

Huracans i Medicans: Resposta a l'Escalfament Global

R. Romero

Professor Titular del Grup de Meteorologia, Departament de Física,
Universitat de les Illes Balears, 07122 Palma de Mallorca
email: Romu.Romero@uib.es

Resumen

Sobre el Mar Mediterráneo se generan ocasionalmente tempestades ciclónicas cuya estructura nubosa se asemeja a la de los huracanes. Se les ha denominado ciclones cuasitropicales, miniciclones y, más recientemente, medicanes. Aún siendo un fenómeno poco habitual y de reducido tamaño e intensidad moderada, algunas islas y zonas costeras se han visto afectadas por los fuertes chubascos e intensos vientos que rodean al ojo central. El calentamiento superficial de las masas oceánicas registrado durante las últimas décadas y su más que probable amplificación a lo largo de este siglo han sacado a relucir los posibles efectos del cambio climático sobre la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales y, por extensión, de otros sistemas con un comportamiento físico similar como los medicanes. La presente ponencia tiene por objeto plantear los cambios observados y las tendencias futuras en el comportamiento de huracanes y medicanes en respuesta al calentamiento global, destacándose las incertidumbres del problema.

Introducción

Por el pequeño tamaño de los medicanes, y al evolucionar casi siempre sobre mar abierto donde la densidad de observaciones meteorológicas es muy baja, no existen registros sistemáticos de este tipo de eventos. No obstante, los satélites meteorológicos han permitido identificar distintos casos con gran claridad durante las últimas décadas (p.e. Ernst y Matson 1983; Reale y Atlas 2001; Jansà 2003): con un diámetro de varias decenas de kilómetros, presentan una estructura axisimétrica, bandas nubosas de gran desarrollo vertical enroscándose en torno a su centro e incluso la presencia de un ojo central (ver ejemplos en la Fig. 1). Se puede afirmar que cada año se producen varios ciclones de estas características a lo largo y ancho del Mediterráneo, preferentemente en la estación otoñal. Algunos han afectado a las islas mediterráneas, como es el caso de Mallorca, notándose sus efectos en forma de vientos muy intensos, fuertes chubascos y cambios de presión muy rápidos y pronunciados. Obviamente, son tempestades potencialmente peligrosas para la sociedad y el territorio por el carácter destructivo que puede alcanzar el viento.

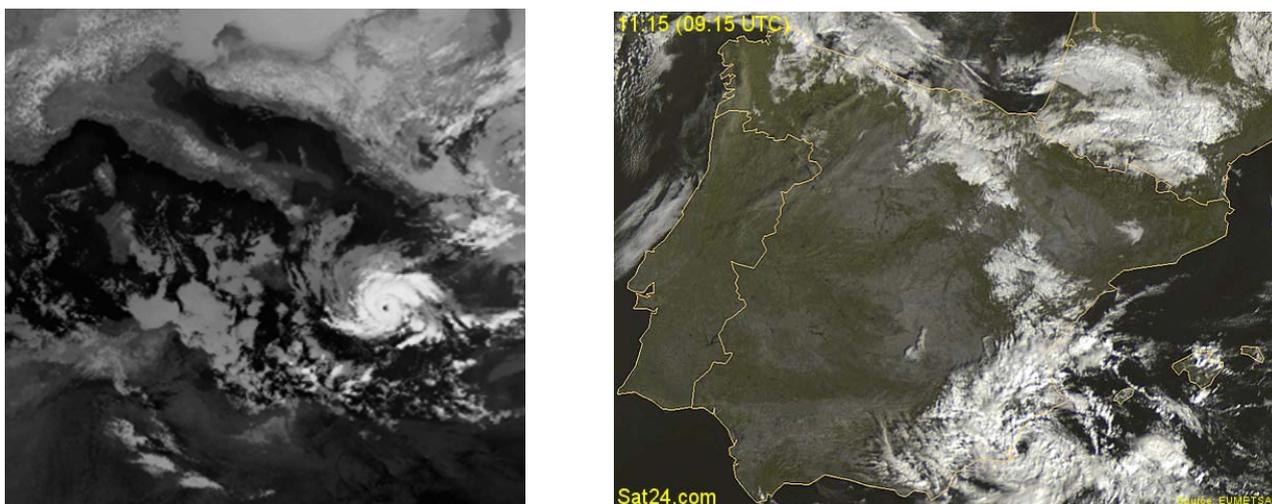


Figura 1. (a) Medicán del 16 de enero de 1995, situado al este de Sicilia;
 (b) Medicán del 18 de octubre de 2007, frente a las costas murcianas.

Simulaciones numéricas de casos reales han permitido confirmar que estos sistemas meteorológicos se sustentan en el desequilibrio termodinámico entre mar y atmósfera (Homar et al. 2003 ; Fita et al. 2007), facilitado por la irrupción de masas de aire frío desde latitudes superiores sobre las aguas relativamente cálidas del Mediterráneo (Emanuel 2005a). Es decir, su fuente de energía radica en la liberación de grandes cantidades de calor latente en la atmósfera cuando el vapor de agua procedente del Mediterráneo se ve forzado a ascender y condensar de un modo vigoroso por la inestabilidad existente. Dicho mecanismo físico, junto al aspecto característico que adoptan los medicanes en las imágenes de satélite, son los aspectos que les asemejan a los tan conocidos –y mucho más destructivos– ciclones tropicales o huracanes.

Bajo este punto de vista, los instrumentos que se han diseñado para evaluar el riesgo de huracanes sobre los océanos tropicales serían también aplicables para el problema análogo del Mediterráneo (Romero y Emanuel 2006). En particular, la denominada teoría de interacción aire-mar (Emanuel 2003) predice correctamente la velocidad máxima del viento –o mínima presión central– alcanzable por los ciclones tropicales, siendo dicha velocidad mayor cuanto más caliente se encuentra la superficie del océano. Por otra parte, se ha formulado un índice empírico que permite describir satisfactoriamente la probabilidad de génesis de ciclones tropicales observada. Este índice se basa en la temperatura del mar pero también en otros ingredientes necesarios para la formación de huracanes: la existencia de una perturbación previa, un alto contenido de humedad en la columna atmosférica y un cambio débil del viento en la vertical.

De especial relevancia en la actualidad es el efecto que puede acarrear el cambio climático sobre la incidencia de ciclones tropicales y medicanes. Aunque la frecuencia anual de los primeros no ha aumentado significativamente, sí se ha podido ya detectar una mayor proporción de ciclones intensos y de larga duración –lo que repercute en un mayor potencial destructivo– como consecuencia del aumento de temperatura experimentado por los océanos tropicales (Webster et al. 2005, Emanuel 2005b). Se espera que esta tendencia continúe durante este siglo en respuesta al imparable calentamiento de los océanos (p.e. Knutson y Toleya 2004), mientras experiencias recientes como el huracán Katrina –aún sin poder ser directamente achacables al cambio climático– ayudan a entender la magnitud del problema. Para el Mediterráneo las bases de datos son demasiado escasas y superficiales como para permitir un análisis estadístico robusto de los eventos pasados. Sin embargo, los modelos de simulación del clima constituyen una herramienta útil para estimar los cambios futuros en la magnitud y frecuencia de los ingredientes precursores de los medicanes.

Teoría de los ciclones tropicales

La teoría de interacción aire-mar demuestra que el estado estacionario de los ciclones tropicales puede idealizarse como una máquina de Carnot, con la salvedad de que la absorción de calor ocurre mayoritariamente en forma de calor latente de vaporización, adquirido desde la superficie del mar por las corrientes de aire convergentes (ver Emanuel 2003). Tomando como referencia la figura 2, el aire comienza a moverse según una trayectoria espiral desde el exterior (punto *a* en Fig. 2) hacia el centro de la depresión. Experimenta una disminución de presión y su entropía se incrementa obedeciendo tanto a la transferencia de entalpía desde la superficie del mar (mayoritariamente en forma de evaporación) como a la disipación de energía cinética en la capa fronteriza planetaria. Al mismo tiempo, su momento angular disminuye debido a la fricción con la superficie del mar. La temperatura en este tramo *a-b* apenas cambia. En las paredes del ojo del huracán (punto *b*), el flujo se vuelve ascendente siguiendo aproximadamente superficies de entropía y momento angular constantes mientras la presión obviamente decrece. Este tramo es aproximadamente adiabático y libre de fricción. Posteriormente, en la periferia del sistema el aire desciende (tramo *o-o'* en la Fig. 2), y la entropía adquirida en el tramo convergente inicial se pierde hacia el espacio por radiación electromagnética mientras que se adquiere momento angular por mezcla con el ambiente. Este tramo es prácticamente isotérmico. Finalmente, el ciclo se cierra entre los puntos *o'* y *a*, conservándose el momento angular y sin apenas entropía disponible para la producción de energía cinética.

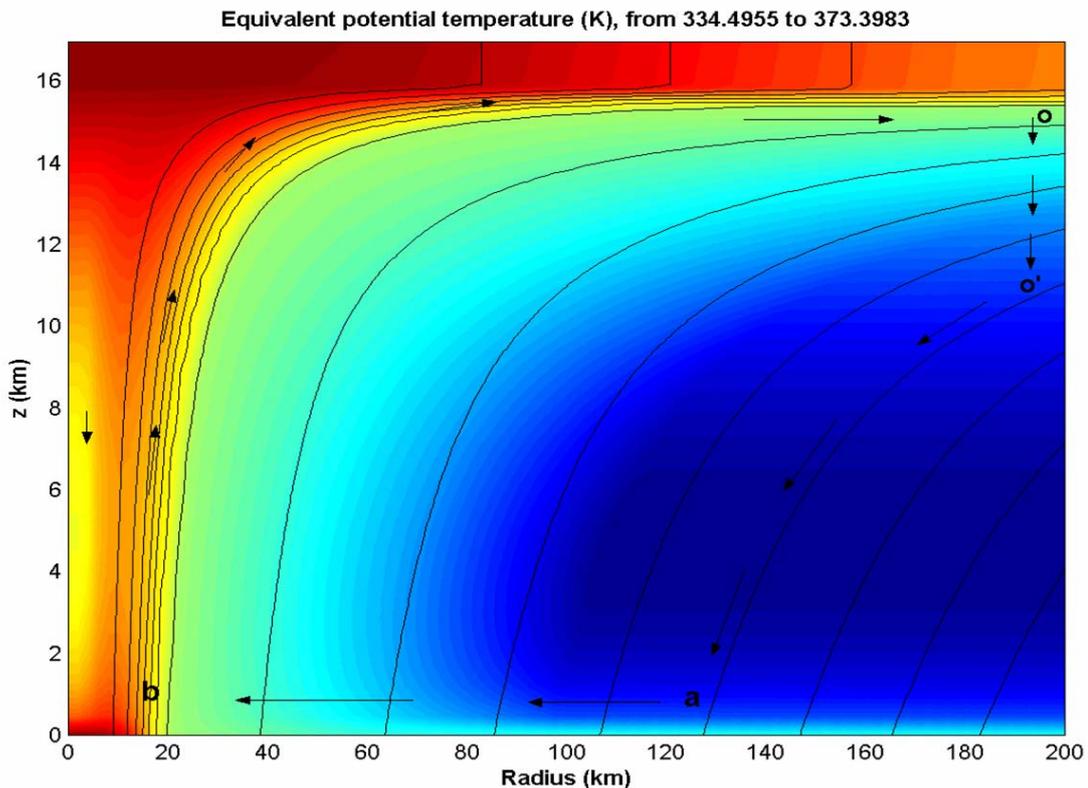


Figura 2. Corte vertical esquemático a través de un ciclón tropical. Se muestra el campo de temperatura potencial equivalente (en colores, valores crecientes desde el azul hacia el rojo) y el campo de momento angular absoluto específico en torno al eje del ciclón (en contornos, valores crecientes hacia afuera). (Figura cortesía del Prof. K. Emanuel)

Así pues, como en la máquina de Carnot, el ciclo energético del ciclón tropical maduro sigue un proceso de expansión isotérmica (con adición de entalpía), expansión adiabática, compresión isotérmica y compresión adiabática. La diferencia fundamental es que la energía disponible en el ciclo de Carnot académico se utiliza en realizar trabajo sobre su ambiente, mientras que en los ciclones tropicales el trabajo se consume en la disipación turbulenta en la

capa fronteriza. Formulando el teorema de Carnot para el sistema específico que estamos tratando (Emanuel 2003), se puede ver que la producción neta de energía mecánica en el ciclo es

$$P = 2\pi \frac{T_s - T_o}{T_s} \int_a^b [C_k \rho |V| (k_o^* - k) + C_D \rho |V|^3] dr \quad (1)$$

mientras que la disipación neta de energía en la capa fronteriza es

$$D = 2\pi \int_a^b C_D \rho |V|^3 r dr \quad (2)$$

expresiones en las que T_s es la temperatura de la superficie del mar, T_o la temperatura media de la superficie fría (tramo $o-o'$ en la Fig. 3), V es la velocidad del viento cerca de la superficie, ρ la densidad del aire, k la entalpía húmeda específica del aire cercano a la superficie y k_o^* dicha entalpía para el aire en contacto con el océano, el cual se asume saturado de vapor de agua a la temperatura del mar. Finalmente, C_D y C_k son los coeficientes adimensionales de transferencia de momento y entalpía que aparecen en la formulación tradicional de los flujos superficiales. Igualando las expresiones (1) y (2) y asumiendo que ambas integrales están dominadas por los valores de sus integrandos en torno al radio r de máxima velocidad del viento, se obtiene una expresión aproximada para dicha velocidad:

$$|V_{\max}|^2 \approx \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s - T_o}{T_o} (k_o^* - k) \quad (3)$$

la cual debe entenderse como un valor potencial, en la práctica un límite superior, de la intensidad alcanzable por el ciclón si éste se forma.

El valor V_{\max} puede calcularse a partir de las condiciones atmosféricas y la temperatura de la superficie del mar. Casos reales de los océanos tropicales han servido para demostrar que este modelo idealizado describe adecuadamente la energética de los ciclones maduros y predice correctamente la velocidad máxima del viento –o mínima presión central, en virtud de la relación del viento del gradiente– que se pueden alcanzar (Emanuel, 2003).

En lo que se refiere a la génesis de los ciclones tropicales, existe todavía un gran desconocimiento teórico. Sin embargo, el mismo autor logró formular un índice empírico de génesis que combina algunos factores que regulan dicho proceso: la velocidad potencial del viento que soporta el ambiente (dada por (3)), la vorticidad absoluta en la troposfera baja (η , tomando como referencia el nivel de 850 hPa), la humedad relativa en la troposfera media (H , a 600 hPa) y la cizalladura vertical del viento (V_{shear} , como el módulo de la diferencia del viento a 850 y 250 hPa). Este índice viene dado por:

$$I = |10^5 \eta|^{3/2} \left(\frac{H}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{\max}}{70}\right)^3 (1 + 0.1 V_{shear})^{-2} \quad (4)$$

expresión en la que deben utilizarse unidades S.I. para las variables dimensionales y % para la humedad relativa H . Obsérvese que valores elevados de η , H y V_{\max} actúan en favor de I , mientras que V_{shear} contribuye negativamente. El índice I permite describir satisfactoriamente la probabilidad de génesis de ciclones tropicales observada.

Aplicabilidad a la región mediterránea

Las herramientas de diagnóstico anteriores se han ensayado para al área mediterránea, tanto para el diseño de una climatología mensual como para el estudio de medicanes particulares. En el primer caso, los campos meteorológicos utilizados para los cálculos se han obtenido de la base de datos de reanálisis ERA-40, disponibles a las 00, 06, 12 y 18 UTC sobre niveles isobáricos estándar con una resolución espacial de 1.25° . En el caso de los medicanes se han tomado los análisis del ECMWF, disponibles a las mismas horas y niveles aunque con una resolución espacial mayor (0.3°), en algunos casos suficiente como para capturar en cierta medida el propio ciclón. Los parámetros que se han obtenido o calculado a partir de las anteriores fuentes de datos son la temperatura de la superficie del mar (SST, en $^{\circ}\text{C}$), la presión central mínima alcanzable por el ciclón (MINCP, en hPa), la velocidad máxima del viento según la relación (3) (MAXWS, en m/s) y el índice empírico de génesis dado por la expresión (4) (GENPDF).

La climatología realizada corresponde al período 1981-2000 y se ha elaborado por meses, a partir de los estados diarios definidos por el promedio de las 4 horas de análisis disponibles, una vez interpolados a una malla regular de 50 km de resolución según una proyección Lambert conforme. Para cada uno de los 12 meses y únicamente en los puntos de malla marinos se han calculado los siguientes indicadores estadísticos para SST, MINCP, MAXWS y GENPDF: valor medio (MEAN), valor percentil 25% (QT25), valor percentil 75% (QT75), rango inter-cuartil ($\text{IQR}=\text{QT75}-\text{QT25}$), y número medio de días por encima de 4 umbrales predefinidos (THRS1, THRS2, THRS3 y THRS4, dependientes de la naturaleza de cada variable). Además, se han calculado los histogramas mensuales para el Mediterráneo occidental, central y oriental a partir de todos los puntos de malla (unos 325) incluidos en cada uno de esos dominios geográficos.

Los eventos estudiados corresponden a 12 casos de medicanes fundamentalmente del Mediterráneo occidental y central, el más antiguo de septiembre de 1971 y el más reciente de diciembre de 2005. Para cada uno de ellos se ha calculado la distribución espacial de SST, MINCP, MAXWS y GENPDF cada 6 horas, durante un período de 3 días centrado en el momento de madurez del ciclón según se desprende de la información satelitaria. Con el objeto de representar el escenario sinóptico en el que se formaron los medicanes, se incorpora también el campo de presión a nivel del mar y la altura geopotencial a 500 hPa.

Todos los resultados obtenidos se encuentran disponibles en la página web asociada a este trabajo <http://medicanes.uib.es>, en la que el usuario puede interactuar fácilmente y representar e interpretar los diversos productos cuya nomenclatura es la arriba indicada. En esta comunicación se presentan únicamente los resultados más interesantes relativos a la aplicación del índice tropical empírico GENPDF para describir la probabilidad de génesis de huracanes mediterráneos.

Como ejemplos de los eventos analizados, la figura 3 contiene los resultados para cuatro de los medicanes estudiados. En todos los casos se puede comprobar el escenario sinóptico común a este tipo de fenómenos mediterráneos: presencia de una depresión fría profunda en niveles medios de la troposfera, no necesariamente desligada de la circulación general, reflejada también en superficie como una circulación ciclónica a menudo de carácter secundario. La ausencia de valores elevados de cizalladura direccional del viento en la zona de formación del medicán (cuadro blanco en las figuras) indica una débil advección térmica, tal como corresponde a los sistemas baroclinos maduros o en fase de disipación, en los que las depresiones de altura y de superficie adoptan una estructura vertical en fase.

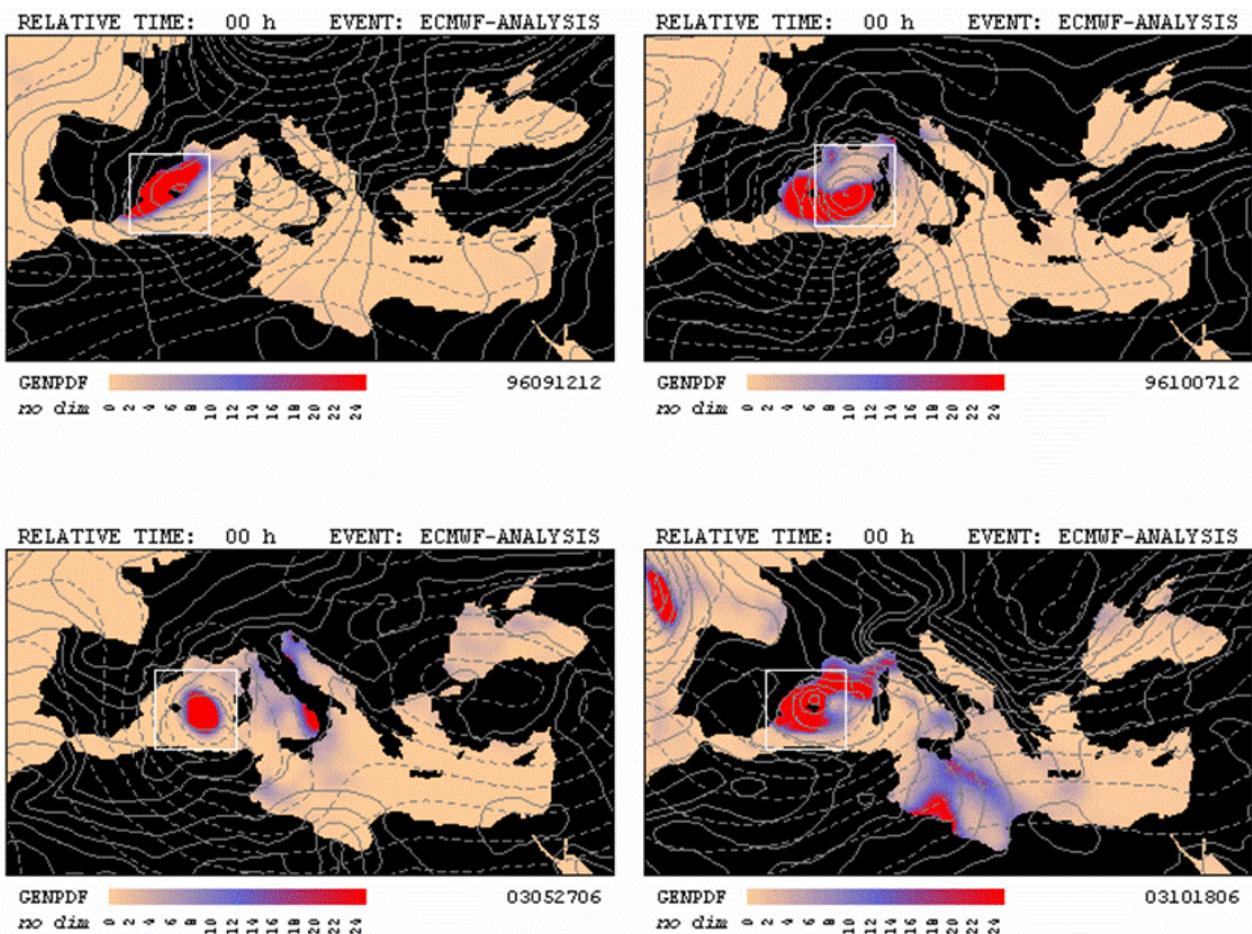


Figura 3. Caracterización meteorológica de los ambientes precursores de cuatro medicanes (los eventos afectaron a las zonas señaladas por el cuadrado blanco, en las fechas indicadas en la parte inferior derecha de cada figura): en línea continua, se representa el campo de presión a nivel del mar; en línea discontinua, la altura geopotencial a 500 hPa; y en colores según la escala adjunta, los valores calculados para el índice de génesis GENPDF.

Además de una cizalladura vertical débil del viento y la presencia de vorticidad ciclónica en niveles bajos, el escenario sinóptico descrito favorece la humidificación de la columna atmosférica por el ascenso inducido en la masa de aire, y también una inestabilidad acusada por el contraste entre el aire mediterráneo superficial (cálido y húmedo) y el aire frío superior. Todos estos factores contribuyen positivamente a la probabilidad de génesis de ciclones cuasi-tropicales de acuerdo con la expresión (4). Efectivamente, el índice GENPDF calculado en el área de formación del ciclón presenta valores muy altos (Fig. 3), resultado que se satisface también para el resto de eventos analizados.

Se puede concluir, entonces, que el índice empírico ajustado a las condiciones tropicales es también un buen indicador de los ambientes meteorológicos que pueden generar ciclones cuasi-tropicales en la región mediterránea. Sería deseable encontrar valores altos de GENPDF únicamente en aquellas zonas que experimentaron esas ciclogénesis, pero al igual que ocurre sobre los océanos tropicales, valores altos o incluso extremos del índice suponen tan solo una condición necesaria, pero no suficiente, para la formación del ciclón. En uno de los casos de la figura 3 puede observarse, por ejemplo, valores relativamente altos de GENPDF al sur de Sicilia, una zona donde no se observó ningún miniciclón.

En lo que se refiere a la distribución espacial y temporal de GENPDF desde el punto de vista climatológico, los valores medios mensuales más altos en el conjunto de la cuenca mediterránea se obtienen en los meses de otoño. Especialmente en el mes de octubre (Fig. 5,

panel izquierdo-superior), por ser un mes en que se combinan una temperatura del mar todavía relativamente alta y la incursión activa de depresiones extratropicales hacia la cuenca. No debe entonces sorprender que la mayoría de medicanes de los que se tiene constancia hayan ocurrido en los meses otoñales (de nuestra base de datos de 12 eventos, 3 ocurrieron en septiembre, 4 en octubre y 2 en la primera mitad de diciembre). No obstante, los medicanes no son exclusivos del otoño y pueden ocurrir en cualquier época del año (un buen ejemplo es el caso analizado de enero de 1995; Fig. 1a). Debe hacerse notar que aunque una alta temperatura superficial del mar es un elemento importante, el factor determinante para la ciclogénesis no es tanto el valor absoluto de dicha variable, sino el grado de desequilibrio termodinámico existente entre la superficie y la atmósfera.

Observando de nuevo la figura 5 (panel izquierdo-superior) –representativa también de otros meses del año si bien con valores menores de GENPDF como se ha comentado– puede constatar la gran diferencia de los valores medios entre el Atlántico y Mediterráneo. Claramente, los ambientes propicios a la generación de ciclones cuasi-tropicales ocurren con mucha mayor intensidad y/o frecuencia en el ámbito mediterráneo que en zonas contiguas. Incluso en el seno del Mediterráneo, son destacables las diferencias entre el mar de Alborán y el resto del Mediterráneo occidental, y entre el Mediterráneo oriental y el resto de la cuenca. No obstante, cuando se atiende a la ocurrencia de valores extremadamente altos del índice de génesis, posiblemente los indicadores más idóneos del potencial real de ciclogénesis cuasi-tropical, la frecuencia observada en las diferentes regiones no tiene porque seguir la pauta observada para los valores medios.

Efectos del cambio climático

Una vez confirmada la aplicabilidad del índice empírico de génesis GENPDF a la región mediterránea, parece razonable examinar las climatologías futuras de dicha variable proporcionadas por los modelos de simulación del clima con el propósito de estimar la respuesta de los medicanes al calentamiento global. Debe hacerse notar que los modelos de circulación general (GCMs) no poseen todavía una resolución espacial suficiente que permita resolver explícitamente depresiones del tamaño de los medicanes. Consecuentemente, salvo que se disponga de simulaciones de modelos climáticos regionales, se hace necesario el empleo de técnicas indirectas como la planteada.

Se han considerado tres modelos distintos de entre la última generación de GCMs que se emplean para las proyecciones climáticas (p.e. IPCC 2007): el CSIRO-Mk3.0 (Australia), el ECHAM5/MPI-OM (Alemania) y el GFDL-CM2.1 (USA). Dichos modelos operan con resoluciones espaciales en longitud y latitud sobre la atmósfera dadas por $1.875^{\circ} \times 1.865^{\circ}$, $1.875^{\circ} \times 1.865^{\circ}$ y $2.5^{\circ} \times 2.01^{\circ}$, respectivamente. Con el objeto de evaluar la capacidad de los modelos de reproducir los aspectos del clima presente se han tomado las salidas diarias (12 UTC) durante el período 1981-2000 de una simulación de referencia correspondiente al "clima del siglo XX" (20C3M). Los efectos del cambio climático se han estudiado mediante una simulación para el siglo XXI forzada con un escenario socio-económico de emisiones alto, en concreto el escenario A2 de la clasificación SRES (IPCC 2007). En este segundo caso el análisis se centra en el período 2081-2100. Para los tres GCMs considerados y cada una de las simulaciones se han calculado los mismos parámetros meteorológicos que se indicaron en el apartado anterior. Los resultados obtenidos están disponibles en <http://medicanes.uib.es> bajo la siguiente nomenclatura de los experimentos: CSIRO-20C3M, CSIRO-SRESA2, ECHAM5-20C3M, ECHAM5-SRESA2, GFDL-20C3M y GFDL-SRESA2.

El incremento de la temperatura superficial del mar proyectado por los tres GCMs para finales del siglo XXI es muy acentuado, alcanzando unos 3°C durante los meses de otoño (véase un ejemplo de dicho calentamiento en la Fig. 4). No obstante, parece haber algunas discrepancias entre las simulaciones de referencia 20C3M de los modelos CSIRO y GFDL, y el clima observado (esto es, la SST derivada de los ERA-40); ambos GCMs resultan ser apreciablemente más "fríos"

que la realidad. No así la simulación ECHAM5-20C3M, que reproduce con gran exactitud el ciclo anual observado de la SST en la mayoría de zonas de la cuenca mediterránea.

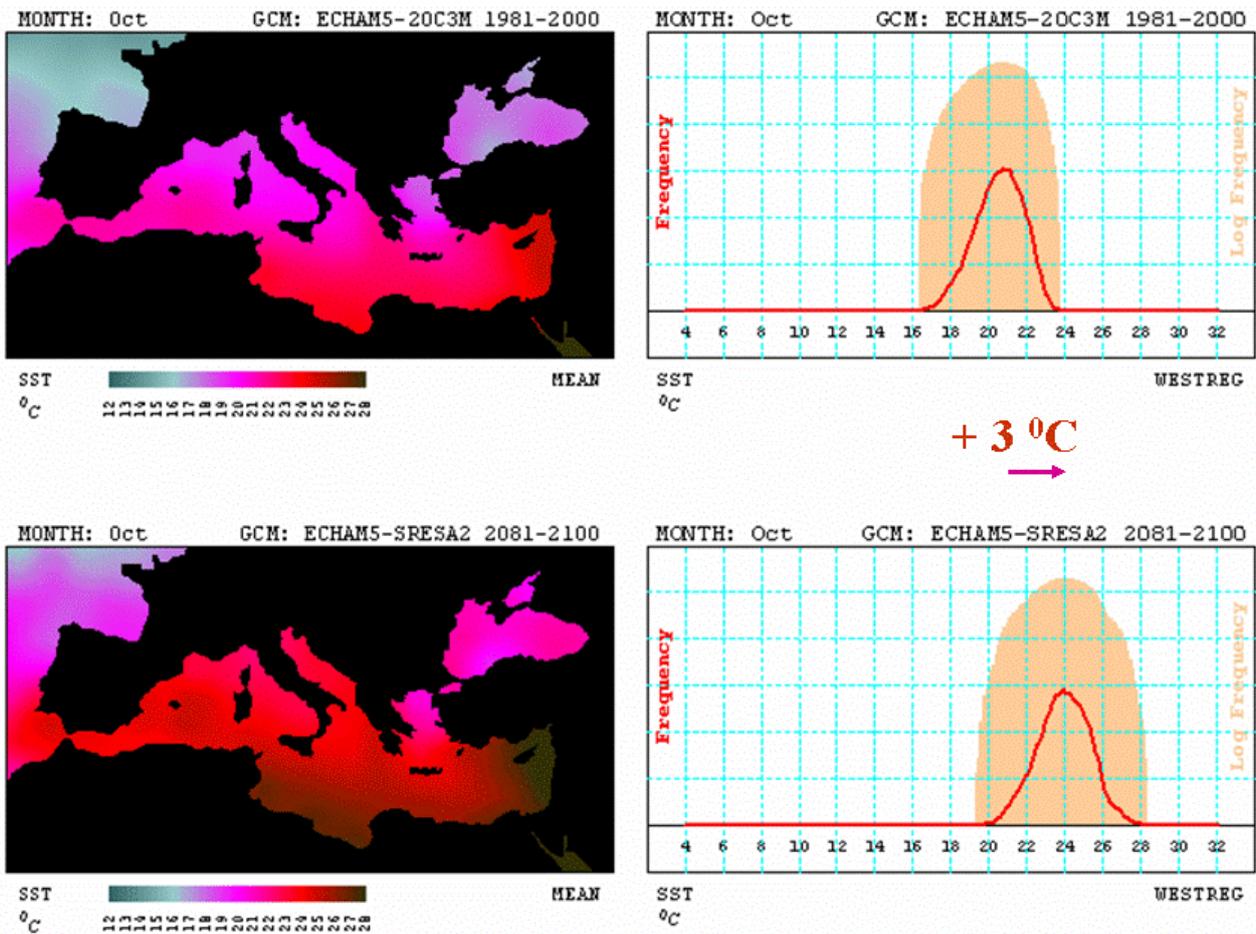


Figura 4. Distribución espacial del valor medio mensual de la SST (valores según escala de colores) para el mes de octubre y los experimentos ECHAM5-20C3M (arriba-izquierda) y ECHAM5-SRESA2 (abajo-izquierda). Distribución de frecuencias de la SST en escala lineal (línea gruesa) y en escala logarítmica (barras) sobre el Mediterráneo occidental para el mes de octubre y los experimentos ECHAM5-20C3M (arriba-derecha) y ECHAM5-SRESA2 (abajo-derecha); tal como se indica se proyecta un calentamiento medio de la superficie del mar de unos 3 °C.

Las deficiencias de CSIRO y GFDL en la simulación de la temperatura del mar, y probablemente otras inexactitudes en los regímenes de circulación atmosférica simulados sobre las latitudes mediterráneas, resultan en un diagnóstico defectuoso del índice empírico de génesis GENPDF. En cambio, el modelo ECHAM5 sí reproduce los principales aspectos de la climatología observada de GENPDF (véase una comparación de los experimentos para el mes de octubre en la Fig. 5). La habilidad que alcanza el modelo alemán para simular el clima presente es meritoria, máxime si se tiene en cuenta la gran cantidad de factores que, de un modo no lineal, intervienen en la definición (4). En definitiva, parece haber motivos suficientes para asignar una mayor confianza a los resultados del clima futuro que proporcione el ECHAM5-SRESA2 que a los proporcionados por CSIRO-SRESA2 y GFDL-SRESA2.

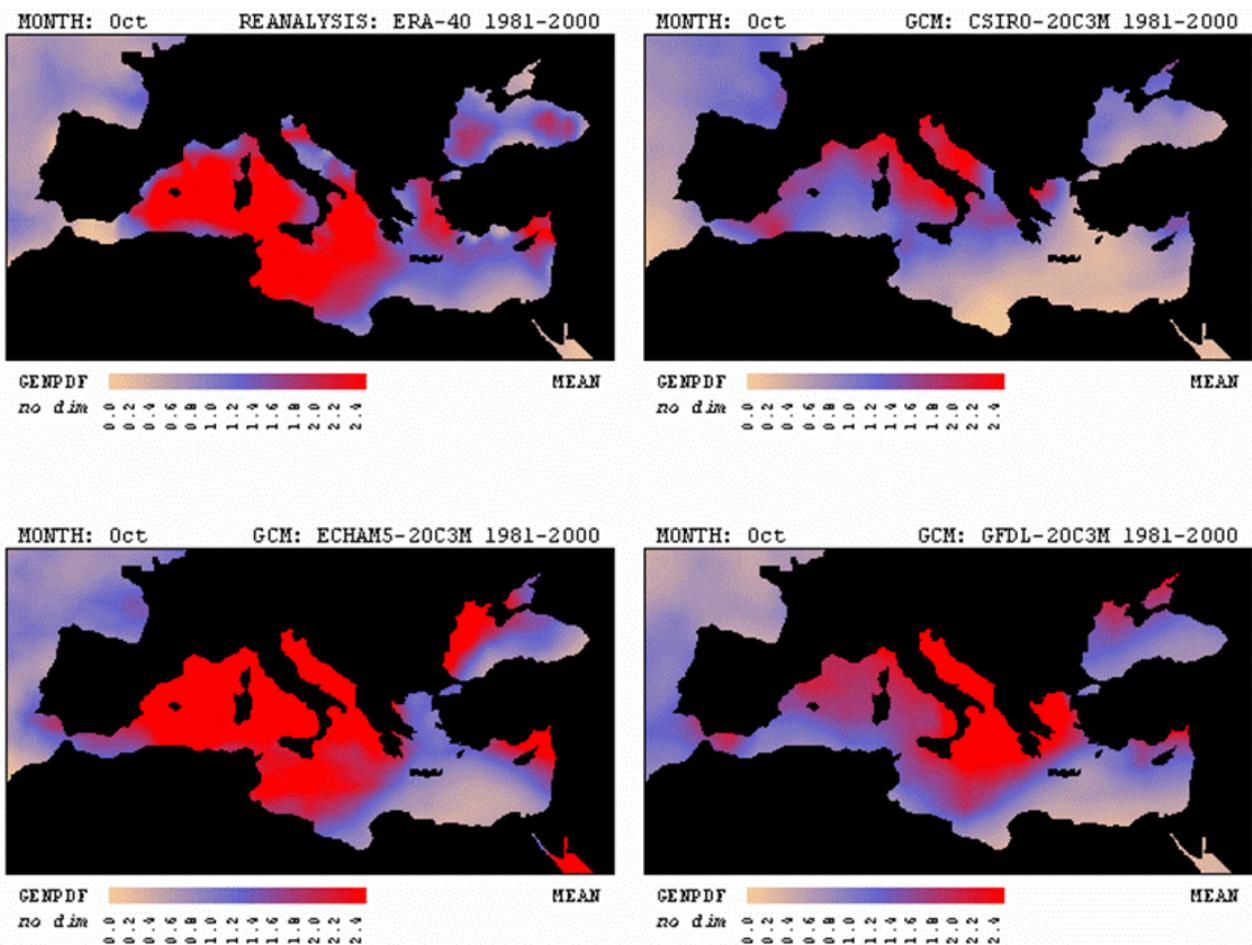


Figura 5. Distribución espacial del valor medio mensual del índice de génesis GENPDF (valores según escala de colores) para el mes de octubre y los experimentos ERA-40 (arriba-izquierda), CSIRO-20C3M (arriba-derecha), ECHAM5-SRESA2 (abajo-izquierda) y GFDL-20C3M (abajo-derecha).

Los modelos CSIRO y GFDL indican para el futuro una mayor extensión de las áreas con valores medios mensuales elevados del índice GENPDF (no se muestra), siguiendo un patrón espacial muy similar al de su clima presente (p.e. el de la Fig. 5 arriba-derecha y abajo-derecha). No obstante, ya se ha mencionado que estos resultados ofrecen baja confianza. El más creíble modelo ECHAM5 ofrece una tendencia contraria para los valores medios mensuales de GENPDF, es decir, una disminución futura, en promedio, del índice GENPDF (ver en la Fig. 6 izquierda los resultados para el mes de octubre). La razón de dicha tendencia, a pesar del aumento notable de la SST (Fig. 4), radicaría en una menor frecuencia de incursiones frías y depresionarias desde latitudes altas hacia la cuenca mediterránea, tal como proyecta el propio IPCC y otros estudios regionales (p.e. Sumner et al. 2003). Sin embargo, para un correcto análisis del problema no se debe atender únicamente a los valores medios, sino más bien a la frecuencia de valores extremos del índice GENPDF, bajo la hipótesis de que los medicanes aparecen ligados a valores anormalmente altos de dicho índice (recordar Fig. 3). Un análisis de los histogramas futuros de la variable GENPDF revela que, al menos para la región occidental y los meses de otoño, la frecuencia de valores extremos de GENPDF es mayor en el futuro que en el presente a pesar de la disminución de los valores medios (Fig. 6 derecha).

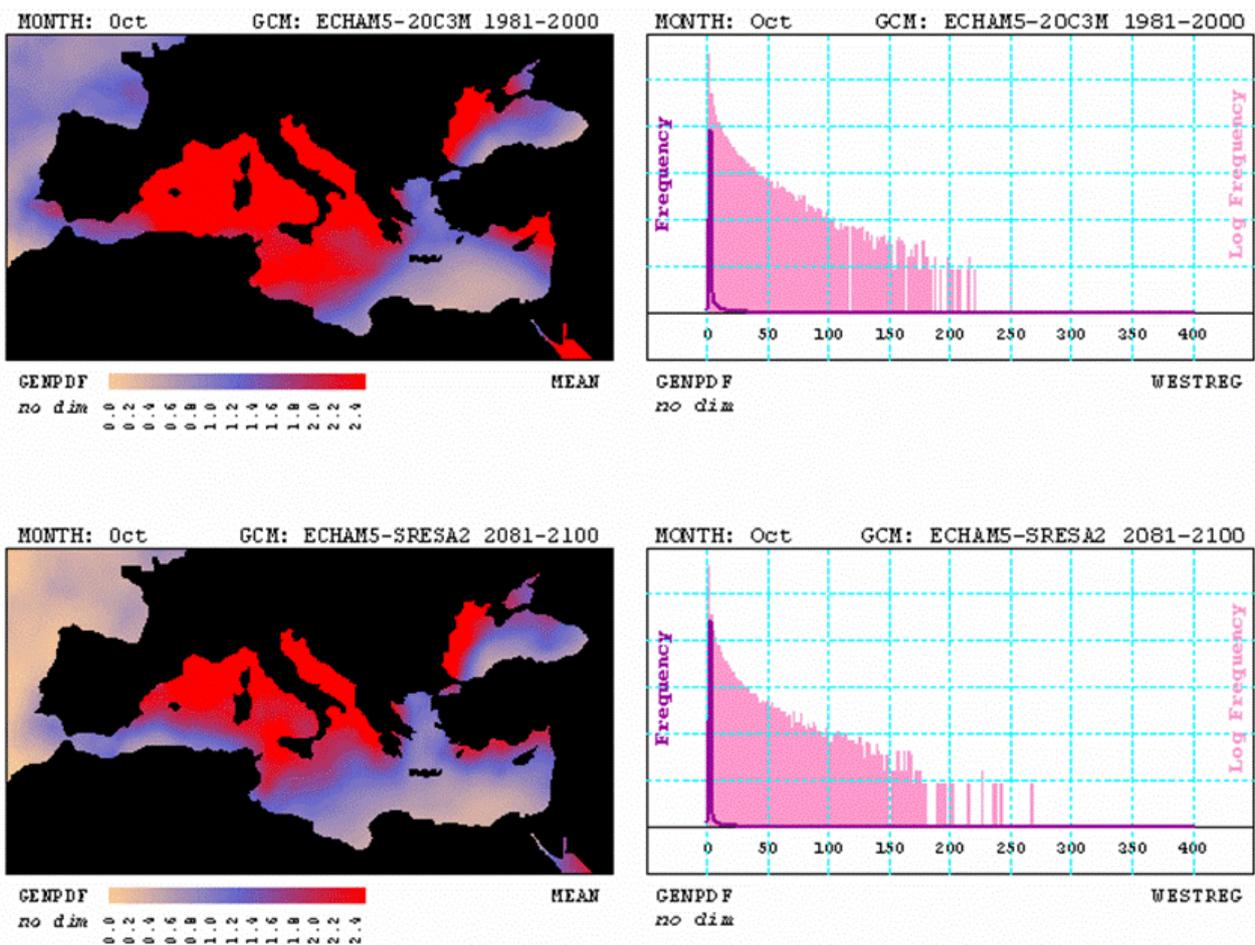


Figura 6. Distribución espacial del valor medio mensual del índice de génesis GENPDF (valores según escala de colores) para el mes de octubre y los experimentos ECHAM5-20C3M (arriba-izquierda) y ECHAM5-SRESA2 (abajo-izquierda). Distribución de frecuencias de GENPDF en escala lineal (línea gruesa) y en escala logarítmica (barras) sobre el Mediterráneo occidental para el mes de octubre y los experimentos ECHAM5-20C3M (arriba-derecha) y ECHAM5-SRESA2 (abajo-derecha).

Como conclusión, puede comentarse que aunque el índice tropical empírico GENPDF se perfila como un indicador muy útil para caracterizar el potencial del ambiente de generar medicanes, existen hoy en día grandes incertidumbres sobre la evolución futura del conjunto completo de ingredientes que participan en la génesis de estas tempestades. Si se atiende al modelo ECHAM5, que es el que nos ofrece mayor confianza, los medicanes del futuro –aunque quizá menos frecuentes– podrían ser típicamente más intensos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado bajo los objetivos y financiación del proyecto PRECIOSO (CGL2005-03918/CLI) del Plan Nacional I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia.

Bibliografía

- Emanuel, K. (2003): "Tropical cyclones". *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **31**, 75-104.
 Emanuel, K. (2005a): "Genesis and maintenance of Mediterranean hurricanes". *Adv. Geosc.*, **2**, 217-220.
 Emanuel, K. (2005b): "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years". *Nature*, **436**, 686-688.
 Ernst, J. A. and M. Matson (1983): "A mediterranean tropical storm?". *Weather*, **38**, 332-337.

- Fita, L., R. Romero, A. Luque, K. Emanuel and C. Ramis (2007): "Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model". *Nat. Haz. and Earth. Syst. Sci.*, **7**, 41-56.
- Homar, V., R. Romero, D. J. Stensrud, C. Ramis and S. Alonso (2003): "Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: Dynamical vs boundary factors". *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **129**, 1469-1490.
- IPCC (2007): "Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change" *Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds)*.
- Jansà, A. (2003): "Miniciclons a la Mediterrània". *IX Jornades de Meteorologia Eduard Fontserè (ISBN 84-930328-6-7)*, 75-85.
- Knutson T. and R. Toleya (2004): "Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization". *J. Climate*, **17**, 3477-3495.
- Reale, O. and R. Atlas (2001): "Tropical cyclone-like vortices in the extratropics: observational evidence and synoptic analysis". *Weather Forecast.*, **16**, 7-34.
- Romero, R. and K. Emanuel (2006): "Space-time probability density of Mediterranean hurricane genesis in the light of an empirical tropical index". *V Asambleu Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (CD-Rom, ISBN 84-8320-373-1)*.
- Sumner, G. N., R. Romero, V. Homar, C. Ramis, S. Alonso and E. Zorita (2003): "An estimate of the effects of climatic change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late 21st century". *Climate Dyn.*, **20**, 789-805.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry and H. R. Chang (2005): "Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment". *Science*, **309**, 1844-1846.