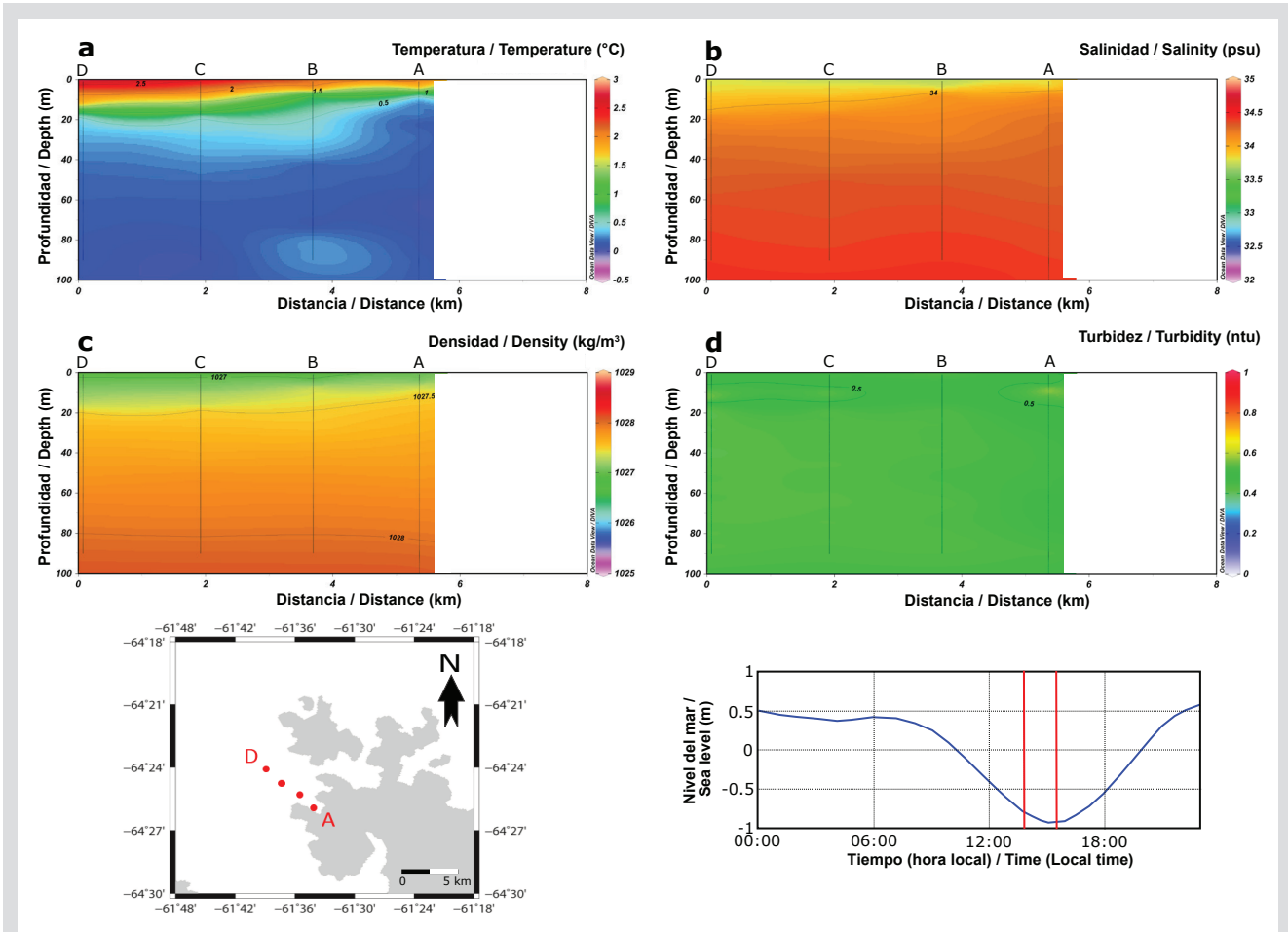
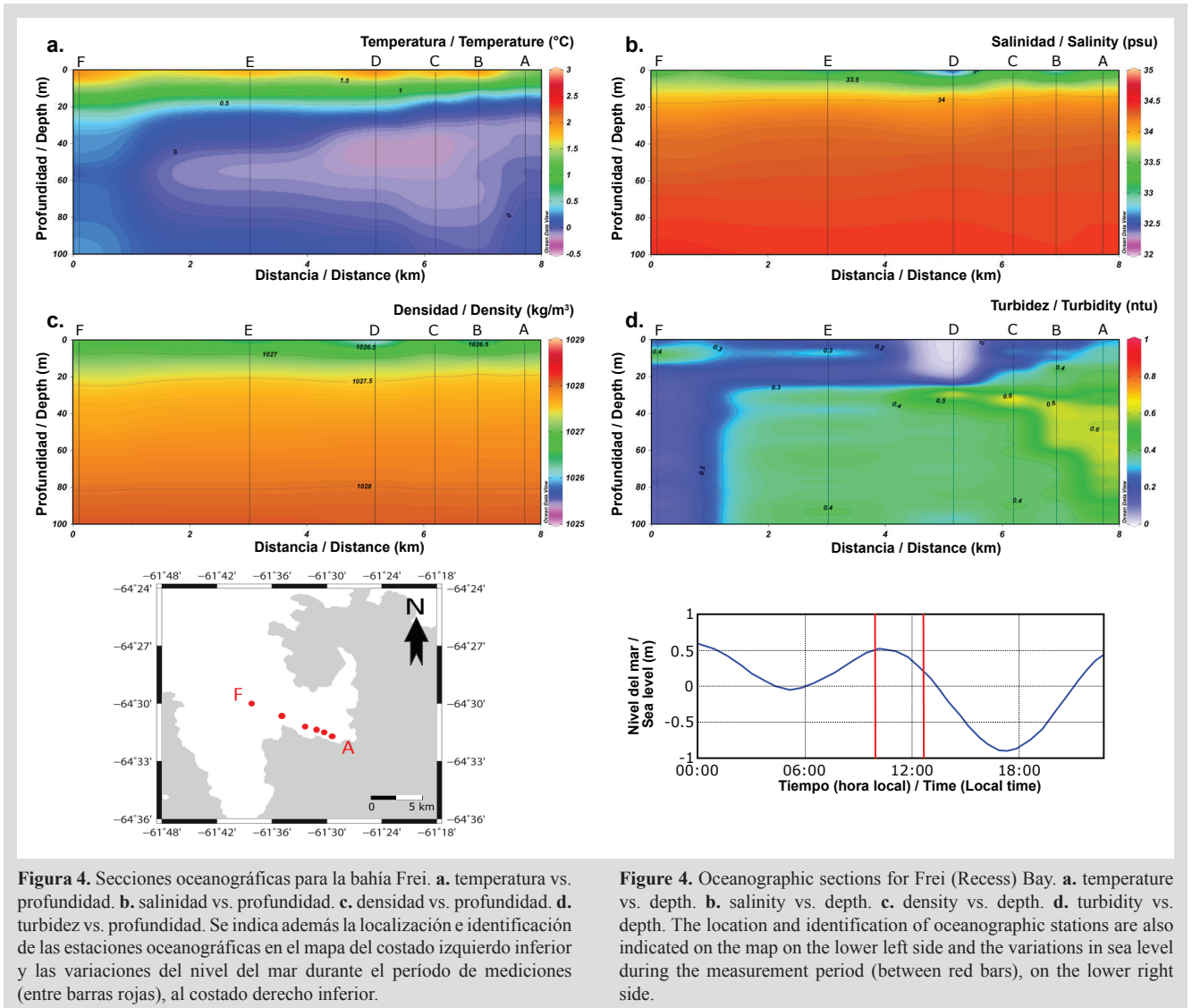


Figura 3. Secciones oceanográficas para la bahía Eckener. **a.** temperatura vs. profundidad. **b.** salinidad vs. profundidad. **c.** densidad vs. profundidad. **d.** turbidez vs. profundidad. Se indica además la localización e identificación de las estaciones oceanográficas en el mapa del costado izquierdo inferior y las variaciones del nivel del mar durante el periodo de mediciones (entre barras rojas), al costado derecho inferior.

Figure 3. Oceanographic sections for Eckener Bay. **a.** temperature vs. depth. **b.** salinity vs. depth. **c.** density vs. depth. **d.** turbidity vs. depth. The location and identification of oceanographic stations are also indicated on the map on the lower left side and the variations in sea level during the measurement period (between red bars), on the lower right side.

temperaturas más frías (entre 0,7 °C y 1,2 °C) se encontraron entre las estaciones A y B, indicando un flujo de aguas desde el glaciar, correlacionándose con menores valores de salinidad y densidad (< 34) y de densidad (< 1027,5 kg/m³) (Figura 3b, 3c), pero con núcleos aún menores, posiblemente asociado a aportes de agua superficial de otros glaciares. La distribución de temperaturas entre el nivel de 20 a 80 m de profundidad, siguió un patrón similar al superficial, caracterizándose por presentar menores temperaturas al interior de la bahía (entre -0,2 y 0,1 °C). Estas bajas temperaturas se asociaron a altos valores de turbidez que muestra la pluma procedente de la descarga glaciar, principalmente, entre 30 y 60 m de profundidad (Figura 4d). Esta pluma tuvo una inclinación ascendente y alcanzó máximos a ~40 m de profundidad (> 0,7 NTU), extendiéndose desde la estación A a la D.

the glacier, correlating with lower values of salinity and density (< 34) and density (< 1027.5 kg/m³) (Figure 3b, c), but with even smaller nuclei, possibly associated with surface water inputs from other glaciers. The distribution of temperatures between the level of 20 to 80 m depth, followed a pattern similar to the surface, characterized by presenting lower temperatures inside the bay (between -0.2 and 0.1 °C). These low temperatures were associated with high turbidity values shown by the plume coming from the glacial discharge, mainly between 30 and 60 m depth (Figure 4d). This plume sloped upward and reached maximum depths at ~40 m (> 0.7 NTU), extending from station A to D.



Bahía Wilhelmina

Las mediciones hidrográficas fueron realizadas durante la marea llanante. Se encontró que los valores superficiales de temperatura oscilaron entre un mínimo de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ al interior de la bahía y un máximo de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sector más lejano (Figura 5a). Las temperaturas más frías (entre $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) se encontraron más cercanas al frente del glaciar (estaciones A y B), contrario a la salinidad cuyos valores más altos se encontraron fuera de la bahía ($\sim 33,8$) (estación E, figura 5b), así también para la densidad en superficie (figura 5c), pero con núcleos menores en la parte central de la sección ($< 1027,5\text{ kg/m}^3$) (estación C). En general, cerca del frente del glaciar, las isohalinas se presentaron inclinadas, indicando la tendencia de que el agua menos salina del fondo tiende hacia superficie.

Wilhelmina Bay

Hydrographic measurements were made during the flood tide. It was found that the surface temperature values oscillated between a minimum of $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ inside the bay and a maximum of $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the furthest sector (Figure 5a). The coldest temperatures (between $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) were found closer to the front of the glacier (stations A and B), contrary to the salinity whose highest values were found outside the bay (~ 33.8) (station E, Figure 5b), also for the surface density (Figure 5c), but with smaller nuclei in the central part of the section ($< 1027.5\text{ kg/m}^3$) (station C). In general, near the front of the glacier, the isohaline was inclined, indicating the tendency that the less saline water at the bottom tends towards the surface.

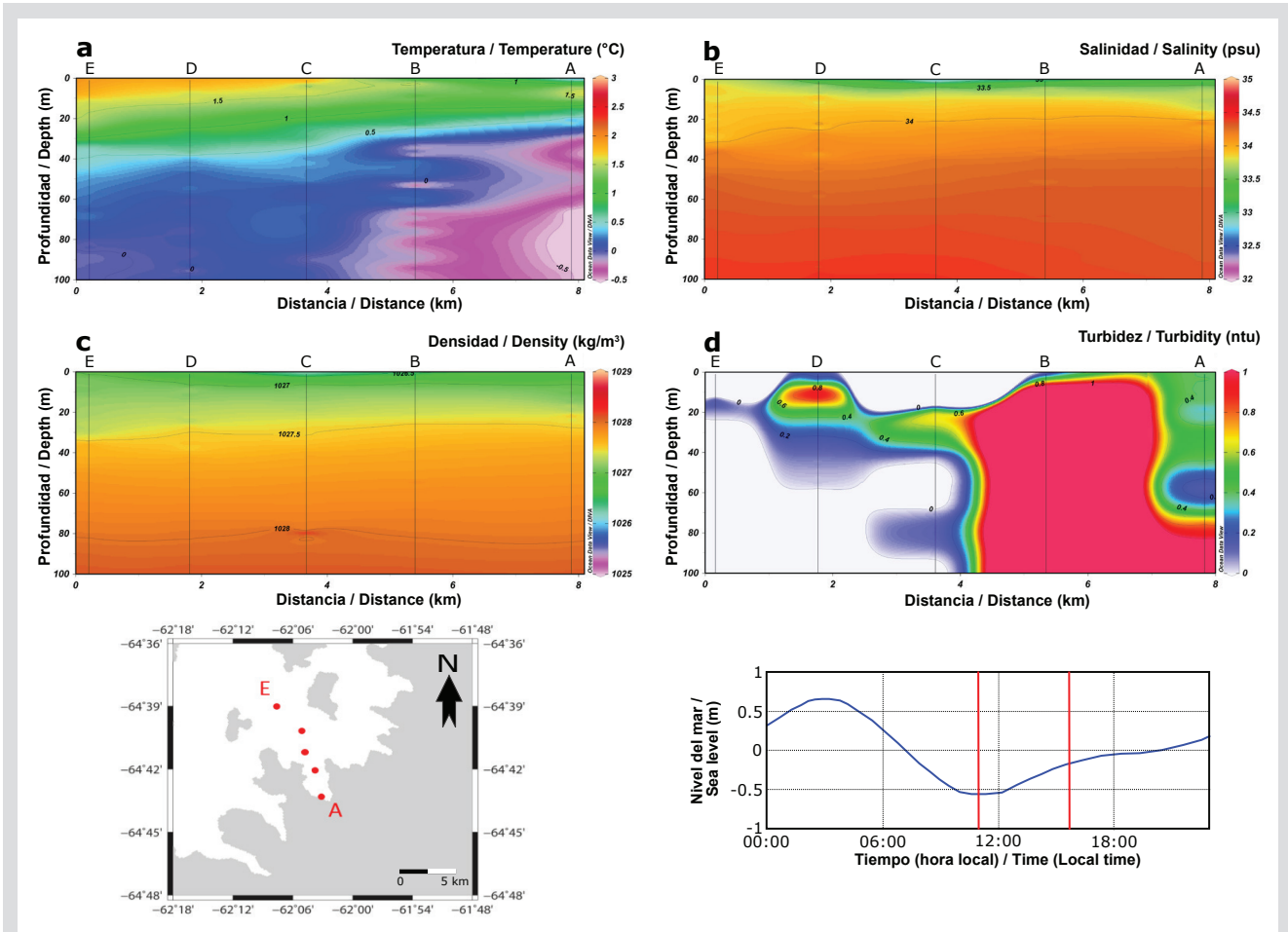


Figura 5. Secciones oceanográficas para la bahía Wilhelmina. **a.** temperatura vs. profundidad. **b.** salinidad vs. profundidad. **c.** densidad vs. profundidad. **d.** turbidez vs. profundidad. Se indica además la localización e identificación de las estaciones oceanográficas en el mapa del costado izquierdo inferior y las variaciones del nivel del mar durante el período de mediciones (entre barras rojas), al costado derecho inferior.

Figure 5. Oceanographic sections for Wilhelmina Bay. **a.** temperature vs. depth. **b.** salinity vs. depth. **c.** density vs. depth. **d.** turbidity vs. depth. The location and identification of oceanographic stations are also indicated on the map on the lower left side and the variations in sea level during the measurement period (between red bars), on the lower right side.

Los valores superficiales de turbidez presentaron un máximo de 0,4 NTU en las cercanías del frente glaciar. La distribución de turbidez mostró una surgencia de aguas más turbias desde el glaciar, extendiéndose hasta la estación B, donde se registraron los valores más altos de todas las bahías estudiadas (> 2.5 NTU) y con una distribución vertical homogénea (Figura 5d). Otros dos despegues se produjeron de capas nefeloides intermedias a partir de la surgencia principal con menores valores de turbidez: entre 20 a 40 m y entre 70 y 90 m de profundidad, en estación C. En la estación D también se observó un núcleo más turbio subsuperficial, el cual se puede asociar a la influencia de otros glaciares de la bahía.

The surface turbidity values presented a maximum of 0.4 NTU in the vicinity of the glacier front. The turbidity distribution showed an upwelling of turbid waters from the glacier, extending to station B, where the highest values of all the studied bays were recorded (> 2.5 NTU) and with a homogeneous vertical distribution (Figure 5d). Two other takeoffs were produced from intermediate nepheloid layers from the main upwelling with lower turbidity values: between 20 and 40 m and between 70 and 90 m depth, at station C. At station D, a more turbid subsurface core was also observed, which can be associated with the influence of other glaciers in the bay.

Bahía Paraíso

Las mediciones hidrográficas fueron realizadas durante la marea llenante. Se encontró que los valores superficiales de temperatura oscilaron entre un mínimo de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte sur de la bahía (estación A, más cercano al glaciar de Oscar Cove) y un máximo de $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sector norte (estación E) (Figura 6a). Las temperaturas más altas (entre $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) se distribuyeron en superficie desde la estación E a la B, que se asociaron también a menores salinidades y densidades (figura 3b,c). En el sector de la estación A, durante las mediciones, el agua de mar en superficie estaba casi completamente cubierto por pedazos de hielo, lo que podría explicar las bajas temperaturas en superficie, sin embargo, esta situación no se correlacionó con valores más altos de turbidez (figura 6d), sino que

Paradise Bay

Hydrographic measurements were made during the flood tide. It was found that the surface temperature values oscillated between a minimum of $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the southern part of the bay (station A, closest to the Oscar Cove glacier) and a maximum of $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the northern sector (station E) (Figure 6a). The highest temperatures (between $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) were distributed on the surface from stations E to B, which were also associated with lower salinities and densities (Figure 3b, c). In the sector of station A, during the measurements, the seawater on the surface was almost completely covered by pieces of ice, which could explain the low temperatures on the surface, however, this situation was not correlated with higher values of turbidity (Figure 6d), but rather on the

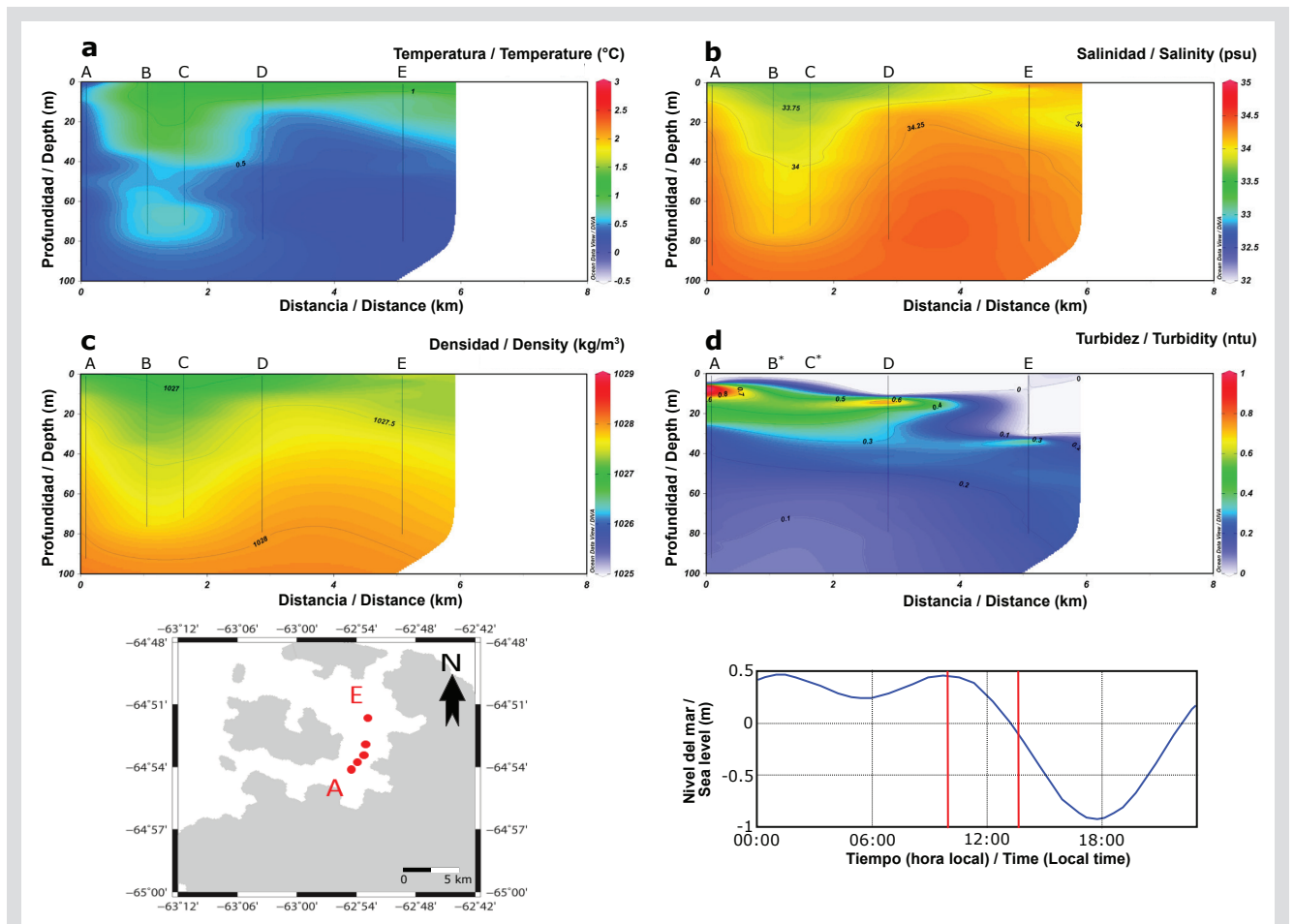


Figura 6. Secciones oceanográficas para la bahía Paraíso. **a.** temperatura vs. profundidad. **b.** salinidad vs. profundidad. **c.** densidad vs. profundidad. **d.** turbidez vs. profundidad. Se indica además la localización e identificación de las estaciones oceanográficas en el mapa del costado izquierdo inferior y las variaciones del nivel del mar durante el período de mediciones (entre barras rojas), al costado derecho inferior. B* y C*: estaciones sin datos de turbidez.

Figure 6. Oceanographic sections for Paradise Bay. **a.** temperature vs. depth. **b.** salinity vs. depth. **c.** density vs. depth. **d.** turbidity vs. depth. The location and identification of oceanographic stations are also indicated on the map on the lower left side and the variations in sea level during the measurement period (between red bars), on the lower right side. B* and C*: stations without turbidity data.

en subsuperficie. Es así que la distribución de turbidez mostró una capa nefeloide subsuperficial procedente de la pluma de descarga del glaciar de Oscar Cove ($> 0,3$ NTU). En el sector más lejano a la bahía, desde ~ 50 m y hacia mayores profundidades, se evidenció turbidez con valores homogéneos ($< 0,2$ NTU) en todas las estaciones.

Diagramas T-S

La figura 7, muestra los diagramas de temperatura-salinidad (T-S) para las bahías estudiadas. Aunque los patrones de la distribución de los datos T-S son relativamente parecidos, existieron algunas diferencias. Bahía Duarte presentó las menores temperaturas y salinidades superficiales, pero éstas últimas fueron similares a las de bahía Frei. También el patrón de esta última bahía fue más parecido a Wilhelmina. Todas las bahías presentaron valores similares de salinidad para las aguas más profundas, sin embargo, sus temperaturas fueron algo distintas. Los patrones de Eckener y Paraíso fueron los más distintos a las demás, posiblemente por influencia más directa de las aguas

subsurface. Thus, the turbidity distribution showed a subsurface nepheloid layer from the discharge plume of the Oscar Cove glacier (> 0.3 NTU). In the sector furthest from the bay, from ~ 50 m and towards greater depths, turbidity was observed with homogeneous values (< 0.2 NTU) in all stations.

T-S diagrams

Figure 7 shows the temperature-salinity (T-S) diagrams for the studied bays. Although the distribution patterns of the T-S data are relatively similar, there were some differences. Bahía Duarte presented the lowest temperatures and surface salinities, but the latter were similar to those of Bahía Frei. Also, the pattern of this last bay was more similar to Wilhelmina. All the bays presented similar salinity values for the deeper waters, however, their temperatures were somewhat different. The Eckener and Paraíso (Paradise) patterns were the most different from the others, possibly due to the more direct influence of the waters of the Geerlaché Strait for

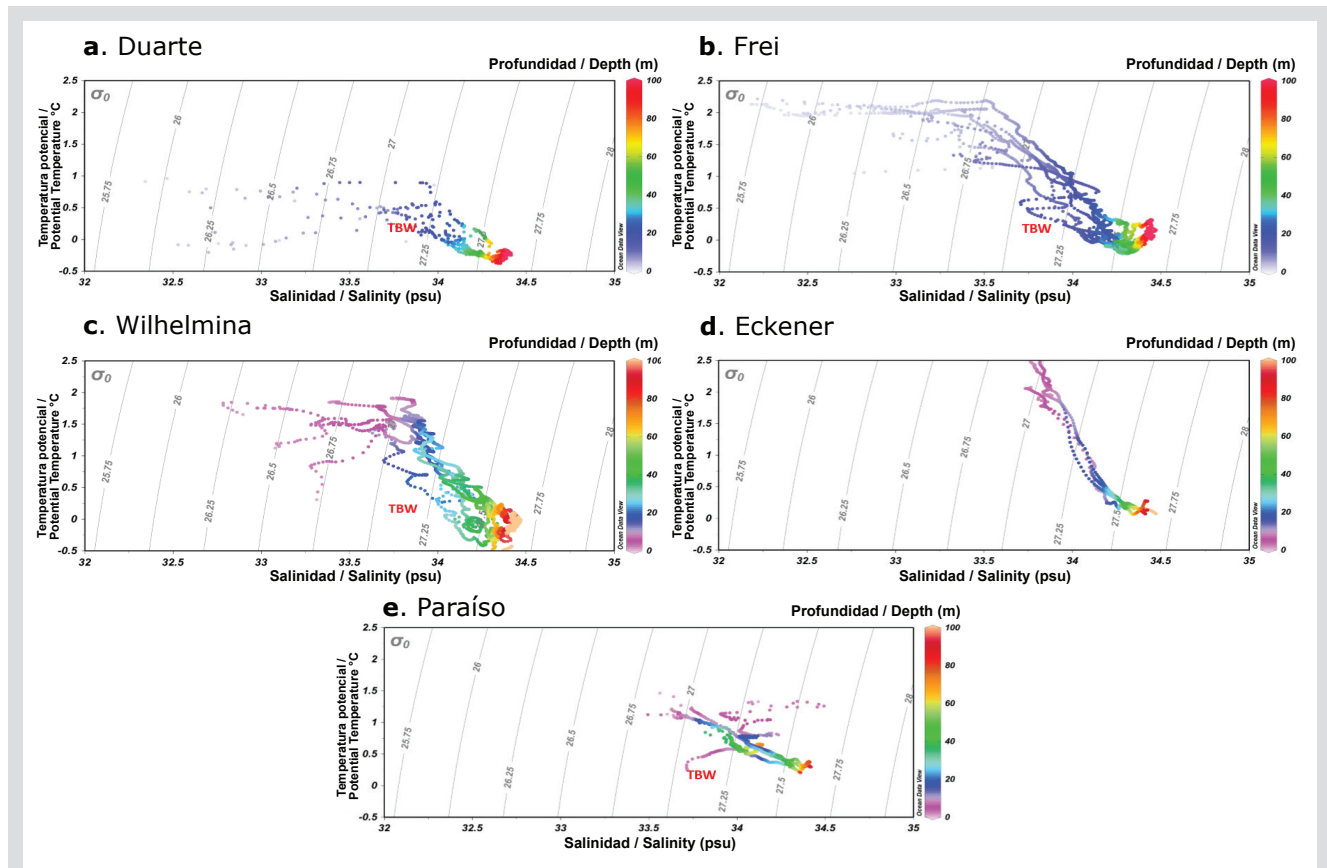


Figura 7. Diagramas de Temperatura y Salinidad (T-S). Se indica el Agua Transicional Zonal con Influencia del Mar de Bellingshausen superficial (TBW). a. bahía Duarte. b. bahía Eckener. c. bahía Frei. d. bahía Wilhelmina. e. bahía Paraíso.

Figure 7. Temperature and Salinity Diagrams (T-S). The Zonal Transitional Water Influenced by the superficial Bellingshausen Sea (TBW) is indicated. a. Duarte Bay. b. Eckener Bay. c. Frei (Recess) Bay. d. Wilhelmina Bay. e. Paradise Bay.

del estrecho Gerlaché para la primera y, para la segunda, influencia de la formación/derremittiendo de hielo marino. En todas las bahías, excepto en bahía Eckener, se encontró la influencia del Agua Transicional Zonal con Influencia del Mar de Bellingshausen superficial (TBW), según valores de referencia de García *et al.* (2002), aunque según rangos T-S presentados por Huneke *et al.* (2013). Eckener podría tener también una influencia menor de TBW.

DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo confirman y coinciden con los encontrados por Rodrigo *et al.* (2016) en cuanto a las presencia y características de las plumas de sedimento en bahías y fiordos de la costa de Danco, las cuales fueron identificables por sus altos valores en la concentración de partículas y por su asociación con lenguas de agua fría. Las plumas de sedimento en la costa de Danco fueron un fenómeno común y permanente para el período de las mediciones, e independientes de las características del tamaño de las bahías-fiordos y glaciares (Rodrigo *et al.*, 2016), sin embargo, los valores de concentración de partículas obtenidas en este trabajo fueron un poco menor (en promedio 2,9 mg/l) a los obtenidos por Domack y Williams (1990) y Domack e Ishman (1993), que obtuvieron datos de los fiordos mayores de la costa de Danco (en promedio 3,0 mg/l), pero con valores máximos muy altos ($> 7,0$ mg/l) (Tabla 2), lo cual es consistente con la complejidad de esas bahías o fiordos donde convergen varios glaciares de marea de mayores proporciones con, posiblemente, mayores flujos subglaciales y a través de grietas, incluyendo también una mayor concentración de icebergs más grandes que pueden llevar una mayor carga de sedimentos (Domack e Ishman, 1993). Por otro lado, los mayores valores de concentración de partículas medidas de la región se encuentran en la isla King George (islas Shetland del Sur), lo cual está de acuerdo con el tipo de ambiente glaciomarino asociado a un clima subpolar, que produciría un mayor flujo sedimentario desde los glaciares de marea (Anderson y Domack, 1991; Powell y Domack, 2002). Yoo *et al.* (2015) encontraron estructuras similares de las plumas de sedimentos con las de este trabajo, y las asoció directamente a derretimiento glaciar, pero a diferencia de nuestra área de estudio que corresponde a un clima seco, en King George la descarga de agua derretida puede estar afectada por agua de lluvias, además es observable el escurrimiento de agua en tierra a través de arroyos que llevan sedimentos al mar y pequeñas cascadas desde algunos glaciares.

the former and, for the latter, influence of the formation/melting of sea ice. In all bays, except in Eckener bay, the influence of Zonal Transitional Water with Influence of the superficial Bellingshausen Sea (TBW) was found, according to reference values of García *et al.* (2002), although according to T-S ranges presented by Huneke *et al.* (2013). Eckener could also have a minor influence on TBW.

DISCUSSION

The results of this work confirm and coincide with those found by Rodrigo *et al.* (2016) regarding the presence and characteristics of sediment plumes in bays and fjords of the Danco Coast, which were identifiable by their high values in the concentration of particles and by their association with tongues of cold water. Sediment plumes off the Danco Coast were a common phenomenon and permanent for the period of the measurements, and independent of the characteristics of the size of the bays-fjords and glaciers (Rodrigo *et al.*, 2016), however, the particle concentration values obtained in this work were a little lower (in average 2.9 mg/l) to those obtained by Domack and Williams (1990) and Domack and Ishman (1993), who obtained data from the major fjords of the Danco Coast (on average 3.0 mg / l), but with very high (> 7.0 mg / l) (Table 2), which is consistent with the complexity of those bays or fjords where several tidal glaciers of greater proportions converge with possibly greater subglacial flows and through crevasses, also including the greater concentration of larger icebergs that can carry a higher sediment load (Domack and Ishman, 1993). On the other hand, the highest measured particle concentration values in the region are found on King George Island (South Shetland Islands), which is in accordance with the type of glaciomarine environment associated with a subpolar climate, which would produce a higher sedimentary flow from tidal glaciers (Anderson and Domack, 1991; Powell and Domack, 2002). Yoo *et al.* (2015) found similar structures of the sediment plumes with those of this work and associated them directly with the glacial melt, but unlike our study area that corresponds to a dry climate, in King George the meltwater discharge may be affected by rainwater, it is also observable the runoff of water on land through streams that carry sediments to the sea and small waterfalls from some glaciers.

Tabla 2. Comparación entre valores de concentración de partículas obtenidas en distintas bahías antárticas.**Table 2.** Comparison between particle concentration values obtained in different Antarctic bays.

Lugar / Place	Concentración - Promedio Máximo / Concentration - Maximum Average (mg / l)	Referencia / Reference
Costa de Danco / Danco Coast		
2015 Duarte	4.1 > 6.4	Este trabajo
2015 Frei	3.0 5.3	Este trabajo
2015 Wilhelmina	4.1 5.3	Este trabajo
2015 Eckener	3.6 4.6	Este trabajo
2015 Paraíso	4.1 > 6.4	Este trabajo
<i>Promedio / Average</i>	<i>3.8 5.6</i>	
2014 Frei	3.4 4.7	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
2014 Salvesen	3.0 3.3	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
2013 Beaupre	4.1 7.6	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
2013 Frei	3.0 3.4	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
2013 Guesalaga	2.9 3.2	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
2013 Paraíso	3.0 3.8	Rodrigo <i>et al.</i> (2016)
<i>Promedio / Average</i>	<i>2.9 4.9</i>	
1988 Andvord	1.8 > 5.5	Domack and Ishman (1993)
1988 Brialmont	3.0 > 7.0	Domack and Williams (1990)
1988 Cierva	3.0 4.2	Domack and Williams (1990)
1988 Lester	4.0 > 7.0	Domack and Williams (1990)
<i>Promedio / Average</i>	<i>3.0 5.9</i>	
Isla King George (Is. Shetland del Sur) / King George Island (Is. South Shetland)		
1988 Martel	-- 12.0	Domack and Ishman (1993)
1996 Marian	8.9 9.5	Yoo <i>et al.</i> (2015)
1998 Marian	3.5 13.9	Yoo <i>et al.</i> (2015)
2000 Marian	2.8 3.6	Yoo <i>et al.</i> (2015)
<i>Promedio / Average</i>	<i>5.1 7.0</i>	

Aunque cabe la posibilidad de que las comparaciones de los valores de las concentraciones no estén del todo correctos debido al error de cada método de conversión de unidades, los distintos tipos de instrumentos, técnicas de determinación de la cantidad de partículas y diferencias en los períodos de medición, se encuentra que las tendencias concuerdan con las características de los distintos tipos de ambientes glaciomarineros. Quizás sólo la comparación con los resultados obtenidos por Rodrigo *et al.* (2016) son más confiables ya que se utilizó el mismo tipo de instrumento y metodología. En general, en este trabajo, se obtuvieron mayores valores promedios de concentración de partículas que los de Rodrigo *et al.* (2016) (Tabla 2). También, comparando la variabilidad temporal de bahía Frei, que fue la única bahía en donde se realizaron mediciones por tres años consecutivos, se observó que los valores de concentración de partículas fueron aumentando en el tiempo (máximo en 2013: 3,4 mg/l; en 2014: 4,7 mg/l y en 2015: 5,3 mg/l) (Tabla 2), aunque para este trabajo (2015), hubo condiciones de marea vaciante que pudo ayudar a aumentar el flujo sedimentario (Figura 8), como fue demostrado por Yoon *et al.* (2015) y Rodrigo *et al.* (2016). Otras hipótesis que

Although the comparisons of the concentration values may not be entirely correct due to the error of each unit conversion method, the different types of instruments, techniques for determining the number of particles, and differences in the periods of measurement, it is found that the trends agree with the characteristics of the different types of glaciomarine environments. Perhaps only the comparison with the results obtained by Rodrigo *et al.* (2016) is more reliable since the same type of instrument and methodology was used. In general, in this work, higher mean particle concentration values were obtained than those of Rodrigo *et al.* (2016) (Table 2). Also, comparing the temporal variability of Frei (Recess) Bay, which was the only bay where measurements were made for three consecutive years, it was observed that the particle concentration values increased over time (maximum in 2013: 3.4 mg / l; in 2014: 4.7 mg / l and in 2015: 5.3 mg / l) (Table 2), although for this work (2015), there were dumping tidal conditions that could help increase sedimentary flow (Figure 8), as demonstrated by Yoon *et al.* (2015) and Rodrigo *et al.* (2016). Other hypotheses that could contribute to the variability of the sedimentary flow

podieron contribuir a la variabilidad de las características de flujo sedimentario hacia la bahía son: cambios en la dinámica de la cuenca de drenaje glaciar debido a la desaparición de una de parte de la plataforma de hielo Larsen B en 2002 (e.g. Rignot *et al.*, 2004), o más directamente por un mayor derretimiento glaciar local (Powell y Domack, 2002; Pichlmaier *et al.*, 2004) debido a la intrusión de aguas más cálidas provenientes del estrecho de Gerlaché. Tampoco se descarta la influencia de otros fenómenos a otras escalas que pudieran hacer variar la temperatura en el aire y en el mar, como un evento El Niño-Oscilación del Sur (Meridith *et al.*, 2008; Rahaman *et al.*, 2019) y cambios en la fase del Modo Anular del Sur (Marshall, 2003, 2007). Sin embargo, la estructura térmica en la bahía Frei no pareció haber cambiado mucho, manteniéndose los patrones de distribución espacial y valores de temperatura, por lo cual, la respuesta marina local pudiera ser más lenta ante los cambios océano-atmósfera regionales y sus teleconexiones. De todos modos, Yoon *et al.* (2015) observaron que la respuesta del derretimiento glaciar es sensible y relativamente rápida con fenómenos meteorológicos a corto plazo como las ya mencionadas lluvias y con la variabilidad estacional, por consiguiente, fenómenos climáticos a otras escalas podrían afectar el comportamiento glaciar, situación aún no bien comprendida por la falta de los estudios correspondientes.

characteristics towards the bay are changes in the dynamics of the glacial drainage basin due to the disappearance of a part of the Larsen B ice shelf in 2002 (eg Rignot *et al.*, 2004), or more directly by greater local glacial melt (Powell and Domack, 2002; Pichlmaier *et al.*, 2004) due to the intrusion of warmer waters coming from the Gerlaché Strait. The influence of other phenomena at other scales that could change the temperature in the air and the sea, such as an El Niño-Southern Oscillation event (Meridith *et al.*, 2008; Rahaman *et al.*, 2019) and changes in the Southern Annular Mode phase (Marshall, 2003; Marshall, 2007). However, the thermal structure in Frei (Recess) Bay did not seem to have changed much, maintaining the spatial distribution patterns and temperature values, therefore, the local marine response could be slower in the face of regional ocean-atmosphere changes and their teleconnections. However, Yoon *et al.* (2015) observed that the glacial melt response is sensitive and relatively fast with short-term meteorological phenomena such as the aforementioned rains and with seasonal variability, therefore, climatic phenomena at other scales could affect glacial behavior, a situation not yet well understood by the lack of the corresponding studies.

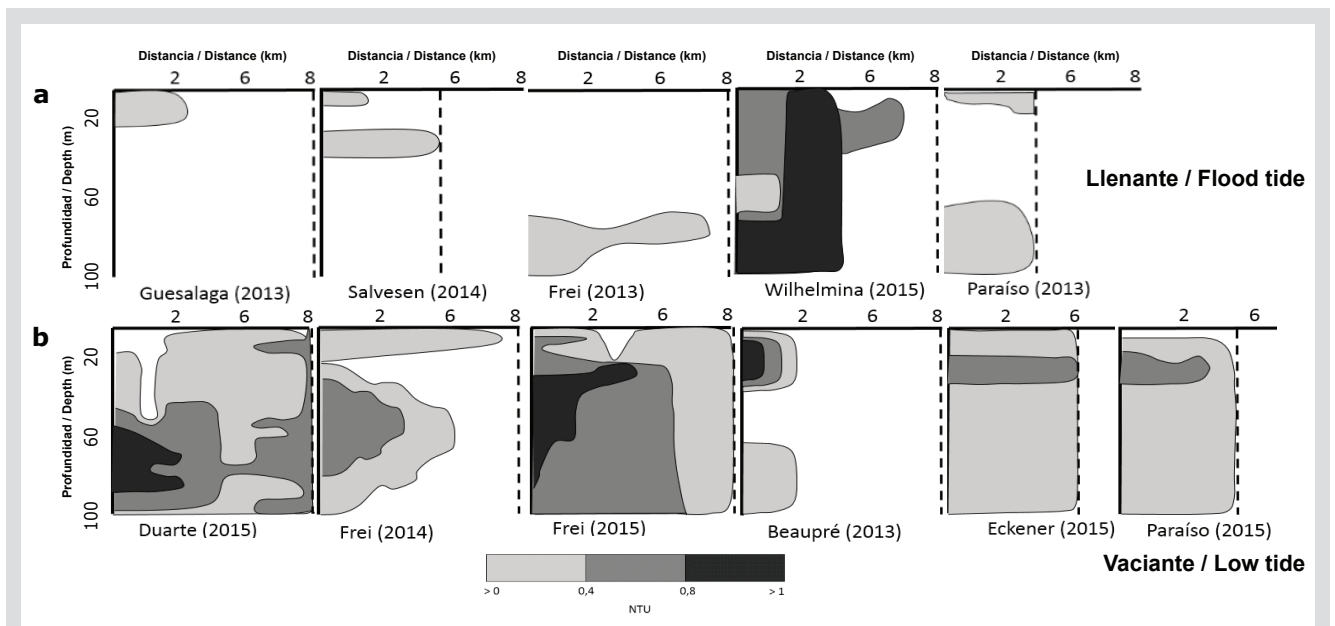


Figura 8. Esquema representativo de las estructuras de las plumas de sedimento, donde la escala de grises (barra inferior) indica los valores de concentración de turbidez (NTU) y la línea segmentada representa la estación oceanográfica más lejana en cada bahía. Se agregan resultados de Rodrigo *et al.* (2016) para comparación. Los esquemas son agrupados según el tipo de marea dominante durante las mediciones.

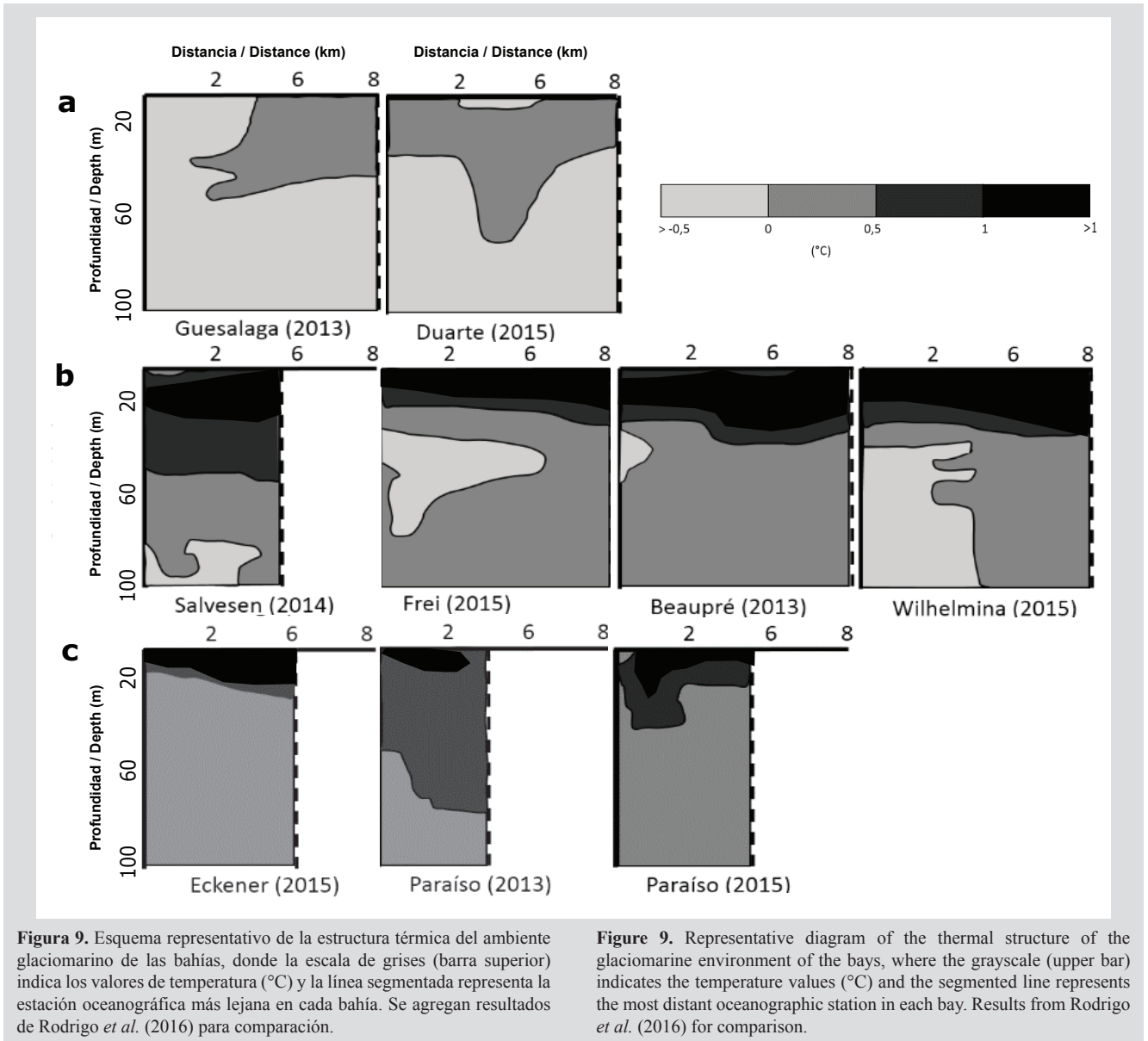
Figure 8. Representative diagram of the sediment plume structures, where the grayscale (lower bar) indicates the turbidity concentration values (NTU) and the segmented line represents the furthest oceanographic station in each bay. Results from Rodrigo *et al.* (2016) for comparison. The schemes are grouped according to the type of dominant tide during the measurements.

Por otro lado, se mantuvieron las características térmicas generales de las bahías si son agrupadas latitudinalmente en norte, centro y sur. En el sector norte, donde se localizan las bahías Guesalaga y Duarte, las temperaturas fueron en general más frías (Figura 9a) y menos salinas, lo que podría asociarse a una influencia de aguas transicionales zonales del mar de Weddell (TWW) (García *et al.*, 2002; Sangrá *et al.*, 2011), pero los diagramas T-S no mostraron esta influencia directamente, por lo que también podría deberse a una mayor generación de agua derretida fría desde los glaciares, por encontrarse esta zona más cercana al clima subpolar (Anderson y Domack, 1991). Por otro lado, mayores temperaturas superficiales fueron encontradas en las bahías centrales (Figura 9b), especialmente desde su parte media a distal desde el frente glaciar, pero presentaron un flujo sedimentario de fondo mucho más frío. Esto podría asociarse a un mayor aporte de agua derretida subglacial que formó una pluma fría y cargada de sedimentos. No está claro qué pudiera causar este mayor derretimiento en la zona central de la costa de Danco, pero como fue mencionado anteriormente podría pensarse en un factor dinámico asociado con la pérdida de plataformas de hielo del lado del mar de Weddell o intrusiones de masas de agua más cálida provenientes del mar de Bellingshausen, lo cual es posible debido a la identificación del agua TBW. Durante el crucero de la Primera Expedición Científica de Colombia a la Antártica, fue posible determinar la distribución de temperatura superficial del mar del estrecho de Gerlaché (Molares, 2015, 2016) y se observó una diferencia de $\sim 1,25$ °C entre el sector norte-sur y el central, también descrito por Giraldo *et al.* (2019). Aunque Eckener pertenece al sector central, fueron distintas sus características oceanográficas a las demás bahías y tuvo una estructura similar a las del sur (Figura 9c), pero por supuesto, no en los rangos de los valores de temperatura. Esto pudo haber ocurrido por la influencia directa de las aguas del estrecho y su aislamiento relativo, como sucede en bahía Paraíso.

A pesar de que Yoo *et al.* (2015) y Rodrigo *et al.* (2016) mostraron un modelo para el flujo de sedimento proveniente de los frentes glaciares basado en dos plumas principales: una superficial menos salina, y otra más profunda con un núcleo más concentrado de partículas de sedimento; los resultados de este estudio, mostraron algunas diferencias (Figura 8), como mayores concentraciones de partículas y extensiones espaciales de las plumas, ya sea en la horizontal (hasta 6 km) y en la

On the other hand, the general thermal characteristics of the bays were maintained if they are grouped latitudinally in north, center, and south. In the northern sector, where the Guesalaga (Curtiss) and Duarte bays are located, temperatures were generally colder (Figure 9a) and less saline, which could be associated with an influence of zone transitional waters of the Weddell Sea (TWW) (García *et al.*, 2002; Sangrá *et al.*, 2011), but the TS diagrams did not show this influence directly, so it could also be due to a greater generation of cold meltwater from the glaciers, as this area is closer to the subpolar climate (Anderson and Domack, 1991). On the other hand, higher surface temperatures were found in the central bays (Figure 9b), especially from their middle to distal part from the glacier front, but they presented a much cooler bottom sedimentary flow. This could be associated with a greater contribution of subglacial meltwater that formed a cold and sediment-laden plume. It is not clear what could cause this greater melting in the central zone of the Danco Coast, but as mentioned above, it could be thought of as a dynamic factor associated with the loss of ice shelves on the Weddell Sea side or intrusions of warmer water bodies from the Bellingshausen Sea, which is possible due to the TBW water identification. During the cruise of the Colombia's First Scientific Expedition to Antarctica, it was possible to determine the distribution of sea surface temperature of the Gerlaché Strait (Molares, 2015; 2016), and a difference of ~ 1.25 °C was observed between the northern-south sector and central, also described by Giraldo *et al.* (2019). Although Eckener belongs to the central sector, its oceanographic characteristics were different from the other bays and it had a similar structure to those of the south (Figure 9c), but of course, not in the ranges of temperature values. This could have occurred due to the direct influence of the waters of the strait and its relative isolation, as it happens in Paradise Bay.

Although Rodrigo *et al.* (2016) and Yoo *et al.* (2015), showed a model for the flow of sediment from glacial fronts based on two main plumes: a shallow one less saline, and a deeper one with a more concentrated core of sediment particles; the results of this study showed some differences (Figure 8), such as higher concentrations of particles and spatial extensions of the plumes, either horizontally (up to 6 km) and vertically (sometimes almost the entire water column). In any case, the more concentrated core of the plumes began to lose concentration more rapidly once it left the bay, possibly



vertical (a veces casi toda la columna de agua). De todos modos, el núcleo más concentrado de las plumas comenzó a perder concentración más rápidamente una vez que salió de la bahía, posiblemente afectado por otros sistemas de corrientes o de circulación (Trusel *et al.*, 2010), incluyendo el efecto del viento fuera de la bahía.

En relación con los cambios espaciales verticales, es notorio el caso de Wilhelmina y Frei (este estudio, 2015) (Figura 8), donde se observó que la descarga de agua glacial ascendió alcanzando la superficie en Wilhelmina y quedando interestratificada cerca la superficie de Frei. Según el modelo de Mugford y Dowdeswell (2011), este tipo de comportamiento del flujo de partículas se

affected by other current or circulation systems (Trusel *et al.*, 2010), including the effect of the wind outside the bay.

Concerning vertical spatial changes, the case of Wilhelmina and Frei (this study, 2015) (Figure 8) is notorious, where it was observed that the discharge of glacial water rose, reaching the surface in Wilhelmina and being interbedded near the surface of Frei. According to the Mugford and Dowdeswell (2011) model, this type of particle flow behavior is associated with a higher sedimentary contribution subglacially, in this case, with values higher than 6.5 mg/l (1 NTU), where the plume traveled from the base of the glacier front, maintaining

asocia a un mayor aporte sedimentario subglacialmente, en este caso, con valores superiores a 6,5 mg/l (1 NTU), donde la pluma viajó desde la base del frente del glaciar, manteniendo una cierta distancia con el mismo y a medida que ascendió, la fuerza de boyantez dominó cada vez más y de esta forma, la trayectoria hacia superficie resultó curvada hacia arriba. Una vez en superficie, esta se extendió con las corrientes superficiales (Figura 10). Es así como, a medida que la pluma asciende y se estratifica, se produce una caída de partículas sedimentarias hacia el fondo que se desprenden de la misma, creando depósitos sedimentarios y estratigrafía de subfondo característica (Powell y Domack, 2002). De la observación de los resultados obtenidos por Rodrigo *et al.* (2016) y este trabajo, en general, el modelo para la zona de la costa de Danco sería el de la figura 10a, considerando un bajo flujo subglacial de sedimentos y agua, no obstante, en la zona central del área de estudio, existe un mayor flujo de sedimento subglacial que permitiría ser descrito por el modelo de flujo de descarga media (Figura 10b) o el de flujo con descarga alta (Figura 10c). Por otro lado, hay que considerar que anteriormente (Griffith y Anderson, 1989; Domack y Williams, 1990; DaSilva *et al.*, 1997) se pensaba que las plumas de sedimentos por derretimiento glacial eran raras, sin embargo, este trabajo y otros recientes (Yoo *et al.*, 2015; Rodrigo *et al.*, 2016) demuestran lo contrario, donde posiblemente su rol dentro de los procesos sedimentarios glaciomarineros recientes de la región de la península Antártica, vaya adquiriendo mayor importancia en la medida que la producción sedimentaria sea mayor, la cual se correlaciona directamente con el cambio climático.

a certain distance with it and as it ascended, the buoyant force dominated more and more and, in this way, the trajectory towards the surface was curved upwards. Once on the surface, it spread with the surface currents (Figure 10). This is how, as the plume rises and stratifies, sedimentary particles fall to the bottom that is released from it, creating sedimentary deposits and characteristic sub-bottom stratigraphy (Powell and Domack, 2002). From the observation of the results obtained by Rodrigo *et al.* (2016) and this work, in general, the model for the Danco coastal zone would be that of Figure 10a, considering a low subglacial flow of sediments and water, however, in the central zone of the study area, there is a greater flow of subglacial sediment that could be described by the medium discharge flow model (Figure 10b) or the high discharge flow model (Figure 10c). On the other hand, it must be considered that previously (Griffith and Anderson, 1989; Domack and Williams, 1990; DaSilva *et al.*, 1997) it was thought that sediment plumes due to glacial melt were rare, however, this work and other recent (Yoo *et al.*, 2015; Rodrigo *et al.*, 2016) show the opposite, where possibly its role within the recent glaciomarine sedimentary processes of the Antarctic peninsula region, will acquire greater importance as sedimentary production is greater, which is directly correlated with climate change.

Finally, it follows that the sedimentary flows from the glacier fronts in the small bays of the Danco Coast have a variable spatial extension, as well as their concentration of sediments, which will depend mainly on the greater or lesser melting of the glaciers, which will contribute

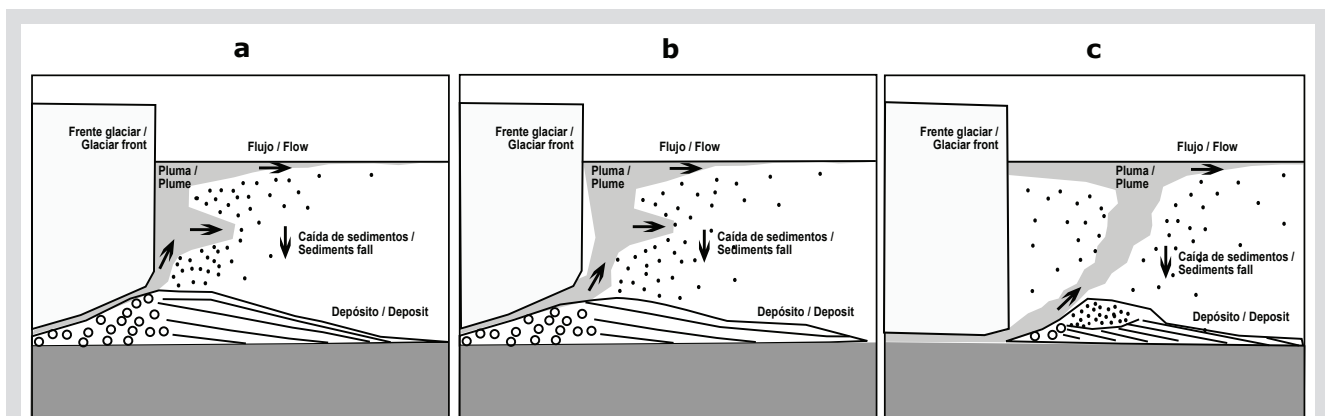


Figura 10. Modelos del flujo de sedimento subglacial en el ambiente glaciomarinero de fiordos-bahías, basados en Mugford y Dowdeswell (2011), y Powell y Domack (2002). **a.** para flujos con baja descarga de agua y sedimentos. **b.** para flujos con moderada descarga de agua y alta de sedimentos. **c.** para flujos de alta descarga.

Figure 10. Models of subglacial sediment flow in the glaciomarine environment of fjords-bays, based on Mugford and Dowdeswell (2011), and Powell and Domack (2002). **a.** for flows with a low discharge of water and sediments. **b.** for flows with moderate water discharge and high sediment. **c.** for high discharge flows.



Finalmente, se desprende que los flujos sedimentarios provenientes de los frentes de los glaciares en las bahías pequeñas de la costa de Danco, tienen una extensión espacial variable, así también su concentración de sedimentos, que dependerá principalmente del mayor o menor derretimiento glaciar, que aportarán mayor contenido de partículas subglacialmente que por otros mecanismos. Sobre las causas del derretimiento glaciar, es materia de estudios adicionales, pero podría estar asociado a calentamiento atmosférico e intrusiones de masas de agua más cálidas, sin descartar fenómenos de ajustes dinámicos de los glaciares sobre la península Antártica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa Antártico Colombiano, al Capitán Camilo Segovia, oficiales y tripulación del buque ARC “20 de Julio”, así como los investigadores y técnicos por su apoyo y camaradería durante la Primera Expedición Científica de Colombia a la Antártica. Además, CR agradece al Instituto Antártico Chileno (INACH) y al Dr. José Retamales por las gestiones de contacto, así como el financiamiento parcial del proyecto FONDECYT N°11121522 de Chile. También se agradece al editor y al revisor anónimo, que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

higher content of particles subglacially than by other mechanisms. The causes of glacial melt are the subject of additional studies, but it could be associated with warming atmospheric and intrusions of warmer water masses, without ruling out phenomena of dynamic adjustments of the glaciers on the Antarctic Peninsula.

ACKNOWLEDGEMENT

We thank the Colombian Antarctic Program, Captain Mr. Camilo Segovia, officers and crew of the ARC “20 de Julio” ship, as well as the researchers and technicians for their support and camaraderie during the First Scientific Expedition of Colombia to the Antarctic. Also, CR thanks the Chilean Antarctic Institute (INACH) and Dr. José Retamales for the contact procedures, as well as the partial financing of the FONDECYT project N ° 11121522 in Chile. We are also grateful to the editor and anonymous reviewer, who contributed to improving the manuscript.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Anderson, J.B. and E.W. Domack. 1991. The glacial marine environment: subglacial and glacial climatic setting. Foreword. In Anderson, J.B and G.M. Ashley (Eds.) *Glacial marine sedimentation; paleoclimatic significance; a discussion*. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 261.
- Dierssen, H.M., R.C. Smith and M. Vernet. 2002. Glacial meltwater dynamics in coastal waters west of the Antarctic Peninsula. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 99: 1790-1795.
- Domack, E.W. and S. Ishman. 1993. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords of Chile and the northern Antarctic Peninsula. *Mar. Geol.*, 143: 103-123.
- Domack, E.W. and C.E. McClennen. 1996. Accumulation of glacial marine sediments in fjords of the Antarctic Peninsula and their use as Late Holocene paleoenvironmental indicators. *Antarct. Res. Ser.*, 70: 135-154.
- Domack, E.W. and C.R. Williams. 1990. Fine structure and suspended sediment transport in three Antarctic fjords. *Antarct. Res. Ser.*, 50: 71-89.
- Domack, E.W., D.J.P. Foss, J.P.M.Syvitski and C.E. McClennen. 1994. Transport of suspended particulate matter in an Antarctic fjord. *Mar. Geol.*, 121: 161-170.
- García, M. A., C. G. Castro, A. F. Ríos, M. D. Doval, G. Rosón, D. Gomis and O. López. 2002. Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep-Sea Res. Part II. Top. Stud. Oceanogr.*, 49(4): 585-602.
- Giraldo, A., M.I. Criales-Hernández, M. Jerez-Guerrero y D.F. Mojica-Moncada. 2019. Biomasa del mesozooplankton y ensamblaje de copépodos epipelágicos en el estrecho de Gerlache (Antártica) durante el verano austral de 2015. *Bol. Investig. Mar. Costeras*, 48(1): 9-26.
- Griffith, T.W. and J.B. Anderson. 1989. Climatic control of Sedimentation in bays and fjord of the northern Antarctic Peninsula. *Mar. Geol.*, 85: 181-204.
- Hogg, A.E., A. Shepherd, S.L. Comford, K.H. Briggs, N. Gourmelen, J.A. Graham and E. Rignot. 2017. Increased ice flow in Western Palmer Land linked to ocean melting. *Geophys. Res. Lett.*, 44(9): 4159-4167.

- Marín, V., A. Tironi, M.A. Paredes and M Contreras. 2013. Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecol. Model.*, 264: 7-16.
- Marshall, G.J. 2003. Trend in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *J. Climatol.*, 16: 4134-4143.
- Marshall, G.J. 2007. Half-century seasonal relationships between the Southern Annular Mode and Antarctic temperatures. *J. Climatol.*, 27: 373-383.
- Meridith, M.P., E.J. Murphy, E.J. Hawker, J.C. King and M.I. Wallace. 2008. On the interannual variability of ocean temperatures around South Georgia, Southern Ocean: forcing by El Niño/Southern Oscillation and the southern annular mode. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 55: 2007-2022.
- Molares, R. 2015. Primera expedición científica de Colombia en la Antártida. Reporte de crucero. Verano Austral 2014/2015. Dirección General Marítima, Cartagena, 119 p.
- Molares, R. 2016. Objetivo dos. Establecer la dinámica de nutrientes presentes en la columna de agua y su relación con la comunidad planctónica en el estrecho de Gerlache. Verano Austral 2014-2015. Informe Ejecutivo. Dirección General Marítima, Cartagena, 57 p.
- Mugford, R.I. and J.A. Dowdeswell. 2011. Modeling glacial meltwater plume dynamics and sedimentation in high-latitude fjords. *J. Geophys. Res.*, 116.
- Padman, L., 2005. Tide Model Driver (TMD) manual, versión 1.2. *Earth Space Res.*, 13 p.
- Powell, R. and G.W. Domack. 2002. Modern glaciomarine environment. In: Menzies, J. (Ed.). *Modern glacial environments: processes, dynamics and sediments, glacial environments*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 445-486 pp.
- Rahaman, W., S. Chatterjee, T. Ejaz and M. Thamban. 2019. Increased influence of ENSO on Antarctic temperature since the Industrial Era. *Sci. Rep.*, 9, 6006.
- Rignot, E., G. Casassa, P. Gogineni, W. Krabill, A. Rivera, and R. Thomas, 2004. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18401.
- Rodrigo, C., S. Giglio and A. Varas. 2016. Glacier sediment plumes in small bays on the Danco Coast, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 28(5): 395-404.
- Sangrá, P., C. Gordo, M. Hernández-Arencibia, A. Marredo-Díaz, A. Rodríguez-Santana, A. Stegner, A. Martínez-Marrero, J.L. Pelegrí and T. Pichon. 2011. The Bransfield current system. *Deep Sea Res. Part I*, 58: 390-402.
- Turner, J., S.R. Colwell, G.J. Marshall, T.A. Lachlan-Cope, A.M. Carleton, P.D. Jones, V. Lagun, P.A. Reid and S. Iagovkina. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25(3): 279-294.
- Yoo, K.C., M.K. Lee, H.I. Yoon, Y.I. Lee and C.Y. Kang. 2015. Hydrography of Marian Cove, King George Island, West Antarctica: implications for ice-proximal sedimentation during summer. *Antarct. Sci.*, 27: 185-196.
- Zhou, M., P. P. Niiler and J. H. Hu. 2002. Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep-Sea Res. I.*, 49: 267-280.

RECIBIDO/RECEIVED: 28/09/2019

ACEPTADO/ACCEPTED: 26/10/2020