

ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE LA DINÁMICA SUBESTACIONAL DEL JET SUBPOLAR SOBRE SUDAMÉRICA

Marco E. Micieli^{1,2}, Marisol Osman^{1,2,3}, Denisse Sciamarella^{1,2,4}
marco.micieli@cima.fcen.uba.ar. Autor correspondiente.

¹CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina.

²CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina.

³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Buenos Aires, Argentina.

⁴CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique, 75016 Paris, France.

Palabras clave: *Weather Regimes*, Homologías Persistentes, Topología del Caos.

1) INTRODUCCIÓN

El jet subpolar (*Polar-Front Jet*, PFJ) es una estrecha banda de aire de máxima intensidad de viento en altura resultado del fuerte contraste térmico extratropical y representa una parte fundamental de la circulación atmosférica de gran escala. En la escala subestacional, esta circulación es abordada frecuentemente mediante el enfoque de los regímenes meteorológicos (*Weather Regimes*, WRs), un conjunto reducido de patrones recurrentes, persistentes y cuasi-estacionarios asociados a la dinámica del flujo de gran escala. Sin embargo, habitualmente se utilizan diversas técnicas estadísticas para identificarlos que conllevan a resultados ambiguos, impidiendo una definición física robusta. Estas limitaciones motivaron el uso de Homologías Persistentes (*Persistent Homology*, PH), una técnica topológica que permite estudiar la estructura subyacente de una nube de puntos analizando la presencia de “agujeros en diferentes dimensiones”. En particular, Strommen y otros (2023) propusieron que los WRs del PFJ sobre la región del Océano Atlántico Norte durante los meses de invierno estarían representados por las componentes conexas o 0-agujeros significativos de las regiones más densas en el espacio de estados reconstruido del sistema. Sin embargo, bajo esta hipótesis, sólo obtienen dos de los tres regímenes esperados dado el comportamiento trimodal documentado previamente por Woolings y otros (2010). En nuestro trabajo, redefinimos esta estrategia en forma más robusta para analizar la dinámica subestacional del PFJ en las inmediaciones de Sudamérica y el Océano Atlántico Sur durante los meses de invierno, incluyendo un análisis sobre las regiones menos densas del espacio de estados e incorporando conceptos recientes de Topología del Caos (Sciamarella y Charó, 2024).

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron datos medios diarios de viento zonal en niveles bajos (800-950 hPa) del reanálisis del centro europeo ERA5 (Hersbach y otros, 2020), con una resolución de 2.5° x 2.5° en la región 25-85°S 25-85°W y para el período 1980-2019. Esta elección se basa en el carácter cuasi-barotrópico que presenta el PFJ por la acción de los *eddies* transientes.

Como parte del pre-procesamiento de los datos, se filtró el ciclo estacional a partir de una climatología para cada día del año suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días, seguido de la aplicación del filtro de Lanczos con una ventana móvil de 60 días y una frecuencia de corte de 10 días para retener la variabilidad de más baja frecuencia de la escala

subestacional. Por último, se removió la tendencia a largo plazo mediante una regresión lineal cuya pendiente fue ajustada con el estimador no paramétrico de Sen.

Para la definición de los WRs del PFJ se aplicó *K-means* en el espacio de estados estandarizado, reteniendo 3 *clusters* en base a los resultados de distintas métricas de validación del agrupamiento (no se muestran). Para la asignación diaria a un WR se exigió una correlación lineal mayor o igual a 0,5 con el patrón medio del *cluster*, ponderada por la latitud. Los días que no cumplieron esta condición quedaron sin asignación.

Siguiendo a Strommen y otros (2023), se trabajó con un espacio de estados tridimensional. La primera coordenada es un índice diario para capturar la latitud del PFJ (*Jet Latitude Index*, JLI; Woolings y otros, 2010), mientras que la segunda y tercera coordenada son las componentes principales (*Principal Components*, PC) asociadas a las primeras dos Funciones Ortogonales Empíricas (*Empirical Orthogonal Functions*, EOFs) que mayor varianza explican sobre las anomalías subestacionales de viento zonal en niveles bajos, normalizadas por la desviación estándar media, ponderada por la latitud, de todo el dominio para cada día del año suavizada con un promedio móvil centrado de 60 días. Esto permite darle el mismo peso a todas las estaciones, aunque para el análisis sólo se retendrán los meses de invierno (junio-julio-agosto).

Para el análisis topológico, se aplicó PH en el espacio de estados estandarizado sobre la nube original y aquellas que se obtienen luego de aplicar un filtro por mayor y menor densidad de puntos, a partir de la versión multidimensional de la Estimación de Densidad de Kernel (*Kernel Density Estimation*, KDE). Se analizó la estructura asociada en el espacio de estados y la relación con los WRs de los 0-agujeros (H_0) de las regiones más densas y de los 1-agujeros (H_1) o huecos superficiales de las regiones menos densas significativamente persistentes en términos homológicos.

3) RESULTADOS PRINCIPALES

En la Figura 1, se muestran las composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de viento zonal en niveles bajos para los días asignados en cada uno de los tres regímenes hallados (J_S , J_C , J_N). En particular, J_S está caracterizado por tener las máximas anomalías desplazadas hacia regiones polares y J_N hacia el Ecuador. J_C , en cambio, está asociado a máximas anomalías en la región de los *stormtracks*. Estos regímenes generan además cambios significativos en la temperatura superficial y la precipitación (no se muestran).

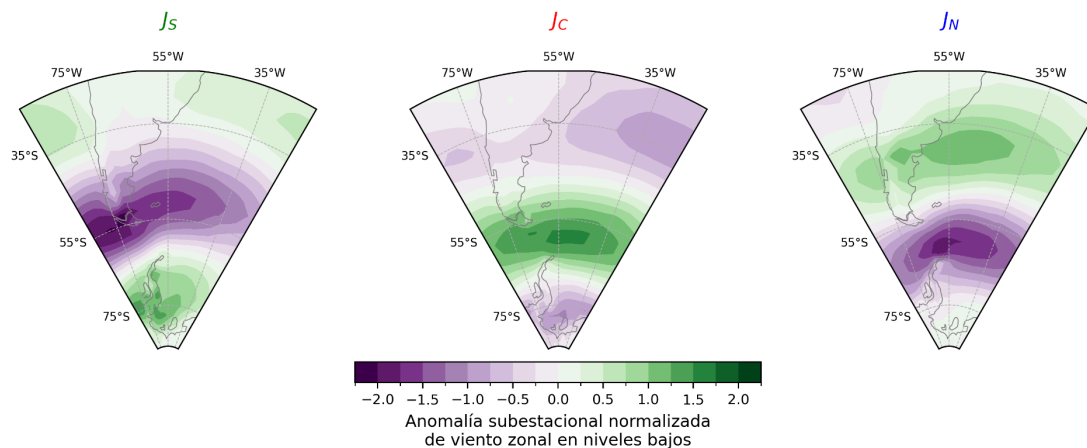


Figura 1: Composiciones de anomalías subestacionales normalizadas de viento zonal en niveles bajos para los campos diarios asignados en cada WR del PFJ (columnas).

La Figura 2a revela, en el espacio de estados, una región central de máxima densidad y dos estructuras huecas de mínima densidad en los laterales. Las Figuras 2b y 2c muestran que dicha región más densa corresponde al 0-agujero más persistente, vinculado a J_C , mientras que las estructuras huecas están representadas por el primer y segundo 1-agujero más persistentes, vinculados a J_S y J_N respectivamente. Los resultados para otros umbrales cercanos de densidad son similares (no se muestran).

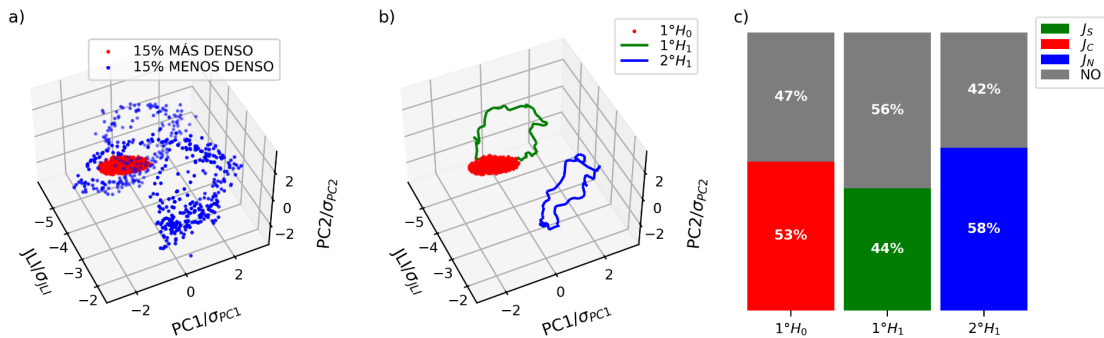


Figura 2: (a) Nube de puntos asociada al 15 % más denso (rojo) y al 15 % menos denso (azul) en el espacio de estados estandarizado. (b) Para estas nubes filtradas, puntos asociados al primer 0-agujero ($1^\circ H_0$, rojo) y a los dos primeros 1-agujeros ($1^\circ H_1$, verde; $2^\circ H_1$, azul) homológicamente más persistentes. (c) Para estas características topológicas, contribución porcentual de cada WR y de los puntos sin asignación (gris).

4) CONCLUSIONES

Se encontraron tres WRs bien definidos para el PFJ que se distinguen principalmente por la variabilidad en su ubicación latitudinal. El análisis topológico revela que identificar las homología de orden cero de las regiones más densas del espacio de estados con los WRs no es correcto: es indispensable explorar también las homología de orden uno de las regiones menos densas. Según nuevos conceptos en Topología del Caos, estos 1-agujeros se asocian a modos de variabilidad no lineales, conectados a través de zonas de juntas representadas por 0-agujeros de la parte más densa.

REFERENCIAS

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M. y Thépaut, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 730, 1999-2049.

Sciamarella, D. y Charó, G. D., 2024: New elements for a theory of chaos topology. Topological Methods for Delay and Ordinary Differential Equations: With Applications to Continuum Mechanics, Vol. 51, Amster, P. y Benevieri, P. (eds), Birkhäuser.

Strommen, K., Chantry, M., Dorrington, J. y Otter, N., 2023: A topological perspective on weather regimes. Climate Dynamics, 60, 1415-1445.

Woollings, T., Hannachi, A. y Hoskins, B., 2010: Variability of the North Atlantic eddy-driven jet. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136, 856-868.