



Características de mezcla de submesoescalas en las bahías del Estrecho de Gerlache (Antártida)

Submeso-scale Mixing Features in the Gerlache Strait Bays (Antarctica)

Jhon F. Mojica^{1-4*}, David M. Holland¹⁻², Julio Monroy³⁻⁴

0000-0003-3317-0404

0000-0002-5768-0866

0000-0002-3981-7486

1. Center for global Sea Level Change, NYUAD, Abu Dhabi UAE. jhon.mojica@nyu.edu

2. Courant Institute of Mathematical Science, NYUNY, New York, USA

3. Grupo de Investigación en Oceanología (GIO), Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena de Indias, Colombia

4. Programa Antártico Colombiano, Bogotá, Colombia

* Autor de correspondencia.

RESUMEN

Las medidas de turbulencia en el océano son escasas, especialmente en ambientes como la Antártida. En este trabajo presentamos un mapa de distribución espacial de las difusividades diapícnas y de las características de la columna del agua a través de las tres principales bahías del estrecho de Gerlache. Las medidas fueron registradas durante la quinta expedición colombiana a la Antártida, 2018-2019, usando un perfilador de microestructura vertical en caída libre sobre los primeros 400 m de profundidad, para registrar las fluctuaciones de la cizalla vertical a escalas de disipación ($10^{-3} - 10^3$ m). La difusividad diapícnica es alta, entre 1-2 órdenes de magnitud sobre la corriente principal de Gerlache, comparada con el interior de las bahías, con valores que van desde $O(\log_{10}k_p = -3 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$ hasta $O(\log_{10}k_p = -5 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$ respectivamente sobre los primeros 400 m. Los valores más elevados de mezcla fueron registrados en la sección sur del estrecho de Gerlache (bahía Flandes) comparados con los valores de la sección norte (bahía Charlotte), indicando la presencia de agua bien mezclada. Hay zonas más activas (Hot Spots) que presentan altos niveles de mezcla turbulenta y pueden ser asociadas con la interacción producida por la entrada de masas de agua como la Upper Circumpolar Depth Water, la Antarctic Surface Water, y la Weddell Sea Deep Water, con el agua que reside en las bahías y la topografía que presenta cada una de estas.

PALABRAS CLAVE: Hielo-océano, Dinámica oceánica antártica, Mezcla diapícnica, Estrecho de Gerlache, Mezcla.

ABSTRACT

Measurements of turbulence in the ocean are sparse, especially in environments such as Antarctica. Here we map the spatial distribution of diapycnal diffusivities and the water column characteristics across the three main bays in the Gerlache Strait on the western side of the Antarctic Peninsula. The measurements were recorded during the Fifth Colombian Antarctic Expedition, 2018-2019, using a Vertical Microstructure Profiler in free fall for the first 400 m depth, to record fluctuations of vertical shear at dissipation scales ($10^{-3} - 10^3$ m). Diapycnal diffusivities are higher by 1-2 orders of magnitude in the Gerlache mainstream compared with the interior bays, with values from $O(\log_{10}k_p = -3 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$ to $O(\log_{10}k_p = -5 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$ respectively over the upper 400 m. The highest mixing values were recorded in the southern section of Gerlache Strait (Flandes Bay) compared to the northern one (Charlotte Bay), indicating better well-mixed water in the south. Observed Hot Spots of higher turbulence levels may be associated with the interaction of the entrance of the Upper Circumpolar Depth Water, the Antarctic Surface Water, and the Weddell Sea Deep Waters with resident waters and topography.

KEYWORDS: Sea ice, Antarctic Ocean dynamics, Diapycnal mixing, Gerlache Strait, Mixing.

INTRODUCCIÓN

El océano y el hielo marino alrededor de la Antártida son los principales mediadores del intercambio de calor e impulso con la atmósfera. La variación del intercambio está determinada en gran medida por la interacción entre estos componentes en la zona marginal de hielo marino, que tiene efectos variables en diferentes áreas alrededor de la Antártida. La forma en que el hielo marino responde a los cambios atmosféricos y oceánicos está relacionada en gran medida con las propiedades físicas de cada componente. Las propiedades del océano cambian de acuerdo con la intensidad de diferentes procesos y estructuras como olas internas, mareas, turbulencias y mezcla diapícnal, entre otros. Estos procesos también afectan la tasa de derretimiento y desprendimiento de las plataformas de hielo. Una mejor caracterización de estos procesos es clave para comprender la circulación a escala global y el transporte de calor, nutrientes y otros trazadores climáticos y ecológicos importantes.

Un énfasis particular para la oceanografía es comprender procesos como la mezcla turbulenta a escala fina y submesoescala ($10^3 - 10^3$ m) debajo de la capa de mezcla. Este rango de escala abarca la transición desde la propagación simple de onda-onda a lo largo de los límites de masas de agua hasta una mezcla turbulenta en la que el calor y la salinidad, entre otros, se intercambian verticalmente (Sheen *et al.*, 2013). Varios estudios han resaltado la importancia de la mezcla turbulenta de las corrientes alrededor de la Península Antártica (es decir, Venables *et al.*, 2014), pero el impacto de la mezcla en áreas interiores como las bahías en el Estrecho de Gerlache (GS) sigue siendo poco estudiado. Por ello, ubicamos nuestras estaciones oceanográficas en las bahías únicas, pero de difícil acceso en el GS para obtener información detallada sobre la disipación de energía producida por la intrusión de agua no residente, así como sus propiedades y dinámica para comprender cómo impacta en el medioambiente local. Hasta donde sabemos, actualmente existe una brecha en los datos relacionados con la mezcla en esta área.

Aquí presentamos datos de microestructura de turbulencia de alta resolución recopilados durante la Quinta Expedición Antártica Colombiana 2018-2019, a bordo del *ARC 20 de Julio*. El conjunto de datos fue recopilado por un Perfilador de medición vertical (VMP) de caída libre de Rockland Scientific, en tres bahías en el GS para mapear la intensidad de la mezcla turbulenta en el área. Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la dinámica del océano en el GS a las escalas más pequeñas, en particular, para calificar y cuantificar la

INTRODUCTION

The ocean and the sea ice around Antarctica are the major mediators of the exchange of heat and momentum with the atmosphere. The variation of the exchange is largely determined by the interaction between these components in the marginal sea-ice zone, which has varying effects in different areas around Antarctica. How sea ice responds to atmospheric and oceanic changes is largely related to the physical properties of each component. The ocean properties change according to the intensity of different processes and structures such as internal waves, tides, turbulence, and diapycnal mixing, among others. These processes also affect the rate of melting and calving of ice shelves. A better characterization of these processes is key to understanding the global-scale circulation and the transport of heat, nutrients, and other climatically and ecologically important tracers.

A particular emphasis for oceanography is to understand processes such as turbulent mixing at the fine scale, and submesoscale ($10^3 - 10^3$ m) below the wind-mixed layer. This scale-range spans the transition from simple wave-wave propagation along water masses boundaries to turbulent mixing in which heat and salinity among others are vertically exchanged (Sheen *et al.*, 2013). Several studies have highlighted the significance of turbulent mixing by the currents around the Antarctic Peninsula (i.e. Venables *et al.*, 2014), but the impact of mixing in interior areas such as the bays in the Gerlache Strait (GS) remains understudied. Therefore, we located our oceanographic stations in the unique but difficult to access bays in the GS to obtain detailed information about the energy dissipation produced by the intrusion of non-resident water, as well as its properties and dynamics to understand how it impacts the local environment. As far as we know, there is currently a gap in data related to mixing in this area.

Here we present high-resolution turbulence microstructure data collected during the Fifth Antarctic Colombian Expedition 2018-2019, on board the *ARC 20 de Julio*. The dataset was collected by a free-falling Vertical Measuring Profiler (VMP) from Rockland Scientific, across three bays in the GS to map the intensity of the turbulent mixing in the area. This work aims to characterize the ocean dynamics in the GS at the smallest scales, in particular, to qualify and quantify the diapycnal mixing and its spatial variability. Diapycnal mixing is a

mezcla diapícnal y su variabilidad espacial. La mezcla diapícnica es un proceso relevante porque controla los flujos verticales de propiedades biológicas y físicas (Masson, 2002).

El manuscrito está estructurado de la siguiente manera: En la Sección 2 presentamos el área de estudio y describimos la dinámica del océano en el GS. Los datos y la metodología se describen en la Sección 3, donde detallamos el sistema de adquisición y los métodos aplicados para estimar la difusividad diapícnal del VMP. Las propiedades de la columna de agua y los niveles de mezcla se describen en la Sección 4, y en la Sección 5 se presenta un análisis sobre cómo la entrada de aguas antárticas desde el sur influyen en la estabilidad de las bahías. Finalmente, la Sección 6 resume las principales conclusiones de este trabajo, incluyendo cómo la entrada del agua circumpolar profunda mejora la turbulencia en Bahía Flandes y crea una capa de agua bien mezclada a medida que se mueve hacia el norte hacia Bahía Charlotte.

ÁREA DE ESTUDIO

El Estrecho de Gerlache (GS) se encuentra en la Antártida más septentrional, donde separa el Archipiélago Palmer de la Península Antártica (Figura 1). Es de alrededor ~150 km de largo y ~10 km de ancho, con ~600 m de profundidad media, y contiene tres bahías interiores principales: Flandes, Andvord y Charlotte (de sur a norte respectivamente). Es un área caracterizada por una circulación principalmente de sur a norte de aguas superficiales antárticas (AASW) y aguas profundas circumpolares superiores (UCDW) en los 400 m superiores (Savidge y Amft, 2009). El AASW es una masa de agua fría y dulce afectada por la descarga de agua de deshielo continental, el deshielo estacional del hielo marino y los efectos atmosféricos, que pueden controlar el flujo de calor superficial y la formación de hielo marino (Valkonen *et al.*, 2008). Durante el calentamiento del verano, el AASW puede ocupar los 100 m superiores de la columna de agua, donde puede afectar la tasa de derretimiento y retroceso de los glaciares circundantes (Cook *et al.*, 2014). Debajo de ~100 m, el UCDW es cálida y salada e inunda el GS. Desde el norte, hay una entrada subterránea de un núcleo de aguas profundas del mar de Weddell (WSDW) (Smith *et al.*, 1999). El WSDW es más fría y salada que el UCDW; cada masa de agua tiene una firma de agua característica. La entrada de estas aguas influye en la etapa de hielo dentro del GS, una región donde la zona costera ha venido sufriendo cambios rápidos y fuertes durante las últimas décadas (Lencina-Avila *et al.* 2018).

relevant process because it controls vertical fluxes of biological and physical properties (Masson, 2002).

The manuscript is structured as follows: In Section 2 we present the study area and describe the ocean dynamics in the GS. The data and methodology are described in Section 3, where we detail the acquisition system and the methods applied to estimate the diapycnal diffusivity from the VMP. The water column properties and mixing levels are described in Section 4, and a discussion on how the entrance of Antarctic waters from the South influences the stability of the bays is presented in Section 5. Finally, Section 6 summarizes the main conclusions of this work, including how the entrance of Circumpolar Deep Water enhances the turbulence at the Flandes Bay and creates a well-mixing layer as it moves to the north to Charlotte Bay.

STUDY AREA

The Gerlache Strait (GS) is located in northernmost Antarctica, where it separates the Palmer Archipelago from the Antarctic Peninsula (Figure 1). It is around ~150 km long and ~10 km wide, with ~600 m average depth, and contains three main interior bays: Flandes, Andvord, and Charlotte (south to north respectively). It is an area characterized by a mainly south-to-north circulation of Antarctic Surface Water (AASW) and Upper Circumpolar Deep Water (UCDW) over the upper 400 m (Savidge and Amft, 2009). The AASW is a cold and fresh water mass affected by continental meltwater discharge, seasonal sea-ice melting, and atmospheric effects, which can control surface heat flux and sea-ice formation (Valkonen *et al.*, 2008). During summer warming, the AASW can occupy the upper 100 m of the water column, where it can impact the melting and retreat rate of the surrounding glaciers (Cook *et al.*, 2014). Below ~100 m, the warm and salty UCDW floods into the GS. From the north, there is a subsurface entrance of a core of Weddell Sea Deep Waters (WSDW) (Smith *et al.*, 1999). The WSDW is colder and saltier than UCDW; each water mass has a characteristic water signature. The entrance of these waters influences the ice stage inside the GS, a region where the coastal zone has been suffering rapid and strong change over recent decades (Lencina-Ávila *et al.*, 2018).

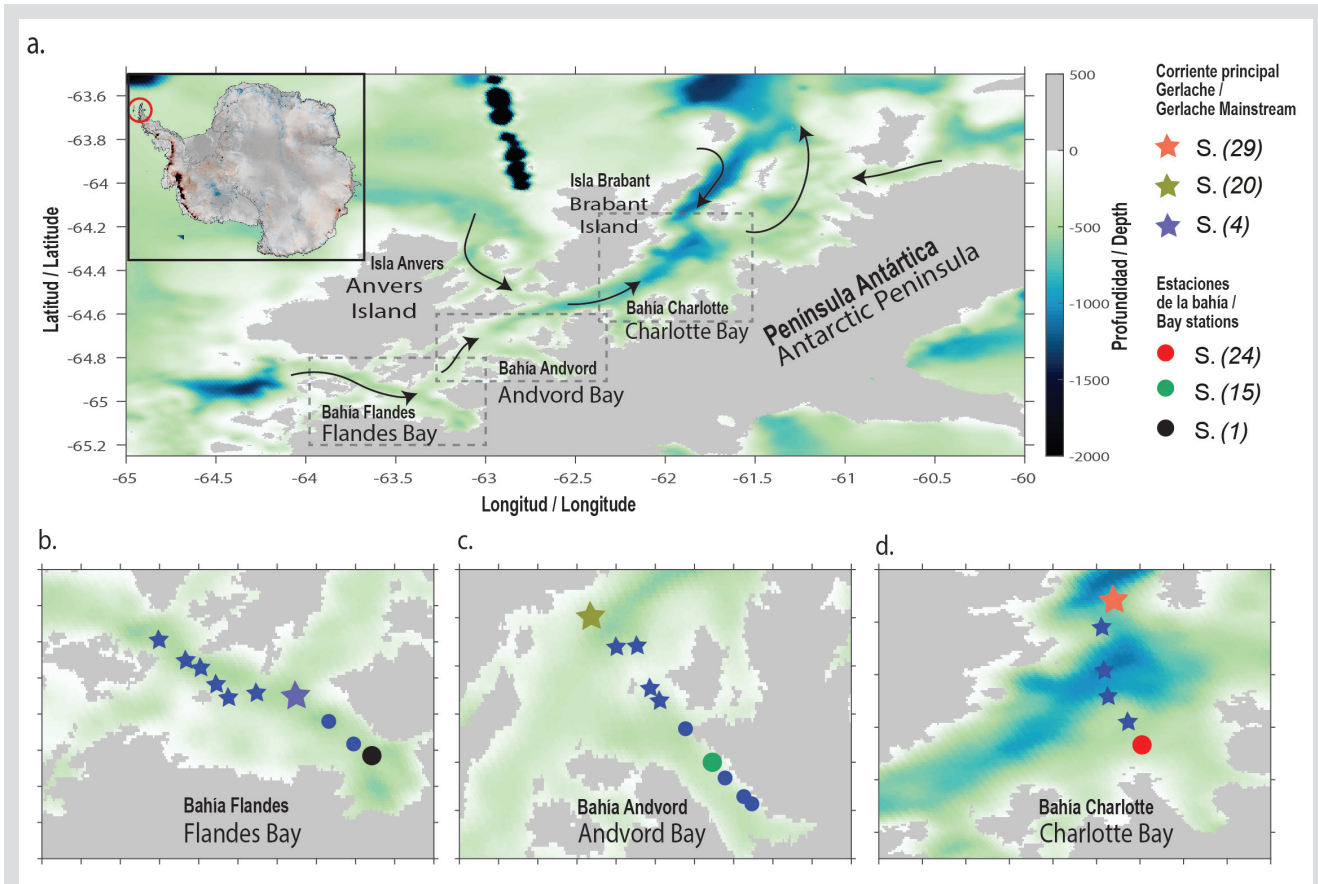


Figura 1. a. Mapa del Estrecho de Gerlache. (Entrada) ubicación en el extremo norte de la Antártida. (Flechas negras) Patrón de circulación oceánica principal hasta 400 m de profundidad, basado en Savidge y Amft (2009). (Cuadrados segmentados) Ubicación de las principales bahías de Gerlache, **b.** Bahía Flandes, **c.** Bahía Andvord, y **d.** Bahía Charlotte. (Estrellas) indican la ubicación de las estaciones oceánicas VMP en la corriente principal de Gerlache. (Puntos) ubicación de las estaciones oceánicas VMP en el interior de las bahías. La leyenda de color identifica la ubicación y el número de estación VMP seleccionado para representar los diferentes diagramas en el manuscrito.

Figure 1. a. Gerlache Strait map. (Inlet) location at the northern tip of Antarctica. (Black arrows) Main ocean circulation pattern down to 400 m depth, based on Savidge and Amft (2009). (Segmented squares) Gerlache main bays location, **b.** Flandes Bay, **c.** Andvord Bay, and **d.** Charlotte Bay. (Stars) indicate the location of the VMP ocean station in the Gerlache mainstream. (Dots) location of VMP ocean stations at the interior of the bays. The color legend identifies the location, and the VMP station number selected to represent the different diagrams in the manuscript.

METODOLOGÍA

Perfilador de microestructuras

El conjunto de datos presentado para este trabajo fue adquirido a bordo del buque de la Armada de Colombia ARC 20 de Julio y su embarcación clase defender, del 27 de diciembre de 2018 al 4 de enero de 2019, durante la Quinta Expedición Antártica Colombiana 2018-2019. Se utilizó un Perfilador de Microestructura Vertical (VMP) 250 (Figura 2a) para caracterizar la microestructura de la columna de agua. El VMP-250 tiene cinco sensores: dos sondas de corte, un termistor, uno de microconductividad y uno para presión (Figura 2b). El equipo viene con calibración de fábrica. El VMP-250 es un equipo de alta resolución con una frecuencia de muestreo de 512 Hz, que puede registrar

METHODOLOGY

Microstructure profiler

The dataset presented for this work was acquired onboard the Colombian Navy ship *ARC 20 de Julio* and its defender-class boat, from December 27, 2018, to January 4, 2019, during the Fifth Antarctic Colombian Expedition 2018-2019. A Vertical Microstructure Profiler (VMP) 250 (Figure. 2a) was used to characterize the microstructure of the water column. The VMP-250 has five sensors: two shear probes, one thermistor, one micro-conductivity, and one for pressure (Figure. 2b). The equipment comes with factory calibration. The VMP-250 is high-resolution equipment with a sampling rate of 512 Hz, that can record the micro-structure of the water column at the scale of

la microestructura de la columna de agua en la escala de centímetros durante el despliegue en caída libre. Para obtener mediciones de cizallamiento precisas, el perfilador requiere un descenso suave y libre para minimizar la contaminación por la vibración de las señales de cizallamiento medidas. Se utilizó un cabrestante de desacoplamiento de movimiento PID-2 (Figura 2a) para mantener un despliegue de caída libre proporcionando una cuerda floja para garantizar que el instrumento caiga lo más libremente posible. La velocidad media de caída en estas condiciones fue de $\sim 0,85 \text{ m s}^{-1}$. La profundidad del fondo marino en tiempo real fue registrada por el multihaz y el sonar a bordo del barco. La cuerda del cabrestante se marcó cada 10 metros, alcanzando una longitud máxima de cuerda de 400 m. Además, se utilizó una polea de medición durante las estaciones de Bahía Charlotte para controlar la cantidad de cuerda desplegada.

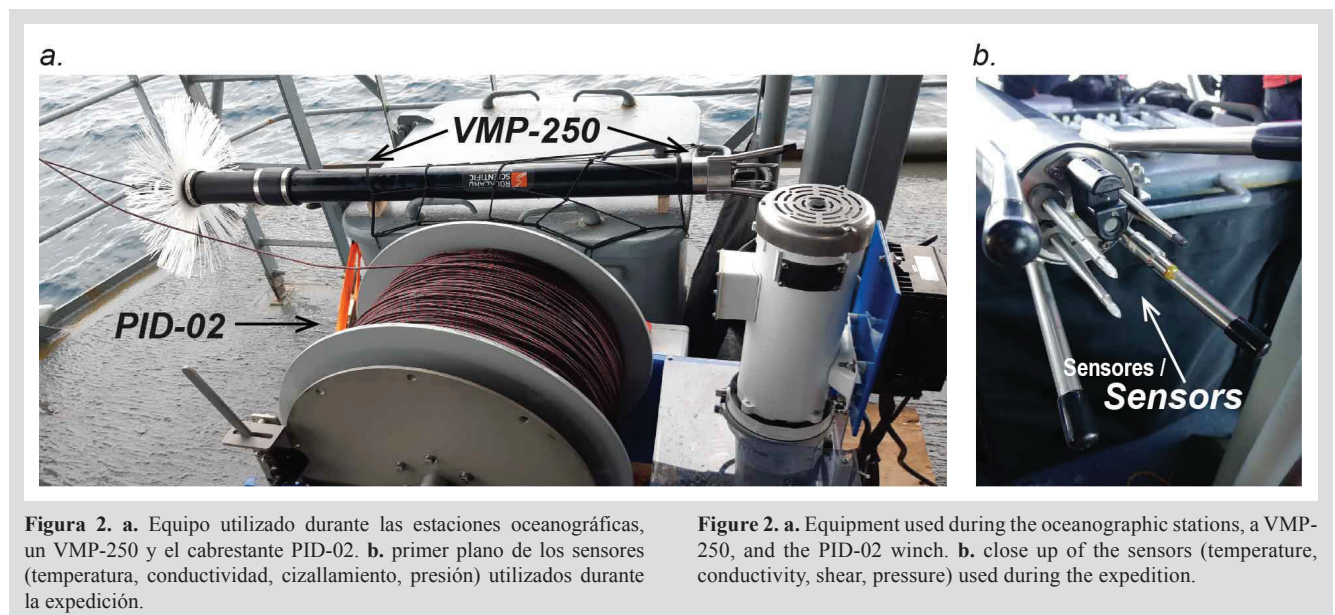
Para estudiar la microestructura del GS, se ocuparon tres secciones transversales a lo largo de su longitud desde la entrada principal de agua en el suroeste hasta la salida en el noreste. Cada sección comienza desde la corriente principal de Gerlache (es decir, el canal principal de profundidad de Gerlache) y atraviesa el interior de cada bahía. La primera sección termina dentro de Bahía Flandes, la segunda dentro de Bahía Andvord y la tercera en la entrada de Bahía Charlotte (Figura 1). Las tres secciones exhiben cambios suaves en la topografía. Las ubicaciones precisas de las estaciones se dan en la Tabla 1 (material complementario).

Monitoreamos 26 estaciones VMP en total, con una separación promedio de 2 km por cada sección de bahía,

centimeters during free-fall deployment. To obtain accurate shear measurements, the profiler requires a smooth and free descent to minimize contamination by the vibration of the measured shear signals. A motion decoupling winch PID-2 (Figure. 2a) was used to maintain a free-fall deployment by providing a slack of rope to ensure that the instrument is falling as freely as possible. The average fall speed under these conditions was $\sim 0.85 \text{ m s}^{-1}$. The real-time seafloor depth was recorded by the multibeam and sonar on board the boat. The winch rope was marked every 10 meters, reaching a maximum rope length of 400 m. In addition, a measuring pulley was used during the Charlotte Bay stations to control the amount of rope deployed.

To study the microstructure of the GS, three cross-sections were occupied along its length from the main water entrance in the southwest to the exit at the northeast. Each section starts from the Gerlache mainstream (i.e. main Gerlache depth channel) and traverses to the interior of each bay. The first section ends inside the Flandes Bay, the second inside the Andvord Bay, and the third at the entrance to Charlotte Bay (Figure 1). All three sections exhibit smooth changes in topography. Precise locations of the stations are given in Table 1 (supplementary material).

We monitored 26 VMP stations in total, with an average separation of 2 km for each section bay, to record the variability from the ice shelf edge to the mean stream of the GS. The *ARC 20 de Julio*, which is not an icebreaker, was used to record the Charlotte stations; just 6 of 10 proposed stations on the Charlotte Bay were



para registrar la variabilidad desde el borde de la plataforma de hielo hasta la corriente media del GS. El ARC 20 de Julio, que no es un rompehielos, se utilizó para registrar las estaciones de Charlotte; solo 6 de las 10 estaciones propuestas en la bahía de Charlotte se registraron debido a la gran condición de hielo marino. Se utilizó un barco de clase defensiva para los despliegues en las otras bahías (Andvord y Flandes) para llegar a áreas con una capa de hielo marino casi completa. Las tres secciones se realizaron con alta sinóptica (~ 5 horas por sección).

El software MotoCross y RSILink, proporcionado por Rockland Scientific, se utilizó para acceder al conjunto de datos que se registró en la memoria interna de la computadora (persistor) del VMP. El procesamiento se realizó con Matlab 2018B. Convertimos el conjunto de datos a unidades físicas después de correlacionarlo con la velocidad de generación de perfiles (para estar seguros de la caída libre), luego eliminamos picos y banderas defectuosas aplicando un filtro de paso bajo a 1 Hz para identificar las vibraciones detectadas por los acelerómetros internos. Para el análisis solo se utilizaron los datos registrados durante la caída libre, para asegurar la estabilidad de la velocidad vertical, ya que en este caso no hubo perturbación de la columna de agua debido al equipo. Los valores de corte se registraron individualmente por dos sensores diferentes para identificar posibles fallas de funcionamiento o datos ruidosos. La media de las tasas de disipación se estimó a partir de las dos sondas.

3.2 Difusividad diapicna

La tasa de disipación de energía turbulenta (ε) está relacionada con la transferencia de energía cinética de escalas grandes a pequeñas en términos de fluctuaciones de la velocidad del flujo (Kolmogorov, 1941). Asumiendo la isotropía como condición, el GS puede crear remolinos de diferentes tamaños que están limitados por la estratificación del flujo. La inestabilidad de cizallamiento es un mecanismo común de transferencia de energía desde la estabilidad a la turbulencia y puede cuantificarse como una tasa de producción mediante la teoría de Reynolds:

$$-\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'} (\partial U / \partial z) \quad (1)$$

dónde $(-\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'})$ es el estrés de Reynolds y $(\partial U / \partial z)$ es la cizalla media. Las interacciones de remolinos producen una cascada de energía desde escalas más pequeñas hasta escalas moleculares donde la energía se transfiere de mecánica a calórica en el orden de la viscosidad molecular cinemática (ν) siguiendo:

recorded because of a heavy sea-ice condition. A defender-class boat was used for the deployments in the other bays (Andvord and Flandes) to reach areas with almost full sea-ice cover. All three sections were performed with high synopticity (~ 5 hours per section).

MotoCross and RSILink software, provided by Rockland Scientific, was used to access the dataset that was recorded in the internal computer memory (persistor) of the VMP. Processing was performed using Matlab 2018B. We converted the dataset to physical units after correlating with the profiling speed (to be sure about the free fall), then we deleted spikes and bad flags by applying a low pass filter at 1 Hz to identify vibrations detected by the internal accelerometers. Only data recorded during free fall were used for the analysis, to ensure stability of the vertical velocity, as in this case there was no perturbation of the water column due to the equipment. Shearing values were recorded individually by two different sensors to identify possible malfunction or noisy data. The mean of the dissipation rates was estimated from the two probes.

Diapycnal diffusivity

The turbulent energy dissipation rate (ε) is related to the transfer of kinetic energy from large to small scales in terms of flow velocity fluctuations (Kolmogorov, 1941). Assuming isotropy as a condition, the GS can create eddies at different sizes that are limited by the flow stratification. Shear instability is a common energy transfer mechanism from stability to turbulence and can be quantified as a production rate by the Reynolds theory:

$$-\overline{\mathbf{w}'\mathbf{w}'} (\partial U / \partial z) \quad (1)$$

where $(-\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'})$ is the Reynolds stress and $(\partial U / \partial z)$ is the mean shear. The eddy interactions produce a cascade of energy from smaller scales down to molecular scales where the energy is transferred from mechanical to caloric at the order of the kinematic molecular viscosity (ν) following:

$$\varepsilon = 15 / 2 \nu \overline{(\partial U / \partial z)^2} = 15 / 2 \nu \int_0^\infty \Psi(k) dk \quad (2)$$

where (Ψ) is the spectrum of the shear (Nasmyth, 1970). Following Oakey (1982), we calculated the Nasmyth empirical spectrum. The energy spectrum was calculated via the Fast Fourier Transform (FFT) to identify the signature of the process that drives the water column dynamics. We choose an FFT length of 0.1 m to resolve the lowest wavenumber of the processes that can be developed in the area. Once this is known, we proceed to estimate the vertical mixing through the diapycnal diffusivity (k_p),

$$\varepsilon = 15 / 2 \nu \overline{(\partial U / \partial z)^2} = 15 / 2 \nu \int_0^\infty \Psi(k) dk \quad (2)$$

dónde (Ψ) es el espectro de la cizalla (Nasmyth, 1970). Siguiendo a Oakey (1982), calculamos el espectro empírico de Nasmyth. El espectro de energía se calculó mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificar la firma del proceso que impulsa la dinámica de la columna de agua. Elegimos una longitud FFT de 0,1 m para resolver el menor número de onda de los procesos que se pueden desarrollar en la zona. Una vez conocido se procede a estimar la mezcla vertical a través de la difusividad diapícnal (k_p), que influye en la fuerza y el patrón de la circulación oceánica y determina la heterogeneidad del calor y la sal en diferentes escalas espaciales (Steward, 2008). La relación para cuantificar k_p Fue propuesta por Osborn (1980):

$$k_p = \Gamma \varepsilon / N^2 \quad (3)$$

dónde $\Gamma = 0.2$ es la eficiencia de mezcla empírica definida por Osborn y Cox, (1972), y N es la frecuencia de flotabilidad. Un promedio oceánico global para valores estimados de mezcla vertical de $k_p \approx 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, y la difusividad pelágica media viene dada por $k_p \approx 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Thorpe, 2005). Siguiendo esta metodología, podemos producir un mapa 2D en términos de mezcla que describe la dinámica general de la microestructura en el GS.

Entre los procesos que proporcionan energía a la circulación oceánica en el GS, podemos contar los icebergs rodantes, las olas internas que rompen, la convección y las intrusiones (Arneborg *et al.* 2004). Como enfoque inicial para identificar cuál de estos podría ser responsable de los niveles de mezcla medidos, calculamos el ángulo de Turner (McDougall *et al.*, 1988).

$$T_u \text{ (deg)} = \tan^{-1} (\alpha \partial \theta / \partial z - \beta \partial S / \partial z, \alpha \partial \theta / \partial z + \beta \partial S / \partial z) \quad (4)$$

Dónde β es el coeficiente de contracción de la salinidad, α es el coeficiente de expansión térmica, θ es la temperatura potencial, S es la salinidad, y z se define positivo al alza. Valores de ángulo de $-45^\circ \leq T_u \leq 45^\circ$ indican condiciones estables del océano, mientras $45^\circ \leq T_u \leq 90^\circ$ indica que la estabilidad está disminuyendo por la sal, una condición en la que pueden desarrollarse procesos de dedos de sal.

RESULTADOS

Contexto hidrográfico

Hay un cambio claro en las propiedades de la masa de agua de los 400 m superiores de la columna de agua desde la entrada sur del GS (junto a la isla Anvers sobre $63,68^\circ \text{W}$) hasta la salida norte (isla de Liege sobre $61,63^\circ \text{W}$). El AASW

which influences the strength and pattern of the ocean circulation and determines the heat and salt heterogeneity at different spatial scales (Steward, 2008). The relationship to quantify k_p was proposed by Osborn (1980):

$$k_p = \Gamma \varepsilon / N^2 \quad (3)$$

where $\Gamma = 0.2$ is the empirically mixing efficiency defined by Osborn and Cox, (1972), and N is the buoyancy frequency. An oceanic global average for vertical mixing estimates values of $k_p \approx 10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, and the average pelagic diffusivity is given by $k_p \approx 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Thorpe, 2005). Following this methodology, we can produce a 2D map in terms of mixing that describes the general microstructure dynamics in the GS.

Among the processes that provide energy to ocean circulation in the GS, we can count rolling icebergs, breaking internal waves, convection, and intrusions (Arneborg *et al.*, 2004). As an initial approach to identify which of these might be responsible for the measured mixing levels, we calculate the Turner angle (McDougall *et al.*, 1988).

$$T_u \text{ (deg)} = \tan^{-1} (\alpha \partial \theta / \partial z - \beta \partial S / \partial z, \alpha \partial \theta / \partial z + \beta \partial S / \partial z) \quad (4)$$

Where β is the salinity contraction coefficient, α is the thermal expansion coefficient, θ is the potential temperature, S is the salinity, and z is defined positive upwards. Angle values of $-45^\circ \leq T_u \leq 45^\circ$ indicate stable ocean conditions, while $45^\circ \leq T_u \leq 90^\circ$ indicates that the stability is decreasing by salt, a condition in which salt fingering processes may develop.

RESULTS

Hydrographic context

There is a clear change in the water mass properties of the upper 400 m of the water column from the southern entrance of the GS (next to Anvers Island over 63.68°W) to the northern exit (Liege Island over 61.63°W). The AASW is identified at a maximum depth of ~ 100 m. The shallow water warms as it circulates to the north, where a maximum surface temperature of 2.6°C , was recorded compared to a maximum of 1.2°C in the south. There is a seasonal thermocline at around 80 m depth that works as a boundary layer between the shallow and intermediate waters. In general, there is a similar salinity range at all three sections in the top 400 m of the water column. A minimum value of 33.4 psu was recorded at the surface

se identifica a una profundidad máxima de ~ 100 m. El agua poco profunda se calienta a medida que circula hacia el norte, donde se registró una temperatura superficial máxima de $2,6$ °C, frente a una máxima de $1,2$ °C en el sur. Existe una termoclina estacional a unos 80 m de profundidad que funciona como capa límite entre las aguas poco profundas e intermedias. En general, existe un rango de salinidad similar en las tres secciones en los 400 m superiores de la columna de agua. Se registró un valor mínimo de $33,4$ psu en las aguas superficiales de la sección de Flandes, posiblemente debido al agua dulce procedente del derretimiento del hielo procedente de las regiones del sur. Una capa de interfaz separa el AASW y el uCDW, y esto se puede ver claramente en las variaciones de temperatura y densidad, producidas por la dinámica interna provocada por la mezcla de las diferentes masas de agua que ingresan al GS (Figura 3). La sección de la Bahía de Flandes se destaca porque su pequeña variabilidad de temperatura en los 400 m superiores de la columna de agua (rango $1,2 - 0,3$ °C) indica que el uCDW tiene temperaturas más altas que las registradas a profundidades menores. El uCDW se caracteriza por un núcleo de agua tibia alrededor de ~ 150 m de profundidad, donde alcanza una temperatura de $1,0$ °C y una salinidad de $34,4$ psu. Estas propiedades son típicas en las regiones donde la precipitación domina sobre la evaporación y se denomina estratificación difusa (Kelley *et al.*, 2003). Esta configuración de capas difusivas cambia en la sección de Andvord, donde se puede identificar la mezcla de uCDW y WSDW, impactando capas por debajo de 100 m, con un valor de salinidad superior de $34,5$ psu en comparación con la sección de Flandes. El agua más profunda aquí es más fría y más densa que la bahía de Flandes. La sección de Charlotte tiene el rango de temperatura más grande ($2,8$ a $-0,7$ °C). Aquí, el AASW poco profunda es más cálida y el agua más profunda es más fría con una marca clara de WSDW que influye en la dinámica del área. Los cambios de densidad son impulsados principalmente por la temperatura más que por la salinidad.

La frecuencia de flotabilidad identifica el área como débilmente estratificada, con agua estratificada poco profunda que se presenta esporádicamente (~ 100 m) en la sección de Flandes y junto a cada entrada de la bahía donde residen las aguas locales (excepto la bahía de Andvord). La N_{media} es de $0,42$ cph, mientras que la flotabilidad media del océano es de ~ 3 cph (Figura 3d). La estratificación baja indica un sistema propenso a intrusiones que puede producir agua bien mezclada. La mayoría de los perfiles se caracterizaron por valores de ángulo de Turner de $40^\circ \leq T_v \leq 55^\circ$, lo que implica la presencia potencial de dedos de sal.

waters in the Flandes section, possibly due to fresh waters from melting ice coming from southern regions. An interface layer separates the AASW and the UCDW, and this can be seen clearly in the temperature and density variations, produced by the internal dynamics caused by the mixing of the different water masses entering the GS (Figure 3). The Flandes Bay section stands out because its small temperature variability over the upper 400 m of the water column (range $1.2 - 0.3$ °C) indicates that UCDW has higher temperatures than those recorded at shallower depths. UCDW is characterized by a core of warm water around ~ 150 m depth, where it reaches a temperature of 1.0 °C and salinity of 34.4 psu. These properties are typical in regions where precipitation dominates over evaporation and is termed diffusive layering (Kelley *et al.*, 2003). This diffusive layering configuration changes at the Andvord section, where mixing of UCDW and WSDW can be identified, impacting layers below 100 m, with a higher salinity value of 34.5 psu compared to the Flandes section. The deeper water here is colder and denser than Flandes Bay. The Charlotte section has the largest temperature range (2.8 to -0.7 °C). Here the shallow AASW is warmer and the deepest water is colder with a clear signature of WSDW that influences the dynamics in the area. The density changes are principally driven by the temperature rather than salinity.

The buoyancy frequency identifies the area as weakly stratified, with sporadic shallow stratified water (~ 100 m) at the Flandes section and next to each bay entrance where the local waters reside (except for Andvord bay). The N_{mean} is 0.42 cph, while the average ocean buoyancy is ~ 3 cph (Figure 3d). Low stratification indicates a system prone to intrusions that can produce well-mixed water. Most of the profiles were characterized by Turner angle values of $40^\circ \leq T_v \leq 55^\circ$, implying the potential presence of salt fingering. At the Flandes section, strongly-stratified shallow water (< 100 m) is the only water that is not prone to develop salt fingering, a product of the cold water mainly produced by melting. The entrance of warmer shallow water from the North decreases the stability. The water transition is clear and almost constant in the Charlotte Bay (Figure 3C). From here we can identify the relevance of the bathymetry and the location (North-South) of the water stability.

Mixing measurements

The high resolution of the shear sensors installed in the VMP-250 allowed us to calculate the Nasmyth

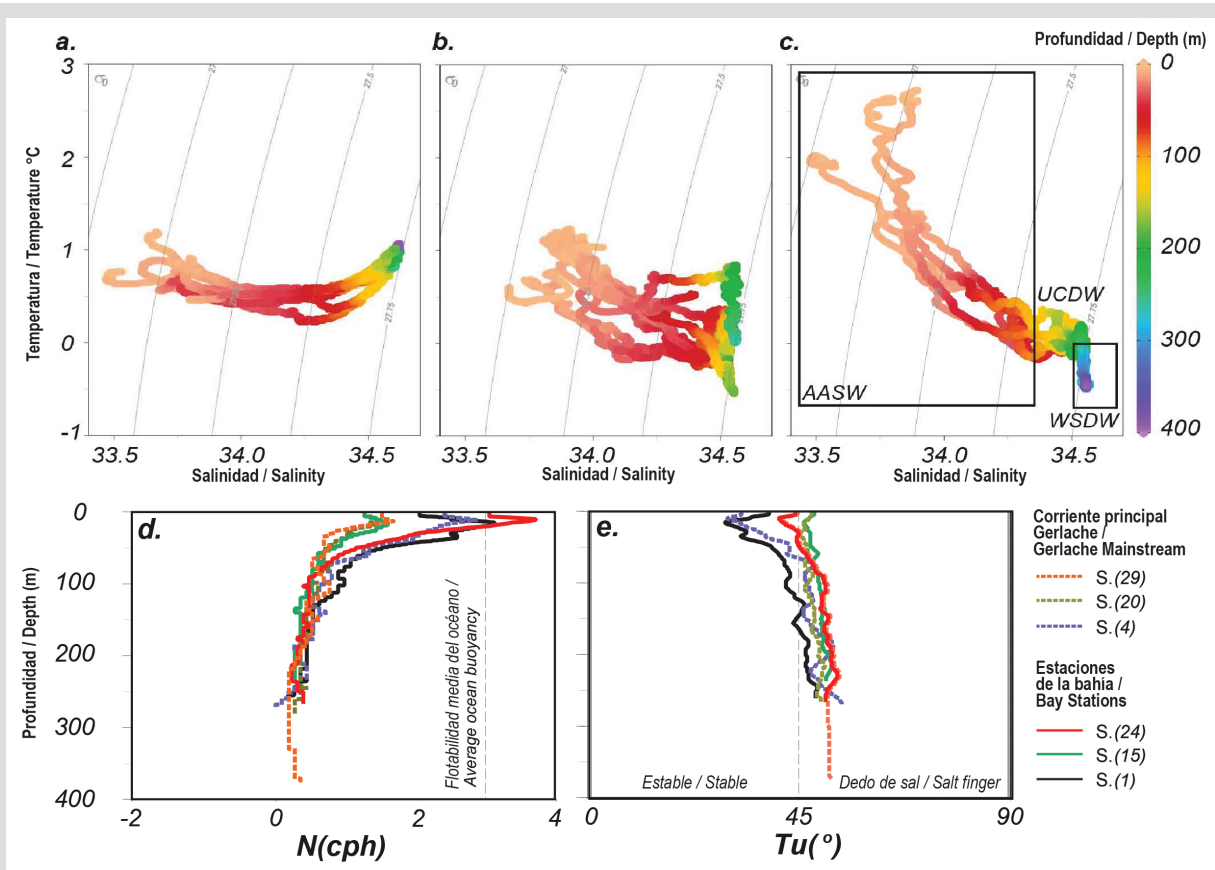


Figura 3. Diagrama T-S en Bahía **a.** Flandes, **b.** Andvord y **c.** Charlotte respectivamente, a partir de los perfiles de datos completos de VMP. **d.** frecuencia de flotabilidad, y **e.** ángulo de Turner para seis estaciones representativas, tres ubicadas sobre la corriente principal de Gerlache y tres dentro de las bahías de estudio. En **c.** ubicamos cajas con la ubicación de las principales masas de agua.

Figure 3. T-S diagram **a.** Flandes, **b.** Andvord, and **c.** Charlotte Bay respectively, from the full VMP data profiles. **d.** buoyancy frequency, and **e.** Turner angle for six representative stations, three located over the Gerlache mainstream, and three inside the study bays. In **c.** we located boxes with the location of the main water masses.

En la sección de Flandes, las aguas poco profundas están fuertemente estratificadas (< 100 m) siendo la única agua que no es propensa a desarrollar dedos de sal, producto del agua fría que se produce principalmente al derretirse. La entrada de aguas poco profundas más cálidas desde el norte decreta la estabilidad. La transición del agua es clara y casi constante en la bahía de Charlotte (Figura 3C). A partir de aquí podemos identificar la relevancia de la batimetría y la ubicación (norte-sur) de la estabilidad del agua.

Mezclar medidas

La alta resolución de los sensores de cizallamiento instalados en el VMP-250 nos permitió calcular el espectro empírico Nasmyth en el GS (Figura 4). Las altas concentraciones de energía son evidentes sobre las estaciones ubicadas en la corriente principal de Gerlache, donde circula la mayor parte del uCDW y el WSDW. Los triángulos de la Figura 4 identifican el número de onda máximo para estimar

empirical spectrum at the GS (Figure 4). High energy concentrations are evident over the stations located in the Gerlache mainstream, where most of the UCDW and the WSDW circulate. The triangles in Figure 4 identify the maximum wavenumber for estimating the dissipation rate; above this limit, the instrument noise prevails over the measurements. The maximum wavenumber to estimate the integration upper limit is 46 cpm. The ε associated with each spectrum represents the spatial energy variation for each water mass. The lowest values are associated with the stations inside the bays ($\varepsilon = 5 \times 10^{-10} \text{ Wkg}^{-1}$), while the highest value was located in the mainstream ($\varepsilon = 3 \times 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$) at a depth and location associated with the UCDW. The ε associated with the presence of WSDW has the lowest energy values.

The variability of ε with depth was estimated in 3 m bins, resulting in an average value of $\varepsilon = 2 \times 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$ with remarkable and sporadic peaks of $O(\varepsilon = 1 \times 10^{-10} \text{ Wkg}^{-1})$

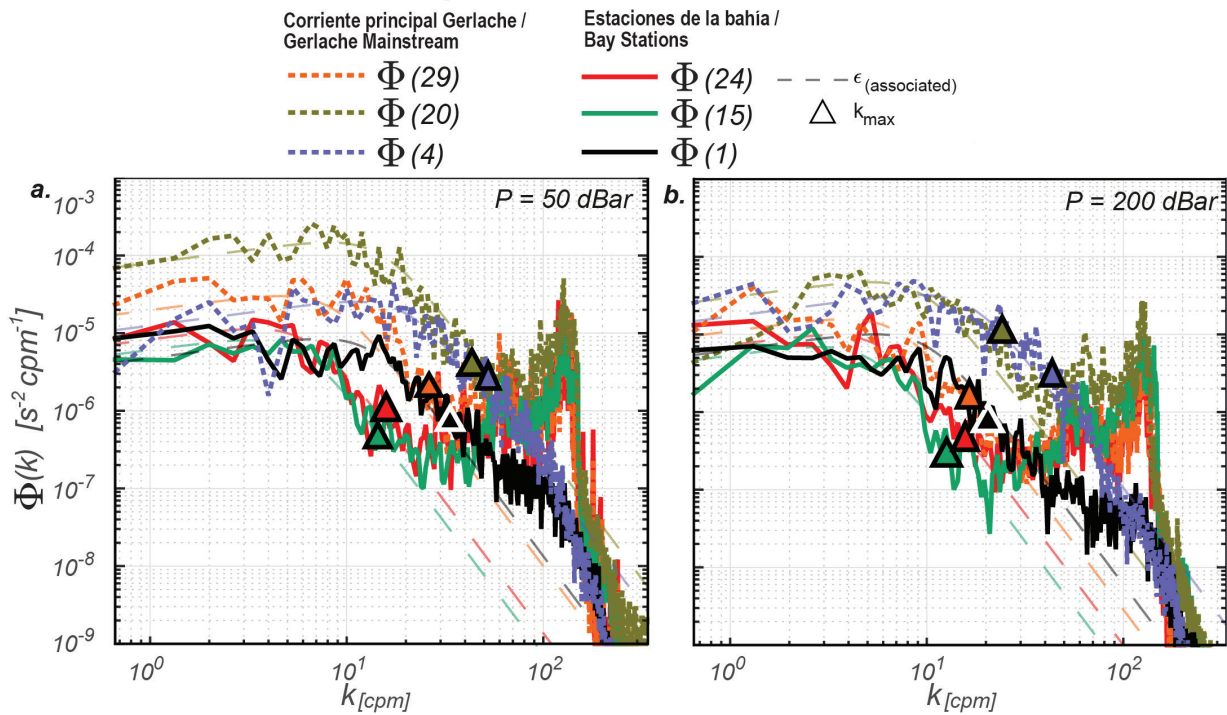


Figura 4. Espectro de energía de número de onda a **a.** 50 m y **b.** 200 metros de profundidad para tres estaciones dentro de cada bahía y tres estaciones sobre la corriente principal de Gerlache. Se eligió una profundidad de 50 y 200 m para ilustrar la influencia de los procesos convectivos directos que dominan las aguas poco profundas. Las líneas punteadas indican el espectro predicho en números de onda altos donde el ruido del instrumento domina las mediciones.

Figure 4. Wavenumber energy spectrum at **a.** 50 m and **b.** 200 meters depth for three stations inside each bay, and three stations over the Gerlache mainstream. 50 and 200 m depth was chosen to illustrate the influence of direct convective processes that dominates shallow waters. The dashed lines indicate the predicted spectrum at high wavenumbers where instrument noise dominates the measurements.

la tasa de disipación; por encima de este límite, el ruido del instrumento prevalece sobre las mediciones. El número de onda máximo para estimar el límite superior de integración es 46 cpm. La ϵ asociada con cada espectro representa la variación de energía espacial para cada masa de agua. Los valores más bajos están asociados con las estaciones dentro de las bahías. ($\epsilon = 5 \times 10^{-10} \text{ Wkg}^{-1}$), mientras que el valor más alto se ubicó en la corriente principal ($\epsilon = 3 \times 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$) a una profundidad y ubicación asociadas con la uCDW. La ϵ asociada con la presencia de WSDW tiene los valores de energía más bajos.

La variabilidad de ϵ con profundidad se estimó en bins de 3 m, resultando en un valor promedio de $\epsilon = 2 \times 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$ con picos notables y esporádicos de $O(\epsilon = 1 \times 10^{-10} \text{ Wkg}^{-1})$ dentro de las bahías y $O(\epsilon = 3 \times 10^{-6} \text{ Wkg}^{-1})$ en la corriente principal de Gerlache a alrededor de ~ 200 m de profundidad (Figura 5), donde se encuentra la interfaz de agua. La variabilidad en superficie y durante los primeros 100 m es mayor que en profundidad debido a la influencia del viento y la atmósfera, de acuerdo con la estratificación

inside the bays and $O(\epsilon = 3 \times 10^{-6} \text{ Wkg}^{-1})$ in the Gerlache mainstream at around ~ 200 m depth (Figure 5), where the water interface is located. The variability at the surface and over the first 100 m is higher than at depth due to the wind and atmospheric influence, in agreement with the water stratification (N). Below 100 m the stratification is essentially uniform, and ϵ at the stations located over the Gerlache mainstream is larger by one to two orders of magnitude than in the bays, largely due to bathymetry and water-shear interaction. Sections of the vertical profile of dissipation as a function of depth (Figure 5) have uniform values of dissipation (same order of magnitude). For instance, stations on the Gerlache mainstream show a large ϵ over different depths range, this indicate depth ranges over which vertical overturning of water is occurring. This occurs principally where different water masses meet and interleave and thus mix. The results are roughly in agreement with Ross and Lavery (2010) who report an average of $\epsilon = 1 \times 10^{-9} \text{ Wkg}^{-1}$ close to Anvers Island.

del agua (N). Por debajo de 100 m, la estratificación es esencialmente uniforme y ϵ en las estaciones ubicadas sobre la corriente principal de Gerlache es más grande en uno o dos órdenes de magnitud que en las bahías, en gran parte debido a la interacción batimetría y cizalladura del agua. Las secciones del perfil vertical de disipación en función de la profundidad (Figura 5) tienen valores uniformes de disipación (mismo orden de magnitud). Por ejemplo, las estaciones en la corriente principal de Gerlache muestran una gran ϵ en diferentes rangos de profundidad, esto indica rangos de profundidad sobre los cuales se está produciendo un vuelco vertical del agua. Esto ocurre principalmente donde las diferentes masas de agua se encuentran y se entrelazan y así se mezclan. Los resultados están de acuerdo con Ross y Lavery (2010) que informan un promedio de $\epsilon = 1 \times 10^{-9} \text{ Wkg}^{-1}$ cerca de la isla de Anvers.

DISCUSIÓN

Niveles más altos de disipación de energía (es decir, $\epsilon > 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$) están relacionados con el intercambio de energía y la disipación turbulenta producida por la entrada de uCDW y AASW al GS. Esta suposición se evidencia en la ubicación de la profundidad del máximo de ϵ (Figura 5), dónde las masas de agua se mezclan y erosionan, así como la firma de las masas de agua originales. En la ubicación de Flandes, hay una transferencia de energía de las aguas superiores más cálidas y profundas a las más frías

DISCUSSION

Higher levels of energy dissipation (i. e. $\epsilon > 10^{-8} \text{ Wkg}^{-1}$) are related to the exchange of energy and turbulent dissipation produced by the entrance of UCDW and the AASW to the GS. This assumption is evidenced by the depth location of the maximum ϵ (Figure 5), where the water masses are mixing and thus eroding the signature of the original water masses. At the Flandes location, there is a transfer of energy from the warmest deeper to the coldest upper waters that releases potential energy from the temperature field. This compensation produces a well-mixed layer marked by density gradients, diapycnal mixing occurring in some locations is confirmed by the reduction of the deep-water vertical density gradient recorded in the interior stations. For instance, when comparing bays, once can see from Figure 3f, that the pycnocline is much more eroded in Flandes than in Anvord Bay or Charlotte Bay. The increase of the mixing values from Flandes to Andvord and Charlotte Bays is related to the reduction in the stratification of the pycnocline (Figure 3g-h); this could be produced by the dominance of the turbulent processes reflected in the lower values of both the water buoyancy and Turner angle.

High values of the buoyancy frequency are required to maintain the balance of the vertical diapycnal flux; because of this lack of stability, the system is prone to produce overturning through the full water column. A

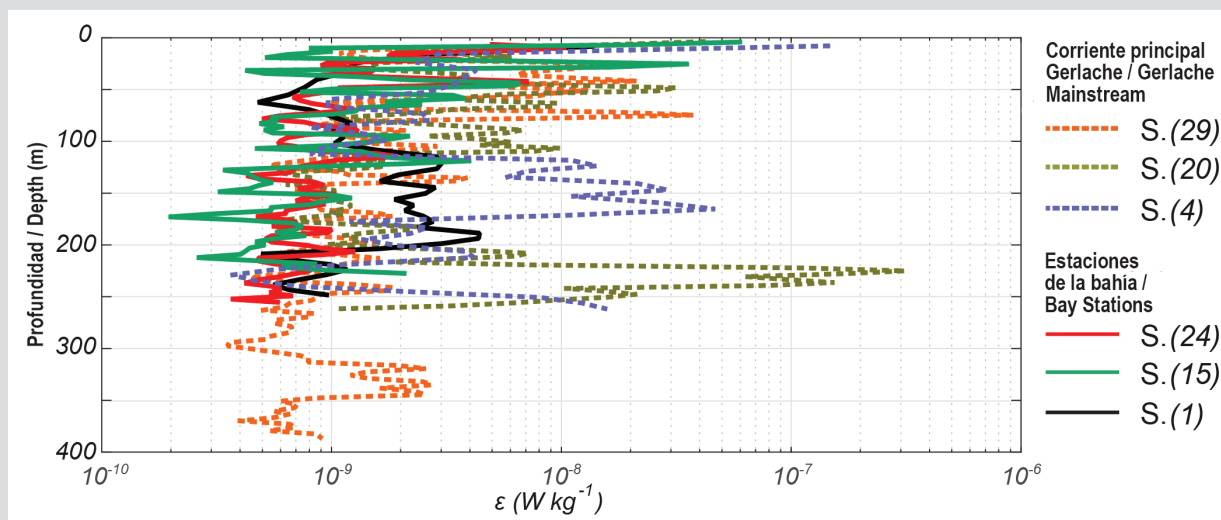


Figura 5. Tasas de disipación de estaciones VMP representativas sobre el Estrecho de Gerlache. Tamaño del bin 3 m. Estación 29 (70-80 m); Estación 20 (210-260 m) y Estación 4 (120-170 m), se encuentran los valores máximos de ϵ , dónde se encuentran las profundidades y la ubicación de las masas de agua.

Figure 5. Dissipation rates for representative VMP stations over the Gerlache Strait. Bin size 3 m. Station 29 (70-80 m); Station 20 (210-260 m), and Station 4 (120-170 m), maximum values of ϵ , where depths and location of the water masses meet.

que libera energía potencial del campo de temperatura. Esta compensación produce una capa bien mezclada marcada por gradientes de densidad. La mezcla diapycnal que ocurre en algunos lugares se confirma por la reducción del gradiente de densidad vertical de aguas profundas registrado en las estaciones interiores. Por ejemplo, al comparar bahías, se puede ver en la Figura 3f, que la picnoclina está mucho más erosionada en Flandes que en Bahía Andvord o Bahía Charlotte. El aumento de los valores de mezcla de Bahía Flandes a Andvord y Charlotte, está relacionado con la reducción en la estratificación de la picnoclina (Figura 3g-h); esto podría producirse por el predominio de los procesos turbulentos reflejados en los valores más bajos tanto de la flotabilidad del agua como del ángulo de Turner.

Se requieren valores altos de la frecuencia de flotabilidad para mantener el equilibrio del flujo diapycnal vertical; debido a esta falta de estabilidad, el sistema es propenso a producir un vuelco en toda la columna de agua. Una estratificación débil permite las entradas del uCDW al GS, lo que trae menores niveles de oxígeno ($220 \mu\text{mol kg}^{-1}$), y debido a procesos biológicos puede llegar a $37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ en el área (Torres *et al.*, 2020). La mezcla y la interacción de las masas de agua pueden afectar los ciclos biológicos como la migración vertical. La estratificación más baja también afecta la estabilidad del sistema cuantificada por T_u . Hay un área donde la columna de agua completa es propensa a cambiar fácilmente su condición de estable a digitación de sal en Bahía Charlotte. La bahía de Charlotte es el primer lugar afectado por la entrada de agua más fría del norte (WSDW), que interactúa con agua relativamente más cálida del sur (uCDW); esta interacción crea un valor decreciente de la temperatura potencial y las condiciones de salinidad en profundidad para desarrollar el proceso de doble difusión. En las bahías del sur la estabilidad se ve reforzada por la notable presencia de uCDW por debajo del AASW, pero solo hasta los primeros 100 m de profundidad donde el sistema pierde la estratificación y se puede producir un proceso de doble difusión como los dedos de sal (Figura 3h).

La difusividad diapycnal calculada en el GS da un valor medio de $O(\log_{10} k_p = -4.7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ en la sección de Flandes, $O(\log_{10} k_p = -4.9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ en la sección Andvord, y $O(\log_{10} k_p = -5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ en la sección de Charlotte (Figura 6). En todas las secciones los valores más altos de k_p ocurren en la superficie debido a la ventilación con la atmósfera. Esto implica un mayor nivel de energía que se puede transferir del océano a los glaciares, acelerando el retroceso de los glaciares ubicados en el área de estudio

weak stratification allows the entrances of the UCDW to the GS, which brings lower levels of oxygen ($220 \mu\text{mol kg}^{-1}$) and due by biological processes can reach $37 \mu\text{mol kg}^{-1}$ in the area (Torres *et al.*, 2020). Mixing and water masses interaction can affect biological cycles such as vertical migration. Lower stratification also affects the system stability as we quantified by the T_u . There is an area where the full water column is prone to change easily its condition from stable to salt fingering and is the Charlotte Bay. The Charlotte Bay is the first location affected by the entrance of colder northern water (WSDW), that interact with relative warmer southern water (UCDW); this interaction creates a decreasing value of potential temperature and salinity in-depth, conditions to develop double diffusion process. At the southern bays the stability is enhanced by the remarkable presence of UCDW below the AASW, but just until the first 100 m depth where the system loses the stratification and double-diffusive process such as salt fingering can be produced (Figure 3h).

Diapycnal diffusivity calculated at the GS gives a mean value of $O(\log_{10} k_p = -4.7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ at the Flandes section, $O(\log_{10} k_p = -4.9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ at the Andvord section, and $O(\log_{10} k_p = -5.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ at the Charlotte section (Figure 6). At all sections the highest values of k_p occur at the surface due to ventilation with the atmosphere. This implies a higher level of energy that can be transferred from the ocean to the glaciers, accelerating the glacier retreatment located in the study area (Torres *et al.*, 2020). The diapycnal map is patchy, with clear hot spots at the upper mixed-layer; these are mainly located at the entrance of each bay, where there is a slight topography change. The resident waters work as a natural barrier resisting the erosion and impact of external waters with higher temperatures that could impact directly the interior glaciers bays. The location of the hot spots implies that there may be interaction with the resident waters in the bays at such depths. The bays are configured such that each southern border acts as a thermal and mechanical barrier to the main South-to-North circulation of the GS, thereby reducing the diapycnal mixing by reducing the water-mass interaction. Comparing the three sections from the southwest to the northeast, there is a clear enhancement of dissipation in the south part where the mixing was concentrated in the shallow waters (AASW – UCDW interaction). In the north part, the mixing was concentrated in the interface UCDW - WSDW.

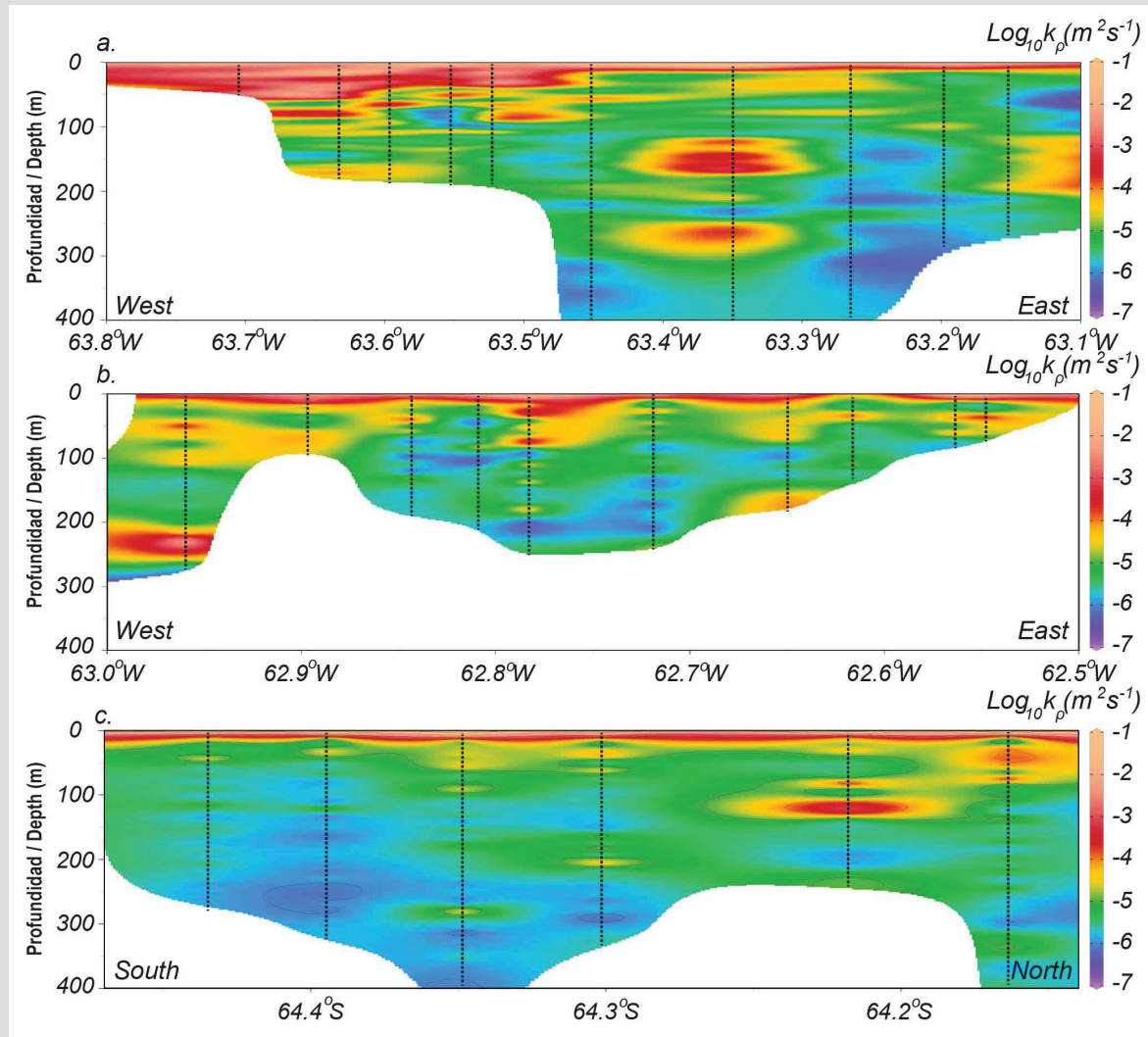


Figura 6. Secciones de difusividad diapícnal calculadas en escala logarítmica sobre Bahía **a.** Flandes, **b.** Andvord y **c.** Charlotte. Las líneas discontinuas identifican la ubicación de cada estación VMP.

Figure 6. Diapycnal diffusivity sections calculated in logarithmic scale over the **a.** Flandes, **b.** Andvord, and **c.** Charlotte Bays. Dashed lines identify the location of each VMP station.

(Torres *et al.*, 2020). El mapa diapícnal es irregular, con claros puntos activos en la capa superior mixta; estos se ubican principalmente en la entrada de cada bahía, donde hay un ligero cambio de topografía. Las aguas residentes funcionan como una barrera natural resistiendo la erosión y el impacto de aguas externas con temperaturas más altas que podrían impactar directamente las bahías de los glaciares interiores. La ubicación de los puntos calientes implica que puede haber interacción con las aguas residentes en las bahías a tales profundidades. Las bahías están configuradas de tal manera que cada borde sur actúa como una barrera térmica y mecánica a la circulación principal sur-norte del GS, reduciendo así la mezcla diapícnal al reducir la interacción agua-masa. Comparando las tres secciones de suroeste a noreste, hay un claro aumento de la disipación

To confirm if the entrance of UCDW and the AASW can provide the energy for the observed mixing, we consider if internal wave radiation is relevant in this area. This is the level of propagation of the internal waves regarding the bathymetry, current, and water stability. To do so, we calculate the steepness parameter:

$$S = (N\sqrt{2} H_{rms}) / U_0 \quad (5)$$

where H_{rms} is the RMS height of topography; we get an average peak value of 0.2. Values $S < 0.3$ indicate that 10 % or less of internal wave energy is dissipated locally, confirming a transition from a linear to an inertial oscillation regimen (Nikurashin and Ferrari, 2011). This low value indicates that most of the energy provided for the observed turbulence and mixing at intermediate layers

en la parte sur donde la mezcla se concentró en las aguas someras (interacción AASW - uCDW). En la parte norte, la mezcla se concentró en la interfaz uCDW - WSDW.

Para confirmar si la entrada de uCDW y AASW puede proporcionar la energía para la mezcla observada, consideramos si la radiación de ondas internas es relevante en esta área. Este es el nivel de propagación de las ondas internas con respecto a la batimetría, la corriente y la estabilidad del agua. Para ello, calculamos el parámetro de inclinación:

$$S = (N\sqrt{2} H_{rms}) / U_0 \quad (5)$$

dónde H_{rms} es la altura RMS de la topografía; obtenemos un valor pico medio de 0,2. Valores $S < 0.3$ indican que el 10 % o menos de la energía de las ondas internas se disipa localmente, lo que confirma una transición de un régimen de oscilación lineal a uno inercial (Nikurashin y Ferrari, 2011). Este valor bajo indica que es probable que la mayor parte de la energía proporcionada para la turbulencia y mezcla observadas en las capas intermedias sea producida por la interacción onda-onda. A partir de la distribución del espectro de energía a diferentes profundidades (Figura 4), se observa una interacción no lineal con las variaciones de energía en las interfaces de agua donde se encontraba la entrada de uCDW y AASW. Se necesitarán más estudios para confirmar esta hipótesis.

El AASW se mueve alrededor del lado oeste de la Península Antártica, impactando la parte poco profunda de las plataformas de hielo locales y sus glaciares. El impacto provoca pérdida de estabilidad de las aguas en la parte norte del GS en términos de temperatura, menor estratificación y mayores valores de mezcla vertical. Existe un claro intercambio de propiedades entre el uCDW y el ramificación del WSDW que ingresa a las aguas intermedias del GS desde el norte. Esto puede producir un proceso de entrelazado debido a la variabilidad de la temperatura y la salinidad (variación espacial diapicna). El uCDW tiene la energía más alta disponible para producir el tipo de mezcla que potencialmente puede afectar las bahías de Gerlache. Dado que la circulación principal y la capa de hielo marino protegen las propiedades del agua interior de las bahías, las aguas residentes se ven afectadas solo ligeramente por esta intrusión. Otro factor a considerar es la batimetría: la suave pendiente desde el cauce Gerlache hacia el interior de las bahías ayuda a bloquear la entrada de aguas externas. En Bahía Flandes, el flujo de agua interactúa con la batimetría, lo que sugiere la generación de ondas internas. Esta podría ser una fuente de energía para la mezcla registrada en esta área.

is likely to be produced by the wave-wave interaction. From the distribution of the energy spectrum at different depths (Figure 4), there is a non-linear interaction with energy variations at the water interfaces where the entrance of UCDW and AASW were. Further studies will need to confirm this hypothesis.

The AASW moves around the west side of the Antarctic Peninsula, impacting the shallow part of the local ice-shelves and their glaciers. The impact causes loss of stability of the waters in the northern part of the GS in terms of temperature, lower stratification, and higher vertical mixing values. There is a clear exchange of properties between the UCDW and the branch of the WSDW that enters the intermediate waters of the GS from the north. This can produce an interleaving process due to temperature, and salinity variability (diapycnal spiciness). The UCDW has the highest energy available to produce the sort of mixing that can potentially impact the Gerlache Bays. Since the main circulation and the sea-ice -cover protect the interior water properties of the bays, the resident waters are only slightly affected by this intrusion. Another factor to consider is the bathymetry: the smooth slope from the Gerlache mainstream to the interior of the bays helps to block the entrance of external waters. In Flandes Bay, the water flow interacts with the bathymetry, suggesting internal wave generation. This could be an energy source for the mixing recorded in this area.

CONCLUSIONS

For the first time, a summer-time diapycnal diffusivity map was successfully quantified in the main bays of the Gerlache Strait. The mixing and diapycnal diffusivity profiles quantified with the VMP shear sensors are consistent with the variation of the internal water properties measured by the temperature and salinity sensors on the Gerlache pathway from the southwest to the northeast and from the mainstream to the interior of the bays. Stratification is significantly weaker when we move to the northeast, due to erosion of the summer thermocline from shear and mixing developed earlier the southwest. Maximum diapycnal diffusivity values change from $\log_{10} k_p = -2.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ at the Flandes section to $\log_{10} k_p = -3.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ at the Charlotte section, implying well-mixed waters in the northern part of the GS. The high stability levels of the waters inside each bay combined with low values of k_p , may influence the amount of sea

CONCLUSIONES

Por primera vez, se cuantificó con éxito un mapa de difusividad diapícnal de verano en las principales bahías del Estrecho de Gerlache. Los perfiles de mezcla y difusividad diapícnal cuantificados con los sensores de cizallamiento VMP son consistentes con la variación de las propiedades internas del agua medidas por los sensores de temperatura y salinidad en la vertiente principal de Gerlache desde el suroeste hacia el noreste y desde la corriente principal hasta el interior de las bahías. La estratificación es significativamente más débil cuando nos movemos hacia el noreste, debido a la erosión de la termoclina de verano por el cizallamiento y la mezcla desarrollada antes en el suroeste. Los valores máximos de difusividad diapícnal cambian de $\log_{10} k_p = -2.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en la sección de Flandes para $\log_{10} k_p = -3.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en la sección de Charlotte, lo que implica aguas bien mezcladas en la parte norte del GS. Los altos niveles de estabilidad de las aguas dentro de cada bahía combinados con bajos valores de k_p , puede influir en la cantidad de hielo marino producido en cada bahía. Los valores de k_p muestran que una gran cantidad de energía está potencialmente disponible para producir mezclas en la parte norte donde entra el WSDW, y aguas poco profundas en la parte sur del GS. Este resultado debería motivar más estudios para identificar los diferentes mecanismos de mezcla que pueden impactar los flujos de propiedades y nutrientes del uCDW al AASW, afectando los sistemas físicos, biológicos y químicos. Para identificar los procesos de mezcla predominantes que se originan en la zona, desplegaremos un ADCP paralelo para medir las velocidades actuales en una futura expedición.

Aquí, hemos identificado un patrón espacial que relaciona la intrusión de uCDW con el agua residente en las bahías. Esta interacción produce una variedad de aguas bien mezcladas en las bahías del estrecho de Gerlache. Este patrón coincide con la ubicación de los puntos calientes de mayores niveles de mezcla turbulenta y la variabilidad de las propiedades del agua en toda la columna de agua en Gerlache. Los procesos de entrelazado pueden estar presentes en la entrada de cada bahía. Otra consideración es qué tan rápido (espacialmente) podría cambiar la temperatura del AASW. Las bajas temperaturas en la ubicación de producción primaria son una condición para capturar el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, condiciones que observamos en Bahía Flandes pero no en Charlotte. Estos procesos necesitan más investigación en el contexto del cambio climático, que se asemeja a variaciones

ice produced in each bay. These k_p values show that a high amount of energy is potentially available to produce mixing in the northern part where the WSDW enters, and shallow waters at the southern part of the GS. This result should motivate further studies to identify the different mixing mechanisms that can impact the fluxes of properties and nutrients from the UCDW into the AASW, affecting the physical, biological, and chemical systems. To identify the predominant mixing processes that originate in the area, we will deploy a parallel ADCP to measure the current velocities in a future expedition.

Here, we have identified a spatial pattern that relates the intrusion of UCDW to the resident water in the bays. This interaction produces a range of well-mixed waters in the Gerlache Strait Bays. This pattern matches the location of the hot spots of higher mixing turbulence levels and the variability of water properties throughout the Gerlache water column. Interleaving processes may be present at the entrance of each bay. Another consideration is how fast (spatially) the AASW temperature might change. Low temperatures in primary production location is a condition to capture atmospheric carbon dioxide (CO_2), conditions we observed in Flandes Bay but not Charlotte Bay. These processes need further research in the context of climate change, which is likely to water mass variations that may supply energy (heat) that contributes to the cycle of glacier melting in the area and oceanic sequestration zones for CO_2 . In further work, we will quantify the production, incidence, and dissipation of internal waves and tides in the area.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Center for global Sea Level Change (CSLC) of New York University Abu Dhabi (NYUAD) Research Institute (G1204) in the UAE, and the Antarctic Colombian Program (PAC). Data collected during the fifth Antarctic Colombian Expedition 2018-2019. Logistical support for this project in the Antarctic was provided by the ARC 20 de Julio through the Colombian Navy and the CCO. We thank Clare Eayrs and all colleagues at the CSLC for critical review and support

de la masa de agua que pueden suministrar energía (calor) que contribuye al ciclo de derretimiento de los glaciares en el área y las zonas de secuestro oceánico de CO₂. En un trabajo posterior, cuantificaremos la producción, incidencia y disipación de olas y mareas internas en el área.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Centro para el Cambio Global del Nivel del Mar (CSLC) del Instituto de Investigación de la Universidad de Nueva York Abu Dhabi (NYUAD) (G1204) en los EAU, y el Programa Antártico Colombiano (PAC). Datos recopilados durante la quinta Expedición Antártica Colombiana 2018-2019. El apoyo logístico para este proyecto en la Antártida fue proporcionado por el ARC 20 de Julio a través de la Armada de Colombia y la CCO. Agradecemos a Clare Eayrs y a todos los colegas del CSLC por la revisión crítica y el apoyo.

BIBLIOGRAFIA / LITERATURE CITED

- Cook, A.J., D.G. Vaughan, A.J. Luckman and T. Murray. 2014. A new Antarctic Peninsula glacier basin inventory and observed area changes since the 1940s. *Ant. Sci.*, 26(6): 614 – 624.
- Kelley, D. E., H.J.S. Fernando, A.E. Gargett, J. Tanny and E. Özsoy. 2003. The diffusive regime of double-diffusive convection. *Progr. Oceanogr.*, 56(3 - 4): 461 – 481. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00026-0.
- Kolmogorov, A. N. 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proc. R. Soc. Lond.*, 434: 9 - 13.
- Lencina-Ávila J., C. Goyet, R. Kerr Rodrigo, I. Orselli, M. Mata and F. Touratier. 2018. Past and future evolution of the marine carbonate system in a coastal zone of the Northern Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Res. II*, 149: 193 - 205. DOI:10.1016/J.DRS2.2017.10.018.
- McDougall, T.J., S.A. Thorpe and C.H. Gibson. 1988. Smallscale turbulence and mixing in the ocean: 3-9. In: Nihoul, J.C.J. and B.M. Jamart (Eds.). *Small-scale turbulence and mixing in the ocean*. Elsevier, Amsterdam.
- Masson, D. 2002. Deepwater renewal in the Strait of Georgia. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 54: 115 - 126.
- Nasmyth, P. W. 1970. *Oceanic turbulence*. Univ. British Columbia. 71 p. doi: 10.14288/1.0084817.
- Nikurashin, M. and R. Ferrari. 2011. Global energy conversion rate from geostrophic flows into internal lee waves in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L08610. doi: 10.1029/2011GL046576.
- Oakey, N. S. 1982. Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, 12: 256 – 271. DOI: 10.1175/1520-0485.
- Ross, T. and A. Lavery. 2010. Acoustic detection of oceanic double-diffusive convection: a feasibility study. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 27(3): 580 - 593.
- Savidge, D. K. and J.A. Amft. 2009. Circulation in the West Antarctica Peninsula derived from 6 years of shipboard ADCP transects. *Deep-Sea Res. I*, 56: 1633 - 1655.
- Sheen, K. L., J. Brearley, D. N. Garabato, D. Smeed, S. Waterman, J. Ledwell, M. Meredith, L. St. Laurent, A. Thurnherr, J. Toole and A. Watson. 2013. Rates and mechanisms of turbulent dissipation and mixing in the Southern Ocean: Results from the Diapycnal and Isopycnal Mixing Experiment in the Southern Ocean (DIMES). *J. Geophys. Res. Oc.*, 118: 2774 – 2792. DOI: 10.1002/jgrc.2021.
- Smith, D.A., E.E. Hofmann, J.M. Klinck and C.M. Lascara. 1999. Hydrography and circulation of the West Antarctic Peninsula continental shelf. *Deep-Sea Res. I*, 46: 925 - 949.



Stewart, R. 2008. Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography. Texas A&M Univ. 345 p.

Thorpe, S. A. 2005. The turbulent ocean. Cambridge Univ., Cambridge. 439 p.

Torres, R., A. Caicedo and J. Iriarte. 2020. Hydrographic conditions during two austral summer situations (2015 and 2017) in the Gerlache and Bismarck straits, northern Antarctic Peninsula. Deep-Sea Res. I, doi: 10.1056/j.dsr.2020.103278

Valkonen, T., T. Vihma and B. Doble. 2008. Mesoscale modeling of the atmosphere over Antarctic sea ice: A late autumn case study. Mon. Weather Rev., 136: 1457 – 1474.

Venables, E., K. Nichols, F. Wolk, K. Makinson and P. Anker. 2014. Measuring turbulent dissipation rates beneath an Antarctic ice shelf. Mar. Tech. Soc. J., 48(5).

RECIBIDO/RECEIVED: 05/09/2019

ACEPTADO/ACCEPTED: 17/06/2020

MATERIAL SUPLEMENTARIO / SUPPLEMENTARY MATERIAL

Tabla 1. Ubicación de las estaciones oceanográficas donde se desplegó el VMP-250.

Table 1. Location of the oceanographic stations where the VMP-250 was deployed.

VMP-250			
	Estación / Station #	Latitud / Latitude (°)	Longitud / Longitude (°)
Bahía Flandes / Flandes Bay	1	-65.0721	-63.1515
	2	-65.0506	-63.1986
	3	-65.0176	-63.2646
	4	-64.9862	-63.3494
	5	-64.9842	-63.4518
	6	-64.9678	-63.5525
	7	-64.9365	-63.6330
	8	-64.9070	-63.7051
	9	-64.9487	-63.5964
	10	-64.9896	-63.5229
Bahía Andvord / Andvord Bay	11	-64.8351	-62.5484
	12	-64.8348	-62.5637
	13	-64.8140	-62.6169
	14	-64.7982	-62.6498
	15	-64.7636	-62.7181
	16	-64.7353	-62.7831
	17	-64.7215	-62.8092
	18	-64.6794	-62.8432
	19	-64.6813	-62.8973
	20	-64.6501	-62.9600
Bahía Charlotte / Charlotte Bay	24	-64.4348	-61.7934
	25	-64.3943	-61.8276
	26	-64.3486	-61.8749
	27	-64.3017	-61.8819
	28	-64.2180	-61.8859
	29	-64.1638	-61.8603

