

LOS MEJORES AJUSTES PROBABILÍSTICOS DEL ÍNDICE NAO INVERNAL Y SUS FASES POSITIVA Y NEGATIVA RECIENTES

Javier MARTÍN VIDE¹, M^a José CORDOBILLA¹
¹ Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona
jmartinvide@ub.edu, mj.cordobilla@gmail.com

RESUMEN

Tras un análisis temporal básico de la serie de valores del índice NAO invernal del período 1864-2009, que no ha detectado tendencia lineal significativa, y un análisis espectral, que ha revelado varios picos, se han buscado las distribuciones de probabilidad que ofrecen mejor ajuste de la distribución empírica. El ligero sesgo negativo de la distribución de frecuencias no impide la aceptación de su normalidad, aunque los mejores ajustes los dan otras distribuciones, como la Gamma generalizada de 4 parámetros. Mediante ella y otras cinco se han calculado los valores esperados del índice NAO invernal para diferentes períodos de retorno. Se han considerado 4 subperíodos de unos 35 años, mostrándose diferencias significativas entre las medias y las estructuras probabilísticas de los subperíodos 1940-1974 y 1975-2009, correspondientes a una fase negativa y una positiva, respectivamente, de la NAO.

Palabras clave: Ajuste Probabilístico, Distribución de Probabilidad, Índice NAO.

ABSTRACT

The winter NAO index series of the 1864-2009 period has been analysed. It does not show any linear trend. The spectral analysis reveals several peaks. The empirical frequency distribution, with a weak negative skewness, is Gaussian, although there are other probability distributions that fit it better, as the 4-parameters generalized Gamma. The winter NAO index values for several return periods have been calculated by means of the best probability distributions. Four sub-periods can be distinguish, among them the negative NAO phase period of 1940-1974 and the positive one of 1975-2009, that show different mean as well as probabilistic characteristics.

Key words: Probabilistic Fitting, Probability Distribution, NAO index.

1. INTRODUCCIÓN

Los índices de teleconexión o de patrones de variabilidad de baja frecuencia, como el índice NAO, han sido analizados ampliamente en cuanto a sus influencias sobre series climáticas convencionales o elaboradas, sean pluviométricas, térmicas, de insolación, de índices de sequía, etc. (HURRELL, 1995; RODRÍGUEZ-PUEBLA *et al.*, 2001; MARTÍN VIDE y FERNÁNDEZ, 2001; POZO-VÁZQUEZ *et al.*, 2004; LOPEZ-BUSTINS *et al.*, 2008; LÓPEZ-MORENO y VICENTE-SERRANO, 2008; GONZALEZ-HIDALGO *et al.*, 2009;

etc), como predictores de los valores de éstas. Igualmente, se ha estudiado su influencia sobre otras variables ambientales o económicas, tales como los caudales fluviales, la abundancia de determinadas poblaciones biológicas, etc. (ATRILL y POWER, 2002; KETTLEWELL *et al.*, 2003; TRIGO *et al.*, 2004; POCIASK-KARTECZKA, 2006, etc.) La técnica estadística más usual en estos análisis es la de las correlaciones, principalmente lineales.

La evolución temporal de los índices de teleconexión ha sido también estudiada, con el objeto de establecer las diferentes fases de los patrones de teleconexión, para, en último extremo, intentar estimar su evolución futura. El análisis estadístico cronológico o temporal, con los diferentes tests de tendencias, es, lógicamente, la herramienta más usada para este propósito.

En el presente trabajo se analiza probabilísticamente una larga serie de valores del índice NAO invernal, que cubre el período 1864-2009. Concretamente, se ha verificado el ajuste de la serie completa, así como la de 4 subperíodos, a un amplio abanico de distribuciones de probabilidad, para establecer las de mejor ajuste en cada caso. Esto ha permitido, junto con otros análisis complementarios (test de comparación de medias, ANOVA, etc.), establecer algunas diferencias estadísticamente significativas entre los dos últimos subperíodos, 1940-1974 y 1975-2009, representativos, aproximadamente, en la bibliografía de dos fases diferentes del patrón noratlántico.

2. DATOS Y MÉTODOS

La serie del índice NAO invernal analizada es la denominada ‘NAO Station Based (DJFM) Index’ ó ‘Winter (Dec-Mar) Station Based NAO Index’, construida por Jim Hurrell como diferencias estandarizadas de las presiones medias, reducidas al nivel del mar, de diciembre a marzo, inclusive, de Lisboa y Stykkisholmur/Reykjavik, que cubre el período 1864-2009 y está disponible en <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/nao.stat.winter.html>. En esta serie es fácil apreciar visualmente un tramo final, desde mediados de la década de los años 70 del siglo XX hasta la actualidad, con valores predominantemente positivos, frente a los de las tres décadas y media precedentes, mayoritariamente negativos, lo que justifica hablar de unas fases positiva y negativa de la NAO (Fig. 1)

Se han considerado también 4 subperíodos de 35 años, excepto el primero, de 41, a saber: 1864-1904, 1905-1939, 1940-1974 y 1975-2009, sobre los que también se aplica el mismo análisis probabilístico realizado para toda la serie, con el objeto de discriminar mejor las diferencias entre subperíodos, en especial las de las dos fases contrastadas citadas.

Los procedimientos estadísticos empleados han sido: (1) los propios de la Estadística descriptiva sobre los valores de la serie global; (2) los usuales en los análisis cronológicos o de tendencias (t-test, Man-Kendall, SNHT, etc.); (3) el análisis espectral MESA; (4) el test de comparación de medias y el ANOVA para comparación de subperíodos; y (5) los ajustes a medio centenar de distribuciones de probabilidad, suponiendo límites desconocidos, y su verificación mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling (esta última, que es una modificación de la de Kolmogorov-Smirnov, es más exigente con el ajuste en las colas de la distribución).

Los paquetes o programas estadísticos principales utilizados han sido *AnClim*, Software for Time Series Analysis, versión 5.004 (STEPÁNEK, 2006) y *EasyFit*, versión 5.3, 2010, de MathWave Technologies.

3. RESULTADOS

3.1. Descripción estadística de la serie del índice NAO invernal

La serie del índice NAO analizada, que cubre, sin lagunas, el período 1864-2009, tiene 146 valores. Su media es 0.19 [-0.12, +0.50, intervalo de confianza del 95%] y su desviación tipo, 1.91 [1.77, 2.09] (Tabla 1). Los valores extremos de la serie son +5.08, que corresponde al invierno extendido de 1989 (diciembre de 1988 a marzo de 1989), y -4.89, que se registró en el invierno extendido de 1969 (diciembre de 1968 a marzo de 1969). En uno de cada cuatro inviernos el índice queda por debajo de -1 y en la misma proporción sobrepasa con claridad +1.5.

Tabla 1: Valores de los parámetros estadísticos de la serie del índice NAO invernal (1864-2009)

<i>Número de valores</i>	146
<i>Media</i>	0.19
<i>Desviación tipo</i>	1.91
<i>Varianza</i>	3.64
<i>Asimetría</i>	-0.21
<i>Curtosis</i>	-0.17
<i>Valor mínimo</i>	-4.89
<i>Percentil 5</i>	-3.39
<i>Percentil 10</i>	-2.42
<i>Percentil 25</i>	-1.03
<i>Percentil 50 (mediana)</i>	0.24
<i>Percentil 75</i>	1.61
<i>Percentil 90</i>	2.67
<i>Percentil 95</i>	3.24
<i>Valor máximo</i>	5.08

La distribución de frecuencias presenta un ligero sesgo o asimetría negativa (-0.21) y es muy levemente platicúrtica (-0.17). Ambos índices de forma difieren muy poco de los correspondientes a la campana de Gauss. En todo caso, se acepta con claridad la normalidad de la distribución.

3.2. Análisis temporal básico y espectral de la serie del índice NAO invernal

La serie temporal del índice NAO invernal (1864-2009) analizada no presenta tendencia lineal significativa según el t-test y el test de Mann-Kendall (Fig.1). Visualmente, se aprecia un aumento de las oscilaciones decadales a lo largo del tiempo. El contraste de valores entre los segundos lustros de los años 60 y de los 90 del siglo XX, donde se sitúan, precisamente, los extremos de la serie, es muy llamativo. Tanto es así que diversos test de homogeneización, como el de las desviaciones acumuladas o el SNHT, señalan una inhomogeneidad en años del intervalo 1972 a 1981, precisamente en el tránsito de la fase negativa a la positiva de la NAO.

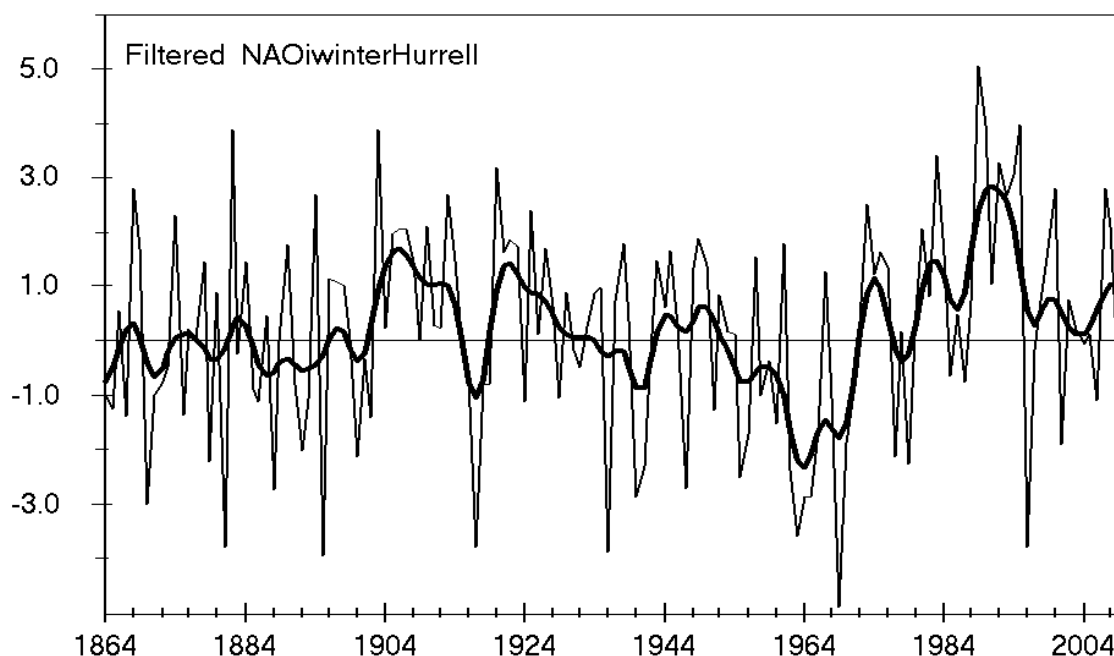


Fig.1: Serie temporal del índice NAO invernal [NAO Station Based (DJFM) Index de Hurrell] con un filtro gaussiano de paso bajo.

El análisis espectral MESA (*Maximum Entropy Spectral Analysis*) de la serie muestra picos significativos al 95% de 2.4 y 2.7 (quizá relacionados con la QBO), 4.6, 5.7 y, sobre todo, de 7.7 años (Fig.2).

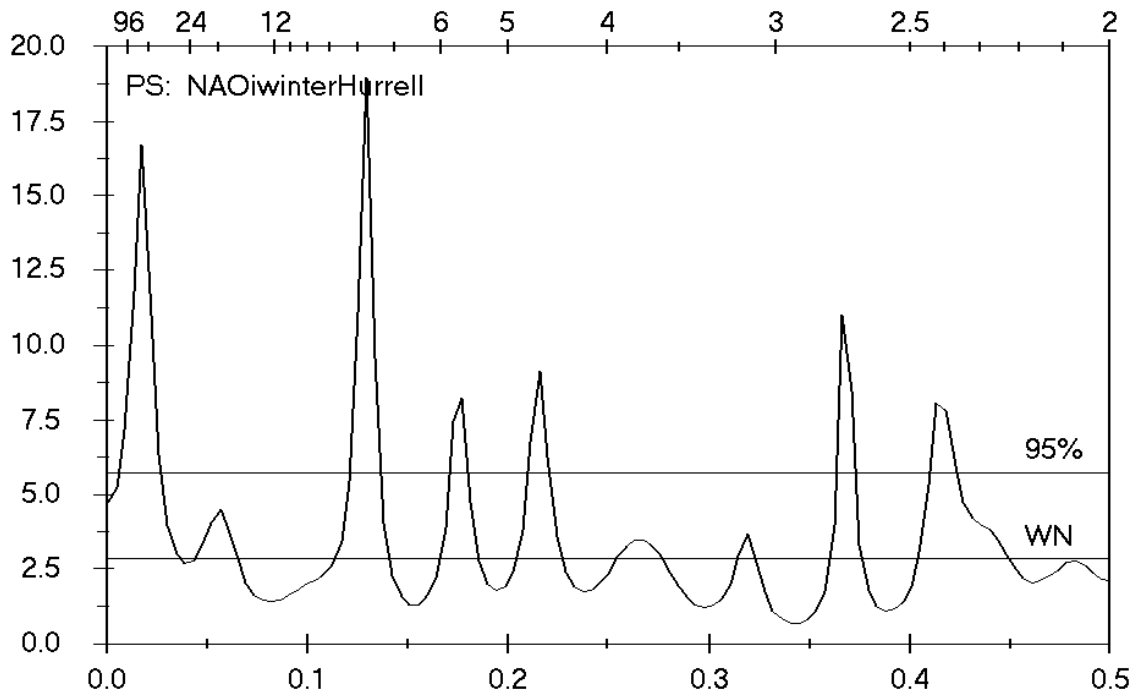


Fig.2: Picos significativos (95%) en la serie temporal del índice NAO invernal mediante MESA.

3.3. Contraste básico entre los subperíodos de la serie del índice NAO invernal

Se han considerado, a partir de la inspección visual y los estudios previos, dos subperíodos de 35 años en la segunda mitad de la serie, los 1940-1974 y 1975-2009, así como el previo a ellos de la misma longitud, 1905-1939, y el primer tramo de la serie, 1864-1904, ligeramente más largo (41 años). Los valores de los parámetros estadísticos básicos de los cuatro subperíodos se resumen en la tabla 2. Las medias más contrastadas corresponden a las de los subperíodos tercero y cuarto.

Tabla 2: Valores de los parámetros estadísticos básicos de las series del índice NAO invernal correspondientes a los 4 subperíodos considerados.

	1864-1904 (1er. subper.)	1905-1939 (2º subper.)	1940-1974 (3er.subper.)	1975-2009 (4º subper.)
<i>Nº de valores</i>	41	35	35	35
<i>Media</i>	-0.13	0.58	-0.59	0.97
<i>Desviación tipo</i>	1.87	1.58	1.87	1.97
<i>Varianza</i>	3.49	2.51	3.51	3.86
<i>Asimetría</i>	0.15	-1.09	-0.26	-0.16
<i>Curtosis</i>	-0.11	1.76	-0.86	-0.03
<i>Valor mínimo</i>	-3.97	-3.89	-4.89	-3.78
<i>Percentil 5</i>	-3.72	-3.82	-3.86	-2.56
<i>Percentil 10</i>	-2.64	-1.07	-2.87	-2.0
<i>Percentil 25</i>	-1.30	-0.2	-2.31	-0.17
<i>Percentil 50</i>	-0.23	0.72	-0.55	0.76
<i>Percentil 75</i>	1.10	1.79	1.28	2.67
<i>Percentil 90</i>	2.61	2.22	1.70	3.64

Percentil 95	3.76	2.79	2.0	4.18
Valor máximo	3.89	3.18	2.52	5.08

Admitiendo la normalidad de las cuatro distribuciones muestrales de los subperíodos, así como la igualdad de sus varianzas, un análisis ANOVA indica que al menos la media de un subperíodo es estadísticamente diferente de las restantes ($F = 5.189$, $p = 0.002$). Al aplicar el test de comparación de medias a los subperíodos tercero y cuarto, $Z = (|0.97 - (-0.59)|) / \sqrt{[(3.86/35) + (3.51/35)]} = 3.40 > 1.96$, hay que concluir que sus medias son estadísticamente distintas, con un nivel de confianza del 95%.

3.4. Ajustes probabilísticos de la serie completa de valores del índice NAO invernal y de los de sus 4 subperíodos

3.4.a. Serie completa

Como se ha dicho, la serie completa (1864-2009) es gaussiana, así lo admite con holgura el test de Kolmogorov-Smirnov. Se han buscado, sin embargo, entre un amplio catálogo de medio centenar, las distribuciones de probabilidad que ofrecen mejor ajuste. Verificado mediante el citado test y el de Anderson-Darling, las seis mejores distribuciones de ajuste son: Gamma generalizada de 4 parámetros, Weibull de 3 parámetros, Burr de 4 parámetros, Kumaraswamy, Beta y Johnson SB. La distribución Gamma generalizada de 4 parámetros, $k = 7.048$, $\alpha = 6.2488$, $\beta = 25.315$ y $\gamma = -32.319$, es la mejor, con ajustes razonables de los valores extremos de la serie. Los valores del índice NAO invernal esperados para períodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, mediante la citada distribución, son: -3.95 y 3.86; -4.55 y 4.29; -5.12 y 4.69; y -5.82 y 5.16, respectivamente.

De todos modos, las diferencias entre los ajustes ofrecidos por las citadas distribuciones e, incluso, con otras, como la Normal, son muy pequeñas (Fig.3).

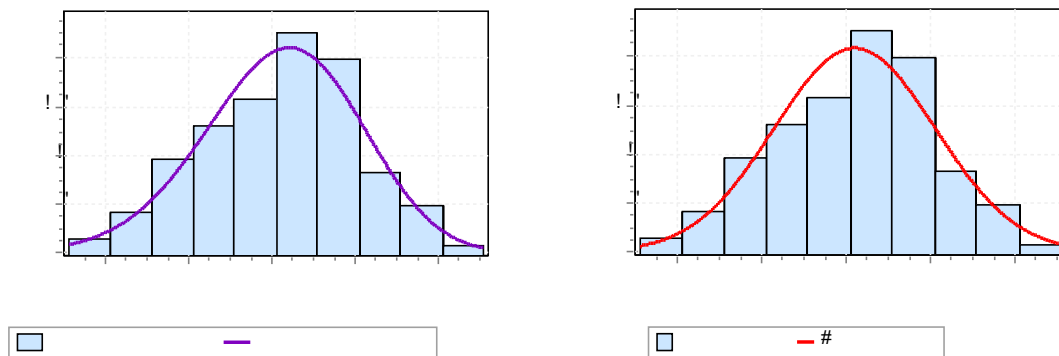


Fig.3: Histogramas y funciones de densidad de probabilidad de las distribuciones Gamma generalizada de 4 parámetros (izquierda) y Normal (derecha), que muestran muy escasas diferencias entre sí.

Con las 6 distribuciones citadas se han hallado los valores máximo y mínimo del índice NAO invernal para períodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 200 y 500 años. Como era previsible, las diferencias entre los valores estimados para cada período de retorno son pequeñas (Tabla 3). Tan sólo a modo indicativo, para un período de retorno de medio milenio, los valores extremos sobrepasan, en general, el 5 en valor absoluto.

Tabla 3: Valores extremos del índice NAO invernal para diferentes períodos de retorno estimados mediante las seis mejores distribuciones de ajuste de la serie completa.

<i>T</i>	<i>Gamma generalizad.</i> $k=7.048$ $\alpha=6.2488$ $\beta=25.315$ $\gamma=-32.319$	<i>Weibull</i> $\alpha=4.3959$ $\beta=8.0549$ $\gamma=-7.1458$	<i>Burr</i> $k=79.244$ $\alpha=4.4811$ $\beta=21.561$ $\gamma=-7.2334$	<i>Kumaraswamy</i> $\alpha1=4.2275$ $\alpha2=48.725$ $a=-6.9589$ $b=12.825$	<i>Beta</i> $\alpha1=14.915$ $\alpha2=9.4223$ $a=-11.837$ $b=7.7928$	<i>Johnson SB</i> $\gamma=-1.1079$ $\delta=2.5988$ $\lambda=21.357$ $\xi=-12.653$
5	-1.39, +1.80	-1.41, +1.83	-1.42, +1.82	-1.43, +1.84	-1.42, +1.84	-1.43, +1.85
10	-2.29, +2.57	-2.32, +2.59	-2.31, +2.59	-2.33, +2.60	-2.31, +2.62	-2.33, +2.62
50	-3.95, +3.86	-3.83, +3.84	-3.83, +3.85	-3.82, +3.83	-3.85, +3.85	-3.90, +3.82
100	-4.55, +4.29	-4.32, +4.26	-4.32, +4.27	-4.30, +4.24	-4.38, +4.24	-4.43, +4.21
200	-5.12, +4.69	-4.73, +4.62	-4.74, +4.64	-4.70, +4.60	-4.85, +4.58	-4.91, +4.54
500	-5.82, +5.16	-5.19, +5.06	-5.20, +5.09	-5.14, +5.02	-5.40, +4.96	-5.48, +4.91

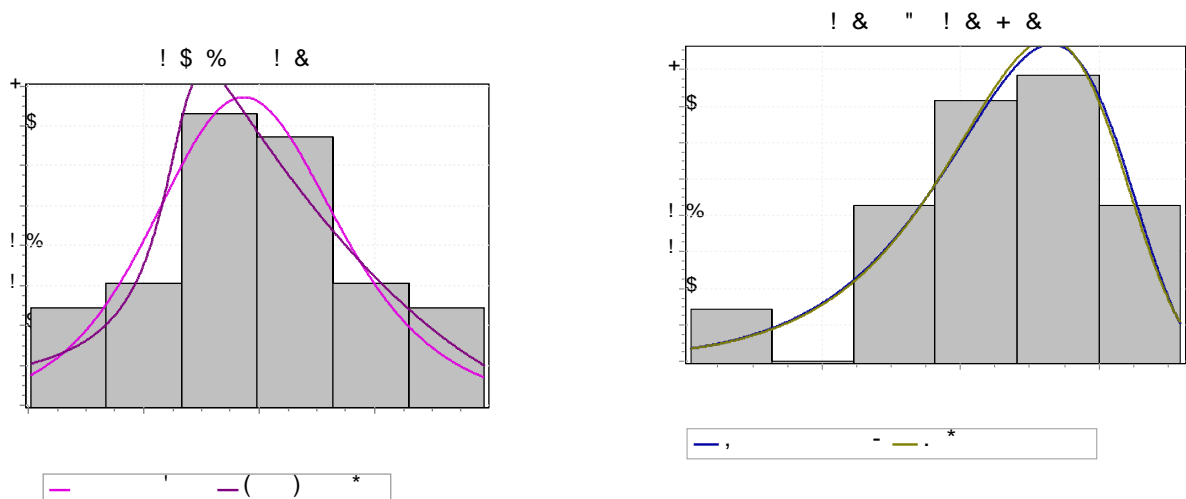
3.4.b. Series de los subperíodos

Se ha realizado el mismo análisis probabilístico sobre los cuatro subperíodos, obteniéndose la relación de las mejores distribuciones de ajuste de la tabla 4.

Tabla 4: Las mejores distribuciones de probabilidad de ajuste de los valores del índice NAO invernal de los 4 subperíodos

1864-1904	1905-1939	1940-1974	1975-2009
Wakeby (40.845, 13.827, 2.8213, -0.34859, -4.9799)	Kumaraswamy (26.967, 9.8068, -34.087, 4.495)	Johnson SB (-0.32036, 0.89131, 8.4311, -5.4043)	Wakeby (80.594, 19.295, 3.4999, -0.49697, -5.3418)
Logística generalizada (0.03813, 1.0623, -0.19992)	Burr (113.25, 392.52, 485.15, -478.07)	Beta (2.0049, 1.3263, -5.3589, 2.5839)	Normal (1.9651, 0.96743)

En la Fig.4 se representan los histogramas de cada subperíodo junto con las parejas de funciones de densidad de probabilidad de mejor ajuste.



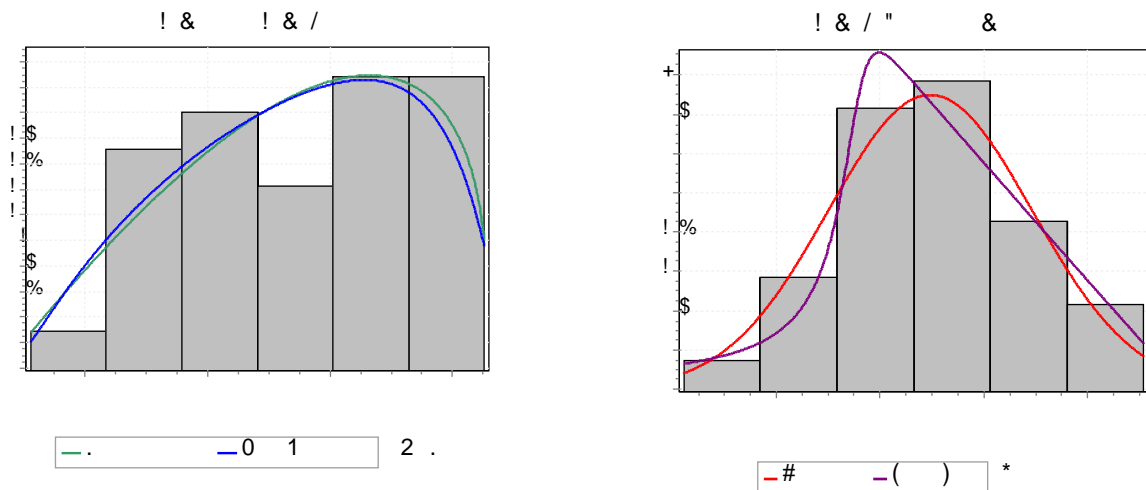


Fig.4: Histogramas y funciones de densidad de probabilidad de las distribuciones que mejor ajustan las distribuciones empíricas de los cuatro subperíodos.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La distribución de frecuencias de los valores del índice NAO invernal del período 1940-1974 presenta una forma claramente diferenciada del resto, bimodal, frente a las de los otros tres subperíodos, unimodales, aunque los tests de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling permiten aceptar la normalidad. Las funciones de densidad de probabilidad de mejor ajuste, Beta y Johnson SB, muestran unas formas convexas rotundas. Al comparar las distribuciones empíricas de los períodos tercero y cuarto sobresale el hecho de que los valores de los percentiles 75, 90 y 95 del cuarto período son aproximadamente el doble que los del tercero (Tabla 2), lo que expresa a las claras la anomalía positiva del índice NAO invernal de las últimas décadas, respecto al período de los años 40 a mediados de los 70 del siglo XX.

La distinta forma y estructura frecuencial, así como la diferencia entre las medias, de los valores del índice NAO invernal de los períodos 1940-1974 y 1975-2009 invita a aceptar que constituyen conjuntos estadísticamente diferentes, definiendo en su secuencia temporal dos fases de carácter contrastado. La práctica coincidencia de la fase última, positiva, con el período de manifestación más claro del calentamiento global no es suficiente, sin embargo, para aceptar una relación causal entre el cambio climático y fases positivas de la NAO. Más plausible puede ser la hipótesis de un aumento de la variabilidad del índice NAO invernal en relación con el calentamiento global, acorde con el incremento de la varianza a lo largo del siglo XX y comienzos del XXI (Tabla 2).

Por la forma de la distribución de frecuencias y la anomalía negativa de los valores el tercer período es el más especial, mientras que por la anomalía positiva lo es el cuarto. En todo caso, los valores del índice NAO invernal muestran un comportamiento decadal bastante variable, habiendo aumentando los contrastes a lo largo del período analizado.

La normalidad de la distribución de valores del índice NAO invernal puede ser aceptada en el período completo y en los 4 subperíodos. En el caso de la serie completa, la distribución de Gauss es un buen modelo probabilístico, aunque haya otras varias que realicen un ajuste de una bondad ligeramente superior. Tan sólo en el tercer período, con años con un índice muy

negativo, el aspecto de la distribución empírica tiende a alejarse del patrón gaussiano. Cabe sospechar incluso una mezcla de poblaciones. En todo caso, la fase negativa de la NAO correspondiente al período 1940-1974 es, desde el análisis probabilístico, la más anómala del último siglo y medio.

5. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se encuadra en el proyecto ‘Estructura diaria de la precipitación en Cataluña y sus conexiones mediterráneas’ (RECABA), CGL2008-06129-C02-01 (Ministerio de Ciencia e Innovación), y en los trabajos del Grupo de Climatología 2009 SGR443 (Generalitat de Catalunya) y del Instituto del Agua (UB).

6. REFERENCIAS

- ATTRILL, M.J. y POWER, M. (2002): “Climatic influence on a marine fish assemblage”. *Nature*, 417, pp. 275-278.
- GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C.; LOPEZ-BUSTINS, J.A.; STEPANEK P.; MARTIN-VIDE, J. y DE LUIS, M. (2009). "Monthly precipitation trends on the Mediterranean façade of the Iberian Peninsula during the second half of the 20th century (1951-2000)". *International Journal of Climatology*, 29, pp. 1415-1429.
- HURRELL, J. W. (1995): “Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation”. *Science*, 269, pp. 676–679.
- KETTLEWELL, P.S.; STEPHENSON, D.; ATKINSON, M.D. y HOLLINS P.D. (2003): “Summer rainfall and wheat grain quality: relationships with the North Atlantic Oscillation”. *Weather*, 58, pp. 1–9.
- LOPEZ-BUSTINS, J.A.; MARTIN-VIDE, J. y SANCHEZ-LORENZO, A. (2008): “Iberian winter rainfall trends based upon changes in teleconnection and circulation patterns”. *Global and Planetary Change*, 63, 2-3, pp. 171-176.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. y VICENTE-SERRANO, S.M. (2008): “Positive and negative phases of the wintertime north Atlantic oscillation and drought occurrence over Europe: A multitemporal-scale approach”. *Journal of Climate*, 21, pp. 1220-1243.
- MARTÍN VIDE, J. y FERNÁNDEZ, D.(2001): "El índice NAO y la precipitación mensual en la España peninsular". *Investigaciones Geográficas*, 26, pp. 41-58, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante.
- POCIASK-KARTECZKA, J. (2006): “River Hydrology and the North Atlantic Oscillation: A General Review”. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35, 6, pp. 312–314.
- POZO-VÁZQUEZ, D.; TOVAR-PESCADOR, J.; GÁMIZ-FORTIS, S.R.; ESTEBAN-PARRA, M.J. y CASTRO-DÍEZ, Y. (2004): “NAO and solar radiation variability in the European North Atlantic region”. *Geophysical Research Letters*, 31, 5, L05201.
- RODRÍGUEZ-PUEBLA. C.; ENCINAS, A.H. y SÁENZ, J. (2001): “Winter precipitation over the Iberian Peninsula and its relationship to circulation indices”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5 (2), pp. 233-244.
- STEPÁNEK, P. (2006): *AnClim-software for time series analysis*. Dept. of Geography, Fac. of Sciences, Masaryk University, Brno, 1.6 MB.
- TRIGO, R.M.; POZO-VAZQUEZ, D.; OSBORN, T.J.; CASTRO-DIEZ, Y.; GÁMIZ-FORTIS, G. y ESTEBAN-PARRA, M.J. (2004): “North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow, and water resources in the Iberian Peninsula”. *International Journal of Climatology*, 24, pp. 925–944.

