Tethys, 3, 21–25, 2006
www.tethys.cat
ISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2006.3.03

Revista editada per **ACAM**
(Associació Catalana de Meteorologia)

Tendències futures de la temperatura superficial del mar al Carib i la Mediterrània Occidental

L. Garcies i J. Cuxart

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

Rebut: 18-X-2006 – Acceptat: 9-XI-2006 – **Versió Original**

Correspondència a: lorenagarcies@gmail.com

Resum

Els models climàtics globals prediuen un escalfament generalitzat de l'atmosfera, de diferent intensitat segons les característiques de cada model i les hipòtesis d'emissió de gasos d'origen antròpic. Aquest escalfament no es distribueix de forma homogènia al planeta. En aquest estudi es compara l'evolució prevista de la temperatura superficial del mar Carib i el mar Mediterrani, i es relaciona amb el possible allargament de la temporada d'huracans i la major força dels mateixos pel Carib i amb l'afavoriment de temps sever en la Mediterrània. En ambdós casos és d'esperar un augment de la freqüència i la intensitat d'episodis de temps sever degut a l'augment previst de la temperatura superficial del mar en 1.5°C i 2.5°C per al mar Carib i mar Mediterrani respectivament.

1 Introducció

Els episodis de temps sever tenen un gran impacte sobre les persones, els seus béns i el seu entorn. Les precipitacions intenses sovint combinades amb vents forts causen inundacions i destrucció d'edificis i zones de cultiu. Poden anar associades a la formació de sistemes convectius mesoscalars en latituds mitjanes o a la formació de ciclons o huracans a les zones tropicals. Les zones on aquests fenòmens tenen lloc estan adaptades a la seva existència, d'acord amb la seva freqüència d'ocurrència i intensitat del fenomen, i prenen les mesures de precaució necessàries segons la informació climatològica disponible. Els danys esperables estan indexats, per exemple, per les companyies d'assegurances o en les especificacions tècniques de construcció de vivendes i grans infraestructures.

L'escalfament global que es preveu per el segle XXI i que ja sembla detectar-se en un bon nombre de mesures (Gayà, 2005) significa que hi ha més energia disponible en el sistema climàtic. Els canvis poden afectar la distribució de temperatures en el planeta, especialment si es produeix un desglaç important en latituds altes. Els gradients de temperatura entre pols i tròpics poden disminuir i resultar en un canvi dels patrons de transport de calor entre ambdues zones, tant atmosfèrics com oceànics.

Les conclusions de l'IPCC[1] apunten que, amb l'augment de la temperatura, hi haurà més vapor d'aigua a l'atmosfera i un augment global de precipitació, tot i que a latituds mitjanes i baixes poden haver-hi zones que experimentin menys precipitació, especialment aquelles que se situïn de bell nou a les branques descendents de les cèl·lules de Hadley. També s'espera que la variabilitat interanual augmenti i que hi hagi més episodis extrems de precipitació tant a latituds baixes com mitjanes.

En aquest treball es provarà d'estimar mitjançant un estudi simple de l'evolució prevista de la temperatura superficial del mar com pot augmentar la freqüència de temps sever durant aquest segle. La hipòtesi de treball és molt simple, potser fins i tot simplista: si augmenta la temperatura superficial del mar al Carib i a la Mediterrània, hi ha més energia disponible per alimentar episodis de temps sever, siguin huracans o sistemes convectius mesoscalars. Evidentment, no es contemplen altres factors, com la dinàmica necessària per convertir aquesta energia disponible en una estructura ciclònica complexa. És a dir, si hi ha energia acumulada a la part superficial del mar, però no es donen els factors pertorbadors necessaris per donar lloc a la ciclogènesi, no es donaran els episodis de temps sever. En definitiva, si els canvis climàtics afecten la dinàmica at-

[1] http://www.ipcc.ch

2006 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

mosfèrica les conclusions que es puguin extrapolar d'aquest estudi poden ser qüestionades.

Ens centrarem en dues àrees d'especial interès: les afectades pels huracans[2], que exemplificarem amb el cas del mar del Carib, i la Mediterrània Occidental, una àrea que sembla que pot experimentar un descens de precipitació significatiu segons el models climàtics.

Els ciclons tropicals són sistemes que es caracteritzen per presentar un centre de baixes pressions, de nucli calent, al voltant del qual els vents giren en sentit ciclònic. S'originen per l'amplificació d'una pertorbació en la zona tropical d'aigües càlides (el valor llindar és de 26.7°C o 80°F) aprofitant la gran quantitat d'energia disponible i arribant a generar un cicló. Per a la formació completa de l'estructura, cal que hi hagi humitat disponible en tota la troposfera, que la zona marítima amb temperatura per sobre del llindar sigui extensa, que els vents no presentin cisalles fortes en la vertical i que hi hagi divergència en capes altes (Fernández, 2003a).

Les fases prèvies a la d'huracà són la d'ona tropical, depressió tropical i tempesta tropical en ordre d'intensitat determinada per la velocitat del vent. La fase d'huracà s'assoleix quan els vents sostinguts màxims sobrepassen els 117 quilòmetres per hora, a més a més, la pressió central a nivell mitjà del mar davalla per sota els 1000 hPa. Els huracans provoquen forts vents, grans onades, intenses precipitacions, tornados i inundacions. El costat dret de l'huracà, relatiu a la direcció del seu desplaçament, és la part més perillosa degut a que a la seva velocitat se li suma la velocitat de la corrent de vent en la qual està immers; a més a més, els tornados són més freqüents en aquesta part del sistema.

En l'estructura d'un huracà hi distingim tres zones: l'ull o vòrtex de fins a 100 km de diàmetre, amb vents fluixos; l'anell de vents huracanats que es pot estendre fins a més de 200 km del centre i les bandes espirals o d'alimentació amb vents en superfície que convergeixen cap al centre. Els ascensos més forts es produeixen prop del vòrtex on s'allibera gran quantitat de calor latent de condensació.

A l'oceà Atlàntic la temporada ciclònica comença l'1 de juny i es prolonga fins el 30 de novembre. Les zones de gènesi principals dels huracans són el Carib Occidental i el Golf de Mèxic a principi i final de temporada, i entre l'arc de les Antilles Menors i les illes de Cap Verd entre juliol i setembre (Fernández, 2003b).

Pel que fa als episodis de precipitació intensa a la Mediterrània Occidental, la seva ocurrència sembla ben correlacionada amb la presència de ciclons extratropicals en tota la profunditat de la troposfera o en capes mitjanes i altes (Depressiò Aïllada en Nivells Alts), la presència d'un mar càlid que proveeixi abundant humitat, advecció en capes baixes de mar cap a terra, aire fred en altura o distribució de vorticitat potencial que afavoreixi els ascensos, i factors de dispar de la convecció, fonamentalment orogràfics (Romero et al., 1997; Tuduri i Ramis, 1997). No presenten vents molt intensos, a diferència dels huracans, i les energies en joc tampoc no són comparables.

No existeix una temporada ben definida per a les precipitacions intenses, però se solen donar a la tardor (Romero et al., 1998), tot i que també hi ha episodis en primavera on la temperatura del mar és un factor menys rellevant (Buzzi et al., 2005). En qualsevol cas, sembla haver-hi una bona correlació entre la temperatura superficial del mar i l'ocurrència de temps sever (Lebeaupin et al., 2006). La TSM (temperatura superficial del mar) pot considerar-se un bon indicador de la disponibilitat d'humitat a nivells baixos i de la seva estabilitat tèrmica.

En aquest treball s'estudiarà l'evolució de la TSM per un punt al Carib i un a la Mediterrània segons tres models climàtics diferents. A la secció 2 es descriurà la metodologia emprada, a les dues següents els resultats per ambdues àrees i finalment es donaran unes conclusions preliminars.

2 Metodologia

Els models climàtics que han participat als exercicis d'intercomparació de l'IPCC posen a disposició de la comunitat científica una selecció dels seus resultats pel període de control (finals del segle XX) i pel de pronòstic (segle XXI). Són valors per cada punt de malla del model promitjats per mesos. Els camps posats a disposició tenen malles de resolució horitzontal relativament baixa (uns 300 km). Els punts triats han estat (24° N, 90° W) -representatiu del Carib i el Golf de Mèxic- i (40° N, 7° E) per a la Mediterrània Occidental, car els models de treball veuen el punt de malla més proper a aquestes coordenades com a punts de mar. Per als objectius d'aquest treball s'ha considerat suficient utilitzar promitjos de 30 anys, corresponents als períodes 1961-1990 (estats de partida de cada model que difereixen entre sí per als distints models i escenaris degut a condicions prèvies d'integració diferents), 2010-2039, 2040-2069 i 2070-2099. Per al model ECHAM no s'ha disposat de base de dades per al període 1961-1990. Així doncs, per a cada punt de malla hom té la temperatura superficial del mar mitjana per a cada mes, sent la mitjana corresponent als anys dels períodes indicats.

Els models triats són el CGCM2 (Yukimoto et al., 2001), l'ECHAM4 del Max Planck Institute (Roeckner et al., 1996) i el R30 del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) (Delworth et al., 2002). Les sortides escollides corresponen als escenaris A2 i B2 de l'IPCC, basats en hipòtesis diferents sobre les futures evolucions mundials de variables demogràfiques, econòmiques i tecnològiques. Aquestes hipòtesis repercuteixen de manera distinta en les emissions futures de gasos. L'escenari A2 correspon a una evolució amb creixement sostingut de la població i consum extensiu de combustibles fòssils, mentre que el B2 assumeix una regulació demogràfica a mig termini i l'aparició de noves formes d'energia de baix impacte ambiental. Tots dos

[2] http://hurricanes.noaa.gov/

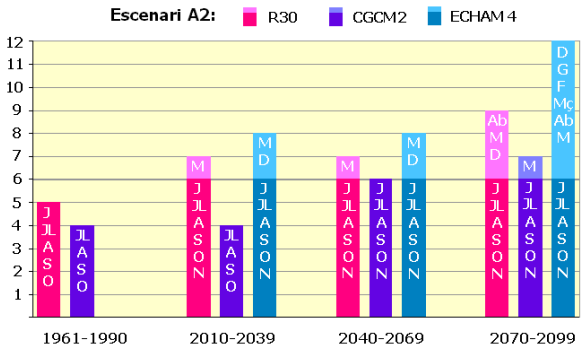

Figura 1. Duració (mesos) de les temporades ciclòniques predites per als models R30, CGCM2 i ECHAM4, per l'escenari A2, en funció de la temperatura superficial del mar. Es considera temporada ciclònica quan aquest paràmetre és superior als 26.7°C. (Gener, G; febrer, F; març, Mç; abril, A; maig, M; juny, J; juliol, JL; agost, A; setembre, S; octubre, O; novembre, N; desembre, D.)

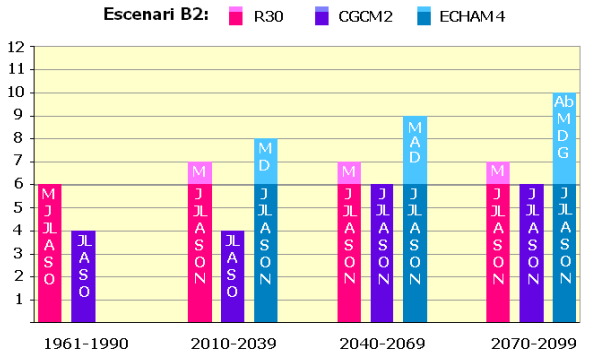

Figura 2. Duració (mesos) de les temporades ciclòniques predites per als models R30, CGCM2 i ECHAM4, per l'escenari B2, en funció de la temperatura superficial del mar. Es considera temporada ciclònica quan aquest paràmetre és superior als 26.7°C. (Gener, G; febrer, F; març, Mç; abril, A; maig, M; juny, J; juliol, JL; agost, A; setembre, S; octubre, O; novembre, N; desembre, D.)

escenaris preveuen augments globals de temperatura, però el de l'escenari B2 és aproximadament la meitat que el de l'escenari A2 (Guijarro, 2001).

Amb les dades recollides s'ha estudiat la durada de la temporada ciclònica en la conca atlàntica en base a la temperatura superficial del mar. Cada temporada s'ha fet a partir d'aquells mesos que presenten una temperatura superficial del mar superior als 26.7°C (80°F en la literatura anglosaxona). Cal tenir present que aquest no és l'únic factor que s'ha de tenir en compte en a la gènesi de ciclons tropicals però sí que serveix d'indicador de l'abast de la temporada ciclònica a la vista de la coherència dels resultats obtinguts.

Per a la Mediterrània, la temperatura superficial del mar és un factor a tenir en compte en el desenvolupament de temps advers a la tardor, de manera que també se n'estudiarà l'evolució. Per a aquesta darrera zona s'estudiarà la temperatura mitjana mensual màxima per a la superfície de la mar. A partir d'aquí es poden estudiar les repercussions d'un possible desplaçament i intensificació de temperatures mensuals màximes sobre episodis de ciclogènesi intensa amb pluges abundants i vents forts que afecten a la Mediterrània.

De les dades obtingudes de temperatura superficial del mar en mitjana mensual per al punt de malla en qüestió, s'escollirà de cada un dels quatre períodes el mes que presenta major temperatura. D'aquesta manera es podrà avaluar l'evolució de les temperatures superficials mensuals màximes. L'estudi en aquesta zona s'ha realitzat no tant per la seva repercussió en la formació de miniciclons amb semblances amb els ciclons tropicals, sinó per l'afavoriment de temps advers. A la vista de tots els models i escenaris es podrà estimar l'existència o no d'una tendència en l'evolució de les temperatures mitjanes mensuals màximes. Aquesta variant de l'estudi també s'ha realitzat amb el punt de malla escollit per al golf de Mèxic.

3 Tendència per la zona del Carib i el Golf de Mèxic

Els mesos que formen part de la temporada ciclònica habitual del segle XX de la conca atlàntica són: juny (J), juliol (JL), agost (A), setembre (S), octubre (O) i novembre (N). En aquest estudi, per als diferents períodes i models, els mesos s'han inclòs en la temporada ciclònica quan la temperatura superficial del mar superava els 26.7°C. S'han agafat de referència els sis mesos citats, de manera que per a cada període es destaquen, per sobre i per sota del límit dels 6 mesos, aquells mesos que segons el criteri escollit s'incorporen o queden fora de la temporada. Les figures 1 i 2 referencien les temporades ciclòniques predites respecte a la temporada habitual establerta.

Com ja s'ha dit, només disposem de les dades de dos models pel període de control (1961-1990). Crida l'atenció que els resultats difereixen pels mateixos models en aquest període pels dos escenaris. També que la temporada ciclònica bé és més curta que l' observada pel mateix període, o bé captura malament els sis mesos (de maig a octubre per R30 en l'escenari B2). Això ja ens indica com de gran és la indeterminació en els resultats dels models, deguda a múltiples factors (resolució, parametritzacions no prou realistes, forçaments incomplets ...) i, per tant, que l'estudi de les tendències futures arrossegarà -i segurament amplificarà- aquests errors.

Per tots dos escenaris i tots els models, la temporada ciclònica tendeix a allargar-se a mesura que el segle XXI avança. Tanmateix cada model segueix la seva pròpia evolució. Per l'escenari A2, ECHAM4 estén la temporada ciclònica un mes per davant (maig) i un per darrera (desembre) pels períodes 2010-2039 i 2040-2069, però al final del

segle tot l'any la temperatura es troba per sobre del llindar de 26.7°C, el que significaria que podrien haver-hi huracans durant tot l'any. Els altres models no tenen un comportament tan extrem, però també acaben amb temporades més llargues que l'actual i que les seves pròpies temporades inicials. ECHAM4 augmenta 6 mesos per A2 i 4 per B2, CGM2 3 mesos respecte el seu estat de control per A2 i 2 per B2; R30 n'augmenta 4 per A2 i 1 per B2. Sembla clar que, en qualsevol cas la temporada de ciclons s'allargarà si només considerem aquest paràmetre, i que l'allargament serà molt important en el cas de que es compleixi l'escenari A2 (augment continuat de la població i ús majoritari de combustibles fòssils). En canvi, la correcció d'ambdues tendències (cas B2) mitigarà aquest augment de durada, però no l'evitarà.

La figura 3 mostra el mes en el que es produeix la temperatura màxima de l'aigua del mar i el seu valor. Destacar les importants diferències entre els dos models que tenen dades pel període de control. R30 té l'aigua més càlida a l'agost amb vora 30°C mentre que CGM2 la té el setembre amb vora 28°C, 2°C de diferència, per tots dos escenaris. R30 manté com a mes més càlid agost, amb un increment d'1.5°C entre 2020 i 2080, ECHAM4 té setembre amb 2°C d'increment i temperatures similars a les R30, i CGM2 oscil·la entre agost i setembre amb un augment lleugerament superior al dels altres models, però amb temperatures menors.

Per tant, sembla que no hi ha cap desplaçament significatiu del màxim de temperatura per cap dels models, que estimen uns increments de temperatura importants, d'entre 1.8 i 2.4°C. Això implica que, no només la temporada d'huracans s'allargaria, si no que l'aigua estaria força més calenta i l'energia acumulada disponible per a la generació d'huracans seria superior.

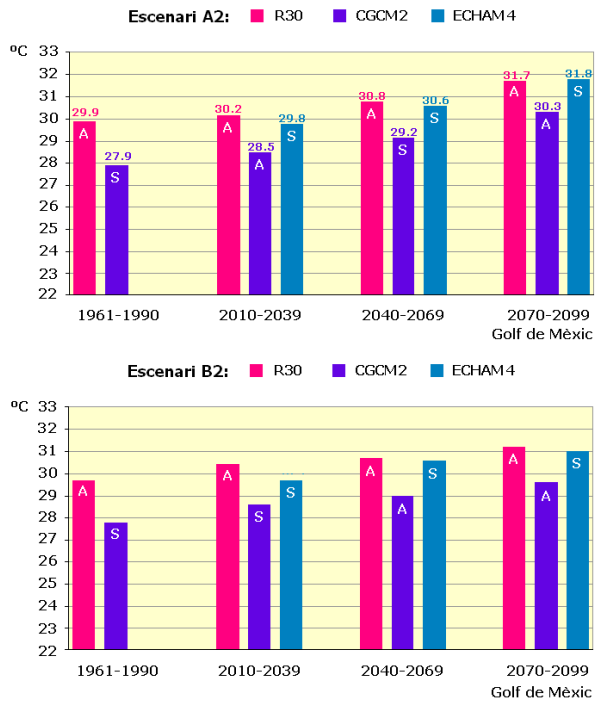

Figura 3. Temperatures superficials màximes del mar per als models R30, CGCM2 i ECHAM4, per al golf de Mèxic. El valor numèric sobre cada columna indica el valor exacte mentre que la lletra que l'acompanya correspon al mes en què han tingut lloc. (Gener, G; febrer, F; març, Mç; abril, A; maig, M; juny, J; juliol, JL; agost, A; setembre, S; octubre, O; novembre, N; desembre, D.)

4 Tendències per a la Mediterrània Occidental

Per a la Mediterrània no hem estudiat cap període concret car no tenim coneixement de que n'hi hagi cap de ben determinat ni un valor llindar clar per decidir quan el mar és prou calent per afavorir el desenvolupament de temps sever. Recordem que un mar càlid és un factor més per l'existència de temps sever, que necessitarà normalment d'un forçament dinàmic, sovint d'origen sinòptic. Ara bé, quan més càlid, més humitat disponible, més calor latent que s'alliberarà en el procés de convecció, tempestes més intenses i precipitacions més abundants.

La figura 4 mostra, per a cada model, període i escenari, el mes que té l'aigua més càlida i el seu valor. En aquest cas els dos models que ofereixen dades en el període de control tenen condicions pràcticament idèntiques pels dos escenaris, tot i que un situa el màxim a l'agost amb 25°C i l'altre al setembre amb 23.5°C. Cada model manté el màxim en el mateix mes, independentment de l'escenari i el període (agost per R30 i ECHAM4, setembre per CGCM2).

El fet més rellevant per aquesta àrea és que els increments de temperatura són notablement superiors als que es donen pel Carib. ECHAM 4 segueix sent el model amb tendències més extremes i dóna augments de 3.3°C per A2 i 2.5°C per B2 entre 2020 i 2080, amb valors finals de 29.8°C i 28.6°C respectivament, similars als màxims actuals del Carib. Els altres models estimen increments superiors als 3°C per A2 i als 2°C per B2, amb valors entre 25.7°C i 27.6°C segons el model i l'escenari.

Per tant, la Mediterrània Occidental experimentaria un increment de temperatura superior al del Carib i arribaria a valors similars als actuals d'aquella zona. No s'han consultat dades complementaris, però aquest panorama seria compatible amb una disminució de la circulació de latituds mitjanes per aquesta zona, amb menor nuvolositat i precipitació i major insolació durant l'any, conduint a temperatures més altes a finals de l'estiu que poden afavorir l'aparició de temps sever quan es donin les condicions favorables, probablement amb precipitacions més intenses.

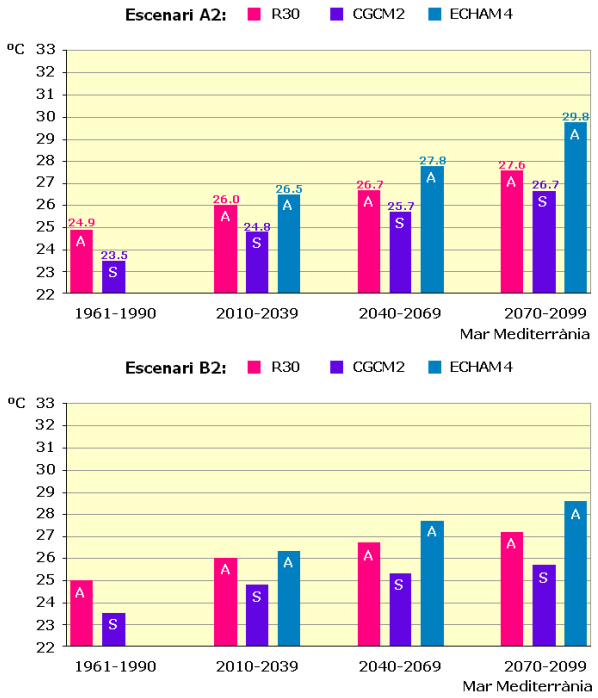

Figura 4. Temperatures superficials màximes del mar per als models R30, CGCM2 i ECHAM4, per a la Mar Mediterrània. El valor numèric sobre cada columna indica el valor exacte mentre que la lletra que l'acompanya correspon al mes en què han tingut lloc. (Gener, G; febrer, F; març, Mç; abril, A; maig, M; juny, J; juliol, JL; agost, A; setembre, S; octubre, O; novembre, N; desembre, D.)

5 Conclusions

Els models globals estudiats, amb les seves conegudes limitacions (baixa resolució horitzontal i vertical, parametritzacions excessivament simplificades, forçaments incomplets), donen tendències consistents entre ells per dos punts seleccionats, representatius de la zona del Carib i de la Mediterrània Occidental.

La temperatura de la superfície del mar augmentarà de l'ordre de 1.5°C al Carib. El llindar de 26.7°C necessari per a la formació d'huracans, se superarà en més mesos que en l'actualitat, allargant la temporada de ciclons entre 1 i 6 mesos segons el model i l'escenari. Sis mesos significa que tot l'any seria temporada de ciclons. A més, l'aigua més calenta significa més disponibilitat de vapor i energia per alimentar els ciclons, que probablement augmentarien la seva força.

A la Mediterrània l'augment esperat se situa al voltant dels 2.5°C, molt superior al del Carib, i amb temperatures similars a les del Carib avui en dia. De fet, per l'escenari A2 tots els models prediuen temperatures per sobre del llindar dels huracans (26.7°C), mentre que pel B2 dos models també el superen. Això mostra la gran disponibilitat possible d'humitat i energia en cas de condicions favorables al desenvolupament de sistemes convectius en aquesta zona. Manca explorar amb més detall si la circulació general experimentaria canvis que expliquessin aquestes variacions tan grans.

Agraïments. Aquest treball ha estat realitzat en el marc de l'assignatura de Física del Clima del curs 2005-06 de la Llicenciatura de Física de la Universitat de les Illes Balears. Agraïm l'ajuda d'Elisa Tudurí i de l'alumnat de l'assignatura. També destaquem Víctor Homar i Romualdo Romero del Departament de Física pels seus valuosos comentaris.

Referències

Buzzi, A., Richard, E., i 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., i 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 Climatologia (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., i 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., i Schulzweida, U., 1996: *The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate*, Max Planck Institut fü r Meteorologie, **218**.

Romero, R., Ramis, C., i 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., i 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. i 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., i Uchiyama, T., 2001: *The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) - Model Climate and Variability* -, Pap. Meteorol. Geophys., **51**, 47–88.