

ALGUNOS MECANISMOS DE ACOPLAMIENTO ENTRE LA TROPOPAUSA TÉRMICA Y LA MEDIA TROPOSFERA Y LA BAJA ESTRATÓSFERA EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Adrián E. Yucheche^(1,2), Pablo O. Canziani^(1,2), Susana A. Bischoff⁽³⁾

- (1) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina**
- (2) Equipo Interdisciplinario para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global (PEPACG), Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA), Buenos Aires, Argentina**
- (3) Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina**
ae@uca.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se analizan las estructuras espaciales más representativas del comportamiento conjunto de distintas tropopausas térmicas, i.e. simples o dobles, con la troposfera media y con la baja estratósfera, separadamente, en la región sur de Sudamérica. Asimismo, se presentan también las evoluciones temporales de dichas estructuras. Las tropopausas térmicas son calculadas a partir de datos de radiosondeo utilizando la definición de la Organización Meteorológica Mundial. La troposfera media (baja estratósfera) es representada por 500 (100) hPa y en ambos casos los datos utilizados provienen de los niveles estándar incluidos en los radiosondeos. A todos los datos se les aplica un criterio de selección para eliminar posibles valores erróneos. La variable utilizada es la altura geopotencial. La metodología consiste en el uso del Método de Componentes Principales en modo S para obtener los distintos modos de acoplamiento. En general, los resultados indican que las tres primeras estructuras espaciales más representativas pueden ser identificadas con fenómenos frecuentes de diferentes escalas en la región, como ser la propagación vertical de ondas planetarias, sistemas sinópticos (frentes fríos y bloqueos) y de mesoescala (sistemas convectivos de mesoescala).

ABSTRACT

The goal of this research is to identify the most representative spatial structures for the joint behaviour between different thermal tropopauses, i.e. single or double ones, and the middle troposphere and lower stratosphere, in a separate fashion, within the southern tip of South America. Likewise, the temporal evolutions of the aforementioned structures are also presented. Thermal tropopauses are calculated from radiosonde data following the World Meteorological Organization definition. On the other hand, the middle troposphere (lower stratosphere) is represented by 500 (100) hPa using data included in radiosondes for both mandatory levels. All datasets are applied a selection procedure in order to discard potential erroneous values. The working variable is geopotential height. Principal Components Analysis method in S-mode is used to obtain the different coupling modes. In summary, results show that the three most representative spatial structures can be identified with typical different scale phenomena occurring in the region, such as vertical propagation of planetary

waves, synoptic-scale systems (cold fronts and blockings) and mesoscale phenomena (mesoscale convective complexes).

1. INTRODUCCIÓN

De la misma manera que la tropopausa dinámica se ha utilizado como elemento de diagnóstico que resuelve apropiadamente los distintos procesos atmosféricos (e.g. Morgan y Nielsen-Gammon, 1998; Nielsen-Gammon, 2001) la tropopausa térmica también podría ser utilizada con el mismo fin. Hasta el momento esta es un área de investigación vacante. Quizás la explicación por la cual la tropopausa dinámica es la preferida a la hora de efectuar los estudios mencionados reside en que la misma se define a través de la vorticidad potencial (Ertel, 1942a, 1942b), una cantidad dinámica que requiere de cierta densidad de datos para ser calculada, debido fundamentalmente a que es preciso evaluar la vorticidad relativa. Tal densidad de datos es imposible que se encuentre sobre ciertas regiones del Globo haciendo uso de la red aerológica mundial, sobre todo en zonas oceánicas, un inconveniente que no se tiene si se utilizan datos de reanálisis. Es por ello que frecuentemente los trabajos que tratan con la tropopausa dinámica utilizan datos de reanálisis. Una superficie con un valor apropiado de vorticidad potencial, denominada superficie isertélica, define a la tropopausa dinámica. La existencia de tropopausas múltiples dentro del marco de la tropopausa dinámica es ampliamente aceptada, algo que ocurre toda vez que una línea vertical corta la misma superficie isertélica al menos dos veces. Sin embargo, en contraste con el uso masificado de la tropopausa dinámica no existen trabajos que hagan mención a tropopausas dobles para la misma, ni para el Globo en general ni para Sudamérica en particular, un resultado que sí es conocido para la tropopausa térmica (e.g. Bischoff et al., 2007; Yuchechen, 2009). El objetivo del presente trabajo es el de identificar diversos procesos regionales que relacionen a las distintas tropopausas con dos niveles estándar, uno representativo de la troposfera media (500 hPa) y el otro de la baja estratósfera (100 hPa), de manera de utilizar a la tropopausa térmica como una herramienta alternativa de diagnóstico y de pronóstico para tales procesos.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En principio, los datos a utilizar provienen de 22 estaciones de radiosondeo ubicadas en Argentina, Bolivia, Chile, sur de Brasil, e Islas Malvinas, obtenidos de la base de datos global de radiosondeos de la Universidad de Wyoming. Para cada uno de los sondeos disponibles sobre cada estación la información para 500 y 100 hPa es extraída de los niveles estándar si la misma se encuentra disponible, mientras que las tropopausas se calculan a partir de los niveles significativos por medio de un programa en lenguaje FORTRAN respetando la definición de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, 1992). Si bien el mencionado programa puede calcular hasta cinco tropopausas distintas para cada sondeo, aquí sólo se utilizarán los datos de tropopausas simples y dobles. A todos los datos se les aplica un proceso de selección para eliminar valores potencialmente erróneos. Para los datos que superan el proceso de selección la metodología aplicada es la siguiente. En cada una de las estaciones de radiosondeo a utilizar se calculan las series de valores medios de altura geopotencial para cada una de los niveles de interés, obteniéndose el “año climático” para el período 1973-2007, incluyendo un valor por cada uno de los 366 días que lo

componen. En esta instancia cabe mencionar que se incluye toda la información disponible para cada una de las estaciones, sin importar la hora de lanzamiento de cada radiosondeo. En el caso de que existan datos faltantes luego de efectuar los promedios se efectúa una interpolación lineal para obtenerlos, a menos que la cantidad consecutiva de datos faltantes sea excesiva, en cuyo caso directamente se descarta la estación. A cada una de las series obtenidas se les aplica un análisis armónico, y se generan las anomalías extrayéndose de las series originales la media anual y aquellos armónicos que superen el 10% de la varianza explicada, obteniéndose una serie de anomalías para cada serie original. Luego estas anomalías son estandarizadas por estación, armándose una matriz \mathbf{Z} con 366 columnas y con el doble del número de estaciones (que varía según el caso analizado debido a la excesiva falta de datos) como número de filas. La mitad superior (inferior) de las filas incluye las anomalías de altura de tropopausa (nivel estándar), una fila por cada estación. El paso final es confeccionar la matriz de correlaciones $\mathbf{R} = \mathbf{Z}\mathbf{Z}^T$ para cada par (tropopausa, nivel estándar), con seis pares totales. Los diferentes modos de acoplamiento se obtienen por medio del Método de Componentes Principales en modo S, usualmente denominados EOF (por Empirical Orthogonal Function), como los autovectores de la matriz \mathbf{R} . Tradicionalmente suelen mostrarse las EOF en orden descendente de varianza espacial representada, siendo la EOF1 la estructura más representativa. La evolución temporal de cada EOF puede estimarse a partir de la relación $\mathbf{Z} = \mathbf{E}\mathbf{C}(t)$, donde \mathbf{E} son las EOFs y donde los coeficientes dependientes del tiempo se denominan *factor scores*, o simplemente *scores*.

3. RESULTADOS

La estructura espacial más representativa para el acoplamiento de tropopausa simple y 500 hPa se muestra en la Figura 1, como así también el campo real de anomalías que presenta mejor correlación con ella. La EOF1 tiene una varianza explicada de 13,04%. Puede observarse que las estructuras de tropopausa y 500 hPa se encuentran en fase, con un núcleo de anomalías máximas ubicado en el centro del dominio. La Figura 1 también muestra la evolución temporal de los scores correspondientes, marcándose con una flecha con qué score se asocia la máxima correlación. Se denomina *factor loading*, o simplemente *loading*, al valor de correlación entre cada una de las estructuras y los campos reales. En general, la evolución temporal de los loadings y los scores se encuentra en fase. Puede notarse de la Figura 1 que los scores poseen una marcada estacionalidad. La onda semianual representa el 50% de la varianza total de la serie. Cuando los scores adoptan valores positivos (negativos) se dice que las estructuras encontradas se presentan en modo directo (inverso). Luego, las estructuras obtenidas se encuentran en modo directo (inverso) aproximadamente durante los equinoccios (solsticios).

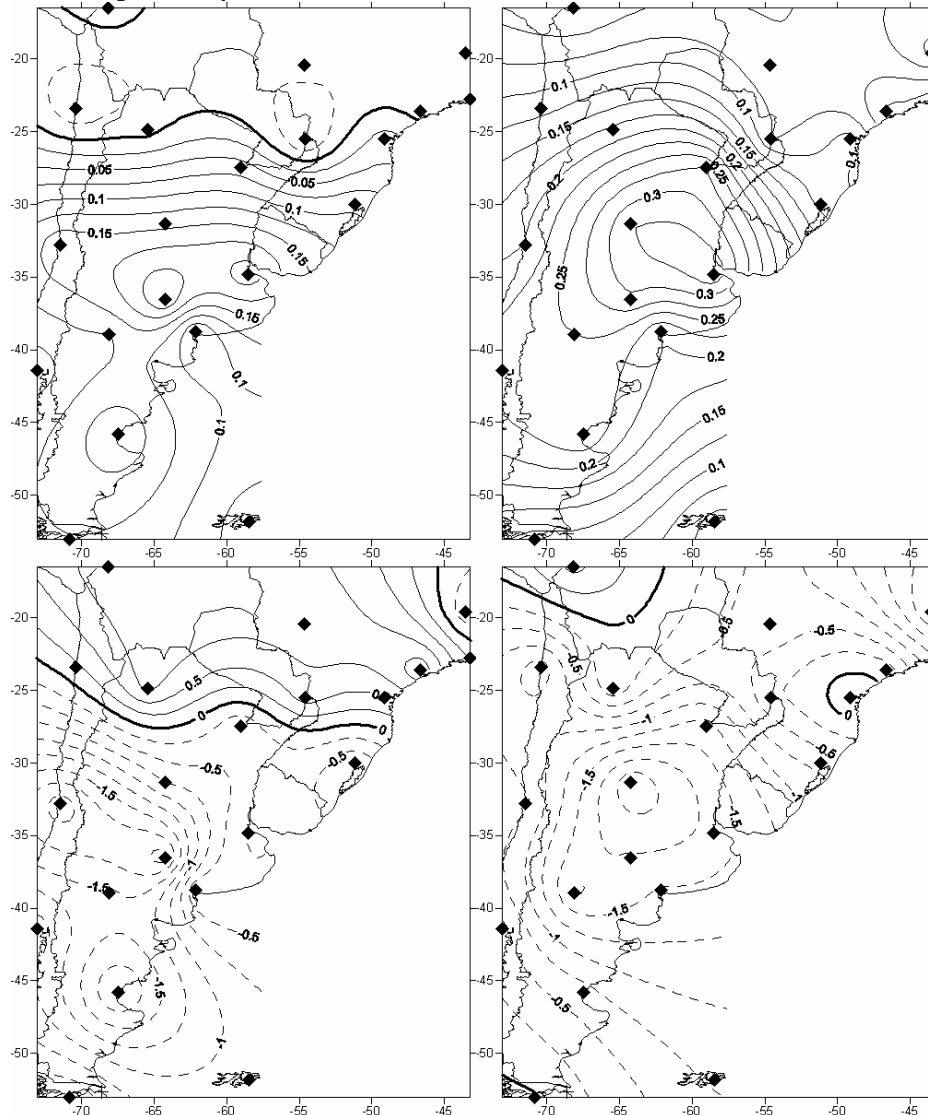
La Figura G1 del ERA-40 Atlas (Kållberg et al., 2005) (no mostrada aquí) representa el comportamiento del viento zonal medio entre 1000 y 0.1 hPa a lo largo del año para regiones ecuatoriales. De ella puede verse que existe una reversión en la dirección del viento dos veces al año. Casi por obviedad se denomina Semiannual Oscillation (SAO) a tal comportamiento. Es importante notar que la SAO ecuatorial se encuentra en fase con la serie temporal de scores mostrada en la Figura 1. La condición para propagación vertical de ondas planetarias es que el viento medio zonal \bar{u} sople del oeste y no sea muy intenso (e.g. Zdunkowski y Bott, 2003, p. 479; Vallis, 2006, p. 557) de manera que en regiones

ecuatoriales existe la posibilidad de propagación vertical solamente durante los equinoccios. Algo similar puede concluirse para latitudes medias del Hemisferio Sur (HS) pues en 500 hPa la diferencia de temperatura media zonal \bar{T} entre 50°S y 65°S, i.e. $\bar{T}_{50^{\circ}S}^{500} - \bar{T}_{65^{\circ}S}^{500}$, también tiene un comportamiento semianual (ver Meehl, 1991, Fig. 4), en fase con la SAO ecuatorial. Debido a que tal diferencia de temperaturas se invierte dos veces al año, también lo hará la dirección del viento térmico, el cual soplará del oeste justamente durante los equinoccios, cuando $\bar{T}_{50^{\circ}S}^{500} - \bar{T}_{65^{\circ}S}^{500} > 0$. Será entonces durante los equinoccios cuando exista la posibilidad de propagación vertical de ondas planetarias para latitudes medias del HS, al menos en 500 hPa. Esto es justamente lo que puede interpretarse para las estructuras espaciales encontradas en la EOF1. Durante los equinoccios, el modo directo de la EOF1 permite la propagación vertical de ondas de Rossby en 500 hPa, cuya señal se representa por anomalías positivas. La señal de propagación vertical también alcanza a la tropopausa simple, aunque se presenta atenuada debido a que en cercanías de la tropopausa se encuentra el jet, para el cual \bar{u} es importante. Así, la propagación vertical de ondas de Rossby troposféricas eleva tanto la superficie de 500 hPa como la de tropopausa simple. Durante los solsticios, cuando la EOF1 se encuentra en modo inverso, la propagación vertical se encuentra inhibida y las anomalías de altura de ambas superficies son negativas. La inhibición de la propagación vertical coincide con las épocas en las que se registran mayores tasas de ciclogénesis en superficie en la región, i.e. verano e invierno. Estos resultados están de acuerdo con aquellos que indican que un descenso de la tropopausa desestabiliza la baja troposfera (e.g. Griffiths et al., 2000). Particularmente durante invierno los scores adoptan valores mínimos, i.e. la tropopausa adopta su posición más baja, y la región se convierte en una de las más ciclogénicas del HS (Hoskins y Hodges, 2005). Cabe destacar que tal descenso de la tropopausa también está relacionado con el ingreso de aire estratosférico hacia la troposfera (Yuchechen, 2009). La crítica que puede efectuarse a la interpretación de propagación vertical vertida aquí es que la misma se efectúa con promedios zonales, pero ello no afecta las conclusiones obtenidas debido a que los datos utilizados tienen carácter climatológico (incluyen 35 años de información), al igual que los promedios zonales.

Si bien las siguientes dos estructuras más representativas para el acoplamiento entre tropopausa simple y 500 hPa, i.e. EOF2 y EOF3 no se muestran aquí por falta de espacio, se mencionará brevemente a qué situaciones físicas corresponden. La primera de ellas representa el avance de frentes fríos desde el sudoeste. Las estructuras espaciales de la EOF2 explican $\approx 10\%$ de la varianza espacial total, con anomalías de signo opuesto a ambos lados de la línea frontal. Al comparar los campos de tropopausa con los de 500 hPa dichas anomalías se encuentran en fase. Por otra parte, la EOF3 representa situaciones de bloqueo, con mayor predominancia durante el otoño. En conjunto, las tres primeras EOF explican el $\approx 30\%$ de la varianza espacial total.

Hasta aquí solo se ha hecho mención al acoplamiento tropopausa simple/500 hPa. Es interesante mencionar que los resultados para el acoplamiento tropopausa simple/100 hPa representan los mismos fenómenos físicos descritos aquí. Y aún más. Como regla general, las primeras tres EOF se vinculan con propagación vertical de ondas planetarias, avance de frentes fríos y bloqueos, no solamente para los acoplamientos descritos aquí, sino también para los acoplamiento tropopausa inferior/500 hPa, tropopausa inferior/100 hPa, tropopausa superior/500 hPa y tropopausa superior/100 hPa. Existen ciertos detalles en cuanto a la EOF1

(referentes a la posición e intensidad del jet dependiendo de la tropopausa utilizada) que han sido omitidos y que el lector interesado podrá encontrar desarrollados en Yucheche (2009). La única violación a la regla establecida aquí parece tener lugar para el acoplamiento tropopausa superior/100 hPa, en el cual las estructuras espaciales de la EOF3 no representan bloques, sino sistemas convectivos de mesoescala. Nuevamente, el lector es remitido a Yucheche (2009) para mayores detalles.



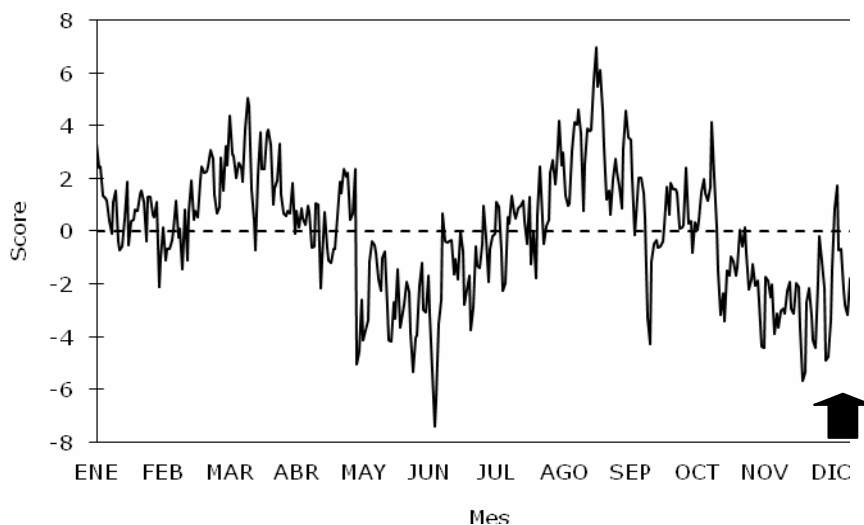


Figura 1 – Estructuras espaciales y evolución temporal asociadas al acoplamiento de alturas normalizadas de tropopausa simple y 500 hPa para la EOF1. El grupo de estructuras espaciales muestra la EOF (arriba) y el campo real mejor correlacionado con ella (abajo). Tropopausa (500 hPa) corresponde al panel de la izquierda (derecha). Las líneas sólidas (punteadas) representan valores positivos (negativos), mientras que la línea sólida más gruesa denota el cero. El valor del loading más significativo es de $r = -0.71$ y se corresponde con el score marcado por la flecha (ver texto para definiciones).

4. CONCLUSIONES

Una de las conclusiones del presente estudio es que las estructuras espaciales más representativas de los distintos acoplamientos entre las diferentes tropopausas y 500 y 100 hPa se vinculan a fenómenos característicos de la región analizada, como ser la propagación vertical de ondas planetarias, los frentes fríos y los bloqueos. Quizás aún más importante es el hecho de que la tropopausa térmica, en este caso en combinación con niveles estándar, permite resolver correctamente los distintos fenómenos que tiene lugar en la atmósfera, algo que ya ha sido verificado utilizando la tropopausa dinámica. Esto pone de manifiesto el hecho de que la descripción de un fenómeno físico no puede depender de la forma elegida para estudiarlo, a la vez que reconcilia las definiciones de ambas tropopausas, usualmente tratadas como incompatibles.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de la Tesis Doctoral del primer autor, llevada a cabo a lo largo de 5 años con una beca otorgada por el CONICET y con lugar de trabajo dentro de la Pontificia Universidad Católica Argentina. Queremos expresar nuestra gratitud hacia la Universidad de Wyoming por poner a disposición del público su base de datos global de radiosondeos. El presente trabajo fue financiado con los subsidios CONICET PIP2004 5276 y BID 1728/OC-AR PICT 2004-26094.

6. REFERENCIAS

- Bischoff, S. A., P. O. Canziani, y A. E. Yuchechechen, 2007: The tropopause at southern extratropical latitudes: Argentine operational rawinsonde climatology, *Int. J. Climatol.*, **27**, 189-209, doi:10.1002/joc.1385
- Ertel, H., 1942a: Ein neuer hydrodynamischer Erhaltungssatz, *Naturwissenschaften*, **30**, 543-544
- Ertel, H., 1942b: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz, *Meteor. Z.*, **59**, 277-281
- Griffiths, M., A. J. Thorpe, y K. A. Browning, 2000: Convective destabilization by a tropopause fold diagnosed using potential-vorticity inversion, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 125-144
- Hoskins, B. J., y K. I. Hodges, 2005: A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks, *J. Climate*, **18**, 4108-4129
- Kållberg, P., P. Berrisford, B. Hoskins, A. Simmons, S. Uppala, S. Lamy-Thépaut, y R. Hine, 2005: *ERA-40 Project Report Series No. 19*, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, England, vii + 191 pp.
- Meehl, G. A., 1991: A Reexamination of the Mechanism of the Semiannual Oscillation in the Southern Hemisphere, *J. Climate*, **4**, 911-926
- Morgan, M. C., y J. W. Nielsen-Gammon, 1998: Using Tropopause Maps to Diagnose Midlatitude Weather Systems, *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2555-2579
- Nielsen-Gammon, J. W., 2001: A Visualization of the Global Dynamic Tropopause, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82** (6), 1151-1167
- Vallis, G. K., 2006: *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*, Cambridge University Press, Cambridge, CB2 8RU, UK, xxv + 745 pp.
- World Meteorological Organization, 1992: *International Meteorological Vocabulary – No. 182*, Second edition, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, xv + 784 pp.
- Yuchechechen, A. E., 2009: *La Tropopausa Térmica en el Sur de Sudamérica: Climatología, Variabilidad, y Relaciones con la Tropósfera Media y la Baja Estratósfera*, Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 311 pp.
- Zdunkowski, W., y A. Bott, 2003: *Dynamics of the Atmosphere: A Course in Theoretical Meteorology*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, xviii + 719 pp.