



Tendencias futuras de la temperatura superficial del mar en el Caribe y el Mediterráneo Occidental

L. Garcies y J. Cuxart

Departamento de Física, Universitat de les Illes Balears. Ctra. Valldemossa, km 7.5. 07122 Palma de Mallorca

Recibido: 18-X-2006 – Aceptado: 9-XI-2006 – Versión Traducida

Correspondencia a: lorenagarcies@gmail.com

Resumen

Los modelos climáticos globales predicen un calentamiento generalizado de la atmósfera, de distinta intensidad según las características de cada modelo y las hipótesis de emisión de gases de origen antrópico. Este calentamiento no tiene una distribución homogénea en el planeta. En este estudio se compara la evolución prevista de la temperatura superficial del mar Caribe y el mar Mediterráneo, y se relaciona con el posible alargamiento de la temporada de huracanes y la mayor fuerza de los mismos por el Caribe y con el favorecimiento de tiempo severo en el Mediterráneo. En ambos casos es de esperar un aumento de la frecuencia y de la intensidad de episodios de tiempo severo debido al aumento previsto de la temperatura superficial del mar en 1.5°C y 2.5°C para el mar Caribe y mar Mediterráneo respectivamente.

1 Introducción

Los episodios de tiempo severo tienen un gran impacto sobre las personas, sus bienes y su entorno. Las precipitaciones intensas a menudo combinadas con vientos fuertes causan inundaciones y destrucción de edificios y de zonas de cultivo. Pueden ir asociadas a la formación de sistemas convectivos mesoscalares en latitudes medias o a la formación de ciclones o huracanes en las zonas tropicales. Las zonas donde estos fenómenos tienen lugar están adaptadas a su existencia, de acuerdo con su frecuencia de ocurrencia e intensidad del fenómeno, y toman las medidas de precaución necesarias según la información climatológica disponible. Los daños esperables están registrados, por ejemplo, por las compañías de seguros o en las especificaciones técnicas de construcción de viviendas y grandes infraestructuras.

El calentamiento global que se prevé para el siglo XXI y que ya parece detectarse en un buen número de medidas (Gayà, 2005) significa que hay más energía disponible en el sistema climático. Los cambios pueden afectar a la distribución de temperaturas en el planeta, especialmente si se produce un deshielo importante en latitudes altas. Los gradientes de temperatura entre polos y trópicos pueden disminuir y resultar en un cambio de los patrones de transporte de calor entre ambas zonas, tanto atmosféricos como oceánicos.

Las conclusiones del IPCC¹ apuntan que, con el aumento de la temperatura, habrá más vapor de agua en la atmósfera y un aumento global de precipitación, aunque en latitudes medias y bajas pueden haber zonas que experimenten menos precipitación, especialmente aquéllas que se sitúen de nuevo en las ramas descendientes de las células de Hadley. También se espera que aumente la variabilidad interanual y que haya más episodios extremos de precipitación tanto en latitudes bajas como medias.

En este trabajo se intentará estimar mediante un estudio simple de la evolución prevista de la temperatura superficial del mar cómo puede aumentar la frecuencia de tiempo severo durante este siglo. La hipótesis de trabajo es muy simple, tal vez incluso simplista: si aumenta la temperatura superficial del mar en el Caribe y en el Mediterráneo, hay más energía disponible para alimentar episodios de tiempo severo, se trate de huracanes o de sistemas convectivos mesoscalares. Evidentemente, no se contemplan otros factores, como la dinámica necesaria para convertir esta energía disponible en una estructura ciclónica compleja. Es decir, si hay energía acumulada en la parte superficial del mar, pero no se dan los factores perturbadores necesarios para dar lugar a la ciclogénesis, no se producirán los episodios de tiempo severo. En definitiva, si los cambios climáticos afectan a la dinámica

¹<http://www.ipcc.ch/>



atmosférica, las conclusiones que se puedan extrapolar de este estudio pueden ser cuestionadas.

Nos centraremos en dos áreas de especial interés: las afectadas por los huracanes², que ejemplificaremos con el caso del mar del Caribe, y la Mediterránea Occidental, un área que parece que puede experimentar un descenso de precipitación significativo según los modelos climáticos.

Los ciclones tropicales son sistemas que se caracterizan por presentar un centro de bajas presiones, de núcleo caliente, alrededor del cual los vientos giran en sentido ciclónico. Se originan por la amplificación de una perturbación en la zona tropical de aguas cálidas (el valor umbral es de 26.7°C o 80°F) aprovechando la gran cantidad de energía disponible y llegando a generar un ciclón. Para la formación completa de la estructura, tiene que haber humedad disponible en toda la troposfera, que la zona marítima con temperatura por encima del umbral sea extensa, que los vientos no presenten cizallas fuertes en la vertical y que haya divergencia en capas altas (Fernández, 2003a).

Las fases previas a la de huracán son la de ola tropical, depresión tropical y tormenta tropical en orden de intensidad determinada por la velocidad del viento. La fase de huracán se alcanza cuando los vientos sostenidos máximos sobrepasan los 117 kilómetros por hora, además, la presión central a nivel medio del mar desciende por debajo de los 1000hPa. Los huracanes provocan fuertes vientos, grandes olas, intensas precipitaciones, tornados e inundaciones. El lado derecho del huracán, relativo a la dirección de su desplazamiento, es la parte más peligrosa debido a que a su velocidad se le suma la velocidad de la corriente del viento en la cual está inmerso; además, los tornados son más frecuentes en esta parte del sistema.

En la estructura de un huracán, distinguimos tres zonas: el ojo o vórtice de hasta 100 km de diámetro, con vientos flojos; el anillo de vientos huracanados que puede extenderse hasta más de 200 km del centro y las bandas espirales o de alimentación con vientos de superficie que convergen hacia el centro. Los ascensos más fuertes se producen cerca del vórtice donde se libera gran cantidad de calor latente de condensación.

En el océano Atlántico, la temporada ciclónica empieza el 1 de junio y se prolonga hasta el 30 de noviembre. Las principales zonas de génesis de los huracanes son el Caribe Occidental y el Golfo de México a principio y final de temporada, y entre el arco de las Antillas Menores y las islas de Cabo Verde entre julio y septiembre (Fernández, 2003b).

En cuanto a los episodios de precipitación intensa en el Mediterráneo Occidental, su ocurrencia parece bien correlacionada con la presencia de ciclones extratropicales en toda la profundidad de la troposfera o en capas medias y altas (Depresión Aislada en Niveles Altos), la presencia de un mar cálido que provea abundante humedad, advección en capas bajas de mar hacia tierra, aire frío en altura o distribución de vorticidad potencial que favorezca los ascensos, y factores

de disparo de la convección, fundamentalmente orográficos (Romero et al., 1997; Tuduri y Ramis, 1997). No presentan vientos muy intensos, a diferencia de los huracanes, y las energías en juego tampoco no son comparables.

No existe una temporada bien definida para las precipitaciones intensas, pero se suelen producir en otoño (Romero et al., 1998), aunque también hay episodios en primavera en los que la temperatura del mar es un factor menos relevante (Buzzi et al., 2005). En cualquier caso, parece que hay una buena correlación entre la temperatura superficial del mar y la ocurrencia de tiempo severo (Lebeauupin et al., 2006). La TSM (temperatura superficial del mar) puede considerarse un buen indicador de la disponibilidad de humedad a niveles bajos y de la estabilidad térmica.

En este trabajo estudiaremos la evolución de la TSM para un punto en el Caribe y uno en el Mediterráneo según tres modelos climáticos distintos. En la sección 2 describiremos la metodología utilizada, en las dos siguientes los resultados para ambas áreas y finalmente se darán unas conclusiones preliminares.

2 Metodología

Los modelos climáticos que han participado en los ejercicios de intercomparación del IPCC ponen a disposición de la comunidad científica una selección de sus resultados por el período de control (finales del siglo XX) y por el de pronóstico (siglo XXI). Son valores por cada punto de malla del modelo promediados por meses. Los campos puestos a disposición tienen mallas de resolución horizontal relativamente baja (unos 300 km). Los puntos escogidos han sido (24° N, 90° W) –representativo del Caribe y del Golfo de México– y (40° N, 7° E) para el Mediterráneo Occidental, puesto que los modelos de trabajo ven el punto de malla más cercano a estas coordenadas como puntos de mar. Para los objetivos de este trabajo hemos considerado suficiente utilizar promedios de 30 años, correspondientes a los períodos 1961-1990 (estados de partida de cada modelo que difieren entre sí para los distintos modelos y escenarios debido a condiciones previas de integración diferentes), 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Para el modelo ECHAM no se ha dispuesto de base de datos para el período 1961-1990. Así pues, para cada punto de malla se tiene la temperatura superficial media del mar para cada mes, siendo la media correspondiente a los años de los períodos indicados.

Los modelos escogidos son el CGCM2 (Yukimoto et al., 2001), el ECHAM4 del Max Planck Institute (Roeckner et al., 1996) y el R30 del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) (Delworth et al., 2002). Las salidas escogidas corresponden a los escenarios A2 y B2 del IPCC, basados en hipótesis distintas sobre las futuras evoluciones mundiales de variables demográficas, económicas y tecnológicas. Estas hipótesis repercuten de manera distinta en las emisiones futuras de gases. El escenario A2 corresponde a una evolución con crecimiento sostenido de la población y consumo extensivo de combustibles fósiles, mientras que el B2 asume

²<http://hurricanes.noaa.gov/>

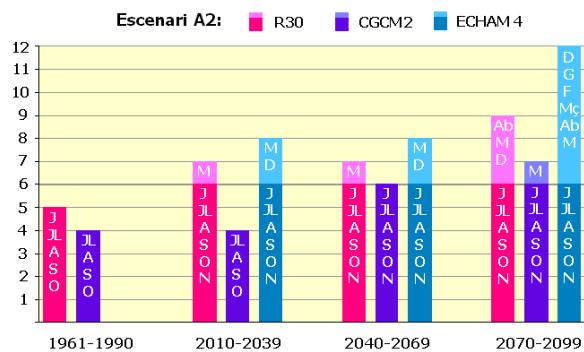


Figura 1. Duración (meses) de las temporadas ciclónicas predichas para los modelos R30, CGCM2 y ECHAM4, para el escenario A2, en función de la temperatura superficial del mar. Se considera temporada ciclónica cuando este parámetro es superior a los 26.7°C. (Enero, G; febrero, F; marzo, Mç; abril, A; mayo, M; junio, J; julio, JL; agosto, A; septiembre, S; octubre, O; noviembre, N; diciembre, D.)

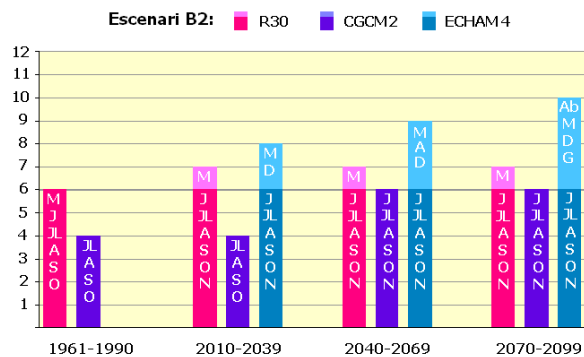


Figura 2. Duración (meses) de las temporadas ciclónicas predichas para los modelos R30, CGCM2 y ECHAM4, para el escenario B2, en función de la temperatura superficial del mar. Se considera temporada ciclónica cuando este parámetro es superior a los 26.7°C. (Enero, G; febrero, F; marzo, Mç; abril, A; mayo, M; junio, J; julio, JL; agosto, A; septiembre, S; octubre, O; noviembre, N; diciembre, D.)

una regulación demográfica a medio plazo y la aparición de nuevas formas de energía de bajo impacto ambiental. Ambos escenarios prevén aumentos globales de temperatura, pero el del escenario B2 es aproximadamente la mitad que el del escenario A2 (Guijarro, 2001).

Con los datos recogidos se ha estudiado la duración de la temporada ciclónica en la cuenca atlántica en base a la temperatura superficial del mar. Cada temporada se ha hecho a partir de esos meses que presentan una temperatura superficial del mar superior a los 26.7°C (80°F en la literatura anglosajona). Hay que tener en cuenta que éste no es el único factor a tener en cuenta en la génesis de ciclones tropicales pero sí que sirve de indicador del alcance de la temporada ciclónica a la vista de la coherencia de los resultados obtenidos.

Para el Mediterráneo, la temperatura superficial del mar es un factor a tener en cuenta en el desarrollo de tiempo adverso en otoño, de manera que también estudiaremos su evolución. Para esta última zona estudiaremos la temperatura media mensual máxima para la superficie del mar. A partir de aquí se pueden estudiar las repercusiones de un posible desplazamiento e intensificación de temperaturas mensuales máximas sobre episodios de ciclogénesis intensa con lluvias abundantes y vientos fuertes que afectan al Mediterráneo.

De los datos obtenidos de temperatura superficial del mar en media mensual para el punto de malla en cuestión, se escogerá de cada uno de los cuatro períodos el mes que presenta mayor temperatura. De este modo, podremos evaluar la evolución de las temperaturas superficiales mensuales máximas. El estudio en esta zona se ha realizado no tanto por su repercusión en la formación de miniciclones con parecidos con los ciclones tropicales, sino por el favorecimiento de tiempo adverso. A la vista de todos los modelos y escenarios podremos estimar la existencia o no de una tendencia en

la evolución de las temperaturas medias mensuales máximas. Esta variante del estudio también se ha realizado con el punto de malla escogido para el Golfo de México.

3 Tendencia para la zona del Caribe y el Golfo de México

Los meses que forman parte de la temporada ciclónica habitual del siglo XX de la cuenca atlántica son: junio (J), julio (JL), agosto (A), septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N). En este estudio, para los distintos períodos y modelos, los meses se han incluido en la temporada ciclónica cuando la temperatura superficial del mar superaba los 26.7°C. Hemos cogido como referencia los seis meses citados, de modo que para cada período se destacan, por encima y por debajo del límite de los 6 meses, esos meses que según el criterio escogido se incorporan o quedan fuera de la temporada. Las figuras 1 y 2 hacen referencia a las temporadas ciclónicas predichas respecto a la temperatura habitual establecida.

Como ya hemos dicho, sólo disponemos de los datos de dos modelos para el período de control (1961-1990). Llama la atención que los resultados difieran para los mismos modelos en este período para los dos escenarios. También que la temporada ciclónica o bien es más corta que la observada para el mismo período, o bien captura mal los seis meses (de mayo a octubre para R30 en el escenario B2). Esto ya nos indica cuán grande es la indeterminación en los resultados de los modelos, debida a múltiples factores (resolución, parametrizaciones no lo suficientemente realistas, forzamientos incompletos ...) y, por lo tanto, que el estudio de las tendencias futuras arrastrará –y seguramente amplificará– estos errores.

Para los dos escenarios y todos los modelos, la temporada ciclónica tiende a alargarse a medida que el siglo XXI avanza. Sin embargo, cada modelo sigue su propia evolución. Para el escenario A2, ECHAM4 extiende la temporada ciclónica un mes por delante (mayo) y uno por detrás (diciembre) para los períodos 2010-2039 y 2040-2069, pero a finales del siglo la temperatura se encuentra durante todo el año por encima del umbral de 26.7°C, cosa que significaría que podría haber huracanes durante todo el año. Los otros modelos no tienen un comportamiento tan extremo, pero también acaban con temporadas más largas que la actual y que sus propias temporadas iniciales. ECHAM4 aumenta 6 meses para A2 y 4 para B2, CGM2 3 meses respecto a su estado de control para A2 y 2 para B2; R30 aumenta 4 para A2 y 1 para B2. Parece claro que, en cualquier caso, la temporada de ciclones se alargará si sólo consideramos este parámetro, y que el alargamiento será muy importante en el caso de que se cumpla el escenario A2 (aumento continuo de la población y uso mayoritario de combustibles fósiles). En cambio, la corrección de ambas tendencias (caso B2) mitigará este aumento de duración, pero no lo evitará.

La figura 3 muestra el mes en que se produce la temperatura máxima del agua del mar y su valor. Hay que destacar las importantes diferencias entre los dos modelos que tienen datos para el período de control. R30 tiene el agua más cálida en agosto con cerca de 30°C mientras que CGM2 la tiene en septiembre con cerca de 28°C, 2°C de diferencia, para los dos escenarios. R30 mantiene como mes cálido agosto, con un incremento de 1.5°C entre 2020 y 2080, ECHAM4 tiene septiembre con 2°C de incremento y temperaturas similares a las R30, y CGM2 oscila entre agosto y septiembre con un aumento ligeramente superior al de los otros modelos, pero con temperaturas menores.

Por lo tanto, parece que no hay ningún desplazamiento significativo del máximo de temperatura para ninguno de los modelos, que estiman unos incrementos de temperatura importantes, de entre 1.8°C y 2.4°C. Esto implica que, no sólo la temporada de huracanes se alargaría, sino que el agua estaría bastante más caliente y la energía acumulada disponible para la generación de huracanes sería superior.

4 Tendencias para el Mediterráneo Occidental

Para el Mediterráneo no hemos estudiado ningún período concreto porque no tenemos conocimiento de que haya ninguno bien determinado ni un valor umbral claro para decidir cuando el mar es lo bastante caliente para favorecer el desarrollo de tiempo severo. Recordemos que un mar cálido es un factor más para la existencia de tiempo severo, que necesitará normalmente un forzamiento dinámico, a menudo de origen sinóptico. Ahora bien, cuanto más cálido, más humedad disponible, más calor latente que se liberará en el proceso de convección, tormentas más intensas y precipitaciones más abundantes.

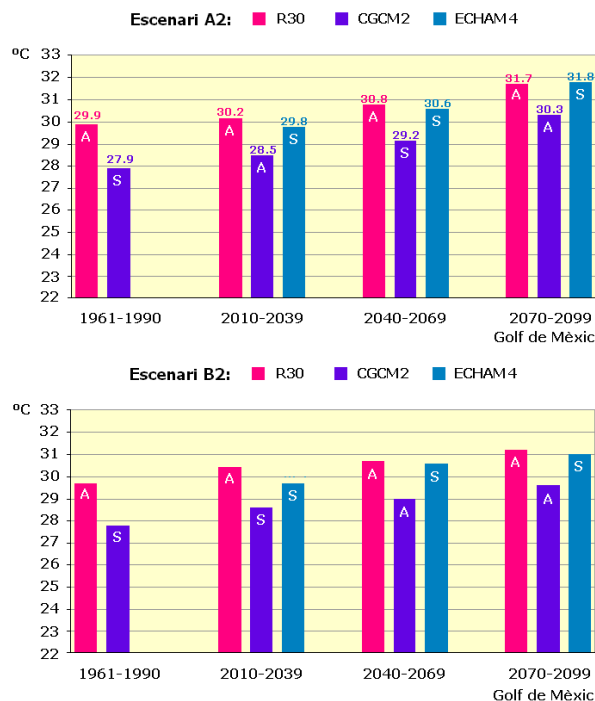


Figura 3. Temperaturas superficiales máximas del mar para los modelos R30, CGCM2 y ECHAM4, para el Golfo de México. El valor numérico sobre cada columna indica el valor exacto mientras que la letra que la acompaña corresponde al mes en que han tenido lugar. (Enero, G; febrero, F; marzo, Mç; abril, A; mayo, M; junio, J; julio, JL; agosto, A; septiembre, S; octubre, O; noviembre, N; diciembre, D.)

La figura 4 muestra, para cada modelo, período y escenario, el mes que tiene el agua más cálida y su valor. En este caso, los dos modelos que ofrecen datos en el período de control tienen condiciones prácticamente idénticas para los dos escenarios, aunque uno sitúa el máximo en agosto con 25°C y el otro en septiembre con 23.5°C. Cada modelo mantiene el máximo en el mismo mes, independientemente del escenario y del período (agosto para R30 y ECHAM4, septiembre para CGCM2).

El hecho más relevante para este área es que los incrementos de temperatura son notablemente superiores a los que se dan para el Caribe. ECHAM4 sigue siendo el modelo con tendencias más extremas y da aumentos de 3.3°C para A2 y 2.5°C para B2 entre 2020 y 2080, con valores finales de 29.8°C y 28.6°C respectivamente, similares a los máximos actuales del Caribe. Los otros modelos estiman incrementos superiores a los 3°C para A2 y a los 2°C para B2, con valores entre 25.7°C y 27.6°C según el modelo y el escenario.

Por lo tanto, el Mediterráneo Occidental experimentaría un incremento de temperatura superior al de Caribe y llegaría a valores similares los actuales de esa zona. No se han consultado datos complementarios, pero este panorama sería compatible con una disminución de la circulación de latitudes medias para esta zona, con menor nubosidad y pre-

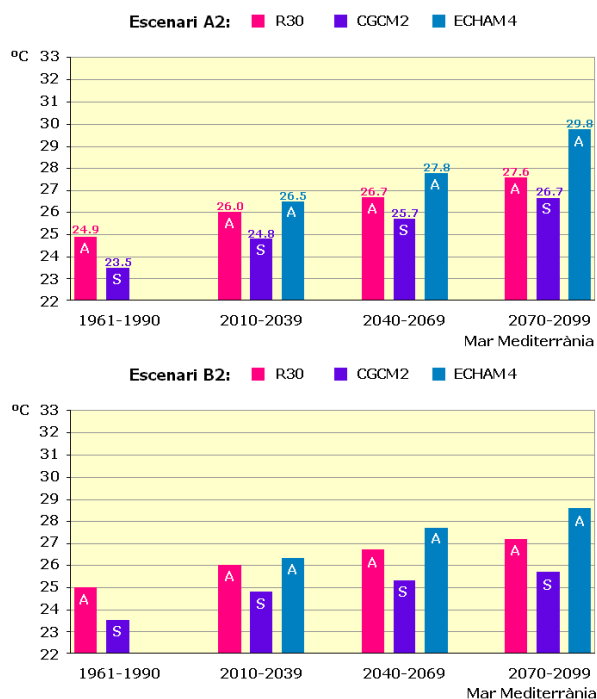


Figura 4. Temperaturas superficiales máximas del mar para los modelos R30, CGCM2, ECHAM4, para el Mar Mediterráneo. El valor numérico sobre cada columna indica el valor exacto mientras que la letra que lo acompaña corresponde al mes en que han tenido lugar. (Enero, G; febrero, F; marzo, M; abril, A; mayo, M; junio, J; julio, JL; agosto, A; septiembre, S; octubre, O; noviembre, N; diciembre, D.)

cipitación y mayor insolación durante el año, conduciendo a tormentas más altas a finales de verano que pueden favorecer la aparición de tiempo severo cuando se den las condiciones favorables, probablemente con precipitaciones más intensas.

5 Conclusiones

Los modelos globales estudiados, con sus conocidas limitaciones (baja resolución horizontal y vertical, parametrizaciones excesivamente simplificadas, forzamientos incompletos), dan tendencias consistentes entre ellos para dos puntos seleccionados, representativos de la zona del Caribe y del Mediterráneo Occidental.

La temperatura de la superficie del mar aumentará del orden de 1.5°C en el Caribe. El umbral de 26.7°C necesario para la formación de huracanes se superará en más meses que en la actualidad, alargando la temporada de ciclones entre 1 y 6 meses según el modelo y el escenario. Seis meses significa que todo el año sería temporada de ciclones. Además, el agua más caliente significa más disponibilidad de vapor y energía para alimentar ciclones, que probablemente aumentarían su fuerza.

En el Mediterráneo el aumento esperado se sitúa alrededor de los 2.5°C, muy superior al de Caribe, y con temperaturas similares a las del Caribe hoy en día. De hecho, para el escenario A2, todos los modelos predicen temperaturas por encima del umbral de los huracanes (26.7°C), mientras que para el B2 dos modelos también lo superan. Esto muestra la gran disponibilidad posible de humedad y energía en caso de condiciones favorables al desarrollo de sistemas convectivos en esta zona. Falta explorar con más detalle si la circulación general experimentaría cambios que explicaran estas variaciones tan grandes.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido realizado en el marco de la asignatura de Física del Clima del curso 2005-06 de la Licenciatura de Física de la Universitat de les Illes Balears. Agradecemos la ayuda de Elisa Tudurí y del alumnado de la asignatura. También destacamos Víctor Homar y Romualdo Romero del Departamento de Física por sus valiosos comentarios.

Referencias

- Buzzi, A., Richard, E., y Romero, R., 2005: *Summary report on MEDEX studies and scientific results on Mediterranean cyclones causing high impact weather*, www.medex.inm.uib.es.
- Delworth, T. L., Stouffer, R. J., Dixon, K. W., Spelman, M. J., Knutson, T. R., Broccoli, A. J., Kushner, P. J., y Wetherald, R. T., 2002: *Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model*, *Clim. Dynam.*, **19**, 555-574.
- Fernández, A. J., 2003a: *Los ciclones tropicales y su predicción. Vigencia de las leyes del Padre Benet Viñ es. A: J. Arús et al (ed.). IX Jornades de Meteorologia. Eduard Fontserè, Associació Catalana de Meteorologia.*
- Fernández, A. J., 2003b: *Rasgos climatológicos de los huracanes del Atlántico Norte. Particularidades de la actividad ciclónica tropical en Cuba. A: J. Arús et al (ed.). IX Jornades de Meteorologia. Eduard Fontserè, Associació Catalana de Meteorologia.*
- Gayà, M., 2005: *Tornados en España (1987-2005): distribución temporal y espacial*, *Revista de Climatología* (<http://webs.ono.com/reclim/>), pp. 9-17.
- Guijarro, J. A., 2001: *Resumen del tercer informe científico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. A: G. X. Pons and J. A. Gujarro (ed.). El canvi climàtic: passat, present i futur*, Monografies de la Societat d'Història Natural de les Illes Balears, **9**.
- Lebeaupin, C., Ducrocq, V., y Giordani, H., 2006: *Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts*, *J. Geophys. Res.*, **111**.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., y Schulzweida, U., 1996: *The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate*, *Max Planck Institut für Meteorologie*, **218**.
- Romero, R., Ramis, C., y Alonso, S., 1997: *Numerical simulation of a extreme rainfall event in Catalonia: role of orography and evaporation from the sea*, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 537-559.
- Romero, R., Guijarro, J. A., Ramis, C., y Alonso, S., 1998: *A 30 year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish*

Mediterranean regions: First exploratory study, Int. J. Climatol., **18**, 541–560.

Tuduri, E. y Ramis, C., 1997: *The environments of significant convective events in the western Mediterranean*, Weather Forecast., **12**, 294–306.

Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Sugi, M., Kitamura, Y., Hosaka, M., Shibata, K., Maeda, S., y Uchiyama, T., 2001: *The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) - Model Climate and Variability -*, Pap. Meteorol. Geophys., **51**, 47–88.