

INFLUENCIA DE LOS FORZAMIENTOS EXTERNOS EN LOS TIPOS DE CIRCULACIÓN SOBRE LA PENÍNSULA IBÉRICA EN EL ÚLTIMO MILENIO

Juan A. GARCÍA VALERO^{2,1}, Juan J. GÓMEZ NAVARRO^{1,4}, Juan P. MONTÁVEZ¹

Pedro JIMÉNEZ¹, Raquel LORENTE¹, Fidel GONZÁLEZ³ (3), Eduardo ZORITA⁴

¹Universidad de Murcia, España. ²Delegación de AEMET en la Región de Murcia, España.

³Universidad Complutense de Madrid, España. ⁴Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Alemania

jugarciav@aemet.es, j.gomeznavarro@um.es, montavez@um.es, pedro.jimenezguerrero@um.es,
raquel.lorente1@um.es, fidelgr@fis.ucm.es, eduardo.zorita@hzg.de

RESUMEN

Las proyecciones de CC son a menudo analizadas desde una óptica de los Tipos de Circulación (TCs). Los cambios proyectados en la frecuencia de los TCs pueden ayudar a entender el grado de influencia de los diferentes forzamientos en la dinámica atmosférica, así como en el resto de variables climáticas. Sin embargo, esta metodología no ha sido explorada suficientemente en simulaciones de tipo paleoclimático.

Nuestro estudio analiza la evolución de la frecuencia de los principales TCs obtenidos para invierno y verano, mediante una simulación paleoclimática llevada a cabo para el último milenio con una versión climática del modelo MM5 sobre Europa y la Península Ibérica (PI). La simulación incluye tres forzamientos externos diferentes: Gases de Efecto Invernadero (período industrial), actividad volcánica (máximo entorno a 1810) y radiación solar (mínimo hacia 1700). Para la caracterización de los TCs se utilizaron datos diarios de Presión a Nivel del Mar y Geopotencial a 500 hPa sobre una ventana que cubre la PI.

Los resultados evidencian una importante variabilidad en las series de frecuencia de los TCs a lo largo del milenio simulado, observándose conexiones muy significativas entre la frecuencia de algunos de ellos con el forzamiento externo dominante.

Palabras clave: Tipos de Circulación, Forzamiento, Simulación paleoclimática, MM5, Península Ibérica.

ABSTRACT

Climate change projections are frequently analysed through the Circulation Types (CTs). Projected changes in the frequency of the CTs can help to understand the influence degree of several forcings on the atmospheric dynamics and some climate variables. Nevertheless this method has not been used enough for paleosimulations.

This study analyses the behavior in the frequency of the main CTs obtained for winter and summer from a paleosimulation performed for Europe and the Iberian Peninsula for the last millennium (1001-1990) using a climate version of MM5. The simulation includes three kind of external forcings: Greenhouse Gases (industrial period), volcanic activity (maximum near 1810) and solar activity (minimum around 1700). For the characterization of the CTs were employed daily data of Sea Level

Pressure (SLP) and Geopotential Height at 500 hPa Level of a window that covers the Iberian Peninsula (IP).

The results indicate the existence of an important variability of the frequency series of the CTs along the millennium, when significant relationships between external forcings and some frequency series were found.

Key words: Circulation Types, Forcings, paleosimulation, MM5, Iberian Peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

En el estudio de la detección y atribución del cambio climático, es fundamental conocer mejor el papel de la variabilidad natural a diversas escalas temporales, así como ser capaz de cuantificar el efecto de los forzamientos externos en la evolución del clima (Hegerl et al., 2011). Sin embargo, este análisis demanda el conocimiento de la coevolución del clima y sus forzamientos durante largos periodos de tiempo (Huybers y Curry., 2006). Lamentablemente, el periodo instrumental sólo abarca típicamente los últimos 150 años, y sólo en determinados lugares, por lo que no es adecuado para acometer este análisis.

Existen principalmente dos metodologías que tratan de dar respuesta a este problema: reconstrucciones del clima y modelos climáticos. Las primeras pueden estar basadas en fuentes de información indirecta de origen natural (Beltrami., 2002, Büntgen et al., 2011), así como en registros documentados de actividades humanas (Rodrigo et al., 2012). Las reconstrucciones suponen una importante fuente de evidencia que permite escudriñar sobre la evolución del clima en el pasado. Por otro lado, el uso de modelos climáticos permite construir una evolución plausible del clima de manera auto consistente en función de ciertos forzamientos usados como hipótesis de partida (Zorita et al., 2005, Ammann et al., 2007, Gómez et al., 2011). De esta manera, las simulaciones del clima del pasado se pueden utilizar como una banco de pruebas en el que comprender las interacciones climáticas y contrastar hipótesis sobre los mecanismos que han podido jugar un papel importante en los cambios climáticos acontecidos en el pasado y que podrían tener lugar en el futuro.

Existen multitud de técnicas que permiten analizar tanto la evolución del clima real como las simulaciones climáticas, y que son de gran utilidad a la hora de validar muchos aspectos de los modelos frente a las observaciones. Si nos centramos en la escala sinóptica, una de las herramientas frecuentemente utilizadas pasa por establecer una clasificación de los principales Tipos de Circulación (TCs), que se pueden considerar desde un punto de vista formal como los atractores del sistema (Lorenz 1956). No obstante, aunque durante los últimos años se han desarrollado técnicas estadísticas estándar que permiten establecer una clasificación bastante objetiva, todavía hay margen para la subjetividad del investigador en la elección del método de clustering utilizado, en las variables en las que se basa la clasificación, en la ventana y resolución escogidas o en el número de TCs considerados, entre otros factores (García-Valero et al., 2012, Michelangeli et al., 1995, Fereday et al., 2008). Establecida una metodología acorde a las necesidades del investigador, el análisis de los TCs permite simplificar en un número manejable de casos la multitud de estados meteorológicos en los que se puede encontrar la atmósfera. En un contexto paleoclimático, este análisis permite entender mejor cómo los forzamientos climáticos han jugado un papel en la modificación de la circulación sinóptica durante el último milenio, propiciando un tipo u otro de circulaciones estereotipadas, lo cuál habría dejado su impronta en la evolución en escalas sinópticas y regionales.

El área de interés en este estudio es la Península Ibérica (PI), la cuál ha sido identificada como uno de las áreas más sensibles al cambio climático (Giorgi 2006), y en la que actualmente se está constatando un aumento de las temperaturas en primavera y verano (Brunet et al., 2007), así como una disminución de las precipitaciones a comienzos del invierno y primavera (Serrano et al., 1999). Todos estos cambios son compatibles con un desplazamiento hacia el norte del Storm Track (Paredes et al., 2006), relacionado con cambios en la frecuencia de determinados tipos de tiempo. La evolución climática en la PI durante el último milenio ha sido estudiada anteriormente mediante diversas reconstrucciones climáticas (Nieto et al., 2011, Dorado et al., 2011, Rodrigo et al., 2012, entre otros), así como a través de modelos climáticos (Gómez et al., 2011 y 2012). Con respecto a las simulaciones, éstas se han utilizado para estudiar el papel, a escala regional, de la variabilidad interna con respecto a la variabilidad inducida por los forzamientos externos (Gómez et al., 2012). En particular, en este último trabajo se encontraron indicios de respuesta de la circulación sinóptica a los factores externos, lo cuál podría jugar un papel importante en la evolución de la temperatura y la precipitación a escala regional. Sin embargo, no se profundizó sobre qué patrones de circulación son en particular los más sensibles a los forzamientos, ni en identificar si hay diferencias en la respuesta climática según el tipo y naturaleza del forzamiento.

En este estudio se da un paso más en la comprensión de las interacciones entre los forzamientos externos y la respuesta climática, analizando para ello la evolución de los principales TCs que podrían haber jugado un papel en la determinación el clima en la PI durante el periodo 1001-1990, en una simulación paleoclimática realizada con el modelo regional MM5. La simulación considera tres tipo de forzamientos externos, permitiendo estudiar la influencia de cada uno de ellos en la evolución de los TCs. Así mismo, también se analiza la relación que hay entre los cambios de la circulación sinóptica con elementos como la temperatura y precipitación a escala regional, permitiendo con ello entender de una manera más profunda la evolución climática de la PI a lo largo del último milenio, y en particular las anomalías que podrían haberse producido en periodos clave como puede ser el de la Pequeña Edad de Hielo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos analizados en este estudio fueron generados mediante una simulación climática efectuada con una versión climática del modelo regional MM5 (Grell et al., 1994, Gómez et al., 2011) acoplada al modelo de circulación general ECHO-G (Zorita et al., 2005). Tanto el modelo global como el regional consideran de manera idéntica tres tipos diferentes de forzamientos externos: concentraciones de gases de efecto invernadero, radiación solar incidente, y el efecto parametrizado de grandes erupciones volcánicas. La evolución de estos tres factores ha sido adaptada de la reconstrucción de Crowley 2000, y se muestra en la Figura 1. Por cuestiones de brevedad, no se desarrollan aquí los detalles de la implementación de los forzamientos en las simulaciones, ni tampoco de la configuración física utilizada en la simulación regional. El lector interesado puede consultar las referencias aportadas.

La configuración espacial empleada por el modelo regional consta de dos dominios anidados bidireccionalmente de 90 y 30 kilómetros de resolución espacial que abarcan gran parte de Europa y toda la PI, respectivamente (ver Figura 2. en Gómez et al., 2011). En la caracterización de los TCs se han utilizado únicamente diversos campos a escala sinóptica extraídos del dominio exterior, mientras que los datos del dominio interior, de mayor resolución, se han empleado para analizar la respuesta de la temperatura y precipitación a escala regional a los TCs obtenidos.

Basándonos en el análisis de los TCs sobre la PI llevado a cabo por *García-Valero et al., 2012*, que fue establecido usando el reanálisis ERA40, hemos considerado dos variables conjuntamente: Z500 y SLP. Al incluir el geopotencial se tiene en cuenta que una parte importante del régimen de precipitaciones sobre la PI está condicionado por la inestabilidad atmosférica, que no está del todo bien representada en la otra variable. Así mismo, la ventana utilizada es la misma que en el estudio mencionado, y se encuentra entre los paralelos 34.875° y 45°N y los meridianos 10.125°W y 5.625°E, que cubren toda la PI. La clasificación se ha desarrollado teniendo en cuenta las series estacionales de ambas variables atmosféricas, obteniéndose una clasificación de la circulación en cada una de las estaciones del año, no obstante, por cuestiones de brevedad este estudio se centra en verano (JJA) e invierno (DEF).

El método de agrupamiento se basa en la metodología desarrollada por *Kyselý y Huth 2006*, que consta de dos pasos. Primero se realiza una clasificación previa mediante un análisis en componentes

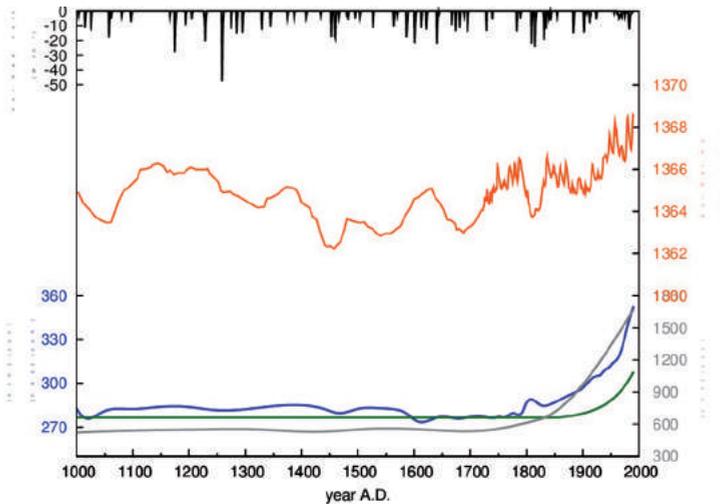


FIG. 1: Reconstrucción de los forzamientos utilizados en las simulaciones. La línea naranja muestra la radiación solar incidente. La línea negra superior indica la reducción en la constante solar debido a eventos volcánicos. Las líneas azul, verde y gris denotan la evolución de la concentración de CO₂, NO₂ y CH₄, respectivamente.

principales rotadas en modo T, y los tipos de tiempo así obtenidos se utilizan como semillas para una segunda clasificación que emplea el método K-medias. El método empleado para la selección del número de TCs se basa en el análisis del gráfico de los log(autovalores), que se explica de forma detallada en *Wilks 2006*. Con la ayuda de este gráfico se determinan el número de componentes principales a retener, el cuál se utiliza para definir el número de TCs, siendo éste último el doble al del número de componentes principales retenidas (*García-Valero et al., 2012*).

Una vez obtenidos los TCs de invierno y verano del periodo simulado (1001-1990) se ha analizado a posteriori la evolución de las frecuencia anuales de cada uno de ellos duante este período.

3. RESULTADOS

3.1. Tipos de Circulación

Siguiendo el método de selección del número de TCs (ver Sección anterior), un número de 10 y 6 fueron considerados para invierno y verano, respectivamente. En las Figuras 2 y 3 se representan los centroides (promedio de los días agrupados en un mismo TC) de invierno y verano, respectivamente. Es

importante destacar que para facilitar su interpretación sinóptica aparecen representados en una ventana geográfica mayor que la empleada en el proceso de agrupación. Así mismo, cada TC va acompañado a su derecha por sus Tipos de Tiempo (TTs) asociados (arriba temperatura y abajo precipitación). La numeración de cada uno de ellos está basada en su frecuencia relativa, de manera que TC1 es el más frecuente en promedio durante todo el período, TC2 el siguiente, y así sucesivamente. Desde un punto de vista general los TCs pueden clasificarse cualitativamente en tres grandes categorías: ciclónicos, anticiclónicos y zonales, según sea la curvatura de las isohipsas de Z500 sobre la PI. De este modo, los primeros están relacionados con el paso de vaguadas o depresiones, los segundos con el adorsamiento (curvatura anticiclónica) del flujo en 500 hPa, mientras que en los últimos se observa la presencia de una fuerte circulación del Oeste.

En la Figura 4 se muestran las series de frecuencias móviles de 31 años, obtenidas a partir de las frecuencias anuales, de los TCs de invierno (izqda) y verano (dcha), respectivamente. Sobre las diferentes gráficas representadas se observa una importante variabilidad en todos los TCs. Tanto en invierno como en verano se observa claramente que algunos de ellos han experimentado una evolución muy similar, mientras que en otros su evolución es totalmente la contraria. Ejemplos de TCs que han evolucionado de forma parecida son los TCs 4-5-9 y TC 1-6 de invierno, así como los TCs 2-3 y TCs 4-5 de verano. Por el contrario, los TCs 1-9-inv y los TCs 1-5-ver presentan evoluciones claramente opuestas. Este resultado manifiesta el comportamiento compensador que parece presentar la dinámica atmosférica, de modo que el incremento en la frecuencia de ciertos patrones va acompañado de un descenso en la frecuencia de otros.

3.2. Tipos de Tiempo. Precipitación y temperatura

La variabilidad regional de elementos como la precipitación y la temperatura está gobernada en gran medida por la circulación atmosférica dominante y por tanto por los TCs. Para entender mejor el papel de los patrones atmosféricos en la variabilidad regional se han obtenido los Tipos de Tiempo (TTs) o patrones de anomalías de precipitación y temperatura media asociados a cada uno de ellos. En las Figuras 2 y 3 pueden verse los TTs asociados a los diferentes TCs. En el caso de la precipitación, y debido a la gran variabilidad que presenta este elemento, sus TTs están referidos a patrones de anomalías estandarizadas. En los TTs se puede observar que en muchos de ellos aparecen anomalías del mismo signo en toda la PI, identificándose claramente los TCs responsables de las anomalías de carácter generalizado. Un ejemplo de esto lo encontramos en los TCs 1-6-inv y TC1-ver que se relacionan con importantes anomalías positivas de temperatura, mientras que los TCs 2-7-9-inv y TC5-ver lo hacen con los patrones de anomalías negativas. También aparecen TTs con un patrón de tipo bipolar, describiéndose comportamientos regionales distintos. Un ejemplo de ello son las diferencias encontradas entre los TTs de precipitación de invierno, TTs 5-10, el primero relacionado con anomalías positivas de precipitación en la fachada atlántica, y el segundo con anomalías positivas en la fachada mediterránea. De forma general, se observa una mayor regionalización de los TTs de precipitación, probablemente como consecuencia de la mayor influencia que en esta variables ejercen los factores orográficos, así como otros de tipo más local. A pesar de ello, también se observan comportamientos regionales en los TTs de temperatura, como es el caso del TT5-inv o del TT2-ver en los que aparece una importante anomalía positiva de temperatura en la zona Este peninsular, tal vez como consecuencia del efecto foehn provocado por los vientos de componente oeste en esta región.

Un resultado interesante de los TCs y los TTs es la alta coherencia física existente entre ellos, siendo relativamente sencillo entender los TTs en función de los flujos atmosféricos superficiales y

de niveles medio-altos definidos en los TCs. Un ejemplo claro se observa en los TTs fríos de invierno, TCs 7-9, en los que se aprecia una importante advección de Norte sobre la PI. De igual manera, también resulta sencillo entender los TTs relacionados con importantes anomalías positivas de precipitación, TCs 5-8-10-inv y TC6-ver, donde se observa en todos ellos una situación atmosférica de gran inestabilidad sobre la Península.

3.3. Influencia de los forzamientos solar y volcánico en los TCs

La variabilidad observada en la frecuencia anual de los TCs en el último milenio es una combinación de la variabilidad interna del sistema y de los forzamientos externos (Gómez et al., 2012). El análisis de las relaciones entre forzamientos y frecuencias puede ayudar a entender mejor la variabilidad de otros elementos climáticos como la precipitación o la temperatura. La diferente naturaleza de los forzamientos solar y volcánico, el primero actuando de forma continua sobre la

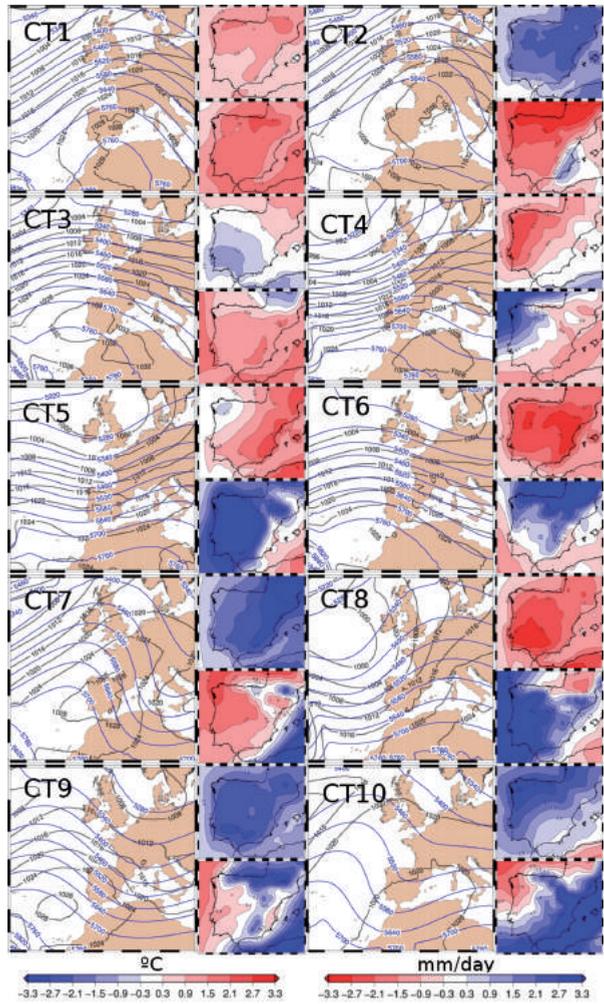


FIG. 2: Tipos de Circulación y Tipos de Tiempo asociados para el invierno. Los mapas grandes representan los TC (en líneas de contorno se representa la presión a nivel del mar en negro y Z500 en azul), mientras que los mapas pequeños (a su derecha) son sus TT asociados (el mapa superior representa anomalías de temperatura media diaria, y el inferior de precipitación). El orden está basado en su frecuencia relativa de mayor a menor.

baja frecuencia de las series, y el segundo actuando como un pulso, cuya acción se produce sobre la alta frecuencia de las series, obliga a hacer un análisis diferente para cada uno de ellos. Por ello, se han planteado dos métodos distintos. Por un lado, la influencia solar se ha analizado mediante las correlaciones obtenidas entre las series móviles de 31 años del forzamiento solar y de las frecuencias de los TCs. La significación estadística de las correlaciones se ha evaluado mediante el test t-Student. Respecto al análisis de la influencia volcánica, se han calculado los cambios relativos medios en la frecuencia de los TCs entre los 5 años anteriores y posteriores a una serie de años en los que se produjeron fuertes erupciones volcánicas. Los años considerados se corresponden con las 7 erupciones

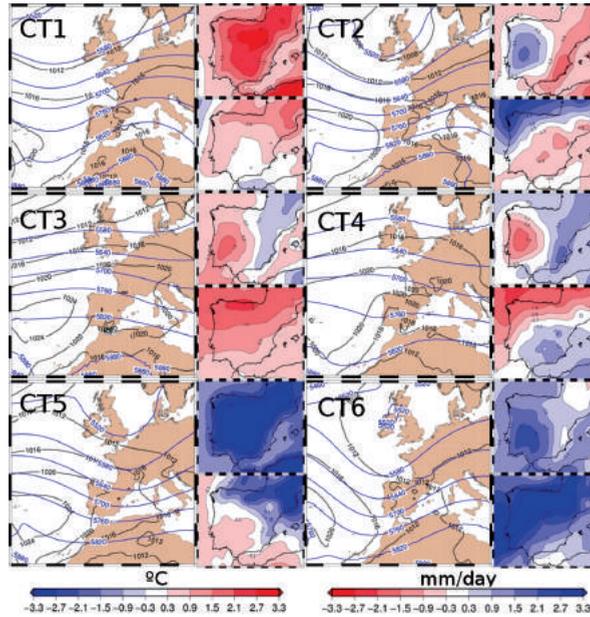


FIG. 3: *Idem que en la Figura 2 para la estación de verano.*

más importantes de todo el milenio, en los que se produjo una reducción de la constante solar superior a 20 W/m². La significación estadística de los cambios se ha evaluado obteniéndose los cambios relativos para todos los períodos móviles de 10 años del milenio (cambios entre los primeros y los segundos 5 años), con excepción de los períodos en los que se incluyen los 7 eventos volcánicos más importantes. La población obtenida de cambios, recuerda a una población normal, de media y mediana muy próximos al cero, por lo que hemos considerado significativos aquellos cambios que resultaron inferiores al valor del primer cuartil de la población (para el caso en que el cambio relativo fue negativo) o superiores a tercer cuartil (para los casos en que el cambio relativo fue positivo).

En la Tabla 1 pueden verse los resultados de los cálculos, observándose una influencia significativa de los forzamientos en la frecuencia anual de alguno de los TCs. En relación a esto, se aprecia la existencia de TCs sensibles tanto al forzamiento solar como al volcánico (TCs 1-9-inv y TCs 1-5-ver), mientras que otros presentan una dependencia al tipo de forzamiento. Así, los TCs 4-5-8-inv y TCs 4-6-ver sólo reaccionan al forzamiento solar, mientras que TC 7 de invierno es el único sensible, de manera exclusiva al forzamiento volcánico. El resto de TCs parecen no estar influidos, al menos de forma significativa. Si se tiene en cuenta el signo de la correlación y el de los cambios

relativos de los TCs más sensibles (en negrita en Tabla 1) se aprecia un comportamiento complementario entre algunos patrones, de modo que cuando la frecuencia de algunos de ellos aumenta en otros disminuye, y viceversa. En este sentido, si se tienen en cuenta las correlaciones con el forzamiento solar en invierno, los TCs 4-5-9, cuyos patrones describen la transición de las depresiones extratropicales desde el Oeste hacia el Este de la PI, presentan una frecuencia mayor en épocas de bajo forzamiento solar, a diferencia del TC1, cuyo patrón marca una situación mucho más estable, y cuya frecuencia disminuye significativamente. En cuanto a los cambios observados durante los inviernos posteriores a un episodio volcánico intenso lo más destacable es el aumento del TC 7,

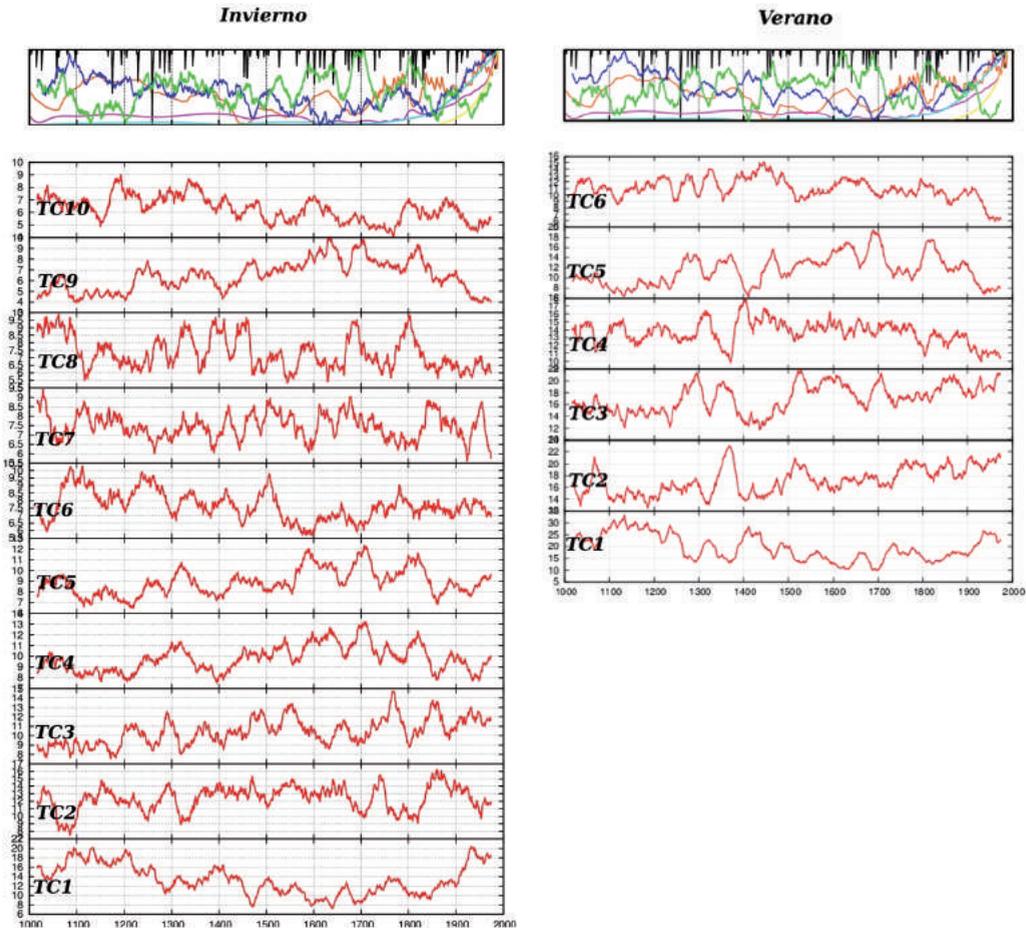


FIG. 4: Frecuencia móvil anual (31 años) de los TCs de invierno (izqda) y verano (dcha). Los paneles están organizados de mayor a menor frecuencia relativa de abajo a arriba. Los paneles superiores muestran las medias móviles de 31 años de los promedios de precipitación (verde) y temperatura (azul) para la PI, así como los forzamientos solar (rojo), volcánico (negro) y de gases de efecto invernadero (violeta, azul claro y amarillo (idem Fig. 1)).

patrón que se asimila en gran medida al de la fase negativa del modo de variabilidad East Atlantic. En relación al verano y al forzamiento solar, se obtienen resultados similares al invierno, observándose de nuevo una mayor frecuencia en el paso de depresiones extratropicales (TCs 5-6-ver) en períodos de

bajo forzamiento, así como un descenso en la frecuencia de la situación TC1, mucho más estable. En cuanto a la influencia volcánica en verano se obtiene un resultado parecido al que acaba de mencionarse, aunque en este caso sólo hay dos patrones afectados TCs 1-5, el primero asociado con el patrón más intenso de anomalías positivas de temperatura, y el segundo con el patrón más importante de anomalías negativas, resultado que sugiere un mayor impacto de la influencia volcánica en las temperaturas estivales que en la precipitación.

De todo este análisis puede concluirse que cuando el forzamiento solar disminuye y/o el volcánico aumenta, se produce un aumento de la frecuencia de TCs ciclónicos sobre la PI y un descenso de patrones atmosféricos de tipo anticiclónico. Los primeros están en general asociados a TTs con importantes anomalías positivas de precipitación y negativas de temperatura, mientras que los segundos están relacionados con patrones cálidos y de carácter seco. Este resultado podría explicar el aumento generalizado en las precipitaciones sobre la PI durante la Pequeña Edad de Hielo, así como la anticorrelación entre temperatura y precipitación señalada en *Gómez et al., 2012*.

	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10
INVIERNO										
solar	0.67	0.02	0.09	-0.60	-0.51	0.41	0.02	-0.36	-0.57	-0.06
volcanes	-27.5	+25.3	-23.9	+3.5	-6.1	-0.7	+27.1	-21.6	+63.3	-9.0
VERANO										
solar	0.54	0.15	-0.06	-0.34	-0.65	-0.46	—	—	—	—
volcanes	-37.9	+13.1	+8.1	+5.0	+40.3	-15.3	—	—	—	—

TABLA 1: *Influencia de los forzamientos solar y volcánico en la frecuencia de los tipos de circulación. en negrita se muestran las correlaciones y cambios relativos estadísticamente más significativos.*

4. CONCLUSIONES

En este estudio se han obtenido los TCs y las variaciones en sus frecuencias anuales relativas en invierno y verano, a partir de los datos diarios de las variables SLP y Z500, procedentes de una simulación regional que abarca el período 1001-1990. Así, 10 y 6 TCs fueron obtenidos para invierno y verano, respectivamente. Todos ellos pueden englobarse dentro de tres grandes categorías de situaciones atmosféricas: anticiclónicas, ciclónicas y zonales. Para entender la variabilidad regional que los diferentes patrones atmosféricos provocan en variables como la precipitación y la temperatura también se obtuvieron sus TTs asociados, representados por patrones de anomalías de precipitación y temperatura.

La influencia de los forzamientos solar y volcánico en la frecuencia de los TCs ha sido analizada con el fin de entender desde un punto de vista dinámico la variabilidad simulada de la precipitación y temperatura sobre la PI, especialmente en períodos de bajo forzamiento solar (mínimo de Maunder, entorno a 1700), o de notable forzamiento volcánico (mínimo de Dalton, alrededor de 1810). Para ello, se han analizado de manera independiente la influencia que ambos forzamientos ejercen sobre las series de frecuencia. Los resultados evidencian que algunos TCs, principalmente los de tipo ciclónico y anticiclónico, presentan una correlación muy significativa con el forzamiento solar, negativa para los primeros y positiva para los segundos. Respecto al forzamiento volcánico se observa algo similar, los patrones ciclónicos tienden a aumentar su frecuencia durante los años siguientes a

una gran erupción, disminuyendo la de los anticiclónicos. En relación a ésto se observa que en invierno, uno de los patrones que presenta una configuración compatible con el patrón de la fase negativa del modo de variabilidad East Atlantic, tiende a aumentar su frecuencia durante los años posteriores a una erupción volcánica intensa.

Considerando los cambios descritos en la frecuencia de los TCs por la acción de los forzamientos, es posible entender mediante sus TTs asociados, la variabilidad regional simulada para la precipitación y la temperatura durante periodos de notable forzamiento, como el que representó la Pequeña Edad de Hielo, cuando se produjo un descenso notable de la temperatura media peninsular y un incremento de las precipitaciones (Gómez et al., 2012). Aunque en este trabajo se pone de manifiesto la posible influencia de los forzamientos en la circulación atmosférica, es necesario revisar el papel que sobre los resultados puede tener el efecto directo de los forzamientos sobre la temperatura media de la troposfera, y por tanto sobre el cambio relativo de la altura de Z500.

REFERENCIAS

- Ammann, et al. (2007). *Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 104. pp. 3713–3718.
- Beltrami, H. (2002). *Earth's long-term memory*. Science. 297. pp. 206–207.
- Brunet, M. et al. (2007). *Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005*. Journal of Geophysical Research. 11. doi:10.1029/2006JD008249.
- Büntgen, et al. (2011). *2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility*, Science. 331. pp. 578–582.
- Crowley, T.J. (2000): *Causes of climate change over the past 1000 years*. Science. 289. pp. 270–277.
- Dorado-Liñán, I. et al. (2011). *Tree-ring proxy based temperature reconstructions and climate model simulations: Cross-comparison at the Pyrenees*, Climate of the Past Discussions. 7. pp. 3919–3957.
- García-Valero, J.A. et al. (2012). *A seasonal study of the atmospheric dynamics over the Iberian Peninsula based on circulation types*. Journal of Theoretical and Applied Climatology. doi:10.1007/10.1007/s00704-012-0623-0.
- Giorgi, F. (2006). *Climate change hot-spots*. Geophysical Research Letters. 33. pp. 217–222.
- Gómez-Navarro, J.J. et al. (2011): *A regional climate simulation over the Iberian Peninsula for the last millennium*. Climate of the Past. 2. pp. 451–472
- Gómez-Navarro, J.J. et al. (2012): *Internal and external variability in regional simulations of the Iberian Peninsula climate over the last millennium*. Climate of the Past. 8. pp. 25–36.
- Grell, G.A. et al. (1994). *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Tech. Rep. NCAR/TN 398+STR. National Center for Atmospheric Research.
- Hegerl, et al. (2011). *Influence of human and natural forcing on European seasonal temperatures*. Nature Geoscience. 4. pp. 1–5.
- Huybers, P. y Curry, W. (2006). *Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability*. Nature. 441. pp. 329–332.
- Kysely, J. y Huth, R. (2006). *Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods*. Journal of Theor and Applied Climatology. 85. pp. 19–36.
- Lorenz, E. (1956). Technical report. Statistical Forecast Project Report 1. Dep. of Meteorology. MIT 49. vol. 1. chap. *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*.
- Michelangeli, P. et al. (1995): *Weather regimes: Recurrence and quasi stationary*. Journal of the Atmospheric Sciences. 52, pp. 1237–1256.
- Nieto-Moreno, V. et al. (2011). *Tracking climate variability in the western Mediterranean during the Late Holocene: a multiproxy approach*. Climate of the Past. 7. pp. 1395–1414.

- Rodrigo, F.S. et al. (2012). *Climate variability in Andalusia (southern Spain) during the period 1701-1850 AD from documentary sources: evaluation and comparison with climate model simulations*. *Climate of the Past*. 8. pp. 117–133 .
- Serrano, A. et al. (1999). *Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula*, *Journal of Climate*. 12. pp. 2894–2919 .
- Trigo, D.P, et al. (2006). *Understanding precipitation changes in Iberia in early Spring: weather typing and storm-tracking approaches*. *Journal of Hydrometeorology*. 7. pp. 101-113.
- Wilks, D. (2006) . *Statistical methods in the atmosphere sciencies*. Academic, San Diego.
- Zorita, E. et al. (2005). *Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years*. *Geophysical Research Letters*. 32. pp. 755-762.

