

## RECONSTRUCCIÓN PALEONTOLÓGICA DE LAS SEQUÍAS EN ESPAÑA

Javier GONZÁLEZ PÉREZ<sup>1</sup>, Francisco CABRERA JERÓNIMO<sup>1</sup>, José María GARCÍA MERINO<sup>1</sup>, Olga MORALES ENCINAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Grupo Ingeniería del Agua, ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Castilla la Mancha*

<sup>2</sup> *Facultad de Humanidades, Universidad de Castilla la Mancha*  
javier.gonzalez@uclm.es

### RESUMEN

España es un país que se caracteriza por la variabilidad de sus precipitaciones, tanto en tiempo como en lugar. Dentro del régimen de precipitaciones, es importante conocer con detalle las características de las sequías, pues suponen los episodios más críticos en la gestión y planeamiento de los recursos hidráulicos. Al régimen variable de las precipitaciones se suma actualmente la posible influencia del cambio climático. La evaluación de esta influencia requiere la mejor cuantificación de la variabilidad natural. Con ello, el estudio con mayor detalle de esta variabilidad climática en España, y en concreto de las sequías, es muy necesario en un país tan sensible a estas amenazas.

La ETSI de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Castilla la Mancha, a través de un equipo multidisciplinar y dentro del Proyecto SINEAQUA, está llevando a cabo la reconstrucción de los episodios de sequías ocurridos en España mediante tres líneas de investigación:

- Estudio de textos históricos (ruegos, rezos y rogativas realizadas por la Iglesia pidiendo lluvias para salvar las cosechas, referencias en antiguos proyectos de ingeniería, recaudación de impuestos por la Hacienda Pública, etc.).
- Agroclimatología, ciencia que estudia la relación entre las precipitaciones y la producción agraria de determinados cultivos.
- Dendrocronología, ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles y reconstruye las precipitaciones mediante su grosor.

El objetivo final de la investigación es obtener un catálogo que, contruidos sobre un Sistema de Información Geográfica, permita al usuario consultar los episodios de sequía ocurridos en España desde la Edad Media.

**Palabras clave:** Paleoclimatología, sequía, producción agrícola, dendrocronología, documentación histórica, España.

### ABSTRACT

Spain is strongly characterised by high precipitation variability (regional and temporal). It is very interesting for the water resources planning and management to understand the characteristic of droughts (severity and duration). In fact, several international institutions had

marked the southwest of Europe like one of the most vulnerable regions in front of the Global Climate Change. For several reasons, Spain needs know how droughts occur and how to face up to this natural hazard.

The Technical School of Civil Engineers (ETSI Caminos, Canales y Puertos) of Castilla La Mancha University works in the reconstruction of droughts events through three principal lines of investigation:

- Documental references (special prays and processions, judge resolutions and taxes)
- Agrarian climatology. This science studies the relationship between the precipitation and the agrarian produce.
- Dendrochronology. This science studies the relationship between tree rings and climate (temperature and precipitation).

The final goal of this investigation is to build a Geographic Information System (GIS) that permits to search droughts events occurred in Spain since the Middle-Ages.

**Key words:** Paleoclimatology, drought, agrarian produce, dendrochronology, historic documentation, Spain.

## 1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO SINEAQUA

El proyecto SINEAQUA se enmarca dentro del Programa Nacional de Investigación y Desarrollo, (CGL2006-08750/CLI) y el Plan Regional de Investigación de Castilla-La Mancha (PAI06-0048-5308), además de contar con el apoyo del Ministerio de Medio Ambiente. El objetivo principal del proyecto es crear una base de datos que recoja todos los episodios de sequías sufridos en España y que éstos se puedan consultar para sucesivas investigaciones.

SINEAQUA cuenta con una página web ([www.sineaqua.es](http://www.sineaqua.es)) en la que, a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puedan consultar las sequías acontecidas en nuestro país.

La envergadura del objetivo del proyecto produce que sea muy difícil asegurar que se encuentra constancia de los episodios de sequías ocurridos en España y de sus principales consecuencias. El conjunto de fuentes utilizadas hará posible que los episodios más significativos y sus principales impactos queden recogidos. Sin embargo la base de datos generada se concibe como una base abierta, dónde investigadores o usuarios del sistema pueden sugerir la inclusión de nuevas referencias históricas a las que ellos han tenido acceso y que pueden ser de interés para la mejor definición de un episodio. Cada referencia sugerida será consultada para su validación antes de ser incorporada en la base de datos general.

SINEAQUA emplea varias de estas fuentes: las históricas documentales, la Agroclimatología y la Dendrocronología. Existen muchos otros que han sido ampliamente estudiados, como el estudio de los testigos de hielo (SAZ SANCHEZ, 2003).

En los países mediterráneos, como España, la fuente de datos de los textos históricos parece inagotable gracias a una larga y prolija historia, frente a la escasa riqueza forestal que hace más limitada la reconstrucción dendrocronológica.

Cabe destacar que estos métodos se complementan en el espacio y en el tiempo, pues los árboles, fuente de la dendrocronología, están en las montañas, la Agroclimatología, que emplea fundamentalmente el cereal, en las llanuras y los textos históricos en las ciudades y zonas desde hace más tiempo habitadas. Según algunos autores, es muy recomendable cruzar varias fuentes de información en las reconstrucciones paleoclimáticas (BRAJOS RUIZ, 2006).

## **2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROCESO**

Las sequías constituyen en España una de las amenazas más importantes para el medio ambiente. Su estudio parece muy justificado en un país con unas precipitaciones muy bajas en algunas regiones y con mayor demanda de agua día a día. Bien es cierto que la sociedad española está más concienciada de la limitación de este recurso natural, pero también es más vulnerable.

El clima español es muy cambiante porque se encuentra en una zona de transición entre el clima tropical y el polar, por lo que existen grandes gradientes entre unas regiones y otras. En el Mediterráneo, los procesos climáticos son aun más complicados. Quizá el problema más grave al que se enfrentan los planificadores hídricos es la descompensación entre la población y los recursos y a la irregularidad de las precipitaciones en la Península (BRIFFA, 1995).

Reconstruir climas pasados en todas las escalas de tiempo es importante si se quieren entender los mecanismos de control climático (BARRIENDOS, 1999). La mejora de los conocimientos acerca de la distribución de las sequías en España puede llevar a planificar mejor las medidas paleadoras y correctoras de las épocas de escasez en nuestro país a corto, medio y largo plazo.

Las reconstrucciones paleoclimáticas suponen una innovación en el estudio del clima, pues sólo con este tipo de datos con los que se pueden captar las variaciones de décadas o centurias y son una base esencial para su comparación con la pequeñísima parte que El Hombre conoce, con datos instrumentales desde hace apenas 100 años (FRITTS, 1976).

Otra razón que justifica este estudio es el cambio climático. Partiendo de la hipótesis de la existencia de una clara tendencia a producirse un descenso de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas, la planificación hidrológica a medio plazo deberá contar con esta situación, planteándose estrategias y políticas al respecto (TILL y GUIOT, 1990).

## **3. RECONSTRUCCIÓN PALEOCLIMÁTICA MEDIANTE TEXTOS HISTÓRICOS**

SINEAQUA está acotado a la geografía española durante la Edad Moderna y Contemporánea. Se establece este periodo de tiempo inicial porque la conservación de los documentos administrativos no se producirá hasta 1572, año en el que Felipe II crea en la fortaleza que había pertenecido a los Enríquez, cerca de Valladolid, el Archivo de Simancas, como depósito en el que debía conservarse toda la documentación que había sido generada por la administración y las instituciones de la corona desde la creación de la monarquía hispánica, en 1475, hasta mediados del siglo XIX, periodo en el que gracias a las estaciones pluviométricas, están recogidas las precipitaciones caídas hasta nuestros días, y que pueden consultarse en el Instituto Nacional de Meteorología.

En el empleo de esta metodología utilizamos documentos y expedientes generados en la misma fecha en que se sucedieron estos hechos, así como de autores y cronistas que vivieron durante ese periodo histórico, pudiendo de esta manera determinar la autenticidad y veracidad de los episodios de sequías.

Es importante tener en cuenta cómo afectan las sequías sobre la población: enfermedades, hambre, escasez de cosechas y subida de precios sobre los cereales y otros cultivos, la escasez de pastos y como consecuencia la muerte del ganado, así como los movimientos migratorios de la población. A su vez, estas consecuencias por si mismas pueden determinar periodos secos en la historia, que la administración no los registra o contempla como tal. También son numerosos los documentos públicos que redactados por el monarca o la máxima figura municipal reflejan privilegios y concesiones o donaciones sobre los vecinos para la reducción de impuestos por motivos de “escasez de cosechas” o “la seca en los campos”. En las ordenanzas municipales, también encontramos años secos en los que se determina la variabilidad de los precios. En las actas de plenos de los Ayuntamientos encontramos registros de peticiones de rogativas con el fin de que el cielo mandara agua para el progreso de la población. Barriendos establece un modelo para determinar la intensidad de la sequía a través de las actuaciones producidas por las rogativas.

La construcción de aceñas y acequias sobre arroyos y ríos en periodos más tempranos, así como de canales, embalses y pantanos en épocas más modernas conlleva la necesidad de un mayor aprovechamiento del agua en estos periodos secos. Durante la edad moderna, estas construcciones podían ocasionar graves discusiones por la ocupación de los terrenos y el aprovechamiento del agua que terminaban en pleitos. Sus sentencias nos han llegado a través de las Reales Chancillerías o audiencias que administraban la justicia en Castilla. Dividida por el río Tajo, comprendía hacia el norte, la Real Chancillería de Valladolid, y hacia el sur, la Chancillería de Granada. Eran tribunales de primera instancia que despachaban pleitos civiles y criminales; hacia 1527 se crearon tribunales intermedios, Galicia, Navarra, Mallorca, Valencia.

Las tipologías utilizadas según la procedencia de los documentos son:

- Documentación procedente de Hacienda y del fisco. Expedientes de Hacienda, libros de cuentas, libros de diezmos, endeudamiento de alcabalas y gestión de otras cargas y sisas; censos, préstamos hipotecarios (son créditos privados a particulares).
- Documentación procedente de la agricultura y ganadería. La producción se puede medir siempre que haya una continuidad; libros de positos que contienen registros de granos y cosechas; arriendos y utilización de dehesas, de bienes de propio y comunales.
- Documentación procedente de órganos de gobierno municipales. Los libros de actas del pleno contienen la información relativa a la actividad municipal; tienen gran continuidad, en algunos municipios alcanza a los inicios de la Edad Media, en otros debido a causas externas, ya sean incendios, inundaciones o plagas han desaparecido en gran parte. En ellos podemos encontrar datos sobre rogativas, que solicitaba el Ayuntamiento a las parroquias o catedrales con el fin de obtener lluvias para que llegaran a los campos y fuentes para el abastecimiento del municipio. Otros ejemplos de documentos oficiales son privilegios, títulos, estatutos, ordenanzas municipales, concordias.
- Documentación judicial. Pleitos entre municipios por el uso indebido del agua, y de los accidentes naturales, así como el aprovechamiento de bienes que no están en su término

municipal; pleitos entre vecinos por la construcción de molinos en lugares donde ya existían otros ingenios hidráulicos, entorpeciendo la molienda de granos o impidiendo que llegue el agua a las tierras de labranza; sentencias y libros de deliberaciones de los tribunales del agua.

- Documentación eclesiástica y monástica. Los libros de actas capitulares, recogen la información relativa a los oficios religiosos realizados en las parroquias, catedrales y capillas, procesiones, peregrinaciones en nombre del patrón de la ciudad para conseguir el agua necesaria para regar las cosechas; dependiendo del oficio realizado, así se consideraba la sequía.

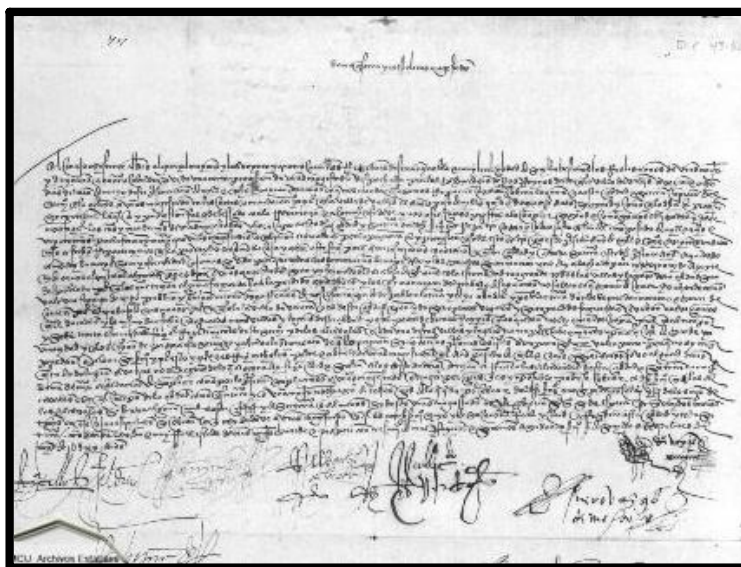


Fig 1: Carta del Concejo de la Ciudad de Sevilla para que se suspendiese la cobranza del servicio acordado en las Cortes de Valladolid de 1518 a causa de la sequía y esterilidad de los campos. Archivo General de Simancas, cámara de Castilla, legajo 43, documento 52, 1521/06/sd.

#### 4. RECONSTRUCCIÓN PALEOCLIMÁTICA MEDIANTE AGROCLIMATOLOGÍA

##### 4.1. Introducción

Esta rama dentro del proyecto SINEAQUA tiene como objetivo desarrollar un modelo agrometeorológico de las producciones agrícolas que permita relacionar las condiciones meteorológicas con las productividad agrícola de los diferentes cultivos y zonas de España. Así tras la calibración y validación del modelo tratar de reconstruir los valores de precipitación anual asociados a los valores de las producciones agrícolas entre los siglos XVI al XIX recogidas en los registros de las diferentes fuentes historiográficas, pudiendo llegar a reconstruir parcialmente las series de precipitación hasta el siglo XVI.

Es conocido y aceptado por todos que las fluctuaciones meteorológicas determinan en gran medida las épocas de labranza y los resultados productivos de estas. Los cultivos necesitan

atender unas necesidades hídricas, de lo contrario se ven sometido a un estrés hídrico que influye negativamente en su desarrollo. Aunque el estrés hídrico puede ser generado por un exceso de humedad esta posibilidad es despreciable en climas mediterráneos donde son los periodos de sequías los principales causantes de este fenómeno. Esto sugiere que en épocas de sequía la relación entre la disponibilidad de agua por parte del cultivo y las producciones es muy directa, tanto que existen infinidad de modelos que estudian esta relación con diferentes grados de aproximación, como: *SWAP*, *CERES* y *WOFOST* (EITZINGER. et al, 2004). Debido a su especificidad su aplicación en las diferentes las zonas de España no es todo lo buena que se desea y exigen una enorme disponibilidad de datos para su implementación, en definitiva, para lograr los objetivos es necesario construir un modelo que sea aplicable al área de estudio en función de la disponibilidad de datos existente.

#### 4.2. Descripción del modelo

El modelo describe la relación “agua-suelo-planta” calculando la disponibilidad hídrica por parte de la planta mediante un balance hídrico. El balance hídrico se realiza en base a una simplificación del modelo hidrológico de Témex (TEMEZ 1977), que permite la simulación del balance de humedad en el suelo a escala mensual, a partir de la cual se obtiene los valores de evapotranspiración real, *ETa*. De forma que una vez conocidas las necesidades hídricas mensuales de la planta representadas por los valores de *ETa* y la disponibilidad de agua mediante el balance hídrico mensual podemos valorar en que etapas se produce estrés hídrico y que influencia ejerce en el rendimiento del cultivo mediante la relación descrita por (DAREMBOOS y KASSAM, 1979) en la siguiente expresión:

$$(1 - Y_a/Y_m) = K_y * (1 - ET_a/ET_m)$$

Donde *Y<sub>a</sub>* es el rendimiento real del cultivo, *Y<sub>m</sub>* el rendimiento máximo en condiciones óptimas, *K<sub>y</sub>* es un factor de respuesta del rendimiento al déficit hídrico y *ET<sub>m</sub>* es la evapotranspiración máxima.

La calibración del modelo se realiza comparando los valores de *Y<sub>a</sub>* simulados con los procedentes del Anuario de Estadística Agroalimentaria buscando maximizar el factor *R<sup>2</sup>* de Pearson (VEN TE CHOW, 1988). Y para finalizar, una vez calibrado y validado el modelo, a los *Y<sub>a</sub>* simulados se los asigna un valor de precipitación anual como muestra gráficamente la figura 2.

#### 4.3. Conclusiones

La relación entre la precipitación y los valores de producción muestra como estos dependen de la precipitación. Esta relación no se aprecia por encima de cierto umbral de precipitación lo que indica que esta es el principal factor limitante de las producciones solo en aquellos años en los que la precipitación es inferior a un cierto nivel.

#### 4.4. Futuros retos

Desarrollar una metodología que permita relacionar los valores de producción procedentes del MAPA con los valores registrados en los *diezmos* desde mediados del XVI a mediados del XIX y posteriormente asignar a cada *diezmo* un valor de precipitación anual, de forma que puedan reconstruirse serie de precipitaciones anuales hasta mediados del XVI para cada provincia de España.

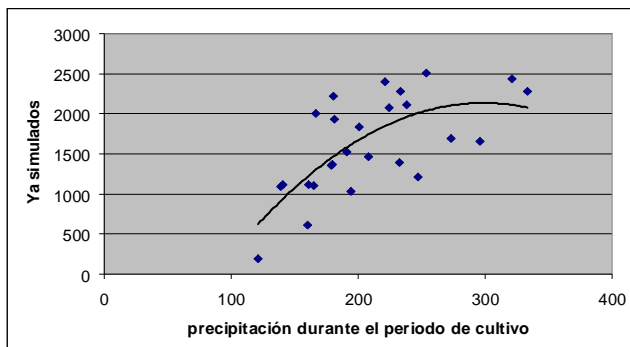


Fig. 2. Precipitación frente a *Ya* simulados para Valladolid desde 1980 a 2005

## 5. RECONSTRUCCIÓN PALEOCLIMÁTICA MEDIANTE DENDROCRONOLOGÍA

### 5.1 La ciencia de la Dendrocronología

La Dendrocronología es relativamente joven. Se empezó a desarrollar a mediados del siglo XIX por el alemán Kuechler, quien se dio cuenta que durante la pertinaz sequía que asoló Texas en esta época, los anillos de crecimiento de los árboles aparecían más estrechos. Ya en la década de 1930, el astrónomo Douglas se percató de la existencia de unos ciclos climáticos provocados especialmente por las fases de las manchas solares que afectan a la radiación solar que la Tierra recibe. Este científico funda en 1937 el “Laboratory of tree Ring Research”, de la Universidad de Arizona, y sienta las bases de la dendrocronología moderna. En las últimas décadas se producen grandes aportaciones en la Dendrocronología, destacando las aportaciones de Fritts (1976), Guiot, C. (1990) y Cook et al (1999), así como el gran desarrollo de técnicas estadísticas de análisis multivariantes y los métodos de reconstrucción.

La dendrocronología es la ciencia que se encarga de estudiar y datar los anillos de los árboles. La dendroclimatología se encarga de relacionar el clima en el que vivieron los árboles y sus anillos.

Como ya se ha citado en el epígrafe 1, los países mediterráneos, entre ellos España, poseen una rica historia que les dota de una fuente casi inagotable de datos históricos sobre el clima pasado. Sin embargo, la gran dispersión climática y una limitada riqueza forestal, hace muy complicada una única reconstrucción dendroclimática en España. Las realizadas en nuestro país, hacen normalmente una reconstrucción local, esto es, recomponen el clima en alguna estación meteorológica cercana al lugar donde se sitúan los árboles. Otros trabajos hablan de una señal macro climática que afecta a toda la península, aunque sólo son capaces de reconstruir el clima de unas series concretas (FERNADEZ CANCIO y MANRIQUE, 1997).

### 5.2 ¿Por qué se forman los anillos de crecimiento de los árboles?

El tronco leñoso de los árboles, está formado por la peridermis o corteza, floema, xilema y cámbium vascular.

El árbol tiene dos tipos de crecimiento, el primario, en sentido vertical que le permite ganar altura, y el secundario, en grosor, que dota al tronco de mayor estabilidad. A la Dendrocronología es el crecimiento secundario el que le interesa. En los climas templados el crecimiento se produce en la estación vegetativa (primavera y verano) cuando las condiciones climáticas son favorables. El cámbium se divide en dirección radial provocando un ensanchamiento del xilema y generando nueva corteza. Cuando llegan las condiciones desfavorables en otoño e invierno, el cambio de estado de crecimiento activo a inactivo produce una marca oscura y de alta densidad en la madera llamada **anillo de crecimiento**.

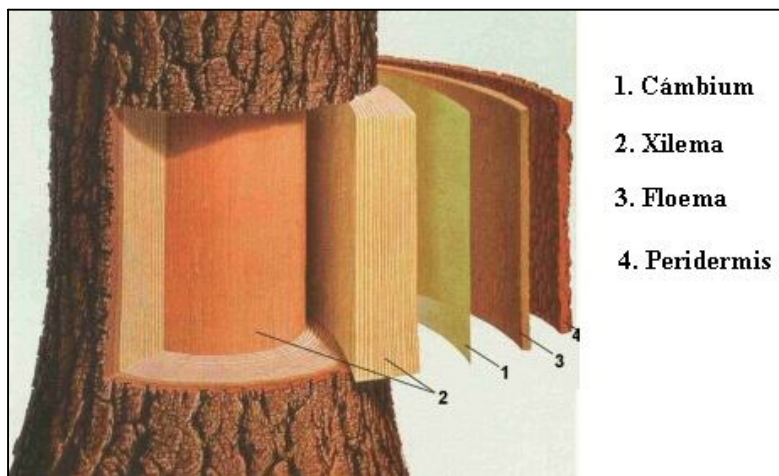


Fig 3: Partes del tronco del árbol.

### 5.3 Planteamiento del problema y metodología

Uno de los principales problemas que se plantean en España es la dificultad, por la dispersión climática y heterogeneidad en la localización de datos dendrocronológicos, de hacer una única reconstrucción para todo el territorio (FERNANDEZ CANCIO y MANRIQUE, 1997).

En el caso de SINEAQUA, desarrollamos una metodología novedosa que procure recoger la principal señal climática de un conjunto de dendrocronologías y hacer una reconstrucción dendroclimática en el área más amplia posible, dentro de un lícito intervalo de confianza.

La metodología sigue el esquema de la figura siguiente. Existe un punto de arranque que va a parar al estudio del **modelo biológico**. En éste, se pretende detectar la señal climática común a todas las dendrocronologías creando grupos con alta correlación cruzada. Seguidamente, se localiza el periodo de tiempo (los meses) cuya precipitación está más relacionada con el crecimiento del anillo de los árboles.

Cabe destacar que otra de las aportaciones que esta metodología realiza es el diseño de unos filtros de series temporales. Estas herramientas estadísticas permiten al investigador localizar más nítidamente las relaciones entre precipitación y anchura del anillo del árbol al eliminar distorsiones de las series temporales. Por las características propias de estas series temporales



(autocorrelación en el caso de las dendrocronologías y ruido blanco en el caso de las precipitaciones), los filtros se hacen especialmente útiles.

Si los resultados son aceptables y conseguimos un periodo de tiempo suficientemente largo, creamos un **modelo físico**, que consiste en reconocer un área donde la precipitación sea lo más parecida posible a la que relata la señal climática principal de las dendrocronologías. Esperamos conseguir el área más grande posible, aunque existe otra metodología, la Reconstrucción Punto por Punto (COOK et al, 1999), que puede construir una malla muy extensa (hasta de todo el oeste de EEUU) y se mide la calidad de la reconstrucción en cada nodo.

Una vez visto que el modelo físico cumple las condiciones de amplitud y relación con la señal de las dendrocronologías buscada, procedemos a realizar la **reconstrucción climática** mediante la calibración y verificación del Método de Regresión Lineal.

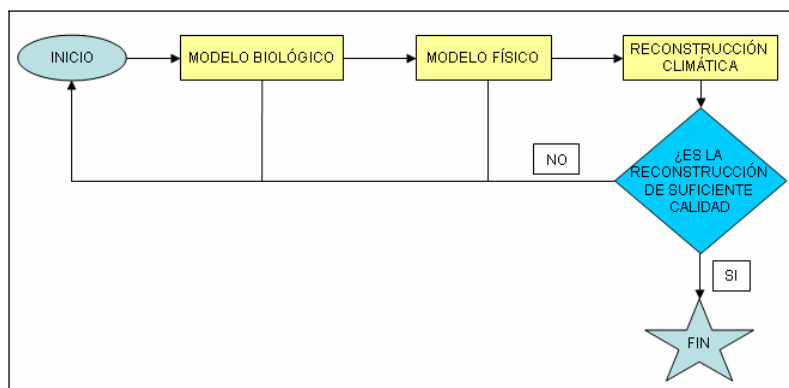


Fig 4: Esquema de la metodología para las reconstrucciones dendroclimáticas

## 6. CONCLUSIONES

Un mejor conocimiento de las características y recurrencia de las sequías puede aportar importantes avances en el conocimiento de nuestro clima y medio ambiente. Es importante conocer sus propiedades temporales y espaciales para la mejora de la gestión y planeamiento de los recursos hidráulicos, tratando de limitar sus consecuencias.

La reconstrucción de los episodios de sequía permitirá así mismo el correcto análisis de su recurrencia, así como relacionarla con algunas de las causas que pueden inducirlas: evolución de las manchas solares y actividad solar, impacto del cambio climático, etc.

El proyecto SINEAQUA supone en España un importante avance en la Investigación y Desarrollo del conocimiento de nuestro clima y los recursos hídricos disponibles, tan importante par a entender los procesos ambientales que tanto nos afectan.

## 7. REFERENCIAS

- BARRIENDOS, M. Inédito.
- BRADLEY, R.S. (Editor) (1990) *Global changes of the past*. UCAR/OIES. Boulder, Colorado, pp 101-115.
- BRAJOS RUIZ, J.J. et al (2006) *Los recursos hídricos en Tenerife frente al cambio climático*. III Congreso Nacional de Ingeniería Civil, territorio y Medio Ambiente. Zaragoza.
- BRIFFA, K.R. (1995) *Interpreting high-resolution Proxy climate data – The example of dendroclimatology, in Analysis of climate variability*. Applications of statistical techniques. Springer. Berlin. 77-94.
- BARRIENDOS, M. (1999) La climatología histórica en el marco geográfico de la antigua monarquía hispánica. *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, (3): pp 32-54
- CEDEX (1995). *Curso sobre las sequías en España*. Madrid.
- COOK, E.R. et al. (1999) Drought Reconstructions for the Continental United States. *Journal of Climate*. 12: pp 1145-1162.
- DAREMBOOS, J y KASSAM, A.H. (1979) *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Ed: FAO. Roma
- EITZINGER, J., et al (2004). “Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions”. *Ecological Modelling*. 171, 223–246.
- FERNANDEZ CANCIO, A., MANRIQUE, E. (1997). *Nuevos métodos de reconstrucción dendroclimática: aplicaciones al estudio climático y fitoclimático del último milenio*. Madrid: pp. 327.
- FRITTS, H.C. (1976) *Tree ring and climate*. London: Academic Press. p. 367.
- SAZ SANCHEZ, M.A. (2003) *Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV. Estudio dendroclimático*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, pp 1-38
- TEMEZ, J.R. (1977) *Modelo matemático de transformación precipitación-aportación*. Ed: Asociación de Investigación. Industrial Eléctrica-ASINEL.
- TILL, C., GUIOT, J. (1990) Reconstruction of precipitation in Morocco since 1100 A.D. based on Cedrus atlantica tree-ring widths. *Quaternary research*. 33: 337-351.
- VEN TE CHOW y D. R. MAIDMENT, L. W. MAYS (1988) *Applied hydrology*. Ed: McGraw-Hill. USA.