



Servicio
Meteorológico
Nacional

El SMN en la campaña SouthTRAC

Parte II: actividades científicas y apoyo en la campaña

Nota Técnica SMN 2020-76

Alejandro A. Godoy¹, Nicolás Rivaben² y Paola Rodriguez Imazio^{3,4}

¹ Dirección de Servicios Sectoriales, Dirección Nacional de Pronósticos y Servicios a la Sociedad

² Dirección de Meteorología Aeronáutica

³ Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios.

⁴ CONICET

Octubre 2020



Ministerio de Defensa
Presidencia de la Nación

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

Desarrollada durante los meses de Septiembre y Noviembre del año 2019, la campaña *SouthTRAC* realizó vuelos en las regiones subpolares australes con el objetivo de estudiar la dinámica, transporte y química de la *UTLS* (*Upper Troposphere - Lower Stratosphere* o Alta Tropósfera - Baja Estratósfera por sus siglas en inglés), utilizando la aeronave denominada *HALO* (*High Altitude and Long Range Research Aircraft*). El Dr. Godoy, el Lic. Rivaben y la Dra. Rodríguez Imazio, científicos asociados de *SouthTRAC*, constituyeron la participación del SMN en esta campaña internacional, la cual constó de diversas mediciones de alta resolución, remotas e *in situ*, de la atmósfera para latitudes altas del hemisferio sur. Los detalles técnicos de esta campaña fueron descritos por Rivabén y otros (2020). En esta segunda parte, se detallan las tareas específicas desarrolladas por los investigadores del SMN, como también así el enfoque científico y el trabajo en marcha y a futuro con los datos provenientes de dicha campaña. En particular, se hizo una revisión sinóptica de un evento de turbulencia en aire claro (CAT) durante el vuelo ST25 utilizando datos de reanálisis del ERA5 (ECMWF), del modelo de pronóstico GFS (NCEP) y mediciones de una radiosonda lanzada desde la estación de Marambio a las 17:45 UTC. Una baja polar bien definida se ubicó al oeste de la Península Antártica sobre el mar de Bellingshausen en la mañana del 12 de noviembre. Al norte de la misma, se observó una pequeña y profunda perturbación a un nivel de 300 hPa de rápido desplazamiento hacia el noroeste de la península antártica, la circulación en niveles bajos favoreció una advección de aire frío sobre el Mar de Bellingshausen y una intrusión de aire estratosférico entre niveles de 450 hPa y 300 hPa cerca de 62°S-60°O. Estas condiciones favorecieron a su vez una fuerte frontogénesis de nivel superior, asociada a la inversión de la tropopausa en esa región. El parámetros frontal térmico estimado por los modelos indica fuertes gradientes de temperatura para niveles entre 200-350 hPa. Los índices de turbulencia ElrodTI1, ElrodTI2, y Brown indican condiciones de turbulencia moderadas a severas entre 300 hPa y 250 hPa. Los datos de las radiosondas de la estación de Marambio muestran una fuerte inversión de temperatura con una amplitud de 4 K entre 250 hPa y 200 hPa, para tiempos cercanos a la ocurrencia crítica del patrón sinóptico. Esta situación es consistente con el plegamiento de la tropopausa y el intercambio de gases traza, y se espera poder realizar una comparación detallada con datos de la campaña *SouthTRAC*.

Abstract

Developed during September and November of 2019, the *SouthTRAC* campaign carried out flights in the southern subpolar regions with the aim of studying the dynamics, transport and chemistry of the *UTLS* (*Upper Troposphere - Lower Stratosphere*), using the aircraft *HALO* (*High Altitude and Long Range Research Aircraft*). Dr. Godoy, Lic. Rivaben and Dr. Rodríguez Imazio, associate scientists of *SouthTRAC*, constituted the participation of SMN in this international campaign, which implied various high resolution measurements, remote and *in situ*, of the atmosphere for high latitudes at the southern hemisphere. The technical details of this campaign were described by Rivabén et al. (2020). In this second part, the specific tasks carried out by the SMN researchers are detailed, as well as the scientific approach and the work in progress with the data obtained during the campaign. In particular, A synoptic review of a Clear-Air Turbulence (CAT) event during ST25 flight was analysed using ERA5 reanalysis (ECMWF), GFS forecast model (NCEP), and measurements from a radiosonde launched from Marambio station at 17:45 UTC. A strong and well-defined polar low was located at West of the Antarctic Peninsula over the Bellingshausen

Sea in the morning of 12 November. At the north of the polar low, a small and deep perturbation at 300 hPa level moved quickly towards the north-west of the Antarctic peninsula favouring a cold air advection at low levels over Bellingshausen Sea and a stratospheric air intrusion between 450 hPa and 300 hPa levels near 62°S-60°W. These conditions favoured a strong upper level frontogenesis, associated with a tropopause folding in that region. Strong temperature gradients and high Thermal Front Parameter (TFP) were observed in the NWP model at 200-350 hPa. Ellrod Turbulent Index (1 and 2) and Brown Index indicate moderate to severe turbulence conditions between 300 hPa and 250hPa. Radiosondes data from Marambio station show a sharp temperature inversion with an amplitude of 4 K between 250 hPa and 200 hPa, for times close to the critical occurrence of the synoptic pattern. This situation is consistent with tropopause folding and exchange of tracer gases, and it is expected to be confirmed and further investigated using high resolution data from the SouthTRAC campaign.

Palabras clave: SouthTRAC, UTLS-SH, ondas de gravedad, turbulencia

Citar como:

Godoy, A. A., N. Rivaben y P. Rodriguez Imazio, 2020: El SMN en la campaña SouthTRAC. Parte II: Actividades científicas y apoyo en la campaña. Nota Técnica SMN 2020-76.

1. INTRODUCCIÓN

El experimento SouthTRAC, tal como se explica en Rivabén y otros (2020) tiene como objetivo responder varias preguntas respecto a la dinámica, transporte y química de la UTLS en las regiones subpolares australes. El sistema climático en las regiones polares presenta varios puntos a analizar, desde entender la dinámica atmosférica de gran escala como el agujero de ozono o procesos en pequeña escala como las Ondas de Gravedad Atmosféricas (OGA) y la turbulencia. La información del experimento y los detalles de los objetivos científicos se detallan en la página web de DLR -Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. o Centro Alemán para el Viaje Aeroespacial por sus siglas en alemán (<https://www.pa.op.dlr.de/southtrac/>).

1.1 Antecedentes relacionados con el proyecto

Los estudios previos realizados en la UTLS muestran que pequeñas variaciones en la distribución de gases traza, como el vapor de agua, el ozono y nubes cirrus tiene un impacto en el forzante radiativo del sistema climático terrestre y de la temperatura en superficie, las cuales son importantes para entender el cambio climático (Riese et al., 2012, Solomon et al., 2010). Existe una gran incerteza en los cambios futuros del ozono y el vapor de agua en la UTLS, debido a la capacidad limitada de los modelos numéricos en predecir la recuperación del ozono y procesos relacionados con el forzado radiativo durante el siglo XXI. Por ejemplo, Bekki et al. (2013) encuentra que las incertezas en el modelado del ozono provienen en parte por la dificultad de representar los cambios del ozono en la vecindad de la tropopausa.

La mayoría de los estudios recientes en la UTLS se focalizaron en el Hemisferio Norte (HN) o en los trópicos (Gettelman et al., 2011). Sin embargo, observaciones de satélite y datos de modelos numéricos indican diferencias significativas en los procesos de transporte y composición entre el HN y el Hemisferio Sur (HS) (Hegglin et al., 2009; Konopka et al., 2015, Ploeger et al., 2013, Stiller et al., 2012). Una de las razones principales es que los procesos de intercambio y acoplamiento en latitudes medias de la tropopausa están fuertemente determinados por la ubicación y la intensidad de la corriente en chorro y la distribución de las regiones de rompimiento de ondas. Además, existen diferencias hemisféricas en las fuentes de emisión como la quema de biomasa y combustible fósil que tiene un impacto significativo en el intercambio de aerosoles/gases traza en la UTLS.

Otra diferencia importante entre ambos hemisferios es la dinámica de las OGA. Comparaciones entre las predicciones de los modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés) y datos de satélite, revelan una gran variabilidad en la representación del momento zonal medio absoluto de las OGA estratosféricas (GWMFs en sus siglas en inglés). Algunas características se logran representar de manera aceptable, pero se observan desvíos o “gaps” durante el invierno cerca de 60°S (Geller et al. 2013) y cerca de regiones con topografía elevada.

La mayoría de las simulaciones GCM exhiben un error sistemático en la simulación de la circulación estratosférica polar y una subestimación de la temperatura polar estratosférica (Butchart et al. 2011). Además se observan errores en la fecha de rompimiento del vórtice polar del HS en la primavera. Esto se

combina con la dificultad en representar de manera adecuada las OGAs en la estratosfera. Por otra lado, la representación inapropiada de la temperatura en el vórtice polar del HS influye en el período en el cual la química heterogénea está activa en la primavera austral, generando predicciones incorrectas de la pérdida de ozono teniendo en cuenta un escenario de cambio climático en las zonas polares (Austin et al. 2003, McLandress and Shepherd 2009).

Observaciones muestran que las OGA presentan una mayor actividad en la región conocida como cinturón de ondas de gravedad. Observaciones de globos y satélite en la región de la corriente en chorro polar del HS indican valores altos de GWMFs alrededor de 60°S. (e.g. Ern et al. 2006, Hertzog et al. 2008, Alexander et al. 2010). Las razones físicas de la existencia de este máximo se pueden explicar por ejemplo, por advección de las OGA por el viento corriente abajo en la región de los Andes y la Península Antártica (Sato et al. 2009), entre otros procesos físicos. En resumen, el problema de parametrizar las OGA no resueltas y su interacción sensible con la dinámica a gran escala es uno de los aspectos que presentan más incertidumbre en el modelado numérico (Shepherd 2014, entre otros).

En base a los antecedentes de las investigaciones realizadas en la temática, los temas científicos y objetivos del experimento se dividieron en 4 grupos:

DYN-1: Procesos de acoplamiento en la tropopausa del HS

Su objetivo se centra principalmente en encontrar diferencias en los procesos dinámicos que determinan la composición de la UTLS del HS respecto del HN en intensidad y estacionalidad. Estas diferencias se buscan combinando mediciones de trazadores de larga vida de diferentes datos espectrales para obtener información sobre las escalas de tiempo relevantes. Los trazadores de vida más corta, así como la observación por teledetección de la estructura térmica y química revelan el papel de los procesos que permiten el desarrollo de, por ejemplo, la tropopausa térmica que muestran diferentes estructuras y propiedades en el UTLS del HS (Hegglin et al., 2009).

DYN-2: Ondas de Gravedad en el Hemisferio Sur

El objetivo se centra en el estudio de la generación, propagación y disipación de OGAs que son más intensas en la región de los Andes durante el invierno del HS.

CHEM-1: Impacto del vórtice Antártico en la UTLS del HS

Tiene como objetivo determinar la distribución de VSLS (Very short-lived substances) halogenados en la UTLS del HS, así como la disminución del ozono inducido por halógeno. Además, se investiga cómo el vapor de agua en la UTLS puede verse afectado por el colapso del vórtice polar.

CHEM-2 Quema de biomasa y emisiones biogénicas en la troposfera superior del Atlántico Sur

El objetivo se centra en encontrar las características de las plumas de combustión de biomasa en la UTLS del HS. Las mismas se realizan con observaciones de detección remota in situ de ozono, NO_x, PAN y otros gases traza. Además se busca identificar la presencia de amoníaco y nitrato de amonio, los cuales se relacionan con la quema de biomasa y el desarrollo de aerosoles en la región de la UTLS.

2. PARTICIPACIÓN DEL SMN

Como se comentó en la Nota Técnica SMN 2020-75 (Rivabén y otros, 2020), el SMN participó activamente tanto en la organización de la campaña como también en la logística durante el experimento. Se coordinó con la VAG Ushuaia y el Centro Meteorológico Marambio para el lanzamiento de las ozonosondas en función de los vuelos realizados durante la campaña. Por otro lado, el SMN también brindó apoyo meteorológico local a la Campaña SouthTRAC durante la Fase 1 en septiembre de 2019 en Calafate y durante la Fase 2 en noviembre en Río Grande.

2.1 Actividades en la ciudad de Calafate

La primera etapa de la campaña se centró en el estudio de las ondas de gravedad y el rompimiento del vórtice polar. Durante esta etapa, se realizaron 15 vuelos científicos dotados con instrumentos a bordo, en los cuales, se lanzaron entre 6 y 8 sondas Vaisala y KIT por cada vuelo. Los mismos partieron desde el Aeropuerto Internacional “Gob. Ramón Trejo Noel” de la Ciudad de Río Grande, Tierra del Fuego. El centro de operaciones de los vuelos se ubicó en el hangar principal de la base aeronaval de la Armada Argentina “Pioneros del Sur” ubicado en el mencionado aeropuerto. El primer vuelo de HALO se realizó el 11/9/2019, mientras que el último vuelo de la primera fase despegó el 2/10/2019.

Dado que en esta primera etapa, el objetivo era entender la dinámica de las OGAs fue necesario establecer observaciones meteorológicas a sotavento de la cordillera de los Andes. El punto de observación fue la ciudad de El Calafate, provincia de Santa Cruz.



Fig. 1: Lanzamiento de un radiosondeo en la ciudad del Calafate en presencia de fuertes vientos. Fuente: <https://www.pa.op.dlr.de>

En esta nueva locación, se estableció un centro de operaciones en un complejo de cabañas ubicado en la costa del Lago Argentino donde también se alojaron investigadores, pilotos y equipo de filmación del experimento. En el mismo lugar se hicieron los lanzamientos de los radiosondeos "Vaisala". El Dr. Alejandro Godoy fue el investigador designado por el SMN durante las primeras cinco semanas de la campaña, donde realizó apoyo meteorológico especializado y pronóstico del tiempo. El mismo consistió en la presentación del pronóstico a 48 hs, a las 12 UTC y a las 21 UTC, para la ciudad del Calafate y Río Grande y el estado de la troposfera media y alta, información clave para la realización de los vuelos. Además se presentó información del modelo de pronóstico del SMN (WRF) con productos orientados a la identificación de regiones probables para el desarrollo de OGAs en la Patagonia, como el campo de divergencia horizontal en los niveles de presión de 500 y 200 hPa. El investigador del SMN además participó de las discusiones del pronóstico y posibles despachos de vuelos del planeador para observar de la mejor manera posible OGAs en la baja estratósfera. También participó en las observaciones realizadas con radiosondeos y las comunicaciones con la torre de control del aeropuerto del Calafate. Se realizaron 4 lanzamientos rutinarios por día (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC) y lanzamientos especiales cada 3 horas cuando la situación era favorable (Figura 1). Si bien el equipo de la DLR y las entidades alemanas contaban con el instrumental y personal necesario, el conocimiento del clima y la meteorología local es un factor determinante que asegura el éxito de la campaña.

Como una extensión para la campaña SouthTRAC, el Instituto DLR de Física Atmosférica lanzó una campaña en cooperación con el piloto Klaus Ohlmann, siguiendo actividades anteriores dentro del Proyecto 'Mountain Wave', para explorar las propiedades de las ondas de montaña generadas por los Andes. Las mediciones se realizaron con dos planeadores especiales con instrumentos que despegaron desde el aeropuerto del Calafate. Para habilitar el planeador para mediciones de viento y turbulencia, DLR-IPA desarrolló un sistema de mediciones de variables termodinámicas para las aeronaves, que incluye una sonda de flujo, unidad de medición inercial, sensores de temperatura y sensores de humedad (Figura 2). De esta forma, se puede recopilar datos tridimensionales del viento, la temperatura y la humedad a lo largo de la ruta de vuelo para cuantificar la dinámica de las ondas de montaña cerca de su origen y llegar hasta la tropopausa. En la Figura 2 se muestran los patrones nubosos asociados a las ondas de montaña y el patrón de circulación que buscaban los planeadores.

La primera etapa del análisis de los datos se realizó in situ durante la campaña para poder cuantificar la calidad de las observaciones que se estaban realizando. Un ejemplo provisto por la DLR es el realizado por el planeador, como se observa en la Figura 3 y en la Figura 4, la comparación entre el radiosondeo lanzado el 11/09 y el 13/09 con datos del planeador. Allí se observa un ajuste aceptable entre los datos de viento del planeador y el radiosondeo, indicando que estas observaciones pueden ser útiles para el estudio de las OGAs en la troposfera, así como también la turbulencia asociada.

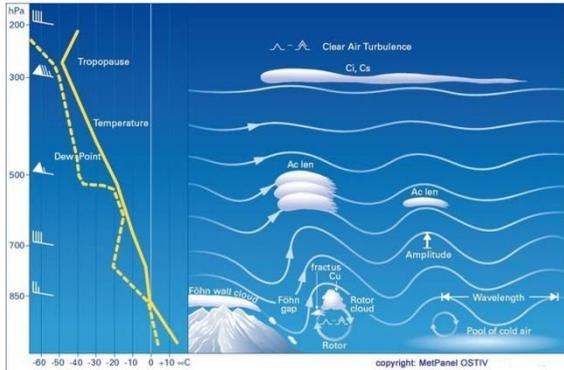


Fig. 2: Der.: Patrón de circulación, perfil de temperatura y nubosidad asociada a la presencia de Ondas de Gravedad forzadas por la topografía. Izq.: Fotografía del planeador utilizado durante la campaña en Calafate. Fuente: <https://www.pa.op.dlr.de/southtrac/html/soaring/blog.htm>.

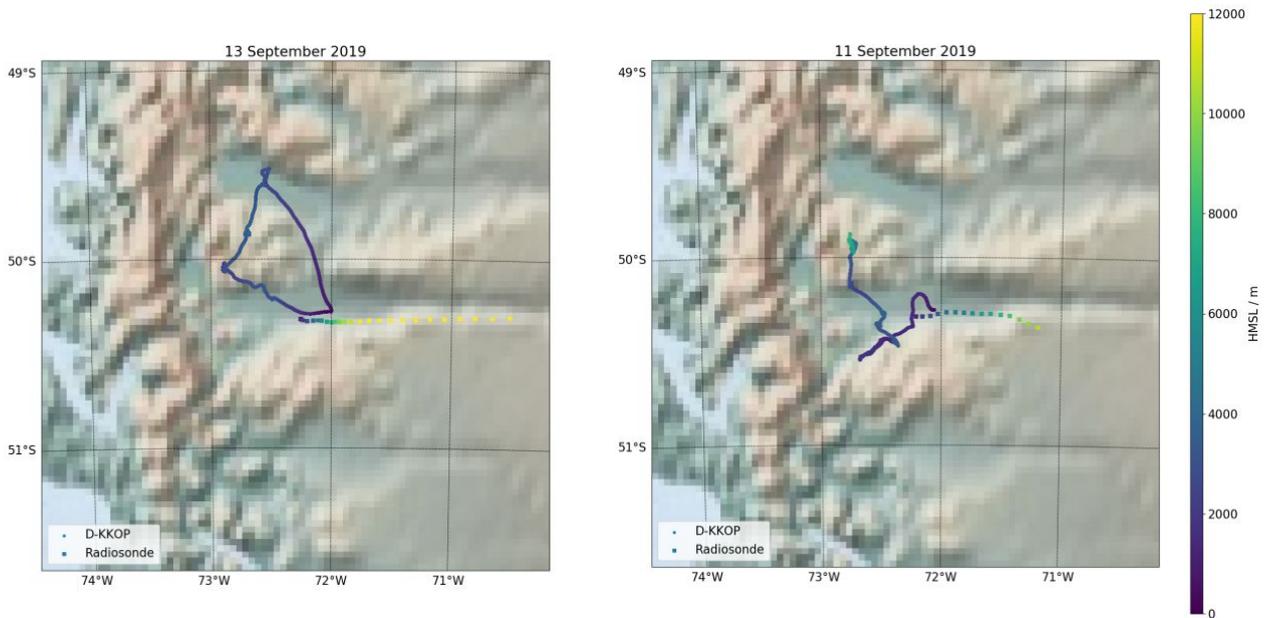


Fig. 3: Trayectoria del planeador (línea llena) y de la radiosonda (puntos) para los días 11/9/2019 (izq.) y 13/9/2019 (der.). La barra de colores indica la altura aproximada. En sombreado se muestra la topografía. Fuente: <https://www.pa.op.dlr.de/southtrac/html>

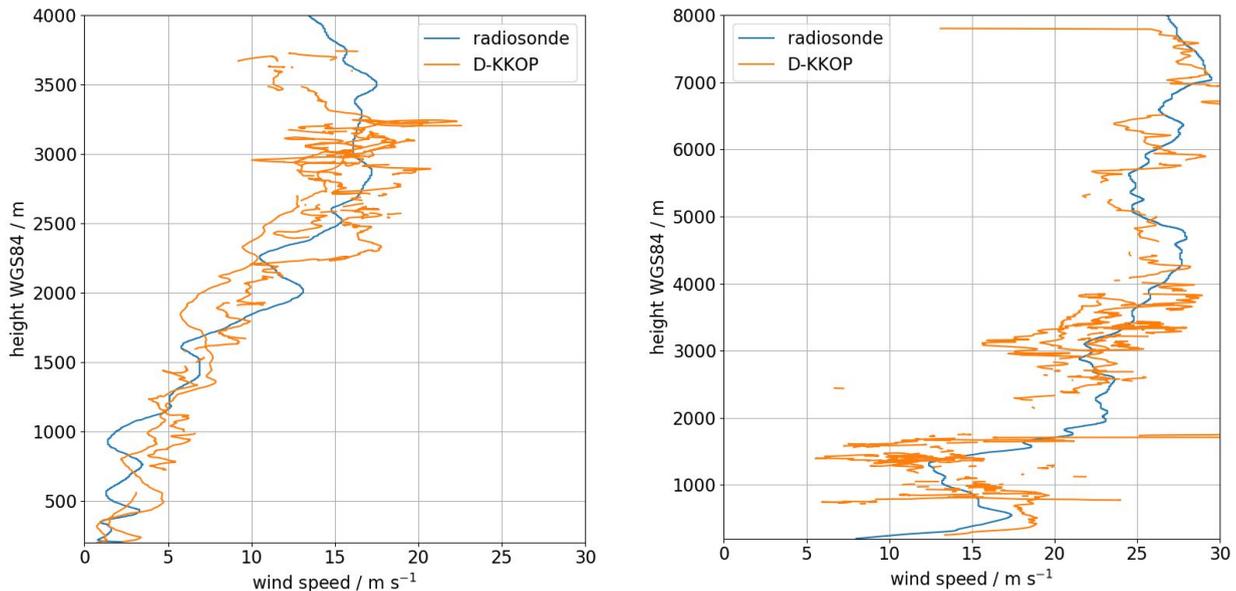


Fig. 4: Estimación del viento ($m s^{-1}$) por el planeador (naranja) y del radiosonda (azul) para los días 11/9/2019 (izq.) y 13/9/2019 (der.). Las dos curvas naranja representan la etapa de ascenso y descenso del planeador. Fuente: <https://www.pa.op.dlr.de/southtrac/html>

2.2 Actividades durante la fase 2 de la campaña

En la segunda etapa de la campaña, personal de la Dirección de Meteorología Aeronáutica del SMN brindó asesoramiento en la gestión y toma de decisiones de los planes de vuelo científicos propuestos establecidos en los briefings todos los días a las 11:00 hs, mientras que en la reunión general realizada todos los días a las 16:00 hs expuso la perspectiva meteorológica semanal clave para los próximos vuelos. Los planes de vuelo en los que el SMN participó de manera activa son los vuelos ST24, ST25, ST26 y ST27. En particular, se trabajó con herramientas de despacho de vuelos científicos provistas por la campaña como el MSS (Mission Support System por sus siglas en inglés), un software basado en Python para la gestión y planificación de vuelos de investigación y el HALO Tracker, software destinado para el seguimiento satelital del vuelo. En particular, el MSSI posee distintos tipos de visualizaciones, donde se pueden asignar la planificación de los vuelos a nivel fijo y como corte vertical de acuerdo al esquema propuesto por Rautenhaus y otros. Un ejemplo de estas visualizaciones se muestra en la Figura 5.

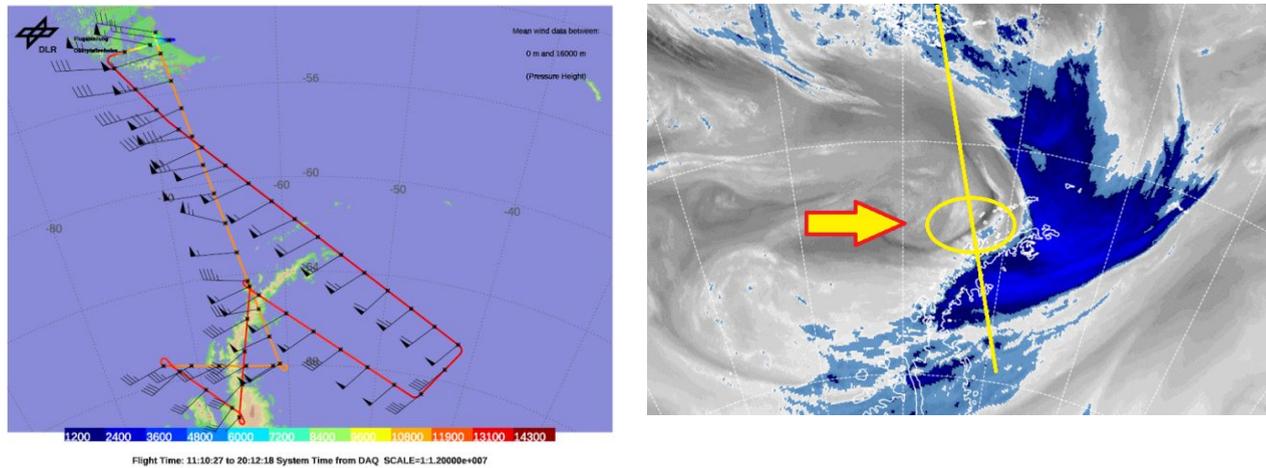


Fig. 6: Plan de vuelo correspondiente al vuelo ST25 de la campaña SouthTRAC, realizado el 12 de Noviembre de 2019 (der.). El punto rojo indica la ubicación de la base Marambio. Imagen del canal 9 (6.9 μm) del satélite GOES-16 correspondiente a las 12:00 UTC del día 12/11/2019 (izq.). La flecha indica la posición aproximada de la trayectoria de vuelo donde se reportó turbulencia.

Este evento es de gran interés en el contexto del estudio de transporte y mezclado turbulento en la UTLS antártica. Por esta razón, se lo eligió como punto de partida para un caso de estudio tomando en cuenta en tres ejes principales:

1. **Descripción sinóptica detallada del evento meteorológico utilizando datos de reanálisis del modelo ERA5.**
2. **Cálculo de índices de turbulencia mediante datos del modelo operativo GFS.**
3. **Caracterización de la tropopausa sobre la región de Marambio utilizando datos de radiosondeos.**

Los resultados preliminares obtenidos de este estudio se presentaron en el workshop: *SouthTRAC UTLS Chemistry and Transport Workshop*, en una charla titulada *Synoptic review of a polar-low CAT event during ST25*, y se detallan a continuación.

1. Un análisis sinóptico detallado de dicho evento muestra que el patrón turbulento observado sobre la Península antártica se da como resultado entre la interacción de una baja polar formada al oeste de la península antártica y una pequeña perturbación de rápido desplazamiento a unos 300 hPa proveniente del noroeste de la península. Dicha perturbación favoreció una advección de aire frío a niveles bajos sobre el mar de Bellingshausen y una intrusión de aire estratosférico entre niveles de 450 hPa y 300 hPa cerca de 62°S-60°O. La figura 07 muestra el desplazamiento de la baja polar y la perturbación en niveles medios y altos mediante cartas de líneas de corriente, espesor y altura geopotencial obtenidos a partir de datos de reanálisis ERA5, para las 12 y las 18 UTC del día 12 de Noviembre de 2019.

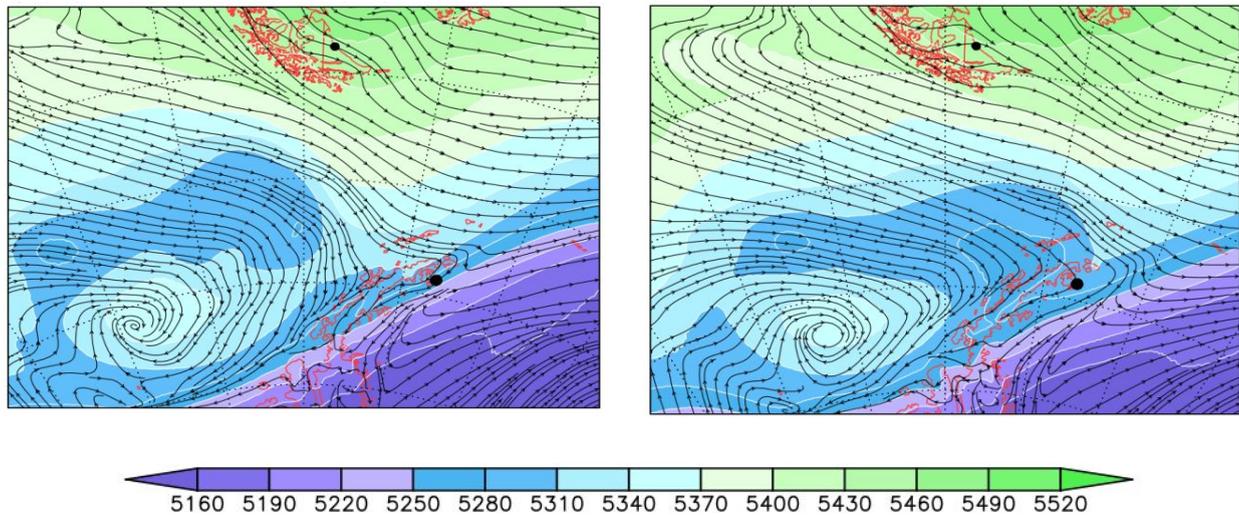


Fig. 7: Altura geopotencial (líneas), viento en 1000 hPa y espesor 1000/500 hPa (sombreado) para el 12/11/2019 a las 12 UTC (izq.) y a las 18 UTC (der.), obtenidos de los reanálisis del modelo ERA5.

La Figura 8 muestra un mapa de las líneas de corriente en 300 hPa y de la vorticidad potencial (VP) para las 12 UTC y las 18 UTC también obtenidos a partir del modelo ERA5, en la cual puede apreciarse un fuerte gradiente de VP al frente de la perturbación que avanzaba hacia la península antártica. Los valores bajos de VP indican la presencia de aire estratosférico por detrás del eje de vaguada indicando una importante caída de la tropopausa en la región del pasaje de Drake.

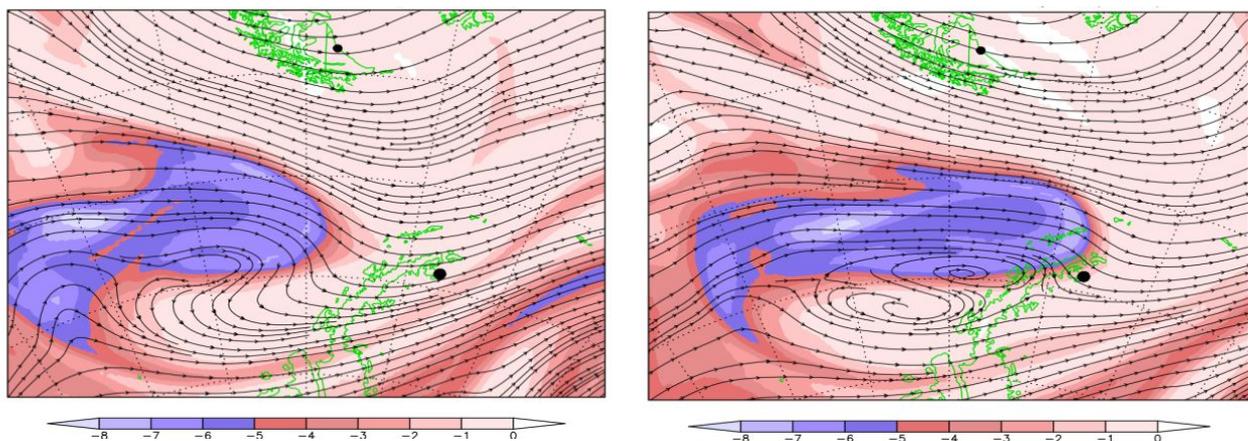


Fig. 8: Líneas de corriente en 300 hPa y vorticidad potencial (sombreado) para las 12 UTC (izq.) y las 18 UTC (der.) del ERA5.

Estas condiciones favorecieron una fuerte frontogénesis de nivel superior, asociada con el plegamiento de la tropopausa en esa región. Adicionalmente, se observó una fuerte aceleración de la corriente en chorro (Figura 9), con valores por encima de los 100 nudos en 300 hPa a 60°S de latitud, indicando una fuerte

cortante horizontal y vertical del viento del lado polar de la corriente en chorro. En el corte vertical de la Figura 9 se observa un importante pliegue de la tropopausa, alcanzando los 500 hPa entre 60°S y en 64°S, muy cerca de la base Marambio. Los forzantes dinámicos encontrados son fundamentales para ubicar las regiones con potencial de desarrollo de turbulencia en aire claro que luego se confirman con los cálculos de los índices de turbulencia.

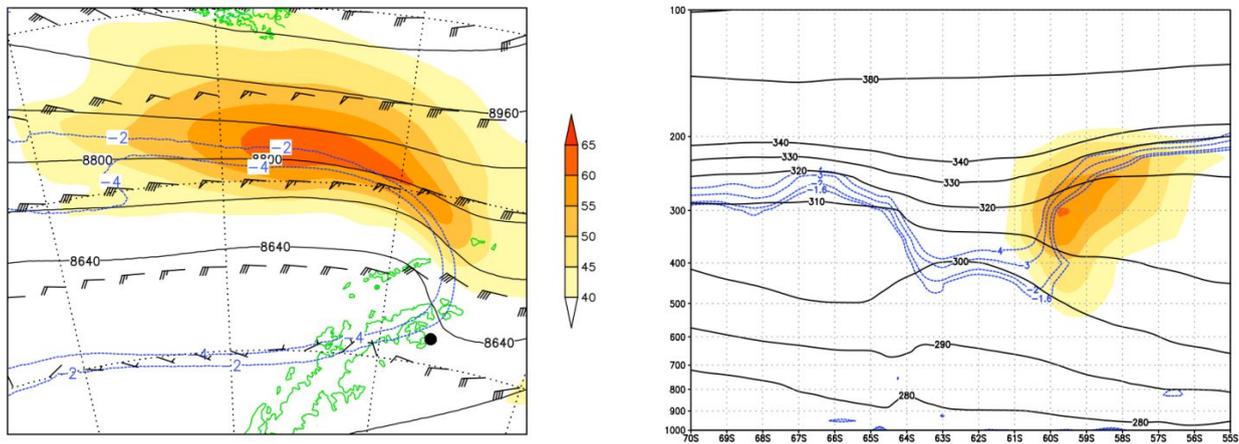


Fig. 9: Izq.: viento máximo (sombreado, mayor a 40 m/s) y viento en 300 hPa. Altura geopotencial (líneas negras) y vorticidad potencial (-2 y -4 PVU). Der.: corte vertical en 60°O de la temperatura potencial (cont. negro), viento máximo (sombreado, mayor a 40 m/s) y vorticidad potencial entre -1,6 y -4 PVU.

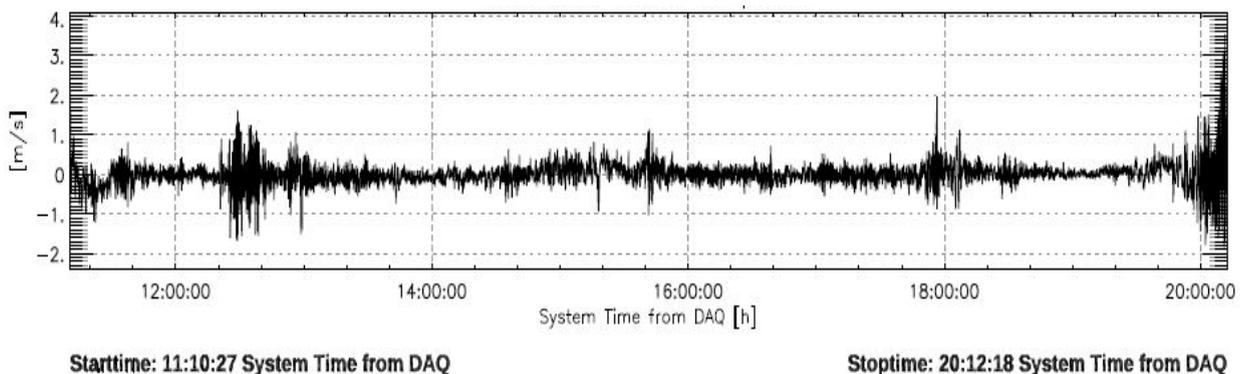


Fig. 10: Componente vertical del vector viento medida por el instrumental BAHAMAS a bordo de HALO durante el vuelo ST25.

La Figura 10 muestra la componente vertical del vector viento medida por el instrumental BAHAMAS a bordo de HALO durante el vuelo ST25, corroborando el registro de dos eventos de turbulencia, uno a las 12:42 UTC y el otro a las 17:55 UTC (más información de BAHAMAS en Rivabén y otros [2020]). El registro de posición de BAHAMAS indica que la aeronave se hallaba volando en las cercanías de la base Marambio cerca de las 18 UTC, como puede apreciarse en la Figura 11, donde se muestra la longitud y la latitud de

HALO durante su vuelo, como función del tiempo. Dado que el nivel de vuelo de HALO alrededor de las 18 UTC era aproximadamente de 160 hPa (indicando un FL410 = 12400 m de altura), la turbulencia registrada por la aeronave a esa hora resulta de menor intensidad (ver Figura 10). Esto resulta consistente con el análisis sinóptico, que indica fuertes gradientes de vorticidad potencial (lo cual a su vez puede ser un indicador de inestabilidad dinámica y turbulencia) para niveles comprendidos entre 250 y 300 hPa. En la siguiente parte del trabajo se evaluaron, los distintos índices de turbulencia que eran consistentes para la ocurrencia de turbulencia moderada a severa para los mismos niveles de presión y ubicaciones geográficas, tanto para las 12 UTC como para las 18 UTC.

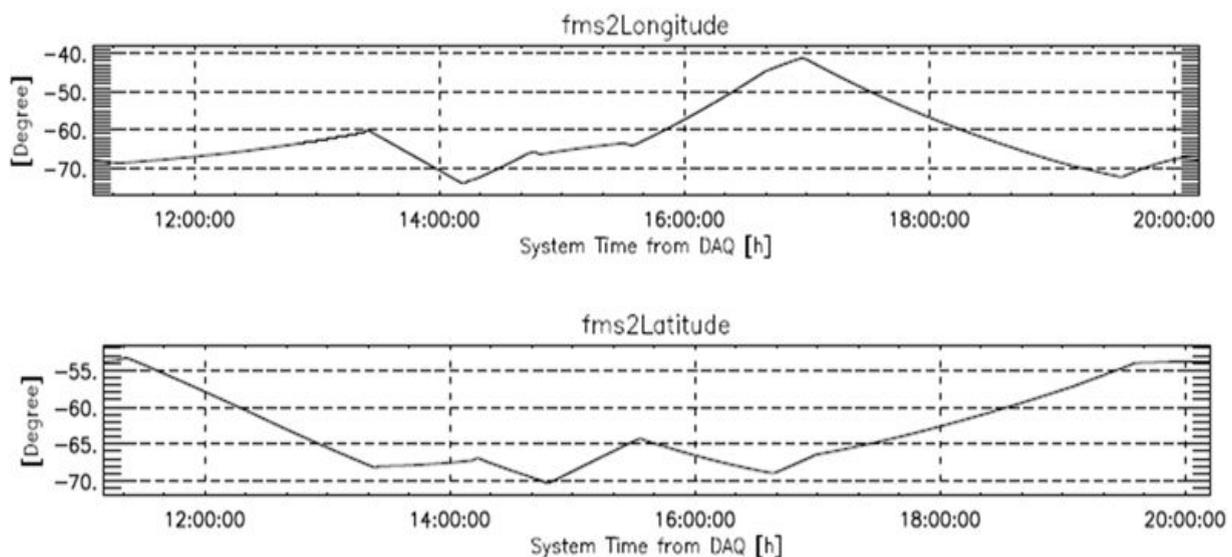


Fig. 11: Longitud y latitud registrada por el instrumental BAHAMAS a bordo de HALO durante el vuelo ST25.

2. Diversos autores (Ellrod y Knapp, 1992; Ferrer y otros, 1969; Lee 1984; Roach 1970; Brown 1973) señalan que un aumento en la cortante media de una capa, permite inferir la existencia de subcapas con cortante mayor. De esta manera, a través de un análisis a gran escala se puede inferir la existencia de cortante crítica que favorezca la ocurrencia de inestabilidad de Kelvin Helmholtz que desencadenan turbulencia en aire claro (CAT). La misma está asociada a una fuerte cortante en la vertical, deformación horizontal del flujo y un importante gradiente de temperatura que permita una disminución de la estabilidad estática. **Los índices de turbulencia** tienen en cuenta la mayoría de estos factores. Para el presente caso de estudio, se calcularon los índices Brown (Brown, 1973), Dutton [Dutton, 1980], Ellrod T11 y Ellrod T12 (Ellrod y Knapp 1992) utilizando datos del modelo GFS tanto para las 12 UTC como para las 18 UTC, para distintos niveles de vuelo. La Figura 12 muestra la intensidad en color de los índices Brown y ElrodT11 para las 12 y las 18 UTC calculados en la región de interés, para 250 hPa. Si bien el índice Brown muestra un máximo potencial de CAT a 300 hPa (no mostrado aquí), el índice ElrodT11 indica lo mismo para 250 hPa, al borde de la baja polar (ver Figura 12b y c). El índice ElrodT12 muestra un comportamiento similar al ElrodT11, aunque sus valores máximos sólo se pronostican para niveles inferiores a 350 hPa. Por último, el índice Dutton (no mostrado aquí), no es consistente con el patrón sinóptico observado dado que su forma de

estimar la turbulencia está basado en una regresión tipo “Stepwise” de reportes de turbulencia en el Océano Atlántico Norte.

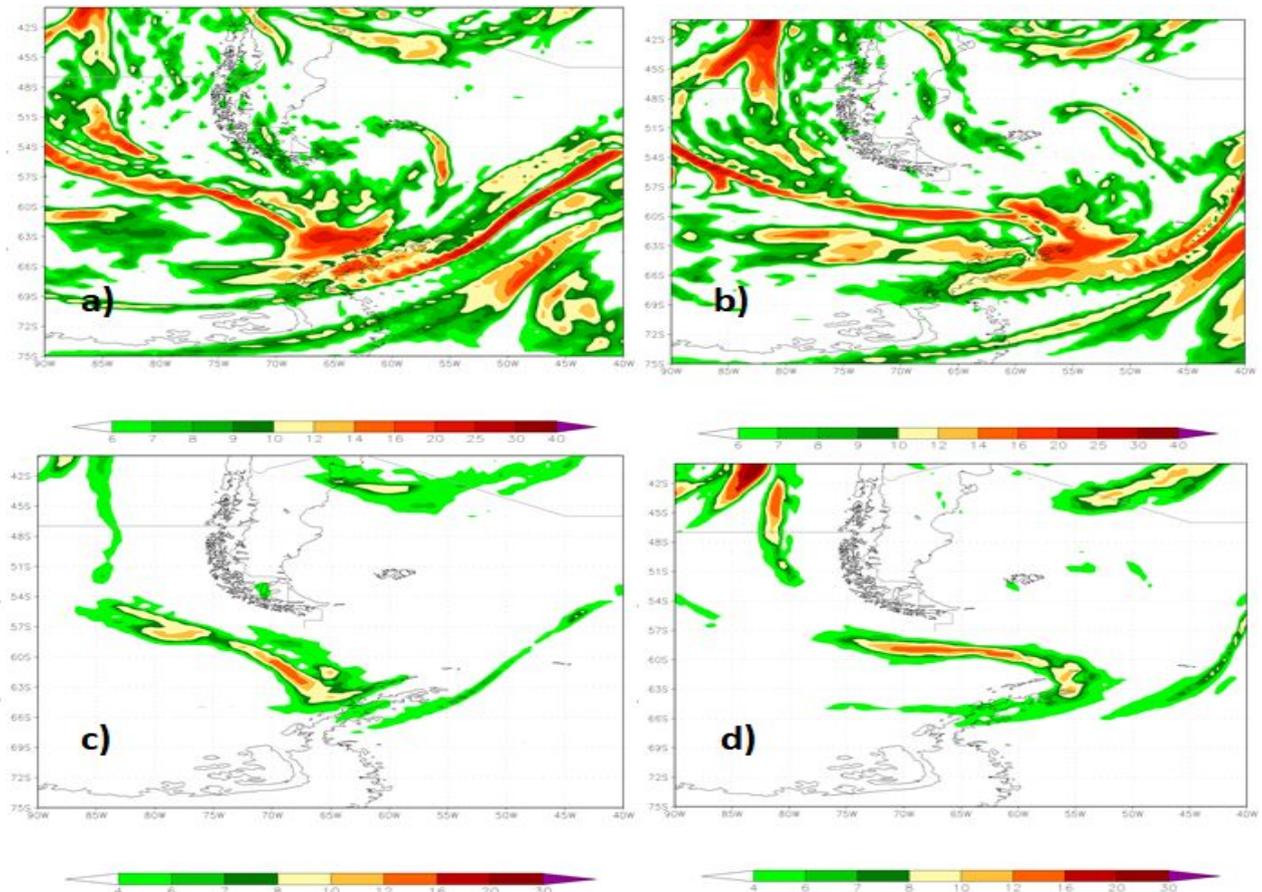


Fig. 12: Índices de turbulencia para el nivel de 250 hPa (FL340) calculados con a partir del análisis del modelo GFS para el día 12/11/2019. a) Índice Brown a las 12 UTC; b) Índice Brown y las 18 UTC; c) Índice Ellrod T11 a las 12 UTC y; d) Índice Ellrod T11 a las 18 UTC.

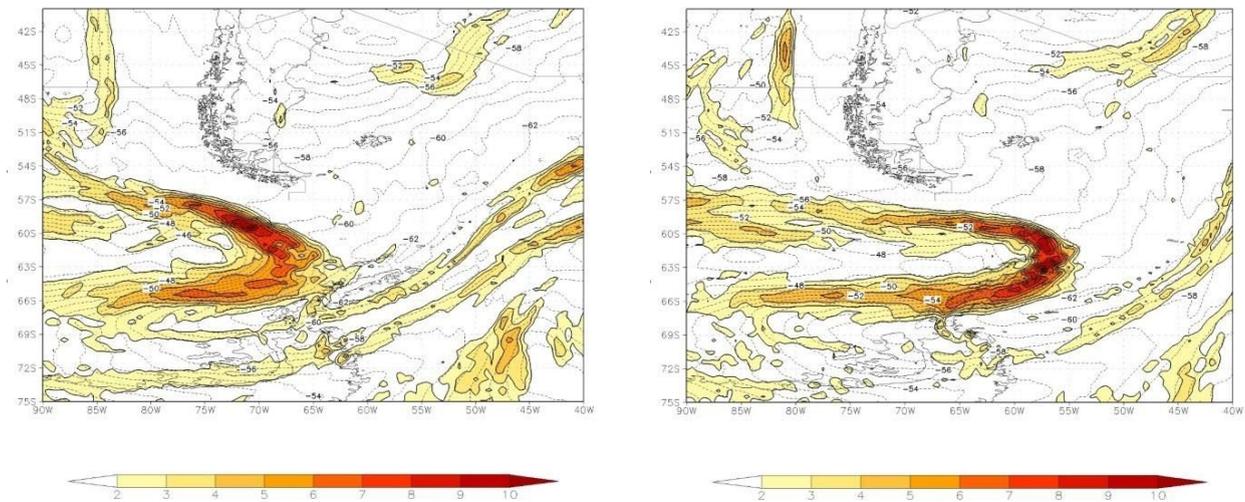


Fig. 13: Gradiente de temperatura horizontal (sombreado) y temperatura (contornos) en °C para 250 hPa (FL340, líneas negras) calculados con el análisis del modelo GFS para el día 12/11/2019 a las 12:00 UTC (izq.) y 18:00 UTC (der.).

Por último, la Figura 13 muestra el gradiente de temperatura horizontal a 250 hPa para las 12 UTC y las 18 UTC obtenido a partir de los análisis del modelo GFS. Como puede apreciarse, se observa un fuerte gradiente horizontal de temperatura en el frente oriental de la perturbación, que avanza a rápida velocidad hacia la península antártica a las 18 UTC. Esta fuerte variación horizontal en la temperatura para estos niveles sugiere la existencia de una inversión de la tropopausa sobre la península antártica. Esto puede verificarse a partir de los datos arrojados por un radiosondeo de la base Marambio, lanzada a las 17:47 UTC.

3. Resultados obtenidos de las ozonosondas: La Figura 14 muestra un perfil de temperatura obtenido a partir de un ozonosondeo lanzado desde la base Marambio (~64°S-56°O) el día 12 de Noviembre de 2019 a las 17:47 UTC. Si bien estos sondeos se realizan de forma periódica en la base, el mismo fue coordinado por el SMN en base a los pronósticos y la ruta de vuelo, para obtener la mayor y mejor información posible relacionada a la situación meteorológica del día. EL instrumental aerológico utilizado consta de una radiosonda Vaisala RS92 SGP una ozonosonda EN-SCI ECC (para más detalles de estas sondas ver [Vaisala](#) y [ozonosonde](#), respectivamente). Para el análisis preliminar presentado en la presente nota solo se utilizaron los datos obtenidos por la radiosonda, dejando los datos relacionados con el ozono para trabajos futuros.

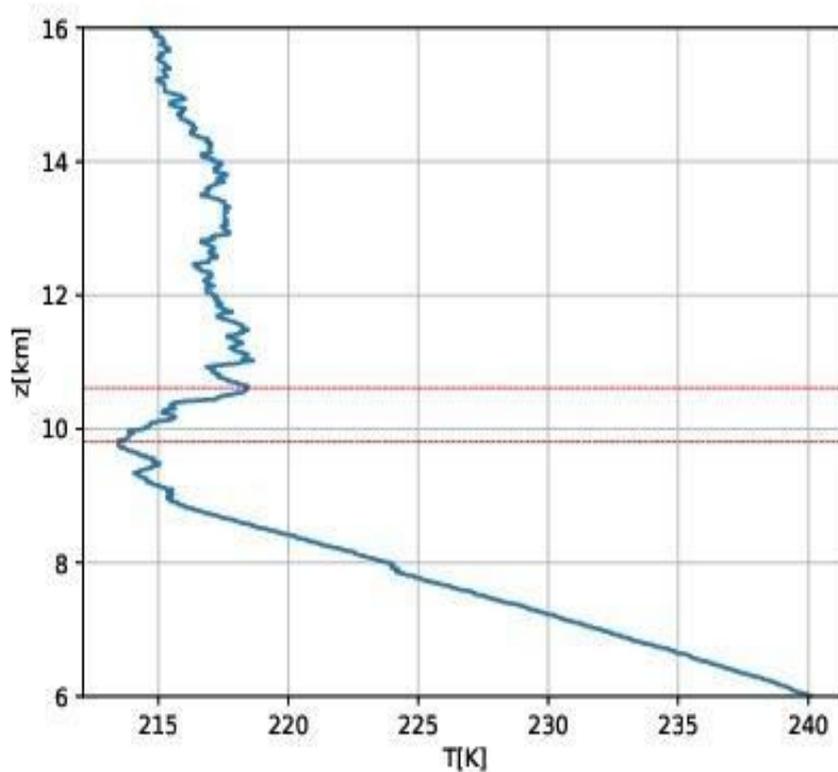


Fig. 14: Perfil vertical de la temperatura obtenido de la radiosonda Vaisala RS92 SGP lanzada en la base Marambio el 12/11/2019. Las líneas rojas indican el nivel inferior y superior de la tropopausa térmica (ver texto).

Una fuerte inversión de temperatura puede observarse a partir de los 10 km aproximadamente, con una extensión de alrededor de 1 km y una intensidad de ~4 K. Esta fuerte inversión en la temperatura es comúnmente conocida como inversión de la tropopausa, y es consistente con el evento de turbulencia de aire claro generado por la situación sinóptica descrita previamente, que indica fuertes gradientes de vorticidad potencial. De acuerdo a los datos del sondeo, la sonda registró altitudes de alrededor de los 10 km y presiones del orden de 250 hPa hacia las 18:20 UTC. Como se mencionó previamente, la aeronave se encontraba sobrevolando el área de Marambio, pero a unos 160 hPa.

A partir de este perfil de temperatura se infirieron los niveles inferior y superior de la tropopausa. De acuerdo al criterio de la OMM, la tropopausa térmica se define como el nivel más bajo donde el lapso de temperatura (definida por la derivada de la temperatura con respecto de la altura, $-\frac{\partial T}{\partial z}$) cae por debajo de 2 K/km y su promedio entre este nivel y todos los niveles superiores dentro de 2 km permanece por debajo de este valor (Hoika 1999). De esta forma, el nivel inferior de la tropopausa, z_{TP} , quedó determinado en $z_{TP} = 9.821$ km, mientras que el nivel superior alcanzó los 10.650 km. Estos niveles se indican con líneas rojas en la Figura 14. Con el objetivo de realizar una descripción más detallada de la tropopausa, se calcularon la frecuencia de Brunt-Vaisala al cuadrado y la cizalladura vertical del viento, definidos respectivamente por

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$S^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2$$

donde g es la aceleración de la gravedad, θ es la temperatura potencial, y u y v son las componentes zonal y meridional del viento. Valores elevados de N^2 denotan una fuerte estabilidad estática, mientras que valores grandes de S^2 indican inestabilidad dinámica.

Si bien la resolución vertical media del sondeo es de ~5 m, fue necesario realizar un suavizado de las señales. Siguiendo una tendencia lineal de 10 puntos en las señales del sondeo, se realizó un suavizado tomando valor medio cada 10 puntos, lo cual implica una nueva resolución vertical de ~60 m. Esta práctica es común al trabajar con señales de radiosondeos (ver, por ejemplo Wilson *et al.* 2012 y referencias contenidas). Si bien implica una disminución en la resolución vertical, resulta útil a la hora de eliminar ruido en este tipo de señales, el cual se amplifica notablemente en las magnitudes derivadas. El criterio utilizado aquí se basa en dos principios. Por un lado, se pide que la diferencia entre el sondeo original y el suavizado no supere el valor del error instrumental. Para el caso del sensor de temperatura de la radiosonda utilizada, este ronda en los 0.2 °C para niveles correspondientes a la región de la tropopausa, definida aquí como $z_{TP} \pm 2$ km. Por otro lado, sabiendo que la longitud de Ozmidov, para la cual los flujos atmosféricos se vuelven estables y los efectos de la estratificación no son importantes es de alrededor de 10 m (Schneider *et al.* 2015), es posible estimar que no se pierde información importante de los efectos de la estratificación en las escalas medias (transporte y mezclado) y grandes (inyección de energía) del flujo. Los perfiles suavizados, junto con los originales se muestran en la Figura 15, para la temperatura y la temperatura potencial. A modo de referencia, también se muestra un perfil vertical de temperatura obtenido a partir de datos de reanálisis del modelo ERA5.

Si bien la coincidencia entre las mediciones y el modelo es bastante buena para regiones por debajo y por arriba de la región de la tropopausa, el modelo reproduce muy pobremente la inversión de temperatura. Mas aún, dada la resolución vertical del modelo, sólo se tienen dos puntos dentro de la región de la tropopausa, lo cual resulta insuficiente para realizar un estudio detallado de la naturaleza física de esta región.

A partir de los perfiles suavizados se calcularon N^2 y S^2 . La Figura 16 muestra ambas magnitudes, señalando nuevamente z_{TP} , y los máximos respectivos para cada magnitud. Fuera de la región de la tropopausa N^2 se mantiene más o menos constante, como consecuencia de los perfiles casi lineales de temperatura. Dentro de la región de la tropopausa N^2 aumenta por un factor de ~5, alcanzando un valor máximo de $N^2_{max} = 5.8 \times 10^4 \text{ s}^{-2}$, para una altura de $z = 10.4$ km, es decir, alrededor de 579 m por sobre z_{TP} . Por otro lado, el perfil de S^2 obedece un máximo inmediatamente encima de z_{TP} , para una altura de $z = 10.033$ km, apenas 212 m sobre z_{TP} , 4 veces menor que N^2_{max} . Estos resultados indican la existencia de una inestabilidad dinámica sobre el nivel de la tropopausa, y por debajo de un máximo en la frecuencia de Brunt-Väisälä, la cual a su vez indica estabilidad estática. Este escenario, el cual indica una tropopausa dinámica por debajo de una tropopausa térmica es consistente para patrones sinópticos ciclónicos (Wirth 2001). Un análisis más completo puede obtenerse a partir del cálculo del número de Richardson a partir de los perfiles de N^2 y S^2 . Sin embargo, es necesario tener en cuenta que dados los valores pequeños de N^2 , esta magnitud presenta un alto contenido de ruido.

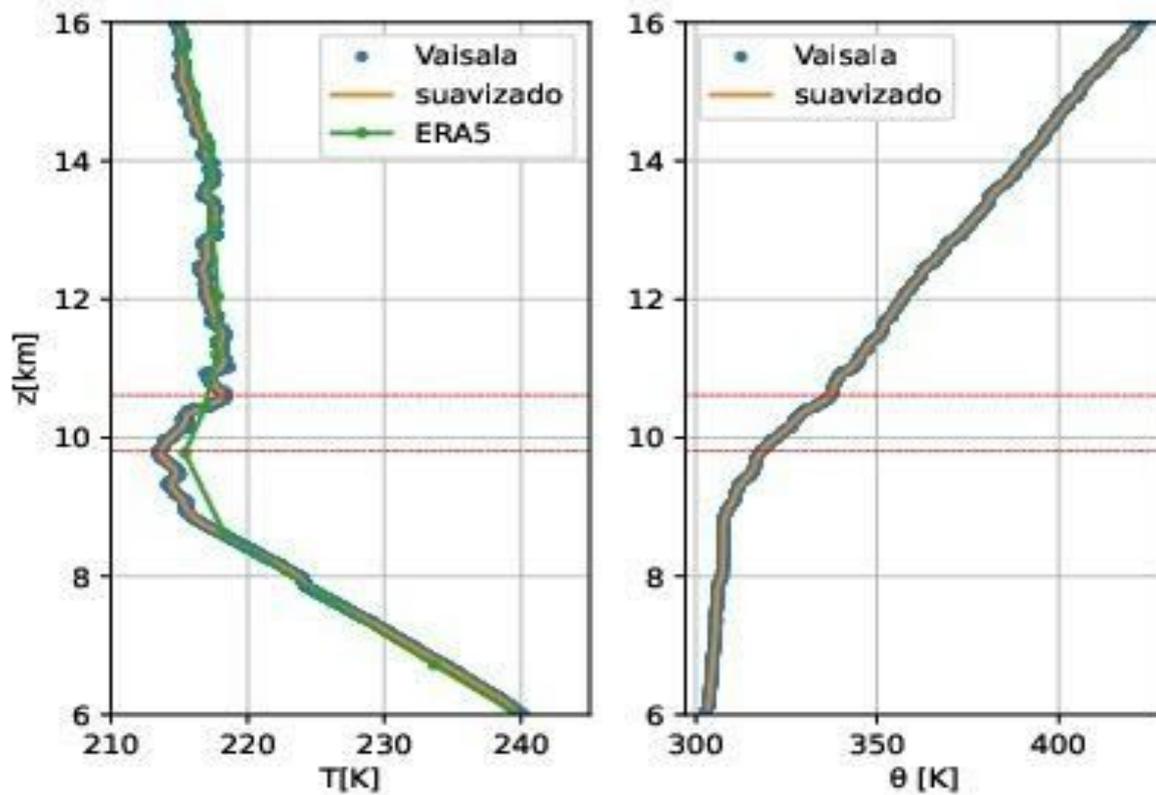


Fig. 15: Perfiles verticales de temperatura (izq.) y temperatura potencial (der.) para los sondeos (azul), las señales suavizadas (naranja). Como referencia, se agregó el perfil obtenido mediante datos de reanálisis del ERA5 para la temperatura.

Si bien los resultados obtenidos son preliminares, es posible discutir ciertos aspectos acerca de la tropopausa en el caso de estudio propuesto que pueden contribuir en el avance de trabajos futuros. Por un lado, puede verse que los gradientes verticales de los datos de temperatura del ERA5 en la región de la tropopausa difieren notablemente de los datos obtenidos por el radiosondeo. Estas diferencias ciertamente resultan de la resolución vertical mucho más alta (factor 60) de los perfiles de la radiosonda. Esto indica que la capa de estratificación estable por encima del nivel de la tropopausa exhibe un mayor efecto inhibitor en el intercambio troposfera-estratosfera del que se infiere a partir de cálculos en base a cantidades obtenidas de modelos numéricos de baja resolución vertical. Más aún, la capa de estratificación estable que aparece sobre el máximo de inestabilidad dinámica indica la independencia cualitativa de esta conclusión sobre la definición de la tropopausa. Esto es especialmente importante, ya que la tropopausa dinámica es más relevante para el estudio del intercambio en la UTLS, dado que la vorticidad potencial (que constituye la magnitud utilizada en los modelos numéricos para definir la tropopausa dinámica) es una magnitud conservada bajo movimientos adiabáticos. Si bien una continuación natural del presente estudio consiste en un estudio climatológico de la tropopausa en las región de la península antártica, debe tenerse en cuenta que los sondeos son demasiado dispersos en esa región como para realizar estudios en términos de la

vorticidad potencial. No obstante, el análisis propuesto aquí hace posible una discusión cualitativa de la definición de la tropopausa en la región, la cual espera poder enriquecerse en el futuro mediante el abordaje de los siguientes puntos:

1. Estudio climatológico de la tropopausa a partir de los radiosondeos de Marambio e Isla St. George.
2. Comparación del presente caso de estudio con datos de alta resolución de la campaña SouthTRAC
3. Comparación de los datos de sondeos y SouthTRAC
4. Comparación con datos del modelo regional PolarWRF.

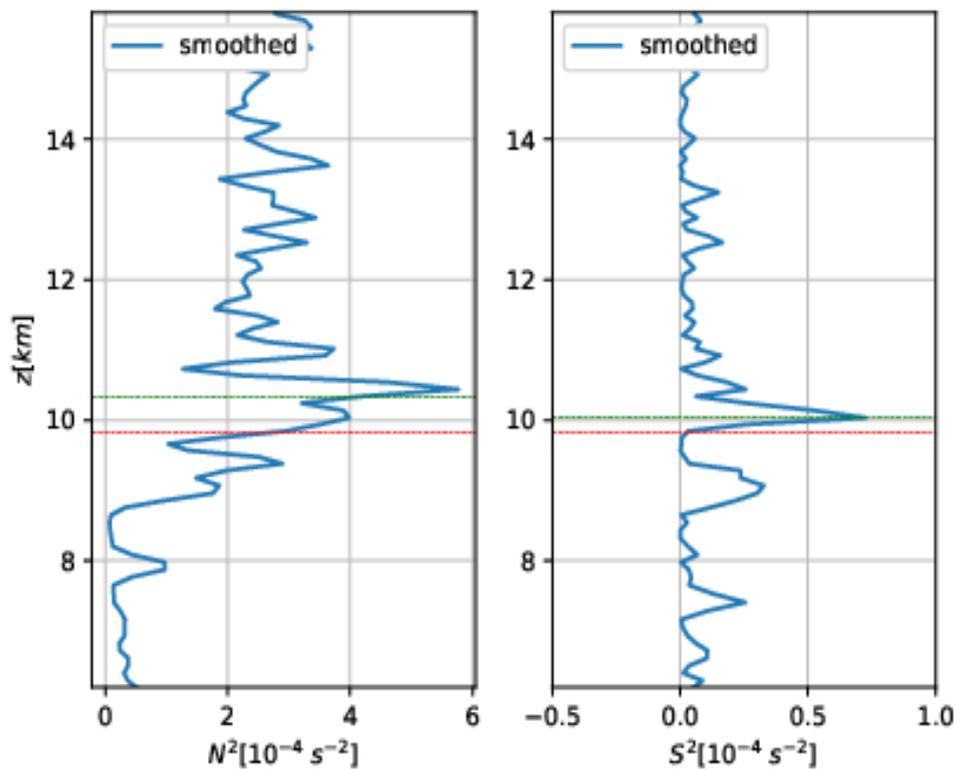


Fig. 16: Frecuencia de Brunt-Väisälä al cuadrado (izq.), y cortante vertical del viento al cuadrado (der.). El nivel de la tropopausa, z_{tp} , se indica en rojo, y en verde el máximo para cada magnitud.

Este último punto se encuentra en desarrollo. Como punto de partida, se espera poder realizar simulaciones en un dominio similar al utilizado por la Dirección Meteorológica de Chile, comprendido entre 50°-80°S y 20°-120°O. La Figura 17 muestra dicho dominio, junto con cuatro anidados (subdominios). La resolución del modelo se eligió de 50 km para el dominio madre, con un anidado de 10 km para representar la península. Anidados más pequeños, de 2 km, se planean a futuro (ver Figura 17), para poder contrastar datos con los resultados ya obtenidos por la DMC.

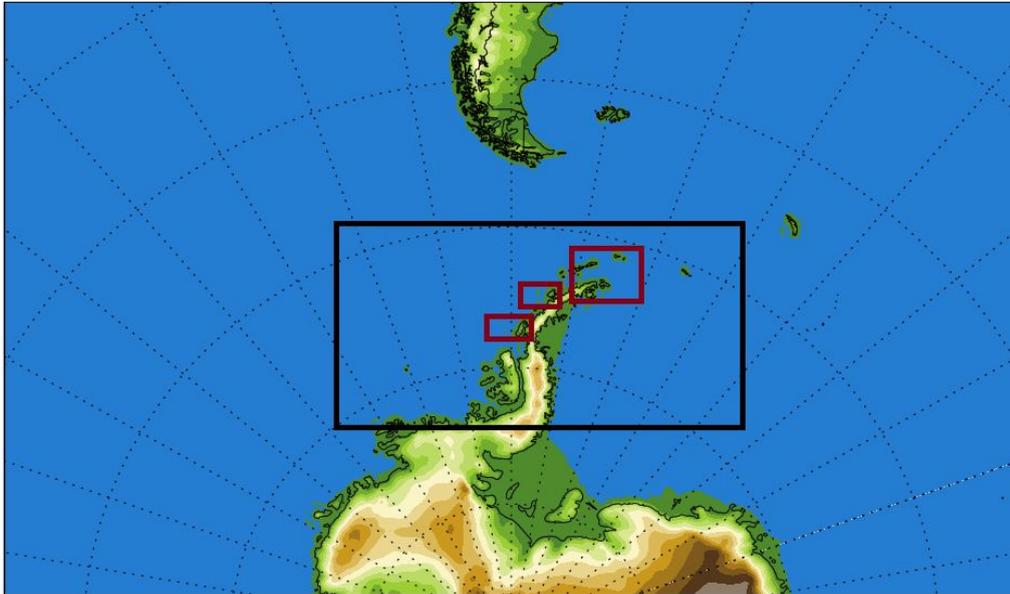


Fig. 17: Esquema del dominio planteado para una simulación del modelo PolarWRF.

4. CONCLUSIONES

El Dr. Godoy, el Lic. Rivaben y la Dra. Rodríguez Imazio, científicos asociados de *SouthTRAC*, constituyeron la participación del SMN en esta campaña internacional, la cual constó de diversas mediciones de alta resolución, remotas e *in situ*, de la atmósfera para latitudes altas al sur. Para lo que sigue, deben tenerse en cuenta tres aspectos de suma importancia:

- El acceso ilimitado que los investigadores (y por ende el SMN) poseen a los datos de la campaña (que serán públicos a partir del año 2024).
- La gran utilidad de los datos en el marco del plan estratégico de investigación y desarrollo del SMN. Por un lado, los parámetros atmosféricos que permiten realizar asimilación de datos en modelos de pronóstico numérico, los cuales son escasos para latitudes altas al sur. Por el otro, las mediciones de alta resolución de concentración de una gran cantidad de gases traza (entre ellos el ozono), a diferentes latitudes, longitudes y altitudes. Estas observaciones se obtuvieron y calibraron mediante dropsondes arrojadas durante los vuelos y un radar de apertura sintética montado en la base del avión, entre otros instrumentos.
- Las colaboraciones científicas surgidas durante el workshop y afianzadas posteriormente durante la campaña, para la cual el SMN brindó apoyo logístico e integró el comité de toma de decisiones, tanto académicas como operativas.

Por último, en el marco del workshop posterior a la campaña *SouthTRAC*, realizado los días 22 y 23 de Septiembre de 2020, se realizó y presentó un trabajo preliminar, titulado *Synoptic review of a polar-low CAT event during ST25*. En este se realizó un estudio detallado de un patrón sinóptico sucedido durante uno de

los vuelos de la campaña, asociado a un evento de turbulencia de aire claro sobre la península antártica. Para ello se combinó un análisis a partir de datos de reanálisis del modelo ERA5 con el cálculo de índices de turbulencia utilizando datos del modelo GFS, y datos *in situ* obtenidos de un radiosondeo de la base Marambio. Las principales conclusiones pueden resumirse en los siguientes puntos

- El pasaje de una baja polar muy profunda de escala sinóptica y una perturbación ciclónica en altura que cruzó el Pasaje de Drake a las 18 UTC favoreció una intrusión de aire estratosférico entre 450 hPa y 300 hPa y una disminución importante de la altura del nivel de la tropopausa, en coincidencia con el evento de CAT registrado.
- Las imágenes satelitales del GOES-16 correspondientes al vapor de agua en niveles medios, el parámetro frontal térmico e índices CAT calculados como ET11 y Brown, confirmaron posibles condiciones de turbulencia de aire claro cerca de la ubicación de la base Marambio.
- El ozonosondeo logró capturar la inversión de temperatura en la región de la tropopausa sobre la base Marambio.
- La frecuencia de Brunt-Väisälä y los valores de cortante vertical del viento indican inestabilidad dinámica por debajo de las condiciones de estabilidad térmica, consistentemente con el patrón sinóptico de naturaleza ciclónica observado.

Por último, se espera que los datos obtenidos en la campaña den continuidad a este trabajo, y puedan complementar la implementación de un modelo de pronóstico regional en la región antártica, como lo es el Polar WRF. También resulta importante mencionar la utilidad de los datos obtenidos en la campaña para la calibración de índices de turbulencia en el hemisferio sur, y su importante impacto sobre la meteorología aeronáutica.

Agradecimientos

Se agradece a la Dra. Vera Brensen y al Dr. Peter Hoor por el acceso e instalación del software MSS (Mission Support System) y a la Dra. Sonja Gisinger por el acceso a las comunicaciones de HALO en vivo durante la 2da fase de la campaña SouthTRAC. También se agradece a Andreas Dörnbrack por el acceso a la información del planeador y las comunicaciones durante la 1ra fase de la campaña. Agradecemos especialmente a Luciano Vidal y Martin Rugna por facilitarnos las imágenes de satélite GOES-16.

REFERENCIAS

Alexander, M. J., M. Geller, C. McLandress, S. Polavarapu, P. Preusse, F. Sassi, K. Sato, S. Eckermann, M. Ern, A. Hertzog, Y. Kawatani, M. Pulido, T. A. Shaw, M. Sigmond, R. Vincent, and S. Watanabe, 2010: Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* n/a–n/a. DOI: 10.1002/qj.637.

Austin, J., D. Shindell, S. R. Beagley, C. Brühl, M. Dameris, E. Manzini, T. Nagashima, P. Newman, S. Pawson, G. Pitari, E. Rozanov, C. Schnadt, and T. G. Shepherd, 2003: Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 3.1, pp. 1–27. DOI: 10.5194/acp-3-1-2003.

- Bekki, S., A. Rap, V. Poulain, S. Dhomse, M. Marchand, F. Lefevre, P. M. Forster, S. Szopa, and M. P. Chipperfield, 2013. "Climate impact of stratospheric ozone recovery". In: *Geophys. Res. Lett.* 40.11, pp. 2796–2800. DOI: 10.1002/grl.50358.
- Brown, R., 1973. "New indices to locate clear-air turbulence". *Meteorological Magazine*, 102, 347–361
- Butchart, N., A. J. Charlton-Perez, I. Cionni, S. C. Hardiman, P. H. Haynes, K. Krüger, P. J. Kushner, P. A. Newman, S. M. Osprey, J. Perlwitz, M. Sigmond, L. Wang, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, A. Baumgaertner, P. Braesicke, C. Brühl, et al., 2011. "Multimodel climate and variability of the stratosphere". In: *J. Geophys. Res.* 116.D5. DOI: 10.1029/2010jd014995.
- Dutton, M.J.O., 1980. "Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output". *Meteorological Magazine*, 109,293-309.
- Ellrod, G.P., Knapp D.I., 1992. "An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use". *Wea. Forecasting*, 7,150-165.
- Ern, M., P. Preusse, and C. D. Warner, 2006. "Some experimental constraints for spectral parameters used in the Warner and McIntyre gravity wave parameterization scheme". In: *Atmos. Chem. Phys.* 6.12, pp. 4361–4381. DOI: 10.5194/acp-6-4361-2006.
- Ferrer, A. J, Morinigo, A. S, Hordij, J.M, Lichtenstein, E. R, 1960; "Turbulencia en aire claro sobre el cono sur de Sudamérica" Publicación C, N°3 del Servicio Meteorológico Nacional.[12]pp.
- Geller, Marvin A., M. Joan Alexander, Peter T. Love, Julio Bacmeister, Manfred Ern, Albert Hertzog, Elisa Manzini, Peter Preusse, Kaoru Sato, Adam A. Scaife, and Tiehan Zhou, 2013. "A Comparison between Gravity Wave Momentum Fluxes in Observations and Climate Models". In: *J. Clim.* 26.17, pp. 6383–6405. DOI: 10.1175/jcli-d-12-00545.1.
- Gettelman, A., P. Hoor, L. L. Pan, W. J. Randel, M. I. Hegglin, and T. Birner, 2011. "The extratropical upper troposphere and lower stratosphere". In: *Rev. Geophys.* 49.3. DOI: 10.1029/2011rg000355.
- Godoy, A. A., N. Rivabén y P. Imazio, 2020: El SMN en la campaña SouthTRAC. Parte II: actividades científicas y apoyo en la campaña. Nota Técnica SMN 2020-76.
- Hegglin, Michaela I. and Theodore G. Shepherd, 2009. "Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux". In: *Nat. Geosci.* 2.10, pp. 687–691. DOI: 10.1038/ngeo604.
- Hertzog, Albert, Gillian Boccara, Robert A. Vincent, François Vial, and Philippe Cocquerez (2008). "Estimation of Gravity Wave Momentum Flux and Phase Speeds from Quasi-Lagrangian Stratospheric Balloon Flights. Part II: Results from the Vorcore Campaign in Antarctica". In: *J. Atmos. Sci.* 65.10, pp. 3056–3070. DOI: 10.1175/2008jas2710.1.
- Hoinka, K. P. 1999 "Temperature, Humidity, and Wind at the Global Tropopause." in *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2248–2265, DOI: [doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2248:THAWAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2248:THAWAT>2.0.CO;2).
- Konopka, Paul, Felix Ploeger, Mengchu Tao, Thomas Birner, and Martin Riese (2015). "Hemispheric asymmetries and seasonality of mean age of air in the lower stratosphere: Deep versus shallow branch of the Brewer-Dobson circulation". In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 120.5, pp. 2053–2066. DOI: 10.1002/2014jd022429.
- Lee D.R., Stull R.S., Irvine W.S., 1984; "Clear air turbulence techniques". Air Weather Service Tech. Note AFGWC/TN-79/001 (REV), Air Force Global Weather Central, Offutt AFB, Nebraska, 16.
- McLandress, Charles and Theodore G. Shepherd (2009). "Simulated Anthropogenic Changes in the Brewer–Dobson Circulation, Including Its Extension to High Latitudes". In: *J. Clim.* 22.6, pp. 1516–1540. DOI: 10.1175/2008jcli2679.1.
- Ploeger, F., G. Günther, P. Konopka, S. Fueglistaler, R. Müller, C. Hoppe, A. Kunz, R. Spang, J.-U. Grooß, and M. Riese (2013). "Horizontal water vapor transport in the lower stratosphere from subtropics to high latitudes during boreal summer". In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 118.14, pp. 8111–8127. DOI: 10.1002/jgrd.50636.

- Rautenhaus M, Bauer G, Dörnbrack A., 2012. A web service based tool to plan atmospheric research flights. *Geosci. Model Dev.* 5: 55–71.
- Riese, M., F. Ploeger, A. Rap, B. Vogel, P. Konopka, M. Dameris, and P. Forster, 2012. “Impact of uncertainties in atmospheric mixing on simulated UTLS composition and related radiative effects”. In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 117.D16. DOI: 10.1029/2012jd017751.
- Roach, WT., 1970; “On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence”. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 96, 413-429.
- Sato, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi, 2009. “On the origins of mesospheric gravity waves”. In: *Geophys. Res. Lett.* 36.19. DOI: 10.1029/2009gl039908.
- Schneider, A., Gerding, M., and Lübken, F.-J. 2015. “Comparing turbulent parameters obtained from LITOS and radiosonde measurements”. In: *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 2159–2166, DOI:doi.org/10.5194/acp-15-2159-2015.
- Shepherd, Theodore G., 2014. “Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections”. In: *Nat. Geosci.* 7.10, pp. 703–708. DOI: 10.1038/ngeo2253.
- Solomon, S., K. H. Rosenlof, R. W. Portmann, J. S. Daniel, S. M. Davis, T. J. Sanford, and G.-K. Plattner, 2010. “Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming”. In: *Science* 327.5970, pp. 1219–1223. DOI: 10.1126/science.1182488.
- Stiller, G. P., T. von Clarmann, F. Haenel, B. Funke, N. Glatthor, U. Grabowski, S. Kellmann, M. Kiefer, A. Linden, S. Lossow, and M. López-Puertas, 2012. “Observed temporal evolution of global mean age of stratospheric air for the 2002 to 2010 period”. In: *Atmos. Chem. Phys.* 12.7, pp. 3311–3331. DOI: 10.5194/acp-12-3311-2012.
- Wilson, R., H. Luce, F. Dalaudier, and J. Lefrère, 2010. “Turbulence Patch Identification in Potential Density or Temperature Profiles.” In: *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 977–993, DOI: doi.org/10.1175/2010JTECHA1357.1.
- Wirth, V., 2001. “Cyclone-anticyclone asymmetry concerning the height of the thermal and the dynamical tropopause”. In: *J. Atmos. Sci.*, 58, 26–37. DOI: [doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<0026:CAACTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<0026:CAACTH>2.0.CO;2).

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), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martin Rugna (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).