

CHAPTER 1 / CAPÍTULO 1

The Andalusian Climate Through Historical Records

El clima de Andalucía a través de los registros históricos

El cambio climático en Andalucía: evolución y consecuencias medioambientales
Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía): 25-41 (2007)
© Los autores. Sevilla. España. ISBN: 978-84-96 776-40-1

The Andalusian Climate Through Historical Records

F. S. Rodrigo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. La Cañada de San Urbano, s/n, 04120, Almería. frodrigo@ual.es

ABSTRACT

The anthropogenic influence on climate overlaps a background of natural climate variability that may diminish or increase it. Paleoclimatic studies are useful in understanding the nature and possible reasons for present climate variations, because they allow the analysis of changes in the relatively short instrumental period in longer-scale perspectives. In this work, the reconstruction of climatic characteristics in Andalusia from the 16th century to the present is presented. This reconstruction is based on the analysis of a wide variety of documentary data. Weather information was taken from original documentary sources in different Andalusian localities, basically from the Guadalquivir river Valley. Main observations correspond to the rainfall regime, due to its influence on agriculture. Different types of data are described (qualitative informations, economical series, early instrumental data), as well as the methodology appropriate to analyse them. Results obtained to date are summarized. Finally, scientific challenges for future research are outlined.

Key words: *historical climatology, historical documents, Andalucía, climate, extreme events.*

El clima de Andalucía a través de los registros históricos

F. S. Rodrigo

Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. La Cañada de San Urbano, s/n, 04120, Almería. frodrigo@ual.es

RESUMEN

La influencia antropogénica sobre el clima se superpone a un fondo de variabilidad climática natural, a la cual puede atenuar o amplificar. Los estudios paleoclimáticos son útiles para la comprensión de la naturaleza y posibles causas de las actuales variaciones climáticas, ya que permiten el análisis de los cambios en el relativamente breve periodo instrumental desde una perspectiva temporal más amplia. En este trabajo se describe la reconstrucción de las características climáticas de Andalucía desde el siglo XVI hasta el presente. Esta reconstrucción se basa en el análisis de una amplia variedad de fuentes documentales. La información meteorológica fue obtenida de documentos originales de diferentes localidades andaluzas, básicamente del Valle del Guadalquivir. Las principales observaciones corresponden al régimen de lluvias, debido a su influencia en la agricultura. Se describen distintos tipos de datos (informaciones cualitativas, series económicas, primeros datos instrumentales), así como la metodología apropiada para analizarlos, y se exponen algunos de los resultados obtenidos hasta la fecha. Finalmente, se indican algunos de los retos científicos para futuras investigaciones.

Palabras clave: climatología histórica, documentos históricos, Andalucía, clima, fenómenos extremos.

INTRODUCCIÓN

Según el último informe publicado del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), es necesario ampliar la base de datos climáticos existentes para conseguir dilucidar los procesos que gobiernan fenómenos climáticos tales como sequías e inundaciones, e identificar las causas de las variaciones climáticas a largo plazo. Se subraya la necesidad de recopilar sistemáticamente observaciones climáticas tanto de datos instrumentales como de otros tipos de datos climáticos (denominados datos “proxy”). Ello se debe a que la magnitud de la señal asociada con

la variabilidad climática “natural”, es decir, la variabilidad no inducida por la acción del hombre, es todavía una incertidumbre. La falta de una completa comprensión de la variabilidad climática en escalas temporales interanuales, por décadas o siglos, hace difícil interpretar los cambios climáticos ocurridos durante el último siglo. En este contexto, ha alcanzado un importante desarrollo en los últimos años la climatología histórica, rama de la climatología que pretende describir la evolución climática en el periodo histórico, incluyendo aquellos periodos previos a la recopilación sistemática de datos meteorológicos instrumentales (Brázdil et al., 2005).

Durante los últimos 500 años, el periodo conocido como “Pequeña Edad de Hielo” (aproximadamente entre 1450 y 1850) proporciona la mejor oportunidad para investigar los mecanismos naturales que pueden afectar al clima en escalas temporales entre la década y el siglo. Aunque no hay evidencias de un largo periodo frío sincrónico en todo el globo (Bradley & Jones, 1992), la Pequeña Edad de Hielo fue el periodo más significativo de desarrollo glacial de los últimos dos mil años. Por otra parte, las estimaciones de la composición atmosférica obtenidas a partir del análisis químico de burbujas de aire contenidas en núcleos de hielo, permiten establecer unas concentraciones de gases como el CO₂ o el CH₄ prácticamente constantes, e inferiores a los niveles actuales (Wahlen et al., 1991). Ello destaca el interés de este periodo, ya que el mecanismo antropogénico queda descartado, y ello posibilita investigar las fluctuaciones climáticas de origen natural.

Entre los diferentes datos “proxy” que pueden aportar información sobre los fenómenos climáticos en periodos pre-instrumentales, merecen especial atención los documentos históricos. En general, los diferentes documentos que pueden encontrarse en los archivos (libros de actas capitulares, crónicas, relaciones, correspondencia, etc.) recogen una variedad de informaciones, entre las que destacan anomalías y extremos meteorológicos tales como sequías, inundaciones, heladas, tormentas, etc., junto con su impacto en el medio ambiente y en la sociedad. Cuando los registros de tales sucesos son compilados junto a la descripción de algunos de sus efectos, los resultados pueden transformarse en índices numéricos de severidad (Pfister et al., 1999). Además podemos encontrar una variedad de informaciones sobre aspectos relacionados directa o indirectamente con el clima, que pueden aportar una serie larga, continua y homogénea de información. Son los datos que podemos denominar datos

indirectos, entre los cuales podemos destacar los datos de producción agraria, fechas de la vendimia, o, en la Península Ibérica, informaciones sobre el comercio de la nieve (Rodrigo et al., 1996).

La metodología apropiada para analizar la evolución climática a partir de esta amplia variedad de informaciones se basa en el establecimiento de una codificación por grado de severidad (basada en las descripciones contenidas en los textos) para los datos directos, mientras que los datos indirectos suelen mostrar una mayor complejidad en cuanto a las vinculaciones entre las variables meteorológicas y el dato analizado. Ello obliga a un cuidadoso proceso de calibración y contrastación entre los diferentes tipos de datos. Los datos directos, por un lado, pueden estar sesgados por la subjetividad propia de los documentos escritos; en los datos indirectos, por otra parte, influyen factores no climáticos que es preciso tener en cuenta. Así por ejemplo, la anchura de los anillos de árboles (que constituye un dato “proxy” de origen natural) está influida no sólo por factores climáticos, sino también por el propio desarrollo vital del árbol en los años precedentes.

El principal objetivo de este trabajo es presentar diversos tipos de fuentes documentales útiles para realizar reconstrucciones climáticas y exponer la metodología empleada, así como algunos de los resultados obtenidos. Finalmente, se establecen algunas conclusiones, así como posibles líneas de investigación en el futuro.

DATOS DOCUMENTALES

Los datos documentales sobre la evolución climática del pasado pueden obtenerse a partir de la exploración y análisis de numerosos archivos diseminados por toda la geografía peninsular, como archivos estatales, provinciales, militares, notariales, monacales, catedralicios, parroquiales, municipales,

etc. (Barriendos, 2000). La tipología de los documentos es muy variada: actas de resoluciones, correspondencia privada, anales urbanos, crónicas locales y de órdenes eclesiásticas, relaciones de sucesos excepcionales, como grandes tormentas o inundaciones, etc. Así, por ejemplo, la documentación administrativa de los archivos catedralicios y municipales es uno de los mejores fondos documentales a efectos climáticos, tanto por su densidad como por la calidad de la información contenida. La celebración de las ceremonias de rogativas por motivaciones ambientales (rogativas *pro pluvia* en caso de sequías, *pro serenitate* en caso de fuertes lluvias y tormentas) era competencia de las autoridades municipales, por lo que aparecen registradas en los libros de actas o resoluciones de sus órganos de gobierno. Uno de los aspectos más interesantes del sistema de rogativas es la existencia de una tipología de ceremonias de formato diferente en atención a la gravedad de la situación ambiental que las provoca, lo cual permite su clasificación por orden de severidad de los fenómenos a escala al menos estacional (Martín-Vide & Barriendos, 1995). Además, pueden encontrarse descripciones detalladas de las condiciones ambientales en numerosos relatos que se imprimían bajo el título genérico de *Relaciones*, y que solían ser obra de testigos presenciales de los sucesos, lo que les confiere un alto grado de fiabilidad (por ejemplo, la *Relacion del admirable huracán y espantoso terremoto de agua, y viento que por secretos juicios de Nuestro Señor vino sobre la ciudad de Granada en este año de 1629*, obra de un autor anónimo). Algunas órdenes eclesiásticas, como los jesuitas, establecieron una tupida red de correspondencias por todo el país y las colonias de América, con continuos intercambios de información en forma de correspondencia privada (Rodrigo et al., 1998). Otra fuente importante de información climática son los anales urbanos, como los *Anales de Sevilla*,

publicados en 1677 por Ortiz de Zúñiga, que reflejan los fenómenos de interés en la ciudad durante el tiempo de vida del autor. En términos generales, el mayor volumen de información encontrada en Andalucía se refiere al régimen de precipitaciones, siendo las informaciones relativas a la temperatura muy escasas. Esto se debe principalmente a la influencia de la pluviometría en la agricultura y las infraestructuras de la sociedad en tiempos históricos previos a la Revolución Industrial, a mediados del siglo XIX. También puede ser un indicio de que los fenómenos de cambio climático en Andalucía en los siglos precedentes se manifiestan más en el régimen de precipitaciones que en el régimen térmico.

Una fuente importante de datos viene proporcionada por la producción agrícola, dadas las vinculaciones entre los fenómenos meteorológicos y los resultados de las cosechas. La influencia de los factores meteorológicos en la coyuntura agrícola era en periodos históricos mayor que hoy en día, pues eran menores los recursos de la técnica, más reducida el área de regadío y menos diversificados los cultivos. Los cereales constituían el cultivo más extendido, y, por tanto, el más sensible a las fluctuaciones climáticas (Domínguez Ortiz, 1988). Las cifras de diezmos suponen el mejor método disponible para aproximarse a las fluctuaciones agrícolas (Sebastián Amarilla, 1991). El diezmo era un impuesto ejercido sobre la producción agrícola, correspondiente en la mayoría de los casos a la décima parte de la cosecha (Vincent, 1985). Al representar un porcentaje fijo de las cosechas obtenidas, constituye un barómetro ideal de las oscilaciones de la producción, el mejor índice para analizar las fluctuaciones de las cosechas, y por tanto, las fluctuaciones climáticas que las provocaron (Anés Alvarez, 1970; Anés Alvarez et al., 1979). Ahora bien, el uso de datos de tipo económico (como fechas de la vendimia, o diezmos del trigo) a efectos de

reconstrucciones climáticas debe realizarse con las necesarias cautelas, dadas las relaciones no lineales entre clima y cultivos, y la influencia de factores socioeconómicos, de naturaleza no-climática, en la producción final (Rodrigo, 2001a).

En España, la primera red de estaciones meteorológicas, coordinada por el Real Observatorio Astronómico de Madrid, se crea en 1850 (Font Tullot, 1988), aunque con numerosos problemas iniciales debidos a la calidad y conservación de los instrumentos utilizados, por lo que no es hasta una década después cuando se inicia la observación sistemática de las variables meteorológicas en todo el país (Almarza et al., 1996). El periodo anterior se caracteriza básicamente por esfuerzos individuales que, desde campos como la medicina, la agricultura o la navegación, intentan introducir la ciencia meteorológica en España. Ya en el siglo XVIII la Real Academia de Medicina de Madrid intenta realizar a escala nacional un plan de observaciones meteorológicas, cuyo principal exponente son las “efemérides barométrico-médicas”, registros de presión atmosférica y temperatura en Madrid, de Marzo a Diciembre de 1737, realizados por Francisco Fernández Navarrete (Font Tullot, 1988). En Barcelona, podemos destacar las observaciones meteorológicas que realiza el médico, físico e ingeniero Francesc Salvá y Campillo desde 1780 (Barriendos et al., 2000). En Andalucía existen registros instrumentales diarios en Cádiz desde finales del XVIII (Wheeler, 1995), así como diversos textos, que desde el campo de la medicina, intentaban vincular la aparición y desarrollo de epidemias con condiciones ambientales y climáticas (como por ejemplo, la *Memoria de las enfermedades que se experimentaron en la ciudad de Sevilla en el año 1785*, publicada por el doctor Nieto de Piña en 1786, o la *Breve descripción de la fiebre amarilla padecida en Cádiz* publicada por el doctor Juan Manuel de Arejula en 1806).

La necesidad de contar con registros meteorológicos fiables para la navegación llevó a oficiales de la marina a realizar estudios meteorológicos y oceanográficos, como las observaciones de Sánchez Buitrago sobre el régimen de vientos en la bahía de Cádiz, o los datos sobre temperatura en Cádiz registrados por Tofiño y Varela en 1777 (Wheeler, 1995). Paralelamente a estas iniciativas individuales que, desde el campo de la observación o desde el mundo académico intentan introducir las nuevas concepciones y métodos científicos relacionados con la meteorología, el periodo comprendido entre finales del XVIII y comienzos del XIX se caracteriza por la aparición de los primeros periódicos, editados por intelectuales ilustrados. Así podemos citar ejemplos como *El Mensajero Económico y Erudito*, publicado en Granada entre 1796 y 1797 (Rodrigo et al., 2000a), o el *Semanario Erudito y Curioso de Málaga*, publicado en Málaga entre 1797 y 1800 (Rodrigo, 2001b). Estos periódicos solían incluir datos meteorológicos diarios en forma de tablas, artículos con la descripción de instrumentos meteorológicos, breves ensayos meteorológicos, etc.

El primer investigador que merece un lugar destacado en la climatología histórica española es Manuel Rico Sinobas, que desarrolló una intensa recopilación de datos históricos, así como de datos instrumentales desde 1800 hasta 1855 (Rico Sinobas, 1851). Los manuscritos resultado de esta actividad se conservan en el archivo de la Real Academia de Medicina de Madrid. El siglo XIX termina con una importante obra de recopilación de episodios meteorológicos extremos, realizada por el ingeniero de minas Horacio Bentabol (1900). Posteriormente, ya en el siglo XX, destacan los trabajos de Fontana Tarrats, quien, a lo largo de las décadas de los 60 y los 70, recopiló una gran cantidad de información, gran parte de ella inédita, y sólo parcialmente conocida gracias a Font Tullot (1988).

MÉTODOS

Una aproximación inicial al estudio de los acontecimientos climáticos del pasado consiste en elaborar cronologías de determinados fenómenos como sequías o inundaciones, y en analizar, por ejemplo, la frecuencia por décadas de estos fenómenos (Barriendos & Rodrigo, 2006). Sin embargo, el objetivo básico es encontrar valores cuantitativos de las variables climáticas del pasado, con el objeto de poder construir series temporales que se prolonguen hasta el presente. Para ello, la metodología usual de reconstrucción consiste en derivar índices ordinales de intensidad a partir de las informaciones contenidas en los documentos históricos. Estos índices pueden asignarse en diferentes escalas temporales (mensuales, estacionales, anuales), local o regionalmente. Para las precipitaciones, los datos documentales pueden indexarse (con resolución estacional) de la siguiente forma: periodos muy secos (ausencia de lluvia junto a información sobre descenso del caudal de agua de los ríos, pozos que se secan, etc.), -2; periodos secos (ausencia de lluvia sin información adicional), -1; periodos normales (sin información específica, sin comentarios sobre impactos), 0; periodos húmedos (lluvias intensas y/o continuadas), +1; periodos muy húmedos (lluvias intensas y/o continuas con riadas e inundaciones), +2. Si la resolución es mensual (estacional), el correspondiente índice estacional (anual) se obtiene simplemente sumando los índices obtenidos. Este esquema es coherente con la clasificación tradicional de las categorías climáticas usadas en España para el estudio de las lluvias estacionales y es muy similar a los índices propuestos por Pfister (1992), aunque menos detallado, principalmente por el volumen de informaciones encontradas, menor que en los países centroeuropeos.

El siguiente paso consiste en obtener funciones de transferencia por regresión frente a los datos instrumentales correspondientes a un periodo de solapamiento entre datos cualitativos y datos instrumentales. El periodo de solapamiento se divide en dos subperiodos, uno para obtener las funciones de transferencia (denominado periodo de calibración), y otro para validar las funciones obtenidas (periodo de validación). Si el periodo de solapamiento es demasiado breve, puede utilizarse un procedimiento de correlación cruzada. Si la validación resulta satisfactoria desde un punto de vista estadístico (por ejemplo, mediante un coeficiente de correlación significativo al 95% de nivel de confianza entre la serie instrumental y la serie reconstruida para este periodo), se aplican estas funciones de transferencia a las series de índices correspondientes al periodo pre-instrumental para obtener la serie reconstruida. Los coeficientes de correlación encontrados entre los índices documentales y las medidas instrumentales son del orden de 0.5 (Rodrigo et al., 1999; Pauling et al., 2006). Como consecuencia, hay una pérdida de varianza en la serie reconstruida. Una solución a este problema de pérdida de varianza consiste en reescalar las reconstrucciones mediante un factor de inflación, que puede obtenerse mediante el cociente entre las desviaciones típicas de la serie instrumental y de la serie inicialmente reconstruida (Rodrigo et al., 1999; Rutherford et al., 2005). Sin embargo, el método expuesto puede aplicarse rara vez en climatología histórica. La razón es que en la mayoría de los casos es difícil encontrar un periodo de solapamiento entre datos instrumentales y datos documentales (Luterbacher et al., 2004; Brázdil et al., 2005; Xoplaki et al., 2005; Jones y Briffa, 2006; Pauling et al., 2006). Este problema se vuelve crucial cuando se buscan reconstrucciones a resolución mensual o estacional, principalmente por la falta

de datos suficientes. Cuando un periodo de solapamiento no está disponible, una aproximación alternativa consiste en indexar la serie instrumental. Así, para mantener un esquema coherente con los índices ordinales asignados a los datos documentales, se asigna el valor -2 si la estación es muy seca (lluvias menores al percentil 10 del periodo de referencia 1961-1990); -1 si la estación es seca (lluvias entre el percentil 10 y el 25); 0 si la estación es normal (lluvias entre el percentil 25 y el 75); +1 si es húmeda (lluvias entre el percentil 75 y el 90); +2 si es muy húmeda (lluvias superiores al percentil 90). Posteriormente se encuentran las funciones de transferencia mediante correlación entre la serie instrumental original y la serie de índices derivada de ella. En este caso, cuando los datos instrumentales se transforman a índices ordinales, la pérdida de varianza es pequeña (Brázdil et al., 1995), pero surgen problemas similares cuando estas funciones de transferencia intentan aplicarse a la serie de índices históricos, ya que, mientras que en la serie instrumental existen valores que cubren todo el intervalo o clase definida para cada valor del índice, el proceso de reconstrucción asigna un solo valor compatible con diferentes valores instrumentales dentro de este intervalo. Como consecuencia, la varianza de la serie reconstruida será menor que la de la serie instrumental, y será preciso de nuevo reescalar la serie obtenida.

El tratamiento de los datos indirectos, como los registros de producción agrícola o las series de diezmos, debe ser distinto, dada la naturaleza de este tipo de datos, donde los factores socioeconómicos (es decir, no-climáticos) pueden jugar un importante papel en el comportamiento de las series. Así, en un estudio preliminar sobre la serie de diezmos del cereal en Sevilla publicada por Ponsot (1986) se intentó delimitar este problema mediante el siguiente procedimiento (Rodrigo, 2001a): en primer lugar

se calcularon los parámetros estadísticos básicos de la serie completa de diezmos desde 1587 hasta 1729. Estos estadísticos pueden considerarse como representativos de las condiciones generales de la producción cereal en la época de estudio, es decir, como las “condiciones de contorno” impuestas por los factores socioeconómicos, independientes de factores climáticos. Posteriormente, a partir de la serie original completa se establecen los límites fijados por el primer y tercer cuartil, como parámetros válidos para la selección de los años de interés. En efecto, atendiendo al significado estadístico de estos dos parámetros, el 50% de los datos comprendidos entre el primer y el tercer cuartil pueden considerarse como “normales”, frente al 25% de los datos inferiores al primer cuartil, y el restante 25% de los datos superiores al tercer cuartil. Así, las malas cosechas se asocian a años con valores del diezmo inferiores al primer cuartil; las cosechas que podemos catalogar como “normales” poseen valores del diezmo comprendidos en el intervalo intercuartil, y, por último, las cosechas “excelentes” poseen valores superiores al tercer cuartil. El estudio de la producción cereal, dadas sus condiciones fenológicas, sirve básicamente como indicador del régimen de precipitaciones y de la posible aparición de fenómenos extremos. Los años de buenas cosechas, entonces, han de interpretarse como años con una pluviometría “normal” y con ausencia de fenómenos meteorológicos extremos. Los años de malas cosechas presentan una interpretación más difícil, o bien situaciones de sequía, o bien lluvias excesivas, o bien heladas y granizos. De ahí que la utilidad de este tipo de datos se cifre en su valor a efectos de validación de las informaciones de tipo cualitativo obtenidas de otras fuentes, al menos cuando se analizan series locales.

Las primeras series instrumentales presentan varios problemas de tipo metodoló-

gico, principalmente debidos a la brevedad de las series y la ausencia de una completa información sobre los instrumentos utilizados, ubicación, sistemas de unidades empleados, momento del día de la lectura de datos, etc. (lo que se denomina el meta-data). El primer problema (series de varios meses, o pocos años) restringe la utilidad de estos datos al no permitir la construcción de una serie temporal larga y continua. El segundo problema se refiere al propio dato en sí, en cuanto a su fiabilidad como registro climático. Sólo la comparación entre distintas series contemporáneas y la comparación con un periodo moderno de referencia (que suele ser el 1961-1990) permite una calibración adecuada de estos datos. Existen técnicas de homogeneización de datos que pueden ayudar al estudio de estas series. El establecimiento de una base de datos instrumentales para el periodo anterior al establecimiento de una red institucional de observación meteorológica es uno de los principales objetivos de la investigación climática hoy en día.

RESULTADOS

Aunque una visión completa de la variabilidad climática en épocas históricas no es todavía posible, sí pueden presentarse algunos resultados que ofrecen indicios del comportamiento del clima al menos desde el año 1500. La Figura 1 muestra una cronología de la frecuencia de inundaciones por década del río Guadalquivir en Sevilla desde el 1500 hasta el 1900. Esta cronología se obtuvo a partir del análisis de diversas fuentes documentales, fundamentalmente registros de las rogativas organizadas en la ciudad con motivo de estos sucesos (Barriandos & Rodrigo, 2006). Aunque existen registros previos, hasta el siglo XII, las primeras décadas pueden contener una considerable cantidad de datos perdidos (por las dificultades en la conservación de los documentos), por lo que no se han incluido en esta cronología. La serie termina en 1900 puesto que a partir del siglo XX modificaciones en la infraestructura fluvial (canales de regadío, presas, cambios en el curso del

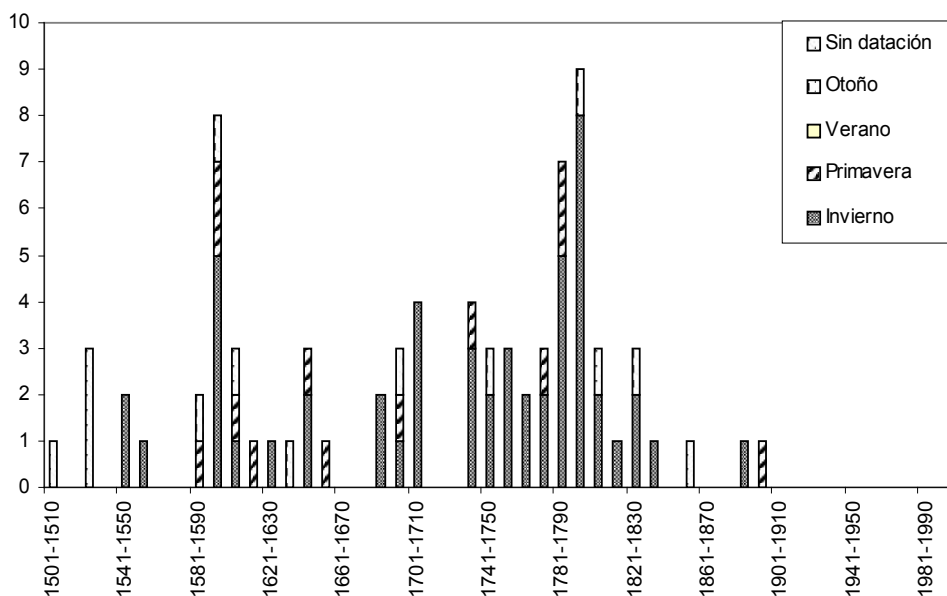


Figura 1. Número de inundaciones por década del Guadalquivir en Sevilla.

río, etc.) pueden influir de manera decisiva en la aparición de este fenómeno.

Puede apreciarse que la mayor frecuencia de inundaciones se registra a finales del siglo XVI y finales del siglo XVIII y que la mayoría ocurrieron en los meses de invierno (de Diciembre a Febrero).

La combinación de las informaciones relativas a inundaciones, junto a otras que describen la aparición de sequías, permite establecer índices ordinales de severidad y reconstruir la evolución pluviométrica de Andalucía desde al menos el siglo XVI, según la metodología expuesta en la sección anterior. En este caso, en lugar de centrarse en una sola localidad, se buscó obtener una serie regional, en base a informaciones procedentes de diversas localidades. El mayor volumen de informaciones corresponde a ciudades del valle del Guadalquivir, como Sevilla, Córdoba, Jaén, Loja y Granada, aunque también se cuenta con informaciones procedentes de Málaga y Cádiz. El objetivo fue establecer una serie temporal de anomalías pluviométricas anuales, utilizando el periodo 1951-1980 como periodo de referencia. La calibración se realizó utilizando datos instrumentales de lluvia anual acumulada en Gibraltar, utilizando como periodo de calibración el 1791-1820. El coeficiente de correlación entre los índices ordinales y la serie instrumental fue 0.56, estadísticamente significativo al 95% de nivel de confianza. Para la validación se utilizó el periodo 1821-1850. La comparación durante el periodo de validación se realizó mediante diferentes tests estadísticos: el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.55, se calculó además el coeficiente de correlación de rango no paramétrico de Spearman, con un valor de 0.52, así como el test t de comparación de medias y el test t de comparación de dos muestras. Todos los resultados fueron estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95%, indicando buenas correlaciones y que no existen

diferencias significativas entre las muestras y sus valores medios. Posteriormente se aplicó la ecuación de regresión obtenida para el periodo de calibración a la serie de índices completa desde el 1500. La pérdida de varianza fue corregida mediante la aplicación de un factor multiplicador consistente en el cociente de las desviaciones típicas de la serie instrumental y la serie reconstruida. El resultado final se muestra en la Figura 2, donde se recogen las anomalías pluviométricas anuales en la región, expresadas como desviaciones respecto a la media del periodo de referencia 1951-1980, junto con la media móvil de 10 años (Rodrigo et al., 1999).

Los aspectos más relevantes pueden resumirse de la siguiente forma: después de algunos años de condiciones predominantemente secas durante el siglo XVI, con un mínimo alrededor de 1540, comienza un periodo húmedo a finales del XVI, que se extiende hasta mediados del siglo XVII. Los años más húmedos corresponden a las décadas de 1591-1600, 1631-1640 y 1641-1650. El siglo XVIII es claramente más seco, con un mínimo alrededor de 1750. A finales del XVIII y comienzos del XIX las precipitaciones aumentan con un máximo a mediados del XIX. Desde este momento, tiene lugar un progresivo descenso en las precipitaciones, sólo interrumpido por las precipitaciones de la década de 1960, que incluso llegaron a provocar nuevas inundaciones en Sevilla (Font Tullot, 1988).

Entre los principales mecanismos responsables de la variabilidad de las precipitaciones en Andalucía, y fundamentalmente durante los meses de invierno, se encuentra la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que puede llegar a explicar hasta un 40% de la varianza de las series pluviométricas andaluzas (Muñoz-Díaz & Rodrigo, 2003). De hecho, este mecanismo afecta a gran parte de la Península Ibérica, básicamente el área central y occidental, y se ha encon-

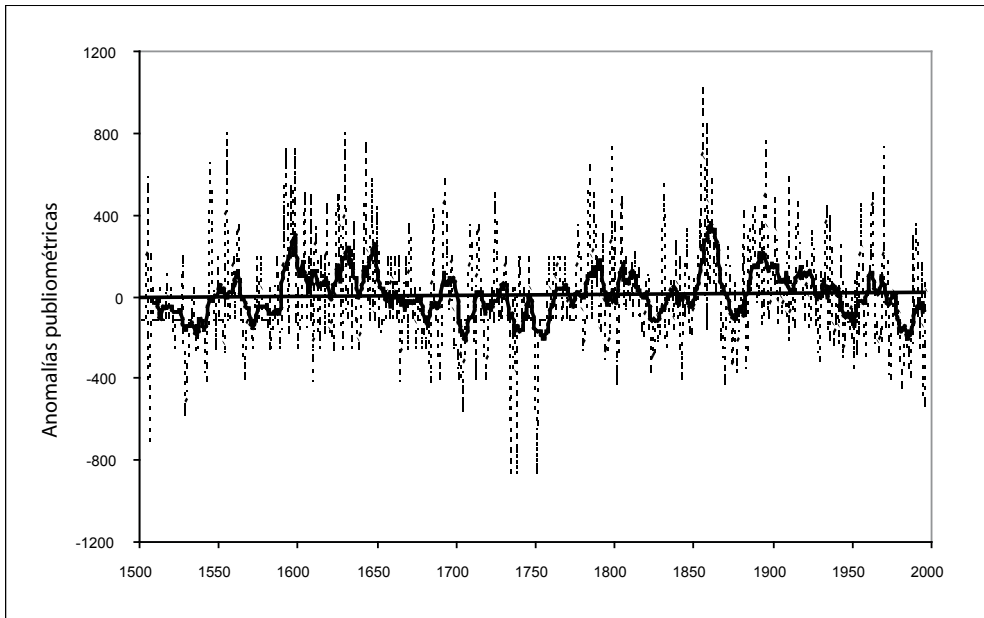


Figura 2. Anomalías pluviométricas anuales en Andalucía 1500-2000. Línea continua: media móvil de 10 años. Valores expresados como desviaciones respecto a la media del periodo de referencia 1951-1980.

trado que está directamente relacionado con la variabilidad en los cursos fluviales de los ríos Duero, Tajo y Guadiana durante el siglo XX (Trigo et al., 2004). La relación con el patrón NAO se debe a que la fase positiva de la NAO está asociada a una intensificación del Anticiclón de las Azores, que produce un bloqueo de los vientos del Oeste sobre la Península Ibérica, y su desvío hacia latitudes más septentrionales, mientras que en la fase opuesta la trayectoria de las borrascas atlánticas se desplaza hacia el sur, causando intensas precipitaciones en la Península. Así, periodos húmedos pueden relacionarse con un predominio de la fase negativa de la NAO, mientras que los periodos secos pueden relacionarse con el predominio de la fase positiva. De hecho, la precipitación de invierno durante los últimos 500 años en el Sur de España y Marruecos se cree que está principalmente determinada por el estado de la NAO (Luterbacher et al., 2002). Esta relación directa entre las precipitaciones en Andalucía y el estado de la NAO ha sido utilizada para reconstrucciones del campo

de presión a nivel del mar y la NAO hasta comienzos del siglo XVI (Luterbacher et al., 2001; Rodrigo et al., 2001; Luterbacher et al., 2002).

Otros posibles mecanismos causales de variabilidad climática son las fluctuaciones en la actividad solar y la actividad volcánica. Respecto a la primera, se ha asociado la aparición de la Pequeña Edad de Hielo con la presencia de dos mínimos en la actividad solar (determinados mediante el estudio del número de manchas solares y la frecuencia de auroras boreales), los denominados Mínimo Maunder, de 1645 a 1715, y Mínimo Dalton, de 1790 a 1820. En nuestro caso, el Mínimo Maunder no parece excepcional dentro de la serie completa, aunque la evolución de las lluvias es muy variable, con severas sequías los años 1664, 1683, 1689, 1704 y 1711, alternando con intensas precipitaciones e inundaciones en 1646, 1649, 1684 y 1692 (Rodrigo et al., 2000b). Esta alta variabilidad ha sido detectada en otras partes de la Europa Mediterránea, como en Italia (Camuffo & Enzi, 1994). En cuanto

al Mínimo Dalton, que parece corresponder a un periodo húmedo en Andalucía, también se ha asociado con un periodo de alta variabilidad en Cataluña (Barriendos & Llasat, 2003). Por otra parte, se cree que la frecuencia y magnitud de las erupciones volcánicas contribuyeron significativamente a la variabilidad climática durante la Pequeña Edad de Hielo (Mann et al., 1998; Pfister & Brázdil, 1999; Crowley, 2000), y en particular durante el Mínimo Maunder, con frecuentes erupciones volcánicas en las décadas de 1670 y 1690 (Luterbacher et al., 2001). Nuestros resultados demuestran una variabilidad similar a la detectada en la temperatura media anual del Hemisferio Norte (Mann et al., 1998; Crowley, 2000): periodos fríos durante mediados del siglo XVII y el siglo XIX, e intervalos algo más cálidos durante mediados del siglo XVI y el siglo XVIII, con un claro aumento de las temperaturas durante el siglo XX. Por tanto, parece que periodos húmedos (secos) en Andalucía estarían relacionados con periodos fríos (cálidos) en el Hemisferio Norte. No obstante, la discusión sobre la influencia de diferentes mecanismos causales en la variabilidad climática, y en particular en la variabilidad de las precipitaciones de Andalucía, es un tema abierto, que debe ser objeto de futuras investigaciones.

Los resultados expuestos en la Figura 2 muestran una evolución fluctuante, con alternancia de periodos secos y húmedos a escala temporal interdecada. Sin embargo, estas fluctuaciones también aparecen a escalas temporales interanuales, con periodos de gran variabilidad de un año a otro, como ocurre por ejemplo durante el periodo 1645-1715. Las informaciones de tipo indirecto son las que pueden ofrecernos una imagen más clara de esta variabilidad de alta frecuencia. La Tabla 1 muestra el análisis resultante del estudio de los diezmos del cereal en Sevilla durante el periodo 1587-1729 (Rodrigo, 2001a).

Los años de malas cosechas fueron determinados mediante el método descrito en la sección anterior, y la atribución a las posibles causas climáticas mediante el análisis de las informaciones de tipo cualitativo encontradas en otras fuentes documentales (Rodrigo, 2001a). Llama la atención el predominio de las situaciones de lluvias intensas y persistentes (muchas veces acompañadas de riadas e inundaciones) sobre las situaciones de sequía. De los 30 años con malas cosechas, 7 corresponden a situaciones de sequía, y 16 a lluvias intensas. Además, se destacan los años con tormentas de verano y granizadas, y los casos de heladas invernales y primaverales. A la hora de analizar los años de malas cosechas, es preciso tener en cuenta otros factores de índole no-climática que podrían haber influido en la agricultura. Así, por ejemplo, otras causas posibles de malas cosechas son la plaga de langosta que perjudicó a la cosecha en la primavera de 1686/87, o las epidemias de peste de los años 1601/02, 1650/51 y 1652/53. Los años 1658/59, 1681/82 y 1684/85 (para los que no se ha detectado presencia de extremos meteorológicos), son años que probablemente se verían afectados por los malos resultados de las cosechas en años anteriores (lluvias en 1657/58, sequía en 1679/80 y en 1683), indicando así la escasa capacidad de recuperación de la agricultura de la época. Como indicábamos en la sección anterior, el tratamiento de los primeros datos instrumentales es una tarea de investigación que se encuentra hoy por hoy lejos de estar completada, pero al menos sí se pueden presentar algunos resultados parciales. Así, por ejemplo, la Figura 3 muestra el número anual de días de lluvia en Sevilla durante el periodo 1778-1785, según se recoge en la *Memoria de los enfermedades que se experimentaron en la ciudad de Sevilla en el año 1785*, texto publicado en 1786 por el médico Nieto de Piña, en el que se intentan relacionar aspectos médicos de

Causas	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Sequías	1604	1604/05 1677/78 1679/80	1589 1605 1610 1635 1678 1683	
Lluvias	1590 1592 1605 1642 1646 1649 1656 1691	1590/91 1592/93 1596/97 1605/06 1607/08 1634/35 1642/43 1645/46 1646/47 1676/77 1683/84 1691/92 1707/08	1591 1597 1608 1643 1647 1649 1658 1692 1708	
Tormentas				1646 1649 1678 1684 1685 1692
Heladas		1588/89 1604/05 1605/06 1609/10 1656/57 1657/58 1658/59	1647 1649 1650	

Tabla 1. Cosechas con producción inferior al primer cuartil según los datos de diezmo del trigo, y posibles causas climáticas.

higiene y salud pública con los fenómenos meteorológicos (Rodrigo et al., 2007).

Los datos presentados en la Figura 3 indican un menor número de días lluviosos desde 1778 hasta 1782, periodo que el autor califica como seco, y un aumento apreciable desde 1783, coincidiendo con la inundación de la ciudad entre Diciembre de 1783 y Enero de 1784.

Parte del interés de los primeros datos instrumentales recopilados es que ofrecen información sobre otras variables distintas de las precipitaciones, como la temperatura, la presión o la dirección del viento. Así, la Figura 4 muestra el ciclo anual de temperatura en Granada durante los años 1796 y 1797, según los datos recopilados en *El Mensajero*, periódico local publicado

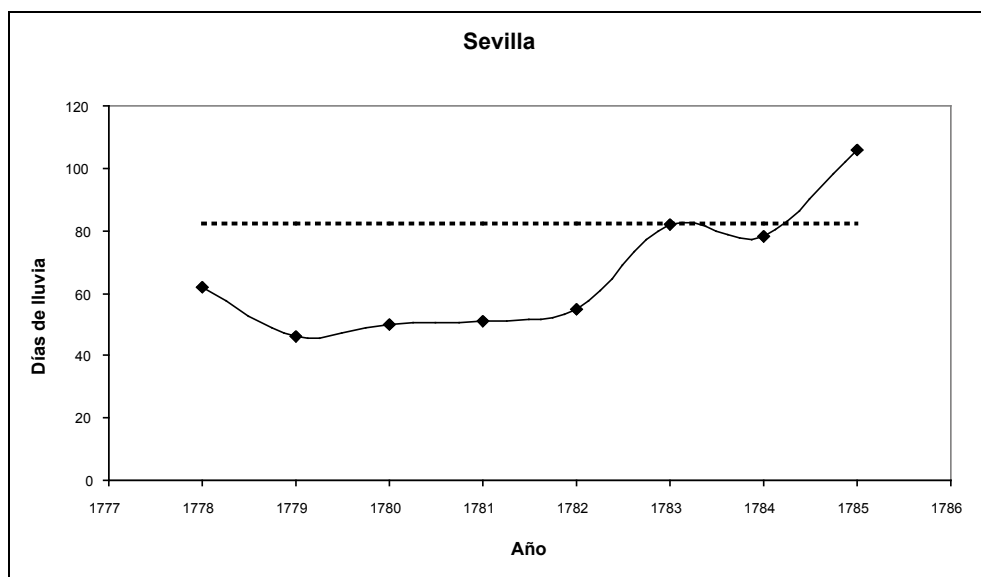


Figura 3. Número anual de días de lluvia en Sevilla, 1778-1785. Línea discontinua: valor medio del periodo de referencia 1961-1990.

durante estos años (Rodrigo et al., 2000a). Se trata de datos diarios tomados al mediodía durante el breve tiempo de publicación del periódico.

Los datos de temperatura correspondientes a las 12 horas están más relacionados con las temperaturas máximas que con las medias, aunque normalmente la temperatura máxima diaria se alcanza después del mediodía. La temperatura media anual en Granada durante los años 1796-1797 fue 17.1°C, 2° más alta que la media del periodo de referencia 1960-1990, y 4.4°C inferior que la media de las máximas. La diferencia es menor en invierno, especialmente en Diciembre (0.4°C). Si aceptamos que las temperaturas a las 12 horas están más relacionadas con las máximas que con las medias diarias, los datos recogidos en la Figura 4 parecen sugerir condiciones ligeramente más frías que en la actualidad, excepto en los meses de verano. Sin embargo, antes de obtener conclusiones es preciso analizar el ciclo diario de temperatura en Granada, así como la posible influencia del desarrollo urbano en los registros de temperatura. Este ejemplo

ilustra las dificultades que surgen cuando se analiza este tipo de datos.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha intentado exponer cómo es posible inferir la evolución climática de Andalucía en el pasado, durante el periodo anterior al establecimiento de una red institucional de observación meteorológica. Durante el periodo histórico es preciso recurrir a fuentes documentales, diseminadas en multitud de archivos de distinta naturaleza (municipales, eclesiásticos, etc). Los métodos de la climatología histórica permiten reconstruir con cierto grado de fiabilidad el comportamiento de las variables climáticas. Los estudios realizados hasta ahora han permitido reconstruir la evolución de las precipitaciones a escala estacional o anual desde el siglo XVI. Sin embargo, aún queda mucho trabajo pendiente, no sólo para ampliar la cobertura espacial de las informaciones, sino también para refinar la resolución temporal de las mismas (a escala al menos mensual) y para extender el análisis a otras variables, fundamentalmente la

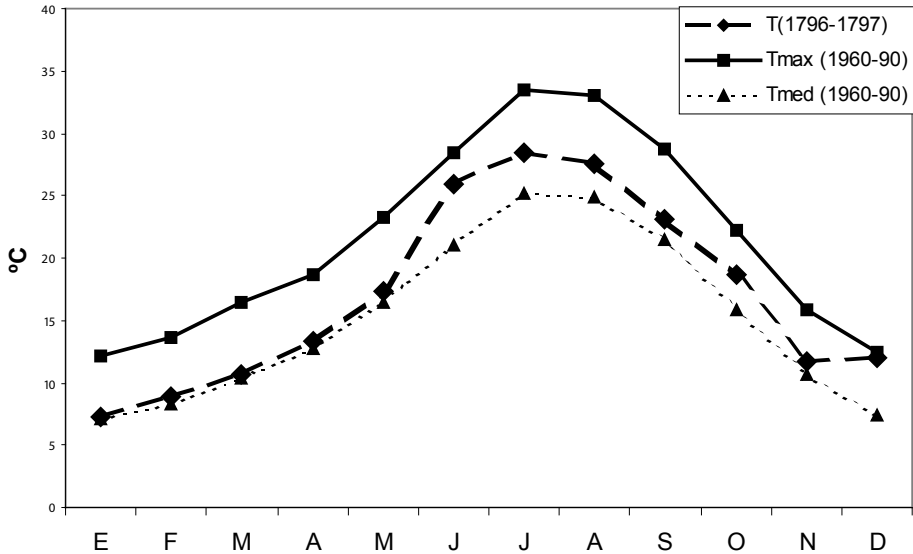


Figura 4. Ciclo anual de temperatura en Granada (1796-1797) y comparación con los valores medios de temperatura máxima diaria y temperatura media durante el periodo de referencia 1960-1990.

temperatura, de la que el volumen de información obtenida es tan escaso que impide la elaboración de cronologías continuadas en el tiempo.

Las precipitaciones muestran un comportamiento fluctuante, con alternancia de periodos secos y húmedos, que, “grosso modo”, pueden caracterizarse por una mayor frecuencia de sequías e inundaciones, respectivamente. La atribución de estas distintas fases climáticas a los diferentes mecanismos causales propuestos por la bibliografía especializada (actividad solar, erupciones volcánicas, gases de efecto invernadero) es una tarea aún por realizar, aunque el paralelismo con el comportamiento de las temperaturas del Hemisferio Norte permite asociar los periodos secos (húmedos) en Andalucía con las fases cálidas (frías) en el Hemisferio Norte. Esta es una hipótesis de trabajo que exigirá posteriores investigaciones en el futuro.

El uso de datos “proxy”, como las series de producción agraria, permite contrastar la validez de las informaciones y descripcio-

nes cualitativas encontradas en otro tipo de fuentes documentales, y explicar en parte las fluctuaciones de alta frecuencia (interanuales) de las variables climáticas. No obstante, el tratamiento de estos datos debe ser especialmente riguroso, dada la influencia de factores socioeconómicos (es decir, no-climáticos) en el comportamiento de la variable en estudio (en nuestro caso los diezmos del trigo).

Las primeras observaciones instrumentales, resultado de iniciativas individuales llevadas a cabo por investigadores ilustrados (médicos, físicos, marinos, etc.) presentan el doble problema de tener que asegurar la calidad de los datos (falta de metadata) y de la brevedad de las series encontradas. Sólo una continuada labor de investigación permitirá en el futuro rescatar estos datos y construir una base de datos con una cobertura espacio-temporal adecuada para realizar posteriores análisis.

El objetivo final de estos estudios no es otro que ampliar en lo posible las informaciones existentes sobre la evolución climática, a

fin de situar el comportamiento del periodo instrumental en un contexto histórico más amplio. Así podrán ofrecerse elementos de análisis para la validación de los modelos

climáticos, y, en consecuencia, para la evaluación de la magnitud de la influencia antropogénica en el clima de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

- Almarza, C., J. A. López, & C. Flores (1996). *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación en España*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Anés Alvarez, G. (1970). *Las Crisis Agrarias en la España Moderna*. Taurus, Madrid.
- Anés Alvarez, G., A. Bernal Rodríguez, J. García Fernández, E. Giralt Raventós & P. Vilar (1979). *La Economía Agraria en la Historia de España*. Alfaguara, Madrid.
- Barriendos, M. (2000). La climatología histórica en España. Primeros resultados y perspectivas de la investigación. En: *La reconstrucción del clima de época preinstrumental*, J. C. García Cordón (ed): 15-56. Universidad de Cantabria, Santander.
- Barriendos, M., J. García, J. Martín-Vide, F. Nunes, J. C. Peña & M. J. Alcoforado (2000). 18th century instrumental meteorological series in the Iberian Peninsula. General characteristics and climatic utility. En: *Giuseppe Toaldo e il suo tempo*, L. Pigatto (ed): 907-920, Bertonecello Artigrafiche, Padova.
- Barriendos M. & M. C. Llasat (2003). The case of the 'Maldá' anomaly in the western Mediterranean basin (AD 1760-1800): an example of a strong climatic variability. *Climate Change* 61: 191-216.
- Barriendos M. & F. S. Rodrigo (2006). Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences-Journal-des-Sciences Hydrologiques* 51: 765-783.
- Bentabol, H. (1900). *Las aguas de España y Portugal*, 2nd ed. Vda. e Hijos de M. Tello, Madrid.
- Bradley, R. S. & P. D. Jones (1992). Climate since A.D. 1500: Introduction. En: *Climate since A.D. 1500*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 1-16. Routledge, London.
- Brázdil R., C. Pfister & H. Wanner (2005). Historical Climatology in Europe-the state of the art. *Climatic Change* 70: 363-430.
- Camuffo, D. & S. Enzi (1992). Reconstructing the climate of Northern Italy from archive sources. En: *Climate since A.D. 1500*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 143-170, Routledge, London.
- Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289: 270-277.
- Domínguez Ortiz, A. (1988). *El Antiguo Régimen: Los Reyes Católicos y los Austrias*. Alianza Editorial, Madrid.
- Font Tullot, I. (1988). *Historia del clima de España. Cambios climáticos y sus causas*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 297 pp.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 966 pp.
- Jones, P. D. & K. R. Briffa (2006). Unusual climate in Northwest Europe during the period 1730 to 1745 based on

- instrumental and documentary data. *Climatic Change* 79: 361-379.
- Luterbacher, J., R. Rickli & E. Xoplaki (2001). The Late Maunder Minimum (1675-1715)- a key period for studying decadal scale climatic change in Europe. *Climatic Change* 49: 441-462.
- Luterbacher, J., E. Xoplaki & D. Dietrich (2002). Extending North Atlantic Oscillation reconstructions back to 1500. *Atmospheric Science Letters* 2: 114-124.
- Luterbacher, J., D. Dietrich & E. Xoplaki (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303: 1499.
- Mann, M. E., R. S. Bradley & M. K. Hughes (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392: 779-787.
- Martín-Vide J & M. Barriendos (1995). The use of rogations ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain). *Climatic Change* 30: 201-221.
- Muñoz-Díaz, D. & F. S. Rodrigo (2003). Effects of the North Atlantic Oscillation on the probability for climatic categories of local monthly rainfall in southern Spain. *International Journal of Climatology* 23:381-397.
- Pauling, A., J. Luterbacher, C. Casty & H. Wanner H (2006). Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics* 26: 387-405.
- Pfister, C. (1992). Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. En: *A methodology for quantifying man-made evidence on weather and climate*, R. S. Bradley & P. D. Jones (eds): 118-142, Routledge, London and New York.
- Pfister, C. & R. Brázdil (1999). Climatic variability in sixteenth century Europe and its social dimension: a synthesis. *Climatic Change* 43: 5-53.
- Pfister, C., R. Brázdil, R. Glaser., M. Barriendos Vallvé, D. Camuffo, M. Deutsch, P. Dobrovolný, S. Enzi, E. Guidoboni, O. Kotyza, S. Militzer, L. Racz, & F. S. Rodrigo (1999). Documentary evidence on climate in sixteenth century Europe, *Climatic Change* 43: 55-110.
- Ponsot, P. (1986). *Atlas de Historia Económica de Andalucía (Siglos XVI-XIX)*. Editoriales Andaluzas Unidas, Granada.
- Rico Sinobas, M. (1851) *Memoria sobre las causas meteorológico-físicas que producen las constantes sequías de Murcia y Almería*. Ministerio de Comercio, Madrid.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (1996). Uso de datos sobre el comercio de la nieve en Sierra Nevada para reconstrucciones climáticas. En: *Sierra Nevada. Conservación y Desarrollo Sostenible (Vol. 1)*, J. Chacón Montero & J. L. Rosúa Campos (eds): 41-53, Universidad de Granada, Granada.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (1998). On the use of the Jesuit Order private correspondence records in climate reconstructions: a case study from Castille (Spain) for 1634-1648 A.D. *Climatic Change* 40: 625-645.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (1999). A 500-year precipitation record in southern Spain. *International Journal of Climatology* 19: 1233-1253.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000a). On the early instrumental series in Andalucía (south Spain): a

- case study from Granada (1796-1797). En: *Giuseppe Toaldo e il suo tempo*, L. Pigatto (ed): 899-906, Bertinello Artigrafiche, Padova.
- Rodrigo, F. S., M. J. Esteban-Parra, D. Pozo-Vázquez & Y. Castro-Díez (2000b). Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial time scales. *International Journal of Climatology* 20: 721-732.
- Rodrigo, F. S. (2001a). Clima y producción agrícola en Andalucía durante la edad moderna (1587-1729). En: *Naturaleza transformada*, M. González de Molina & J. Martínez Alier (eds): 161-182, Icaria, Barcelona.
- Rodrigo, F. S. (2001b). Primeras observaciones meteorológicas en España: el papel de la prensa a finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. En: *II Encuentro sobre Historia y Medio Ambiente*, A. Sabio Alcutén & I. Iriarte Goñi (coords): 138-147, Instituto de Estudios Aragoneses, Huesca.
- Rodrigo, F. S., D. Pozo-Vázquez, M. J. Esteban-Parra & Y. Castro-Díez (2001). A reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index back to A.D. 1501 using documentary data in southern Spain. *Journal of Geophysical Research* 106: 14805-14818.
- Rodrigo, F. S., M. Barriendos, E. Rama-Corredor, J. M. Vaquero, M. J. Esteban-Parra, Y. Castro-Díez, D. Paredes-Beato & R. García-Herrera (2007). Medical Topographical Studies: An unexplored source of climatic data in the Iberian Peninsula during the 18th and 19th centuries. *Geophysical Research Abstracts*, 9: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02568.
- Rutherford, S., M. E. Mann & T. J. Osborn (2005). Proxy-based Northern Hemisphere surface temperature reconstructions: sensitivity to method, predictor network, target season, and target domain. *Journal of Climate* 18: 2308-2329.
- Sebastián Amarilla, J. A. (1991). La Producción de Cereales en Tierras de León Durante la Edad Moderna (1570-1795). *Agricultura y Sociedad*, 59: 75-117.
- Trigo, R. M., D. Pozo-Vázquez, T. J. Osborn, Y. Castro-Díez, S. Gámiz-Fortis & M. J. Esteban-Parra (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 24: 925-944.
- Vincent, B. (1985). *Andalucía en la Edad Moderna: Economía y Sociedad*. Excma. Diputación Provincial de Granada, Granada.
- Wahlen, M., D. Allen, B. Deck & A. Herchenroder (1991). Initial measurements of CO₂ concentrations (1530 to 1940 A.D.) in air occluded in the GISP 2 ice core from central Greenland. *Geophysical Research Letters*, 18: 1457-1460.
- Wheeler, D. (1995). Early instrumental weather data from Cádiz: a study of late eighteenth and early nineteenth century records. *International Journal of Climatology* 15: 801-810.
- Xoplaki, E., J. Luterbacher & H. Paeth (2005). European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium. *Geophysical Research Letters*, 32: L15713.