

PROYECCIONES FUTURAS DE CAMBIO EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA BASADA EN ÍNDICES DE CIRCULACIÓN

Carles LIZONDO OSSET (1), Juan Andrés GARCÍA VALERO (1), Victoria GALLARDO FERNÁNDEZ (1,2)

(1) *AEMET. Delegación Territorial en la Región de Murcia.*

(2) *Universidad de Murcia. Departamento de Física de la Tierra.*

clizondoo@aemet.es, jugarciav@aemet.es, victoria.gallardo@um.es

RESUMEN

Numerosos estudios revelan cambios significativos en temperatura y precipitación en el siglo XX sobre la Península Ibérica. No obstante, hay muy pocos trabajos sobre la PI que aborden los cambios posibles que puedan producirse en la circulación atmosférica. Se plantea la pregunta de si existe también cambios en la circulación atmosférica. Una forma de caracterizar la circulación es mediante índices de circulación relacionados con la intensidad y rotación del flujo. Así en este trabajo se presentan los resultados de proyectar estos índices obtenidos para un ensemble de modelos y bajo escenarios de cambio climático RCP 8.5/4.5. Como resultado más interesante, se observa cambios en todas las estaciones del año, aunque los cambios más notables se aprecian en verano, cuando se produce un aumento del flujo noreste y rotación ciclónica en verano, un aumento del flujo este y disminución del flujo oeste en primavera y otoño, y un aumento rotación anticiclónica en invierno.

Palabras clave: Península Ibérica, índices de circulación atmosférica, escenarios de cambio climático.

ABSTRACT

Numerous studies reveal significant changes in temperature and precipitation in the 20th century over the Iberian Peninsula. However, there are very few works on IP that address the possible changes that may occur in the atmospheric circulation. The question arises whether there are also changes in the atmospheric circulation. One way to characterize the circulation is by circulation indices related to the intensity and rotation of the flow. This paper presents the results of projecting these indices obtained for an ensemble of models and under climate change scenarios RCP 8.5 / 4.5. As an interesting result, changes are observed in all seasons of the year, although the most notable changes are seen in summer, when there is an increase in northeast flow and cyclonic rotation in summer, an increase in east flow and decrease in west flow in spring and autumn, and an anticyclonic rotation increase in winter.

Key words: Iberian Peninsula, atmospheric circulation indices, climate change scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de trabajos dirigidos a la elaboración y análisis de proyecciones de cambio climático revelan para la Península Ibérica (PI) cambios muy significativos para mediados-finales de este siglo en temperatura y precipitación. No obstante, hay muy pocos estudios que tratan sobre los cambios en la circulación atmosférica que podrían producirse bajo los escenarios de cambio climático. En el último informe del IPCC (Stocker et al., IPCC 2013) se resume que en general los cambios más significativos que podrían afectar a la PI sería el de la intensificación en verano de las altas presiones en la zona de Francia, así como el desplazamiento hacia latitudes más altas de las storm tracks en invierno y primavera.

En este trabajo se presenta un estudio de los cambios proyectados en la circulación sobre la península Ibérica desde la óptica de los índices de circulación de Jenkinson y Collison (Jenkinson and Collison, 1977). Dichos índices, calculados a partir de la variable presión a nivel del mar, son indicadores de la dirección y rotación del flujo, y han sido utilizados en diversos estudios para caracterizar y clasificar la circulación atmosférica. Estos índices se han empleado con diversos fines como relacionar la circulación atmosférica con diversos fenómenos meteorológicos como patrones de nubosidad (Azorín-Molina et al., 2014), niebla (Corell et al., 2014) o precipitación (Jones et al., 1993, Goodes y Palutikof., 1998, Grimalt et al., 2014), por mencionar algunos. También se han empleado para evaluar la consistencia de los modelos de circulación general del proyecto CMIP5. Así en Otero et al., 2018 se presenta un estudio de validación de modelos globales en base a la frecuencia de situaciones atmosféricas (anticiclónicas, ciclónicas, etc) definidas a partir de estos índices. Así, aunque en general los modelos simulan razonablemente bien estas situaciones en comparación con las situaciones definidas a partir de datos de reanálisis, se encontraron algunas discrepancias en el sur de Europa donde en general la frecuencia de las situaciones ciclónicas/anticiclónicas eran subestimadas/sobrestimadas por los modelos.

La vocación predictiva de los índices de circulación radica en la estrecha relación entre circulación y fenómenos atmosféricos muy diversos por lo que es de especial interés obtener proyecciones de cambio climático de estos índices y relacionarlos con las proyecciones en otro tipo de variables como la temperatura o precipitación. En esta línea, las proyecciones muestran una intensificación del flujo del este y un decrecimiento del flujo del oeste en el sur de Europa (Otero et al., 2018) que podría estar relacionado con un aumento del tipo anticiclónico en el norte de Europa.

En la línea del trabajo de Otero et al., 2018, este estudio tiene por objeto obtener proyecciones climáticas de los índices calculados sobre la Península Ibérica, proyecciones obtenidas a partir de un conjunto de 17 modelos climáticos globales para analizar posibles cambios en el ciclo anual de dichos índices. De este modo se pretende evaluar la capacidad de los diferentes modelos en reproducir el ciclo anual de los índices de circulación sobre la PI, así como presentar los cambios proyectados en el ciclo anual bajo escenarios RCP. Para ello, este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se expone la metodología así como los datos empleados. En la sección 3 se muestra los principales resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 4 se presenta una discusión de los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA

La caracterización de la circulación atmosférica se ha llevado a cabo mediante el empleo de índices de circulación, conocidos como índices de Jenkinson y Collison (tabla 1). Dichos índices se han calculado a partir de datos diarios de presión a nivel del mar (PNM), extraídos de la base de datos de reanálisis ERA40 para el período 1957-2001. También se han obtenido índices a partir de los datos diarios procedentes de 17 modelos globales (tabla 2) empleados en el último informe del IPCC (Stocker et al., IPCC 2013). De este modo, se han obtenido índices a partir de las simulaciones históricas de dichos modelos, período 1951-2001, así como de sus simulaciones RCPs 4.5 y 8.5 (Taylor et al., 2012) para el período 2006-2100.

Índice de circulación	Notación
Flujo del Oeste	W
Flujo del Sur	S
Flujo direccional neto	F
Vorticidad en la dirección meridional	ZW
Vorticidad en la dirección zonal	ZS
Vorticidad resultante	Z

Tabla 1. Índices de Jenkinson y Collison.

Para el cálculo de los índices se ha considerado una ventana geográfica de 16 puntos grid de resolución 5° x 10° (Lat x Lon) centrada sobre la PI (figura 1 derecha). Debido a la distinta resolución de los datos de reanálisis y de los modelos climáticos considerados (tabla 2), éstos se interpolaron previamente (interpolación bilinear) a la ventana de 16 puntos.

La expresión matemática utilizada para cada uno de los índices se muestra a continuación:

$$W = 1/2 (P12 + P13) - 1/2 (P4 + P5)$$

$$S = A \cdot \{ 1/4 \cdot (P5 + 2 \cdot P9 + P13) - 1/4 \cdot (P4 + 2 \cdot P8 + P12) \}$$

$$F = (W^2 + S^2)^{1/2}$$

$$ZW = B \cdot \{ 1/2 \cdot (P15 + P16) - 1/2 \cdot (P8 + P9) \} - C \cdot \{ 1/2 \cdot (P8 + P9) - 1/2 \cdot (P1 + P2) \}$$

$$ZS = D \cdot \{ 1/4 \cdot (P6 + 2 \cdot P10 + P14) - 1/4 \cdot (P5 + 2 \cdot P9 + P13) - 1/4 \cdot (P4 + 2 \cdot P8 + P12) + 1/4 \cdot (P3 + 2 \cdot P7 + P11) \}$$

$$Z = ZW + ZS$$

Siendo φ la latitud de 40°, $A = 1/\cos(\varphi)$, $B = \sin(\varphi)/\sin(\varphi - \Delta\varphi)$, $C = \sin(\varphi)/\sin(\varphi + \Delta\varphi)$, $D = 1/2 \cdot \cos^2(\varphi)$ y $\Delta\varphi = 5^\circ$

En las figuras 2 y 3 se muestran a modo de ejemplo dos situaciones sinópticas asociadas a cada uno de los índices. Las situaciones representan el mapa medio (composite) obtenido a partir de los días en que el índice toma un valor por encima/debajo de su percentil 90/10. Estos mapas se han obtenido a partir de los datos de ERA40 para el período temporal 1957-2001. Por limitaciones de espacio en la redacción de este texto, y porque no es objeto de este trabajo, los mapas se presentan simplemente como ayuda al lector sin entrar en una descripción detallada de cada uno de ellos.

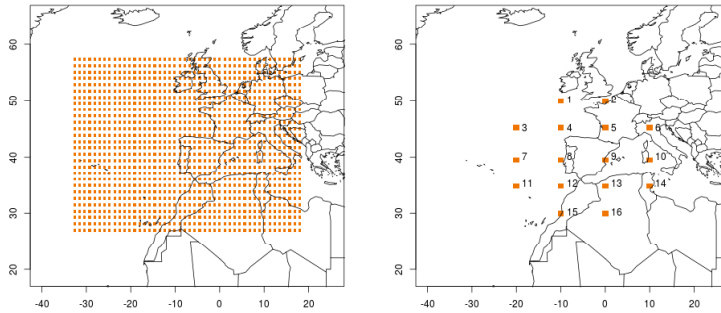


Fig. 1: A la derecha se muestra la ventana considerada para el cálculo de los índices, cuya resolución es de $5^{\circ} \times 10^{\circ}$ (Lat x Lon). A la izquierda se muestra la ventana de ERA40 de resolución $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ cuyos datos fueron interpolados a la rejilla representada en la figura de la derecha.

Determinados los diferentes índices para cada uno de los períodos, 1957-2001 y 2006-2100, se ha obtenido el valor medio mensual de cada uno de ellos. De este modo, se ha representado el ciclo anual obtenido con reanálisis frente al obtenido con los modelos, así como el ciclo anual obtenido con los modelos en el período histórico frente al obtenido por ellos en el período futuro bajo las dos sendas de forzamiento RCP consideradas. Esto nos permitirá entender qué índices se simulan mejor o peor, así como qué índices pueden experimentar los mayores cambios en escenarios futuros. Además, la representación del ciclo anual nos permitirá indagar en la época del año en qué estos aspectos suceden.

3. RESULTADOS

3.1 Ciclo anual de los índices de circulación en el período histórico

En la figura 4 se muestra el ciclo anual obtenido para cada índice en el período 1957-2001. La curva discontinua representa el ciclo obtenido con ERA40, mientras que la continua representa el ciclo anual simulado por la media del ensemble de los modelos

utilizados (tabla 2).

En los índices relativos al flujo (W, S y F) se observa un claro ciclo estacional. La circulación en invierno es preferentemente direccional, dominando el flujo del oeste, mientras que en verano domina la componente este y además se observa un aumento importante de la componente norte, mientras que en invierno el flujo meridional es mucho menor. En cuanto a la intensidad del flujo, se aprecia un descenso muy significativo en verano, con mínimos en agosto y septiembre, y un máximo durante los meses de invierno, especialmente en diciembre.

En la misma figura se puede analizar la época del año donde las diferencias entre modelos y ERA40 es mayor. En general, la mayoría de los índices, excepto ZW y Z, presentan una evolución similar a lo largo del año respecto a la observación, aunque hay diferencias notables como por ejemplo en los índices W y F. Así, los modelos en general sobrestiman la intensidad de la circulación del oeste en invierno, primavera y segunda mitad del otoño, así como el flujo del este en verano. En cuanto al flujo meridional, se observa una sobrestima/subestima de la intensidad del flujo del sur/norte en invierno y segunda mitad del otoño, una subestima del flujo de norte en primavera y desde la segunda mitad del verano hasta la segunda mitad del otoño, mientras que a principios de verano los modelos simulan razonablemente bien el flujo predominante de componente norte.

Modelo	Resolución en grados (longitud x latitud)	Modelo	Resolución en grados (longitud x latitud)
ACCESS 1-0	1.875 x 1.125	GFDL-CM3	2.500 x 2.000
BCC-CSM 1-1-m	2.813 x 2.791	GFDL-ESM2G	2.000 x 2.023
BCC-CSM 1-1	2.813 x 2.791	HADGEM2-CC	1.875 x 1.250
BNU-ESM	2.813 x 2.791	INMCM4	2.000 x 1.500
CANESM2	2.791 x 2.813	IPSL-CM5A-LR	3.750 x 1.895
CCSM4	1.250 x 0.950	IPSL-CM5A-MR	2.500 x 1.268
CSIRO-Mk3-6-0	1.875 x 1.865	IPSL-CM5B-LR	3.750 x 1.895
EC-EARTH	1.125 x 1.125	MPIM-MR	1.875 x 1.875
FGOALS-g2	2.813 x 2.791		

Tabla 2: Modelos utilizados en las simulaciones histórica y futuras (RCP 4.5 y 8.5)

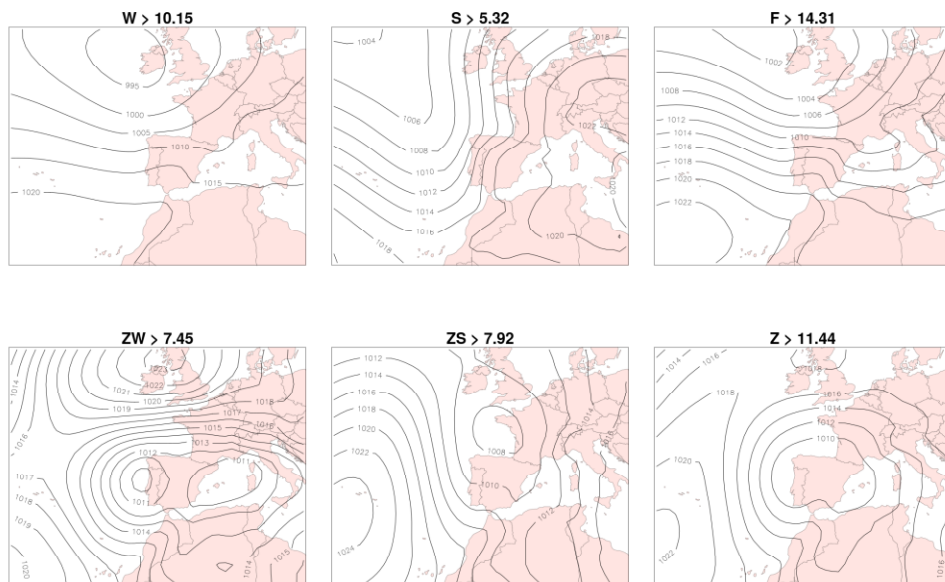


Fig. 2: Situación sinóptica media relativa a considerar los días con un valor diario del índice por encima de su percentil 90. En cada uno de los mapas se representa la presión media a nivel del mar en hPa, y en el título el índice relacionado así como el valor del percentil considerado para cada uno de ellos.

En relación a los índices asociados a la vorticidad (ZW, ZS y Z), también se observa un ciclo anual, en concreto en los índices ZW y ZS. El primero de ellos presenta durante todo el año valores negativos, con valores más altos en verano que en invierno, mientras que el segundo presenta una evolución contraria, valores positivos en verano (vorticidad ciclónica) y negativos en invierno (anticiclónica), siendo curioso el repunte positivo de este índice en el mes de noviembre. La evolución cuasi-complementaria de los índices ZW y ZS provoca que el ciclo anual de la vorticidad sea algo más plano, predominando todo el año un valor negativo y por tanto de dominio anticiclónico. No obstante, se observan algunos cambios estacionales. En invierno el índice tiene un valor muy negativo, claramente anticiclónico, observándose un segundo máximo negativo en verano. Por contra, el valor negativo es menor en primavera y otoño.

Respecto a las diferencias entre modelos y reanálisis, se observa que la componente ZW presenta una evolución muy diferente en los modelos respecto a las observaciones, y esto hace que la evolución de la vorticidad total sea también muy distinta. En cuanto a este índice las diferencias más importantes se observan en invierno, primavera y otoño, cuando los modelos sobrestiman en gran medida la vorticidad negativa, por contra, en verano las diferencias son menores. En cuanto a la componente ZS los modelos la simulan razonablemente bien casi todo el año,

observándose las principales diferencias en verano, época en la que los modelos sobrestiman el valor positivo de la vorticidad.

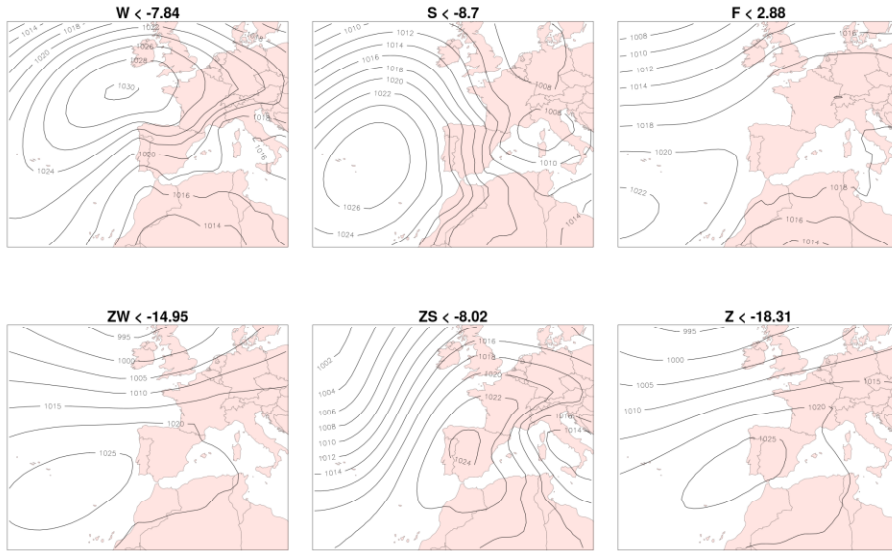


Fig. 3: Idem que en la figura 2, pero en este caso se han considerado los días por debajo del percentil 10 para la obtención de las situaciones sinópticas.

3.2 Ciclo anual bajo escenarios RCPs

La figura 5 muestra los ciclos anuales de los índices de flujo y vorticidad obtenidos para la media del ensemble de los modelos considerados. De este modo, es posible comparar los ciclos futuros de los dos RCPs considerados con el pasado-histórico.

En general se aprecian cambios notables en el ciclo anual en alguno de los índices. A continuación se enumeran los resultados más destacables para cada una de las estaciones del año:

Invierno. El índice W disminuye de intensidad y la circulación anticiclónica se refuerza, concretamente como consecuencia de la componente ZW.

Primavera. El índice W transita desde valores positivos (oeste), al principio de la estación, hacia valores negativos (este) en el mes de mayo. En el futuro esta transición se adelanta (del orden de un mes). Este efecto se aprecia más claramente hacia el final de siglo y para el escenario de mayor forzamiento. Algo similar se observa con ZS que transita en esta época desde valores negativos (vorticidad anticiclónica) a positivos (vorticidad ciclónica). Por último, el índice ZW también presenta cambios importantes en primavera, produciéndose al igual que en invierno un aumento del flujo anticiclónico, especialmente en los dos primeros meses de esta estación.

Verano. Es la estación del año en la que se espera un mayor número de cambios en los índices. Los flujos del este y norte dominantes en esta época del año se intensifican considerablemente. También se intensifica la rotación ciclónica debido a la componente ZS de la vorticidad, especialmente en los meses de junio y julio, reduciéndose la rotación anticiclónica derivada del índice ZW en julio y agosto.

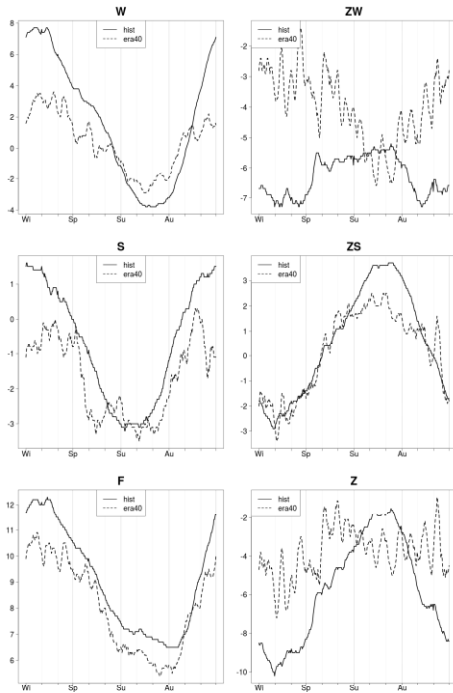


Fig. 4: Ciclo anual de los índices obtenido período futuro 1957-2001, con ERA40C (línea discontinua) y la media del ensemble de modelos (línea continua). En las líneas verticales se muestra el inicio de cada estación del año (rojo0).

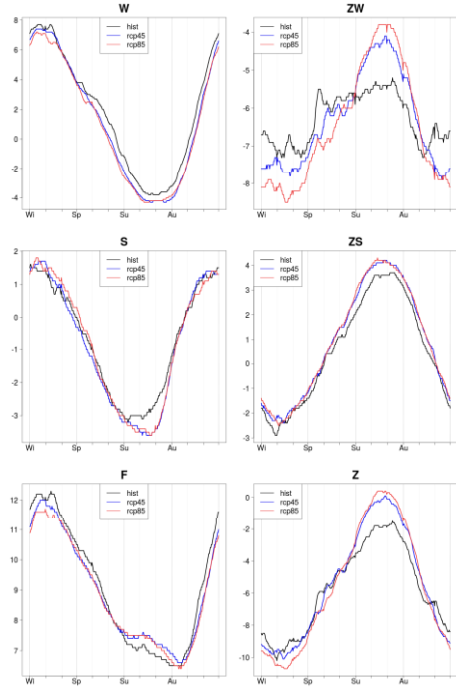


Fig. 5: Idem que Fig 5 pero para el periodo 2006-2010. La línea negra muestra la medida del ensemble obtenida en el periodo histórico, mientras que en las curvas de colores muestran los resultados bajo las simulaciones RCP 4.5 (azul) y 8.5 (rojo).

Otoño. Al contrario que en primavera, el índice W transita desde valores negativos a positivos, observándose en el futuro un retraso en el cambio, sobre todo hacia el primer mes del otoño. Retrasos similares se observan con ZW y ZS. La diferencia con respecto a la primavera es que este retraso es menor que el adelanto observado en la anterior estación.

4. DISCUSIÓN

Se ha caracterizado la circulación atmosférica sobre la Península Ibérica mediante índices de circulación con el objetivo de analizar el cambio de la misma en el futuro. Se ha comparado previamente la circulación atmosférica obtenida con datos de reanálisis con la obtenida con los modelos en un periodo histórico comprobando que concuerdan bastante bien pero teniendo en cuenta que en general los modelos sobrestiman los valores de los índices que miden el flujo (índices W, S y F), resultado que concuerda con Otero et al., 2018. Se observa también que los modelos simulan bastante mal la vorticidad en la dirección meridional (índice ZW).

Respecto a los cambios proyectados en el ciclo anual cabe preguntarse qué posibles implicaciones tendrían en la precipitación y en la temperatura, y si son coherentes con las proyecciones climáticas que se barajan para estas variables. Así, un aumento del flujo del este en primavera y otoño podría propiciar un aumento de la precipitación en el este de la PI (Grimalt et al., 2014). Por otro lado el aumento de la vorticidad ciclónica en verano podría estar relacionado con el aumento tan notable proyectado de las temperaturas en el centro de la PI (Stocker et al., IPCC 2013) probablemente a consecuencia de una intensificación de la baja térmica. Además, este aumento de la vorticidad es coherente con el aumento del flujo del Este obtenido para esta estación del año. Por último, los cambios proyectados en la disminución del índice del W coinciden con los resultados de Otero et al 2018. Un descenso en el valor de este índice podría estar conectado con el desplazamiento de las storm-track hacia latitudes altas (IPCC, 2013) y que podrían relacionarse con el descenso de la precipitación proyectada para las regiones occidentales de la PI, especialmente para la primavera y otoño, tal y como se desprende de los resultados del proyecto Cordex presentados en la [página web de AEMET \(http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat\)](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat).

Como línea futura, se pretende profundizar en el análisis de las relaciones entre índices y variables climáticas, caracterizando los patrones de anomalías de variables como la precipitación y temperatura con cada uno de los índices empleados aquí. También, sería interesante la obtención de índices que caractericen la circulación en altura de manera que servirían para completar y entender mejor los resultados obtenidos en este estudio.

5. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a **AEMET** la concesión de la beca de formación de postgraduados asociada al proyecto de *Regionalización de eventos extremos y sus proyecciones de cambio climático* que vengo desarrollando en la Delegación Territorial de AEMET en la Región de Murcia. Así mismo, quisiera agradecer también a todos los desarrolladores de software libre la posibilidad de utilizar herramientas tan potentes como el lenguaje de computación estadística **R**, así como la suite de comandos **Climate Data Operators (CDO)** los cuáles han sido fundamentales en la elaboración de este estudio.

REFERENCIAS

- Azorín-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., Chen, D., Connell, B. H., Domínguez-Durán, M. A., Revuelto, J., López-Moreno, J-I. (2014) Climatología sinóptica de la nubosidad a partir de datos AVHRR en la Península Ibérica y Baleares durante el semestre cálido mayo-octubre (1997-2011). Fernández-Montes, S., Fernando Sánchez, R. Cambio climático y cambio global. Asociación Española de Climatología (pp. 77-88)
- Corell Custardoy, D., Estrela Navarro, M. J., Valiente Pardo, J. A., Azorín-Molina, C., Martín-Vide, J., Chen, D. (2014) Análisis sinóptico de los días con recolección de agua de niebla en el nordeste de la Península Ibérica. Fernández-Montes, S., Fernando Sánchez, R. Cambio climático y cambio global. Asociación Española de Climatología (pp. 163-172)
- Goodess, C. M., & Palutikof, J. P. (1998). Development of daily rainfall scenarios for southeast Spain using a circulation-type approach to downscaling. *International Journal of Climatology*, 18(10), 1051-1083.
- Grimalt Gelibert, Miquel., Genovart Rapado, M. C. 2014. Caracterización espacio-temporal de las precipitaciones intensas en la vertiente litoral oriental de la isla de Mallorca (1930-2010). Fernández-Montes, S., Fernando Sánchez, R. Cambio climático y cambio global. Asociación Española de Climatología (pp. 447-456)
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jenkinson, A. F. and Collison, F. P. 1977. An initial climatology of gales over the North Sea, Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62, Meteorological Office, Bracknell.
- Jones, P., Hulme, M., and Briffa, K. 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme, *International Journal of Climatology*, 13, 655–663.
- Otero, Noelia; Sillmann, Jana; Butler, Tim. 2018. Assessment of an extended version of the Jenkinson–Collison classification on CMIP5 models over Europe. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 50, no 5-6, p. 1559-1579.
- Taylor, K., Stouffer, R., and Meehl, G. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498, doi: 10.1175/Tech. rep., BAMS-D-11-00094.1.