

Capítulo 5

Sobre la Predicción de la Oscilación del Atlántico Norte

Isabel Fernández, José Miguel Pacheco
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España

...having prepared all their musical instruments, played on them for three hours without intermission; so that I was quite stunned with the noise; neither could I possibly guess the meaning, till my tutor informed me.

Jonathan Swift, Gulliver's travels: A voyage to Laputa, Chapter 2

Introducción: ¿Cuál es la pregunta importante?

En la actualidad existe un alto grado de interés en los fenómenos climáticos, debido a la creciente conciencia de la importancia del clima en cuestiones de todo tipo, ya sean económicas, ambientales o de simple curiosidad científica.

Sin embargo, conviene aclarar que ante el clima los científicos se enfrentan a un problema de extraordinaria complejidad, y las presiones -procedentes de ámbitos tan dispares como el político-económico, los conservacionistas y varios más- no hacen sino aumentar su complicación natural: Incluso la propia noción de método científico se ve a veces en entredicho. Además, la importancia que se da -cada vez más- a las técnicas estadístico-matemáticas oculta con demasiada frecuencia una gran ignorancia acerca de los mecanismos físicos subyacentes.

"Clima" es un concepto general que no admite definiciones tajantes. Sin excesiva precisión, se puede decir que es "un estado medio del tiempo meteorológico" -descrito por algunas variables seleccionadas, tales como temperatura o presión atmosférica- en un área suficientemente extensa y a lo largo de un tiempo razonablemente largo. En fórmulas, puede escribirse que dada un área espacial Ω y un intervalo I de tiempo, si V_m es una variable

meteorológica, entonces se puede definir (Fernández, 2000) la correspondiente variable climática V_c mediante la fórmula siguiente, donde k es una constante de normalización:

$$V_c = k \int_{\Omega \times I} V_m d\Omega dt$$

Es importante señalar que siempre debe especificarse la zona espacial a la que se refieran los estudios climáticos, y que la noción de "intervalo razonablemente largo" es muy difusa. Por ejemplo, si se considera la totalidad de la Tierra como dominio espacial, y como intervalo de tiempo todo el de existencia del globo terrestre, es obvio que tal descripción media será de poca ayuda. Dado que existe una escala natural asociada a la duración de la vida humana, es corriente utilizar intervalos del orden de las decenas de años. Por otra parte, la combinación de latitud geográfica, masa continental u oceánica y circulación atmosférica define ciertas grandes áreas climáticas más o menos claras. En todo caso, al variar el intervalo I deslizándolo sobre el eje del tiempo, la fórmula provee una media móvil que cambia de valor más lentamente que la variable meteorológica original.

Se deduce de los párrafos anteriores que la idea interesante para explorar no es tanto la de "clima" como la de "variabilidad climática". Es conocido que –siempre desde la perspectiva de una escala temporal tan pequeña como la duración de una vida humana media– el clima ha sufrido variaciones a lo largo de la historia de la Tierra, y que la distribución espacial de las áreas climáticas también ha pasado por diferentes estadios. Así pues, la pregunta natural es ¿cuáles son las causas de la variabilidad climática?, y de las posibles contestaciones se podrán extraer conclusiones acerca de la existencia de hipotéticos "cambios climáticos".

Las causas a que se refiere la pregunta son varias, aunque se pueden destacar algunas con mayor claridad. En primer lugar, y para escalas enormes de tiempo, están las astronómicas relacionadas con el cambio de excentricidad de la órbita terrestre, las variaciones del ángulo de la eclíptica y la precesión de los equinoccios. Estos fenómenos hacen variar la relación de la Tierra con su fuente de energía, el Sol –que a estos efectos se considera constante–, en ciclos de decenas de miles de años conocidos como ciclos de Milankovich. Son periodicidades utilizadas para estudios paleontológicos y observadas a partir de los registros fósiles y estratigráficos. Desde el punto de vista de la variable más interesante, la temperatura del aire cerca de la superficie terrestre, la amplitud de las ondas de Milankovich es de sólo unos pocos grados centígrados. Existen también otros ciclos más cortos, cuyo periodo es de cientos de años, que se creen relacionados con episodios de gran actividad volcánica, perturbaciones astronómicas del sistema Tierra-Luna, algunos otros ciclos solares, etc. y cuya amplitud térmica es aún menor. Es importante insistir en estas ideas, puesto que la señal observada, en el mejor de los casos, durante unos 200 años, presenta fluctuaciones que son difíciles de discriminar respecto de los grandes ciclos. De ahí la extrema dificultad de hacer afirmaciones tajantes acerca de los cambios en el clima (ver, p.ej., Diks y Mudelsee, 2000; Kageyama et al., 1999; Monahan et al., 2000).

Para estudios climáticos más próximos a la vida cotidiana, la fuente más evidente de variabilidad es el ciclo de las estaciones del año –de origen astronómico, no se olvide–, que combinado con las inercias de las circulaciones generales atmosférica y oceánica, es la causa más cercana de la distribución climática. Por tanto, hay que volver la vista hacia la memoria histórica –ahora sí, a escalas más humanas– para analizar si hay y cómo han sido los posibles ciclos precedentes para poder plantearse con claridad los dos problemas más importantes: La separación de causas a escalas pequeñas y las posibles predicciones o simulaciones.

La NAO

Descripción general

La Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation, o NAO en sus siglas inglesas) consiste en una pauta climática espacio-temporal que relaciona las características de las estaciones del año entre el Atlántico Noroccidental y Escandinavia, por una parte, y el área Sureste de Estados Unidos con Oriente Medio, por otra. La primera conexión es bastante conocida y bien documentada, mientras que la segunda ha sido puesta de relieve más recientemente. En líneas generales esta pauta recuerda a un modo de vibración esférico con números de onda 3 ó 4 en sendas direcciones espaciales. Ambas conexiones dependen, meteorológicamente hablando, de la diferencia de temperatura superficial del mar (SST, sea-surface temperature, ver Hurrell y Trenberth, 1999) o de presión atmosférica al nivel del mar (SLP, sea-level pressure, más usada en la actualidad) entre dos centros de acción ubicados en el Atlántico Norte –de ahí el nombre–, el Anticiclón de las Azores al Sur y el Centro de Bajas Presiones de Islandia, al Norte. Las mediciones habituales se realizan al Norte en Stykkisholmur (Islandia) y al Sur en Azores, Lisboa o Gibraltar, según qué autores. Existen registros históricos, reconstruidos de forma robusta y fiable, desde hace unos 140 años, y se llama “índice de la NAO”, a la diferencia de valores entre el Sur y el Norte, siempre en este orden. El índice de la NAO es, por tanto, una serie temporal con el siguiente aspecto (la variable representada es la diferencia de anomalías de SST, tras una normalización, tomada de www.jisao.washington.edu/data_sets/nao/):

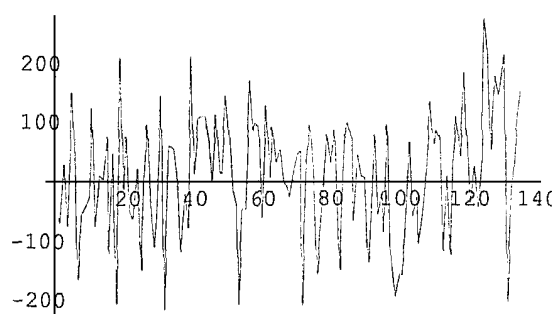


Figura 1. Serie temporal del índice de la NAO.

El índice ha sido, y sigue siéndolo en la actualidad, comparado con gran número de series de diferentes variables, tanto observadas como compuestas, para extraer correlaciones e interpretaciones que ayuden a aclarar la verdadera naturaleza de la NAO. Desde la definición de clima que se está usando, el trabajo se centra en las escalas anual, interanual, bianual y decadal.

La serie es relativamente corta, por lo que los resultados de los análisis típicos realizados sobre ella deben tomarse con mucha precaución. Por ejemplo, comparar con (Billings et al., 2001). También es interesante señalar que la poca información predictiva que ofrece la serie debería implicar un mayor esfuerzo en comprender la distribución espacial tetrapolar que define la oscilación. Esto no ocurre, por ejemplo, en ENSO, donde un simple estudio espectral ya muestra unas periodicidades claras. Por tanto, la consideración de ruidos tiene un papel muy importante en el estudio, interpretación y predicción de la NAO.

Llevando a cabo unos suavizados de la serie con medias móviles de 10, 20 y 30 puntos respectivamente, se obtienen la siguientes series:

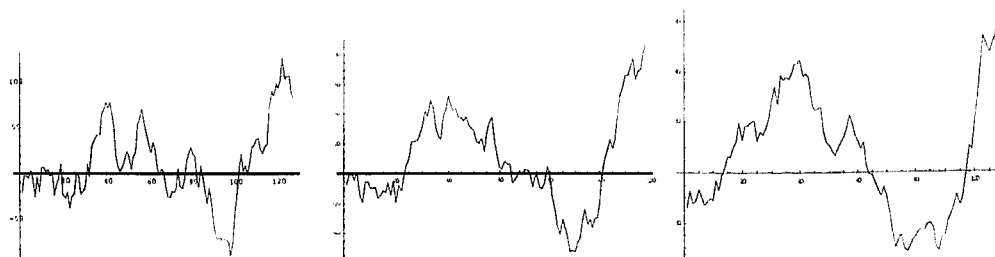


Figura 2. Suavizaciones del índice de la NAO, de izquierda a derecha, con medias móviles de 10, 20 y 30 puntos respectivamente.

que muestran bastante bien el inicio de una pauta oscilatoria con un periodo entre 30 y 50 años, de acuerdo con las descripciones habituales en la literatura, del tipo “...se ha observado un último periodo de unos 25 años en que la NAO se halla en fase positiva...” (Marshall y Kushnir, 1997) a las que siguen comentarios acerca de la pertinencia o no de considerar la influencia humana en el clima. Sin embargo, esta primera impresión debe ser matizada cuidadosamente y descrita en los términos adecuados.

Análisis elemental del índice de la NAO

La apariencia de los gráficos anteriores sugiere extraer la tendencia principal. Para ello basta con ajustar un polinomio de grado no muy elevado, 2 ó 3. El de grado 2 ya recoge bien la impresión general de las descripciones como la cita de un poco más arriba:

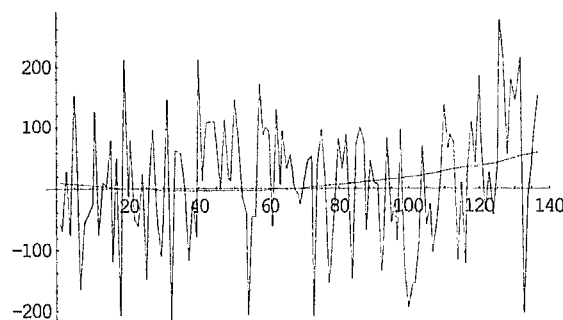


Figura 3. El índice de la NAO y su polinomio de ajuste de segundo grado.

por lo que basta con este ajuste. El polinomio ajustado resulta ser (t son años)

$$p(t) = 11.86 - 0.665t + 0.0734t^2$$

y el resultado de eliminar esta tendencia viene dado por la gráfica siguiente:

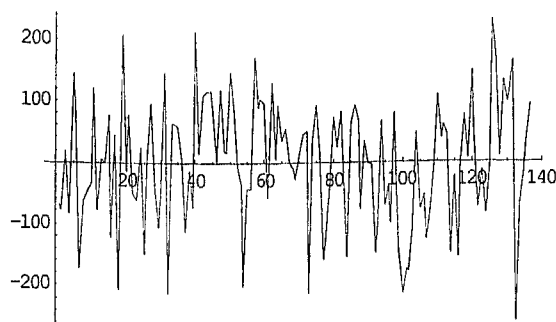


Figura 4. El índice de la NAO una vez eliminada la tendencia.

A partir de ahora el análisis se llevará a cabo sobre esta serie. El primer paso es, obviamente, pasar al dominio de frecuencias y hallar el espectro. Su aspecto es:

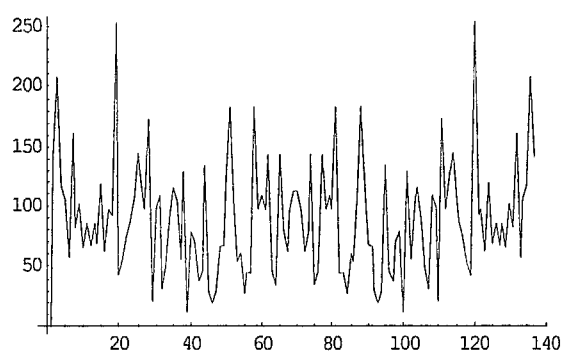


Figura 5. Espectro del índice de la NAO.

en el que se observa un comportamiento de “cola gruesa”, sin ninguna frecuencia que presente una contribución dominante, en otras palabras, aparece como un comportamiento caótico o ruidoso. La discriminación entre ambos conceptos será el objeto de los próximos párrafos, y se halla en la base de la idea de predecibilidad.

Predicción

Hasta ahora se dispone de:

- Una descripción fenomenológica espacio-temporal de la NAO, de la que se ha extraído el índice anterior, a base de ir condensando información con ayuda de la interpretación física de datos meteorológicos, ambientales e históricos de carácter experimental.
- Una serie temporal, ya convenientemente tratada, con un espectro de cola gruesa, y relacionada con el fenómeno climático NAO.

En este apartado se tratará únicamente acerca de la predicción en el ámbito temporal. Dicho de otra forma, se estudiará sólo la construcción de predictores del tipo

$$\hat{X}_t = F(\{X_\tau\}_{\tau < t})$$

lo que limita la tarea a la consideración de las informaciones b).

Es fácil presentar una jerarquía de predictores elementales que bastarán para tener una noción del interés del problema y de sus dificultades metodológicas. El primer predictor se conoce con el nombre de *permanencia*. Se reduce a pensar que el dato observable en el siguiente instante será el último observado:

$$\hat{X}_t = X_{t-1}$$

Este predictor suele funcionar bien a corto plazo y con frecuencia se considera como el "adversario a batir" en el terreno de la predicción práctica.

Un refinamiento del anterior es un predictor lineal $\hat{X}_t = kX_{t-1}$, que equivale, en términos estadísticos, a formular para la serie un modelo autorregresivo de primer orden ó AR(1):

$$X_t = kX_{t-1} + \varepsilon_t, \text{ o bien } X_t - kX_{t-1} = \varepsilon_t,$$

siendo ε_t un término de *ruido* que admite muchas interpretaciones. El ruido puede ser blanco o *coloreado*, donde estos términos significan que no existe memoria (blanco) de otras situaciones, o bien sí existe esa memoria (coloreado). En el caso coloreado se dice que el ruido se *enrojece* si se mantiene una cierta memoria del pasado, o que se *azulea* si se presenta correlado con el futuro. Por supuesto, la memoria se mide con la función de autocorrelación $Aut(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \psi(i, j)$, que en el caso blanco es la delta de Kronecker δ_{ij} .

La introducción de la idea de ruido en el análisis del fenómeno NAO es interesante debido a que una interpretación habitual adjudica la variabilidad climática de NAO a causas puramente meteorológicas, siendo una cuestión importante el que sean troposféricas o estratosféricas. En ambos casos la variación es rápida con respecto a las escalas climáticas y sugiere de manera natural su consideración como ruidos en cualquier modelo.

El modelo $\varepsilon_t = X_t - kX_{t-1}$, se puede considerar como un caso particular de $\varepsilon_t = G(X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots)$, que permite pensar el ruido como el resultado de un proceso con memoria -al menos teóricamente- hasta del principio de la serie de datos. Para ello, se escribirá $\varepsilon_t = G(X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots)$ en la forma:

$$\varepsilon_t = G(X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots) = (F(\nabla, h) \circ (1 - k\nabla))(X_t)$$

donde ∇ es el operador sobre la serie definido por $\nabla X_{t-1} = X_t$ y h es un parámetro para medir el "grado de color" del ruido. Un poco de manipulación mostrará cómo expresar esta idea en fórmulas y relacionarla con la propiedad de difusión del ruido blanco gaussiano. Es conocido (por ejemplo a partir de la ecuación de difusión), que la integración de un modelo browniano con ruido blanco gaussiano muestra que la desviación promedio de la señal crece como la raíz cuadrada del tiempo, $t^{\frac{1}{2}}$, lo que justifica las siguientes apreciaciones. La elección

$$F(\nabla, h) = (1 - \nabla)^h$$

permite, poniendo $h = 0$, reconstruir el modelo AR(1) con ruido blanco gaussiano:

$$\varepsilon_t = ((1 - \nabla)^h \circ (1 - k\nabla))(X_t) = (1 - k\nabla)(X_t) = X_t - kX_{t-1}$$

Además, teniendo en cuenta el desarrollo generalizado del binomio

$$F(\nabla, h) = (1 - \nabla)^h = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{h}{n} (-1)^n \nabla^n$$

se observa que para una elección juiciosa del exponente h se pueden representar ruidos de diferentes clases con la misma fórmula. En efecto, la expresión anterior introduce cualquier valor X_{t-n} , con una ponderación adecuada, en la fórmula del ruido. Existe un índice para medir la memoria residual en series temporales, conocido como el "exponente de Hurst", $Hurst(\{X_t\})$, que resulta ser simplemente la pendiente de la curva que representa las desviaciones de la señal frente al tiempo, por lo que el exponente de Hurst del caso con ruido blanco será precisamente $1/2$. Por tanto, una elección razonable para el parámetro h será:

$$h = Hurst(\{X_t\}) - 1/2$$

Cuando $Hurst(\{X_t\}) = 1/2$, se tiene $h = 0$ y por tanto se trata de un ruido blanco, como ya se ha dicho. Si el exponente mayor que $1/2$, entonces $h > 0$ y se tiene un ruido rojo, o sea con memoria del pasado. En caso contrario, ello indica que el futuro evolucionará de modo contrario al pasado. Todo este cálculo se conoce bajo el nombre de "modelos de integración fraccionaria".

Para la serie del índice de la NAO, el cálculo del exponente da el siguiente resultado:

$$Hurst(NAO) = 0.6473...$$

ligeramente superior al valor crítico $1/2$ correspondiente al ruido blanco, indicando además un cierto enrojecimiento del ruido.

Llegado a este punto, un lego en la materia daría por bueno que el índice NAO está dado por un ruido ligeramente rojo y pasaría a utilizarlo sin más como tal. Sin embargo, es ahora cuando aparecen dos cuestiones relacionadas estrechamente con la idea de método inherente a la investigación científica:

- 1) La aceptación de "la NAO es un proceso de ruido rojo" debe posponerse hasta su contraste mediante los métodos habituales de la Estadística, formulando los correspondientes *tests* de hipótesis.
- 2) Hecho lo anterior, hay que tener en cuenta los aspectos fenomenológicos o físicos: ¿A qué *mecanismos reales* se debe adjudicar la variabilidad de la NAO? Con excesiva frecuencia, el aparato matemático hace olvidar el hecho físico subyacente a la serie estudiada.

Una contestación parcial a la cuestión 1) se puede obtener mediante el concepto de "horizonte de predicción", esto es, el número de unidades temporales para las que la predicción se considera aceptable (por supuesto, mediante los adecuados contrastes de hipótesis). El horizonte de predicción es el inverso del exponente de Lyapunov de la serie. Un análisis fractal de la serie dada, tomado con todas las reservas debido a su poca longitud (Gimeno, 2001), da los siguientes resultados:

Dimensión de inmersión = 6, un valor razonable en estudios climáticos.

Dimensión fractal (dimensión de correlación) = 4.58 ± 0.31 , indicio de poca estructura determinista en los datos de la serie.

Exponente de Lyapunov =

= 0.19 ± 0.08 (calculado con 4 pasos de integración)

= 0.13 ± 0.065 (5 pasos)

= 0.102 ± 0.07 (6 pasos)

Dado que la variabilidad del exponente de Lyapunov es del orden del 50% del valor estimado y aumenta con el número de pasos de integración- aceptando la estimación de 5 pasos se obtiene un horizonte de predicción variando entre 5.13 y 15.38 años, que aunque no parece corresponderse con ninguna variable meteorológica o climática concreta, es del orden de las escalas más reconocidas en el estudio de la NAO (Hurrell, 1995). En otras palabras, la *predecibilidad del índice de la NAO es muy baja, lo que favorece apostar por la hipótesis de consistir en un ruido rojizo (o rosado)*. Para contestar a la segunda cuestión se hace necesario un apartado nuevo.

Simulación

En el apartado de explicación de la NAO, se ha indicado la pertinencia de analizar con cuidado la variación espacial de las magnitudes que definen el fenómeno NAO, dado que un único índice, a pesar de la ventaja de representarse mediante modelos sencillos, no capta las oscilaciones espaciales.

Una solución al problema planteado se obtiene mediante experimentos de simulación llevados a cabo con modelos climáticos numéricos. Los resultados obtenidos a partir de un modelo numérico se producen tras resolver la discretización espacial y temporal de un conjunto de ecuaciones y condiciones suplementarias. Dejando de lado los tecnicismos numéricos, las expresiones intervinientes se pueden dividir en varios grupos, para el caso de un modelo lo más completo posible, con circulación general de la Atmósfera y del Océano, o "Coupled Atmosphere Ocean General Circulation Model" (CAOGCM):

- a) Ecuaciones de la circulación atmosférica:
 - 1. Ecuaciones del movimiento
 - 2. Ecuaciones de estado
 - 3. Ecuaciones termodinámicas
- b) Ecuaciones de la circulación oceánica:
 - 1. Ecuaciones del movimiento
 - 2. Ecuaciones de estado
 - 3. Ecuaciones termodinámicas
- c) Ecuaciones relativas a los casquetes polares:
 - 1. Ecuaciones para el grosor y extensión de la capa de hielo
 - 2. Ecuaciones termodinámicas
- d) Condiciones interfaciales:
 - 1. Ecuaciones para las transferencias de cantidades mecánicas y termodinámicas entre los componentes de a), b) y c).
- e) Expresiones para los forzamientos externos por gases de efecto invernadero u otras consideraciones de interés. Modificando adecuadamente los ítems de este apartado se consigue simular la respuesta climática a los cambios introducidos, que pueden ser extrapolaciones de datos de origen antrópico o de catástrofes naturales, etc.

El modelo numérico se integra sobre un recinto espacio temporal (tal y como se ha visto anteriormente) $\Omega \times I$, donde lo más es habitual que Ω sea un hemisferio, y el intervalo temporal

l puede extenderse, según qué experimentos, desde unas cuantas decenas de años hasta más de mil. Así se obtiene una descripción discreta de la evolución de las variables que interesen, a partir de la que se pueden construir los correspondientes mapas e índices que se compararán después con los registros existentes.

Se halla en marcha el proyecto CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), que estudia 17 modelos numéricos del tipo recién descrito y compara sus resultados. Según los responsables del proyecto, al menos 13 de los 17 modelos competidores reproducen la estructura tetrapolar de la NAO. La comprobación se efectúa habitualmente comparando las EOF de los datos y las correspondientes a la salida de los modelos, a través de los contrastes de hipótesis pertinentes. El índice de la NAO calculado a partir de las simulaciones de unos 10 modelos presenta las características de un ruido ligeramente rojo, coincidiendo con el análisis del apartado 3.

La importancia, cada vez más aceptada, del ruido meteorológico en la NAO está enraizada en consideraciones físicas. Un problema aún no resuelto (Von Storch et al., 2000) es discriminar si el ruido es *causa* o *efecto*. La complicación del sistema climático es tal que los modelos numéricos, por refinados que sean, no pueden dar cabida a todas las variables implicadas: Siempre hay una selección de variables consideradas esenciales, y el resto se parametrizan o se introducen como ruidos. Esta elección puede aclarar el verdadero papel físico del ruido: Si a la pregunta ¿cómo reacciona la salida del modelo a la consideración como ruido de unas u otras variables? se obtienen respuestas coherentes, se podrá afirmar que la NAO es, en cierto sentido, una pauta climática debida a la influencia del ruido meteorológico.

Pero también puede ser cierto lo contrario, esto es, que la NAO actúe como “correa transportadora” para la evolución de las variables meteorológicas (Corti, 1999; Hasselman, 1999). La duda continúa.

A modo de conclusión

El estudio que se acaba de presentar acerca de la predecibilidad de la NAO puede resumirse en dos ideas esenciales:

- 1) Desde el punto de vista de la predicción mediante el puro índice de la NAO, no existen resultados concluyentes, a excepción de la interpretación de la señal como un ruido ligeramente rojizo. El papel del ruido en los modelos climáticos de todo tipo no debe subestimarse, más aún si no está todavía claro si debe considerarse como fuente o resultado de la variabilidad. La poca longitud de la serie sugiere también la utilización de técnicas de análisis “bootstrap” mediante la generación de muestras aleatorias en el cuerpo de la serie y sus estudio con estas herramientas.
- 2) Dada la importancia de las pautas espaciales en la caracterización de la NOA, el análisis de los resultados de las simulaciones, provistos por los diferentes modelos acoplados de circulación, parece imponerse como la mejor estrategia a la hora de intentar predecir la NAO.

Referencias

- Billings L, Schwartz I, Pancrazio J, Schnur J (2001) Dynamic and geometric analysis of short time series: a new comparative approach to cell-based biosensors, *Physics Letters A*, 286, (217-224).
- Corti S, Molteni F, Palmer T (1999) Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes, *Nature*, 398, (799-802).

- Diks C, Mudelsee M (2000) Redundancies in the Earth's climatological time series, *Physics Letters A* 275, (407-414).
- Fernández I, Pacheco J (2000) Bases para la predicción de ENSO, en: García R y Hernández E (eds) *El Niño, climatología, efectos y predicción*. (93-132).
- Gimeno L, García R, Pacheco J, Hernández E, Ribera P (2001) Predictability of global surface temperature by means of nonlinear analysis, *Earth and Planet. Science Letters*, 184, (561-565).
- Hasselman K (1999) Climate change: Linear and nonlinear signatures, *Nature*, 398, (755-756).
- Hurrell J (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation, *Science*, 279, (676-679).
- Hurrell J, Trenberth K (1999) Global SST Analysis: Multiple Problems and their Implications for Climate Analysis, Modeling and Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, www.cgd.ucar.edu/cas/papers/bams99/
- Kageyama M, D'Andrea F, Ramstein G, Valdés P, Vautard R (1999) Weather regimes in past climate atmospheric general circulation model simulations, *Climate Dynamics*, 15, (773-793).
- Marshall J, Kushnir Y (1997) A "White Paper" on Atlantic Climate Variability, en la dirección web <http://geoid.mit.edu/acep/avehtml.html>
- Monahan A, Fyfe J, Flato G (2000) A Regime View of Northern Hemisphere Atmospheric Variability and Change under Global Warming, *Geophys. Res. Letters*, 27(8), (1139-1142).
- Stephenson D, Pavan V (2001) How well do coupled climate models simulate the North Atlantic Oscillation?, *Journal of Climate*, (aparecerá)
- Von Storch H, Von Storch J, Müller P (2000) Noise in the Climate System –Ubiquitous, Constitutive and Concealing, en: Engquist B, Schmid W (eds) *Mathematics Unlimited: 2001 and Beyond*, (1179-1194).