

**ALGUNOS MÉTODOS CUANTITATIVOS EN CLIMATOLOGÍA
HISTÓRICA: LAS CORRELACIONES LINEALES CON DESFASE
EN EL ANÁLISIS DE SERIES**

Mariano BARRIENDOS VALLVÉ
Javier MARTÍN VIDE
*Departamento de Geografía Física y A.G.R.
Universidad de Barcelona*

RESUMEN: Las investigaciones de Climatología histórica no suelen hacer uso de procedimientos estadísticos complejos, por la naturaleza de los datos de partida. Las correlaciones lineales con desfase temporal han permitido revelar las inercias en el comportamiento cronológico de sequías e inundaciones durante la Pequeña Edad de Hielo en Cataluña.

ABSTRACT: Research in Historical Climatology does not commonly use advanced statistical procedures, according to the nature of the data. Lineal correlations, with a temporary lag, have shown inertias in the chronological behavior of droughts and floods during the Little Ice Age in Catalonia (Spain).

INTRODUCCIÓN.

Es sabido que los valores de las variables meteorológicas en un momento dado están relacionados con los valores tomados por ellas en momentos anteriores. Se puede, así, hablar de una cierta dependencia entre los valores de observaciones sucesivas de una misma variable meteorológica, dependencia que disminuye cuando aumenta el intervalo de tiempo que separa las observaciones. Como ejemplo, si se estudia la precipitación diaria y se consideran dos categorías de días, lluviosos y secos, el valor de la probabilidad de día lluvioso después de día lluvioso es superior al de la probabilidad de día lluvioso después de día seco, en prácticamente todos los lugares (MARTÍN VIDE, 1987). Esta propiedad o inercia de las variables meteorológicas recibe el nombre de persistencia. Así, la precipitación diaria presenta persistencia, y lo mismo ocurre con los días secos. La persistencia de las variables meteorológicas deriva en último extremo de la inercia de los procesos atmosféricos.

Por otra parte, hoy se sabe que las anomalías meteorológicas o climáticas en una determinada área pueden tener su origen en el comportamiento del sistema atmósfera-océano de otras regiones geográficas, incluso muy lejanas, con un desfase temporal variable. Con respecto a esas dependencias se habla de "teleconexiones", que son, en la actualidad, objeto de investigaciones de vanguardia.

LA NATURALEZA DE LOS DATOS DE LA CLIMATOLOGÍA HISTÓRICA.

La Climatología histórica es hoy una de las ramas climatológicas que más pueden aportar en el estudio del cambio ambiental y, en concreto, del cambio climático. Pertenece al conjunto de especialidades de la Paleoclimatología, de las que se distingue por la naturaleza de sus datos, informaciones históricas, directas o indirectas. Su período temporal de estudio abarca, pues, el mismo que las series de documentación manuscrita con información relativa a fenómenos o episodios de carácter meteorológico o susceptible de aportar valoraciones meteorológicas. Estas series, según los recursos socioculturales de la época, y según el estado de conservación de los fondos documentales, presentan una calidad óptima desde la Baja Edad Media hasta el inicio de los registros instrumentales sistemáticos, a mediados del siglo XIX.

La Climatología histórica ha pasado por dos etapas abiertamente contrapuestas en cuanto a enfoques metodológicos, de manera que la concepción actual rechaza, en gran medida, los datos y resultados alcanzados por la precedente, basada en el método antropocéntrico. Si, hasta hace dos o tres décadas, la Climatología histórica basaba su reconstrucción de los climas pretéritos en el análisis de hechos no meteorológicos, ni afines, tales como hambrunas, epidemias, migraciones, fluctuaciones de precios o hasta variaciones en las modas del vestir, el enfoque actual da una preeminencia exclusiva a los datos e informaciones de carácter meteorológico o afines explícitos en la documentación. Se trata de elaborar una historia climática pura, atendiendo únicamente a los acontecimientos meteorológicos o fenómenos relacionados con el tiempo y el clima (LE ROY LADURIE, 1959; ALEXANDRE, 1987; BARRIENDOS, 1994). Sólo después de esta primera fase de análisis estrictamente climático los resultados podrán relacionarse con hechos humanos, recordando que el clima no es el único mecanismo explicativo de éstos, sino que interactúa con otros. Así se eliminan interpretaciones a menudo erróneas fundamentadas en informaciones con una posible relación causal, como las citadas antes, pero cuya explicación puede estar en coyunturas socioeconómicas,

guerras, conflictos sociales, etc. y no en un comportamiento especial del sistema atmosférico. De esta manera, en conclusión, se ha invertido el proceso epistemológico, siendo ahora la reconstrucción de los climas del pasado la que suministra, a veces, datos interesantes -tampoco interpretaciones monocausales- para la explicación de hechos socioeconómicos -hambres, epidemias, etc.- y hasta políticos contemporáneos, y no en sentido contrario.

Como buena parte de la información histórica, los datos de partida con que cuenta la Climatología histórica son informaciones textuales y cualitativas, difícilmente tratables, en un principio, con las herramientas usuales de la Climatología, que requieren valoraciones objetivas y ponderadas, y sobre todo, datos o registros instrumentales y cuantitativos. El climatólogo histórico -para quien una doble formación histórica y climatológica es más que aconsejable- se ve en la necesidad de transformar los registros obtenidos en la documentación manuscrita en, al menos, unos grados numéricos o índices, aunque se reduzcan a muy pocos, con los que, apoyados en una herramienta estadística que no podrá ser compleja, extraer una valoración objetiva. Se trata, en una palabra, de cuantitativizar la documentación histórica referida a hechos meteorológicos o afines.

Uno de los procesos iniciales y más factible es la contabilización o frecuencia de cierto tipo de información histórica, como puede ser el número de veces en que se desborda un curso fluvial a su paso por una determinada población o en que la nieve interrumpe las comunicaciones en un camino real. Para que los números que corresponden a esas frecuencias tengan algún valor climatológico habrá que garantizar, de entrada, que los archivos consultados y su información cubren exhaustivamente el período de estudio. De poco sirven series de frecuencias absolutas construidas a partir de unos documentos con lagunas, olvidos o cambios manifiestos de criterios.

Con respecto a todo ello, LE ROY LADURIE (1967) estableció que la documentación histórica con contenidos meteorológicos o afines (fenómenos hidrodépendientes, como inundaciones o temporales de mar, e información de carácter fenológico) sólo es verdaderamente útil en Climatología histórica si la información que contiene es continua, anual, homogénea y cuantitativa, o convertible en datos cuantitativos. Una vez asegurados los tres primeros requisitos, la objetivización o cuantitativización de la información histórica se basa en el establecimiento de las frecuencias de aparición de los fenómenos estudiados. Con base anual, los valores hallados se suelen suavizar mediante medias móviles, que rebajan el "ruido" climático de las series o permiten, a veces, mostrar patrones cíclicos. Varios climatólogos históricos aconsejan no

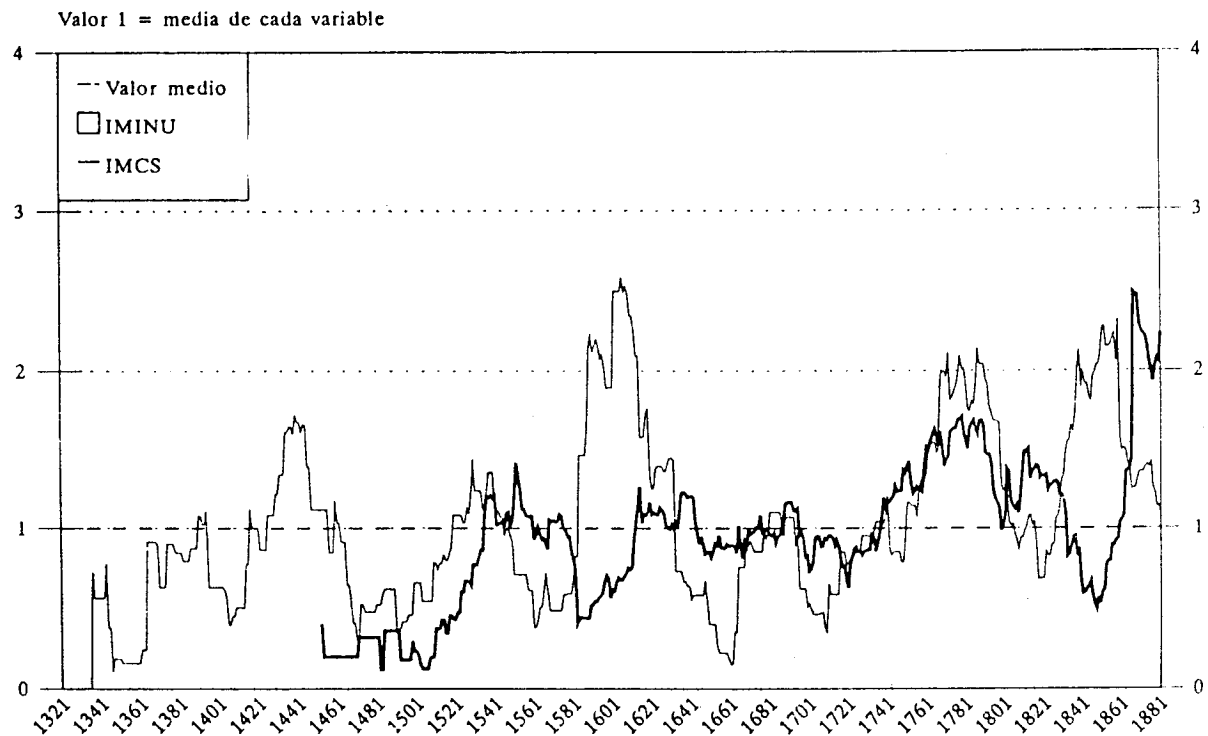
explotar las series con procedimientos estadísticos complejos (ALEXANDRE, 1987), dada la naturaleza simple y frecuencial de los datos de partida. Consideran, además, arriesgada la extrapolación de las informaciones recopiladas a magnitudes instrumentales. En general, se recomienda el uso de índices respecto a los valores medios, que, sin perder el carácter simple de las frecuencias, permite detectar las variaciones de las variables a lo largo del tiempo y establecer comparaciones entre distintos lugares, tal como propuso H. H. Lamb (ALEXANDRE, 1987). No obstante, el cálculo de las sumas acumulativas de desviaciones con respecto a la media y el test *t* de Student, para desvelar cambios significativos en las medias de dos subperíodos, el test de Kendall y la regresión lineal, para la búsqueda de tendencias, el test de Mann-Kendall, para la identificación de discontinuidades o cambios abruptos, el análisis del espectro de potencia o periodograma, para revelar fluctuaciones, y el coeficiente de correlación de Spearman, para el análisis de la correlación espacial de series temporales, son procedimientos estadísticos usados en diversas investigaciones (SÁNCHEZ RODRIGO, 1994).

EL USO DE LAS ROGATIVAS "PRO PLUVIA" Y LOS HIDROMETEOROS CATASTRÓFICOS EN EL ESTUDIO DEL CLIMA HISTÓRICO DE CATALUÑA.

En una reciente investigación llevada a cabo sobre el clima histórico de Cataluña desde el siglo XV al XIX (BARRIENDOS, 1994) se han utilizado las rogativas "pro pluvia", para encuadrar en el tiempo las sequías, y los denominados en un sentido lato hidrometeoros catastróficos, esto es, nevadas, inundaciones y temporales de mar, para determinar los períodos fríos y los de precipitaciones abundantes. Todo ello con el objetivo de conocer con precisión el comportamiento climático que tuvo en la región el episodio denominado Pequeña Edad de Hielo, que se extiende desde la segunda mitad del siglo XVI hasta la primera mitad del XIX.

Las rogativas "pro pluvia", que en el pasado -hasta la primera mitad del siglo XIX- estaban perfectamente normadas por las autoridades eclesiásticas y municipales, tanto en lo referente a la valoración y convocatoria como al tipo de ceremonia a celebrar, aparecen registradas explícitamente en la documentación histórica. Los registros documentales de las rogativas en los casos estudiados (Barcelona, Gerona, Reus/Tarragona, Tortosa, Vic, Cervera y La Seu d'Urgell) permiten construir unas series frecuenciales con un carácter continuo, cuyo alcance temporal medio es de 348 años, abarcando desde el siglo XVI o finales

INDICES DE ROGATIVAS "PRO PLUVIA" E INUNDACIONES. 1337-1881.
Medias móviles de 31 años del índice compensado de cada variable.



del XV hasta mediados del XIX, con una resolución anual, en las que se expresa el número anual de ceremonias, y homogéneo, sin variaciones apreciables de criterios a lo largo del tiempo. Tras un cierto tratamiento estadístico, estas series permiten observar las tendencias y oscilaciones de las necesidades de agua y de las bajas pluviométrías.

De gran importancia de cara a la cuantitativización de los datos de partida es el hecho de que, en la información de partida, pueden distinguirse hasta cinco tipos de rogativas "pro lluvia", que implican una gradación, bien pautada, de las necesidades hídricas. Ello permite distinguir cinco niveles generales de sequía, que son: I, rogativa simple/oración al intercesor; II, rogativa media/traslación del intercesor; III, rogativa grave/procesión con el intercesor; IV, rogativa muy grave/inmersión (exposición desde 1619) del intercesor; V, rogativa crítica/peregrinación al intercesor (BARRIENDOS, 1994).

Los puntos de observación donde se han podido construir series de inundaciones son 12 (Gerona/ríos Ter y Onyar, Tarragona/río Francolí, Tortosa/río Ebro, Lérida/río Segre, Balaguer/río Segre, La Seu d'Urgell/río Segre, El Prat de Llobregat/río Llobregat, el tramo final del río Besòs y varios puntos de la comarca del Maresme, así como Barcelona, a partir de sus rieras. El alcance temporal medio de las series definitivas es de 438 años, con un inicio variable en el tiempo y un final que se prolonga a menudo hasta nuestros días. Se han podido distinguir claramente dos tipos de inundaciones, según los daños causados: extraordinarias y catastróficas.

El análisis estadístico al que se han sometido las series de rogativas de cada uno de los niveles, de inundaciones de los dos tipos, de grandes nevadas y de temporales de mar, así como de rogativas "pro serenitate" (que revelan episodios de lluvias copiosas), para cada lugar y variable, ha consistido en: (1) la contabilización de las frecuencias absolutas en períodos de 5, 10 y 30 años; (2) el cálculo de las medias móviles de 11 en 11 y de 31 en 31 años de los valores anuales; y (3) la reducción de las medias móviles de 31 en 31 años a índices, tomando como referencia o año base la media aritmética correspondiente. Con el objeto de realizar un análisis conjunto de toda el área de estudio se obtuvo, para cada variable, un Índice Compensado General, a partir de los índices de cada punto de observación. Por otra parte, para el estudio de las sequías se elaboró un Índice Medio Combinado de Sequía, resultado de la suma anual de las rogativas "pro lluvia" multiplicadas por el nivel, reducida a la media de toda la serie, y para el de los hidrometeoros catastróficos, otros índices que resumen la información global.

LAS CORRELACIONES LINEALES CON DESFASE.

El poder establecer correlaciones significativas entre las diferentes variables analizadas, de cada punto de observación, y entre éstos, para cada variable, es uno de los objetivos inmediatos tras la preparación estadística descrita en el apartado anterior. En la investigación sobre el clima histórico de Cataluña se ensayaron las citadas correlaciones lineales, que han permitido concretar los comportamientos coincidentes y dispares entre los puntos analizados, así como caracterizar las relaciones entre las variables consideradas durante las diferentes fases y pulsaciones de la Pequeña Edad de Hielo.

La Pequeña Edad de Hielo, o "Miniglaciación", se caracterizó en los países alpinos por tres pulsaciones de similares características, que comportaron un descenso de las temperaturas y un incremento de la precipitación. La cronología de estas pulsaciones comienza con una inicial, a caballo entre los siglos XVI y XVII, una intermedia, en el último tercio del siglo XVIII, y el pulso final, a mediados del XIX (PFISTER, 1988). Esta cronología coincide con la hallada para Cataluña, donde se dan, con muy escasas discrepancias temporales, las tres pulsaciones. Sin embargo, sus características climáticas no son coincidentes entre sí. Las pulsaciones inicial y final se manifiestan con unos acusados descensos en la necesidad de convocar rogativas "pro pluvia", mientras que en la intermedia aumenta sobre los valores medios la frecuencia de tal tipo de rogativa. En cuanto a las inundaciones y al conjunto de hidrometeoros catastróficos, con ciertos desfases temporales sobre los pulsos de las sequías, se detectan también las tres pulsaciones u oscilaciones, caracterizadas en este caso por un aumento de las inundaciones, de las grandes nevadas y de los temporales marítimos.

Precisamente, los desfases temporales entre los pulsos de las sequías y los de las inundaciones, y los restantes hidrometeoros, son del máximo interés en la interpretación global del comportamiento del sistema atmosférico durante el "cambio climático" que supuso la Pequeña Edad de Hielo, en particular en lo que refiere a las inercias del sistema. Para su determinación se han calculado, en primer lugar, los coeficientes de correlación de Pearson entre las series de datos del Índice Compensado General, con el objeto de deducir conclusiones sobre el conjunto del territorio estudiado. En concreto, se hallaron, entre otros, los coeficientes de correlación entre el Índice Medio Combinado de Sequía (variable independiente) y el Índice Medio de Inundaciones (variable dependiente) para los períodos constituidos por los años de las pulsaciones inicial, intermedia y final (se eligieron, respectivamente, 1583-1623, 1765-1805 y 1840-1880). Los valores obtenidos son:

-0,19, 0,68 y -0,85. De donde, la pulsación final muestra un comportamiento bien correlacionado, negativamente, entre las sequías y las inundaciones, en el sentido apuntado antes de una disminución de las primeras y un aumento de las segundas. La correlación relativa a la pulsación intermedia es también significativa, confirmando la coincidencia del aumento de ambas variables (ver figura).

Sin embargo, la no significación de la correlación correspondiente a la pulsación inicial, así como otras efectuadas, invitan a plantear las correlaciones entre las mismas variables pero con un desfase temporal. Así, en el cuadro se presentan los coeficientes de correlación de Pearson del Índice Medio Combinado de Sequía (variable independiente) y el Índice Medio de Inundaciones (variable dependiente), para los tres períodos citados, con desfases temporales de 5, 10, 15, 20 y 25 años, esto es, con un retraso de la variable dependiente respecto a la independiente equivalente a esos números de años. Si desde un punto de vista estrictamente estadístico puede despertar algún recelo ensayar correlaciones lineales entre pares de valores, de variables expresadas como series cronológicas, no referidos al mismo momento, o año, la existencia de inercias y persistencias en el sistema climático avala las probaturas en ese sentido.

Desfase(años)	Puls.inicial	Puls.interm.	Puls.final
0	-0,19	0,68	-0,85
5	-0,70	0,82	-0,78
10	-0,72	0,75	-0,75
15	-0,77	0,54	-0,63
20	-0,91	0,46	-0,50
25	-0,88	0,29	0,00

Nótese, en primer lugar, que las variaciones del coeficiente de correlación, en los tres casos, muestran un comportamiento "regular": creciente, en valor negativo, hasta un desfase de 20 años, en la pulsación inicial; decreciente desde un desfase de 5 años, en la intermedia; y decreciente, en valor negativo, desde la coincidencia temporal, en la pulsación final. Esa regularidad refuerza el interés del procedimiento en cuanto a su capacidad de detección de desfases e inercias.

En segundo lugar, la pulsación final no presenta desfase alguno entre las variables analizadas, ni tampoco entre otras -aquí no consideradas-, como podría verse al correlacionar el Índice Medio Combinado de Sequía y el Índice Medio de Ciclos de Remisión (rogativas "pro serenitate"), Nevadas catastróficas y

Temporales de mar, donde también los valores más elevados del coeficiente de Pearson se dan para el desfase de 0 años. Hubo, por tanto, una absoluta simultaneidad en la disminución de la sequía y el aumento de las inundaciones, grandes nevadas y temporales marítimos en el pulso final de la Pequeña Edad de Hielo.

Por el contrario, aunque la pulsación inicial de la "Miniglaciación" presenta iguales características climáticas que la final, se da un manifiesto desfase entre las variables consideradas, que puede concretarse en 20 años entre la disminución de las sequías y el incremento de las inundaciones.

Por último, la pulsación intermedia, totalmente distinta a las otras, con un aumento de sequías y de inundaciones, que no es, para un clima mediterráneo, un comportamiento raro, presenta una notable simultaneidad, o, si se quiere, una pequeña inercia o desfase, concretado en unos 5 años, entre sequías e inundaciones.

CONCLUSIÓN.

Las inercias y persistencias en el sistema climático pueden detectarse en las series cronológicas elaboradas por la Climatología histórica, constituidas por valores frecuenciales o grados -a menudo suavizados mediante medias móviles y relativizados con la reducción a índices-, con el empleo de correlaciones lineales con desfases temporales entre las variables. De esta manera, han podido establecerse, por primera vez, las características de simultaneidad entre los diferentes elementos y variables climáticos durante las tres pulsaciones de la Pequeña Edad de Hielo en Cataluña.

REFERENCIAS.

- ALEXANDRE, P. (1987): *Le climat en Europe au Moyen Âge*, París, École des Hautes Études en Sciences Sociales.
- BARRIENDOS, M. (1994): *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (ss. XV-XIX)*, Univ.Barcelona, Dep. Geografía Física y A.G.R., Tesis Doctoral inédita.
- LE ROY LADURIE, E.(1959): "Histoire et climat". *Annales E.S.C.* vol.I, pp.3-34, París, A.Colin.
- LE ROY LADURIE, E. (1967): *Histoire du climat depuis l'an mil*, París, Flammarion.
- MARTÍN VIDE, J. (1987): *Característiques climatològiques de la precipitació en*

Temporales de mar, donde también los valores más elevados del coeficiente de Pearson se dan para el desfase de 0 años. Hubo, por tanto, una absoluta simultaneidad en la disminución de la sequía y el aumento de las inundaciones, grandes nevadas y temporales marítimos en el pulso final de la Pequeña Edad de Hielo.

Por el contrario, aunque la pulsación inicial de la "Miniglaciación" presenta iguales características climáticas que la final, se da un manifiesto desfase entre las variables consideradas, que puede concretarse en 20 años entre la disminución de las sequías y el incremento de las inundaciones.

Por último, la pulsación intermedia, totalmente distinta a las otras, con un aumento de sequías y de inundaciones, que no es, para un clima mediterráneo, un comportamiento raro, presenta una notable simultaneidad, o, si se quiere, una pequeña inercia o desfase, concretado en unos 5 años, entre sequías e inundaciones.

CONCLUSIÓN.

Las inercias y persistencias en el sistema climático pueden detectarse en las series cronológicas elaboradas por la Climatología histórica, constituidas por valores frecuenciales o grados -a menudo suavizados mediante medias móviles y relativizados con la reducción a índices-, con el empleo de correlaciones lineales con desfases temporales entre las variables. De esta manera, han podido establecerse, por primera vez, las características de simultaneidad entre los diferentes elementos y variables climáticos durante las tres pulsaciones de la Pequeña Edad de Hielo en Cataluña.

REFERENCIAS.

- ALEXANDRE, P. (1987): *Le climat en Europe au Moyen Âge*, París, École des Hautes Études en Sciences Sociales.
- BARRIENDOS, M. (1994): *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (ss. XV-XIX)*, Univ.Barcelona, Dep. Geografía Física y A.G.R., Tesis Doctoral inédita.
- LE ROY LADURIE, E.(1959): "Histoire et climat". *Annales E.S.C.* vol.I, pp.3-34, París, A.Colin.
- LE ROY LADURIE, E. (1967): *Histoire du climat depuis l'an mil*, París, Flammarion.
- MARTÍN VIDE, J. (1987): *Característiques climatològiques de la precipitació en*

la franja costera mediterrània de la Península Ibèrica, Barcelona, Inst. Cartogràfic de Catalunya.

PFISTER, Ch. (1988): *Klimageschichte der Schweiz, 1525-1860. Das Klima der Schweiz von 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft*, Bern, Paul Haupt.

SÁNCHEZ RODRIGO, F. (1994): *Cambio climático natural. La Pequeña Edad de Hielo en Andalucía. Reconstrucción del clima histórico a partir de fuentes documentales*, Univ. Granada, Dep. Física Aplicada, Tesis Doctoral inédita.

Agradecimientos: El presente trabajo ha sido en parte subvencionado por la *Commission of the European Communities, DGXII, Environment Programme, Climatology and Natural Hazards Unit*, en el contexto del contrato *EV5V-CT92-0167*, y por el proyecto de investigación *DGICYT, PS91-0077 Tendencias climáticas seculares en España. Patrones previsibles de cambio medioambiental*. Por otra parte, el primer coautor disfrutó de una beca del *Plan de Formación de Personal Investigador (FPI) del Ministerio de Educación y Ciencia*, en el período 1990-1993.