

# La variabilidad de las anomalías baroclínicas en diferentes escalas de tiempo y su papel para la persistencia de la corriente en chorro.

Javier Blanco-Fuentes<sup>(1)</sup>, Pablo Zurita-Gotor<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), España (javibf@fis.ucm.es)

<sup>(2)</sup>Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), España (pzurita@fis.ucm.es)

## Introducción y Motivación

Se ha visto tanto en observaciones como en modelos de circulación general que los modos anulares son el principal patrón de variabilidad de la presión a nivel del mar tanto en el hemisferio Norte (HN) como en el Sur (HS) [Thompson and Wallace, 2000]. Este patrón tiene estructura dipolar, la cual se asocia a una migración latitudinal del viento zonal. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) se caracteriza asimismo por un dipolo de presiones, aunque en este caso localizado sobre la cuenca Atlántica.

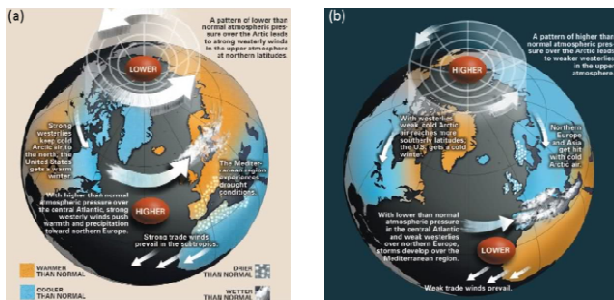


Figura 1: Oscilación del Atlántico Norte (IPCC 2007) en su fase positiva (a) y negativa (b).

La climatología del HS tiene una alta simetría zonal. El viento medio zonal en dicho hemisferio (Fig. 2a) muestra dos máximos diferenciados asociados a las corrientes en chorro subtropical y extratropical. La corriente en chorro extratropical tiene influencia hasta la superficie, de forma que su máximo se asocia al máximo en la componente barotrópica, observado aproximadamente a 50°S.

El modo dominante de variabilidad interna del viento zonal en ambos hemisferios es un movimiento latitudinal de la corriente en chorro (ver Fig. 2b para el HS). Esta variabilidad tiende a ocurrir en escalas de tiempo más largas que la escala característica (sinóptica) del flujo eddy de momento que fuerza dicho desplazamiento (Figs. 2c y 2d). Ello podría ser debido en parte a una realimentación positiva, que se produciría cuando el flujo eddy de momento tiende a reforzar las anomalías de baja frecuencia del viento zonal en vez de ser aleatorio [Lorenz & Hartmann, 2001]. Sin embargo, el mecanismo implicado en dicha realimentación no ha sido aún clarificado.

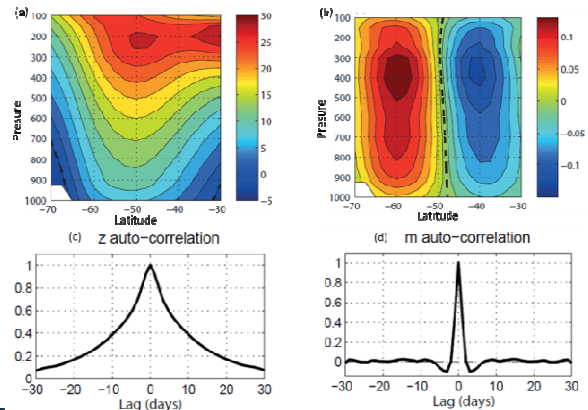


Figura 2: (a) Climatología del viento zonal promediado zonalmente en el HS y (b) primer modo de variabilidad. (c) Persistencia del primer modo y (d) de su forzamiento eddy para distintos desfases.

Robinson [2000] ha propuesto un mecanismo baroclínico para explicar este fenómeno. Este autor especula que cuando los flujos eddy de momento desplazan la corriente en chorro, la fricción reduce el viento en superficie y genera baroclinicidad en la región de convergencia de momento. Ello resulta a su vez en una generación eddy anómala siguiendo a la intensificación de la baroclinicidad, reforzándose de esta forma la convergencia de momento cuando los eddies se propagan meridionalmente desde la región de generación. Aunque este mecanismo parece plausible, su relevancia no ha sido aún testada en observaciones. De forma más general, no están claros los mecanismos que producen variabilidad interna de la baroclinicidad en las regiones extratropicales.

Con esta motivación, nuestro trabajo investiga la variabilidad interna de la baroclinicidad. En primer lugar, se describirá la variabilidad de la baroclinicidad en el Hemisferio Sur (HS) y se investigará su relación con la variabilidad de la componente barotrópica. A continuación se estudiarán los ciclos de vida de la baroclinicidad. Finalmente se describirán los modos de variabilidad en el HN, exponiendo las diferencias encontradas con el HS.

## Datos y metodología

Para realizar este trabajo se han utilizado datos diarios a niveles de presión constante del reanálisis del National Center for Environmental Prediction (NCEP) [Kalnay et al., 1996] desde 1978 a 2010 en ambos hemisferios.

Todos los cálculos se han realizado con las anomalías diarias de cada serie. Para ello, se ha eliminado el ciclo estacional, definido a partir de los 4 primeros armónicos de la climatología diaria. Se han utilizado datos anuales y globales para el HS, mientras que en el HN sólo se ha estudiado la cuenca Atlántica durante un invierno extendido (Noviembre a Abril).

Se define la baroclinicidad como el gradiente meridional de la temperatura potencial. Las variables eddy (denotadas con prima) están referidas a desviaciones respecto de la media zonal (denotada con barra):

$$A = \bar{A} + A'$$

Para el análisis de EOFs, las anomalías fueron pesadas por la raíz cuadrada de la masa de la rejilla de malla en cada punto. En algunos casos, las series se han filtrado utilizando un filtro Lanczos con 31 pesos [Hamming, 1989].

## Climatología y modos de variabilidad de la baroclinicidad

En la climatología, la baroclinicidad está determinada por el balance entre los procesos diabáticos que la fuerzan y los flujos eddy meridionales de calor que la suavizan [Hartmann 1994]. Los flujos eddy de momento también contribuyen a la regeneración de la baroclinicidad extratropical a través del calentamiento adiabático en la célula de Ferrel [Robinson, 2006], siendo este término menor que los otros dos pero no despreciable.

En contraste, la relación entra la variabilidad de la baroclinicidad y la actividad eddy ha sido mucho menos estudiada. Existen 2 posibles escenarios, cuya relevancia podría depender de la escala de tiempo considerada. En primer lugar, podría darse una variabilidad episódica, de forma que la baroclinicidad se redujera durante los ciclos de vida de los eddies [Simmons and Hoskins, 1978] y fuera restaurada cuando éstos se debilitan. Una segunda posibilidad es que la variabilidad de la baroclinicidad fuera forzada por los flujos eddy de momento, en cuyo caso la variabilidad se caracterizaría por un desplazamiento meridional siguiendo al viento barotrópico como en el mecanismo propuesto por Robinson [2000].

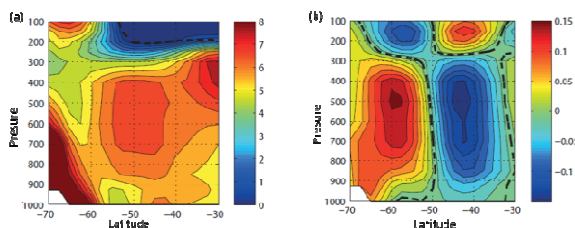


Figura 3: Climatología (a) y primer modo de variabilidad (b) de la baroclinicidad promediada zonalmente en el HS.

En la figura 3a podemos observar que el máximo de la climatología de la baroclinicidad en el HS sigue estando en torno a 50°S pero con una estructura más compleja que en el caso del viento zonal. El primer modo de variabilidad sigue siendo un desplazamiento en torno a ese máximo (Fig. 3b). Esto muestra que las anomalías barotrópicas y baroclínicas tienen un patrón de variabilidad similar.

Si estudiamos los dos primeros modos de variabilidad para la altura de 600hPa (Fig. 4), podemos observar que el primer modo representa nuevamente un desplazamiento latitudinal (varianza explicada 35,4%), mientras que el segundo modo se asocia a un reforzamiento o debilitamiento (varianza explicada 24,9%). Estos resultados son robustos para todos los niveles de presión.

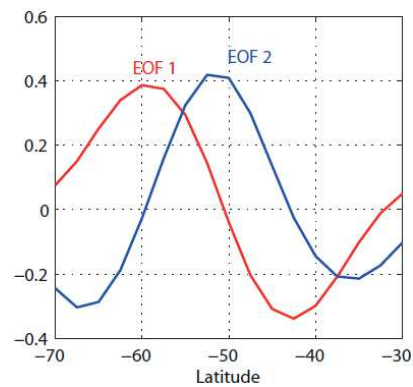


Figura 4: Modos principales de variabilidad de las anomalías baroclínicas a 600hPa en el HS

Se ha realizado un estudio preliminar para ver cómo son de robustos estos resultados para distintas escalas de tiempo (Tabla 1). Se ha encontrado que en la baja frecuencia los dos modos son robustos tanto en estructura como en su ordenación en cuanto a la varianza explicada, siendo la separación entre ellos mayor para mayores periodos de filtrado. Sin embargo, en la alta frecuencia ambos modos explican una varianza similar y no se pueden separar según el criterio de North et al. [1982].

	Desplazamiento	Reforzamiento
10 días 'low'	43,0%	24,9%
30 días 'low'	50,1%	22,0%
90 días 'low'	52,5%	20,2%
10 días 'high'	28,5%	25,4%
30 días 'high'	28,7%	27,2%
90 días 'high'	31,1%	26,6%

Tabla 1: Varianza explicada de los modos principales filtrando con Lanczos pasa baja y pasa alta para el HS.

## Relación entre las anomalías barotrópicas y baroclínicas

Se ha estudiado la relación entre las anomalías barotrópicas y las baroclínicas. Las anomalías barotrópicas se han definido como la integral vertical del viento zonal desde la superficie hasta 100hPa, promediado zonalmente. Su correlación con las anomalías baroclínicas definidas anteriormente es altamente significativa, y alcanza su valor máximo cuando las anomalías barotrópicas preceden a las baroclínicas por unos pocos días (Fig. 5). Este resultado apoya el mecanismo propuesto por Robinson [2000].

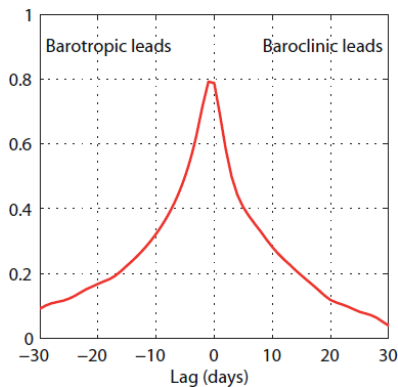


Figura 5: Correlación cruzada entre el viento barotrópico y baroclínico para el HS

## Ciclos de vida de las anomalías baroclínicas

Se ha estudiado en más detalle cuáles son los distintos forzamientos que intervienen en el desplazamiento de la baroclinicidad. Para ello, se ha construido una ecuación derivando meridionalmente la ecuación termodinámica y proyectándola sobre el primer modo a 600hPa:  $B(t) = -\bar{v} \cdot \overline{E O F 1(\psi)}$ . Esta ecuación puede expresarse esquemáticamente:

donde los tres primeros términos de la derecha son debidos al flujo eddy de calor, la circulación meridional y el calentamiento diabático (calculado como un residuo). Otros términos son despreciables.

La figura 6a muestra la correlación para distintos desfases entre las anomalías baroclínicas y los principales forzamientos. La tendencia total (en negro) muestra un ciclo de crecimiento y declive con un periodo de 10-15 días. Todos los forzamientos intervienen en esta tendencia, sin que ninguno sea dominante.

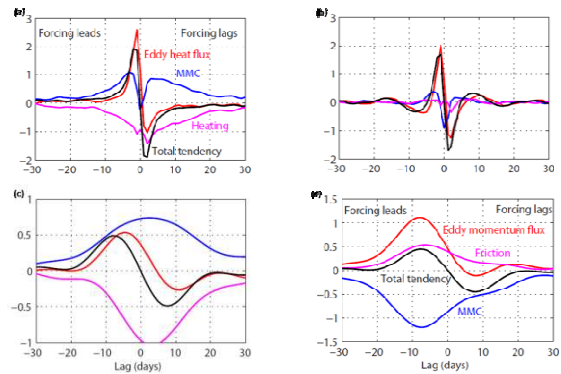


Figura 6: Correlación para distintos desfases entre las anomalías baroclínicas y los distintos forzamientos: (a) en datos sin filtrar, (b) en datos filtrados a alta y (c) en datos filtrados a baja. (d) El mismo análisis para la cizalla y sus forzamientos.

Si filtramos las series para distintas escalas de tiempo aparece una imagen muy distinta. Para alta frecuencia (fig. 6b), la baroclinicidad media zonal simplemente responde al rápido forzamiento debido al flujo eddy de calor, que varía en escalas sinópticas.

Si examinamos la baja frecuencia se observa una dinámica muy distinta. Las anomalías baroclínicas son ahora forzadas principalmente por la circulación meridional, y debilitadas por el calentamiento diabático. El flujo eddy de calor sigue a la tendencia total, como era de esperar.

Para entender mejor el origen del forzamiento debido a la circulación meridional se ha repetido el análisis para la cizalla vertical. Ésta se define como:

donde  $f$  es el parámetro de Coriolis y  $U_z$  es la derivada vertical del viento. Esta variable está altamente relacionada con la baroclinicidad debido a la relación de viento térmico. En concreto, el primer modo de variabilidad es prácticamente idéntico para ambas variables, y además las series asociadas están altamente correlacionadas (97.1%).

Puede obtenerse una ecuación para esta variable diferenciando verticalmente la ecuación de momento zonal y proyectando en el primer modo:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = F(u'v') + F(MMC) + F(Friction)$$

donde los términos de la derecha recogen los forzamientos debidos al flujo eddy de momento, la circulación meridional y la fricción.

Correlacionando esta variable con sus forzamientos en la baja frecuencia como se hizo para la baroclinicidad (fig. 6d), puede observarse que las

anomalías de cizalla son inicialmente creadas por los flujos eddy de momento, reforzadas por la fricción y debilitadas a través de la circulación meridional.

Poniendo todos los resultados en conjunto se puede describir los ciclos de vida para baja frecuencia en los siguientes pasos. (I) Las anomalías de la cizalla son creadas por el flujo eddy de momento en la alta troposfera y fortalecidas por la fricción en superficie. (II) Una circulación meridional indirecta debilita la cizalla y fuerza la baroclinicidad para mantener el balance del viento térmico. (III) Las anomalías baroclinicas son debilitadas diabáticamente.

Todos estos resultados son consistentes con el mecanismo de realimentación positiva basado en el “auto-mantenimiento” de la corriente en chorro [Robinson 2006], pues implican que las anomalías del viento zonal son seguidas de anomalías de la baroclinicidad, las cuales pueden a su vez conducir a un reforzamiento de la anomalía del viento zonal mediante desarrollo baroclínico y convergencia eddy de momento.

## Comparación entre los dos hemisferios

La separación entre las corrientes en chorro subtropical y extratropical en las latitudes medias es menos clara en el hemisferio Norte que en el Sur. Además, esta separación varía con la cuenca y la estación del año. La situación más similar al HS se produce en la cuenca Atlántica durante la estación de invierno, cuando la generación de los eddies es más intensa y las corrientes en chorro extratropical y subtropical se encuentran bien separadas.

Se ha repetido en este caso el estudio realizado anteriormente para el HS. Estudiando primero la variabilidad del viento barotrópico (Fig. 7a) se observa que el modo dominante representa de nuevo un desplazamiento meridional. Este modo explica una varianza del 44.1%, comparada con el 29.6 % para el segundo modo. Sin embargo, en el caso de las anomalías baroclinicas la distinción no es tan clara. En la Figura 7b podemos ver como los modos principales están en cuadratura. Aunque ello también ocurre en el HS, la principal diferencia es que ahora ambos modos explican una varianza muy parecida (34.3% y 30.9%), y no se pueden separar según el criterio de North et. al. [1982]. Ello implica que cualquiera de los dos modos, así como una combinación lineal de ellos, explican prácticamente la misma varianza. Ello podría corresponderse con las distintas fases de una onda que se propagara meridionalmente.

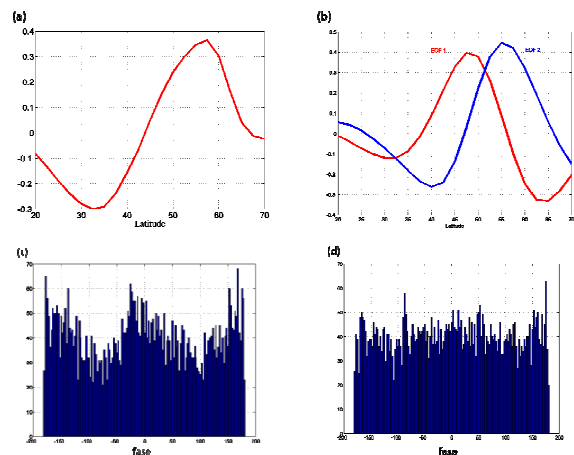


Figura 7: Modos de variabilidad para las anomalías barotrópicas (a) y baroclinicas (b) del viento promedio zonal en la cuenca Atlántica. Histograma de fases de la baroclinicidad para el HS (c) y el HN (d).

Hemos calculado un histograma de fases, representando las anomalías asociadas a los dos primeros modos mediante la expresión

$$A(\cos \varphi \overrightarrow{EOF1} + \sin \varphi \overrightarrow{EOF2})$$

donde  $\varphi(t)$  es la fase y  $\overrightarrow{EOF1}$ ,  $\overrightarrow{EOF2}$  son las estructuras sinusoidales en cuadratura de la figura 7b. En el histograma para el HS (Fig. 7c), se observa

que la fase  $\varphi=0$  es claramente dominante, lo cual

indica la prevalencia de anomalías en la dirección del primer modo de variabilidad (el desplazamiento). En cambio, en el caso del HN (Fig. 7d) no existe ninguna fase dominante, lo cual sugiere que las fases de los modos identificados por el cálculo de EOFs no tienen ninguna relevancia especial.

## Conclusiones

En este estudio se ha analizado la variabilidad de las anomalías de baroclinicidad promedio zonal en ambos hemisferios, encontrando diferencias entre ellos. Mientras que para el HS es claro que el modo dominante es un desplazamiento y el segundo modo una intensificación o debilitamiento, en el caso del HN los dos primeros modos no están bien separados. Esto puede ser debido a la falta de simetría en este hemisferio y/o a la influencia de la corriente en chorro subtropical, que interfiere con la corriente en chorro extratropical. Esto hace que el estudio para el HN sea más complejo que para el HS.

Un análisis más detallado del HS muestra que para frecuencias bajas el modo dominante sigue siendo un desplazamiento, mientras que para frecuencias altas los modos no se pueden separar.

Para frecuencias bajas, se ha propuesto un mecanismo de mantenimiento para la corriente en chorro extratropical. Las anomalías de la cizalla vertical son forzadas por los flujos eddy de momento en la alta troposfera y reforzadas por la fricción en la superficie. Una circulación meridional indirecta produce un debilitamiento de la cizalla y un reforzamiento de las anomalías baroclínicas para mantener el balance del viento térmico. Las anomalías baroclínicas son debilitadas diabáticamente.

Estos resultados apoyan la hipótesis de Robinson [2000] de que los flujos eddy de momento y la fricción juegan un papel importante para la variabilidad de la baroclinicidad durante el ciclo del índice zonal, consistente con resultados recientes en observaciones y modelos [Kidston et al., 2010; Chen and Plumb, 2009]. Este artículo también argumenta que los forzamientos de la baroclinicidad contribuyen a fortalecer la persistencia del índice zonal debido a la generación de anomalías eddy y la aceleración que induce dichos eddies sobre la región de anomalías baroclínicas. Sin embargo, algunos estudios recientes sugieren que la dinámica barotrópica también puede producir variabilidad del índice zonal por sí misma [Barnes et al., 2010] por lo que se necesitan más estudios para clarificar los procesos dinámicos implicados en la persistencia de los modos anulares.

## Referencias

- Barnes, E. A., D. L. Hartmann, D. M. W. Frierson, and J. Kidston (2010), The effect of latitude on the persistence of eddy-driven Jets, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L11804.
- Chen, G., and R. A. Plumb (2009), Quantifying the eddy feedback and the persistence of the zonal index in an idealized atmospheric model, *J. Atmos. Sci.*, 66, 3707–3720.
- Hamming, R. W. (1989), *Digital Filters*, Prentice Hall, Englewood 265 Cliffs, N. J.
- Hartmann, D. L. (1994), *Global Physical Climatology*, Academic Press, San Diego, Calif.
- Kalnay, E., and Coauthors (1996), The NCEP/NCAR 50-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Kidston, J., D. M. W. Frierson, J. A. Renwick, and G. K. Vallis (2010), Observations, simulations, and dynamics of jet stream variability and annular modes, *J. Climate*, 23, 6186-6199
- Lorenz, D. J., and D. L. Hartmann (2001), Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere, *J. Atmos. Sci.*, 58, 3312–3327.
- North, G.R., T. L. Bell, R.F. Cahalan, and F. J. Moeng, (1982): Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 699-706.
- Robinson, W. A. (2006), On the self-maintenance of midlatitude jets, *J. Atmos. Sci.*, 63, 2109–2122.
- Simmons, A. J., and B. J. Hoskins (1978), The life cycles of some nonlinear baroclinic waves, *J. Atmos. Sci.*, 35, 414–432.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace (2000), Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Clim.*, 13, 1000–1016.