

# ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE LA TROPOPAUSA DINÁMICA EN BAJAS SEGREGADAS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Hernán Bechis<sup>1</sup>, Alejandro Aníbal Godoy<sup>1,2</sup>, Norma Edit Possia<sup>1,2</sup>, Claudia Marcela Campetella<sup>1,2,3</sup>.

[hernanbechis@hotmail.com](mailto:hernanbechis@hotmail.com)

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN – UBA

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET – UBA

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional, Argentina

## RESUMEN

Las bajas segregadas son circulaciones ciclónicas cerradas que se desarrollan en niveles altos de la tropósfera, quedando separadas del flujo de los oestes. Estos sistemas se asocian a profundas caídas de la tropopausa, permitiendo intrusiones de aire estratosférico en la tropósfera. Con el objetivo de evaluar la profundidad de estas intrusiones en sistemas de bajas segregadas que afectan la región sur de Sudamérica, en este trabajo se buscó la caída máxima de la tropopausa en 49 eventos de este tipo que se desarrollaron entre los años 1999 y 2008.

Para la identificación de la tropopausa se utilizó la definición dinámica, basada en tres umbrales de vorticidad potencial: -1.6, -2 y -3 PVU. Además, el método de detección se complementó con la utilización de campos de humedad específica, que resultaron útiles para descartar anomalías troposféricas de vorticidad potencial, que podrían confundirse con aire estratosférico.

El análisis de los resultados muestra que la tropopausa dinámica, desciende en las BS estudiadas en promedio hasta niveles de presión de 557 a 437 hPa dependiendo del umbral utilizado. Los sistemas de invierno resultaron ser los más profundos, llegando en promedio a presiones de 592 a 465 hPa. En casos muy intensos la tropopausa alcanzó niveles de 650 a 550 hPa

## ABSTRACT

Cut-off lows are closed cyclonic circulations that develop in high levels of the troposphere, separated from the westerly flow. These systems associate with deep tropopause folds, allowing stratospheric air intrusions within the troposphere. With the goal of evaluate the deep of this intrusions in cut-off lows that affect the southern South America region, in this work we search the maximum tropopause fold in 49 events of this type that develop between the years 1999 and 2008.

For the tropopause identification the dynamic definition was used, based in three potential vorticity thresholds: -1.6, -2 and -3 PVU. Besides, specific humidity fields were useful to rule out tropospheric potential vorticity anomalies, which could be confused with stratospheric air.

The analysis of the results show that in the cut-off lows the dynamic tropopause drops to pressure levels in average from 557 to 437 hPa, depending on the threshold used. Winter systems were the deepest, reaching in average pressure values between 592 and 465 hPa. In very intense cases the tropopause reaches levels from 650 to 550 hPa.

**Palabras clave:** Bajas segregadas, tropopausa, vorticidad potencial.

## 1) INTRODUCCIÓN

Las bajas segregadas (BS) son circulaciones ciclónicas cerradas que se desarrollan en niveles altos de la tropósfera, quedando segregadas del flujo de los oestes. Las mismas pueden extender su circulación ciclónica hasta superficie, aunque en ocasiones están acompañadas de un sistema de alta presión en niveles bajos.

Una característica importante de las BS es un descenso pronunciado de la tropopausa, que permite la intrusión de aire estratosférico hacia la tropósfera. Esto puede asociarse con el desarrollo de diversos fenómenos atmosféricos, algunos de ellos con riesgos para la población. Ejemplo de esto son los aumentos de las concentraciones de ozono en superficie, relacionados con intrusiones de aire estratosférico en proximidad de sistemas de BS, como los documentados por Rondanelli y otros (2002) en base a mediciones en el Cerro Tololo, Chile. Otra posible consecuencia de la caída de la tropopausa en BS es el incremento de la inestabilidad potencial debido al descenso de capas de aire seco estratosférico en niveles medios. Combinado con algún mecanismo de ascenso y disponibilidad de humedad, el desarrollo de convección húmeda profunda es posible. Russell y otros (2009) muestran un caso de BS sobre Gran Bretaña, en el que este mecanismo modifica el perfil vertical de la atmósfera, incrementando significativamente el CAPE y contribuyendo al desarrollo de tormentas intensas. Por último, estos sistemas representan también riesgo para la aviación, debido a la producción de turbulencia en aire claro por la fuerte cortante vertical del viento dada por la presencia del jet que generalmente rodea estos sistemas (Keyser y Shapiro, 1986).

Una manera de estimar que tan profundas son estas intrusiones estratosféricas es analizar la altura de la tropopausa. En este caso, se utilizó la definición “dinámica”, basada en la discontinuidad de la variable vorticidad potencial (VP) en la vertical, con bajos valores en la tropósfera y altos en la estratósfera. Si bien la Organización Meteorológica Mundial (1986) propuso utilizar la superficie de  $|PV|=1.6 \text{ PVU}^1$  en la definición de la tropopausa dinámica, no hay consenso acerca del umbral óptimo para todas las diferentes aplicaciones. En general, valores entre 1 y 4 PVU han sido utilizados en diferentes estudios en las últimas décadas (Ivanova, 2013), aunque el uso de umbrales demasiado altos en la delimitación de la tropopausa puede llevar a la pérdida de la estructura asociada a las intrusiones de aire estratosférico, especialmente en sistemas con circulaciones ciclónicas (ver Cox y otros 1997).

Este trabajo se centró en encontrar una primera aproximación de los niveles de presión alcanzados por la tropopausa dinámica en BS. Para ello se analizaron sistemas de BS que se desarrollaron en el sur de Sudamérica durante el período 1999-2008 y se calculó el mayor nivel de presión alcanzado por la tropopausa dinámica en cada caso. Debido a lo discutido anteriormente, se utilizaron umbrales de -1.6, -2 y -3 PVU, para poder comparar los resultados en función a la elección de este valor.

A continuación se detallan los datos utilizados para el análisis y la metodología de detección de la tropopausa.

## 2) DATOS UTILIZADOS Y METODOLOGÍA

Se propuso analizar la estructura de la tropopausa dinámica en los sistemas de bajas segregadas (BS) que afectan el sur de Sudamérica. Para ello se consideraron los 49 casos detectados por Godoy (2013)

---

<sup>1</sup> La vorticidad potencial toma en general valores positivos en el HN y negativos en el HS, puesto que es el producto de la vorticidad absoluta (positiva y negativa respectivamente en cada hemisferio) por la estabilidad estática.  $1\text{PVU}=1.0 \times 10^{-6} \text{ Km}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$

que ocurrieron entre los años 1999 y 2008 y se formaron sobre el Océano Pacífico al este de 90° O y entre los 15 y 50 grados de latitud sur. La elección de esta región se debió a que la traslación en general hacia el este de las BS hace que muchos de los sistemas allí iniciados afecten zonas continentales, además de que es una de las regiones preferenciales para su desarrollo (Fuenzalida y otros, 2005, Campetella y Possia, 2006).

Se utilizaron los datos del reanálisis ERA-INTERIM (Dee y otros, 2011) en superficies isobáricas, con una resolución espacial de un grado de latitud por un grado de longitud. Se utilizaron los campos de vorticidad potencial y humedad específica para los cálculos de la tropopausa. Además, se calculó la temperatura potencial a partir de los campos de temperatura de la misma fuente.

Para encontrar el nivel de presión correspondiente a la tropopausa dinámica en cada caso, se construyó un algoritmo compuesto por dos criterios que deben cumplirse simultáneamente. Primero, desplazándose desde el nivel de 700 hPa hacia arriba, se busca el primer nivel de presión cuyo valor de VP caiga por debajo del umbral utilizado (-1.6, -2 ó -3 PVU), de manera similar a lo propuesto por Hoinka (1998). Este nivel inferior se tomó por la necesidad de filtrar los efectos de la capa límite, que pueden generar altos valores de |VP|, no relacionados con la tropopausa. El nivel encontrado se identifica entonces con la tropopausa, siempre que cumpla con el segundo criterio, que requiere que la humedad específica sea menor a 1g/Kg. Esta segunda restricción permite filtrar máximos aislados de |VP| localizados en la tropósfera, a los que llamaremos como anomalías troposféricas de vorticidad potencial. Dichas anomalías pueden presentarse ocasionalmente debido a la liberación de calor latente en regiones de ascenso, y resultan problemáticas, puesto que pueden permanecer durante varios días y ocupar una extensión vertical significativa (Morgan y Nielsen-Gammon, 1998). Las regiones de ascenso en general se asocian con un transporte vertical de humedad, por lo que estas regiones de alta |VP| se distinguen claramente de las generadas por un descenso de la tropopausa, relacionadas con aire seco estratosférico.

Para ilustrar brevemente las ventajas de este algoritmo veamos algunos ejemplos:

a) Filtrado de Anomalías Troposféricas de Vorticidad Potencial:

La figura 1 muestra un corte vertical de vorticidad potencial y humedad específica en 36°S para las 06 UTC del 26 de Abril de 1999. Pueden verse en esa figura la caída de la tropopausa asociada a la BS presente ese día alrededor de 72°W y una anomalía interna de VP, centrada en 64°W y abarcando una capa de aproximadamente 300 hPa en la vertical. Esta anomalía no tiene una conexión clara con el sistema de BS, y posiblemente haya sido generada por los desarrollos convectivos observados en la región, identificables gracias a las imágenes satelitales de la fecha (no se muestran). Si bien la primera parte del algoritmo ubicaría la tropopausa cerca de los 650 hPa en la región de la anomalía interna, podemos ver como ésta está embebida en un entorno mucho más húmedo que la BS, quedando por debajo del contorno de 1g/Kg, con lo que es efectivamente filtrada por el método propuesto. En este caso, la tropopausa se ubicaría entonces cercana al nivel de 200 hPa.

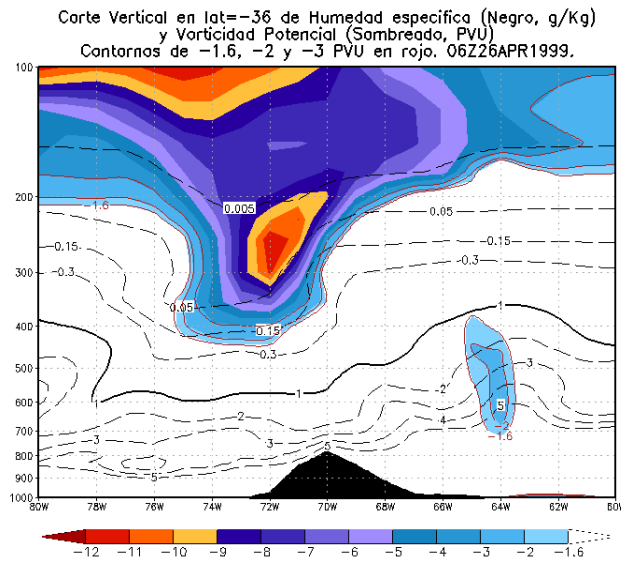


Figura 1. Corte vertical este-oeste en un caso de BS en el que se aprecia una anomalía interna de vorticidad potencial que podría ser malinterpretada como una tropopausa extremadamente baja. En sombreado se graficó la vorticidad potencial, con los contornos de -1.6, -2 y -3 PVU en rojo. También se muestran contornos de humedad específica en negro, con el de 1g/Kg utilizado en el algoritmo de detección resaltado con una línea negra.

b) Comparación con otro algoritmo similar:

Buscar la tropopausa con algoritmos como el propuesto, que relevan los niveles de presión de abajo para arriba, y que llamaremos “ascendentes”, tiene una clara ventaja con respecto a otros algoritmos “descendentes” (de arriba hacia abajo), especialmente cuando se trata con intrusiones estratosféricas en BS. Esto es debido a que, en muchas ocasiones, la caída de la tropopausa más profunda se presenta en los bordes del sistema, como una cuña de aire estratosférico que se introduce por debajo de aire troposférico (por ej. figura 2). Así, este tipo de patrones no son reconocidos por los algoritmos descendentes, que subestiman la altura de la tropopausa, especialmente en casos extremos. En particular, los reanálisis ERA-INTERIM cuentan con la variable presión en la superficie de -2 PVU, que se encuentra utilizando un algoritmo “descendente”, por lo que puede hacerse una comparación con el algoritmo “ascendente” propuesto.

Por ejemplo, la figura 3 muestra la presión alcanzada por la tropopausa dinámica para el umbral de -2 PVU, utilizando ambos algoritmos, para una BS que se presentó en Mayo de 2000 frente a la costa de Chile. Comparando los resultados de los dos métodos en el sector norte de la BS, puede verse que el algoritmo “ascendente” (fig. 3a) reconoce la máxima caída de la tropopausa dinámica hasta el nivel de 500 hPa, en los puntos de grilla en donde el algoritmo “descendente” (fig. 3b) ubica la tropopausa por encima de los 200 hPa. La máxima caída de la tropopausa reconocida por este último algoritmo es sólo hasta 400 hPa, y en una región al sur de lo encontrado por el método “ascendente”.

Para entender el porqué de estas diferencias, se realizó un corte vertical en dirección Sur-Norte de VP a través de la BS en 79°W (figura 2). Este corte confirma la presencia de una lengua de aire estratosférico en el norte del sistema, con aire troposférico por encima, y que no puede ser detectada por el algoritmo “descendente”, que por lo tanto subestima la magnitud de la intrusión estratosférica en este caso.

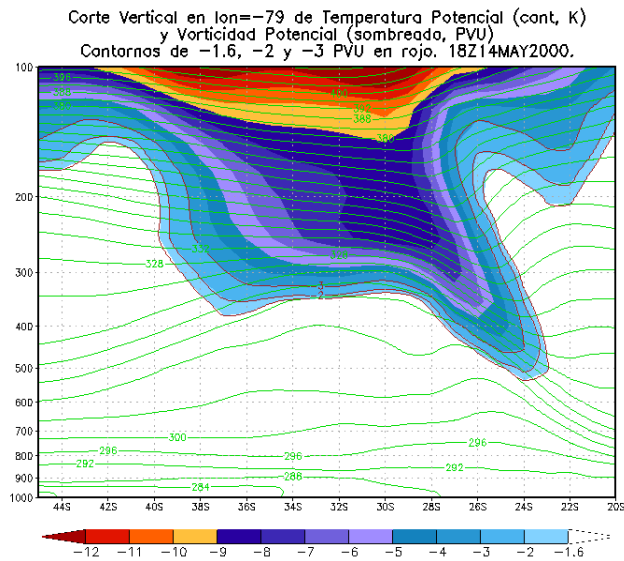


Figura 2. Corte vertical en dirección norte-sur para un caso del 14 de Mayo de 2000 a las 18 UTC. Notar la estructura de la tropopausa dinámica en 24°S que llevaría a una subestimación de la caída en los algoritmos “descendentes”. En sombreado se graficó la vorticidad potencial, con los contornos de -1.6, -2 y -3 PVU en rojo, y en verde la temperatura potencial.

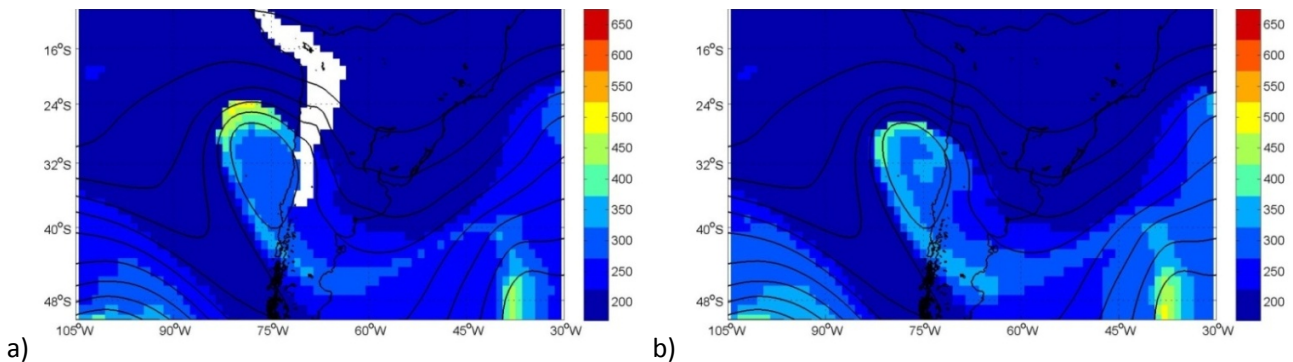


Figura 3. (a) Estimación de la presión de la tropopausa dinámica (umbral -2 PVU) con el algoritmo “ascendente” propuesto y (b) con el “descendente” utilizado en ERA-INTERIM para el mismo caso que en la figura 2. En contornos se superpuso el campo de altura geopotencial en 300 hPa correspondiente.

En resumen, el método sugerido presenta diversas ventajas para la estimación de la presión de la tropopausa dinámica en inmediaciones de BS, por lo que fue el elegido para el desarrollo de este estudio.

Una vez calculados los campos de presión de la tropopausa dinámica con el algoritmo elegido, el trabajo se enfocó en hallar la máxima caída, es decir, la mayor presión alcanzada por las superficies de -1.6, -2 y -3 PVU. Para esto se identificó para cada tiempo en el período de vida de la BS el mínimo de geopotencial en 300 hPa y se buscó la máxima presión de la tropopausa en una caja centrada en ese punto. Esta caja cubre 5 grados de longitud a cada lado del centro, 5 grados de latitud hacia el sur y 10 grados hacia el norte, esto último para asegurarse de incluir los valores extremos observados habitualmente en esa dirección. Se realizaron series temporales para cada caso con los valores encontrados y se extrajeron los valores más altos de cada serie. A continuación se presentan los resultados desprendidos de este análisis.

### 3) RESULTADOS

La base de datos de bajas segregadas (Godoy, 2013) cuenta en la región utilizada con 49 casos, de los cuales 6 corresponden al trimestre de verano (DEF), 18 al otoño (MAM), 13 al invierno (JJA) y 12 a la primavera (SON). El resultado del relevamiento de la caída máxima de la tropopausa en los sistemas de BS, expresada en términos del nivel de presión alcanzado, para cada una de estas estaciones, y los tres umbrales de vorticidad potencial puede resumirse en la figura 4. Para todos los umbrales de VP los sistemas de invierno son los que alcanzan depresiones de la tropopausa más profundas (en promedio 592, 542 y 465 hPa para -1.6, -2 y -3 PVU respectivamente), seguido por los de primavera (583, 525 y 446 hPa), otoño (553, 506 y 433 hPa) y finalmente verano (442, 408 y 367 hPa). A nivel anual, en promedio los 49 casos alcanzan los 557, 508 y 437 hPa para los tres umbrales.

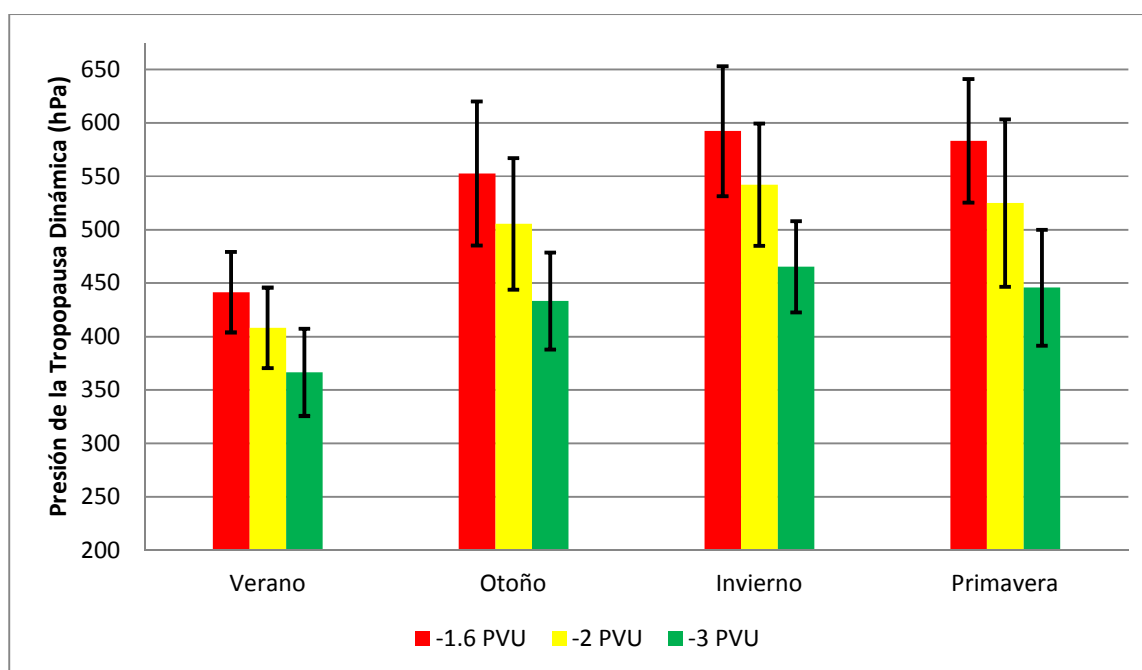


Figura 4. Presión de la tropopausa dinámica para los umbrales de -1.6 PVU (rojo), -2 PVU (amarillo) y -3 PVU (verde). Para cada estación la altura de las barras muestra el valor medio encontrado. Se indica también en barras de error  $\pm$  un desvío estándar.

Por otro lado, si analizamos los mayores valores encontrados en la serie de datos, la tropopausa alcanzó presiones tan altas como 650 hPa para los umbrales de -1.6 y -2 PVU y hasta 550 hPa para el de -3 PVU.

Si bien es difícil realizar estadísticas robustas debido a la poca cantidad de casos, es claro que se alcanzaron caídas importantes de la tropopausa en los sistemas estudiados. Más aún si se comparan los resultados con los valores climatológicos encontrados para la región en trabajos como el de Hoinka (1998). Utilizando umbrales de -1.6, -2.5 y -3.5 PVU, él encuentra que en un promedio anual la tropopausa dinámica no se encuentra por debajo de aproximadamente 340, 300 y 280 hPa respectivamente. Esto muestra, aunque sea de manera parcial, la característica extrema de las caídas de la tropopausa en las BS relevadas. Esto es de algún modo esperable, puesto que en dicha climatología se toman en cuenta todas las situaciones meteorológicas, y no solo las que generan depresiones en la tropopausa.

Por último, las diferencias apreciables en los resultados obtenidos para los diferentes umbrales hacen pensar que es necesario un análisis más profundo del valor de VP a utilizar en la definición de la tropopausa, de manera que la caída obtenida resulte un número relevante para la evaluación de los riesgos asociados a las BS.

#### **4) CONCLUSIONES**

Se analizó la caída de la tropopausa dinámica en 49 sistemas de bajas segregadas que afectaron el sur de Sudamérica durante el período 1999-2008. Utilizando tres umbrales de vorticidad potencial para la detección, se hallaron valores de presión de la tropopausa que para todas las estaciones del año se encontraron claramente por encima de la media climatológica. En particular, los casos de invierno resultaron ser los más extremos y, en promedio, llegaron hasta 592, 542 y 465 hPa, para los umbrales de -1.6, -2 y -3 PVU respectivamente.

Valores aún más extremos se encontraron en casos particulares, variando entre 650 hPa para los umbrales de -1.6 y -2 PVU, y hasta 550 hPa para el de -3 PVU.

Para el análisis se utilizó un nuevo método para la determinación de la presión de la tropopausa dinámica en bajas segregadas. La utilización de campos de vorticidad potencial, en combinación con información de humedad específica resultó satisfactoria para la eliminación de ambigüedades relacionadas con anomalías troposféricas de vorticidad potencial relacionadas a procesos convectivos.

#### **Agradecimientos**

El presente estudio fue financiado con el proyecto UBACyT: 20020120100284

#### **REFERENCIAS**

**Campetella, C. M. y Possia, N. E., 2006:** Upper-level cut-off lows in southern South America. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 181-191.

**Cox, B. D., Bithell, M. y Gray, L. J., 1997:** Modeling of Stratospheric Intrusions within a Mid-latitude Synoptic-scale Disturbance. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123, 1377-1403.

**Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F., 2011:** The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.

**Fuenzalida, H. A., Sánchez, R., & Garreaud, R. D., 2005:** A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 110(D18).

**Godoy, A. A., 2013:** Procesos dinámicos asociados a las bajas segregadas en el sur de Sudamérica. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. 192 pp.

**Hoinka, K. P., 1998:** Statistics of the global tropopause pressure, *Monthly Weather Review*. 126, 3303–3325.

**Ivanova, A. R., 2013:** The tropopause: Variety of definitions and modern approaches to identification. *Russian Meteorology and Hydrology*, 38(12), 808-817.

**Keyser, D., y Shapiro, M. A., 1986:** A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. *Monthly Weather Review*, 114(2), 452-499.

**Morgan, M. C. y Nielsen-Gammon, J. W., 1998:** Using tropopause maps to diagnose midlatitude weather systems. *Monthly weather review*, 126, 2555-2579.

**OMM, 1986:** Atmospheric ozone 1985: Global ozone research and monitoring report. Report 16, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 392 pp.

**Rondanelli, R., Gallardo L. y Garreaud, R. D., 2002:** Rapid changes in ozone mixing ratios at Cerro Tololo (30°10'S, 70°48'W, 2200 m) in connection with cutoff lows and deep troughs, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) 107(D23), 4677.

**Russell A, Vaughan G, Norton EG, Ricketts HMA, Morcrette CJ, Hewison TJ, Browning KA, Blyth AM., 2009:** Convection forced by a descending dry layer and low-level moist convergence. *Tellus* 61A, 250–263.