

# Variabilidad y tendencia anual de la temperatura del aire en las bases permanentes de Antártida

Nota Técnica SMN 2024-190

**Eugenia Maria Garbarini<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Dirección Central de Monitoreo del Clima. Servicio Meteorológico Nacional.*

Diciembre 2024

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

Diversos estudios han ido documentando cambios sustanciales en las temperaturas antárticas, especialmente en la región de la Península. Dentro de las bases que Argentina es responsable de gestionar en la Antártida, únicamente seis operan de manera permanente, de las cuales Marambio, Esperanza y Orcadas se encuentran en el noreste de la Península Antártica, Carlini y San Martín en el sector occidental de la misma y Belgrano II al sur del mar de Weddell. El objetivo de este trabajo, por lo tanto, es evaluar el comportamiento de la temperatura del aire en dichas bases, llevando a cabo un análisis detallado de la variabilidad, las tendencias de temperatura anual y la ocurrencia de extremos, a partir de datos diarios de temperatura media, mínima y máxima. En líneas generales se destacó un aumento significativo y sostenido de las temperaturas anuales en todas las bases, siendo San Martín la base con las mayores tendencias en las tres variables. A su vez, se examinaron los años con las temperaturas medias, mínimas y máximas más altas y más bajas, revelando patrones consistentes de calentamiento en años recientes, con 2021, 2022 y 2023 destacando como algunos de los más cálidos en la mayoría de las bases. Además, se evaluaron las tendencias de los valores anuales máximos y mínimos de las temperaturas diarias, destacando un calentamiento significativo sobre el noreste de la Península Antártica, especialmente en los máximos anuales de temperatura diaria de Orcadas y Esperanza, y sobre el oeste de la Península en los mínimos anuales de temperatura en San Martín.

## Abstract

Several studies have been documenting substantial changes in Antarctic temperatures, especially in the Peninsula region. Within the bases that Argentina is responsible for managing in Antarctica, only six operate permanently, of which Marambio, Esperanza and Orcadas are located in the northeast of the Antarctic Peninsula, Carlini and San Martín in the western Peninsula and Belgrano II to the south of the Weddell Sea. The aim of this work, therefore, is to assess the behaviour of air temperatures along these bases, carrying out a detailed analysis of the variability, annual temperature trends and the occurrence of extremes, based on daily mean, minimum and maximum temperature data. Results have shown a significant and sustained increase in annual temperatures in all bases, with San Martin revealing the greatest trends in the three variables. In turn, the years with the highest and lowest daily mean, minimum and maximum temperatures were examined, revealing consistent warming patterns in recent years; with 2021, 2022 and 2023 standing out as some of the warmest years in most bases. In addition, the trends of the annual maximum and minimum values of daily temperatures were evaluated, highlighting a significant warming over the northeast Peninsula, especially in the annual maximums of daily temperature in Orcadas and Esperanza, and over the western Peninsula in the annual minimums of daily temperatures in San Martín.

**Palabras clave:** Antártida, temperatura, variabilidad, tendencia

**Citar como:** Garbarini E. M., 2024: Variabilidad y tendencia anual de la temperatura del aire en las bases permanentes de Antártida. Nota Técnica SMN 2024-190.

# 1. INTRODUCCION

El sector antártico desempeña un papel crucial en el equilibrio climático y ecológico a nivel mundial. Además de ser un indicador clave de los cambios climáticos globales, la Antártida actúa como un regulador del clima al influir en los patrones climáticos y la circulación oceánica a escala planetaria. Los campos de hielo también ejercen una influencia significativa en el nivel del mar, lo que afecta a las poblaciones costeras en todo el mundo. En la Antártida, Argentina gestiona trece estaciones, de las cuales seis operan de forma permanente durante todo el año, mientras que las demás sólo funcionan de manera temporal durante el verano. Estas bases, distribuidas en diferentes regiones, proporcionan datos climáticos fundamentales para comprender la variabilidad y los cambios en el clima antártico. Dentro de las bases permanentes, Carlini (anteriormente conocida como base Jubany) y San Martín se encuentran en el sector occidental de la Península Antártica; Marambio, Esperanza y Orcadas en el noreste de la misma y Belgrano II en la Bahía Vahsel, al sur del mar de Weddell.

En las últimas décadas, diversos estudios han investigado la variabilidad interanual y las tendencias en las temperaturas de superficie en la Antártida a partir de datos de estaciones, con el fin de estimar si ha habido cambios sustanciales en las mismas. Estudios como Raper et al. (1984), Jacka y Budd (1991, 1998), han identificado cambios climáticos significativos pero éstos no son uniformes en todas las áreas ni en el tiempo. Autores como King (1994); Vaughan et al., (2001, 2003); Turner et al., (2005) y Clem y Fogt, (2015), documentaron tendencias de calentamiento a lo largo de la Península Antártica occidental particularmente en invierno y primavera, mientras que Skvarca et al. (1998); y Orr et al., (2008), observaron un calentamiento significativo sobre el noreste de la Península desde mediados de 1950, especialmente durante el verano, aunque la tasa de calentamiento ha disminuido en décadas recientes (Clem y Fogt, 2015).

El estudio de la ocurrencia de extremos climáticos ha sido de gran interés en los últimos tiempos, particularmente siendo abordado por los reportes llevados a cabo por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) que proporcionan una revisión y evaluación de la relación entre los extremos climáticos, sus impactos y las estrategias para gestionar los peligros asociados a ellos. Dentro de los grupos internacionales que han avanzado en el conocimiento y estudio de los cambios globales de los extremos climáticos, el Grupo Experto en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI: <http://www.clivar.org/organization/etccdi>) ha formulado una serie de índices calculados a partir de datos diarios de temperatura y de precipitación, con el fin de analizar y monitorear la ocurrencia de extremos de manera global. Dichos estudios basados en extremos de temperatura, al ser ampliamente dependientes de la distribución geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas, su longitud y completitud, se han centrado principalmente en el sur de América del Sur. La mayoría de los análisis muestran cambios observados en las temperaturas extremas consistentes con el calentamiento en todo el continente, pero con ciertas variaciones regionales (Vincent et al., 2005). Sin embargo, si bien los índices basados en la temperatura mínima registrada durante el día (es decir nocturna) han registrado un calentamiento progresivo, los basados en la temperatura máxima diaria (o sea diurna) o bien muestran pocos cambios o bien se han enfriado en el sur de América del Sur (Rusticucci, 2012). En la región Antártica, Zazulie y otros (2010) estudiaron en profundidad los cambios en la base Orcadas a partir de registros de temperatura diaria y demostraron la presencia de un calentamiento estadísticamente significativo en las cuatro estaciones del año desde 1950, donde el calentamiento de los extremos fríos excede sustancialmente el calentamiento de la media o de los días más cálidos.

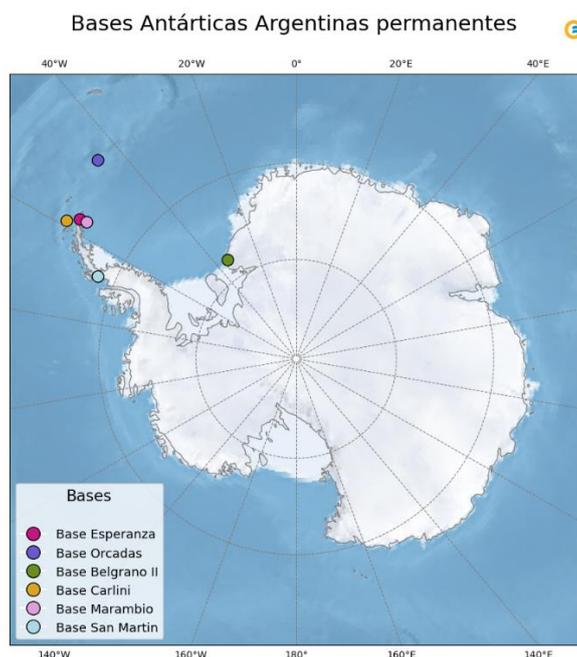
En este contexto, la presente Nota Técnica se propone explorar el comportamiento de la temperatura media, máxima y mínima en las bases antárticas argentinas permanentes en términos de su variabilidad, tendencia y extremos con el fin de documentar los posibles cambios en los registros haciendo énfasis en los cambios a nivel anual.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio, se tuvieron en cuenta datos diarios de temperatura media, máxima y mínima para las seis bases permanentes gestionadas por Argentina (Tabla I, Figura 1).

**Tabla I:** Datos de las bases antárticas argentinas en operación permanente consideradas en este estudio.

N° Estación	N° OMM	Nombre	Lat. (°)	Lon. (°)	Altura (m)	Período de registro
10770	88963	Base Esperanza	-63,39	-56,99	24	1/1/1961 a 31/12/2023
10771	88968	Base Orcadas	-60,73	-44,73	12	3/1/1951 a 31/12/2023
10777	89034	Base Belgrano II	-77,87	-34,62	256	1/4/1980 a 31/12/2023
10781	89053	Base Carlini	-62,23	-58,66	11	1/5/1985 a 31/12/2023
10783	89055	Base Marambio	-64,24	-56,62	198	1/1/1971 a 31/12/2023
10793	89066	Base San Martín	-68,13	-67,10	7	1/3/1976 a 31/12/2023



**Figura 1:** Mapa de la distribución geográfica de las bases antárticas argentinas en operación permanente consideradas para el estudio.

En todos los casos, los datos pasaron por un control interno previo, el cual analiza y compara los datos observados con los reportados por las bases y los corrige manualmente en caso de ser necesario. Es importante tener en cuenta que todas las bases presentaron datos faltantes en todas sus variables reportadas en distintos periodos de tiempo, posiblemente por problemas en el envío de libretas meteorológicas o bien por periodos en los que pudieron haber estado cerradas momentáneamente. El porcentaje de datos diarios faltantes no superó el 10%, a excepción de la serie de temperatura media diaria en Orcadas, que presentó un

11%. Para los subsiguientes análisis se completaron dichos faltantes diarios con los valores medios mensuales correspondientes.

A partir de ello, se calcularon las series anuales de temperatura media, mínima y máxima promedio para cada locación. Para cada una de estas series temporales se estimó la tendencia lineal a través del método de regresión lineal de Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968), el cual propone una recta de regresión lineal de la forma:

$$Y = M X + B \quad (1)$$

Donde M es la pendiente de la recta de regresión lineal calculada tomando la mediana de las pendientes  $m_{i,j}$  entre los pares de puntos de datos  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$  calculadas individualmente como:

$$m_{i,j} = \frac{(y_j - y_i)}{(x_j - x_i)} \quad \text{Si } x_i \neq x_j \quad (2)$$

Y donde B es la ordenada al origen de la recta calculada de forma análoga, es decir, tomando la mediana de las ordenadas al origen  $b_i$  calculadas previamente resolviendo para cada punto  $(x_i, y_i)$  la ecuación:

$$y_i = m x_i + b_i \quad (3)$$

Este método no paramétrico presenta ciertas ventajas frente a otros métodos frecuentemente utilizados ya que es particularmente poco sensible a outliers y no exige la hipótesis de distribución Normal de los datos, lo que lo vuelve más robusto.

A su vez, la significancia de dichas tendencias lineales fue testeada a través del test no paramétrico de tendencia de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) el cual propone como hipótesis nula ( $H_0$ ) que no hay tendencia presente en los datos y como hipótesis alternativa ( $H_a$ ) que los datos presentan una tendencia, la cual puede ser positiva o negativa. Para este estudio se tomó un nivel de significancia de 5% para realizar dicho test, por lo que si el p-valor que se desprende del test es menor que 0.05 entonces  $H_0$  es rechazada y hay evidencia estadística significativa para afirmar que los datos presentan una tendencia lineal con un 95% de confianza.

Para el estudio de la ocurrencia de extremos de temperatura, en primera instancia se elaboraron los rankings de los diez años con mayores y con menores valores de temperatura media, mínima y máxima a partir de las series de promedios anuales. Por otro lado, siguiendo la definición de los índices de extremos de temperatura definidos por ETCCDI, para cada base antártica se calcularon las series de máximo y mínimo valor anual de la temperatura máxima diaria y de la temperatura mínima diaria (TXx, TXn, TNx y TNn respectivamente, o como se denominaron en este estudio: TMAX máx., TMAX mín., TMIN máx. y TMIN mín.). Esto también se replicó para la temperatura media (TMED máx. y TMED mín.) con el fin de caracterizar de forma análoga los extremos de esta variable. Este cálculo se realizó para aquellos años en los que hubiera menos de 10% de datos faltantes, a modo de evitar que los valores extremos seleccionados sean característicos de una temporada del año en particular. Los años que no cumplieron dicho criterio fueron omitidos para la construcción de estas series temporales y figuran como dato faltante de las mismas. A dichas series anuales se les calculó su tendencia lineal y se testeó la significancia estadística repitiendo el procedimiento antes mencionado. Este análisis permite profundizar en el estudio de la ocurrencia de los máximos diarios de temperatura y los posibles cambios presentes en su intensidad a lo largo de los años.

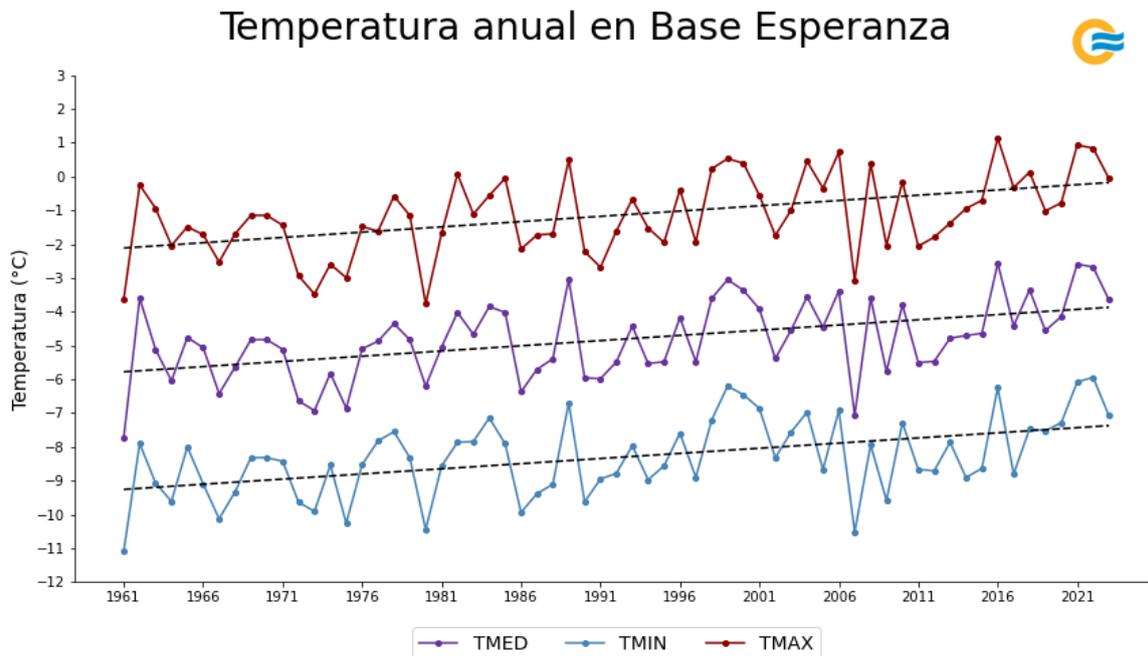
### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis del comportamiento anual de la temperatura

A partir de las series anuales de temperatura media, mínima y máxima se calcularon la media y el desvío para cada base antártica (Tabla II). A su vez, se graficaron las series anuales de temperatura media, mínima y máxima para las seis bases antárticas (Figuras 2 a 7) junto a sus correspondientes rectas de regresión lineal y su test de significancia (Tabla III).

**Tabla II:** Valores medios anuales para cada base junto a su desvío estándar entre paréntesis.

Base Antártica	TMED (°C)	TMIN (°C)	TMAX (°C)
Esperanza	-4.83 (1.16)	-8.31 (1.17)	-1.14 (1.18)
Orcadas	-3.25 (0.84)	-6.19 (1.14)	-0.41 (0.75)
Belgrano II	-13.29 (0.83)	-17.36 (0.86)	-9.87 (0.85)
Carlini	-1.65 (0.80)	-4.00 (0.95)	0.63 (0.68)
Marambio	-8.26 (1.31)	-11.56 (1.24)	-4.64 (1.35)
San Martín	-4.70 (1.38)	-8.37 (1.63)	-1.35 (1.23)



**Figura 2:** Promedio anual de la temperatura media (violeta), temperatura mínima (azul) y temperatura máxima (rojo) junto a sus correspondientes rectas de regresión lineal (línea punteada) para la Base Esperanza.

### Temperatura anual en Base Orcadas

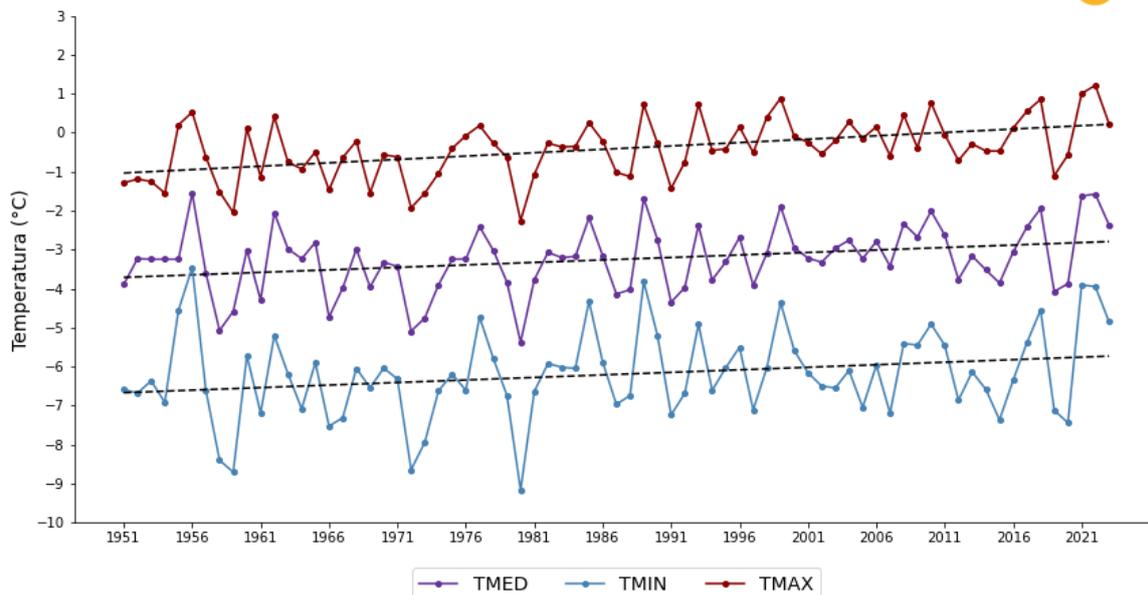


Figura 3: Ídem Figura 2 para la Base Orcadas.

### Temperatura anual en Base Belgrano II

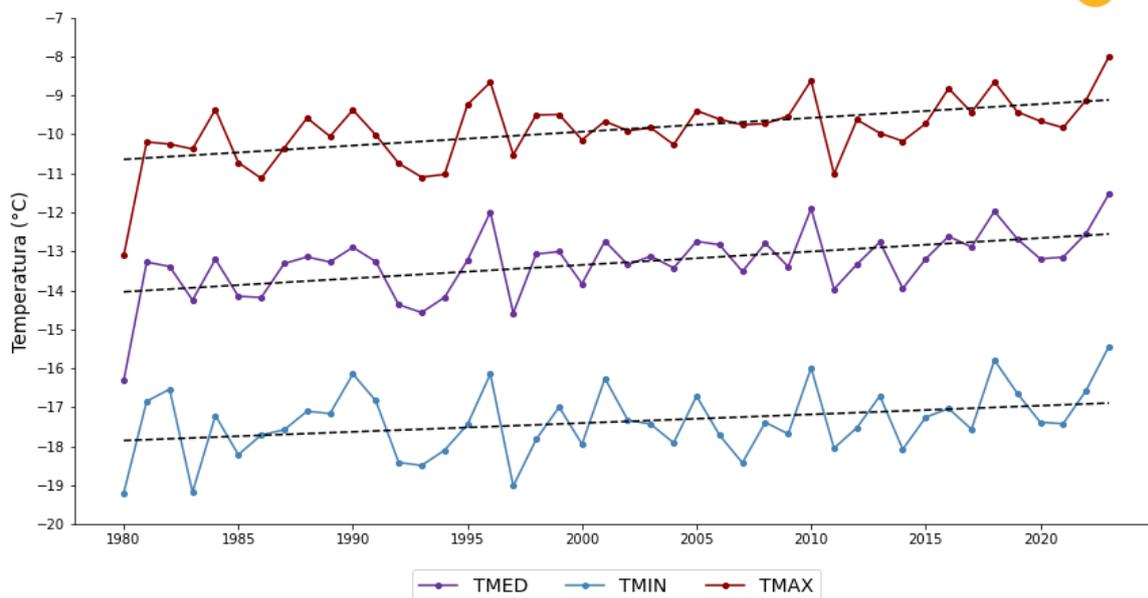


Figura 4: Ídem Figura 2 para la Base Belgrano II.

## Temperatura anual en Base Carlini

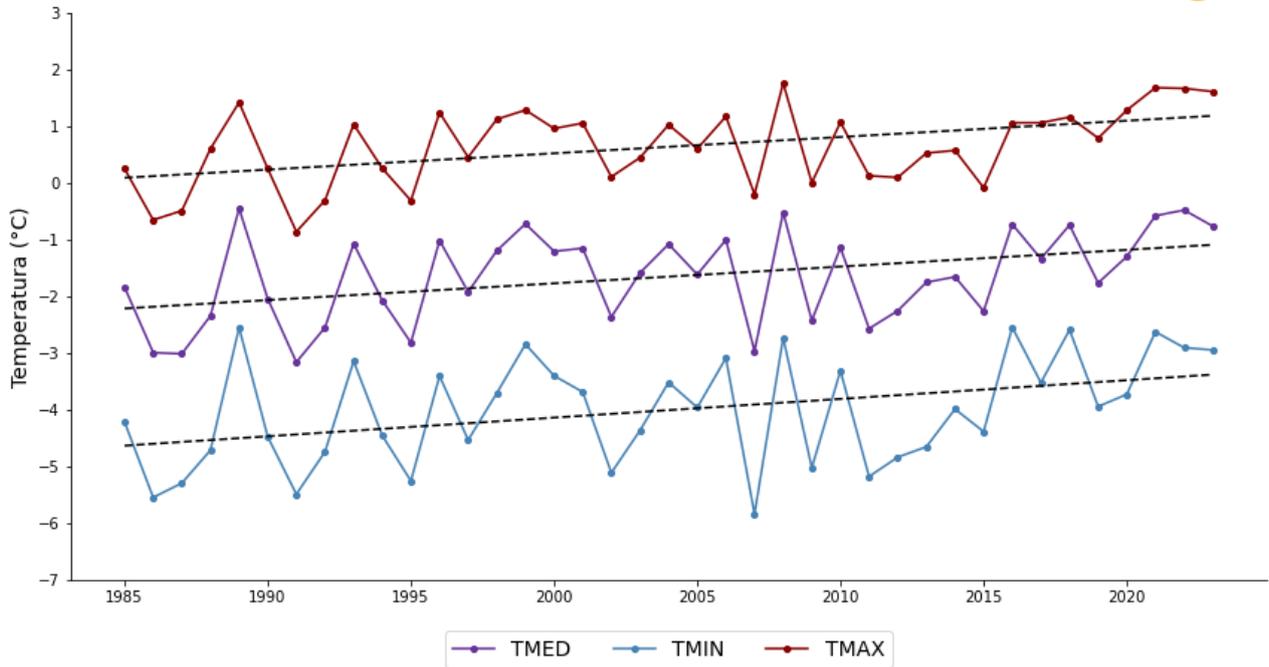


Figura 5: Ídem Figura 2 para la Base Carlini.

## Temperatura anual en Base Marambio

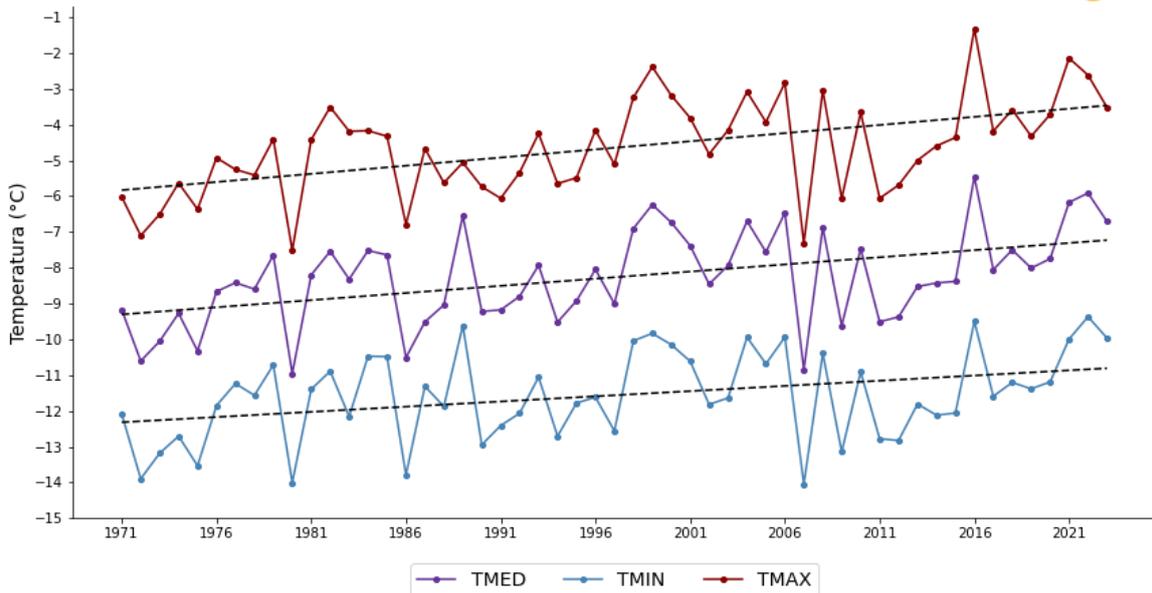
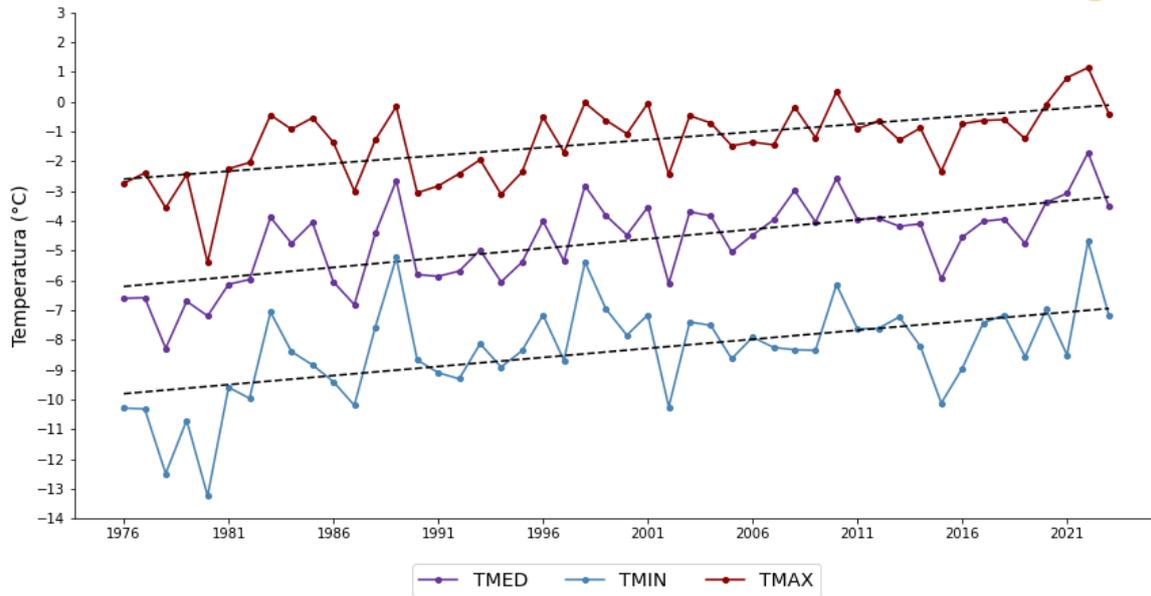


Figura 6: Ídem Figura 2 para la Base Marambio.

## Temperatura anual en Base San Martín



**Figura 7:** Ídem Figura 2 para la Base San Martín.

**Tabla III:** Valores de la ecuación de regresión lineal y su correspondiente p-valor y resultado del test de significancia de la pendiente considerando un 95% de confianza.

Base Antártica	Variable	Ecuación de regresión lineal	p-valor	Significancia al 95%
Esperanza	TMED	$0.03 x - 5.87$	$8.4 \times E-05$	<b>Significativa</b>
	TMIN	$0.03 x - 9.28$	0.0003	<b>Significativa</b>
	TMAX	$0.03 x - 2.12$	0.0003	<b>Significativa</b>
Orcadas	TMED	$0.01 x - 3.68$	0.0046	<b>Significativa</b>
	TMIN	$0.01 x - 6.64$	0.0599	No Significativa
	TMAX	$0.02 x - 1.04$	$2.7 \times E-05$	<b>Significativa</b>
Belgrano II	TMED	$0.03 x - 13.76$	0.0002	<b>Significativa</b>
	TMIN	$0.02 x - 17.84$	0.0463	<b>Significativa</b>
	TMAX	$0.03 x - 10.34$	0.0008	<b>Significativa</b>
Carlini	TMED	$0.03 x - 2.18$	0.0145	<b>Significativa</b>
	TMIN	$0.03 x - 4.61$	0.0127	<b>Significativa</b>
	TMAX	$0.03 x + 0.02$	0.0046	<b>Significativa</b>
Marambio	TMED	$0.04 x - 9.44$	0.0004	<b>Significativa</b>
	TMIN	$0.03 x - 12.40$	0.0081	<b>Significativa</b>
	TMAX	$0.05 x - 5.68$	$6.85 \times E-05$	<b>Significativa</b>
San Martín	TMED	$0.07 x - 6.01$	$6.59 \times E-05$	<b>Significativa</b>

TMIN	0.06 x – 9.73	0.0002	<b>Significativa</b>
TMAX	0.05 x – 2.42	3.86 x E-05	<b>Significativa</b>

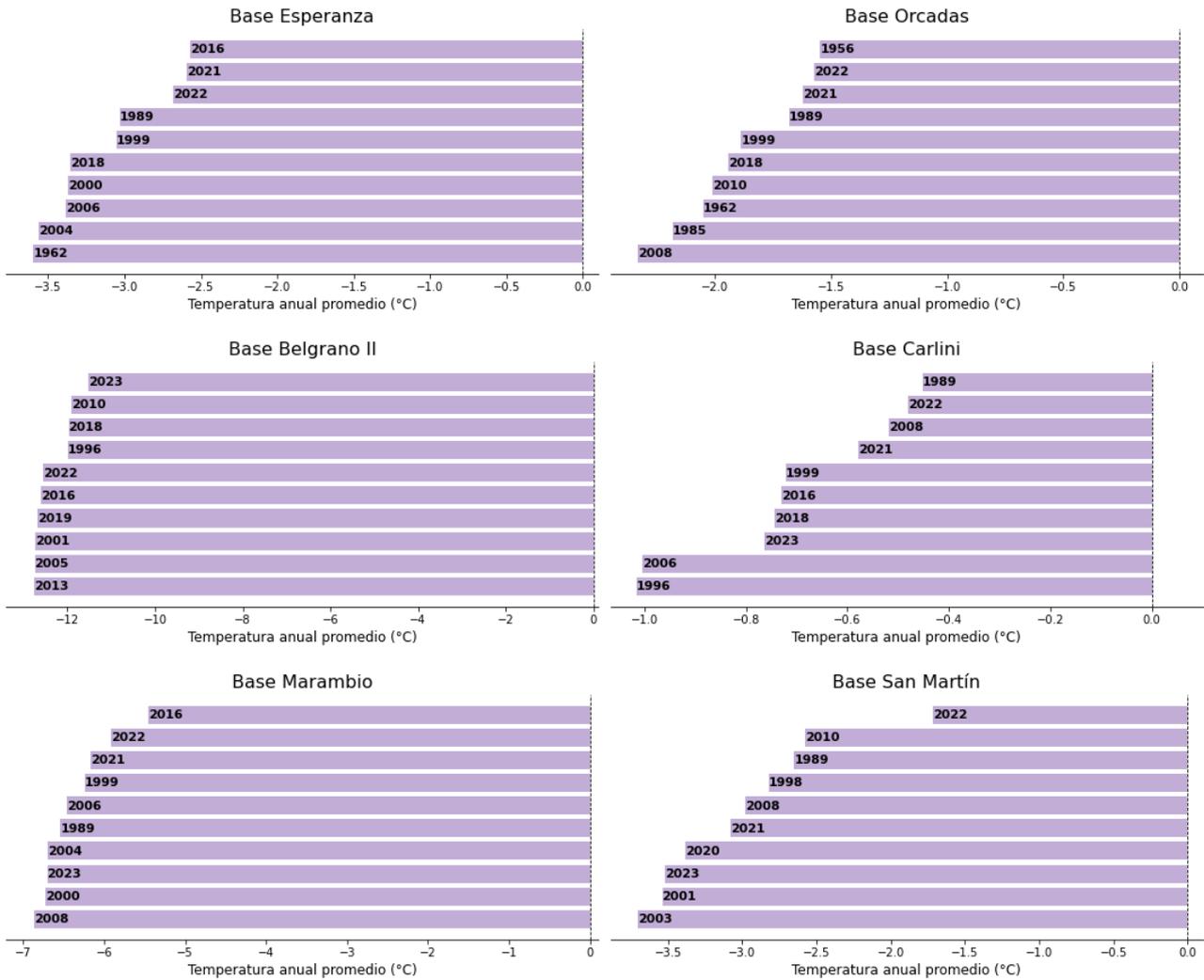
En primera instancia, se puede observar que Carlini es la base más cálida (en términos de las tres temperaturas) y a la vez la que presenta menor variabilidad anual (en términos de temperatura media y máxima). Belgrano II, y en concordancia a su emplazamiento (Figura 1) es la base más fría en términos anuales. Tanto Marambio como San Martín presentan mayor variabilidad anual en sus temperaturas, y a pesar de que Marambio se encuentra más al norte que San Martín, y posiblemente debido a su localización y su altura, presenta condiciones anuales más frías en sus tres temperaturas.

Por otro lado, es importante destacar que en todas las bases las temperaturas anuales han ido registrando un aumento sostenido y significativo con un 95% de confianza (a excepción de la temperatura mínima anual en Orcadas donde el aumento no es significativo). La tendencia creciente en las temperaturas es máxima en San Martín, donde las pendientes de las rectas de regresión lineal presentaron los mayores valores, especialmente en la temperatura media. En Marambio también se registraron las mayores tendencias anuales, principalmente en la temperatura máxima. En líneas generales, los máximos locales parecen ocurrir con mayor frecuencia desde la década de 2010 en adelante, aunque no se descartan algunos máximos de temperatura en décadas previas como por ejemplo el año 1989 en San Martín, Esperanza, Marambio y Carlini, 1956 en Orcadas y 1962 en Esperanza. Análogamente, y en concordancia con la tendencia lineal encontrada, los mínimos de temperatura más intensos suelen estar distribuidos hacia el comienzo del registro, aunque no se descarta la ocurrencia de algún mínimo local/absoluto en la década del 2000 y hacia adelante, como es el caso del año 2007 en las bases Marambio, Carlini y Esperanza. La ocurrencia de dichos años extremos se analizará con mayor profundidad en la siguiente sección.

## 3.2 Análisis de los extremos de temperatura

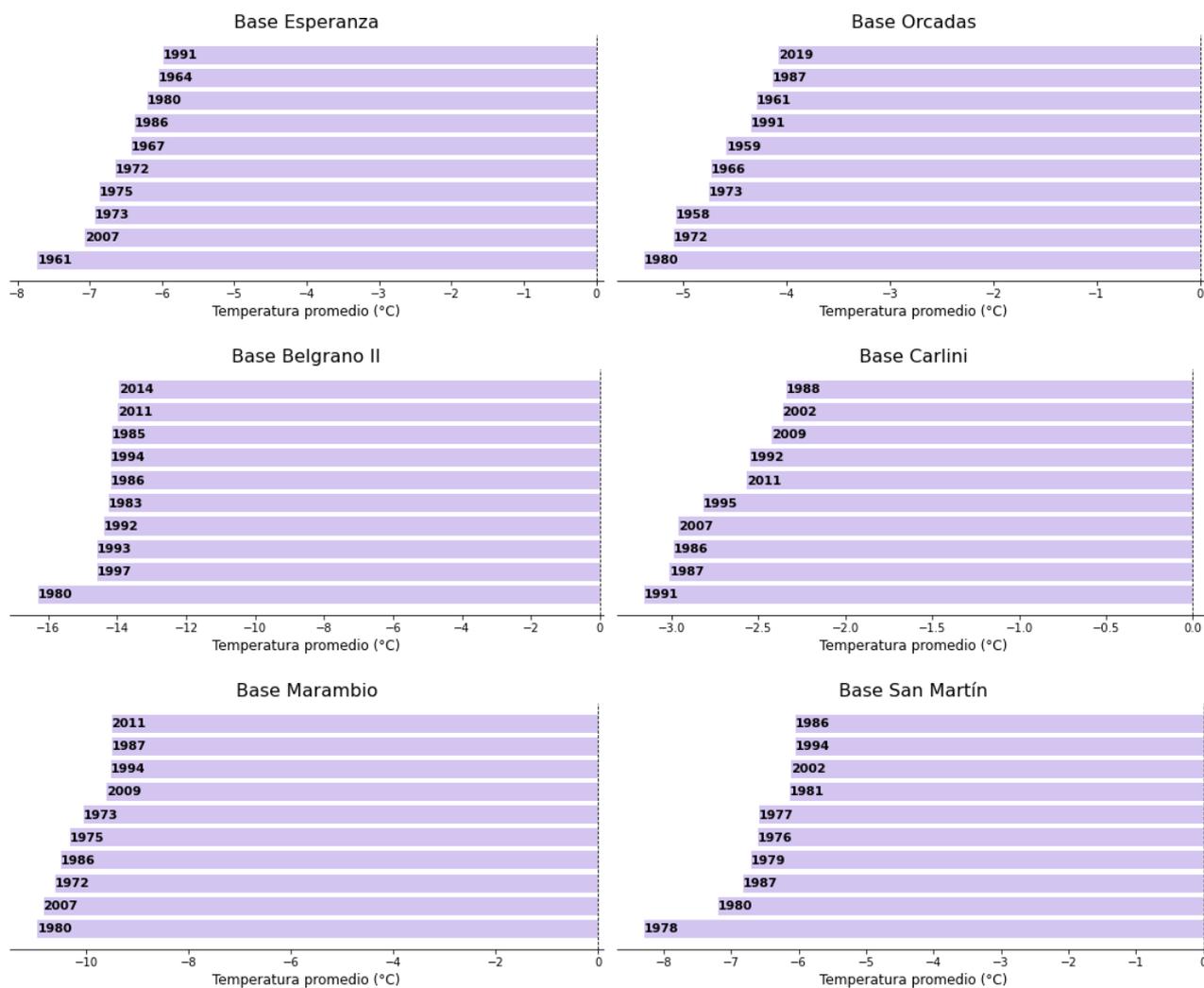
A partir de las series de promedios anuales se elaboraron los rankings de los diez años con mayores y con menores temperaturas media anual (Figuras 8 y 9), mínima anual (Figuras 10 y 11), y máxima anual (Figuras 12 y 13).

# Años más cálidos en Temperatura Media



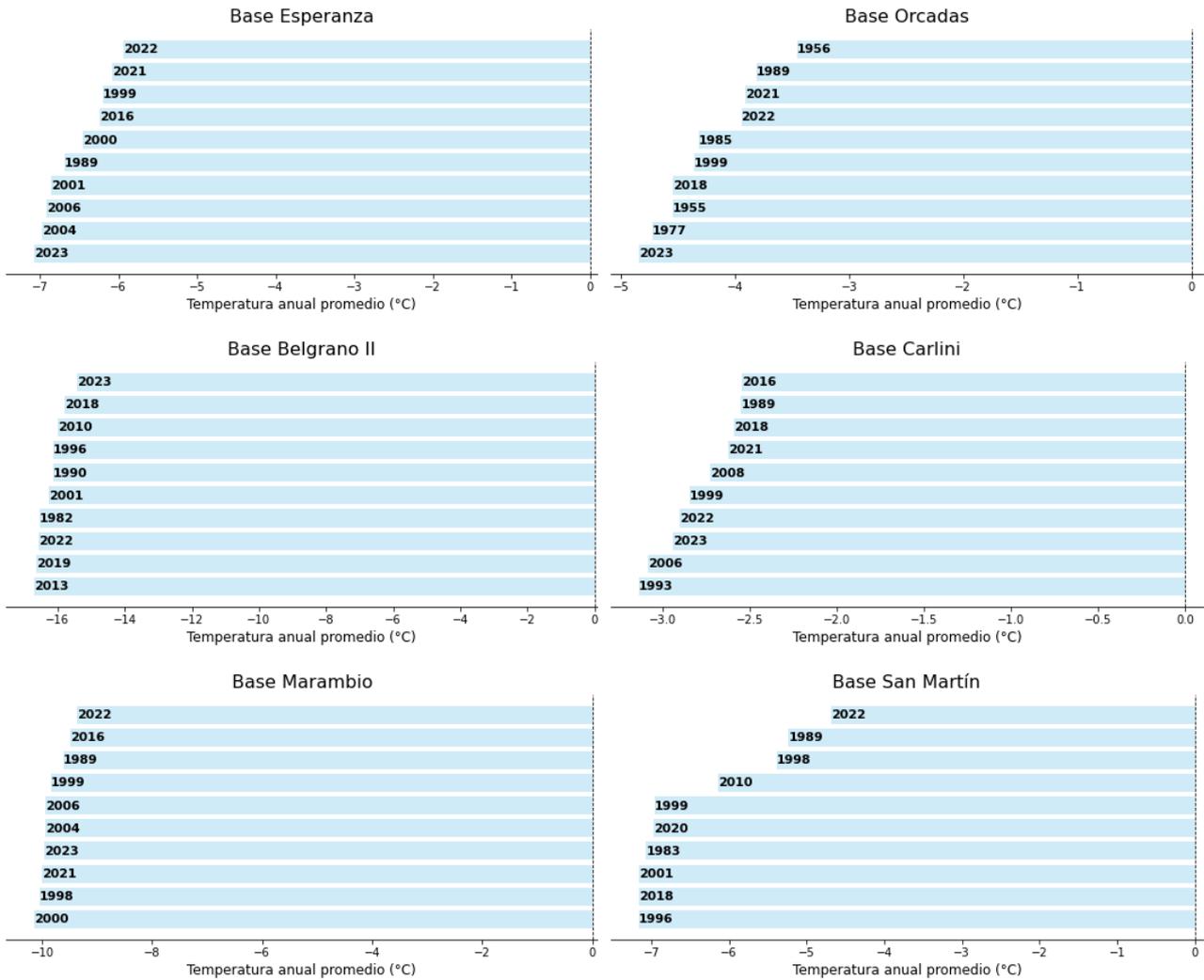
**Figura 8:** Top 10 años con mayores temperaturas medias anuales para las bases antárticas de estudio.

## Años más fríos en Temperatura Media



**Figura 9:** Top 10 años con menores temperaturas medias anuales para las bases antárticas de estudio.

# Años más cálidos en Temperatura Mínima



**Figura 10:** Top 10 años con mayores temperaturas mínimas anuales para las bases antárticas de estudio.

# Años más fríos en Temperatura Mínima

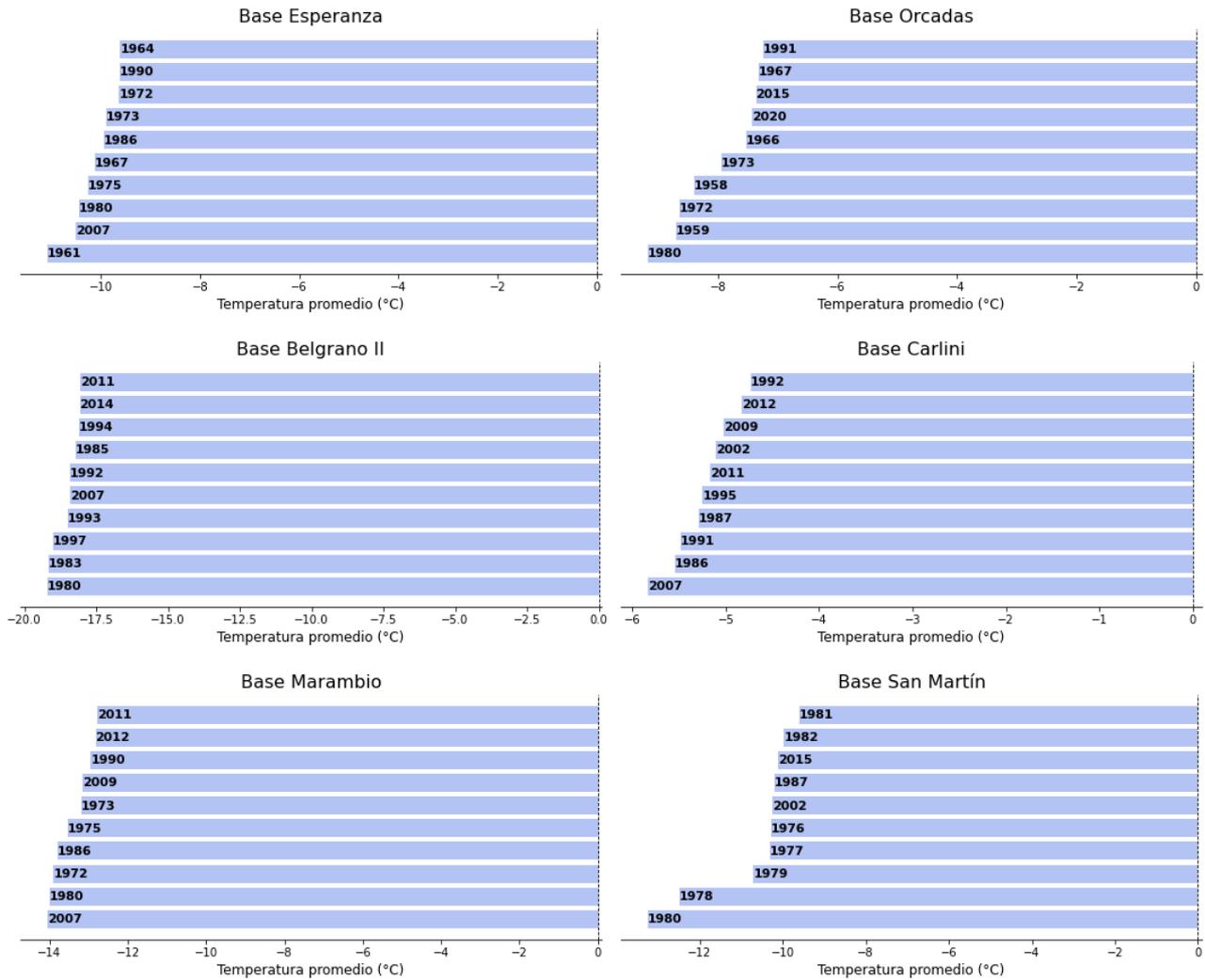
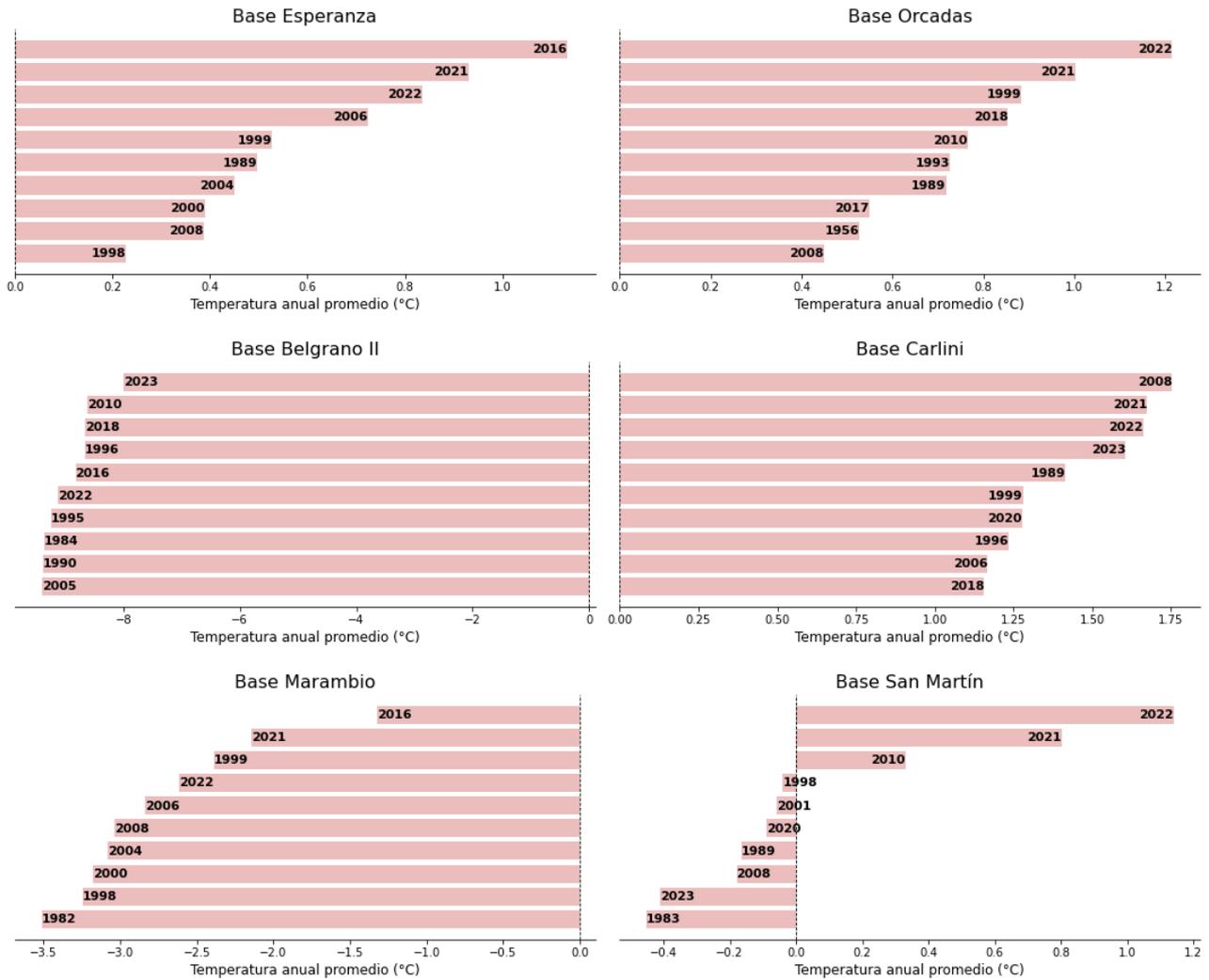


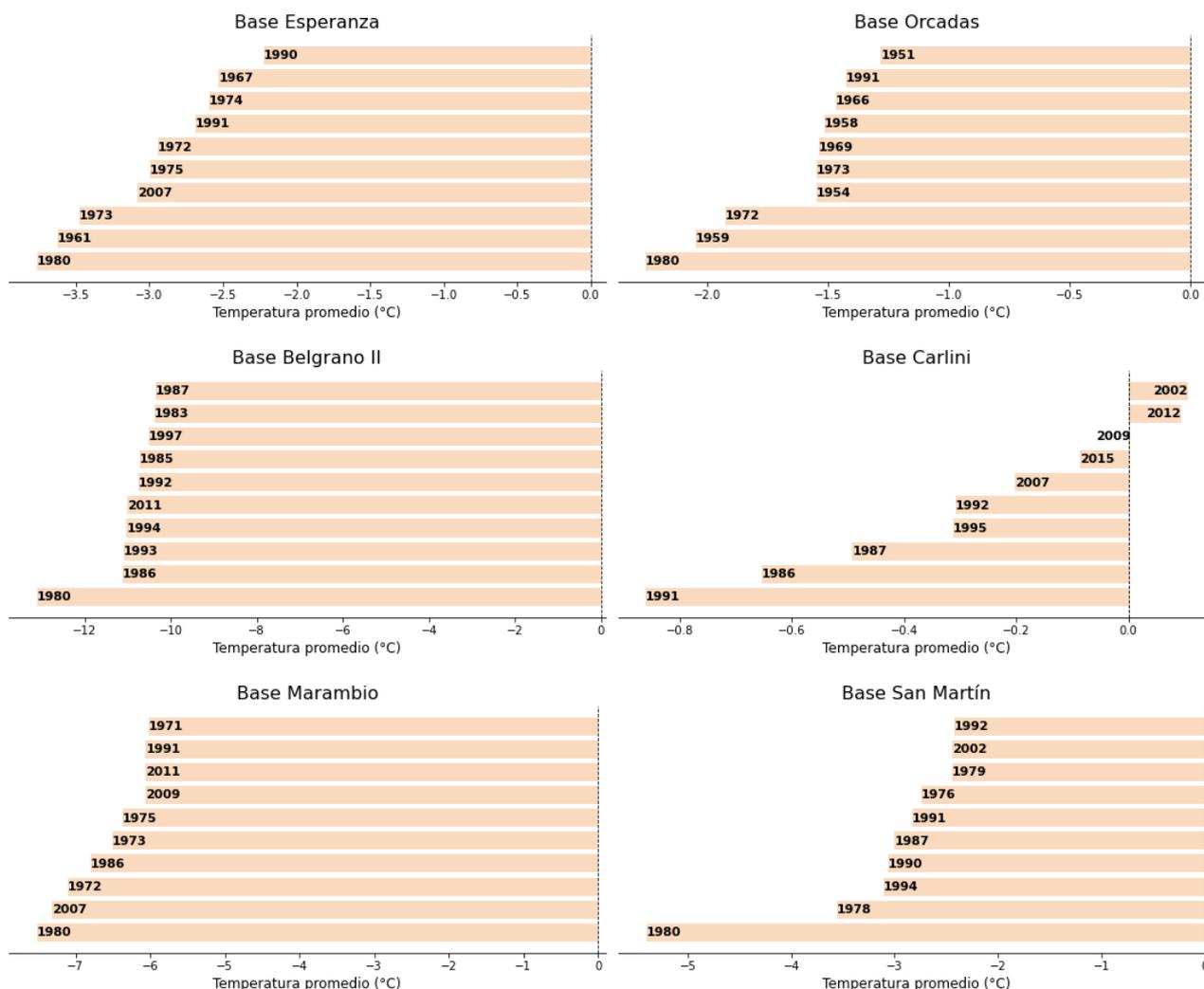
Figura 11: Top 10 años con menores temperaturas mínimas anuales para las bases antárticas de estudio.

## Años más cálidos en Temperatura Máxima



**Figura 12:** Top 10 años con mayores temperaturas máximas anuales para las bases antárticas de estudio.

## Años más fríos en Temperatura Máxima



**Figura 13:** Top 10 años con menores temperaturas máximas anuales para las bases antárticas de estudio.

En Esperanza, en términos de las tres temperaturas, se observa una tendencia al aumento de la temperatura en los años recientes, destacando 2016, 2021 y 2022 como los más cálidos y como los años más fríos, a excepción de 2007, a aquellos anteriores a 1991; lo cual coincide con el análisis previo de tendencia lineal creciente. En la Base Orcadas, 2022 y 2021 destacan como los años cálidos recientes en términos de temperatura media y máxima, mientras que 1956 fue el más cálido en el pasado. Dentro de los años más fríos, los más recientes son 2019 y 2020 en términos de temperatura media y mínima respectivamente. En cuanto a la temperatura máxima, los años más fríos son todos anteriores a 1991. La Base Belgrano II experimenta un aumento en la temperatura media, siendo 2023 el año más cálido, seguido por 2010 y 2018, además de que es importante notar que la mayoría de los años clasificados como tales son posteriores a 1996. Estos años también componen el ranking de los más cálidos en términos de temperatura máxima y mínima. A su vez, los años más fríos recientes son 2011 en las tres temperaturas y también 2014 en temperatura mínima y media, mientras que 1980 es el más frío del registro. En la Base Carlini también se evidencia un aumento de las temperaturas reciente, siendo 2021, 2022 y 2023 catalogados como parte de los años más cálidos en las tres temperaturas. Por otro lado, dentro de los años fríos más recientes se destacan 2007, 2009 y 2011 y previo a ello los años 1991 y 1987. Marambio también muestra un aumento en las

temperaturas en los últimos años, destacando 2016, 2022 y 2021 comunes a las tres variables y, además el año 2023 en temperatura media y mínima. Análogamente a Carlini, dentro de los años fríos más recientes se encuentran 2007, 2009 y 2011. Además, de forma semejante a Belgrano II, el año 1980 figura como el más frío del registro en temperatura media y máxima, superado únicamente por el 2007 en temperatura mínima. En San Martín, al igual que en Carlini, los últimos tres años fueron catalogados como los más cálidos en las tres temperaturas, especialmente el año 2022. En cuanto a los años más fríos, a excepción de 2015 en la temperatura mínima y de 2002 en las tres temperaturas, los años que componen los rankings fríos pertenecen al siglo XX.

Si bien la variabilidad en la ocurrencia de años más fríos y más cálidos puede estar relacionada con eventos climáticos extremos y/o con el efecto conjunto de distintos fenómenos climáticos de gran escala, es importante notar que desde la década de 2000 en adelante se evidencia una mayor frecuencia de años cálidos en todas las bases en comparación con décadas anteriores, lo que sustenta la tendencia al calentamiento en la región antártica mencionada anteriormente.

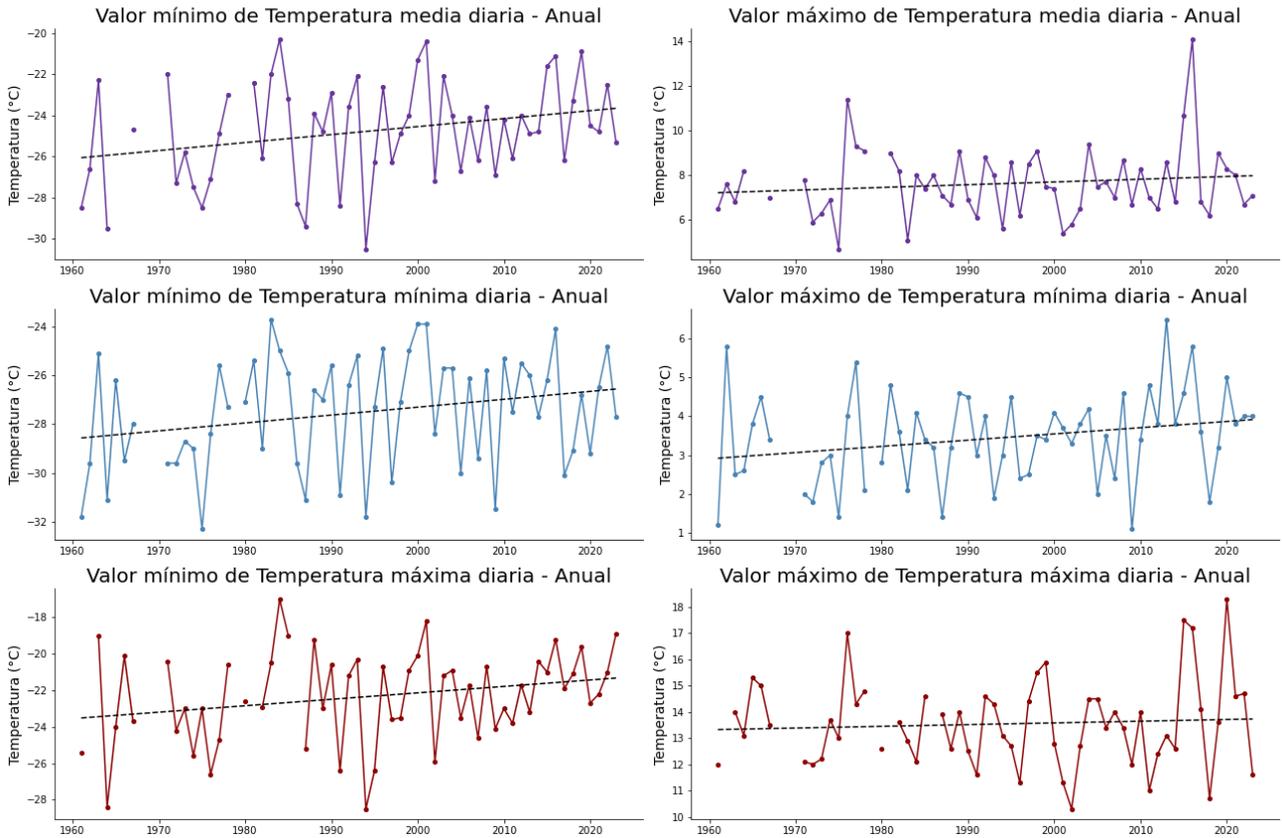
A continuación se analizaron las series de máximo y mínimo valor anual de las temperaturas media, mínima y máxima diarias para todas las bases (Tabla IV y Figuras 14 a 19) junto con el análisis de tendencia lineal (Tabla V).

**Tabla IV:** Valor medio y desvío estándar (entre paréntesis) de las series de máximo y mínimo valor anual de las temperaturas media, mínima y máxima diarias promediados sobre el periodo completo de registro según lo especificado en la Tabla I.

Base Antártica	TMED (°C)		TMIN (°C)		TMAX (°C)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Esperanza	-24.7 (2.4)	7.6 (1.5)	-27.5 (2.3)	3.4 (1.1)	-22.3 (2.5)	13.5 (1.6)
Orcadas	-25.8 (3.1)	4.8 (1.1)	-29.8 (3.3)	2.1 (1.1)	-22.6 (3.2)	9.6 (1.6)
Belgrano II	-35.1 (2.1)	2.5 (1.5)	-40.8 (2.5)	-1.1 (0.9)	-31.2 (2.1)	6.8 (1.5)
Carlini	-17.8 (3.3)	6.1 (1.2)	-20.7 (2.9)	3.5 (0.6)	-15.4 (3.5)	10.1 (1.5)
Marambio	-29.5 (2.3)	6.6 (1.7)	-32.1 (2.1)	2.8 (1.4)	-27.2 (2.4)	11.5 (2.1)
San Martín	-28.3 (5.4)	5.9 (1.0)	-33.9 (5.7)	3.2 (1.1)	-24.6 (5.4)	9.9 (1.5)

En términos generales, Belgrano II registra los promedios más bajos de máximos y mínimos valores anuales en las tres variables, lo cual coincide con su locación. Por otro lado, en Carlini se ven en promedio los valores anuales mínimos más cálidos mientras que en Esperanza se observan los máximos valores anuales de temperatura máxima diaria más cálidos. Además, San Martín presenta mayor variabilidad en las series de mínimo valor anual de temperatura mínima y máxima diaria. De forma contraria, Marambio y Belgrano II presentan menor variabilidad que el resto de las bases en los mínimos valores anuales de temperatura mínima y de temperatura media y máxima respectivamente. Por último, Carlini presenta menor variabilidad en las series de máximos valores anuales de temperatura mínima y máxima diaria.

# Base Esperanza



**Figura 14:** Series anuales de valores mínimos (paneles de lado izquierdo) y valores máximos (paneles de lado derecho) para temperatura diaria media (violeta), mínima (celeste) y máxima (rojo) junto a su tendencia lineal (línea negra punteada) para la Base Esperanza.

# Base Orcadas

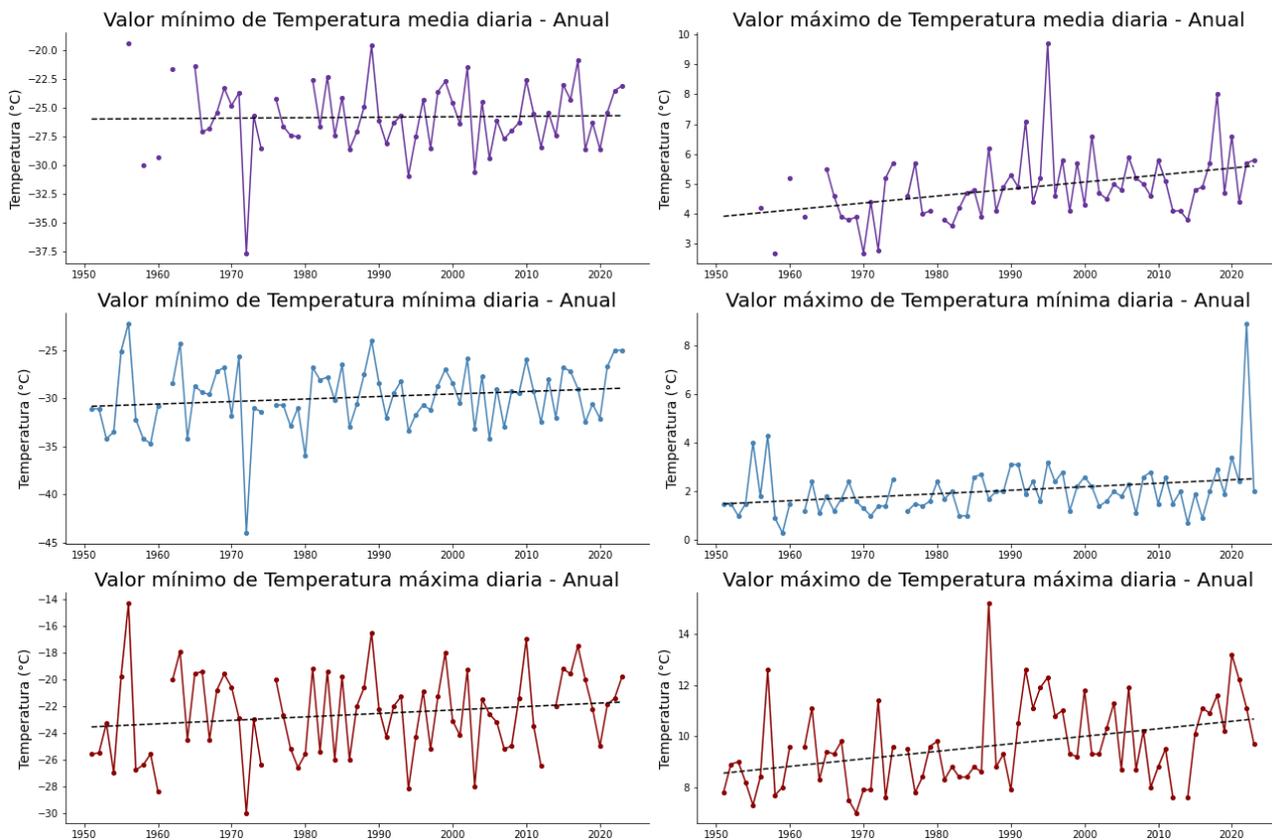


Figura 15: Ídem Figura 14 para la Base Orcadas.

# Base Belgrano II

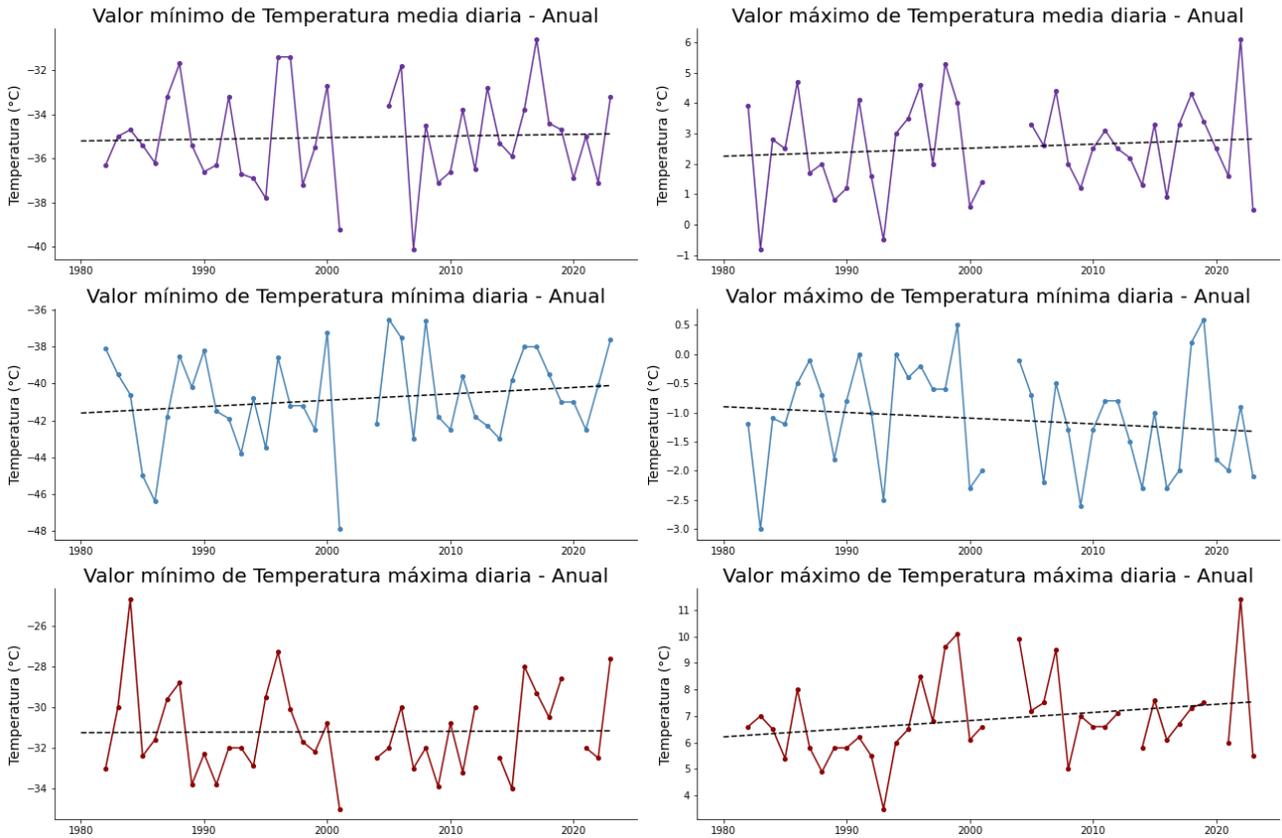


Figura 16: Ídem Figura 14 para la Base Belgrano II.

# Base Carlini

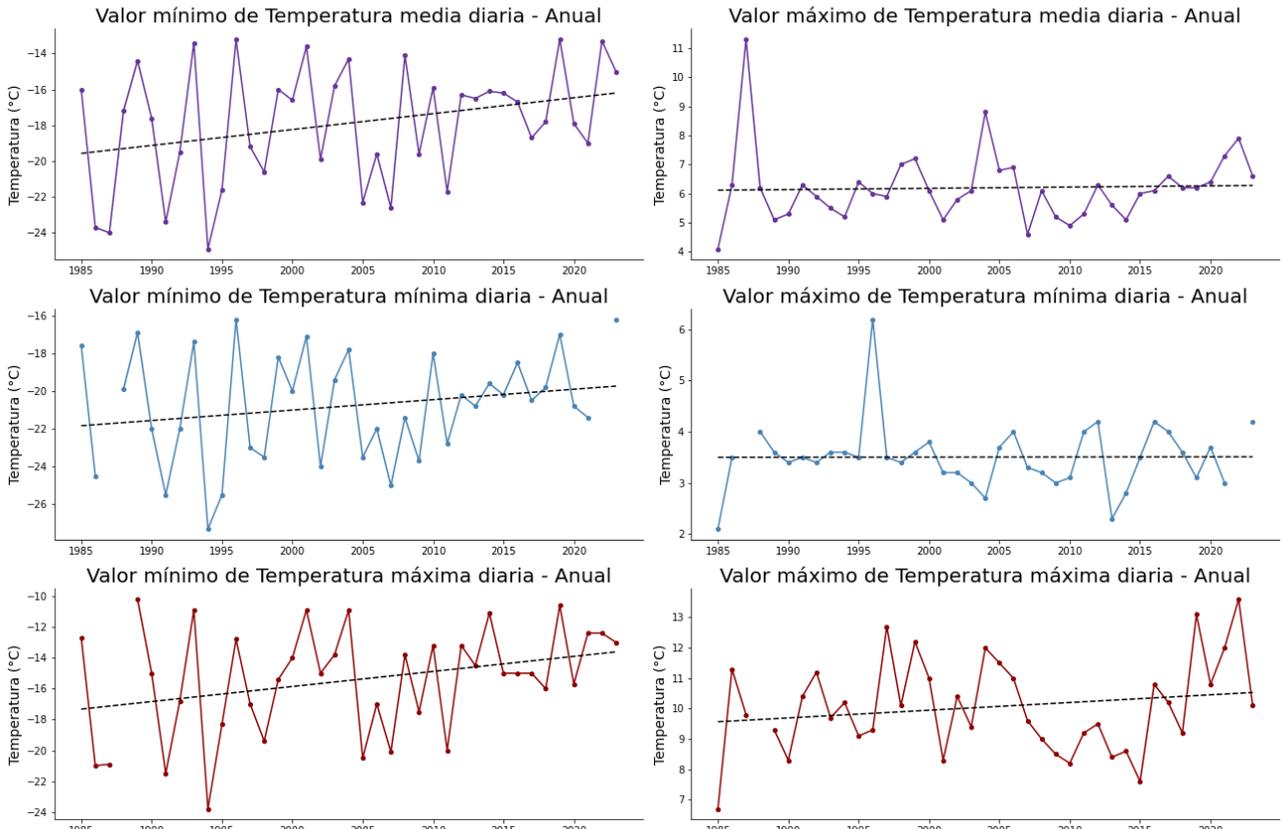


Figura 17: Ídem Figura 14 para la Base Carlini.

# Base Marambio

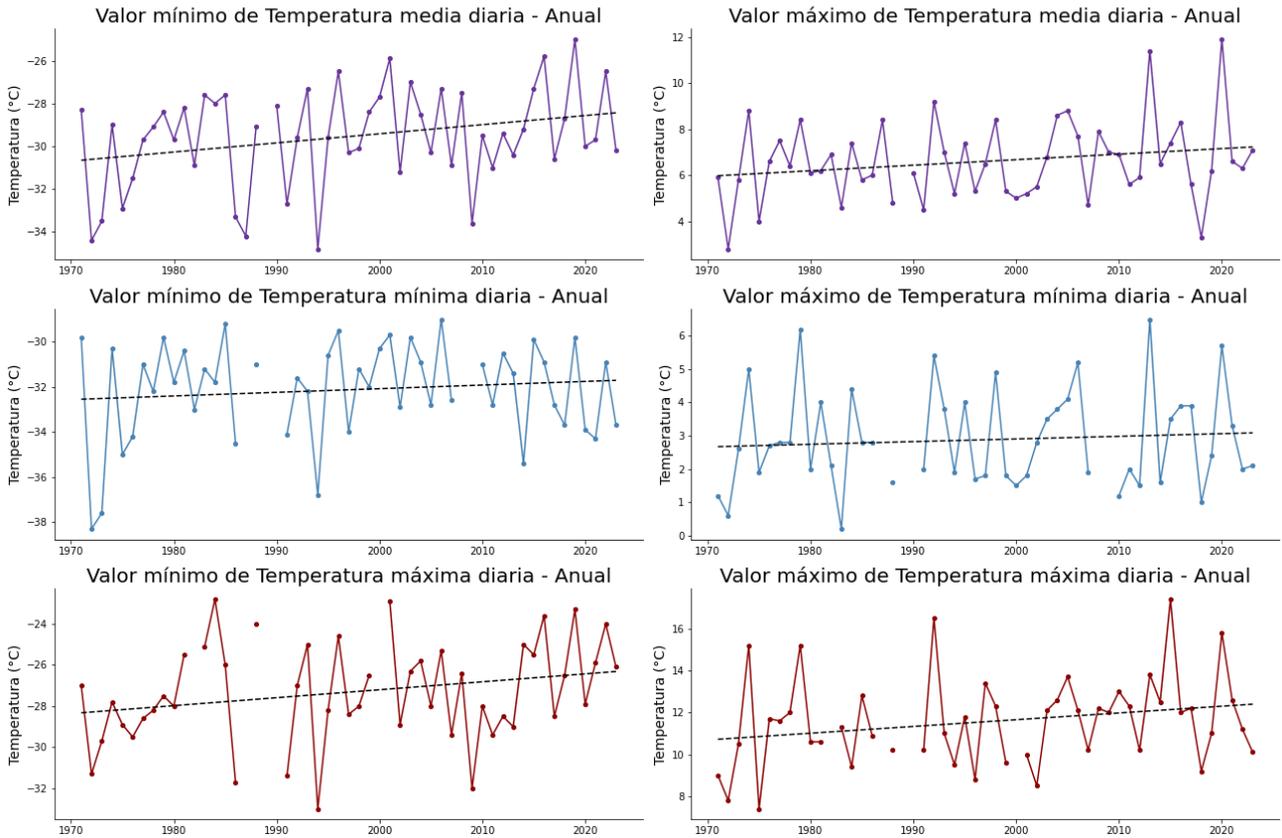
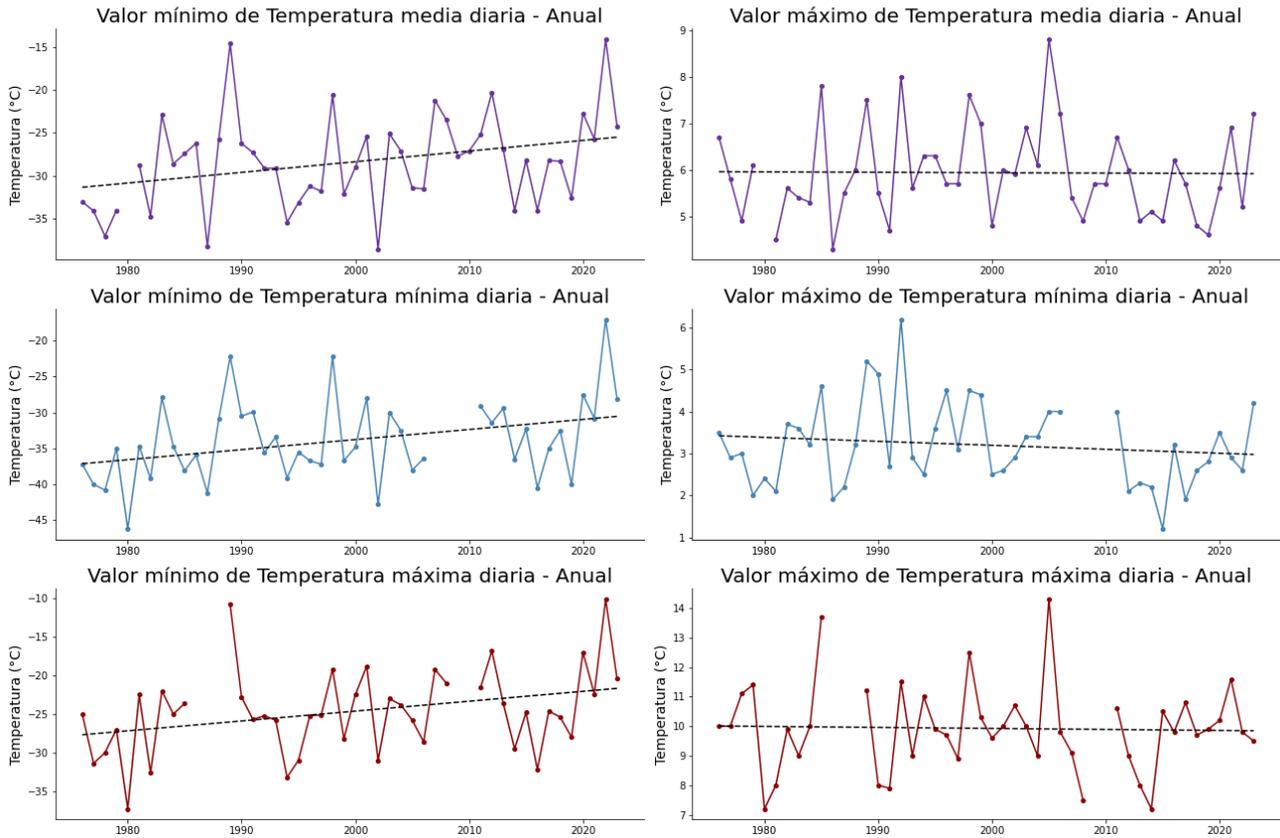


Figura 18: Ídem Figura 14 para la Base Marambio.

## Base San Martín



**Figura 19:** Ídem Figura 14 para la Base San Martín.

**Tabla V:** Valores de la ecuación de regresión lineal y su correspondiente p-valor y resultado del test de significancia de la pendiente considerando un 95% de confianza para las series anuales de valores máximos (máx.) y mínimos (min.) de cada temperatura diaria (TMED, TMIN y TMAX).

Base Antártica	Variable	Ecuación de regresión lineal	p-valor	Significancia al 95%
Esperanza	TMED_min	$0.04 x - 26.06$	0.039	<b>Significativa</b>
	TMIN_min	$0.03 x - 28.57$	0.051	No significativa
	TMAX_min	$0.04 x - 23.51$	0.063	No significativa
	TMED_max	$0.01 x + 7.22$	0.315	No significativa
	TMIN_max	$0.02 x + 2.92$	0.062	No significativa
	TMAX_max	$0.01 x + 13.33$	0.607	No significativa
Orcadas	TMED_min	$0.01 x - 25.98$	0.846	No significativa
	TMIN_min	$0.03 x - 30.83$	0.173	No significativa
	TMAX_min	$0.03 x - 23.56$	0.160	No significativa
	TMED_max	$0.02 x + 3.92$	0.002	<b>Significativa</b>

	TMIN_max	$0.01 x + 1.49$	0.022	<b>Significativa</b>	
	TMAX_max	$0.03 x + 8.55$	0.001	<b>Significativa</b>	
Belgrano II	TMED_min	$0.01 x - 35.21$	0.792	No significativa	
	TMIN_min	$0.03 x - 41.6$	0.296	No significativa	
	TMAX_min	$0.001 x - 31.25$	0.941	No significativa	
	TMED_max	$0.01 x + 2.25$	0.508	No significativa	
	TMIN_max	$-0.01 x - 0.9$	0.406	No significativa	
	TMAX_max	$0.03 x + 6.21$	0.145	No significativa	
	Carlini	TMED_min	$0.09 x - 19.57$	0.061	No significativa
		TMIN_min	$0.06 x - 21.84$	0.219	No significativa
TMAX_min		$0.10 x - 17.32$	0.057	No significativa	
TMED_max		$0.001 x + 6.12$	0.809	No significativa	
TMIN_max		$0.001 x + 3.50$	0.982	No significativa	
TMAX_max		$0.03 x + 9.57$	0.27	No significativa	
Marambio	TMED_min	$0.034 x - 30.65$	0.039	<b>Significativa</b>	
	TMIN_min	$0.02 x - 32.55$	0.428	No significativa	
	TMAX_min	$0.04 x - 28.32$	0.083	No significativa	
	TMED_max	$0.02 x + 5.98$	0.126	No significativa	
	TMIN_max	$0.01 x + 2.67$	0.565	No significativa	
	TMAX_max	$0.03 x + 10.72$	0.100	No significativa	
San Martín	TMED_min	$0.12 x - 31.33$	0.029	<b>Significativa</b>	
	TMIN_min	$0.14 x - 37.12$	0.020	<b>Significativa</b>	
	TMAX_min	$0.13 x - 27.68$	0.029	<b>Significativa</b>	
	TMED_max	$-0.001 x + 5.96$	0.935	No significativa	
	TMIN_max	$-0.01 x + 3.42$	0.383	No significativa	
	TMAX_max	$-0.001 x + 10.01$	0.837	No significativa	

En primera instancia es importante notar que, en la mayoría de los casos, las pendientes de las rectas de tendencia lineal fueron positivas. Únicamente las series de máximos valores anuales de las tres temperaturas diarias en San Martín y de temperatura mínima diaria en Belgrano II muestran pendientes negativas aunque ninguna resultó significativa con un 95% de confianza. Además, tanto en Carlini como en Belgrano II las tendencias resultaron no ser significativas con el umbral de significancia fijado. En San Martín, los mínimos valores anuales de todas las temperaturas diarias presentan una pendiente positiva y significativa, además de ser las mayores en valor absoluto. Este aumento significativo podría indicar condiciones más cálidas en la región oeste de la Península Antártica, especialmente durante los meses más fríos, lo que concuerda con

trabajos previos de Turner et al., (2005) y Ding y Steig (2013) quienes en particular atribuyen el calentamiento durante el invierno a una disminución del hielo marino. En Orcadas, análogamente, las series de máximos valores anuales de las tres temperaturas presentaron aumentos significativos, evidenciando una intensificación en los máximos de manera generalizada como se discute en Zazulie y otros (2010).

A su vez, en Esperanza y Marambio se observa un aumento significativo en los mínimos valores anuales de temperatura media diaria, mostrando un calentamiento generalizado de la temperatura. Esto podría estar relacionado con lo documentado por Clem et. al (2016), quienes encontraron una relación persistente y estadísticamente significativa entre la Oscilación Antártica (AAO o SAM) y la temperatura del aire en el noreste de la Península Antártica durante todo el año debido a la modulación significativa del viento zonal que atraviesa el norte de la península durante los eventos SAM.

Si bien estos cambios significativos en las series de máximos y mínimos valores anuales de temperatura pueden estar acompañando las tendencias de calentamiento previamente documentadas, es importante a futuro realizar un estudio más exhaustivo que tenga en cuenta diferentes factores de variabilidad climática como lo estudiado en Clem et. al (2016) y factores locales de circulación, como por ejemplo los cambios en la extensión de hielo marino y los vientos Föhn como se ha explorado en Ding y Steig (2013) y Turner et. al (2021).

## 4. CONCLUSIONES

En resumen, este trabajo ha explorado la variabilidad y tendencia de las temperaturas superficiales en la Antártida, con foco en las bases argentinas permanentes. Este análisis revela un aumento significativo y sostenido en las temperaturas anuales en todas las bases, con San Martín mostrando las tendencias más pronunciadas, especialmente en la temperatura media.

Además, se ha examinado la ocurrencia de extremos de temperatura, observando una mayor frecuencia de años cálidos en las últimas décadas en todas las bases. Aunque estas variaciones pueden estar relacionadas con eventos climáticos extremos o fenómenos climáticos a gran escala, la preponderancia de años cálidos desde los años 2000 respalda la tendencia al calentamiento en la región antártica.

Es importante destacar que este aumento significativo en las temperaturas anuales puede tener implicaciones importantes para la región y sus ecosistemas, incluidos los cambios en la extensión del hielo marino y los patrones de circulación. Estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar investigando y comprender los factores locales que influyen en el clima antártico. En última instancia, este estudio contribuye al conocimiento sobre el cambio climático en la Antártida y destaca la importancia de monitorear de cerca estas tendencias para informar las decisiones de política y las estrategias de conservación en la región.

## REFERENCIAS

Clem, K.R., Fogt, R.L., 2015: South Pacific circulation changes and the connection to the tropics and regional Antarctic warming in austral spring, 1979-2012, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 2773–2792, doi: 10.1002/2014JD022940.

Clem, K. R., J. A. Renwick, J. McGregor, and R. L. Fogt, 2016: The relative influence of ENSO and SAM on Antarctic Peninsula climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 9324–9341, doi:10.1002/2016JD025305.

Ding, Q., Steig, E. J., 2013: Temperature Change on the Antarctic Peninsula Linked to the Tropical Pacific. *Journal of Climate*, 26 (19), 7570-7585. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00729.1>

Jacka, T.H., Budd W.F., 1991: Detection of temperature and sea ice extent changes in the Antarctic and Southern Ocean. In: WELLER, G., WILSON, C.L. and SEVERIN, B.A. (Eds.) *Proceedings of the International Conference on the Role of the Polar Regions in Global Change*. June 11–15, 1990. Fairbanks, AK: University of Alaska, Geophysical Institute.

Jacka, T.H., Budd W.F., 1998: Detection of temperature and sea-ice-extent changes in the Antarctic and Southern Ocean, 1949-96. *Annals of Glaciology*, 27, 553–559.

Kendall, M.G., 1975: *Rank Correlation Measures*. Charles Griffin, London.

King, J.C., 1994: Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula, *Int. J. Climatol.*, 14, 357–369.

Mann, H.B., 1945: Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13 (3), 245–259. DOI: 10.2307/1907187

Orr, A., Marshall, G. J., Hunt, J. C. R., Sommeria, J., Wang, C., van Lipzig, N. P. M., Cresswell, D., & King, J. C., 2008: Characteristics of Summer Airflow over the Antarctic Peninsula in Response to Recent Strengthening of Westerly Circumpolar Winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(4), 1396-1413. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2498.1>

Raper, S.C., Wigley, T.M., Jones, P.D. and Salinger, M.J., 1984: Variations in surface air temperatures: Part 3. The Antarctic, 1957–1982. *Monthly Weather Review*, 112, 1341–1353.

Rusticucci, M., 2012: Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research* 106 (2012), 1–17 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.11.001>.

Sen, P.K., 1968: Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.

Skvarca, P., Rack, W., Rott, H., Ibarzábal y Donángelo, T., 1998: Evidence of recent climatic warming on the eastern Antarctic Peninsula, *Ann. Glaciol.*, 27, 628–632.

Theil, H., 1950: A Rank Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis, i, ii, iii. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen, Series A Mathematical Sciences*, 53, 386-392, 521-525, 1397-1412.

Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.A., Iagovkina, S., 2005: Antarctic climate change during the last 50 years, *Int. J. Climatol.*, 25, 279–294.

Turner, J., Lu, H., King, J., Marshall, G. J., Phillips, T., Bannister, D., Colwell, S., 2021: Extreme Temperatures in the Antarctic. *Journal of Climate*, 34(7), 2653-2668. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0538.1>

Vaughan, D. G., G. J. Marshall, W.M. Connolley, J.C. King, R. Mulvaney, 2001: Climate change: Devil in the detail, *Science*, 293, 1777–1779.

Vaughan, D.G., Marshall, G.J., Connolley, W.M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D.A., King, J.C., Pudsey, C.J., Turner, J. 2003: Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula, *Clim. Change*, 60, 243–274.

Vincent, L.A., Peterson, T.C., Barros, V.R., Marino, M.B., Rusticucci, M., Carrasco, G., Ramirez, E.,..., Karoly, D., 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *Journal of Climate*, 18 (23), 5011-5023. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3589.1>

Zazulie, N., M. Rusticucci, and S. Solomon, 2010: Changes in climate at high southern latitudes: A unique daily record at Orcadas spanning 1903–2008. *J. Climate*, 23, 189–196, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3074.1>.

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martín Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).