

Densidad de probabilidad espacio-temporal de génesis de huracanes Mediterráneos según un índice tropical empírico

Space-time probability density of Mediterranean hurricane genesis in the light of an empirical tropical index

R. Romero⁽¹⁾ y K. Emanuel⁽²⁾

⁽¹⁾Grupo de Meteorología, Departamento de Física, Universidad de las Islas Baleares, 07122 Palma de Mallorca, Romu.Romero@uib.es

⁽²⁾Program in Atmospheres, Oceans, and Climate, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA

SUMMARY

Tropical-like storms occasionally develop over the Mediterranean Sea, and sometimes attain hurricane intensity. These storms, often called “Medicanes”, operate on the thermodynamic disequilibrium between the sea and the atmosphere and in this respect, as well as in their visual appearance in satellite images, are much like tropical cyclones. In the development of his air-sea interaction theory for tropical cyclones, the second author has shown that the steady-state maintenance of these storms can be idealized as a Carnot engine, with the provision that the heat input is largely in the form of the latent heat of vaporization acquired from the sea surface by the inwards airflow. The mechanical energy available from this thermodynamic cycle balances frictional dissipation, and the theory allows one to determine the potential intensity of the storm from the environmental conditions. Real events from the tropical oceans demonstrate that the idealized model correctly predicts the maximum wind speed –or minimum central pressure– achievable in tropical cyclones. On the other hand, an empirical genesis index that combines the previous potential wind speed value with the low-tropospheric vorticity, mid-tropospheric relative humidity and deep-layer wind shear has been formulated and successfully tested against the true space-time probability of tropical cyclone genesis.

In this work, the above ideas are applied to the Mediterranean region where the record of Medicanes is too sparse to allow any kind of robust statistical analysis of real data. A few well known cases are first used to illustrate the precursor role of a deep, cut-off, cold-core cyclone in the upper and middle troposphere, which acts to increase the local thermodynamic potential for tropical-like cyclones and the relative humidity through a deep layer, thereby inhibiting the formation of convective downdrafts that often prevent the cyclogenesis. High values of the empirical genesis index are invariably obtained for the available cases, indicating that such an index can be a good candidate to estimate –or forecast– the likelihood of Medicanes genesis. Finally, geographical and monthly distributions of potential intensity and genesis index are examined for the whole of the Mediterranean Sea from a climatological perspective, using for that purpose the ERA-40 reanalysis dataset for the period 1958-2001. Results are available at <http://medicanes.uib.es>

1. INTRODUCCIÓN

Sobre el Mar Mediterráneo se generan ocasionalmente pequeñas depresiones similares a los ciclones tropicales, tal como ya han identificado, descrito o simulado distintos autores (p.e. Reale y Atlas 2001; Jansà 2003; Homar et al. 2003). Estos sistemas, conocidos internacionalmente como “Medicanes” y que pueden incluso alcanzar intensidad de huracán, se sustentan en el desequilibrio termodinámico entre mar y atmósfera que, junto al aspecto característico que adoptan en las imágenes de satélite (estructura nubosa de tipo circular, a menudo con un ojo libre de nubosidad compacta y rodeado por bandas espirales de tipo convectivo; Fig. 1), permiten ser asimilados a los ciclones tropicales. Algunos de estos ciclones han evolucionado muy cerca de zonas costeras o han cruzado islas mediterráneas (p.e. la isla de Mallorca el 2 de octubre de 1986, 12 de septiembre de 1996 y el 18 de octubre de 2003) lo que ha permitido disponer de observaciones directas de sus efectos sobre los parámetros meteorológicos a pesar de su pequeño tamaño (Fig. 2).

También se ha podido identificar y explicar el efecto precursor de la ciclogénesis cuasi-tropical que suele tener una depresión fría situada en niveles medios y altos de la troposfera (Emanuel, 2005). La depresión, ligada normalmente a la fase madura de los desarrollos baroclinos, actúa incrementando el potencial termodinámico local así como la humedad relativa de la columna de aire, evitando de esta manera la formación de corrientes descendentes convectivas que a menudo inhiben la ciclogénesis.

La similitud entre ciclones estrictamente tropicales y Medicanes en cuanto a su apariencia y mecanismos físicos influyentes, sugiere el ensayo para el Mediterráneo de ciertos métodos de diagnóstico que ya han demostrado su valor para caracterizar los ambientes

tropicales. Siguiendo esta idea, en la sección 2 se resaltan algunos índices representativos de los ambientes que soportan ciclones tropicales, derivados a partir de consideraciones teóricas. A continuación estos índices se aplican al Mar Mediterráneo (sección 3), destacándose en este trabajo las posibilidades de un índice empírico que formula la densidad de probabilidad de génesis de huracanes.

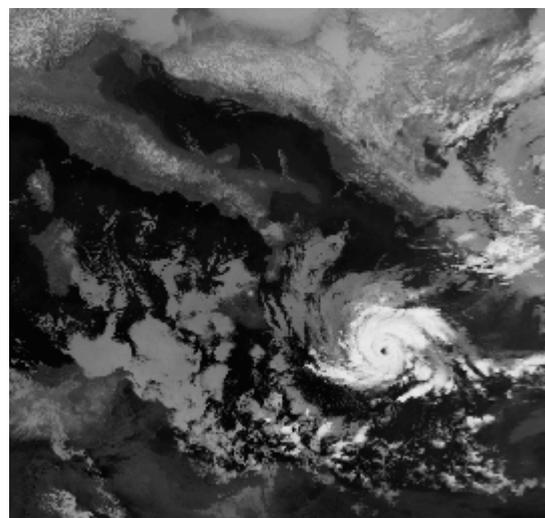


Figura 1 – Medicanes del 16 de enero de 1995, situado al este de Sicilia.
(*Medicane of 16th January 1995, located to the east of Sicily.*)

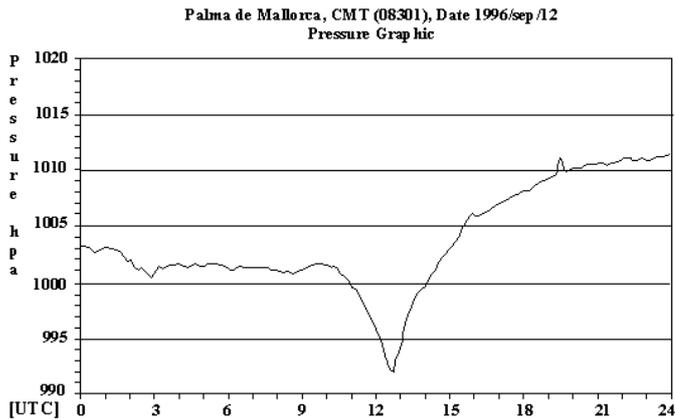


Figura 2 - Registro barométrico en Palma de Mallorca durante el paso del miniciclón del 12 de septiembre de 1996 (cortesía de A. Jansà, INM). (Pressure record in Palma de Mallorca during the passage of the Medicane of 12th September 1996; courtesy of A. Jansà, INM.)

2. TEORÍA DE LOS CICLONES TROPICALES

En su teoría de interacción aire-mar que explica los ciclones tropicales, el segundo autor ha mostrado que el estado estacionario de estas depresiones 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, y múltiples referencias ahí contenidas). Tomando como referencia la figura 3, el aire comienza a moverse según una trayectoria espiral desde el exterior (punto *a* en Fig. 3) 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. 3), 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.

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

$$P = 2\pi \frac{T_s - T_o}{T_s} \int_a^b [C_k \rho |V| (k_0^* - k) + C_D \rho |V|^3] dr \quad (1)$$

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_0^* 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:

$$|V_{\max}|^2 \approx \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s - T_o}{T_o} (k_0^* - k) \quad (3)$$

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).

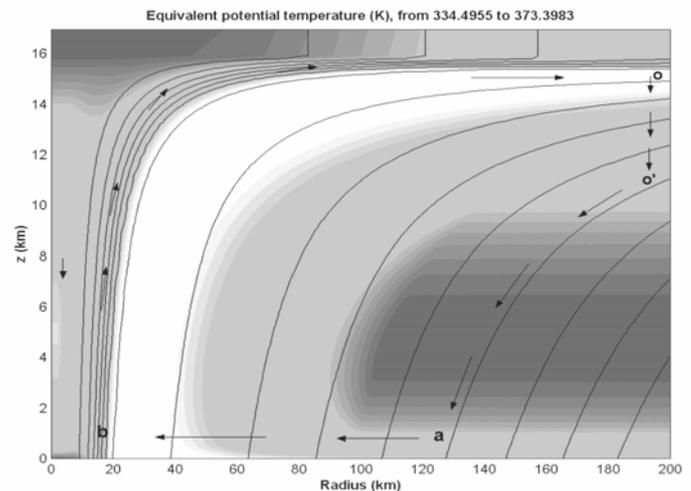


Figura 3 - Sección vertical de un ciclón tropical, la cual muestra los campos de temperatura potencial equivalente (sombreado, aumentando de valor hacia adentro) y de momento angular absoluto específico en torno al eje del ciclón (líneas, aumentando hacia afuera) (Cross-section of a tropical cyclone, showing equivalent potential temperature (shaded, with values increasing inward) and specific absolute angular momentum about the axis of the storm (contours, with values increasing outward).)

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:

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

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, tal como demuestra el resultado de la figura 4.

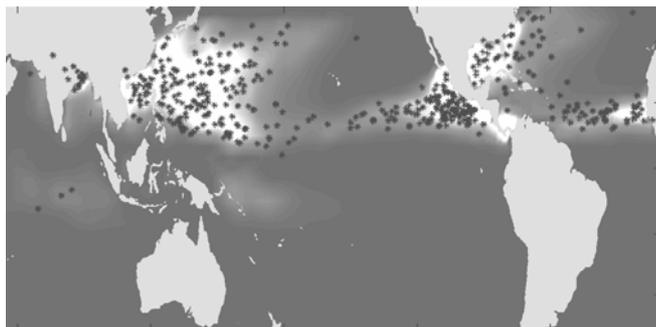


Figura 4 – Climatología del índice de génesis empírico (sombreado) y huracanes observados (asteriscos) para el mes de agosto, 1971-2003. (Climatology of the empirical genesis index (shaded) and observed hurricanes (asterisks) for August, 1971-2003.)

3. APLICACIÓN AL MEDITERRÁNEO

Los resultados anteriores se han aplicado al área mediterránea, tanto para el diseño de una climatología mensual como para el estudio de eventos particulares. En el primer caso, los campos meteorológicos utilizados para los cálculos se han obtenido de la base de datos de reanálisis ERA40, 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 1958-2001 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. Por problemas de espacio no es posible discutir en este texto la variedad de información contenida en la página web. El propósito de esta comunicación es presentar 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, las figuras 5 y 6 contienen los resultados para los ciclones del 16 de enero de 1995 y 12 de septiembre de 1996, eventos que ya fueron ilustrados en las figuras 1 y 2, respectivamente. En ambos 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 Medicane (cuadro blanco en las figuras) indica una débil advección térmica, tal como corresponde a los sistemas baroclínicos maduros o en fase de disipación, en los que las depresiones de altura y de superficie adoptan una estructura vertical en fase.

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 (Figs. 5 y 6), resultado que se satisface también para el resto de eventos analizados.

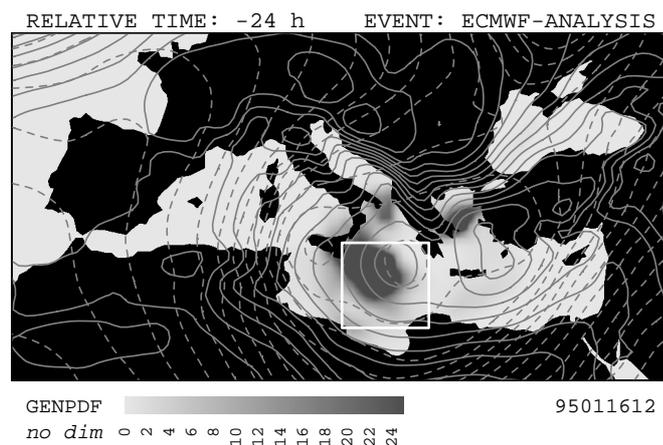


Figura 5 – Resultados para el 15 de diciembre de 1995 a las 12 UTC: presión a nivel del mar (línea continua), altura geopotencial a 500 hPa (línea discontinua) y valores calculados para el índice de génesis GENPDF (sombreado según escala).

(Results on 15th December 1995 at 12 UTC: sea level pressure (continuous line), geopotential height at 500 hPa (dashed line) and calculated values for the genesis index GENPDF (shaded according to scale).)

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 la figura 5 pueden observarse, por ejemplo, valores relativamente altos de GENPDF entre Grecia y Turquía, una zona donde no se observó ningún miniciclón. Un uso más eficiente del índice, teniendo en cuenta por ejemplo su consistencia espacial y temporal o la superación de ciertos umbrales en un área significativa, así como la incorporación de elementos de diagnóstico adicionales, como la cuantificación del forzamiento dinámico o de los efectos de convección profunda antecedente, parece necesario de cara a poder acotar aún más las áreas propensas a la formación de Medicanes y

evitar al máximo las falsas alarmas. Sólo de esta manera el índice adquiriría pleno valor en el entorno de la meteorología operativa.

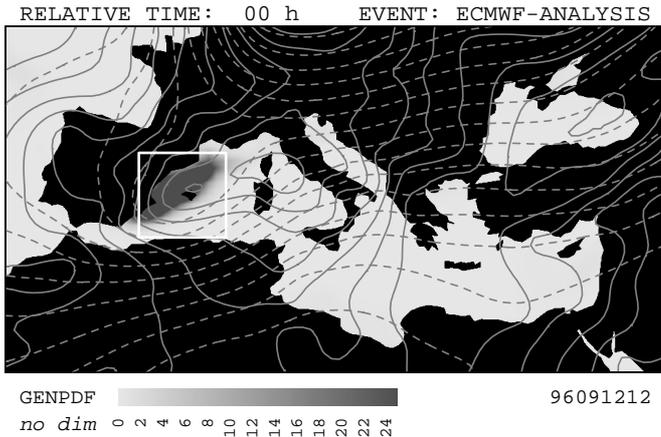


Figura 6 – Resultados para el 12 de septiembre de 1996 a las 12 UTC (mismos campos que en Fig. 5). (Results on 12th September 1996 at 12 UTC (same fields as in Fig. 5).)

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. 7), 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; Figs. 1 y 5). 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. Cómo, si no, podría explicarse la génesis de bajas polares, relativamente frecuentes en latitudes notablemente más altas que la mediterránea.

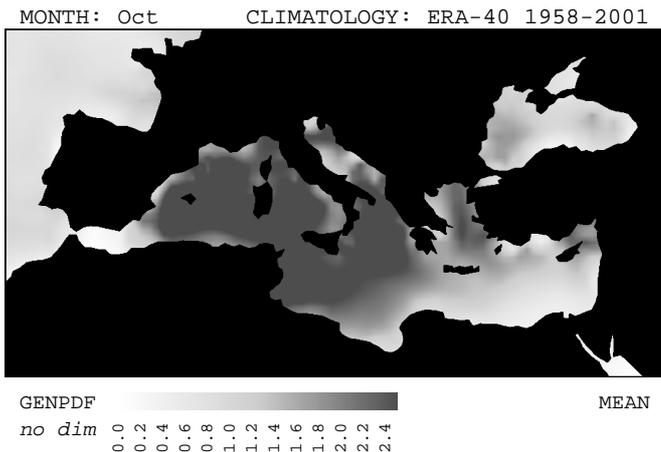


Figura 7 – Distribución espacial del valor medio mensual del índice de génesis GENPDF para el mes de octubre, según escala. (Spatial distribution of mean monthly value of genesis index GENPDF for October, according to scale.)

Observando de nuevo la figura 7 –representativa también de otros meses del año si bien con valores menores de GENPDF como se ha dicho– puede constatar la gran diferencia de los valores medios entre el Atlántico y Mediterráneo. Claramente, los ambientes propicios a la generación de ciclones quasi-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 quasi-tropical, la frecuencia observada en las diferentes regiones no tiene porque seguir la pauta observada para los valores medios. Compárese, por ejemplo, el histograma de la zona oriental con el de la región occidental (Fig. 8), ambos correspondientes al mes de octubre.

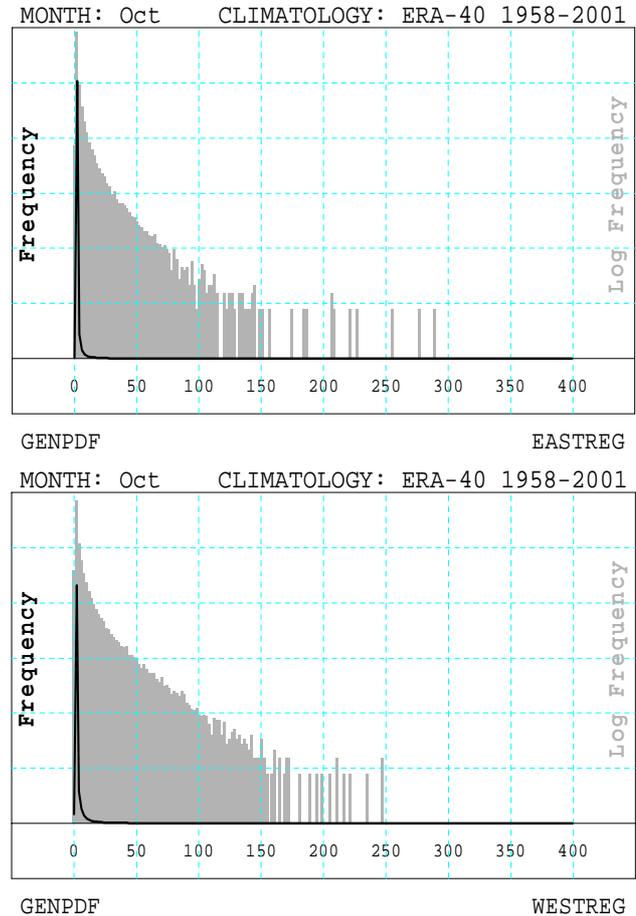


Figura 8 – Distribución de frecuencias de GENPDF en escala lineal (línea gruesa) y en escala logarítmica (barras) en el Mediterráneo oriental (panel superior), y Mediterráneo occidental (panel inferior). (Frequency distribution of GENPDF in linear scale (thick line) and logarithmic scale (bars) in the eastern Mediterranean (upper panel), and western Mediterranean (lower panel).)

Dado que los registros de Medicanes son todavía demasiado escasos como para permitir cualquier análisis estadístico robusto de eventos reales, se espera que el diseño de climatologías basadas en parámetros alternativos como el índice aquí considerado puedan ser de gran ayuda para avanzar en el conocimiento de esta problemática.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado bajo los objetivos y financiación del proyecto PRECIOSO (CGL2005-03918/CLI). Se agradece al Sr. Lluís Fita del Grupo de Meteorología de la UIB su colaboración en la adquisición de datos.

4. REFERENCIAS

- Emanuel, K. (2003): "Tropical cyclones". *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **31**, 75-104.
 Emanuel, K. (2005): "Genesis and maintenance of Mediterranean hurricanes". *Adv. Geosc.*, **2**, 217-220.
 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.
 Jansà, A. (2003): "Miniciclons a la Mediterrània". *IX Jornades de Meteorologia Eduard Fontserè (ISBN 84-930328-6-7)*, 75-85.
 Reale, O. and R. Atlas (2001): "Tropical cyclone-like vortices in the extratropics: observational evidence and synoptic analysis". *Weather Forecast.*, **16**, 7-34.