

Climatología de sistemas de Depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) bajo condiciones de clima futuro

L. GARCIA-GARABAL*, R. NIETO♦

*Environment Physics Laboratory, Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain
lggarabal@uvigo.es, ♦rnieto@uvigo.es

RESUMEN

Este estudio presenta la primera climatología para las depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) en regiones extratropicales del hemisferio Norte bajo condiciones de clima cambiante en los escenarios A2 y A1B. El trabajo se basa en la detección de las DANAs utilizando los datos del modelo BCCR_BCM2.0 del Centro Bjerknæs para la Investigación del Clima de la Universidad de Bergen (Noruega), integrado en el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC). La identificación de los sistemas se realizó aplicando un método objetivo de detección basado en la imposición consecutiva y restrictiva de los tres parámetros físicos principales del modelo conceptual de dichos sistemas (un mínimo de geopotencial en el nivel de 200 hPa, circulación cerrada en niveles altos de la troposfera, mínimo relativo de espesor equivalente y mínimo relativo del parámetro frontal térmico). Los resultados muestran que las siguientes zonas son las de mayor ocurrencia de DANAs: el norte de China-Siberia, extendiéndose por la costa oeste del Pacífico, la costa este de Estados Unidos extendiéndose por el Atlántico Norte hacia Europa, y sobre la parte este del Atlántico, a latitudes de la Península Ibérica y sobre el Mediterráneo; detectándose una gran concentración de sistemas en las áreas más al norte, cercanas a los 70°N. Durante el periodo 2046-2065 se registrará un aumento de sistemas sobre el Atlántico este, extendiéndose la región de ocurrencia sobre este océano hasta Europa, y un descenso de sistemas sobre el Pacífico oeste. Para el A1B se observa un aumento de DANAs sobre la región de Europa en el Mediterráneo oriental, mientras que para el A2 parece que el número es menor que en el periodo de control. Para el periodo 2081-2100, disminuye la zona de ocurrencia en el escenario A2 sobre el Atlántico oeste. El número de sistemas será mayor durante el verano, detectándose los mínimos en invierno y primavera.

Palabras Clave: Depresiones Aisladas en Niveles Altos, DANAs, Cambio climático.

1. Introducción

Las depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) o, como se llaman en inglés, Cut-off Lows (COLs) han suscitado en las últimas décadas un gran interés dentro de la comunidad científica. Existen ciertas características de estos sistemas ampliamente analizadas y estudiadas:

1. Las DANAs son sistemas de baja presión a escala sinóptica formadas como resultado de cambios meridionales de las corrientes en chorro, en torno al nivel de 200 hPa, (Palmén y Newton, 1969; Winkler et al., 2001). En mapas isobáricos las DANAs son fácilmente reconocibles como contornos cerrados de geopotencial con un núcleo frío (Nieto et al., 2005).

2. En cuanto a su intensidad es mayor en la troposfera superior, disminuyendo hacia abajo, siendo posible encontrar circulación ciclónica en superficie.

3. Respecto a su dinámica, las DANAs son zonas aisladas de vorticidad potencial (Wernli and Sprenger, 2007; Nieto et al., 2008) afectando tanto a la troposfera como a la estratosfera.

4. En su ciclo de vida se pueden distinguir cuatro etapas: un primer desarrollo a partir de una vaguada en niveles altos: si existen ondas inestables en la circulación general en niveles altos de la troposfera se produce un aumento de su amplitud y a veces también existe disminución de su longitud de onda; una fase de ruptura: los contornos de geopotencial toman forma de omega invertida formándose una circulación cerrada de la corriente general de los vientos del oeste. El aire frío procedente de las regiones del norte se aísla del flujo polar y el aire cálido procedente de regiones más meridionales se va separando del flujo general subtropical; una fase de aislamiento: la circulación ciclónica está cerrada, bien definida y desarrollada, separada totalmente de la circulación meridional general; y finalmente se produce su debilitamiento por convección o por fusión con la circulación general antes de deshacerse completamente, ya que en muchos casos la DANA es alcanzada por una vaguada de gran amplitud por detrás.

Dependiendo de las diferentes características del terreno y de la presencia y/o ausencia de un océano cálido bajo ellas, existe o no la posibilidad de convección, por lo que las DANAs están asociadas, en muchos casos, a precipitaciones intensas pudiendo causar perjuicios socioeconómicos importantes. Es por esto que su predicción es uno de los retos de los centros meteorológicos, ya que debido a su dinámica de génesis y a su comportamiento no resulta sencilla su detección dentro de los límites de la

predicción meteorológica. Su importancia meteorológica hace que en los últimos años se realizasen múltiples trabajos para analizar su frecuencia y comportamiento, tanto a nivel climatológico para ambos hemisferios (Nieto et al., 2005, 2008; Reboita et al., 2010, Ndara y Waugh, 2010; o Favre et al., 2011) como para analizar su impacto sobre regiones más pequeñas (e.g., Qi et al., 2000; Porcú et al., 2007; Nieto et al., 2007; Campatella y Possia, 2007), y que hoy en día exista un interés dentro de la comunidad científica en estimar los potenciales cambios en su ocurrencia inducidos por el cambio climático antropogénico.

Con respecto a la centuria anterior, es sabido, y atendiendo a los trabajos anteriormente citados que sobre el Hemisferio Norte (Nieto et al., 2005, 2008 y las referencias incluidas en estos estudios) existen ciertas regiones en las cuales la ocurrencias de las DANAS es más frecuente: el sur de Europa y la costa este del océano Atlántico, la región del norte China-Siberia extendiéndose hasta el noroeste de la costa del Pacífico Norte, el Nordeste de Estados Unidos, la parte occidental de los EE.UU., el Nordeste del Atlántico Norte y el Norte de África. Así también se confirmó que, en cuanto a su estacionalidad, las DANAs se forman con más frecuencia durante los meses de verano, encontrándose su mínimo de ocurrencia en el invierno. El número de sistemas a lo largo de las últimas décadas muestra una gran variabilidad interanual, sin mostrar una tendencia significativa al aumento en su número. Son sistemas de corta duración, en su mayoría no superan los 2 o 3 días de vida en su ciclo de aislamiento; y en cuanto a su movimiento es pequeño en general, pudiendo moverse prácticamente en cualquier dirección de un día a otro, siendo menos de un 20% las que permanecen estacionarias.

Bajo diferentes escenarios de clima cambiante se han realizado números trabajos climatológicos de diversos sistemas sinópticos en los últimos años. Es el caso de, por ejemplo, el trabajo de Donat et al. (2010) para tormentas o el de Leckebusch et al. (2006) para vientos extremos sobre Europa, el de Barriopedro et al. (2010) sobre sistemas bloqueantes para el hemisferio Norte, entre muchos otros.

Sin embargo no se encuentra publicada ninguna climatología de DANAs bajo ninguno de los supuestos escenarios de cambio global indicados por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, IPCC 2007).

La finalidad del presente trabajo es realizar una primera aproximación a una climatología de DANAs para el Hemisferio Norte (HN) en regiones extra-tropicales mediante un método objetivo bajo condiciones de clima cambiante. En concreto utilizaremos los datos procedentes del modelo climático desarrollado por el Centro Bjerknes para la Investigación del clima de la Universidad de Bergen (Noruega) en su versión 2 (BCCR-BCM2.0, Déqué et al., 1994, Furevik et al., 2003), uno de los modelos usados para el Cuarto Informe (AR4, Fourth Assessment Report) del IPCC (IPCC, 2007). Se pretende analizar si el modelo es capaz de reproducir los patrones de DANAs en el hemisferio Norte para el siglo que viene. La elección de este modelo y no otro se basa en que ofrece una amplia y completa cantidad de los datos necesarios para el estudio.

2. Metodología de detección.

El interés por el estudio de estos sistemas ha hecho que existan en los últimos años diversos métodos de detección objetiva, cada vez más sofisticados. Partiendo de un método heredero de la detección en mapas sinópticos usados en la década de los 90

(Price y Vaughan, 1993; Kentarchos y Davies, 1998), podemos encontrar trabajos basados en la detección de un mínimo de geopotencial en puntos de rejilla para el nivel de 500 hPa (Bell y Bosart, 1989; o Novak et al., 2002). Pero los trabajos más recientes han desarrollado técnicas de detección más sofisticadas, basadas en los parámetros que definen de la manera más precisa al sistema (e.g., Nieto et al. 2005, 2007; Favre et al., 2011), y que pueden ser aplicados a cualquier tipo de datos en formato de rejilla de los que dispone la comunidad científica hoy en día. Dentro de este tipo se encuentra el desarrollado por Nieto et al. (2005) que será el que sigamos en este trabajo. El método de Nieto et al. (2005) se basa en tres características físicas del modelo conceptual de DANA (Winkler et al., 2001). Las condiciones a cumplir son impuestas consecutivamente y cada una de ellas hace más restrictiva la detección. El primer paso para considerar un punto de rejilla como un posible punto de DANA es que debe ser un vórtice cerrado (de circulación ciclónica) que rodee un mínimo de geopotencial en el nivel de 200 hPa y que se encuentre aislado de la circulación general del oeste. Para esto se le exige que al menos seis de los ocho puntos que rodean al mínimo de geopotencial presenten una diferencia superior a los 10 mgp y que el viento zonal sea de signo cambiante cerca del centro del sistema y a latitudes más altas. Después de escoger estos puntos, el segundo paso se basa en la existencia de un mínimo de espesor equivalente en el centro de la DANA (Huber-Pork y Kress, 1981, 1989). Así, debe existir en el flanco delantero del sistema una banda de espesor mayor que en su interior. Como último paso para encontrar un punto DANA se le exige una condición de baroclinidad (Sabo, 1992), de modo que el Parámetro Frontal Térmico (Renard y Clarke, 1965) al oeste del punto central debería ser más

alto que en el punto central. Este método de detección facilitó una base de DANAs para realizar una de las más extensas climatologías usando diferentes reanálisis. El buen resultado de este método hace que sea uno de los más usados a la hora de determinar estos sistemas (e.g. Reboita et al., 2010).

3. Datos.

La climatología de las DANAs para la última mitad del siglo XXI se realizó utilizando datos obtenidos del modelo climático del Centro Bjercknes para la Investigación del Clima de la Universidad de Bergen (Noruega) en su versión 2 (BCCR-BCM2.0; <https://esg.llnl.gov:8443/home/publicHomePage.do>) para dos periodos de veinte años, 2046-2065 y 2081-2100, de finales del siglo XXI. La resolución en la atmósfera sigue el patrón de truncamiento triangular T63 con una reducción lineal gaussiana a una rejilla cuadrática T42, es decir, se obtiene finalmente una rejilla homogénea de 2,8° en latitud y longitud (Hortal y Simmonds, 1991). Las coordenadas híbridas en la vertical siguen la topografía en la baja troposfera, pero se vuelven gradualmente paralelas a las líneas de presión con el incremento en altura. El modelo parte de superficie hasta los 10hPa, con 31 niveles intermedios. El modelo presenta parametrizaciones físicas para el cálculo de procesos físicos tales como el flujo de masa, energía y momento (Coiffer et al., 1987) y una componente oceánica de 35 capas verticales con un alcance del espaciado meridional de la cuadrícula de 0.5° en el ecuador (Bleck et al., 1992). El acoplamiento entre los modelos de la atmósfera, el océano y el hielo marino se hace a través del software OASIS (Terry et al., 1998). Las salidas originales del modelo poseen datos cada 3 horas de integración, en este trabajo utilizaremos datos diarios. Para

mayor información y referencias sobre el modelo se puede consultar la web <http://www.bjerknes.uib.no/>

El modelo BCCR-BCM2.0 tiene proyecciones para el clima futuro desde 1990 bajo diferentes escenarios de emisiones (A1, A2, B1, B2) que han sido ampliamente aplicados para la construcción de otros modelos climáticos y utilizados para evaluar los impactos del cambio climático (e.g., Orsolini y Sorteberg, 2009; Elshamy et al., 2009; Burgoa et al., 2008; Luo et al., 2011).

Para este estudio usamos datos diarios de geopotencial, viento zonal y temperatura para los niveles de 200 y 300 hPa en los escenarios de proyección de cambio climático A2 y A1B (IPCC, 2007). La familia de la línea evolutiva y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Las cuestiones subyacentes son la autosuficiencia y la preservación de las identidades locales. El índice de natalidad converge muy lentamente, lo cual implica una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico es cada vez más desigual entre las distintas regiones del planeta, por ello, la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales serían rasgos característicos de este futuro. Este escenario podría considerarse la descripción del mundo tal y como evolucionará de mantener nuestro actual comportamiento. El escenario A1 se divide en varios subgrupos entre los cuales el escenario A1B es el más probable. En éste existe equilibrio entre las fuentes energéticas fósiles y no fósiles. Este equilibrio se entiende como la no dependencia excesiva de una fuente de energía, suponiendo que se mejoren todas las formas de aprovisionamiento energético y las tecnologías de uso final. En este escenario las emisiones de CO₂ aumentan hasta el 2050 (debido al rápido crecimiento impulsado principalmente por los combustibles fósiles) y, después

de esta fecha, hay un descenso en las emisiones debido a un mayor uso de soluciones de energía limpia.

La climatología de las DANAs, bajo ambos escenarios, se realiza mediante la detección objetiva de los sistemas aplicando consecutiva y restrictivamente las tres principales características físicas del modelo conceptual de dicho sistema descrito por Nieto et al. (2005). Como segundo objetivo se examina la distribución estacional, anual y la evolución temporal de las DANAs a lo largo de los citados periodos.

Para validar los resultados obtenidos se compararon las simulaciones con el último estudio de clima reciente con datos reanalizados del ECMWF y de NCEP-NCAR (Nieto et al., 2008) para el periodo 1960-1999. Las DANAs fueron detectadas para el hemisferio Norte en latitudes extra-tropicales, por lo que se omitió aquellas que ocurren por encima de 70°N y por debajo de 20°N.

4. Resultados

En esta sección se presentan las climatologías basadas en el modelo conceptual de DANAs sobre la región extra-tropical del hemisferio Norte. La Figura 1 muestra la distribución espacial de los puntos de rejilla que cumplen las condiciones de DANA para el periodo entre 1961 y 2000, años en los cuales podemos comparar con las climatologías previas de Nieto et al. (2008) que usaron datos reanalizados de ERA-40 y NCAR-NCEP. Dado que los gráficos se presentan en una escala porcentual y no de número absoluto de sistemas sobre punto de rejilla, en la DANA sobre un punto de rejilla. Se observa que la distribución geográfica es similar con las DANAs obtenidas con los reanálisis, con la mayor concentración de sistemas en tres áreas preferentes. Estas regiones son el norte de China-Siberia, extendiéndose por la costa oeste del Pacífico, la costa este de

Estados Unidos extendiéndose por el Atlántico Norte hacia Europa, y sobre la parte este del Atlántico a latitudes de la Península Ibérica y sobre el Mediterráneo.

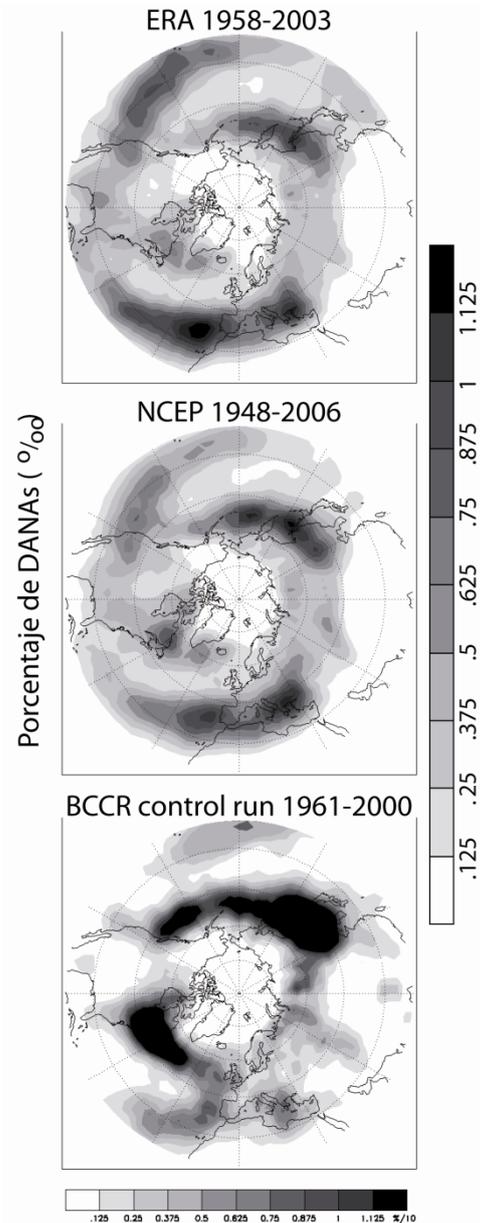


FIG. 1. Climatología anual de DANAs para el hemisferio Norte usando datos de: ERA40 en el periodo 1958-2003 (arriba) y NCEP-NCAR en el periodo 1948-2006 (centro) en una rejilla de 2,5° x 2,5°; y usando datos del modelo BCCR-BCM2.0 para el periodo de control entre 1961-2000 en una rejilla de 2,8° x 2,8°. Los contornos grisáceos indican el porcentaje de DANAs en tanto por mil.

Figura 1 se muestra para su comparación espacial la climatología de DANAs con el periodo de control del

modelo BCCR-BCM (1961- 2000), con ERA40 (1958-2003) y con NCEP-NCAR (1948-2006). La escala en colores grisáceos representa el porcentaje por 1000 de puntos de Estas áreas de máxima ocurrencia son coincidentes con los resultados de los trabajos antes citados pero con una salvedad, los trabajos de Nieto et al. 2005, 2008 muestran que es sobre la región europea donde las DANAs ocurren con mayor frecuencia. Por el contrario, usando el modelo BCCR-BCM en el periodo de control se observa que en latitudes más altas de aquellas regiones un número mayor de sistemas, y sobre Europa el porcentaje es menor. Es de destacar que el modelo BCCR-BCM sí reproduce el patrón bimodal en la ocurrencia de DANAs sobre la región de Europa señalada por Nieto et al., 2007. La distribución estacional (no mostrada aquí) sigue el mismo patrón que la distribución anual.

La figura 2 muestra la climatología de las DANAs para los escenarios A1B y A2 para los subperiodos del siglo XXI, 2046-2065 y 2081-2100, de nuevo, anualmente. En general se observa un patrón de ocurrencia de DANAs similar al periodo de control. Para el periodo 2046-2065 se observa, bajo los dos escenarios, un aumento de los sistemas sobre el Atlántico este, extendiéndose la región de ocurrencia hasta Europa, y un descenso de sistemas sobre el Pacífico oeste. Sobre la región de Europa en el Mediterráneo oriental se observa un aumento de sistemas para el escenario A1B, mientras que para el A2 parece que el número es menor que en el periodo de control. Para el periodo 2081-2100 sobre el Atlántico oeste ocurre una disminución en la amplitud del área de ocurrencia en el escenario A2. La comparación visual de estos mapas anuales nos da una idea de la distribución y concentración de los

sistemas, pero para hacer un análisis del número de sistemas para cada periodo y BCCR-A1B 2046-2065

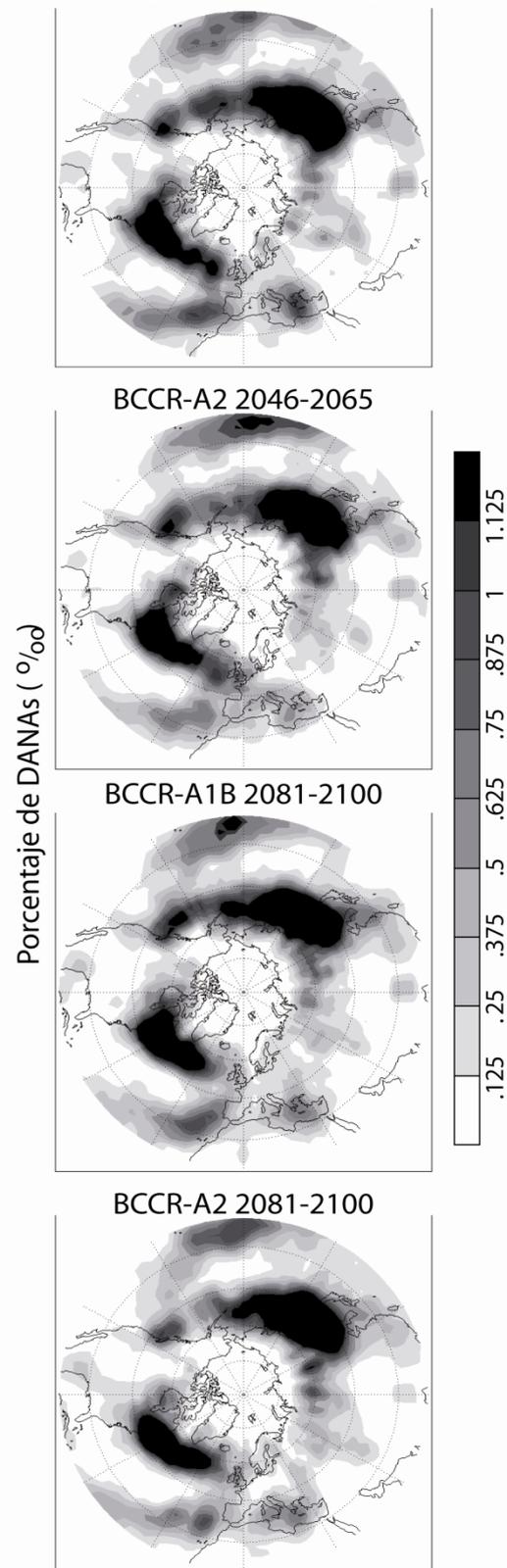


FIG. 2. Climatología anual de DANAs para el hemisferio Norte usando datos del modelo

BCCR-BCM2.0 para los periodos 2046-2065 y 2081-2100 bajo las proyecciones de cambio climático A1B y A2 en una rejilla de 2,8° x 2,8°. Los contornos grisáceos indican el porcentaje de DANAs en tanto por mil.

escenario se presenta a continuación la ocurrencia mensual y estacional de las DANAs.

La figura 3 muestra la distribución estacional de los sistemas observándose, que como en los trabajos realizados para el siglo pasado, las DANAs se forman con más frecuencia durante los meses del verano-junio, julio, agosto (JJA)-. Mientras que es durante el invierno y primavera cuando con más dificultad se desarrollan las DANAs, apenas el 20% para cada una de ellas. Es de destacar que en trabajos previos la estación con menor número de sistemas era claramente el invierno, mientras que en este caso se aprecia una homogeneidad entre el invierno y la primavera. Esta concordancia entre los resultados estacionales está presente también en la distribución mensual de ocurrencia.

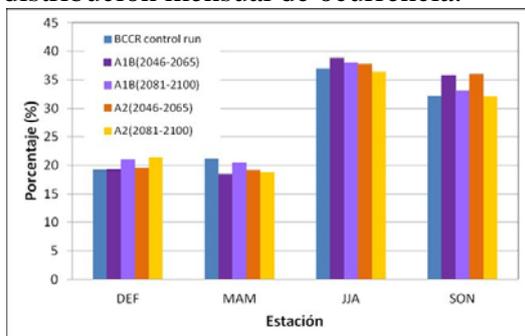


FIG. 3. Distribución estacional del porcentaje (%) de DANAs en el modelo BCCR-BCM. Diciembre, enero y febrero (DJF); marzo, abril y mayo (MAM); junio, julio y agosto (JJA); septiembre, octubre y noviembre (SON).

Del análisis mensual (figura 4) se observa que es durante el mes de junio cuando se alcanza el máximo de sistemas y que se observa un mínimo en marzo. La mayor diferencia entre los diferentes escenarios y periodos se observa en febrero, y la mayor amplitud en el ciclo mensual se detecta para las DANAs bajo el escenario A2 en el periodo 2046-2065 en comparación con las demás climatologías.

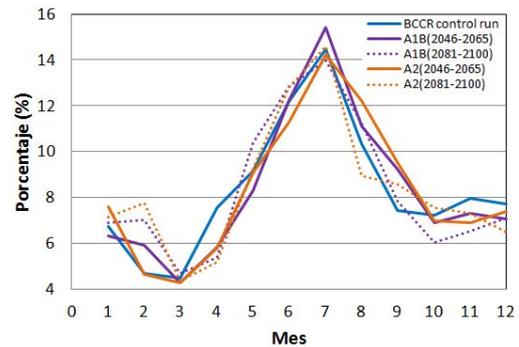


FIG.4. Distribución mensual del porcentaje (%) de DANAs en el modelo BCCR-BCM: línea azul periodo de control, líneas violetas escenario A1B y líneas naranja escenario A2. Las líneas continuas son para el periodo 2046-2065, las discontinuas para 2081-2100.

Aunque en una base mensual y estacional las DANAs muestran un comportamiento de máximos y mínimos común a todos los estudios realizados, otra de las características que gobierna la climatología de las DANAs es su gran variabilidad interanual, pudiendo encontrar valores en algunos años que doblan los valores encontrados para otros. Por ejemplo Price y Vaughan (1992) en su corto periodo de análisis de cinco años para el hemisferio Norte encontraron un máximo de ocurrencia en el año 1994 con 275 casos y un mínimo en 1991 con 181. Nieto et al., (2005) en su trabajo para la región Europea encontraron sólo cuatro casos en 1960 y hasta 26 eventos en 1975. En la figura 5 se refleja el resultado obtenido para el número de DANAs a lo largo de los años detectadas en el modelo BCCR-BCM.

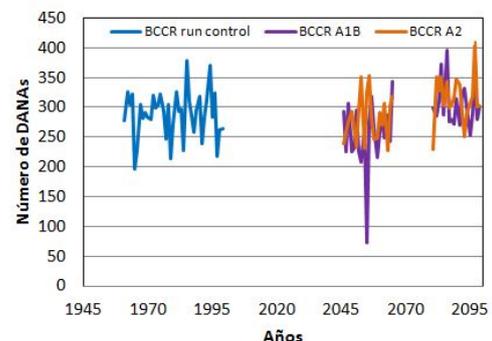


FIG. 5. Evolución temporal de las DANAs en el modelo BCCR-BCM: línea azul periodo de

control, líneas violetas escenario A1B y líneas naranja escenario A2.

Se corrobora la gran variabilidad interanual para estos sistemas (ver tabla 1), detectándose un aumento en el número de sistemas medio para el periodo 1981-2100. Sin embargo no se detecta ninguna tendencia significativa en la frecuencia de ocurrencia para el periodo de estudio.

	<i>Media</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	σ
<i>Control run</i>	287,7	166	379	39,5
<i>A1B 2046-2065</i>	254,1	73	343	56,3
<i>A2 2046-2065</i>	281,1	228	354	38,4
<i>A1B 2081-2100</i>	304,7	252	395	36,9
<i>A2 2081-2100</i>	314,6	229	410	39,4

Tabla 1. Media, valor máximo y mínimo y desviación típica del número de DANAs usando el modelo BCCR-BCM2.0 para el periodo de control (1961-2000) y los escenarios A1B y A2 en los periodos 2046-2065 y 2081-2100.

6. Conclusiones

Este estudio ofrece la primera climatología de DANAs bajo escenarios de cambio global definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC-AR4) en el Hemisferio Norte en regiones extra-tropicales. Las DANAs fueron detectadas usando el modelo BCCR_BCM 2.0 del Centro Bjerknes para la Investigación del Clima de la Universidad de Bergen (Noruega) para los escenarios A2 y A1B y para los periodos 2046-2065 y 2081-2100. Las DANAs fueron localizadas mediante un método objetivo de detección basado en la imposición consecutiva y restrictiva de los parámetros físicos de su modelo conceptual. Los resultados obtenidos para el periodo de control del modelo (1961-2000) se han comparado con los datos reanalizados del ERA-40 y de NCEP-NCAR (Nieto et al., 2008) para los periodos 1958-2003 y 1948-2006, respectivamente. En cuanto a la distribución espacial de las DANAs se puede decir que, de forma general, los resultados obtenidos son similares a trabajos anteriores. Las regiones de

mayor ocurrencia de DANAs en el Hemisferio Norte detectadas son:

- 1) el norte de China-Siberia, extendiéndose por la costa oeste del Pacífico,
- 2) la costa este de Estados Unidos extendiéndose por el Atlántico Norte hacia Europa,
- 3) y sobre la parte este del Atlántico, en las latitudes de la Península Ibérica y sobre el Mediterráneo.

La gran diferencia recae sobre el número de sistemas observados en cada una de las regiones. Así, en trabajos anteriores era sobre la región europea donde las DANAs ocurrían con mayor frecuencia, sin embargo el modelo BCCR-BCM detecta mayor concentración de estos sistemas a latitudes más altas. Este resultado se heredará en las salidas del modelo para los escenarios A2 y A1B para los que hemos realizado el cálculo. Teniendo esto en cuenta, durante el periodo 2046-2065 para ambos escenarios, se registrará un aumento de sistemas sobre el Atlántico este, extendiéndose la región de ocurrencia sobre este océano hasta Europa, y un descenso de sistemas sobre el Pacífico oeste. Comparando resultados entre ambos escenarios, para el escenario A1B se observa un aumento de DANAs sobre la región de Europa en el Mediterráneo oriental, mientras que para el escenario A2 parece que el número es menor que en el periodo de control. Para el periodo 2081-2100, disminuye la zona de ocurrencia en el escenario A2 sobre el Atlántico oeste.

Atendiendo a la frecuencia de las DANAs se localizan más en verano que en invierno, coincidiendo con anteriores resultados. Esto indica que la corriente en chorro seguirá siendo más débil en los meses cálidos, haciendo más propicia la formación de las DANAs. A diferencia de lo que ocurría en resultados anteriores en donde el invierno era la estación con

menos sistemas de forma destacada, en un futuro se encuentra similitud en el número de DANAs encontrado en invierno y en primavera. El análisis mensual corrobora los resultados estacionales, encontrando que es junio el mes de mayor ocurrencia de DANAs y marzo el de menor.

En cuanto al número de sistemas por año se registra una gran variabilidad interanual, como cabía esperar de estudios previos, pero sin detectar ningún tipo de tendencia en el aumento o disminución en la ocurrencia de las DANAs.

En general, este primer estudio del comportamiento de las DANAs en un clima futuro cambiante indica que se mantendrán las regiones de mayor ocurrencia, que será durante los meses de verano cuando se siga detectando un número mayor de sistemas, sin una clara tendencia al aumento de los mismo. Por otro lado, se evidenció que el modelo BCCR-BCM2.0 es capaz de reconocer el patrón de las DANAs, aunque a latitudes altas la detección tan elevada de sistemas requerirá un análisis más fino de los campos utilizados para trabajos posteriores.

Agradecimientos

Los datos utilizados fueron obtenidos del servidor ESG de UCAR.

Se agradece la financiación de la Universidad de Vigo a través de las *“Bolsas de másteres orientados a la investigación: Programa General”* (Convocatoria de ayudas a la investigación 2010).

Referencias

Barriopedro, D., R. García-Herrera, J. F. y R. M. Trigo, 2010: Application of blocking diagnosis methods to General Circulation Models. Part II: model simulations. *Climate Dynamics*, 35(7-8), 1393-1409, doi: 10.1007/s00382-010-0766-6.

Bell, G.D., y L. F. Bosart, 1989: A 15-year climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2142–2163.

Bleck, R., C. Rooth, D. Hu, y L. T. Smith, 1992: Salinity-driven thermocline transients in a wind- and thermohaline-forced isopycnic coordinate model of the North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1486–1505.

Burgoa-Mariaca, A. W., 2008: Escenarios climáticos para el monzón sudamericano: determinados por los modelos de acoplamiento del IPCC AR4. *Revista Boliviana de Física*, 14, 100-115. ISSN 1562-3823.

Campetella, C.M., y N.E. Possia, 2007: Upper-level COLs in Southern South America. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 96, 181–191, doi:10.1007/s00703-006-0227-2.

Coiffer, J., Y. Ernie, J. F. Geleyn, J. Clochard, J. Hoffman, F. Dupont, 1987: The operational hemispheric model at the French Meteorological Service, en *J. Met. Soc. Japan, Special NWPSymposium Volume*, 337–345

Donat, M.G., G.C. Leckebusch, J. G. Pinto, U. Ulbrich, 2010: European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research*, 42, 27-43 doi:10.3354/cr00853

Elshamy, M., Seierstad, I. A., Sorteberg, A., 2009: Impacts of climate change on Blue Nile flows using bias-corrected GCM scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 551-565.

Favre, A., B. Hewitson, M. Tadross, C. Lennard, R. Cerezo-Mota, 2011: Relationships between cut-off lows and the semiannual and southern

- oscillations. *Clym. Dim.* doi: 10.1007/s00382-011-1030-4
- Furevik, T., M. Bentsen, H. Drange, I. K.T. Kindem, N. G. Kvamstø, A. Sorteberg, 2003: Description and evaluation of the bergen climate model: ARPEGE coupled with MICOM. *Climate Dynamics*, 21, 27–51, doi 10.1007/s00382-003-0317-5
- Hortal, M., A. J. Simmons, 1991: Use of Reduced Gaussian grids in spectral models. *Mon. Weath. Rev.* 119, 1057–1074.
- Huber-Pock, F., C. Kress, 1981: Contributions to the problem of numerical frontal analysis. Proceedings of the Symposium on Current Problems of Weather-Prediction. Vienna, June 23–26, 1981. Publications of the Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, p. 253.
- Huber-Pock, F., C. Kress, 1989: An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 40, 170–180.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Summary for policymakers, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., pp. 1–18, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Kentarchos, A.S. y T. D. Davies, 1998: A climatology of cutoff lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990–1994. *Int. J. Climatol.* 18, 379–390.
- Ndarana, T., D. W. Waugh, 2010: The Link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 136, 869–885. doi:10.1002/qj.627
- Nieto, R., L. Gimeno, L. de la Torre, 2005. Climatologies features of cut-off low systems in the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 18, 3085–3103.
- Nieto, R., M. Sprenger, H. Wernli, R.M. Trigo, L. Gimeno, 2008: Identification and climatology of cut-off low near the tropopause, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1146, 256–290, doi:10.1196/annals.1446.016.
- Nieto, R., L. Gimeno, J. A. Añel, 2007: Analysis of the precipitation and cloudiness associated with COLs occurrence in the Iberian Peninsula. *Meteorol. Atmos. Phys.* 96, 103–119 doi:10.1007/s00703-006-0223-6.
- Novak, M.J., L. F. Bosart, D. Keyser, 2002: Climatology of warm season 500 hPa cutoff cyclones and a case study diagnosis of 14–17 July 2000. Preprints, *19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Amer. Meteor. Soc., San Antonio, TX, 68–71.
- Leckebusch, G.C., B. Koffi, U. Ulbrich, J. G. Pinto, T. Spanghel, S. Zacharias, 2006. Analysis of frequency and intensity of winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research*, 31, 59–74
- Luo, F., S. Li, T. Furevik, 2011: The connection between the Atlantic Multidecadal Oscillation and the Indian Summer Monsoon in Bergen Climate Model Version 2.0, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JD015848.
- Orsolini, Y., A. Sorteberg, 2009: Projected changes in Arctic summer cyclones under global warming in the Bergen climate model. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2(1), 1-6.
- Palmén, E., C. W. Newton, 1969: Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation. *Academic Press*, 603.
- Porcú, F., A. Carrassi, C. M. Medaglia, 2007: A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the

- Mediterranean region. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 96, 121–140
doi:10.1007/s00703-006-0224-5.
- Price, J.D., G. Vaughan, 1992: Statistical studies of cutoff-low systems. *Ann. Geophys.*, 10, 96–102.
- Qi, L., Y. Wang, L. M. Leslie, 2000: Numerical simulations of a cut-off low over southern Australia. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 74, 103–115.
- Reboita, M. S., R. Nieto, L. Gimeno, R.P. da Rocha, T. Ambrizzi, R. Garreaud, L. F. Krüger, 2010: Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 115, D17104, doi:10.1029/2009JD013251.
- Renard, R.J., L.C. Clarke, 1965: Experiments in numerical objective frontal analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 93, 547–556.
- Sabo, P., 1992: Application of the thermal front parameter to baroclinic zones around cutoff lows. *Meteorol. Atmos. Phys.* 47, 107–115.
- Terray, L., S. Valcke, A. Piacentini, 1998: OASIS 2.2, Ocean atmosphere sea ice soil: user's guide. Technical Report TR/CMGC/00/10, CERFACS, Toulouse, France, 77
- Wernli, H., M. Sprenger, 2007: Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, 64, 1569–1586.
- Winkler, R., V. Zwatz-Meise, 2001: Manual of synoptic satellite meteorology. Conceptual models. Vers. 6.0. (Available at Central Institute for Meteorology and Geodynamics, HoheWarte 38, 1190 Vienna, Austria).