



Descripción general de algunas variables meteo-marinas de aguas superficiales adyacentes al archipiélago de Palmer, península Antártica, durante 1979-2018 con base en datos Era5

General description of some meteo-marine variables of surface waters adjacent to the Palmer Archipelago, Antarctic Peninsula, during 1979-2018 based on Era5 data

Margorie Alexandra Hernández Duarte^{1*}, Nancy Liliana Villegas Bolaños² y Ana Elena Concha Perdomo³

0000-0001-5460-0720

0000-0003-3932-2106

0000-0001-6766-2111

1. Departamento de Geociencias, Grupo de Estudios Antárticos (GEAA). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. mahernandezd@unal.edu.co*
2. Departamento de Geociencias, Grupo de Investigación en Oceanología CENIT. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. nlvillegasb@unal.edu.co
3. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. aeconchap@unal.edu.co

* Autor de correspondencia

RESUMEN

Se presenta una descripción espacial y temporal de parámetros meteo-marinos del período 1979-2018 de la región marina circundante al archipiélago de Palmer, localizada al oeste de la península Antártica (OPA). La información utilizada fue extraída del reanálisis ERA5. La Temperatura del aire (Ta), Precipitación total (Pr) y Temperatura Superficial del Mar (TSM) mostraron un incremento general en los últimos 40 años en la región de estudio. Los mayores valores de incremento de Ta, Pr y TSM se registraron al norte del estrecho de Gerlache, seguido por el estrecho de Bismarck. Se evidenció que la Cobertura de Hielo Marino (CHM) ha disminuido en mayor parte al norte del archipiélago de Palmer. Se identificó la existencia de una diferenciación local de las condiciones meteo-marinas alrededor del archipiélago. La climatología de cinco puntos de referencia para la región mostró diferencias más visibles durante el invierno austral en la Ta y CHM, durante el verano austral en la TSM y un comportamiento bimodal en la Pr. La tasa de cambio durante el período 1979-2018 para la Ta fue de 0,011 °C/año, para la Pr fue de 0,008 mm/año, para la TSM fue de 0,004 °C/año y para la CHM fue de -0,003 fracción/año.

PALABRAS CLAVE: Climatología, Tendencias, Cobertura de hielo marino, Estrecho de Gerlache, Estrecho de Bismarck.

ABSTRACT

A spatial and temporal description of meteo-marine parameters for 1979-2018 period of the marine region surrounding the Palmer Archipelago, located West of the Antarctic Peninsula (WAP), is presented. The used information was extracted from the ERA5 reanalysis. Air Temperature (Ta), Total Precipitation (TP) and Sea Surface Temperature (SST) showed a general increase over the last 40 years in the study region. The highest increase of Ta, TP and SST values were recorded north of Gerlache Strait, followed by Bismarck Strait. It was evidenced that Sea Ice Cover (SIC) has decreased mostly north of Palmer Archipelago. The existence of a local differentiation of meteo-marine conditions around the Palmer Archipelago was identified. The climatology of five reference points in the region showed more visible differences during the austral winter in Ta and SIC, these were appreciated during the austral summer in SST and a bimodal behavior was recorded in Pr. The rate of change during the 1979-2018 period for Ta was 0.011 °C/year, for Pr it was 0.008 mm/year, for SST it was 0.004 °C/year and for SIC it was -0.003 fraction/year.

KEYWORDS: Climatology, Trends, Sea ice cover, Gerlache Strait, Bismarck Strait.

INTRODUCCIÓN

El continente antártico ha experimentado cambios de temperatura no homogéneos durante los últimos 30 a 50 años, con calentamiento en algunos sectores de la Antártida occidental y ningún cambio general significativo en la Antártida oriental (IPCC, 2019). La península Antártica ha presentado un calentamiento regional a una tasa que excede las observadas en el resto del mundo (Deppeler y Davidson, 2017; Meredith *et al.*, 2017). Concretamente, al suroeste costero de la isla Anvers, que forma parte del archipiélago de Palmer localizado en el occidente de la península Antártica, en años recientes se ha registrado una reducción de la extensión y persistencia del hielo marino en la zona de Puerto Arthur (Fraser y Hoffman, 2003; Atkinson *et al.*, 2004). Estas variaciones en los factores climáticos, generan la disminución de la abundancia del krill antártico (*Euphausia superba*) de gran importancia en la región (Bernard *et al.*, 2017). Los cambios experimentados también han causado la disminución de poblaciones locales de pingüinos Adelia (*Pygoscelis adeliae*) (Cimino *et al.*, 2019) y lobos finos antárticos (*Arctocephalus gazella*), así como la redistribución de la vegetación y afectación en organismos bentónicos (Cárdenas *et al.*, 2018a).

Diversos autores han realizado investigaciones encaminadas a identificar el impacto de la variación del clima en los ecosistemas del archipiélago de Palmer. La punta Biscoe, por ejemplo, es referencia en estudios paleoecológicos desarrollados con las colonias de pingüinos Adelia, que pueden ser afectados por el calentamiento global (Emslie, 2001; Gorman *et al.*, 2017; Cimino *et al.*, 2019). Park *et al.* (2007) y Day *et al.* (2009) han evaluado la influencia del aumento de la temperatura y de las precipitaciones en el ecosistema analizando los flujos del carbono y el nitrógeno. La bahía Sur, situada en la isla Doumer del archipiélago de Palmer, ha sido base de estudios sobre flora y fauna bentónica (Cárdenas *et al.*, 2016, 2018b; Rovelli *et al.*, 2019), así como de oceanografía y meteorología (Cárdenas *et al.*, 2018a; Villegas *et al.*, 2018) constituyéndose en un diagnóstico de las condiciones actuales y sus variaciones locales. Siendo el archipiélago de Palmer una región de interés científico por la riqueza y variedad de sus ecosistemas, y teniendo en cuenta los importantes cambios en el clima en el sector oeste de la península Antártica (OPA) registrados a causa del calentamiento global (Kerr *et al.*, 2018), así como las diferencias regionales y locales observadas al sur del archipiélago de Palmer, el presente artículo tiene como objetivo describir el comportamiento climatológico de algunos parámetros meteo-marinos de aguas circundantes al archipiélago y su tendencia durante el período 1979-2018. La

INTRODUCTION

The Antarctic continent has gone through non-homogenous temperature changes in the last 30 to 50 years, with warming in some areas of Western Antarctica and no significant general change in eastern Antarctica (IPCC, 2019). The Antarctic peninsula has undergone regional warming at a rate exceeding those observed in the rest of the world (Deppeler and Davidson, 2017; Meredith *et al.*, 2017). Particularly in the southwestern coastal region of the Anvers island, which is part of the Palmer Archipelago located West of the Antarctic peninsula, a decrease has been recorded in the extension and persistence of sea ice in Arthur Harbor in recent years (Fraser and Hoffman, 2003; Atkinson *et al.*, 2004). These variations in climatic factors cause a decrease in the abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*), which is of great importance in the region (Bernard *et al.*, 2017). These changes have also caused a decrease in the local populations of Adelia penguins (*Pygoscelis adeliae*) (Cimino *et al.*, 2019) and Antarctic fur seals (*Arctocephalus gazella*), as well as the redistribution of vegetation and impacts on benthic organisms (Cárdenas *et al.*, 2018a).

Several authors have conducted research oriented towards identifying the impact of climate variations in the ecosystems of the Palmer archipelago. Biscoe Point, for example, is referenced in paleoecological studies conducted on Adelia penguin colonies, which can be affected by global warming (Emslie, 2001; Gorman *et al.*, 2017; Cimino *et al.*, 2019). Park *et al.* (2007) and Day *et al.* (2009) have evaluated the influence of the increase in temperature and precipitations in the ecosystem by analyzing carbon and nitrogen fluxes. The South Bay, located in the Doumer Island of the Palmer archipelago, has been the focus of studies on benthic flora and fauna (Cárdenas *et al.*, 2016, 2018b; Rovelli *et al.*, 2019), as well as on oceanography and meteorology (Cárdenas *et al.*, 2018a; Villegas *et al.*, 2018), thus constituting a diagnostic of current conditions and their local variations. Given that the Palmer archipelago is a region of scientific interest due to the richness and variety of its ecosystems, and considering the significant climate changes in the western sector of the Antarctic peninsula (WAP) caused by global warming (Kerr *et al.*, 2018), as well as the regional and local differences observed in the South of Palmer archipelago, the objective of this article is to describe the climatological behavior of some meteo-marine parameters in the surrounding waters of the archipelago and their tendency during the period between

descripción de variables tales como la Temperatura del aire (Ta), la Precipitación total (Pr), la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y la Cobertura de Hielo Marino (CHM) en los últimos 40 años, permitirá tener un panorama de los posibles cambios ocurridos en estas características que servirán como base para futuros trabajos de variabilidad y cambio climático en sectores marinos que convergen en el archipiélago de Palmer. El presente trabajo, junto con los estudios adelantados bajo la Agenda Científica de Colombia en la Antártica 2014-2035, contribuye al conocimiento del OPA, enmarcándose en las prioridades de investigación de la ciencia Antártica descritas por Mahlon *et al.* (2014).

ÁREA DE ESTUDIO

La región de interés para la descripción espacial de las variables meteo-marinas, comprende las aguas enmarcadas en las coordenadas 61-66° S y 61-70° W (Figura 1). Para la descripción temporal, se seleccionaron cinco puntos de referencia que representen geográficamente a las aguas cercanas al archipiélago de Palmer: 1) aguas en el estrecho de Bismarck (64° 54' S y 64° W); 2) aguas en el sector suroeste en el océano del Sur (64° 54' S y 69° W); 3) aguas en el sector noroeste en el océano del Sur (62° S y 69° W); 4) aguas en el pasaje de Drake (62° S y 62° W); y 5) aguas en el estrecho de Gerlache (64° 18' S y 61° 48' W). El archipiélago de Palmer es un conjunto de islas del OPA situadas entre 64°15' S y 62° 50' W. Al occidente del archipiélago se encuentra el océano del Sur; al oriente el estrecho de Gerlache separando al archipiélago de la costa Danco; al sur se encuentra el estrecho de Bismarck; al norte el estrecho de Bransfield, conformado por aguas del estrecho de Gerlache, del mar de Bellingshausen y del mar de Weddell (Vázquez y Tenorio, 2016). El estrecho de Gerlache mide aproximadamente 190 km de largo, 8 km de ancho y su profundidad varía entre 220 m en el sector

1979 and 2018. The description of variables such as Air Temperature (Ta), Total Precipitation (TP), Sea Surface Temperature (SST), and Sea Ice Coverage (SIC) in the last 40 years will allow having an overview of the possible changes in these characteristics, which will serve as the basis for future research on variability and climate change in marine sectors converging in the Palmer archipelago. This work, together with the studies carried out under the Colombian Scientific Agenda for the Antarctica 2014-2035, contributes to the knowledge of the WAP within the framework of the scientific research priorities for the Antarctica described by Mahlon *et al.* (2014).

STUDY AREA

The region of interest for the spatial description of the meteo-marine variables comprises the waters within coordinates 61-66° S and 61-70° W (Figure 1). For the temporal description, five reference points were selected which geographically represent the waters in the vicinity of Palmer archipelago: 1) waters in the Bismarck strait, 64° 54' S and 64° W; 2) waters in the southwestern sector of the Southern Ocean, 64° 54' S and 69° W; 3) waters in the northwestern sector of the Southern Ocean, 62° S y 69° W; 4) waters at Drake Passage, 62° S y 62° W; and 5) waters in the Gerlache strait, 64° 18' S y 61° 48' W. The Palmer archipelago is a group of islands in the WAP, located between 64°15' S and 62° 50' W. To the west of the archipelago is the Southern Ocean; to the east is the Gerlache strait, which separates the archipelago of Danco coast; to the south is the Bismarck strait; and to the north is the Bransfield strait, formed by waters of the Gerlache strait, the Bellingshausen Sea, and the Weddell Sea (Vázquez and Tenorio, 2016). The Gerlache strait is approximately 190 km long, 8 km wide, and its depth varies between 220 m in the western

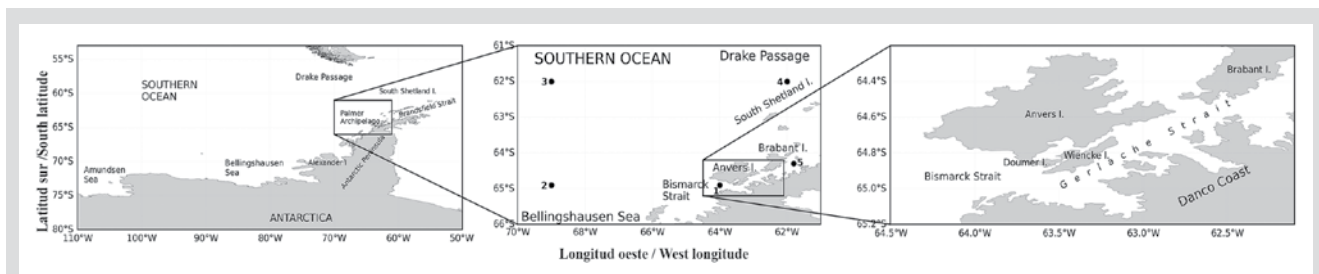


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de los puntos de referencia. 1) Aguas en el estrecho de Bismarck (64° 54' S y 64° W). 2) Aguas en el sector suroeste en el océano del Sur (64° 54' S y 69° W). 3) Aguas en el sector noroeste en el océano del Sur 62° S y 69° W. 4) Aguas en el pasaje de Drake 62° S y 62° W. 5) Aguas en el estrecho de Gerlache 64° 18' S y 61° 48' W.

Figure 1. Location of the study area and the reference points. 1) Waters in the Bismarck strait, (64° 54' S and 64° W). 2) Waters in the southwestern sector of the Southern Ocean, (64° 54' S and 69° W). 3) Waters in the northwestern sector of the Southern Ocean, (62° S and 69° W). 4) Waters at Drake Passage (62° S and 62° W). 5) Waters in the Gerlache strait, (64° 18' S and 61° 48' W).

occidental y 1300 m en el oriental (Canals *et al.*, 1998). Entre las islas que conforman al archipiélago de Palmer están las montañosas Anvers y Brabante (Griffith, 1988; Barcena *et al.*, 2005) situadas al oeste del estrecho de Gerlache y las islas Wiencke y Doumer al sur del estrecho de Gerlache, estando la última al norte del estrecho de Bismarck.

El clima de la región está influenciado por las elevaciones topográficas que actúan como barrera ante la circulación troposférica de dirección occidente-oriente, resultando un tipo de clima marítimo en el occidente y más seco y frío en el oriente. King *et al.* (2003) describen que el OPA está influenciado por las bajas presiones del mar de Amundsen-Bellingshausen (ABSL, por sus siglas en inglés), y por un flujo noroccidental que trae masas de aire más cálidas desde las latitudes medias a través de sistemas de escala sinóptica, obteniendo un ciclo anual de T_a similar al de regiones marítimas. El archipiélago de Palmer es más frío que las islas Shetland del Sur, es la zona más húmeda del Antártico, altamente glaciada, con glaciares conectados a tierra por debajo del nivel del mar. La costa Danco presenta un clima ligeramente más frío, y es el más seco en el área de estudio, con menos de la mitad de la Pr del archipiélago de Palmer pero también es marcadamente glaciada (Griffith y Anderson, 1989). Los sistemas de presión que se mueven a lo largo de la costa OPA desde el mar de Amundsen en sentido nororiente, llevan gran cantidad de humedad disponible para la precipitación, haciendo que ésta sea la parte más húmeda de la Antártida. La Pr anual promedio más alta en toda la Antártida ha sido registrada en la bahía Dallmann, localizada entre las islas Brabante y Anvers (Dewar, 1967). La lluvia y la llovizna son comunes, excepto durante los meses más fríos del invierno, pero la nieve y aguanieve son los principales componentes de la Pr anual, la cual está relacionada con el paso de sistemas de tormentas ciclónicas desde el mar de Bellingshausen, aparentemente cada tres semanas durante todo el año (Rundle, 1971). Al cesar las tormentas, inician los fuertes vientos del oriente y oriente-nororiente, trayendo grandes cantidades de Pr. Los vientos catabáticos son violentos y también frecuentes en las bahías más grandes de la costa de Danco. Estos provocan la ruptura y dispersión de hielo marino e icebergs dentro de las bahías. Los icebergs se forman anualmente en el otoño austral, a finales de marzo o principios de abril, cuando por ser un hielo aún delgado y débilmente anclado a la orilla, es susceptible a la destrucción por tormenta o viento catabático (Krebs, 1983). La circulación en la región supone un fuerte enlace entre los estrechos y mares adyacentes. Desde el estrecho de Bismarck, dominado por el Circumpolar Deep Water (CDW) modificado (Torres *et al.*, 2020), las aguas se introducen al estrecho de Gerlache. Seguidamente, del

sector and 1300 m in the eastern one (Canals *et al.*, 1998). Among the islands that constitute the Palmer archipelago are the mountainous Anvers and Brabante (Griffith, 1988; Barcena *et al.*, 2005), located west of the Gerlache strait and the Wiencke and Doumer islands south of the Gerlache strait, with Doumer island situated north of the Bismarck strait.

The region's climate is influenced by topographic elevations that act as a barrier against west-east tropospheric circulation, resulting in a maritime type of climate in the west and colder and drier one in the east. King *et al.* (2003) state that the WAP is influenced by the Amundsen-Bellingshausen Sea low pressures (ABSL) and by a northwestern flow that brings warmer air masses from the mid-latitudes through synoptic scale systems, obtaining an annual T_a cycle similar to that of maritime regions. The Palmer archipelago is colder than the South Shetland islands. It is the most humid area of the Antarctic, highly glaciated, with glaciers connected to land underneath sea level. Danco coast has a slightly colder weather, and it is the driest in the study area, with less than half the TP of the Palmer archipelago, but also remarkably glacial (Griffith and Anderson, 1989). The pressure systems moving northeast along the WAP coast from the Amundsen Sea carry a high humidity available for precipitation, thus making it the most humid part of Antarctica. The highest average annual TP in the whole Antarctica has been recorded at Dallmann bay, located between the Brabante and Anver islands (Dewar, 1967). Rainfalls and drizzles are common, except during the coldest months of winter, but snow and sleet are the main components of the annual TP, which is related to the passage of cyclonic storms from the Bellingshausen Sea, apparently every three weeks during the whole year (Rundle, 1967). When the storms cease, strong winds from the east and east-northeast begin, bringing large amounts of TP. Katabatic winds are violent and also frequent in the largest bays of Danco coast. These cause the rupture and dispersion of sea ice and icebergs within the bays. Icebergs are formed annually in the southern autumn, at the end of March or beginning of April, when, since they are ice that is still thin and loosely anchored to the shore, they are susceptible to being destroyed by storms or katabatic winds (Krebs, 1983). Circulation in the region suggests a strong connection between the straits and their neighboring seas. From the Bismarck strait, dominated by the modified Circumpolar Deep Water (CDW) (Torres *et al.*, 2020), the waters enter the Gerlache strait. Next, from the Gerlache strait, the waters head north to the Bransfield strait, where

estrecho de Gerlache las aguas se dirigen al norte, al estrecho de Bransfield, donde convergen con el agua proveniente del mar de Weddell (Gordon y Nowlin, 1978). En el occidente de Gerlache, la débil corriente superficial de Bellingshausen fluye al nororiente (Mandelli y Burkholder, 1966). De acuerdo con Amos *et al.* (1990) y Niiler e Illeman (1990), un flujo superficial de aguas cercanas a la costa de la isla Brabante se dirige hacia el norte y entra al suroccidente del estrecho de Bransfield. Sin embargo, la circulación en esta región es compleja y probablemente tiene variaciones estacionales, así como se ha visto en el flujo superficial occidental del sector (Stein, 1982), y el flujo del mar de Weddell hacia el estrecho de Bransfield (Capella *et al.*, 1992; Hofmann *et al.*, 1992). La columna de agua típica del estrecho de Gerlache consiste en una capa superior de Agua Transicional del mar de Bellingshausen (TBW), una capa en el fondo de Agua Transicional del mar de Weddell (TWW) e intrusiones intermedias tanto del occidente como del oriente del CDW. El agua TBW en el estrecho de Gerlache es más fría que en el de Bransfield debido a la influencia de los aportes de agua dulce de los glaciares locales (García *et al.*, 2002). El sistema de agua dulce resultante de la interacción aire-hielo marino influye en las propiedades del agua en la capa de mezcla superficial, repercutiendo en la estratificación del océano superior y los ecosistemas de la región (Meredith *et al.*, 2010).

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Variables meteo-marinas alrededor del archipiélago de Palmer

Los campos y series mensuales de Temperatura del aire (T_a , °C), Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C), Velocidad del Viento (V_v , m/s), Dirección del Viento (D_v , grados), Precipitación Total (Pr, mm) y fracción de Cobertura de Hielo Marino (CHM, 0:1) para 1979-2018, fueron extraídos de la quinta generación de reanálisis ERA-Interim (ERA5) (Hersbach *et al.*, 2019) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5 es el último reanálisis climático producido por ECMWF, que proporciona datos de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. ERA5 incluye información sobre incertidumbres para todas las variables en resoluciones espaciales y temporales reducidas, que son accesibles libremente bajo la License to Use Copernicus Products (v 1.2) desde el Climate Data Store (CDS) a través del Copernicus Climate Change Service (C3S, 2017). Varios estudios han realizado intercomparaciones de los distintos conjuntos de datos de reanálisis y han llegado a la conclusión de que los datos ERA-Interim son los mejores para

they converge with the water from the Weddell Sea (Gordon and Nowlin, 1978). In the western Gerlache, the weak Bellingshausen surface current flows northeast (Mandelli and Burkholder, 1966). According to Amos *et al.* (1990) and Niiler and Illeman (1990), a superficial flow of waters near the coast of Brabante island heads north and enters the Bransfield strait by the southwest. However, circulation in this region is complex and probably has seasonal variations, as has been seen in the surface flow of the area (Stein, 1982) and the flow of the Weddell Sea towards the Bransfield strait (Capella *et al.*, 1992, Hofmann *et al.*, 1992). The typical water column of the Gerlache strait consists of an upper layer of Transitional Bellingshausen Water (TBW), a bottom layer of Transitional Weddell Water (TWW), and intermediate intrusions from both the west and the east of the CDW. TBW in the Gerlache strait is colder than in the Bransfield strait due to the freshwater contributions of the local glaciers (García *et al.*, 2002). The freshwater system resulting from the air-sea ice interaction influences the water properties on the surface mixed layer, affecting the stratification of the upper ocean and the region's ecosystems (Meredith *et al.*, 2010).

MATERIALS AND METHODOLOGY

Meteo-marine variables around the Palmer archipelago

The fields and monthly series of Air Temperature (T_a , °C), Sea Surface Temperature (SST, °C), Wind Speed (WS, m/s), Wind Direction (WD, degrees), Total precipitation (TP, mm), and Sea Ice Coverage fraction (SIC, 0;1) for 1979-2018 were extracted from the fifth ERA-Interim (ERA5) reanalysis generation (Hersbach *et al.*, 2019) of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5 is the last climate reanalysis produced by ECMWF, which provides data for a large number of atmospheric, terrestrial and oceanic climatic variables. ERA5 includes information on uncertainties for all variables in reduced spatial and temporal resolutions, which are open-access under the License to Use Copernicus Products (v 1.2) from the Climate Data Store (CDS) through the Copernicus Climate Change Service (C3S, 2017). Several studies have performed intercomparisons of the different reanalysis data sets and have arrived to the conclusion that ERA-Interim data are the best at representing the recent Antarctic climate (Turner *et al.*, 2019). Giusti (2021) describes ERA5 in detail, disclosing its coverage and quality of information. The variables extracted from ERA5 for the five points in the waters neighboring Palmer

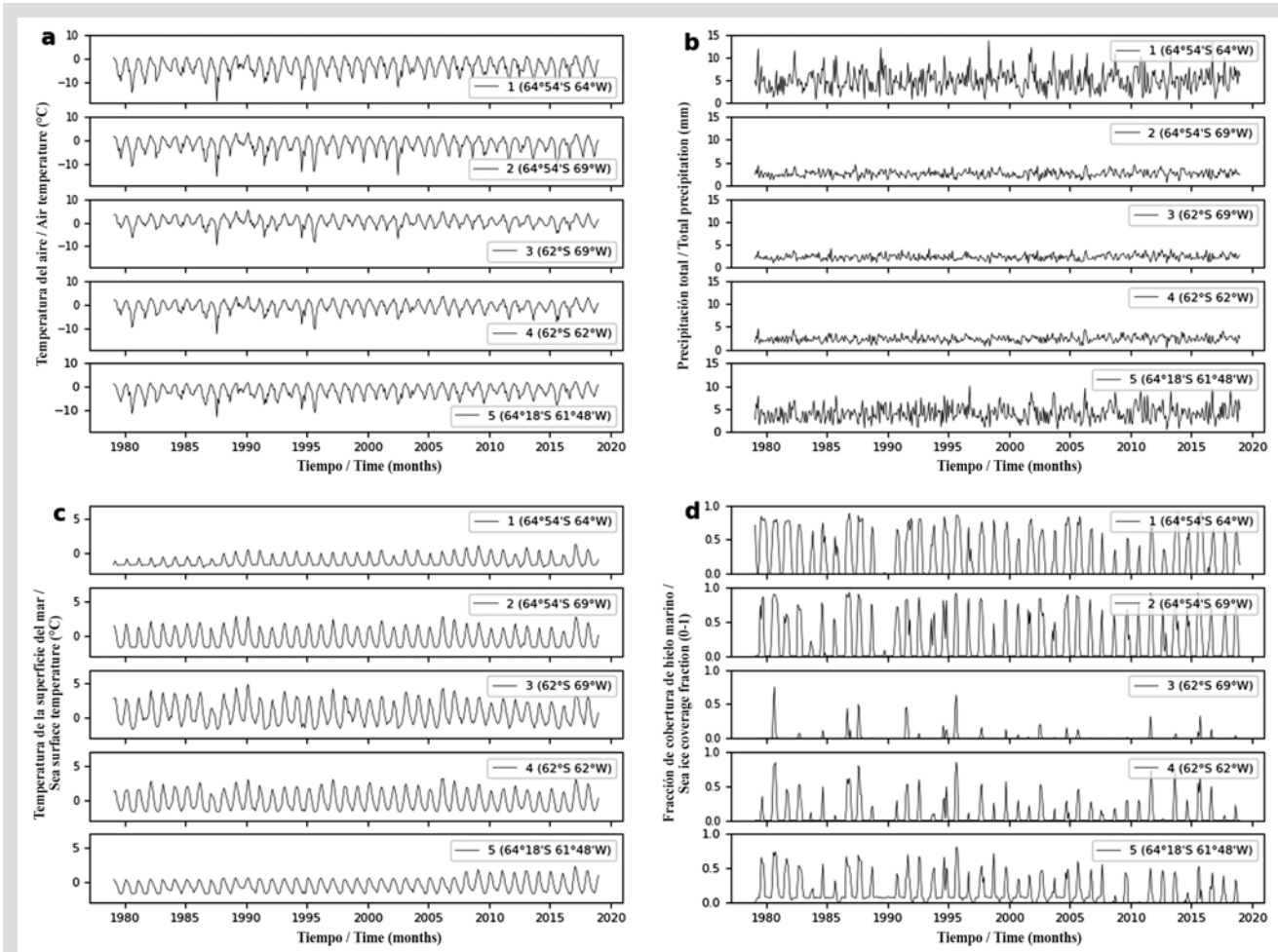


Figura 2. Series de tiempo mensuales 1979–2018 extraídas del ERA5 para cinco puntos en aguas alrededor del archipiélago de Palmer. a) Temperatura del aire (T_a , °C). b) Precipitación Total (TP, mm). c) Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C). d) Cobertura de Hielo Marino (CHM, 0:1).

Figure 2. Monthly time series 1979–2018 extracted from ERA5 for five points in the waters around the Palmer archipelago. a) Air temperature (T_a , °C). b) Total Precipitation (TP, mm). c) Sea Surface Temperature (SST, °C). d) Sea Ice Coverage (SIC, 0:1).

representar el clima antártico reciente (Turner *et al.*, 2019). En Giusti (2021) se describe detalladamente a ERA5, dando a conocer la cobertura y calidad de su información. Las variables extraídas del ERA5 para los 5 puntos en las aguas adyacentes al archipiélago de Palmer (Figura 1) son series mensuales desde 1979 hasta el 2018 (Figura 2).

Para la descripción de su comportamiento anual, se calculó la climatología base 1979–2018. Para este mismo período, se eliminó la estacionalidad de las series y se calculó tanto la tendencia lineal multianual como las tendencias decadales (con nivel de confianza de 95%) en los períodos 1981–1990, 1991–2000 y 2001–2010. La visualización espacial de los campos de las variables extraídas del reanálisis ERA5 se realizó con la aplicación del método de interpolación kriging (Paulson y Ragkousis, 2015), utilizando el variograma Gaussiano, con un rango de 0,3 y anisotropía 0,2, obteniendo

archipiélago (Figure 1) are monthly series from 1979 until 2018 (Figure 2).

To describe the annual behavior, the climatology of the 1979–2018 period was calculated. For the same period, the seasonality of the series was eliminated, and both the multiannual linear trend and the decadal trends (with 95% confidence level) were calculated for the 1981–1990, 1991–2000, and 2001–2010 periods. The horizontal spatial visualization of the variables extracted from ERA5 reanalysis was performed by applying the kriging interpolation method (Paulson and Ragkousis, 2015), using the Gaussian variogram with a 0.3 range and 0.2 anisotropy, obtaining a $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ grid. The multiyear annual average of the horizontal fields was calculated to review the current state of the meteo-marine conditions in the study region, and the difference between the fields of the last and first

una malla de $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$. Se calculó el promedio anual multianual de los campos horizontales para revisar el estado actual de las condiciones meteo-marinas en la región de estudio y se obtuvo la diferencia entre los campos del último y primer año de la ventana de análisis a fin de identificar espacialmente los sectores donde se registraron cambios en las variables durante 40 años. Los cálculos y gráficas se realizaron en Python versión 3.7 (Beazley y Van Rossum, 1999).

RESULTADOS

Promedio anual multianual y climatología de variables meteo-marinas

La distribución espacial del promedio anual multianual 1979-2018 de la Ta (Figura 3a) muestra isotermas latitudinales desde el sector noroccidental del área de estudio paralelas al archipiélago de Palmer hasta 64° S. Los valores altos de Ta ($1,59^{\circ}\text{C}$) se localizan en el sector marino noroeste y los bajos en el sector continental sureste sobre la península Antártica llamada Tierra de Graham ($-13,18^{\circ}\text{C}$). Al suroeste, cerca del mar de Bellingshausen, la Ta es de $-3,0^{\circ}\text{C}$ mostrando un fuerte gradiente longitudinal en el sur de la región. Alrededor de la isla Anvers, se ubican isotermas de $-5,0^{\circ}\text{C}$, y al norte de la isla Brabante se presentan Ta de $-3,0^{\circ}\text{C}$, evidenciando diferencias locales entre el norte ($64^{\circ} 20' \text{S}$) y sur (65°S) del archipiélago. También se aprecian diferencias entre el oeste (Ta promedio $-2,5^{\circ}\text{C}$) y el este (isotermas alrededor de $-7,0^{\circ}\text{C}$) del archipiélago. La distribución espacial de Ta es coherente con el desplazamiento de los vientos. En la Figura 3b, se aprecia al noroeste de la región de estudio, al viento de predominancia noroeste con una intensidad mayor a 9 m/s , que transporta masas de aire cálidas conservando su dirección hasta los 64° S. Allí, sobre el archipiélago de Palmer y el este de la región, se centra un núcleo de vientos de baja intensidad impidiendo que el aire cálido occidental se mezcle con el polar, manteniendo más frío a los sectores del este. A partir de 64° S, entre 64° y 70° W, la dirección del viento se torna sur, llevando masas de aire del noroeste hacia el mar de Bellingshausen con menores velocidades.

En la distribución de isolíneas de TSM (Figura 3c), como era de esperarse, se observa mayor homogeneidad en la región, dada la inercia de esta variable en comparación con la Ta. Se aprecia que los valores disminuyen desde el noroeste con $1,94^{\circ}\text{C}$, hacia el sureste, donde llega a $-1,58^{\circ}\text{C}$ en el estrecho de Gerlache y a $-1,82^{\circ}\text{C}$ al sur de la costa de Danco y la bahía Dallman. En el oeste y norte de la isla Brabante la TSM registrada es $-1,08^{\circ}\text{C}$, y al occidente y sur de la isla Anvers es $-0,98^{\circ}\text{C}$.

year of the analysis window was obtained in order to spatially identify the sectors where changes in the variables were recorded during these 40 years. The calculations and graphs were made on Python, version 3.7 (Beazley and Van Rossum, 1999).

RESULTS

Multi-year annual average and climatology of meteo-marine variables

The spatial distribution of the 1979-2018 multi-year annual average for Ta (Figure 3a) shows latitudinal isothermals from the northwestern sector of the study area, parallel to the Palmer archipelago up to 64° S. High Ta values (1.59°C) are located in the northwestern marine sector and the lower ones in the southwestern continental sector on the Antarctic peninsula called Graham Land (-13.18°C). To the southwest, near the Bellingshausen Sea, the Ta is -3.0°C , showing a strong longitudinal gradient in the South of this region. Around the Anvers island are isothermals of -5.0°C , and, north of the Brabante island, there is a Ta of -3.0°C , which constitutes evidence of local differences between the North ($64^{\circ} 20' \text{S}$) and the South (65°S) of the archipelago. Differences between the West (average Ta of -2.5°C) and the East (isothermals around -7.0°C) of the archipelago are also observed. The spatial distribution of Ta is coherent with wind displacement. In Figure 3b, to the northwest of the study region, a predominantly northwest wind is observed with an intensity greater than 9 m/s , which transports warm air masses, maintaining its direction up to 64° S. There, over the Palmer Archipelago and the East of the region, a nucleus of low intensity winds is located, preventing the warm western air from mixing with the polar, keeping the eastern sectors colder. Starting at 64° S, between 64° and 70° W, the wind turns southward, taking northwestern air masses to the Bellingshausen Sea at lower speeds.

In the SST isolines distribution (Figure 3c), as expected, a greater homogeneity is observed in the region, given the inertia of this variable in comparison with Ta. It is noted that values decrease from the northwest, with 1.94°C , towards the southeast, where they reach -1.58°C at the Gerlache strait and -1.82°C in the South of Danco coast and Dallmann bay. In the west and north of the Brabante island, the recorded SST is -1.08°C , and it is -0.98°C to the west and south of Anvers island.

Additionally, to corroborate these differences from a temporal perspective, the climatological behavior of Ta,

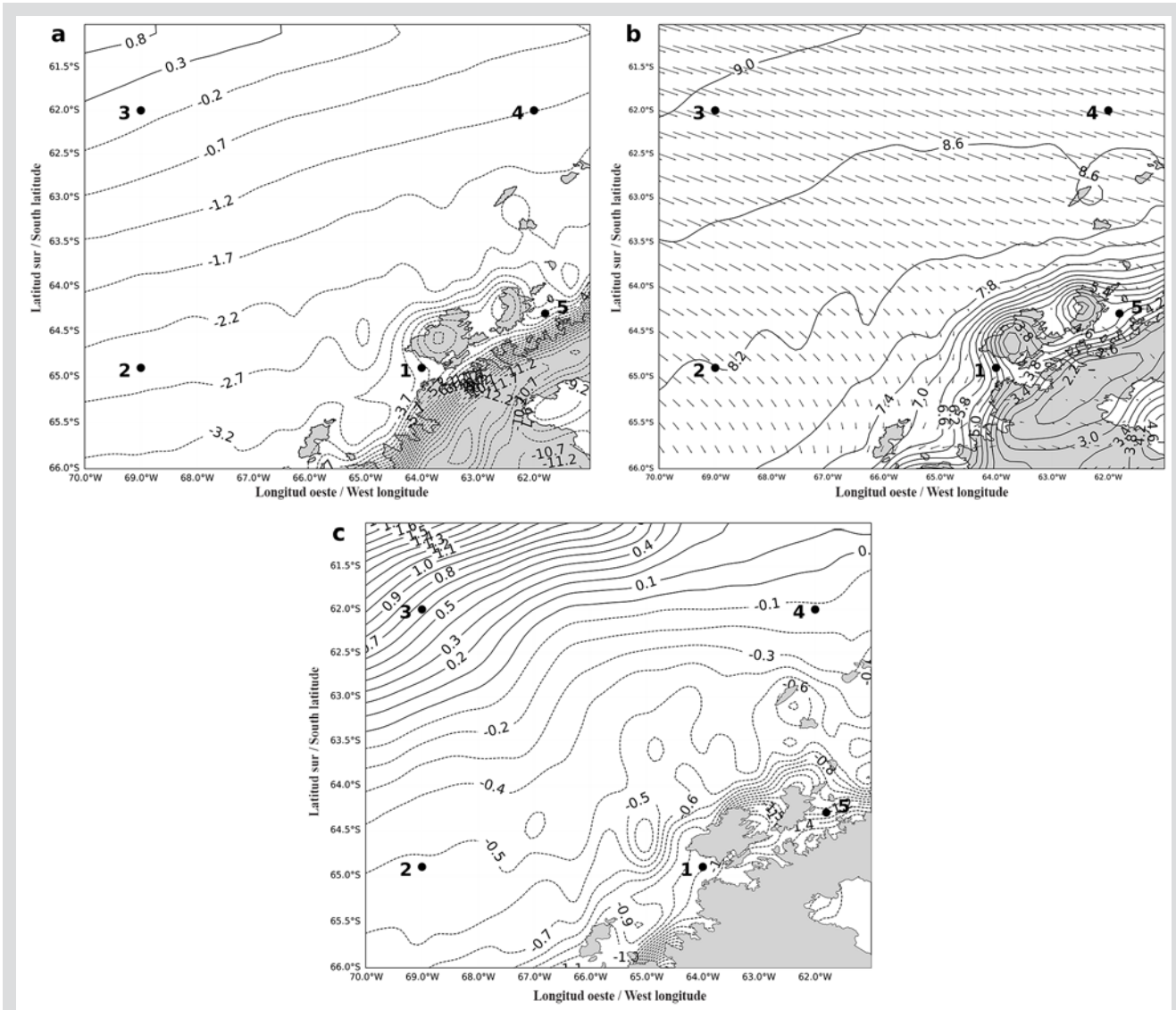


Figura 3. Promedio anual multianual 1979–2018 de T_a (°C), V_v (m/s) y TSM (°C) alrededor del archipiélago de Palmer. 1-5: puntos de referencia para descripción temporal de variables meteo-marinas en aguas adyacentes al archipiélago de Palmer. a) Temperatura del aire (T_a , °C). Intervalo isotermas 0,5°C. b) Viento (V_v , m/s). Intervalo isotacas 0,4 m/s. c) Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C). Intervalo isotermas 0,1°C.

Figure 3. 1970–2018 multi-year annual average of T_a (°C), WS (m/s), and SST (°C) around the Palmer Archipelago. 1-5: reference points for temporal description of meteo-marine variables in the waters neighboring the Palmer Archipelago. a) Air temperature (T_a , °C). Isotherm interval 0.5 °C. b) Wind Speed (WS, m/s). Isotach interval 0.4 m/s. c) Sea Surface Temperature (SST, °C). Isotherm interval 0.1 °C.

Para corroborar estas diferencias también desde el punto de vista temporal se presenta el comportamiento climatológico de T_a , Pr, TSM y CHM del período base 1979–2018 en cinco puntos de referencia seleccionados para las aguas adyacentes al archipiélago (Figura 4) y se muestra la estadística descriptiva de esta climatología (Tabla 1). La climatología de la T_a (Figura 4a) presenta un comportamiento acorde con la estacionalidad de las latitudes australes, con valores altos durante el verano (DEF) y bajos durante el invierno (JJA). Se destaca la diferencia entre los valores altos de T_a del punto 3 (sector noroeste de la región de estudio en el océano del Sur

TP, SST, and SIC is shown for the 1979–2018 base period at five selected reference points for the waters surrounding the archipelago (Figure 4), and the descriptive statistics of this climatology are presented (Table 1). The climatology of T_a (Figure 4a) shows a behavior in accordance with the seasonality of the southern latitudes, with high values during summer (DJF) and low ones during the winter (JJA). A difference is highlighted between high T_a values at point 3 (northwestern sector of the study region in the Southern Ocean, with an average of 0.39 °C) with respect to the low values of point 1 (Bismarck strait with an average of

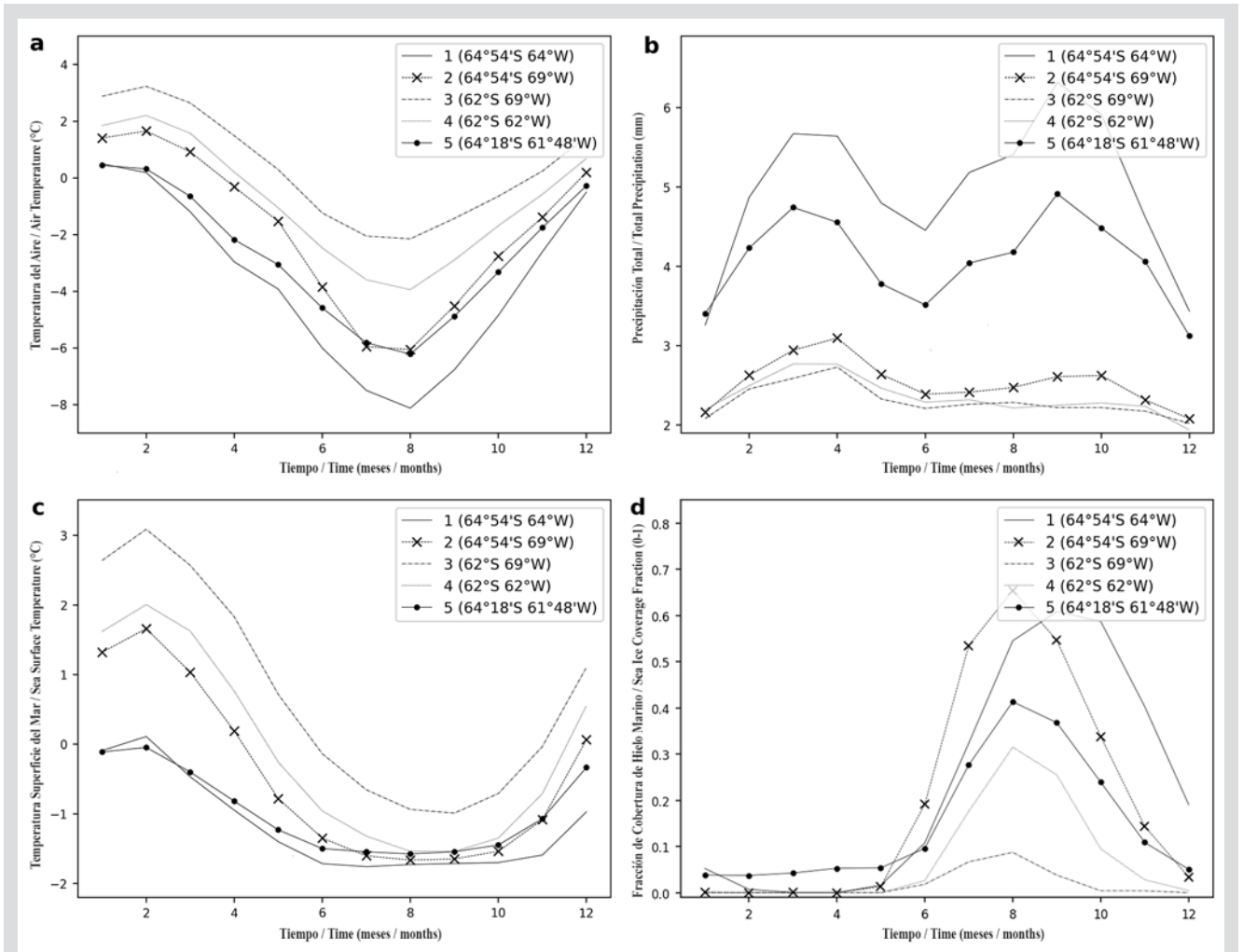


Figura 4. Comportamiento climatológico del período base 1979-2018 de T_a ($^{\circ}\text{C}$), Pr (mm), TSM ($^{\circ}\text{C}$) y CHM (0:1) en cinco puntos de referencia en aguas alrededor del archipiélago de Palmer. a) Temperatura del aire (T_a , $^{\circ}\text{C}$). b) Precipitación Total (Pr , mm). c) Temperatura Superficial del Mar (TSM , $^{\circ}\text{C}$). d) Cobertura de hielo marino (CHM , fracción de área 0:1).

Figure 4. Climatic behavior of the 1979-2018 base period of T_a ($^{\circ}\text{C}$), TP (mm), SST ($^{\circ}\text{C}$), and SIC (0:1) at five reference points in the waters around the Palmer archipelago. a) Air temperature (T_a , $^{\circ}\text{C}$). b) Total Precipitation (TP , mm). c) Sea Surface Temperature (SST , $^{\circ}\text{C}$). d) Sea Ice Coverage (SIC , 0:1 area fraction).

con promedio de $0,39^{\circ}\text{C}$), con respecto a los valores bajos del punto 1 (estrecho de Bismarck con un promedio de $-3,64^{\circ}\text{C}$). Los puntos 1 y 5, ubicados respectivamente en aguas que bañan al sur y norte del archipiélago, muestran T_a similares (aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$) solamente en el verano austral (DEF), pero en JJA la diferencia entre los valores mínimos llega a $1,91^{\circ}\text{C}$. La Pr presenta una climatología bimodal, con valores altos en la primavera y el otoño australes (Figura 4b). Se aprecia que la Pr es mayor en los puntos 1 (sur del archipiélago en el estrecho de Bismarck con promedio de $4,96$ mm) y 5 (norte del archipiélago en el estrecho de Gerlache con promedio de $4,09$ mm) y su estacionalidad es más pronunciada que en los puntos 2, 3 y 4 (en los sectores suroeste y noroeste del océano del Sur y el pasaje de Drake respectivamente, con promedio de $2,4$ mm). Este comportamiento se debe a que 2, 3 y 4 se

$-3,64^{\circ}\text{C}$). Points 1 and 5, located in waters of the South and North of the archipelago, respectively, show similar T_a (approximately 0.5°C) only in the southern summer (DJF), but, in JJA, the difference between the minimum values reaches 1.91°C . The TP reports a bimodal climatology, with high values in the southern spring and autumn (Figure 4b). It is observed that the TP is higher at points 1 (south of the archipelago at the Bismarck strait, with an average of 4.96 mm) and 5 (north of the archipelago at the Gerlache strait with an average of 4.09 mm), and its seasonality is more pronounced than at points 2, 3, and 4 (in the southwestern and northwestern sectors of the Southern Ocean and Drake Passage, respectively, with an average of 2.4 mm). This behavior is due to the fact that 2, 3, and 4 are located in offshore marine waters, where the oceanic-atmospheric

localizan en sectores netamente marinos, donde las condiciones oceano atmosféricas que conllevan a precipitaciones son más homogéneas, presentando oscilaciones de Pr más suavizadas. Por otro lado, en 1 y 5 las condiciones se combinan con el efecto de la orografía del archipiélago, logrando mayores precipitaciones durante el año. Se aprecia que los valores de Pr en 1 y 5 son ligeramente mayores en el segundo semestre mostrando la influencia de las elevaciones del archipiélago de Palmer en la época de intensificación de los vientos.

La TSM presenta un comportamiento monomodal, con valores altos en febrero (promedio de 1,37°C). Ocurre enfriamiento durante la primavera, conservando valores negativos (promedio del mínimo en agosto de -1,51 °C) durante los siguientes meses (Figura 4c). Este comportamiento es similar al de Ta, con oscilaciones suavizadas por la inercia en la respuesta del océano ante la dinámica atmosférica. Persiste la diferencia entre valores altos de TSM del punto 3 (sector noroeste de la región de estudio, en el océano del Sur) con promedio de 0,71 °C y el punto 1 (estrecho de Bismarck) con promedio -1,16 °C. Entre el norte del archipiélago de Palmer (punto 5, promedio -0,97 °C) y el sur (punto 1), se observa una ligera diferencia acentuada a finales de primavera e inicio del verano austral. En el invierno austral, los valores de la TSM en todos los puntos son similares, exceptuando el punto 3 localizado al noroeste de la región.

La CHM inicia su aumento en el otoño austral (MAM) llegando a valores cercanos a 0,6 en agosto en el punto 2 (sector suroeste de la región de estudio, en el océano del Sur) y en septiembre en el punto 1 (estrecho de Bismarck) debido a las bajas Ta y TSM. Estos puntos, ubicados en latitudes más altas, no se encuentran tan expuestos a las masas de aire cálidas que llegan desde el noroeste (Figura 3b). Con relación a los puntos 1 y 5, la Pr en meses anteriores al invierno austral aportó a la desalinización de las aguas superficiales, aumentando la velocidad de cubrimiento de hielo marino, aunque con diferencia en la extensión observada en el verano y primavera austral al norte del estrecho de Gerlache (punto 5) donde en agosto alcanza un máximo de CHM de 0,41, siendo menor que en los puntos ubicados al sur (1 y 2). Los puntos 3 y 4 presentan menor CHM, por su localización más al norte de la región de estudio, donde hay mayor influencia de los vientos relativamente más cálidos del noroeste.

Tendencias de las variables meteo-marinas en el período 1979 - 2018

Para identificar espacialmente los cambios ocurridos en la Ta, Pr y TSM durante los 40 años, se presenta en la Figura 5 la diferencia espacial entre los promedios anuales del último

condiciones leading to precipitations are more homogenous, presenting more smoothed TP oscillations. On the other hand, at 1 and 5, the conditions are combined with the effect of the archipelago's orography, thus causing more precipitations during the year. It is observed that TP values at 1 and 5 are slightly higher during the second semester, which shows the influence of the elevations of the Palmer archipelago during the time of wind intensification.

The SST has a unimodal behavior, with high values in February (an average of 1.37 °C). Cooling occurs in spring, maintaining negative values (average of minimum values in August of -1.51 °C) during the following months (Figure 4c). This behavior is similar to that of Ta, with oscillations smoothed due to inertia in the ocean's response to atmospheric dynamics. There is a persistent difference between high SST values at point 3 (northwestern sector of the study region in the Southern Ocean), with an average of 0.71 °C, and point 1 (Bismarck strait), with an average of -1.16 °C. Between the north of Palmer archipelago (point 5, -0.97 °C average) and the south (point 1), a slight difference is observed, which is intensified at the end of spring and the beginning of the southern summer. During the southern winter, SST values at all points are similar, except for point 3, which is located to the northwest of the region.

The SIC begins to increase during the southern autumn (MAM), reaching values close to 0.6 in August at point 2 (southwestern sector of the study region, in the Southern Ocean), and in September at point 1 (Bismarck strait) due to low Ta and SST. These points, located in higher latitudes, are not so exposed to the warm air masses arriving from the northwest (Figure 3b). Regarding points 1 and 5, the TP during the months prior to the southern winter contributed to the desalinization of surface waters, thus increasing the sea ice covering speed, yet with a difference in the extension observed during the southern summer and spring to the north of Gerlache strait (point 5), where a maximum SIC of 0.41 is reached in August, which is lower than those at points located to the south (1 and 2). Points 3 and 4 report a lower SIC due to their location further north of the study region, where there is a greater influence from the relatively warmer northwestern winds.

Trends of meteo-marine variables in the 1979 - 2018 period

To spatially identify the changes in Ta, TP, and SST during these 40 years, Figure 5 presents the spatial difference between the annual averages of the last and first years of observation (2018 and 1979, respectively).

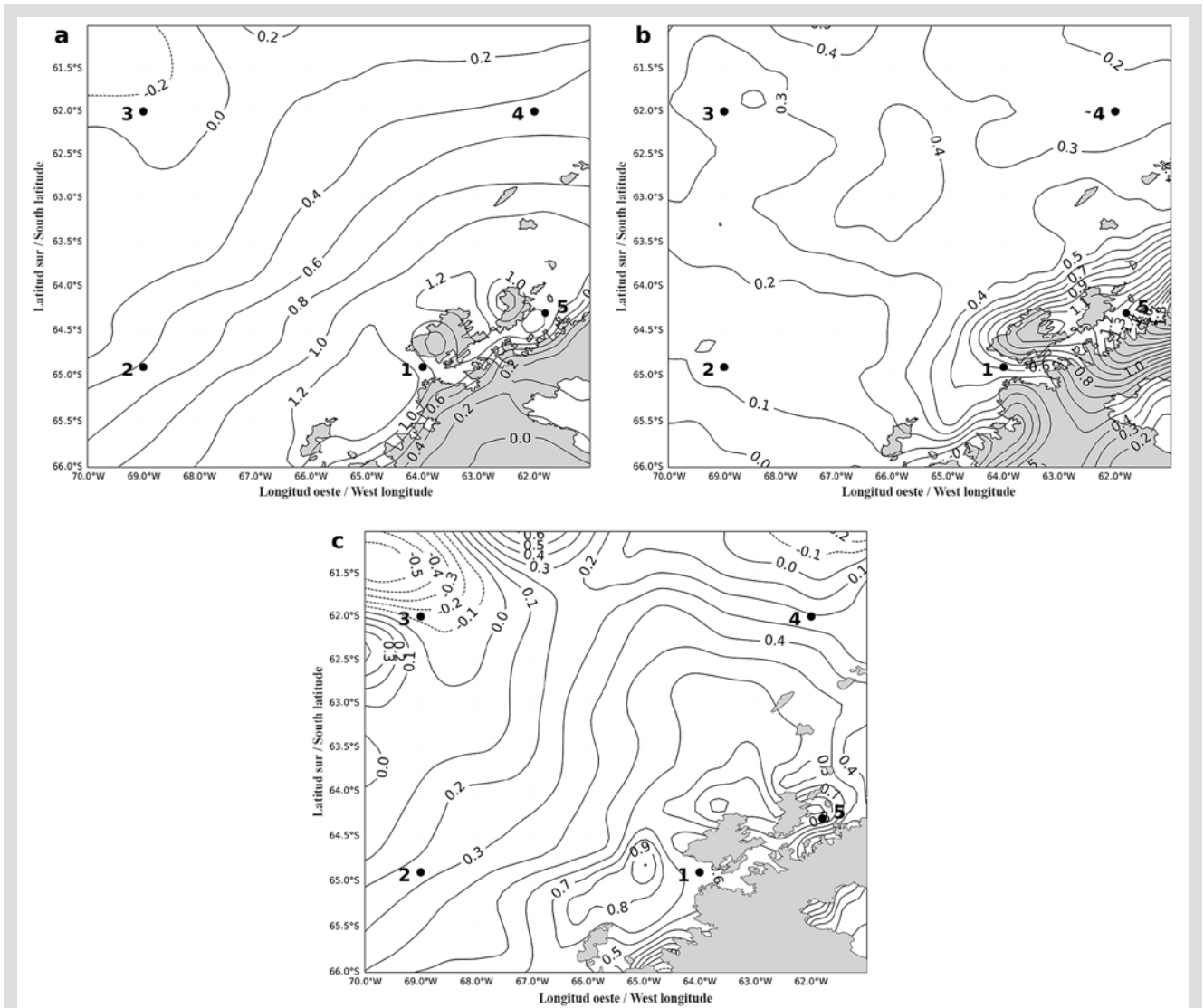


Figura 5. Diferencia entre el promedio anual de 2018 y el promedio anual de 1979 de T_a ($^{\circ}\text{C}$), Pr (mm) y TSM ($^{\circ}\text{C}$) alrededor del archipiélago de Palmer. 1-5: puntos de referencia para descripción temporal de variables meteo-marinas en aguas adyacentes al archipiélago de Palmer. a) Temperatura del aire (T_a , $^{\circ}\text{C}$). Intervalo isotermas $0,2^{\circ}\text{C}$. b) Precipitación Total (Pr , mm). Intervalo isoyetas $0,1$ mm. c) Temperatura Superficial del Mar (TSM , $^{\circ}\text{C}$). Intervalo isotermas $0,1^{\circ}\text{C}$.

Figure 5. Difference between the annual averages of 2018 and 1979 for T_a ($^{\circ}\text{C}$), TP (mm), and SST ($^{\circ}\text{C}$) around the Palmer archipelago. 1-5: points of reference for the temporal description of meteo-marine variables in the waters adjacent to the Palmer archipelago. a) Air temperature (T_a , $^{\circ}\text{C}$). Isotherm interval $0,2^{\circ}\text{C}$. b) Total Precipitation (TP , mm). Isohyet interval $0,1$ mm. c) Sea Surface Temperature (SST , $^{\circ}\text{C}$). Isotherm interval $0,1^{\circ}\text{C}$.

y primer año de observación (2018 y 1979 respectivamente). Así mismo, en la Tabla 1 y Figura 6, se presentan las tendencias de estos parámetros en los cinco puntos de referencia a 2018, y en la Tabla 2, se muestran las tendencias decadales 1981-1990, 1991-2000 y 2001-2010. Se pueden apreciar valores positivos de T_a en toda la región (Figura 5a) demostrando que en el 2018 se registró una T_a mayor que en 1979, a excepción del sureste de la región sobre el sector continental en la Tierra de Graham y al noroeste, sobre el océano del Sur, donde el punto 3 presenta una tendencia negativa a 2018 de $-0,002^{\circ}\text{C}/\text{año}$ (Tabla 1, Figura 6).

Likewise, in Table 1 and Figure 6, the trends of these parameters at the five reference points to 2018 are presented, and, in Table 2, the decade-long trends 1981-1990, 1991-2000 and 2001-2010 are shown. Positive T_a values can be observed throughout the region (Figure 5a), demonstrating that in 2018 a T_a higher than in 1979 was recorded, with the exception of the southeast of the region over the continental sector in Graham Land and the northwest, over the Southern Ocean, where point 3 shows a negative trend to 2018 of $-0.002^{\circ}\text{C}/\text{year}$ (Table 1, Figure 6).

Con relación a las tendencias decadales (Tabla 2), el punto 3 también se destaca al registrar los menores valores entre los puntos seleccionados, siendo para 1981-1990 una tendencia de 0,13 °C/década, para 1991-2000 de 1,07 °C/década y para 2001-2010 de 0,42 °C/década. Sobre el norte de la isla Anvers se presentan valores positivos alrededor de 1,3°C. Lo mismo ocurre sobre el sur del archipiélago de Palmer en el estrecho de Bismarck, donde se localiza el punto 1, con tendencia positiva a 2018 de 0,021°C/año (Tabla 1, Figura 6), el cual se destaca por presentar la tendencia más alta en 1991-2000 de 1,72 °C/década (Tabla 2). En promedio, el aumento de Ta en la región desde 1979 hasta 2018 fue de 0,47 °C (Figura 5a). La Ta en el punto 5 (norte del archipiélago de Palmer, estrecho de Gerlache) presenta el mayor valor de tendencia a 2018 con 0,024 °C/año (Tabla 1, Figura 6), así mismo como la más alta en el período 2001-2010 con 1,15 °C/década (Tabla 2). Cabe anotar que, en los cinco puntos de referencia, las tendencias decadales siguieron un comportamiento similar, en cuanto a que, en 1981-1990 éstas fueron positivas pero menores comparadas con las de 1991-2000 con valores de aumento elevados, los cuales volvieron a bajar en 2001-2010 (Tabla 2).

Tabla 1. Estadística descriptiva de climatologías y resultados de la tendencia lineal multianual (Significativa para el nivel de confianza del 95%) del período 1979–2018 de Ta (°C), Pr (mm), TSM (°C) y CHM (0:1) en los cinco puntos de referencia. 1) Aguas en el estrecho de Bismarck (64° 54' S y 64° W). 2) Aguas en el sector suroeste en el océano del Sur (64° 54' S y 69° W). 3) Aguas en el sector noroeste en el océano del Sur 62° S y 69° W. 4) Aguas en el pasaje de Drake 62° S y 62° W. 5) Aguas en el estrecho de Gerlache (64° 18' S y 61° 48' W).

Puntos de Referencia / Reference Points		Climatología / Climatology 1979-2018				Tendencia 40 años / 40 year trend 1979-2018	
Variables	No.	Min	Max	Promedio / Average	Amplitud / Amplitude	unidad/año / unit/year	± unidad/año / ± unit/year
Temperatura del aire / Air temperature (Ta, °C)	1	-8.12	0.5	-3.64	8.62	0.021	0.011
	2	-6.05	1.66	-1.85	7.71	0.005	0.011
	3	-2.15	3.23	0.39	5.38	-0.002	0.009
	4	-3.94	2.21	-0.81	6.15	0.008	0.009
	5	-6.21	0.45	-2.66	6.66	0.024	0.008
	Prom. / Avg.	-5.29	1.61	-1.71	6.90	0.011	0.010
Precipitación total / Total precipitation (Pr / TP, mm)	1	3.26	6.32	4.96	3.06	0.010	0.010
	2	2.08	3.1	2.53	1.02	0.005	0.003
	3	2.02	2.73	2.3	0.71	0.007	0.003
	4	1.94	2.77	2.35	0.83	0.007	0.002
	5	3.12	4.91	4.09	1.79	0.013	0.007
	Prom. / Avg.	2.48	3.97	3.25	1.48	0.008	0.005

Regarding the decadal trends (Table 2), point 3 also stands out for recording the lowest values among the selected points, being for 1981-1990 a trend of 0.13 °C/decade, for 1991-2000 of 1.07 °C/decade, and for 2001-2010 of 0.42 °C/decade. Towards the north of Anvers island, positive values around 1.3 °C are reported. The same occurs in the south of the Palmer archipelago at Bismarck strait, where point 1 is located, with a positive trend to 2018 of 0.021 °C/year (Table 1, Figure 6), which stands out for reporting the highest trend in 1991-2000 (1.72 °C/decade) (Table 2). On average, the Ta increases in the region from 1979 until 2018 was 0.47 °C (Figure 5a). The Ta at point 5 (north of the Palmer archipelago, Gerlache strait) shows the highest trend value towards 2018 (0.024 °C/year) (Table 1, Figure 6), as well as the highest one during the 2001-2010 period, with 1.15 °C/decade (Table 2). It should be noted that, in the five reference points, the decadal trends followed a similar behavior, considering that, in 1981-1990, they were positive but lower in comparison with those of 1991-2000, with elevated increase values that decreased again in 2001-2010 (Table 2).

Table 1. Descriptive statistics of climatologies and results of the multi-annual linear trend (Significant for the 95% confidence level) for 1979-2018 period of Ta (°C), TP (mm), SST (°C), and SIC (0:1) at the five reference points. 1) Waters in the Bismarck strait, 64° 54' S and 64° W. 2) Waters in the southwestern sector of the Southern Ocean, 64° 54' S and 69° W. 3) Waters in the northwestern sector of the Southern Ocean, 62° S and 69° W. 4) Waters at Drake Passage, 62° S and 62° W. 5) Waters in the Gerlache strait, 64° 18' S and 61° 48' W.

Puntos de Referencia / Reference Points		Climatología / Climatology 1979-2018				Tendencia 40 años / 40 year trend 1979-2018	
Variables	No.	Min	Max	Promedio / Average	Amplitud / Amplitude	unidad/año / unit/year	± unidad/año / ± unit/year
Temperatura Superficial del Mar / Sea Surface Temperature (TSM / SST, °C)	1	-1.76	0.11	-1.16	1.87	0.014	0.002
	2	-1.66	1.66	-0.45	3.32	-0.001	0.003
	3	-0.99	3.09	0.71	4.08	-0.006	0.005
	4	-1.54	2.01	-0.09	3.55	-0.002	0.003
	5	-1.58	-0.04	-0.97	1.53	0.014	0.002
	Prom. / Avg.		-1.51	1.37	-0.39	2.87	0.004
Cobertura de Hielo Marino / Sea Ice Coverage (CHM / SIC, 0:1)	1	0	0.61	0.24	0.61	-0.0042	0.0016
	2	0	0.75	0.20	0.65	-0.0013	0.0013
	3	0	0.09	0.02	0.09	-0.0007	0.0004
	4	0	0.32	0.08	0.32	-0.0014	0.0009
	5	0.04	0.41	0.15	0.38	-0.0057	0.0009
	Prom. / Avg.		0.01	0.42	0.14	0.41	-0.0027

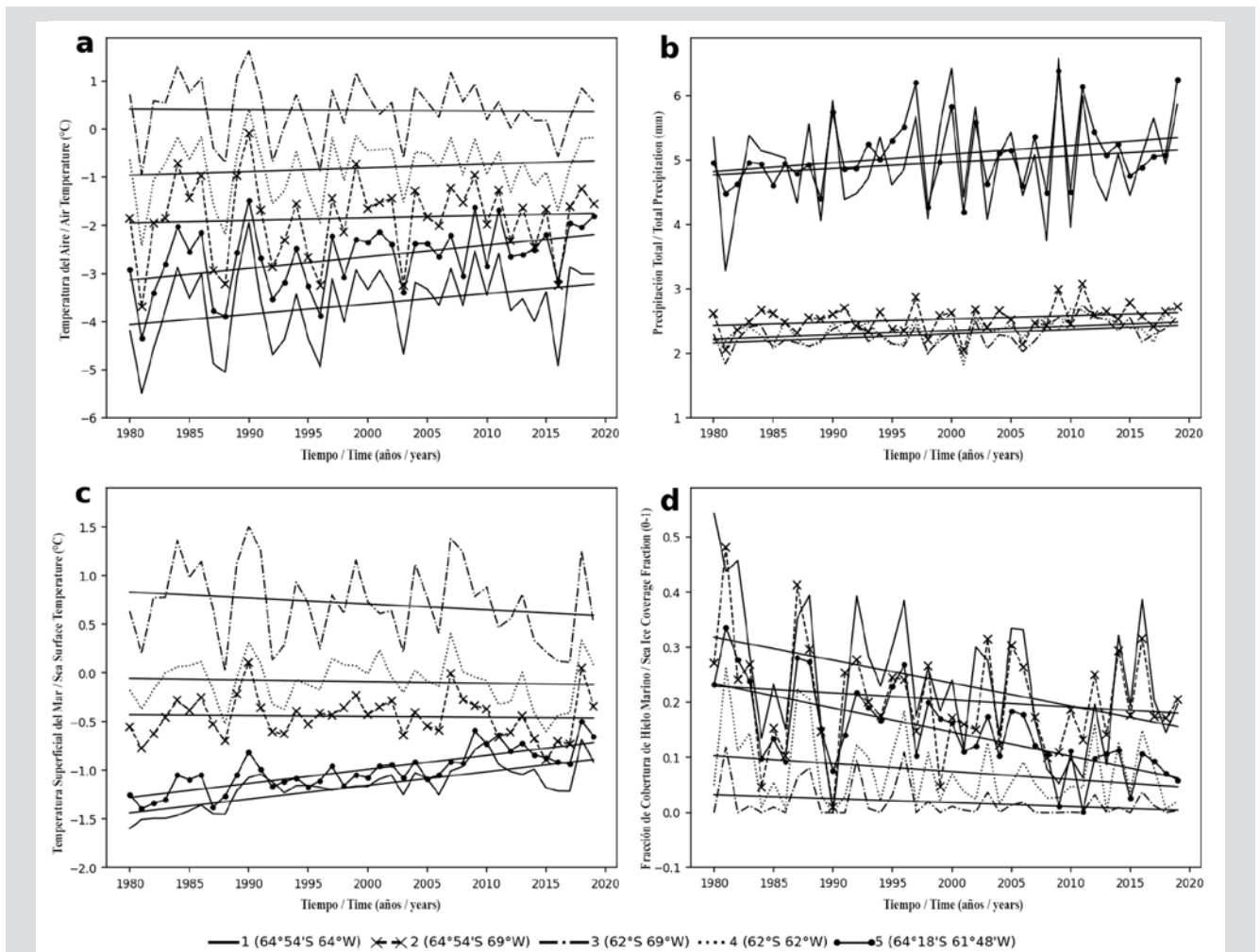


Figura 6. Series de tiempo y tendencia lineal multi-añual del período 1979–2018 de T_a (°C), Pr (mm), TSM (°C) y CHM (0:1) en cinco puntos de referencia en aguas alrededor del archipiélago de Palmer. a) Temperatura del aire (T_a , °C). b) Precipitación Total (Pr, mm). c) Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C). d) Cobertura de hielo marino (CHM, fracción de área 0:1).

Figure 6. Time series and linear multi-annual trend for the 1979–2018 period of T_a (°C), TP (mm), SST (°C), and SIC (0:1) at five reference points in the waters surrounding the Palmer archipelago. a) Air temperature (T_a , °C). b) Total Precipitation (TP, mm). c) Sea Surface Temperature (SST, °C). d) Sea Ice Coverage (SIC, 0:1 area fraction).

El aumento de la Ta, conlleva al aumento en Pr, observado en las isoyetas (Figura 5b) y tendencias positivas de Pr en los cinco puntos (Tabla 1, Figura 6), confirmando que Pr en 2018 fue mayor con respecto a 1979. Se observan valores negativos en un sector confinado a 66° S entre 64° 30' W y 65° W. Sobre las islas Anvers y Brabante, el norte del estrecho de Gerlache y la costa oeste de Tierra de Graham, la Pr fue mayor que en los demás sectores (Figura 5b). Los promedios climatológicos de Pr en el estrecho de Gerlache llegan a 4,01 mm y en el de Bismarck a 4,96 mm (Tabla 1). La mayor tendencia se aprecia en el estrecho de Gerlache donde el punto 5 presenta un valor de 0,013 mm/año y le sigue el de Bismarck donde el punto 1 muestra 0,010 mm/año (Tabla 1, Figura 6).

La distribución de las diferencias de TSM entre los promedios anuales de 2018 y 1979 sigue el mismo patrón encontrado en Ta y Pr (Figura 5c). Los valores positivos localizados en toda la región, evidencian el aumento de TSM en los últimos años, excepto en el noroeste y noreste. Se destaca el aumento de TSM en más de 0,5 °C en un amplio sector, desde 62° 30' S hasta el occidente del archipiélago con 0,86 °C de incremento y al norte de Gerlache con 0,76 °C. Incrementos de TSM entre 0,86 °C y 0,96 °C se registran al sur del estrecho de Bismarck extendiéndose hasta 66° S y 66° 30' W. En cuanto a la tendencia de 1979-2018 (Tabla 1, Figura 6) se observa que en el norte (estrecho de Gerlache) y sur (estrecho de Bismarck) del archipiélago de Palmer es positiva, con 0,014 °C/año. La tendencia de TSM al 2018 en los puntos 2, 3 y 4 es ligeramente negativa con -0,001 °C/año, -0,006 °C/año y -0,002 °C/año, respectivamente (Tabla 1, Figura 6), percibiéndose en los últimos años un aumento de uniformidad de valores de TSM en la región, dado el aumento de valores en un sector (aguas más cercanas al archipiélago de Palmer: estrechos de Gerlache y Bismarck) y la leve disminución en el otro (aguas al suroeste y noroeste de la región de estudio sobre el océano del Sur y el pasaje de Drake).

En cuanto a las tendencias decadales, en la Tabla 2 se destaca para 1991-2000 que los puntos 3 y 4 localizados en el océano del Sur presentan un aumento en las tendencias con 0,53 °C/década y 0,56 °C/década respectivamente. Para 2001-2010, los puntos 2, 3 y 4 muestran disminución en sus tendencias, mientras que aumentan en el punto 5 (estrecho de Gerlache) con 0,45 °C/década y en el 1 (estrecho de Bismarck) con 0,4 °C/década. En forma general, la distribución espacial de la diferencia entre los promedios anuales 2018 y 1979 de Ta, Pr y TSM mostrada en el presente trabajo (Figura 5), indica el incremento de estas variables en los últimos 40 años.

The Ta increase leads to an increase in TP, observed in the isohyets (Figure 5 b) and positive TP trends at all five points (Table 1, Figure 6), thus confirming that the TP in 2018 was higher with respect to 1979. Negative values are observed within a sector limited to 66° S between 64° 30' W and 65° W. Over the Anvers and Brabante islands, the north of the Gerlache strait, and the western coast of Graham Land, the TP was higher than in the other sectors (Figure 5b). The climatological TP averages at the Gerlache strait reach 4.01 mm, and, at the Bismarck strait, 4.96 mm (Table 1). The highest trend is observed at the Gerlache strait, where point 5 shows a value of 0.013 mm/year, followed by Bismarck strait, where point 1 reports 0.010 mm/year (Table 1, Figure 6).

The distribution of the SST differences between the annual averages of 2018 and 1979 follows the same pattern found in Ta and TP (Figure 5c). The positive values located throughout the region constitute evidence of the increase in SST in recent years, except in the northwest and northeast. A SST increase by more than 0.5 °C in a wide area is highlighted, which goes from 62° 30' S to the west of the archipelago with a 0.86 °C increase, and to the north of the Gerlache strait with 0.76 °C. SST increases between 0.86 °C and 0.96 °C are recorded to the south of the Bismarck strait, spanning all the way to 66° S and 66° 30' W. Regarding the 1979-2018 trend (Table 1, Figure 6) it is observed that it is positive in the north (Gerlache strait) and south (Bismarck strait) of the Palmer archipelago, with 0.014 °C/year. The SST trend to 2018 at points 2, 3, and 4 is slightly negative, with -0.001 °C/year, -0.006 °C/year, and -0.002 °C/year, respectively (Table 1, Figure 6), with a perceived increase in the uniformity of SST values in the region, given the value increase in one sector (waters closer to the Palmer archipelago: Gerlache and Bismarck straits) and the slight decrease in another one (waters southwest and northwest of the study region on the Southern Ocean and Drake Passage).

Regarding the decadal trends, it is highlighted in Table 2 for 1991-2018 that points 3 and 4, located in the Southern Ocean, to increase in trends with 0.53 °C/decade and 0.56 °C/decade, respectively. For 2001-2010, points 2, 3, and 4 report a decrease in their trends, while these increase at point 5 (Gerlache strait), with 0.45 °C/decade, and at 1 (Bismarck strait), with 0.4 °C/decade. In general, the spatial distribution of the difference between the annual averages of 2018 and 1979 for Ta, TP, and SST shown in this work (Figure 5) indicates an increase in these variables during the last 40 years.

La CHM presenta tendencias negativas en el período 1979-2018, evidenciando una disminución mayor tanto en el estrecho de Bismarck con -0,0042 fracción/año como en el estrecho de Gerlache con -0,0057 fracción/año (Tabla 1 y Figura 6). Con relación a las tendencias decadales (Tabla 2), se destacan nuevamente el sur y norte del archipiélago de Palmer, donde se observa que los valores negativos son mayores en 2001-2010 con -0,29 fracción/década y -0,14 fracción/década respectivamente.

The SIC shows negative trends in the 1979-2018 period, evidencing a higher decrease both at the Bismarck strait, with -0.0042 fraction/year, and at the Gerlache strait, with -0.0057 fraction/year (Table 1 and Figure 6). With respect to the decadal trends (Table 2), the south and north of the Palmer archipelago stand out once again, where it is observed that the negative values are higher in 2001-2010, with -0.29 fraction/decade and -0.14 fraction/decade, respectively.

Tabla 2. Tendencia lineal decadal (Significativa para el nivel de confianza del 95%) de los períodos 1981-1990, 1991-2000 y 2001-2010 de Ta (°C), Pr (mm), TSM (°C) y CHM (0:1) en los cinco puntos de referencia. 1) Aguas en el estrecho de Bismarck 64° 54' S y 64° W. 2) Aguas en el sector suroccidental en el océano del Sur 64° 54' S y 69° W. 3) Aguas en el sector noroccidental en el océano del Sur 62° S y 69° W. 4) Aguas en el pasaje de Drake 62° S y 62° W. 5) Aguas en el estrecho de Gerlache 64° 18' S y 61° 48' W.

Table 2. Linear decadal trend (significant for the 95% confidence level) of the periods 1981-1990, 1991-2000, and 2001-2010 for Ta (°C), TP (mm), SST (°C), and SIC (0:1) at five reference points. 1) Waters in the Bismarck strait, 64° 54' S and 64° W. 2) Waters in the southwestern sector of the Southern Ocean, 64° 54' S and 69° W. 3) Waters in the northwestern sector of the Southern Ocean, 62° S and 69° W. 4) Waters at Drake Passage, 62° S and 62° W. 5) Waters in the Gerlache strait, 64° 18' S and 61° 48' W.

Variables	Décadas / Decades	Tendencias decadales en los puntos de referencia, unidad/década / Decadal trends at reference points, unit/decade					
		1	2	3	4	5	Prom. / Avg.
Temperatura del aire / Air temperature (Ta, °C)	1981-1990	0.86 ± 0.1	0.38 ± 0.1	0.13 ± 0.08	0.28 ± 0.09	0.45 ± 0.09	0.42 ± 0.09
	1991-2000	1.72 ± 0.06	1.46 ± 0.07	1.07 ± 0.07	1.21 ± 0.06	1.31 ± 0.06	1.35 ± 0.06
	2001-2010	1.13 ± 0.06	0.83 ± 0.07	0.42 ± 0.06	0.24 ± 0.05	1.15 ± 0.06	0.75 ± 0.06
	Prom. / Avg.	1.24 ± 0.07	0.89 ± 0.08	0.54 ± 0.07	0.58 ± 0.07	0.97 ± 0.07	0.84 ± 0.07
Precipitación total / Total precipitation (Pr / TP, mm)	1981-1990	-0.06 ± 0.07	0.16 ± 0.01	0.06 ± 0.02	-0.11 ± 0.02	0.34 ± 0.04	0.08 ± 0.03
	1991-2000	0.7 ± 0.08	-0.1 ± 0.03	-0.3 ± 0.02	-0.34 ± 0.02	-0.34 ± 0.03	-0.08 ± 0.04
	2001-2010	0.23 ± 0.1	0.35 ± 0.03	0.42 ± 0.02	0.25 ± 0.02	0.55 ± 0.08	0.36 ± 0.05
	Prom. / Avg.	0.29 ± 0.08	0.14 ± 0.02	0.06 ± 0.02	-0.07 ± 0.02	0.18 ± 0.05	0.12 ± 0.04
Temperatura superficial del mar / Sea surface temperature (TSM / SST, °C)	1981-1990	0.49 ± 0.01	0.33 ± 0.02	0.30 ± 0.05	0.12 ± 0.06	0.35 ± 0.02	0.32 ± 0.03
	1991-2000	0.04 ± 0.006	0.30 ± 0.01	0.53 ± 0.03	0.56 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.32 ± 0.01
	2001-2010	0.4 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.23 ± 0.04	-0.07 ± 0.02	0.45 ± 0.01	0.21 ± 0.02
	Prom. / Avg.	0.3 ± 0.01	0.2 ± 0.02	0.4 ± 0.04	0.2 ± 0.03	0.32 ± 0.01	0.28 ± 0.02
Cobertura de Hielo Marino / Sea Ice Coverage (CHM / SIC, 0:1)	1981-1990	-0.22 ± 0.01	-0.028 ± 0.01	0.012 ± 0.003	-0.06 ± 0.009	-0.09 ± 0.009	-0.08 ± 0.008
	1991-2000	-0.2 ± 0.007	-0.12 ± 0.007	-0.06 ± 0.004	-0.07 ± 0.006	-0.07 ± 0.006	-0.10 ± 0.006
	2001-2010	-0.29 ± 0.009	-0.11 ± 0.009	-0.02 ± 0.001	-0.03 ± 0.004	-0.14 ± 0.006	-0.12 ± 0.006
	Prom. / Avg.	-0.24 ± 0.009	-0.08 ± 0.009	-0.02 ± 0.003	-0.05 ± 0.006	-0.10 ± 0.007	-0.10 ± 0.007

DISCUSIÓN

Las diferencias de Ta descritas en los sectores circundantes a la región de estudio (Figura 3a), corroboran lo afirmado por Thomas y Tetzner (2018), acerca de que la península antártica forma una barrera ante los fuertes vientos del suroeste en la tropósfera inferior, separando el clima marítimo del mar de Bellingshausen del clima continental en el lado del mar de Weddell, lo que hace de esta región una

DISCUSSION

The differences in Ta described for the surrounding sectors of the study region (Figure 3a) corroborate what was stated by Thomas and Tezner (2018), about the fact that the Antarctic peninsula forms a barrier against strong southwestern winds in the lower troposphere, separating the marine climate of the Bellingshausen Sea from the continental climate on the Weddell Sea side, making this

plataforma de observación única para estudiar la interacción climática entre las diferentes latitudes del hemisferio sur. Las diferencias espaciales de la Ta presentadas en este trabajo, confirman lo observado por Carrivick *et al.* (2019) acerca de la influencia de la topografía del sector en las condiciones meteo-marinas a nivel regional. Debido a que la península presenta una meseta con elevaciones de superficie de hielo hasta de 2000 m entre 63° y 67° S, y que más al sur, a los 74° S ésta se eleva a más de 2500 m, la península Antártica está sujeta a climas subpolares en el norte y a condiciones mucho más frías en el sur, presentando, además, oceanografía y meteorología contrastantes entre este-oeste, con grandes cantidades de nieve que llegan al oeste a causa de los vientos.

Con relación a la distribución de las isotacas, la presencia de vientos con menores valores a partir de los 64° S (Figura 3b), podría ser la manifestación recurrente de la fase positiva de la Oscilación Antártica (OAA) que ha mantenido las bajas presiones durante los últimos 40 años según Goodwin *et al.*, (2016). Los valores positivos de OAA (oscilación no estudiada en el presente trabajo) están correlacionados con temperaturas frías sobre gran parte de la Antártida, a excepción de la península, donde prevalecen temperaturas cálidas (Goodwin *et al.*, 2016). Por otra parte, en González *et al.* (2018), se identifica el predominio de cinco patrones de circulación ciclónica sobre la península y, aunque la mayoría son de movimiento zonal de bajas presiones influyentes en las características locales, hay dos de movimientos meridionales norte-sur, que influyen en el comportamiento de las variables meteo-marinas en la región. La distribución espacial multianual de la TSM (Figura 3c), presenta un patrón similar al de la Ta, mostrando diferenciación en las condiciones alrededor del archipiélago de Palmer. Aquí, en forma muy clara se observan valores más bajos al este y sur, en contraste con los del oeste y norte del archipiélago, debido a la topografía local que interviene en los flujos de vientos y características meteo-marinas observadas también en Villegas *et al.* (2018). El comportamiento climatológico de CHM, es acorde con lo esperado como respuesta del agua marina ante la dinámica de Ta, Pr y TSM (Figura 4d), que conlleva a que el hielo marino se forme y derrita estacionalmente (Jaeschke *et al.*, 2017). Así mismo, el promedio de CHM de los cinco puntos seleccionados (0,14 fracción de área) es acorde con lo observado por Herr *et al.* (2019), quienes indicaron que a nivel regional, la tasa de encuentro de ballenas minke antárticas es más baja precisamente en las costas del OPA debido a su menor concentración de hielo marino.

Con relación a las tendencias de la Ta, en el presente trabajo se encontró una marcada variación entre la década

region a unique observation platform to study the climate interaction between the different latitudes in the southern hemisphere. The spatial Ta differences presented in this work confirm what was observed by Carrivick *et al.* (2019) about the influence of the topography of this sector on the meteo-marine conditions at the regional level. Given that the peninsula has a plateau with ice surface elevations of up to 2000 m between 63° and 67° S, and that, further south at 74° S, it rises to more than 2500 m, the Antarctic peninsula is subjected to subpolar climates in the north and much colder conditions in the south, with contrasting oceanography and meteorology between east-west and large amounts of snow reaching the west because of the winds.

Regarding the isotach distribution, the presence of winds with lower values starting at 64° S (Figure 3b) could be the recurring manifestation of the positive phase of Antarctic Oscillation (AAO), which has maintained the low pressures in the last 40 years according to Goodwin *et al.* (2016). Positive AAO values (an oscillation that was not studied in this work) are correlated with cold temperatures in most of Antarctica, with the exception of the peninsula, where warm temperatures prevail (Goodwin *et al.*, 2016). On the other hand, in González *et al.* (2018), the predominance of five cyclonic circulation patterns over the peninsula is identified, and, although most of them are zonal movements of low pressure influencing local characteristics, there are two that present meridional north-south movements, which influence the behavior of meteo-marine variables in the region. The multi-year spatial distribution of SST (Figure 3c) exhibits a pattern similar to that of Ta, showing a differentiation in the conditions surrounding the Palmer Archipelago. Here, lower values are very clearly observed to the east and south, in contrast with those to the west and north of the archipelago, due to the local topography that intervenes in the wind flows and meteo-marine characteristics also observed by Villegas *et al.* (2018). The climatological behavior of SIC agrees with what was expected as a response of seawater to the dynamics of Ta, TP, and SST (Figure 4d), which leads to the formation of sea ice and its seasonal melting (Jaeschke *et al.*, 2017). In the same way, the SIC average of the five selected points (0.14 area fraction) agrees with that observed by Herr *et al.* (2019), who indicated that at the regional level, the Antarctic minke whale sighting rate is lower, precisely on the shores of the WAP, given its lower concentration of sea ice.

As for the Ta trends, in the present work, a marked variation was found between the 1981-1990

1981-1990 comparada con valores altos en 1991-2000, los cuales nuevamente bajaron en 2001-2010. Turner *et al.* (2005) encontraron que en la estación Vernadsky la tasa de aumento de T_a media anual durante 1971-2000 fue menor que durante 1961-1990 y, aunque los períodos de observación son diferentes al del presente trabajo, es clara la necesidad de estudiar a fondo la variabilidad de los parámetros meteorológicos con relación a oscilaciones oceano-atmosféricas de largo período que permitan identificar la razón de este comportamiento. Turner *et al.* (2019), al analizar la T_a de estaciones en la Antártica para el período 1981-2010, encontraron que éstas han experimentado una tendencia positiva en la T_a media anual a lo largo de su registro, siendo la más alta la de Vernadsky, localizada cerca del punto de referencia 1 del presente trabajo (estrecho de Bismarck) el cual, junto con el punto 5 (estrecho de Gerlache) presentaron los valores más altos de tendencia para 1979-2018.

Turner *et al.* (2019) afirman que la variabilidad de la OAA ejerce un gran control de las temperaturas, influyendo en la profundización de la ABSL como resultado de la persistente fase positiva de la OAA en los últimos años. La OAA no es objeto del presente estudio, pero dada su conocida influencia en la región, es imperativo continuar investigando las variables revisadas en los últimos 40 años, y entender además su posible teleconexión con El Niño Oscilación del Sur (ENOS), debido al impacto que puede causar a la dinámica del hielo marino, la física de aguas superficiales y patrones locales de viento en la región, como ha sido revisado por Kim y Ducklow (2016) y Carrasco (2018). Con relación a la diferenciación espacial en el comportamiento de la T_a en la región del OPA, Turner *et al.* (2005) identificaron un marcado calentamiento desde el suroeste de la península Antártica a través de la estación Vernadsky y la punta de la península hasta las islas Shetland del Sur, con una tasa de calentamiento decreciente al norte de Vernadsky. Este aspecto también se apreció en el presente estudio con las tendencias de T_a encontradas, permitiendo corroborar la diferencia local del área de estudio. Lo mismo fue observado por Stastna (2010), quien con series de T_a de estaciones a lo largo de la península Antártica calculó tendencias mostrando que, en la estación Vernadsky al sur del OPA, se alcanzó un valor alto de tendencia de $0,56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ equivalente a un aumento de $2,97\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 54 años (1950-2003), y un menor aumento en el norte del OPA, en la estación O'Higgins con $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ correspondiente a $0,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 43 años (1961-2003). Turner *et al.* (2005) han observado la asociación entre la circulación atmosférica en la península Antártica y los eventos ENOS (no estudiados en el presente trabajo),

decade compared to the high values of the 1991-2000 decade, which decreased again in 2001-2010. Turner *et al.* (2005) found that, at Vernadsky station, the average annual rate of increase in T_a during 1971-2000 was lower than during 1961-1990, and, even though the observation periods are different to those in this work, there is a clear need to thoroughly study the variability of meteorological parameters in relation to long-period oceanic-atmospheric oscillations that allow identifying the reason for this behavior. While analyzing the T_a of stations in Antarctica for the 1981-2010 period, Turner *et al.* (2019) found that these have experienced a positive trend in the annual T_a average throughout the records, with that of Vernadsky being the highest, which is located near this work's point of reference 1 (Bismarck strait). This point, along with point 5 (Gerlache strait) reported the highest trend values for 1979-2018.

Turner *et al.* (2019) argue that the AAO variability exerts a great control over the temperatures, influencing the deepening of ABSL as a result of the persistent positive phase of the AAO in the last years. The AAO is not an object of study in this work. However, given its known influence on the region, it is imperative to keep investigating the reviewed variables in the last 40 years, as well as to understand their possible teleconnection with the El Niño Southern Oscillation (ENSO), due to the impact it may cause on the sea ice dynamics, the surface waters physics, and local wind patterns in the region, as has been examined by Kim and Ducklow (2016) and Carrasco (2018). With regards to the spatial differentiation in the behavior of T_a in the WAP region, Turner *et al.* (2005) identified a marked warming from the southwest of the Antarctic peninsula, through Vernadsky station and the tip of the peninsula, to the South Shetland islands, with a decreasing warming rate towards the north of Vernadsky. This aspect was also observed in this work with the found T_a trends, which allowed corroborating the local difference of the study area. The same was observed by Stastna (2010), who calculated trends with T_a series along the Antarctic peninsula, showing that, in the southern sector of the WAP corresponding to Vernadsky station, a high trend value of $56\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ was reached, which is equivalent to a $2.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ increase during 54 years (1950-2003), and a lower increase was recorded in the north of the WAP at O'Higgins station with $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, corresponding to $0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ during 43 years (1961-2003). Turner *et al.* (2005) have observed the association between atmospheric circulation in the Antarctic peninsula and ENOS events (not studied

anotando que éstos pueden provocar una influencia tropical sobre los cambios climáticos en la región, con eventos cálidos causantes de alta presión sobre el sistema de ABSL, llevando a condiciones frías y forzamiento de vientos del sur sobre la península Antártica, mecanismo que se sugiere ser analizado teniendo en cuenta además otros factores que controlan a la Ta y TSM de la península. Las tendencias negativas de TSM sobre las aguas del océano del Sur (puntos 2 y 3) y del pasaje de Drake (punto 4) en 1979-2018 podrían estar asociadas al efecto analizado por Ferster *et al.* (2018), quienes con observaciones de TSM derivadas de satélites en 1982-2016 e índices de teleconexiones globales, encontraron correlaciones espaciales significativas asociadas con la OAA.

Con respecto a los años posteriores a 1991, Verona *et al.* (2019) presentan resultados de conjuntos de datos observacionales y modelados de TSM luego de la erupción del volcán Pinatubo, mostrando un patrón de calentamiento similar para la península Antártica, aunque con diferencias en la magnitud de las anomalías. La respuesta de calentamiento de TSM frente a la península Antártica comenzó en el primer año después de la erupción y se extendió hasta 1993. Cabe señalar que, aunque el calentamiento en la península Antártica después de la erupción se observó en todos los conjuntos de datos en Verona *et al.* (2019), el calentamiento no es exclusivo de esta región, y que la contribución de la variabilidad climática interna del área de estudio debe tener un continuo y detallado análisis con diferentes conjuntos de datos. El incremento de Ta, Pr y TSM en los últimos 40 años mostrado en el presente trabajo, fue visto también por Szumińska *et al.* (2018), quienes asocian la tendencia al calentamiento de la península en los últimos 50 años al cambio en los patrones de circulación atmosférica del hemisferio sur.

Estudios recientes sobre la CHM señalan cambios regionales marcados tanto en la extensión y concentración del hielo marino antártico, como en las temperaturas del mar cercanas a la superficie en todo el continente antártico. En las tendencias de CHM para los puntos de referencia seleccionados en el presente estudio se evidencian valores negativos (Tablas 1 y 2 y Figura 6d), lo que concuerda con Fogt y Wovrosh (2015), quienes afirman que el sector de los mares de Amundsen-Bellingshausen ha experimentado una disminución en la extensión y la concentración del hielo marino en las últimas décadas, mientras que ocurre lo contrario en el mar de Ross. Lo observado en el presente trabajo confirma lo visto por Moreau *et al.* (2015), quienes estudiando la presencia y abundancia de ciertos grupos de fitoplancton, demostraron que el estrecho de Gerlache está siendo afectado por el retroceso temprano del hielo marino

in the present work), noting that these can cause a tropical influence on climate changes in the region, with warm events causing high pressure upon the ABSL system, thus leading to cold conditions and forcing of the south winds over the Antarctic peninsula, a mechanism whose analysis is advised, while also considering other factors that control the peninsula's Ta and SST. The negative SST trends on the waters of the Southern Ocean (points 2 and 3) and Drake Passage (point 4) in 1979-2018 may be associated with the effect analyzed by Ferster *et al.* (2018), who found significant spatial correlations related to the AAO with SST observations derived from satellites in 1982-2016 and global teleconnection indices.

As for the years following 1991, Verona *et al.* (2019) present the results of observational and modeled SST data sets after the eruption of the Pinatubo volcano, showing a similar warming pattern for the Antarctic Peninsula, although with differences in the magnitude of the anomalies. The SST warming response of the Antarctic Peninsula started in the first year after the eruption and lasted until 1993. It is worth mentioning that, even though the warming in the Antarctic peninsula after the eruption was observed in all data sets in Verona *et al.* (2019), the warming is not exclusive to this region, and the contribution to the internal climate variability of the study area must be subjected to a continuous and detailed analysis with different data sets. The increase in Ta, TP, and SST in the last 40 years shown in this work was also seen by Szumińska *et al.* (2018), who associate the warming trend in the peninsula during the last 50 years to the change in the atmospheric circulation patterns of the southern hemisphere.

Recent studies on SIC indicate marked regional changes both in the extension and concentration of Antarctic sea ice and the sea temperatures close to the surface throughout the Antarctic continent. In the SIC trends for the selected reference points of this study, negative values are evidenced (Tables 1 and 2 and Figure 6d), which agrees with Fogt and Wovrosh (2015), who claim that the area of the Amundsen-Bellingshausen seas has experienced a decrease in the extension and concentration of sea ice in the last decades, while the opposite occurs in the Ross Sea. What was observed in this work confirms what was seen by Moreau *et al.* (2015), who, studying the presence and abundance of certain phytoplankton groups, demonstrated that the Gerlache strait is being affected by the early sea ice retreat and the increase in SST. According to Cook *et al.* (2016), about 90% of the glaciers in the WAP are being reduced, as well as the extension of sea ice and its mean

y el aumento de la TSM. Según Cook *et al.* (2016), cerca de 90% de los glaciares del OPA se está reduciendo, así como la extensión del hielo marino y su duración media, llegando a unos 90 días (Stammerjohn *et al.*, 2012). En Laffin *et al.* (2021) investigando la influencia de los vientos cálidos y secos de föhn en el derretimiento de la superficie de plataformas de hielo en la península Antártica para 1979-2018, encontraron que las tendencias y la evolución de la fusión a largo plazo inducida por föhn son atribuibles a cambios estacionales. Durante los últimos 20 años, la mayor ocurrencia de föhn se presenta en el verano, con una disminución en otoño, invierno y principios de primavera, lo que concuerda con las tendencias decadales de CHM del presente estudio, sobre todo para los puntos al sur y norte del estrecho de Gerlache.

Es claro que la Antártica presenta diferenciación regional en su respuesta al cambio y variabilidad climática, que la península Antártica se destaca por su vulnerabilidad ante estos procesos, sobretodo el OPA, donde además se aprecian diferencias locales y que, de acuerdo con el presente trabajo, sobresale el estrecho de Gerlache en el comportamiento diferencial de sus condiciones meteo-marinas. El clima y la variabilidad climática de la región de estudio es una compleja combinación de factores, desde los vientos de las montañas hasta patrones atmosféricos y oceanográficos de mayores escalas espaciales, y sus tendencias a largo plazo. Existen aún varios vacíos en la comprensión de la respuesta de los sectores marinos que conforman la península Antártica ante la variabilidad y el cambio climático, planteando interrogantes que deberán ser resueltos con la continuidad de los programas de observación e investigación nacionales e internacionales.

CONCLUSIONES

La distribución espacial del promedio anual multianual de variables meteo-marinas del período 1979-2018 indican una diferenciación local entre el norte (estrecho de Gerlache) y sur (estrecho de Bismarck) del archipiélago de Palmer y entre las aguas costeras del oriente (estrecho de Gerlache) y occidente (océano del Sur) del archipiélago. El comportamiento climatológico (1979-2018) de Ta al norte del estrecho de Gerlache y en el de Bismarck es similar durante el verano del sur, pero en invierno puede presentar diferencias, siendo la Ta menor en el estrecho de Bismarck. La Pr es mayor al norte de los estrechos de Gerlache y de Bismarck comparando con la Pr de los otros sectores en mar abierto de la región de estudio. Entre estos dos estrechos, hay una ligera diferencia en la TSM, acentuada desde el verano del sur, cuando la TSM es mayor al norte de Gerlache. Las diferencias

duration, reaching approximately 90 days (Stammerjohn *et al.*, 2012). Laffin *et al.* (2021), conducting research on the influence of the warm and dry föhn winds on the melting of the surface of ice platforms in the Antarctic peninsula for 1979-2018, found that the trends and evolution of long-term fusion induced by föhn can be attributed to seasonal changes; During the last 20 years, the highest occurrence of föhn happens in summer, with a decrease in autumn, winter and early spring, which matches the SIC decadal trends shown in this study, especially for the points located at the south and north of the Gerlache strait.

It is clear that Antarctica shows a regional differentiation in its response to climate change and variability; that the Antarctic Peninsula stands out for its vulnerability to these processes, especially the WAP, where local differences are also observed; and that, according to this research, the Gerlache strait stands out for the differential behavior of its meteo-marine conditions. The climate and climate variability of the study region is a complex combination of factors, from mountain winds to larger spatial-scale atmospheric and oceanographic patterns, as well as their long-term trends. There are still several gaps in the understanding of the response of the marine sectors that constitute the Antarctic peninsula to climate variability and climate change, thus posing questions that will have to be answered with the continuity of national and international observation and research programs.

CONCLUSIONS

The spatial distribution of the multi-year annual average of meteo-marine variables for the 1979-2018 period indicates a local differentiation between the north (Gerlache Strait) and south (Bismarck Strait) of the Palmer archipelago and between the eastern coast (Gerlache Strait) and western waters (Southern Ocean) of the archipelago. The climatological behavior (1979-2018) of Ta north of the Gerlache and Bismarck straits is similar during the southern summer, but it may exhibit differences in winter, with Ta being the lowest at the Bismarck strait. The TP is higher north of the Gerlache and Bismarck straits, in comparison with the behavior of TP in other open-sea sectors in the study region. Between these two straits, there is a slight difference in SST, which is accentuated since the southern summer, when the SST is higher to the north of Gerlache. The differences between the 2018 and 1979 annual averages show that Ta, TP, and SST have experienced a general increase in the last 40 years in the study region. From the selected reference

entre los promedios anuales 2018 y 1979 muestran que la Ta, la Pr y la TSM han experimentado un incremento general en los últimos 40 años en la región de estudio. De los puntos de referencia seleccionados, se evidenció que en 1979-2018 hay una leve tendencia negativa de Ta en el océano del Sur al noroeste del área de estudio con $-0,002$ °C/año, de TSM al suroeste y al noroeste del área de estudio en el océano del Sur y en el pasaje de Drake con valores de $-0,001$ °C/año, $-0,006$ °C/año y $-0,002$ °C/año, respectivamente. La Pr presentó tendencias positivas. Los mayores valores de incremento de Ta, Pr y TSM se registraron al norte del estrecho de Gerlache, seguido por el de Bismarck. Se evidenció que la CHM presenta tendencias negativas en el período 1979-2018, mostrando una disminución de la cobertura de hielo marino mayor en el estrecho de Bismarck con $-0,0042$ fracción/año y en el de Gerlache con $-0,0057$ fracción/año. La tasa de cambio durante el período 1979-2018 observada en los cinco puntos de referencia para la Ta es de $0,011$ °C/año, para la Pr es de $0,008$ mm/año, para la TSM es de $0,004$ °C/año y para CHM es de $-0,003$ fracción/año. Se destaca a la década 1991-2000 por presentar valores altos de tendencia de Ta para los cinco puntos de referencia con un promedio de $1,4$ °C/década. Los valores de tendencia más altos de Pr se registraron en 2001-2010 con un promedio de $0,4$ mm/década. Las mayores tendencias decadales de TSM fueron observadas en 1981-1990 y 1991-2000 con $0,3$ °C/década. En las tres décadas (1981-1990, 1991-2000 y 2001-2010), la disminución de CHM fue de $-0,1$ fracción/década.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Antártico Colombiano (PAC), la Universidad Nacional de Colombia y al Copernicus Climate Change Service por los datos ERA5 obtenidos bajo Licence to Use Copernicus Products (v 1.2) desde el Climate Data Store (CDS).

points, it was evidenced that in 1979-2018, there is a slight negative trend of Ta to the northwest of the study area in the Southern Ocean with -0.002 °C/year; and for SST in the southwest and northwest of the Southern Ocean and in the Drake Passage, with values of -0.001 °C/year, -0.006 °C/year, and -0.002 °C/year, respectively. The TP showed positive trends. The highest increase values for Ta, TP, and SST were recorded to the north of the Gerlache strait, followed by the Bismarck strait. It was evidenced that the SIC exhibits negative trends during the 1979-2018 period, showing a higher decrease in SIC at the Bismarck strait with -0.0042 fraction/year, and in the Gerlache strait with -0.0057 fraction/year. The rate of change during the 1979-2018 period observed at the five reference points for Ta is of 0.011 °C/year; for TP, it is 0.008 mm/year; for SST, it is 0.004 °C/year; and for SIC, it is -0.003 fraction/year. The decade 1991-2000 stands out for presenting high trend values of Ta for the five reference points, with an average of 1.4 °C/decade. The highest PT trend values were recorded in 2001-2010 with an average of 0.4 mm/decade. The highest SST decadal trends were observed in 1981-1990 and 1991-2000 with 0.3 °C / decade. In the three decades (1981-1990, 1991-2000, and 2001-2010), the SIC decrease was -0.1 fraction/decade.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank the Colombian Antarctic Program (PAC), Universidad Nacional de Colombia, and the Copernicus Climate Change Service for the ERA 5 data obtained under the License to Use Copernicus Products (v 1.2) from the Climate Data Store (CDS).

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Amos, A., S. Jacob and Hu, J. 1990. Racer: Hydrography of the surface water during the spring Bloom in the Gerlache Strait. *Antarct. J. US.*, 25(5): 131-134.
- Atkinson, A., V. Siegel, E. Pakhomov and P. Rothery. 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100-103.
- Barcena M., J. Sesma, E. Isla y A. Palanques. 2005. Respuesta del registro sedimentario a la ciclicidad solar en el estrecho de Gerlache (península Antártica). *Geogaceta*, 38: 179-182.
- Beazley, D. and G. Van Rossum. 1999. Python: Essential Reference. New Riders Publishing.
- Bernard, K., M. Cimino, W. Fraser, J. Kohut, M. Oliver, D. Patterson-Fraser, O. Schofield, H. Statscewich, D. Steinberg and P. Winsor. 2017. Factors that affect the nearshore aggregations of Antarctic krill in a biological hotspot. *Deep-Sea Res. Part I*, 126: 139-147.
- Canals, M., F. Estrada, R. Urgeles and Gebrap 96/97 Team. 1998. Very high-resolution seismic definition of glacial and postglacial sediment bodies in the continental shelves of the northern Trinity Peninsula region, Antarctica. *An. Glaciol.*, 27: 260-264.



- Capella, J., L. Quetin, E. Hofmann and R. Ross. 1992. Models of the early life history of *Euphausia superba*-Part II. Lagrangian calculations. *Deep-Sea Res.*, 39(7-8): 201-220.
- Cárdenas, C., E. M. Newcombe, E. Hajdu, M. González-Aravena, S. W. Geange and J. J. Bell. 2016. Sponge richness on algae-dominated rocky reefs in the western Antarctic Peninsula and the Magellan Strait. *Pol. Res.*, 35: 1, 30532.
- Cárdenas, C., M. González-Aravena and P. Santibañez. 2018a. The importance of local settings: within-year variability in seawater temperature at South Bay, Western Antarctic Peninsula. *PeerJ*, 6:e4289.
- Cárdenas, C., M. González-Aravena, A. Font, J.T. Hestetun, E. Hajdu, N. Trefault, M. Malmberg and E. Bongcam-Rudloff. 2018b. High similarity in the microbiota of cold-water sponges of the genus *Mycale* from two different geographical areas. *PeerJ*, 6:e4935.
- Carrasco, J. 2018. Señales atmosféricas y del hielo marino asociadas a ENOS en el sector norte de la península antártica. *An. Inst. Patagonia*, 46(1): 33-47.
- Carrivick, B., J. Davies, W. M. James, M. McMillan and N. Glasser. 2019. A comparison of modelled ice thickness and volume across the entire Antarctic Peninsula region, *Geogr. Annal.: Series A, Phys. Geogr.*, 101:(1) 45-67.
- Cimino, M., D. Patterson-Frasser, S. Stammerjohn and W. Fraser. 2019. The interaction between island geomorphology and environmental parameters drives Adélie penguin breeding phenology on neighboring islands near Palmer Station, Antarctica. *Ecol. Evol.*, 9: 9334-9349.
- Cook, A.J., P.R. Holland, M.P. Meredith, T. Murray, A. Luckman and D.G. Vaughan. 2016. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. *Science* 353(6296): 283–286.
- C3S, 2017. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate. Copernicus Climate Change Service (CCS) Climate Data Store (CDS). [Acceso mayo 2019]. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- Day, T.A., C.T. Ruhland, S. Strauss, J.H. Park, M.L. Krieg, M.A. Krna and D.M. Bryant, 2009. Response of plants and the dominant microarthropod *Cryptopygus antarcticus*, to warming and contrasting precipitation regimes in Antarctic tundra. *Global Change Biol.*, 15: 1640-1651.
- Deppeler, S. and A. Davidson. 2017. Southern Ocean Phytoplankton in a changing climate. *Front. Mar. Sci.*, 4: 40.
- Dewar, G. 1967. Some aspects of topography and glacierization of Adelaide Island. *Brit. Antarct. Surv. Bull.*, 11: 37-47.
- Emslie, S.D. 2001. Radiocarbon dates from abandoned penguin colonies in the Antarctic Peninsula region. *Antarct. Sci.*, 13(3): 289-295.
- Ferster, B., Subrahmanyam, B. and A. M. Macdonald. 2018. Confirmation of ENSO-Southern Ocean Teleconnections using satellite-derived SST. *Rem. Sens.*, 10: 331. . <https://doi.org/10.3390/rs1002033>.
- Fogt, R. L. and A. J. Wovrosh. 2015. The relative influence of tropical sea surface temperatures and radiative forcing on the Amundsen Sea Low. *J. Clim.*, 28: 8540-8555.
- Fraser, W.R. and E. E. Hofmann. 2003 A predator'S perspective on causal links between climate change, physical forcing and ecosystem response. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 265: 1–15.
- García, M., C. Castro, A. Ríos, M. Doval, G. Roson, D. Gomis and O. López. 2002. Water masses and distribution of physicochemical properties in the western Bransfield Strait and Gerlache Strait during austral summer 1995/96. *Deep-Sea Res. II*, 49: 585-602.
- Giusti, M. 2021. What data and maps are available through C3S (Copernicus Climate Change Service)? ECMWF. [Acceso mayo 2021]. <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=88257857>.
- González, S., F. Vasallo, C. Recio-Blitz, J. Guijarro and J. Riesco. 2018. Atmospheric patterns over the Antarctic Peninsula. *J. Clim.*, 31: 3608-3597.
- Goodwin, B., E. Mosley-Thompson, A. Wilson, S. Porter and M. Sierra-Hernández. 2016. Accumulation variability in the Antarctic Peninsula: the role of large-scale atmospheric oscillations and their interactions. *J. Clim.*, 29: 2596-2579.
- Gordon, A. and W. Nowlin, Jr. 1978. The basin waters of the Bransfield Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, 8: 258-264.
- Gorman, K., S. Talbot, S. Sonsthagen, G. Sage, M. Gravely, W. Fraser and T. Williams. 2107. Population genetic structure and gene Flow of Adélie penguins (*Pygoscelis adeliae*) breeding throughout the western Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 29(6): 499-510.
- Griffith, T. 1988. A geological and geophysical investigation of sedimentation and recent glacial history in the Gerlache Strait region, Graham Land, Antarctica. Thesis Master of Arts. Rice Univ., Texas. 449 p.
- Griffith, T. and J. Anderson. 1989. Climatic control of sedimentation in bays and fjords of the northern Antarctic Peninsula. *Mar. Geol.*, 85(2-4): 181–204.
- Herr, H., N. Kelly, B. Dorschel, M. Huntemann, K. Kock, L. Lehnert, U. Siebert, S. Viquerat, R. Williams and M. Scheidat. 2019. Aerial surveys for Antarctic minke whales (*Balaenoptera bonaerensis*) reveal sea ice dependent distribution patterns. *Ecol. Evol.*, 9: 5664–5682.
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee and J.N. Thépaut. 2019. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). [Accessed on 14-Sep-2019]. 10.24381/cds.fl7050d7.
- Hofmann, E., C. Lascara and J. Klinck. 1992. Palmer LTER: Upper-ocean circulation in the LTER region from historical sources. *Antarct. J.*, 239-241.
- IPCC. 2019. IPCC Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate In: Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama and N.M. Weyer (Eds.) IPCC, Geneva. 755 p.
- Jaeschke, A., M. Wengler, J. Hefter, T. Ronge, W. Geibert, G. Mollenhauer, R. Gersonde and F. Lamy. 2017. A biomarker perspective on dust, productivity, and sea surface temperature in the Pacific sector of the Southern Ocean. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 204: 120–139.
- Kerr, R., Mata, M., Mendes C. and E. Secchi. 2018. Northern Antarctic Peninsula: a marine climate hotspot of rapid changes on ecosystems and ocean dynamics *Deep-Sea Res. Part II* 149: 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.05.006>.

- Kim, H. and H. Ducklow. 2016. A decadal (2002–2014) analysis for dynamics of heterotrophic bacteria in an Antarctic coastal ecosystem: variability and physical and biogeochemical forcings. *Front. Mar. Sci.*, 3: 214.
- King, J.C., J. Turner, G.J. Marshall, W.M. Connolley and T.A. Lachlan-Cope. 2003. Antarctic Peninsula climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records. *Antarct. Res. Ser.* 79: 17-30.
- Krebs, W. 1983. Ecology of neritic marine diatoms, Arthur Harbor, Antarctica. *Micropaleontology*, 29: 267-297.
- Laffin, M., C. Zender, S. Singh, J. Van Wessem, C. Smeets and C. Reijmer. 2021. Climatology and evolution of the Antarctic Peninsula föhn wind-induced melt regime from 1979–2018. *JGR Atmosph.*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020JD033682>.
- Mahlon, C., M. C. Kennicutt II and S. L. Chown. 2014. Six priorities for Antarctic science. *Nature*, 512: 23-25.
- Mandelli, E. and P. Burkholder. 1966. Primary productivity in the Gerlache and Bransfield Straits of Antarctica. *J. Mar. Res.*, 24: 15-27.
- Meredith, M.P., M.I. Wallace, S.E. Stammerjohn, I.A. Renfrew, A. Clarke, H.J. Venables, D.R. Shoosmith, T. Souster and M.J. Leng. 2010. Changes in the freshwater composition of the upper ocean west of the Antarctic Peninsula during the first decade of the 21st century. *Prog. Oceanogr.*, 87: 127–143. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.019>.
- Meredith, M., S. Stammerjohn, H. Venables, H. Ducklow, D. Martinson, R. Iannuzzi, M. Leng, J.M. van Wessem, C. Reijmer and N. Barrand. 2017. Changing distributions of sea ice melt and meteoric water west of the Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Res.*, 139: 40-57.
- Moreau, S., B. Mostajir, S. Bélanger, I.R. Schloss, M. Vancoppenolle, S. Demers and G.A. Ferreyra. 2015. Climate change enhances primary production in the western Antarctic Peninsula. *Glob. Change Biol.*, 21(6): 2191–2205.
- Niller, P. and J. Illeman. 1990. Racer: lagrangian J. Drifter observations of surface circulation in the Gerlache and Bransfield strait. *Antarctic J.*, 134-137.
- Park, J.H., T. A. Day, S. Strauss and C. T. Ruhland. 2007. Biogeochemical pools and fluxes of carbon and nitrogen in a maritime tundra near penguin colonies along the Antarctic Peninsula. *Pol. Biol.*, 30: 199–207.
- Paulson, C. and G. Ragkousis. 2015. pyKriging: a Python kriging toolkit (Version v0.1.0-alpha). [online] Zenodo. Available at: <http://doi.org/10.5281/zenodo.21389> [Acceso mayo 2019].
- Rovelli, L., K. M. Attard, C. A. Cárdenas and R. N. Glud. 2019. Benthic primary production and respiration of shallow rocky habitats: a case study from South Bay (Doumer Island, Western Antarctic Peninsula). *Pol. Biol.*, 42(8): 1459-1474.
- Rundle, A. 1971. Glaciology and meteorology of Anvers Island: subglacial surface of marr ice Piedmont. *Antarc. J. US*, 6: 202-206.
- Stammerjohn, S., R. Massom, D. Rind and D. Martinson. 2012. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison. *Geophys. Res. Lett.*, 39: 6.
- Stastna, V. 2010. Spatio-temporal changes in surface air temperature in the region of the northern Antarctic Peninsula and south Shetland islands during 1950-2003. *Pol. Sci.*, 4: 18-33.
- Stein, M. 1982. Distribution of water masses in the South Shetland Islands during FIBEX. *Nat. Inst. Pol. Res.*, 16-23.
- Szumińska, D., S. Czapiewski, M. Szopińska and Z. Polkowska. 2018. Analysis of air mass back trajectories with present and historical volcanic activity and anthropogenic compounds to infer pollution sources in the South Shetland Islands (Antarctica). *Bull. Geogr. Phys. Geogr. Ser.*, 15: 111–137.
- Thomas, T. and D. Tetzner. 2019. The climate of the Antarctic Peninsula during the twentieth century: evidence from ice cores. *Antarctica, a key to global change: 403-608*. In: Kanao, M. (Ed.). <https://doi.org/10.5772/intechopen.75265>. eBook (PDF) ISBN: 978-1-83962-109-3.
- 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. Part I: Oceanogr. Res. Pap.*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103278>.
- 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. *Internat. J. Climatol.*, 25: 279-294.
- Turner, J., G.J. Marshall, K. Clem, S. Colwell, T. Phillips and H. Lu. 2019. Antarctic temperature variability and change from station data. *Int. J. Climatol.*, 40: 2986–3007. <https://doi.org/10.1002/joc.6378>.
- Vásquez L. y J. Tenorio. 2016. Oceanografía física y observación de las condiciones ambientales del estrecho de Bransfield y alrededores de la isla Elefante. *Bol. Inst. Mar Perú*, 31(2): 153-160.
- Verona, L. I. Wainer and S. Stevenson. 2019. Volcanically triggered ocean warming near the Antarctic Peninsula. *Scient. Rep.*, 9: 9462. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45190-3>.
- Villegas, N., I. Málíkov and C. Cárdenas. 2018. An initial approximation to the meteo-marine conditions of South Bay (Doumer island) and comparison of the meteorological behaviour between Doumer and Anvers islands, Antarctica (austral summer 2016–2017). *Anal. Inst. Patagonia*, 46: 23–32.

RECIBIDO/RECEIVED: 30/09/2019

ACEPTADO/ACCEPTED: 02/06/2021