

Trabajo Fin de Grado

Reconstrucción de la precipitación estival en el Sistema Ibérico desde el siglo XVIII mediante fuentes dendrocronológicas.

Reconstruction of the summer rainfall in the Iberian System since the 18th century by dendrochronological sources.

Autora

Laura Leonardo Cabello

Director

Luís Alberto Longares Aladrén

Universidad de Zaragoza. Facultad de Filosofía y Letras.
Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. 2015-2016

RESUMEN

La Dendrocronología permite realizar reconstrucciones climáticas de periodos pre-instrumentales que son calibradas con los datos instrumentales actuales. El estudio de los anillos de los árboles no sólo nos permite realizar reconstrucciones del pasado climático, sino que también sirven para validar escenarios climáticos futuros. El conjunto de datos derivados contribuirá a seguir profundizando en el análisis del cambio climático y de esta forma poder prever sus posibles consecuencias sobre la sociedad, la economía y la naturaleza.

El objetivo principal de este estudio es conocer los factores climatológicos que afectan a la formación de madera tardía e inferir datos climáticos previos a la época instrumental.

En este trabajo, se han utilizado 582 *cores* pertenecientes a 301 árboles de las especies *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* del conjunto del Sistema Ibérico Español. Se ha aplicado un nuevo método de estandarización basado en el área basal del tronco, para desarrollar una cronología capaz de retener la alta y la baja frecuencia.

Gracias a este método innovador hemos conseguido una reconstrucción climática de 277 años (desde 1735 a 2012) con una alta correlación ($r= 0,613$) con el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). Aportamos con este trabajo 215 años de datos climáticos previos a la época instrumental hasta ahora desconocidos.

Palabras clave: Dendrocronología, anillos de crecimiento, reconstrucción climática, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, madera tardía, Sistema Ibérico, cambio climático.

ABSTRACT

Dendrochronology allows us to make climate reconstruction from pre-instrumental periods which it is calibrated with current instrumental data. The study of tree rings lets us reconstruct past climatic moments and also forecast future weather conditions. The obtained data set will help us to deduce the disturbing climate change, as well as its consequences over society, economy and environment.

The main purpose of the study is to know the climatological factors affecting the *latewood* forming and infer climatological data from before instrumental era.

In this study, we analysed 582 cores of 301 *Pinus sylvestris* and *Pinus uncinata* trees from Spanish Iberian System forests. A new method based on normalization of trunk basal area has been implemented in order to develop a chronology able to retain the high and low frequency.

Thanks to this innovative method we achieved a 277 years climate reconstruction (from 1735 to 2012) with a high correlation ($r = 0,613$) with the Standardized Precipitation Index (SPI). With this study we contribute with climatological data from 215 years before instrumental era previously ignored.

Keywords: Dendrochronology, growth rings, climate reconstruction, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, latewood, Iberian System, climate change.

A mi director, Luís Alberto Longares, por sus consejos, enseñanzas y apoyo durante la realización de este Proyecto; y por descubrirme una disciplina que a día de hoy me apasiona.

Al grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales” de la Universidad de Zaragoza, por guiarme y facilitarme toda la información que he precisado en la realización de este Trabajo Fin de Grado, a la vez de contagiarme la pasión que sienten por su trabajo. En especial a Ernesto Tejedor Vargas y Martín de Luis Arillaga por enseñarme, ayudarme y apoyarme a lo largo del proyecto

Un especial agradecimiento a José Carlos, Teresa, Crispín y Flora, que me enseñaron el valor de los bosques y me permitieron crecer, aprender y disfrutar de los pinares sorianos.

Por último, a mi familia por su apoyo incondicional, su paciencia, comprensión y orientación.

A todos ellos mi gratitud y reconocimiento.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1.- Introducción	6
1.1.- Formación de los anillos de crecimiento	7
1.2.- Crecimiento según región climática	9
2.- Objetivos y justificación	10
3.- Área de estudio	12
3.1.- Especies estudiadas	14
4.- Materiales y métodos	17
4.1.- Análisis de los anillos de crecimiento	18
4.2.- Datos climáticos y calibración	20
4.3.- Calibración/verificación y reconstrucción climática.....	21
5.- Resultados	23
5.1.- Cronología	23
5.2.- Señal dendroclimática (SPI y SPEI)	24
5.3.- Calibración - verificación	24
5.4.- Reconstrucción climática.....	26
5.5.- Episodios extremos	27
6.- Discusión y conclusiones	29
6.1.- Sobre los resultados.....	29
6.2.- Sobre la metodología empleada	30
7.- Bibliografía y recursos web	32-36
8.- Cronograma	38

ÍNDICE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Fig. 1. Climograma del Sistema Ibérico. Fuente Universidad de Zaragoza. Departamento de Geografía. Elaboración propia	13
Fig. 2. Mapa de distribución de las muestras de <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Pinus Uncinata</i> en el Sistema Ibérico español. Fuente: Grupo “clima, agua, cambio global y sistemas naturales”. Universidad de Zaragoza y Centro Nacional de Descargas.....	14
Fig. 3. Mapa de distribución de <i>Pinus sylvestris</i> . Elaboración propia.....	15
Fig. 4. Mapa de distribución de <i>Pinus uncinata</i> . Elaboración propia.....	16
Fig. 5. Tabla de datos, muestras de <i>Pinus sylvestris</i> y <i>Pinus uncinata</i>	17
Fig. 6. Cronología, número de muestras y EPS. Elaboración propia	23
Fig. 7. Correlación entre índices SPI y SPEI y la cronología para el periodo 1950-2012. Elaboración propia	24
Fig. 8. Calibración-verificación para los periodos 1950-1982 y 1982-2012. Elaboración propia	25
Fig. 9. Tabla estadísticos calibración-verificación. Reconstrucción SPI agosto con tres meses de acumulación. Elaboración propia	26
Fig. 10. Reconstrucción climática 1735-2012. Elaboración propia	26
Fig. 11. Periodos secos y húmedos (extremos) según el rango del índice SPI. Elaboración propia	27
Fig. 12. Cronograma. Horas empleadas en cada proceso de aprendizaje	38
 Ilustración. 1. Sección transversal de un tallo leñoso. Fuente. Recurso web: La edad de los árboles	 8
Ilustración. 2. Mapa topográfico de España. Fuente: IGN.....	12
Ilustración. 3 Fotografías <i>Pinus sylvestris</i> . Fuente. Recurso web: Imágenes de archivo.....	15
Ilustración. 4 Fotografías <i>Pinus uncinata</i> . Fuente. Recurso web: Imágenes de archivo.....	16

Ilustración. 5. Barrena <i>Pressler</i> y extracción <i>core</i> con medición de diámetro. Elaboración propia	18
Ilustración. 6. El antes y el después de la extracción de muestras. Fuente. recurso web: http://diplotaxis.blogspot.com.es/2011/09/dendrocronologia.html	19
Ilustración. 7. Mesa de medición con lupa. Fuente: Tejedor, E (TFM 2012)	19
Ilustración 8. Datación anillos de crecimiento de material arqueológico/ histórico. Fuente: Bernabei, M., & Macchioni, N. (2012)	30

1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe consenso sobre el aumento de las temperaturas medias como consecuencia del cambio climático. Durante las últimas décadas, se han sucedido fenómenos extremos, como el aumento en la frecuencia y magnitud de las sequías, o el incremento de las temperaturas (IPCC, 2013). Los estudios actuales afirman que ha aumentado la gravedad de los períodos de sequía en España, pero el conocimiento y la información son escasos y se han limitado a describir cuál ha sido su devenir en las últimas cinco o seis décadas (González-Hidalgo et al., 2011). El conocimiento de estos patrones es crucial ya que nos permitirá estudiar la evolución y los ciclos que se sucederán, con la intención de poder validar modelos climáticos futuros.

En España, hasta mediados de los años cincuenta del pasado siglo, existía una baja cantidad de estaciones meteorológicas que recogían datos. A partir de 1950 se establece una red de estaciones más amplia por la Península Ibérica, aunque presentaba algunos déficits en estaciones por encima de 1.000 m.s.n.m (González-Hidalgo et al., 2011). Por este motivo, se comienza a recurrir a otras fuentes como la que nos concierne, con el objetivo de reconstruir información climática continuada y de calidad de periodos preinstrumentales.

Los árboles son como diarios en los que cada año queda impresa una página como si de un registro de clima se tratase y cuanto más viejos son, más hojas tiene el diario y más información guardan a la espera de que queramos recogerla y sepamos interpretarla. Hay especies milenarias como la Secuoya de California, (*Sequoia sempervirens*), que vive más de 2.000 años; la sabina (*Juniperus thurifera*), que también puede alcanzarlos, el olivo (*Olea europaea*) que puede alcanzar el milenio, o el *Pinus longaeva* considerado como el árbol más longevo del mundo. No son solo especies dignas de admiración por su belleza y dimensiones, sino que constituyen un registro importante del clima pasado que quedó impreso en cada uno de sus anillos de crecimiento.

La ciencia que se encarga del estudio y análisis de este proceso, así como del patrón de crecimiento de los anillos de los árboles se denomina *Dendrocronología* o también conocida como *Datación de los anillos*. El estudio de los anillos de crecimiento se ha implantado en diferentes áreas científicas como la Ecología, la Arqueología, la Climatología. De la unión con esta última nace la Dendroclimatología, que es la ciencia paleoclimática que, mediante los datos obtenidos en las técnicas dendrocronológicas, realiza reconstrucciones climáticas. Su objetivo es establecer e identificar cada anillo con un determinado año y conocer así la evolución climática que se ha sucedido no sólo durante los años de vida del árbol.

Esta ciencia relativamente joven, fue impulsada por el astrónomo americano Andrew Ellicott Douglas a principios de siglo XX, y permite cuantificar de forma precisa el crecimiento radial de los árboles, y la influencia que el clima, el suelo, la edad, tienen en cada especie.

Conociendo el número de anillos de crecimiento se puede determinar los años del árbol, y fijándonos en la amplitud y regularidad de la madera temprana y tardía podremos conocer no sólo las condiciones climáticas del momento de la formación si no también inferir como afecta cada uno de los factores externos e internos al crecimiento vegetal.

Aquí es donde radica la importancia de este tema: podemos conocer el tiempo, la temperatura o las precipitaciones de cualquier lugar, pero estos registros instrumentales (fiables) están limitados a no más de 70 años. Mediante el estudio y análisis del crecimiento de los anillos y los registros existentes se puede ampliar la escala tanto temporal como espacial, generando un avance muy relevante. Como afirma el Dr. Martín de Luís: “*los árboles más que secretos son capaces de contar historias y la labor nuestra es interpretar esas historias e intentar comprenderlas*” (El secreto de los árboles, 2014).

1.1.- La formación de los anillos

Los tallos leñosos tienen dos tipos de crecimiento, el primario que consiste en un crecimiento en altura y el secundario que genera un aumento del grosor. El crecimiento en grosor es debido principalmente a la formación de xilema, que cada año dará lugar a un anillo de crecimiento (recurso web: La edad de los árboles). La estructura de los anillos de crecimiento de las coníferas hace que esta especie se haya empleado tradicionalmente y predominantemente en los estudios dendrocronológicos. Para este estudio hemos seleccionado dos especies del género *Pinus*, cuya estructura de anillos y disposición de los mismos es apropiada para este tipo de trabajos.

El crecimiento, como cualquier proceso, no es continuo y se detiene debido a la limitación de factores externos, como el clima, intervención antrópica, deforestación,... y/o internos como las enfermedades. En zonas con una estacionalidad climática muy marcada, el edafólogo Henri Erhart (1951) afirmaba, que detienen su crecimiento durante la época más desfavorable, condiciones rexistásicas y se reinicia el crecimiento cuando las condiciones son más benignas, condiciones biostásicas. Este patrón anual de actividad y reposo se esculpe sobre la madera en forma de capas concéntricas, denominadas anillos de crecimiento.

Las especies estudiadas, *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*, son plantas dicotiledóneas que poseen dos crecimientos estacionales: en primavera, las condiciones climáticas (calor, mayores nutrientes, agua) permiten que el xilema crezca más y la banda clara es normalmente más ancha, se denominada como *madera temprana* o *earlywood*; el otro crecimiento se va produciendo durante el periodo verano-otoño, en el que se forma la banda oscura (*madera tardía* o *latewood*), cuando generalmente las condiciones climáticas son más restrictivas por el efecto de la sequía. Por consiguiente, en estos meses su xilema crece poco y la banda por lo general es más estrecha. El conjunto de ambas partes se conoce como anillo completo y el estudio de su grosor (*ring-width*) representa el método dendrocronológico más empleado en este tipo de estudios, a diferencia, como veremos más adelante de nuestro proyecto, en el que analizaremos el grosor de la madera tardía o *latewood*.

La madera temprana tiene menor densidad y está compuesta por *traqueidas* anchas con paredes celulares estrechas en sección radial. Por el contrario, la madera tardía está compuesta por células más pequeñas con paredes celulares más anchas que acumulan lignina y de ahí su color más oscuro. La anchura del anillo será el resultado del número y tamaño de las células durante su período de crecimiento (Camarero et al., 1997).

Los patrones fenológicos del crecimiento anual de los anillos están influenciados por las distintas condiciones climáticas (precipitaciones, temperatura, viento, insolación,...), que a su vez dependen de la altitud y latitud, de la orientación, de las condiciones abióticas locales y de otros factores internos como la edad del árbol. Debido a que estas condiciones son más suaves y benignas en los hábitats del *Pinus sylvestris*, la formación de los anillos de crecimiento comienza antes que la del *Pinus uncinata*, los anillos son más anchos y los colores entre la madera tardía y temprana son más homogéneos que en este.

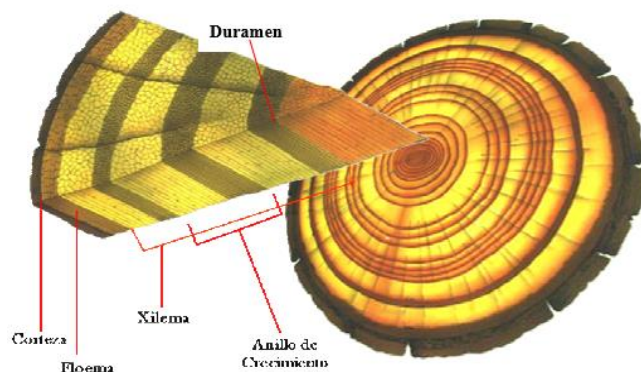


Ilustración. 1. Sección transversal de un tallo leñoso. Fuente recurso web: La edad de los árboles

En Europa, las reconstrucciones climáticas se han realizado mediante información *multiproxy* que enlazan datos instrumentales con diferentes variables derivadas del estudio de los anillos de los árboles (Briffa et al. 2002). Se cree, que el análisis de la evolución del clima mediante la Dendroclimatología podría determinar si los cambios advertidos tienen influencia de carácter antropogénico o natural. Con la aparición del término Desarrollo Sostenible en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (1992) y con la importancia y preocupación acerca del cambio climático de las últimas décadas, averiguar cuál es el origen que propicia y acentúa esta situación, permitirá eliminar la dualidad de pensamiento entre el origen antropogénico o natural que algunos científicos sostienen, posibilitando la toma de decisiones.

Partiendo de la base que “la estructura de los anillos de crecimiento refleja la influencia de factores externos e internos – clima, suelos, competencia, etapa sucesional, situación del anillo en el tronco, edad del árbol,...” (Fritts, 1976; Creber & Chaloner 1984; Jagels et al. 1994; Larson 1994), se deberán eliminar todas aquellas perturbaciones e influencias que de alguna forma modifiquen o determinen el crecimiento de cada una de las partes del anillo de crecimiento, con el fin de poder observar el efecto únicamente del clima sobre los árboles muestreados.

Si consideramos los anillos de crecimiento como fuentes de información fenológica (Camarero et al. 1997) podremos obtener información fundamental tanto para el análisis, como para la comprensión de la evolución climática.

1.2.- Crecimiento según la región climática

El clima influye y controla el crecimiento radial de los árboles, aunque este también dependerá de las interacciones con otros factores. Cada especie responde de una manera a los cambios climatológicos y por tanto a los diversos factores que lo conforman en función de su ecología y características fisiológicas. Todo ello generará una respuesta individual de cada una de las especies, limitando su distribución, disposición, adaptación y cantidad.

En aquellas regiones templadas-frías, en las que las oscilaciones anuales de temperatura y precipitaciones son muy pronunciadas, el periodo de crecimiento estará muy bien delimitado. Será un periodo corto, extendiéndose desde finales de primavera hasta el final del verano o incluso principios del otoño.

En las regiones mediterráneas se alternan numerosas especies de diversos orígenes, que varían en función del gradiente climático y altitudinal. Las condiciones típicamente mediterráneas, presentan bajas temperaturas en invierno y altas en verano, con escasez de agua en estos meses; por lo que la época más favorable de crecimiento es la primavera y el otoño. La actividad del cambium, por lo tanto, estará determinada por esta estacionalidad, siendo muy sensible a cualquier variación de los factores ambientales (variabilidad del clima, composición atmosférica, edafología,...), así como de los procesos antrópicos (fuego, talas, deforestación, etc.).

En el caso de la zona mediterránea, el uso intensivo del territorio, así como la explotación maderera, han modificado la estructura de los bosques, influyendo en su dinámica y potencial de respuesta a los cambios climáticos, pero también sobre el medio ambiente y ecosistemas del que forman parte.

2.- OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

Numerosos estudios han analizado los datos climáticos de España y aseguran que la gravedad de las sequías ha aumentado durante las últimas cinco décadas (Vicente-Serrano et al., 2011 y 2014), aunque es difícil determinar los cambios y la gravedad debido a la baja cantidad de datos climáticos instrumentales fiables. Por ese motivo, en este trabajo presentamos la reconstrucción climática del *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* del conjunto del Sistema Ibérico, con el fin de poder validar la frecuencia de sequías y su magnitud en esta región vulnerable.

Limitados por los registros climáticos instrumentales, es fundamental contribuir a la exploración de datos anteriores a estos, con el fin de desarrollar reconstrucciones de temperatura y precipitaciones, así como de eventos extremos y observar la relación existente con el cambio climático.

La Dendrocronología es muy útil para reconstruir el clima del pasado y obtener datos que no se disponen en los registros climáticos, y también para advertir qué variables limitan el crecimiento de los árboles y cuál es su grado de influencia. Asimismo, esta ciencia también sirve para estudiar diversos procesos que tienen lugar en escalas de tiempo muy amplias, como sucede en la Geología. Como afirman algunos estudios, los árboles pueden registrar el efecto de terremotos, inundaciones o incluso de erupciones volcánicas. Del mismo modo la Dendrocronología permite obtener información biológica importante, pues permite datar los años de germinación de cada ejemplar, lo que es clave para conocer la dinámica de crecimiento de las poblaciones; asimismo, la datación de madera histórica o arqueológica permitirá la reconstrucción climática de miles de años.

Los anillos de crecimiento son registros permanentes y periódicos (anuales), de los que se pueden obtener datos de periodos largos y establecer dataciones; así como aproximarse a la diversa variabilidad de la naturaleza climática. El estudio de los anillos de los árboles, en este caso pinos, permite inferir como fue el clima pasado. “*Los árboles pueden ayudarnos en esta labor, son magníficos testigos de la evolución del clima a lo largo de cientos de años*” (El secreto de los árboles, 2014).

Las comunidades forestales del Sistema Ibérico están muy expuestas a los efectos del cambio climático, al aumento de las temperaturas y a eventos climáticos extremos (IPCC, 2007). Los bosques sufren cambios en su crecimiento, productividad, distribución, estructura, debido a los efectos del cambio climático. Obtener las respuestas a estos cambios es complejo, ya que interactúan con otros factores. Para acercarnos a ellas, en este estudio hemos establecido los siguientes objetivos:

- (i) Conocer la respuesta, negativa o positiva, que tienen las dos fases de crecimiento anual (madera temprana y tardía) frente a los diversos factores climatológicos, con el fin de conocer la influencia del clima sobre nuestros bosques, sobre su distribución y sobre las tendencias de crecimiento; así como el devenir de los diversos ecosistemas naturales;
- (ii) Descubrir la relación entre los factores climatológicos y la localización geográfica mediante la respuesta de crecimiento de los árboles;

- (iii) Servir de apoyo para modelos de predicción climática, así como de gestión de los bosques del futuro;
- (iv) Generar reconstrucciones climáticas que puedan servir de modelo predictivo fiable para ser extrapolado a distintas zonas boscosas.

Conseguidos los objetivos anteriormente expuestos contribuiremos al aumento de la base de datos climáticos aportando datos pre-instrumentales, generaremos reconstrucciones climáticas fiables de los que poder derivar modelos predictivos, que nos permitirán ampliar el conocimiento acerca: del cambio climático, de su evolución, de eventos extremos sucedidos y de la respuesta de los bosques (distribución, disposición, tendencias de crecimiento, diferencias de crecimiento de la madera temprana y tardía,...) a todos ellos. Asimismo, se pretenden que nuestros resultados se puedan extrapolar a áreas próximas a las de nuestro estudio y a otros ecosistemas naturales.

3.- ÁREA DE ESTUDIO

Las muestras empleadas para este estudio han sido cedidas por el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, en concreto por el grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales”. Estas muestras se localizan a lo largo del Sistema Ibérico, abarcando las provincias de Soria, Zaragoza, Teruel y Castellón.



Ilustración. 2: Mapa topográfico de España. Fuente IGN.

El Sistema Ibérico es un sistema montañoso complejo en el que se suceden elevados conjuntos de sierras intercalados con depresiones de litologías muy variadas. Se extiende en dirección noroeste-sureste entre la Depresión del Ebro y la Meseta, por lo que el clima de la zona de estudio variará considerablemente desde el punto más occidental al más oriental, debido a la influencia Mediterránea.

Climáticamente (*fig.1*), la provincia de Soria se caracteriza por una clara influencia continental, la temperatura media es menor, existe un mayor número de días con heladas y la influencia ciclónica atlántica es mayor. Por el contrario, en la provincia de Teruel se da una mayor intensidad de sequías estivales, las tormentas derivadas de la influencia Mediterránea son más abundantes y posee mayor proporción de precipitaciones otoñales. Habrá que tener en cuenta que los contrastes pluviométricos y térmicos existentes en el Sistema Ibérico influirán en el modo de crecimiento de los distintos árboles.

En general, en el área de estudio, la precipitación media anual es de 520 mm. Las mayores precipitaciones tienen lugar en los meses de primavera y otoño (sus dos máximos), con frecuentes tormentas; durante el invierno las precipitaciones se producen por lo general en forma de nieve debido a su elevada altitud media.

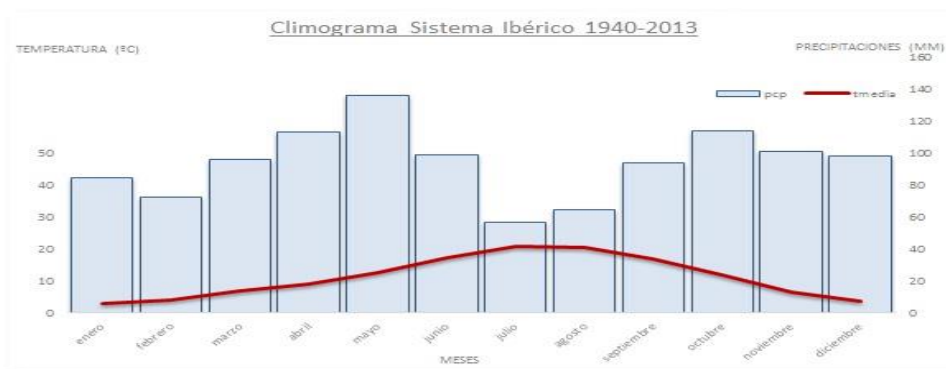


Fig. 1. Climograma S. Ibérico. Elaboración propia. Fuente: AEMET.

Las especies vegetales se ven influenciadas y determinadas por las características de cada uno de los pisos bioclimáticos existentes que varían en función de la altitud. En el Sistema Ibérico, según la adaptación a cada uno de los pisos podremos encontrar: en las zonas de menor altitud la especie *Pinus halepensis*; conforme aumentamos la altitud, encontramos poblaciones mejor adaptadas al clima de montaña como el *Pinus nigra* y el *Pinus sylvestris*, y ya en las proximidades a las cumbres encontramos el *Pinus uncinata*. Los árboles que crecen a una mayor altitud, pertenecientes al piso oro-mediterráneo, se caracterizan por sufrir grandes fluctuaciones de temperatura: en invierno pueden alcanzar puntualmente -20°C y durante el periodo de verano superar los 30°C .

Se han escogido los sistemas montañosos para la extracción de muestras, ya que son espacios lo más aislado posible de perturbaciones antrópicas. En España el uso intensivo del territorio también ha condicionado la dinámica y la estructura de los bosques, y por esta razón, las respuestas de los bosques al cambio climático pueden afectar a la abundancia de estos, a su crecimiento, y a su distribución (Brubaker 1986; Davis y Shaw 2001; Parmesan, 2006). Todos y cada uno de los factores que interactúan limitan la comprensión de la respuesta de los árboles, afectando también a la capacidad de predicción de los bosques al cambio climático (Woodward, 1987; Loehle y LeBlanc 1996).

Las comunidades boscosas del Sistema Ibérico fueron consideradas por el IPCC del año 2007, como zonas muy expuestas a los efectos del cambio climático, el aumento de eventos extremos (sequías y heladas) y el aumento de la temperatura media así lo atestiguan, por lo que tendremos que tenerlo presente durante todo el estudio.

En este contexto y con el fin de poder conocer el crecimiento, que sabemos está determinado por el clima, en este trabajo se abordará el análisis de dos poblaciones de *Pinus sylvestris* (PISY) y *Pinus uncinata* (PIUN) ubicadas en el sector soriano y turolense del Sistema Ibérico.

De los datos cedidos, que fueron puestos a disposición de la autora por parte del grupo de investigación “Clima, agua y cambio global y sistemas naturales” del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio y del Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA) de la Universidad de Zaragoza, se han escogido veinte localizaciones diferentes pertenecientes al Sistema Ibérico (fig.2).

De noroeste a sudeste se sitúan entre el Castillo de Vinuesa (SO) y Valdecuena (TE), a una altitud media de 1.613 m.s.n.m. En estos enclaves se obtuvieron un total de 582 muestras de 301 ejemplares de las dos especies anteriormente citadas, que poseen una media de edad aproximada de 150 años.

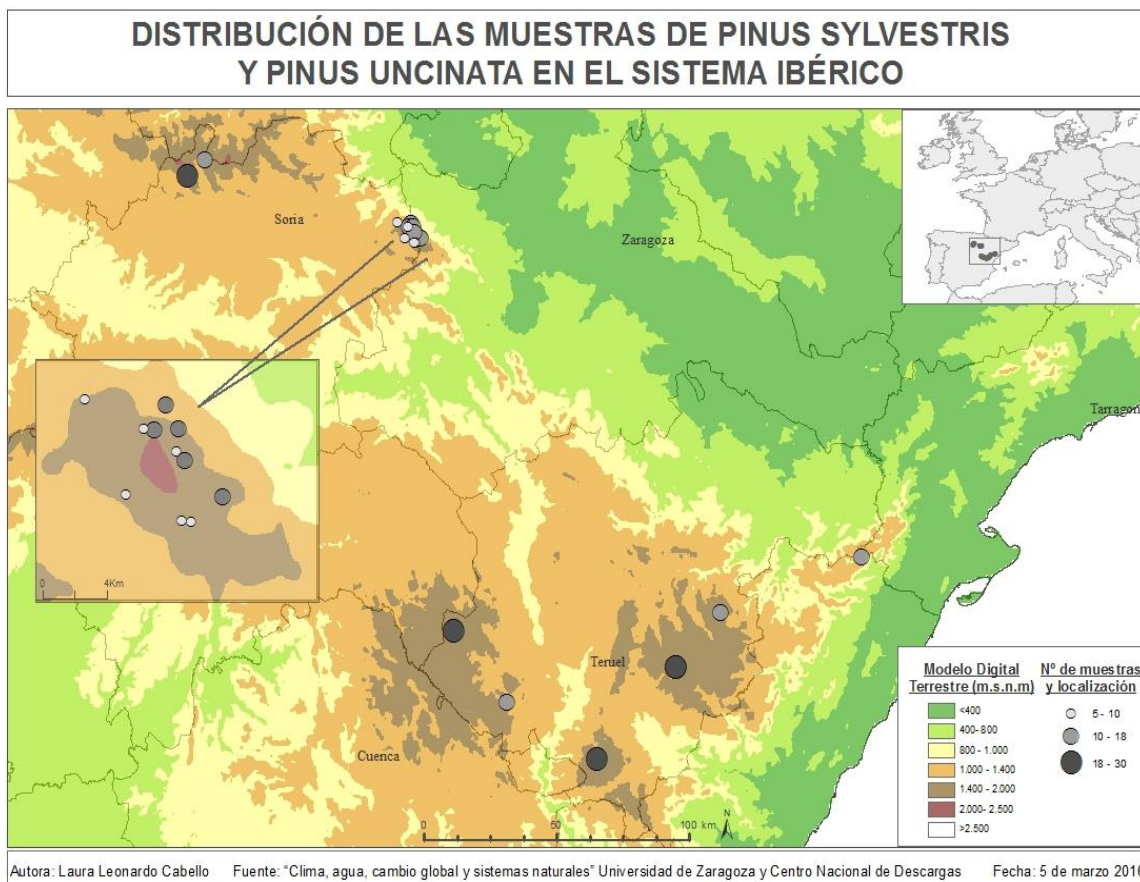


Fig. 2. Distribución de las muestras de *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* en el Sistema Ibérico español. Fuente: grupo "Clima, agua, cambio global y sistemas naturales" – Universidad de Zaragoza; y Centro Nacional de Descargas. Elaboración propia.

3.1.- Especies estudiadas

El pino silvestre (*Pinus sylvestris*) o también conocido como pino albar es una especie arbórea de la familia *Pinacea*, del género *Pinus*. Es muy habitual en el hemisferio Norte, extendiéndose por regiones relativamente frías, sobre todo del norte y centro de Europa y Asia, constituyéndose como el pino con mayor distribución. La masa de pino silvestre que ocupa la Península Ibérica constituye el límite suroccidental de su área de distribución mundial (fig.3) y tiene un gran valor biogeográfico.

En España se distribuyen por el Pre-pirineo y los Pirineos, el Sistema Ibérico, el Sistema Central, y varios enclaves de la Cordillera Cantábrica. Prefieren los lugares con precipitaciones que superen los 1.000 mm., aunque también se distribuyen por zonas con menor pluviometría. Se consideran resistentes, soportan bien la continentalidad, no son exigentes en cuanto a la humedad atmosférica, aunque sí con la del componente edáfico.

Los mayores ejemplares en España se sitúan entre los 1.000 y 2.000 metros de altitud, y se comportan como una especie de montaña: soportan altos grados de insolación, resisten inviernos muy fríos, fuertes vientos y elevadas precipitaciones. Se adaptan a todo tipo de suelos, aunque predominan en suelos silíceos y calizos; no viven en competencia con otras especies que les superen en altura.

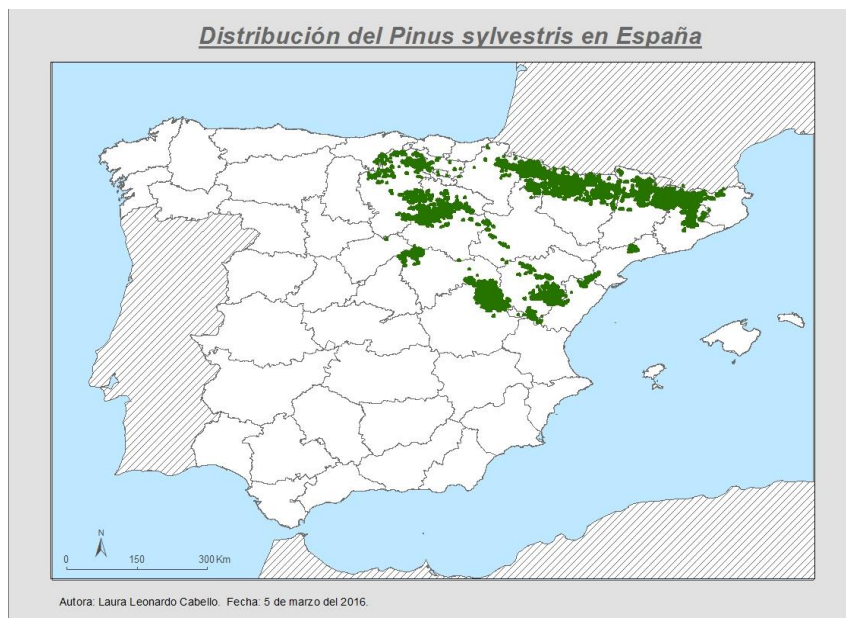


Fig.3. Distribución *Pinus sylvestris* en España. Elaboración propia.

Pueden alcanzar los treinta metros de altura; poseen una corteza parda-rojiza, de donde proviene su nombre común (albar). Poseen un porte esbelto, con tronco recto habitualmente y pocas ramas en su parte baja, su copa es cónica y sus hojas perennifolias son simples y se agrupan en acículas rígidas y punzantes de unos 3-7 cm de longitud dispuestas en parejas (Segura et al., 2010).

Las flores o estróbilos son conos, piñas, de forma oblonga, de color castaño, generalmente simétricas y de pequeño tamaño. Su madera es la más apreciada en carpintería, por su color y ductilidad, empleándose en la construcción de vigas, muebles, parquet, encimeras,... Muchos edificios antiguos, como iglesias, conventos, museos, retablos se hicieron a base de esta madera.



Ilustración. 3. Imágenes *Pinus sylvestris*. Fuente: recurso web.
Imágenes de archivo

La otra especie, el *Pinus uncinata* o pino negro (fig.4) es una especie típica de la región Eurosiberiana y se extiende por España, Francia y Suiza. En nuestro país habita de forma natural sobre todo en los bosques subalpinos pirenaicos donde coloniza cualquier tipo de suelo, entre los 1.700 y 2.200 metros de altitud (Ceballos y Ruiz de la Torre, 1979). Se distribuyen por las Sierras de Gúdar, Cebollera y Guara; y algunas repoblaciones en el Sistema Central y en el Moncayo. De Cantabria y el Principado de Asturias ha ido desapareciendo debido a la proliferación de los altos pastos en la Cordillera.

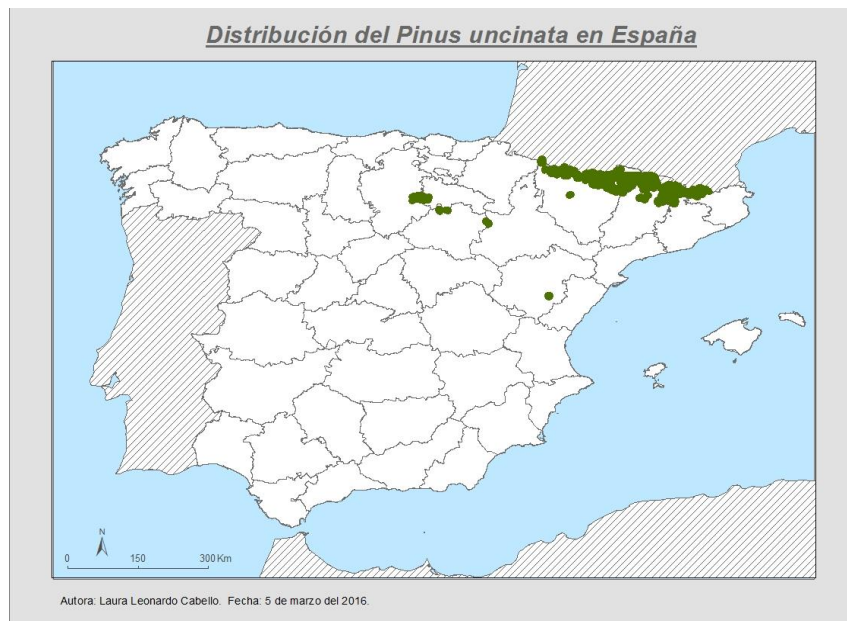


Fig.4. Distribución *Pinus uncinata* en España. Elaboración propia.

A lo largo de su distribución altitudinal, lo podemos observar conviviendo con hayas y abetos, conforme aumentamos en altitud con el *Pinus sylvestris* y en su límite altitudinal puede constituir la única especie arbórea que convive con arbustos como los enebros, rododendros, etc. Por sus características ecológicas, habitan en el piso subalpino, donde desempeña un papel fundamental de repoblación y protección del suelo.

Toleran los ambientes de alta montaña, inviernos fríos y largos con abundante nieve y vientos fuertes, pero en verano no soportan muy bien la sequía. Poseen unas acículas cortas, de 4 a 8 centímetros, gruesas y bastante rígidas de color verde oscuro que se disponen de dos en dos. Los conos femeninos tienen forma de piñas de tamaño pequeño y de forma asimétrica, de 4 a 7 centímetros de longitud de color marrón oscuro (Segura et al., 2010).

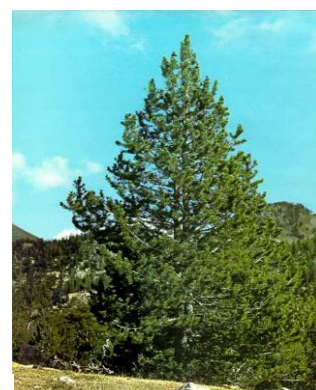


Ilustración. 4. Imágenes *Pinus uncinata*. Fuente: recurso web. Imágenes de archivo

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo, siguiendo unas determinadas pautas de disposición, forma, ubicación, orientación, tamaño, se han seleccionado 301 árboles de las especies *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* del Sistema Ibérico español. Las muestras cedidas, como se ha citado anteriormente, pertenece a la base de muestras del grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales” de la Universidad de Zaragoza (fig.5).

LOCALIZACIÓN	LAT	LON	ALT	ESPECIE	Nº ÁRBOL	Nº MUESTRA	EDAD MEDIA
Benatanduz – Muela Manchón (TE)	40,558	-0,458	1.700	PISY	13	25	191
Estación esquí Javalambre (TE)	40,109	-1,024	1.800	PISY	19	38	316
Castillo de Vinuesa (SO)	42,013	-2,751	1.900	PIUN	18	36	419
Chalet catalán (P.N. Moncayo)	41,809	-1,814	1.020	PISY	15	30	90
Haya Seca (P.N. Moncayo)	41,796	-1,823	1.510	PISY	15	15	71
Collado la Loma (P.N. Moncayo)	41,761	-1,772	1.635	PISY	13	24	57
Barranco de Apio – cabecera (P.N. Moncayo)	41,785	-1,806	1.420	PISY	5	10	87
Barranco Pedregal (P.N. Moncayo)	41,796	-1,805	1.190	PISY	14	28	77
Ladera Bco.Morca – pista la Cantalera (P.N. Moncayo)	41,78	-1,799	1.400	PISY	15	30	59
Arroyo los Cejos (P.N. Moncayo)	41,813	-1,875	1.520	PISY	10	20	46
Umbría de los Micaelos (P.N. Moncayo)	41,762	-1,845	1.480	PISY	10	19	38
Refugio de Majada Baja (P.N. Moncayo)	41,748	-1,795	1.780	PIUN	10	19	48
Cresta Majada Baja (P.N. Moncayo)	41,748	-1,803	1.900	PIUN	10	20	41
Sendero Haya Seca – C.Castilla (P.N. Moncayo)	41,797	-1,831	1.765	PIUN	10	20	76
Orihuela del Tremedal (TE)	40,523	-1,651	1.750	PISY	20	41	183
Pinar del Pla (CS)	40,72	0,177	1.200	PISY	16	34	175
Penyarroya - Valdelinares	40,392	-0,665	2.000	PISY	20	38	181
Penyarroya - Valdelinares	40,392	-0,665	2.000	PIUN	20	39	404
Picos de Urbión (SO)	41,964	-2,829	1.700	PISY	30	60	279
Valdecuenca_(TE)	40,295	-1,414	1.600	PISY	18	36	159
				TOTAL	301	582	149,8

Fig. 5. Fuente: grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales”. Universidad de Zaragoza.

En total, fueron extraídas 582 muestras (*cores*), dos por cada individuo, habiendo sido medidos un total de 64.657 anillos de crecimiento. Estas muestras fueron tomadas a una altitud media de 1.613 m.s.n.m.

De cada muestra se obtuvieron los datos correspondientes a la madera tardía, a la madera temprana, así como del anillo de crecimiento completo. Estos datos permitirán la comparación del crecimiento anual de los árboles con los registros climáticos existentes (en este caso procedentes de la base de datos del CRU - *Climate Research Unit*) de la zona de estudio, Sistema Ibérico, mediante una serie de procedimientos estadísticos que permiten eliminar las posibles perturbaciones e interferencias como la tendencia decreciente del crecimiento en función de la edad del árbol (Harris et al., 2014) y generar cronologías mediante las cuales podremos asumir reconstrucciones y realizar regresiones climáticas de varios cientos de años.

Para su obtención se deberán seguir los siguientes pasos:

4.1.- Análisis de los anillos de crecimiento.

Para la obtención de los datos, se muestreará todo el rango de edad del bosque, a diferencia de cómo se hacía anteriormente que se seleccionaba aquellos árboles dominantes. Aunque se escogerán aquellos ejemplares con características fisiológicas (forma, diámetro del tronco) y una disposición, ubicación, orientación determinada. Se seleccionarán aquellos ejemplares que a priori indiquen la inexistencia de intervención humana en el entorno o de procesos geomorfológicos que condicionen de alguna forma su crecimiento.

Las muestras se extraen generalmente a una altura de 1,3 metros, a la altura del pecho, y normalmente perpendicular a la pendiente (si existiera), para evitar la descompensación de madera. Los testigos o *cores* se extraen mediante una barrena *Pressler*.



Ilustración. 5. Barrena Pressler (izq) y extracción core con medición del diámetro (dcha) *Pinus sylvestris*.
Elaboración propia.

Una vez extraídas las 582 muestras estas fueron trasladadas al laboratorio donde se fijaron a los *portacores* y se dejaron secar a temperatura ambiente (Stokes and Smiley 1968). Una vez secas, se procedió a su lijado para conseguir una superficie plana y pulida que permita distinguir de forma más sencilla los anillos de crecimiento.



Ilustración 6. El antes y el después de la extracción de muestras. Fuente. recurso web: <http://diplotaxis.blogspot.com.es/2011/09/dendrocronologia.html>

Posteriormente, se escanearon y sincronizaron mediante el software *CoRecorder* (Larson 2012) y se comenzó, con ayuda del software, a la datación de cada anillo, es decir, sincronizar los anillos con sus correspondientes años (*proceso de datación*). La datación de los anillos de crecimiento de los árboles, sin necesidad de cortarlos, se realiza gracias a Stokes y Smiley (1968), que establecieron que, el último anillo corresponde al último año de crecimiento antes de realizar la extracción del *core*; de manera que, se va asignando a cada uno de ellos un año retrocediendo en el tiempo.

El proceso de medición de los anillos consiste en obtener la anchura total del anillo (*tree-ring width*), la correspondiente a la madera temprana (*earlywood*) y a la de madera tardía (*latewood*). Con estos datos, se comparan todas las series para detectar aquellas anomalías como anillos dobles o ausentes, que pudieran afectar al resultado final.

Finalmente, el proceso de medición se realiza con el software *TsapWin Scientific* y el control de calidad de la sincronización se llevó a cabo con el programa COFECHA (Holmes 1983). Se procede a realizar un proceso conocido como *interdatación* o *datación cruzada*, en el cual se lleva a cabo comparaciones de las dataciones individuales, para comprobar, de manera visual, si existe sincronía entre los anillos de todos los árboles muestreados.



Ilustración 7. Mesa de medición con lupa. Fuente: Tejedor, E (TFM 2012).

Para analizar y emplear las cronologías de los anillos para reconstrucciones climáticas es imprescindible realizar los métodos correctos de estandarización. En nuestro caso, se emplearon diversas formas de estandarización con el fin de encontrar la más adecuada para nuestro estudio. Las muestras se estandarizaron siguiendo varios métodos: en primer lugar, se aplicó la Curva de Estandarización Regional (RCS, Esper et al., 2003), que se trata de un método dependiente de la edad y de dividir el tamaño de cada anillo por el valor de su edad esperada. Este método es conocido por mantener la señal de baja frecuencia. En segundo lugar, se aplicó el nuevo método de estandarización desarrollado por Tejedor et al., 2016, denominado *BasPois*, que permite mantener la señal tanto de la alta como de la baja frecuencia. En este proceso se siguen los principios de la RCS, pero en vez de utilizar la edad como variable dependiente, se utiliza el tamaño del área basal ajustándose a través del modelo de *Poisson*.

Este proceso es fundamental, ya que hay que eliminar la tendencia de la edad (*proceso de detrending*), en la cual los anillos crecen más en sus años iniciales de vida, así como otras perturbaciones; lo que permite la comparación en la serie final al otorgar a cada árbol el mismo peso ponderado.

4.2.- Datos climáticos y calibración

Para este proceso se descargaron los datos obtenidos de la unidad de investigación *Climatic Research Unit* (CRU TS v.3.22) para el periodo 1945-2012, con una resolución de 0,5° por 0,5° (Harris et al. 2014). Se empleó la temperatura mensual (media, máxima y mínima), y los valores de precipitaciones de la zona estudiada. Posteriormente, se desecharán los primeros cinco años, ya que se considera, como afirma González-Hidalgo et al., 2011, que la mayoría de registros climáticos instrumentales históricos no comienzan hasta la década de 1950.

Los datos climáticos instrumentales y los interpolados de la base de datos del CRU se correlacionan con el *Índice de Precipitación Estandarizado* (SPI, Edwards y Mc Kee et al., 1993), el cual se define como “un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del periodo de acumulación que se trate, respecto de la media” (AEMET); a través del cual se puede cuantificar y comparar intensidades de los déficits de precipitación entre zonas con climas muy diferentes. Por ejemplo: “se puede indicar que un valor de SPI para 3 meses de -2,3 indicaría que la cantidad de precipitación que se ha registrado a lo largo de ese periodo se ha situado a 2,3 veces la desviación estándar por debajo del valor medio” (AEMET).

También se calculó el *Índice de Precipitación Estandarizado-evapotranspiración* (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010), un índice de sequía multiescalar, es decir, un balance hídrico climático en el que se calcula la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial. Así como el *Índice de Severidad de la Sequía de Palmer* (PDSI, Palmer 1965), que es el índice de sequía más comúnmente usado en los Estados Unidos. Los valores de este índice derivan de las medidas de precipitación, temperatura del aire y humedad del suelo.

En concreto nos centraremos en dos: el SPI que se calcula utilizando la precipitación mensual como dato de entrada; y el SPEI que utiliza la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial. Ambos índices se calcularon para diferentes escalas de tiempo de 1 a 24 meses para el periodo de estudio 1950-2012. Posteriormente se correlacionan con la cronología estándar, con el fin de evaluar la influencia de la sequía sobre el crecimiento de los anillos de los árboles. Para la realización de la cronología se calcularon diez elementos diferentes que se relacionarán entre sí, por ejemplo: la edad, el área basal, el radio, el diámetro.

Como novedad en este estudio se empleará la madera tardía (*latewood*) en vez del conjunto del anillo (*tree-ring width*). Griffin et al., 2013 es el único estudio que actualmente ha utilizado la madera tardía para la reconstrucción de sequías. En él se analizaron los monzones del periodo junio-agosto empleando el *Índice de Precipitación Estandarizado* correlacionado con *latewood*, ya que afirmaban que reflejaba mejor la variabilidad de la humedad monzónica.

4.3.- Calibración – verificación y reconstrucción

Para evaluar la exactitud del modelo dividimos la reconstrucción climática en dos periodos equitativos (1950-1981 y 1982-2012) para someterlos al proceso de calibración-verificación (Fritts 1976). El modelo se verifica mediante el *coeficiente de correlación de Pearson*. Calcular la fiabilidad de la cronología es fundamental ya que no todas las series tienen la misma longitud y el grado de sincronización (determinado por el coeficiente de correlación), pudiendo no ser significativo en algún periodo.

La reconstrucción se generó correlacionando los diferentes índices (SPEI, SPI, PDSI) con la cronología resultante, aunque finalmente, como veremos, se compararán únicamente SPI y SPEI al presentar relaciones más significativas.

El modelo relacional obtenido entre la cronología y las series climáticas nos permitirá realizar una reconstrucción climática de varias centenas de años (1700-2012), definidos por la longitud de la cronología disponible, la cual vendrá definida a través del cálculo del estadístico EPS. El método *Express Population Signal* (EPS) genera una estimación del grado de seguimiento de la cronología basándose en un número finito de árboles y en su cronología hipotéticamente perfecta (Cook et al., 1990). La comunidad científica establece valores superiores a 0,85 para asegurar la cronología y por tanto, para la reconstrucción climática. Es decir, este estadístico indicará si el número de muestras y la sincronización de las mismas es suficiente y representativa para el periodo de análisis. Asimismo, se establecerá una media móvil de once años para observar la tendencia de la baja frecuencia.

Para evaluar la precisión de este modelo de transferencia se tiene en cuenta los siguientes estadísticos: coeficiente de correlación (r), el coeficiente de determinación (R^2), la reducción del error (RE), el error cuadrático medio (MSE) y el test de significación (Cook et al., 1994).

R es una medida de la correlación lineal entre la cronología y la variable climática, es decir, del índice SPI frente a la cronología. R^2 indica la forma en la que los datos se ajustan a un modelo estadístico; 1 nos indicará que la línea de regresión se adapta perfectamente a los datos, y 0 indicará que no hay ajuste. Asimismo, nos explicará qué porcentaje de la variabilidad de la muestra es explicada por el modelo de regresión lineal. RE es la varianza entre los datos actuales y los estimados, proporciona una medida de la fiabilidad de la reconstrucción (entre 1 y menos infinito). MSE establece el número de acuerdos y desacuerdos de cada intervalo observado y reconstruido, y será inversamente proporcional al valor de R^2 . (Fritts et al, 1990; Čufar et al, 2008).

Por último, se seguirá el modelo detallado en Akkemik et al. (2005), para identificar y analizar cada uno de los eventos extremos existentes en el periodo estudiado. Para ello se identificarán las desviaciones extremas teniendo en cuenta los umbrales establecidos por el índice SPI (detallados en la *fig.11*, pág.27).

5.- RESULTADOS

Además del aprendizaje con nuevas técnicas de muestreo, preparación y medición de los *cores*, la autora de este trabajo se centró en los procesos, matemáticos, estadísticos y dendrocronológicos detallados en la metodología, que nos han permitido obtener resultados óptimos para establecer una reconstrucción de sequías robusta.

5.1.- Cronología

La cronología se basa en dos especies de *Pinus* diferentes, la media de los árboles analizados es de 149 años, con un mínimo de edad de 38 y un máximo de 419 años. La sensibilidad media fue de 0,18 y la auto-correlación de primer orden de 0,63. La correlación media entre árboles es de 0,45.

La varianza explicada por el primer componente principal es del 27,38%. La relación señal-ruido llega a 29,50 y el EPS supera 0,85 después del año 1735, por lo que el período reconstruido será de 277 años, se inicia en 1735 y finaliza en 2012.

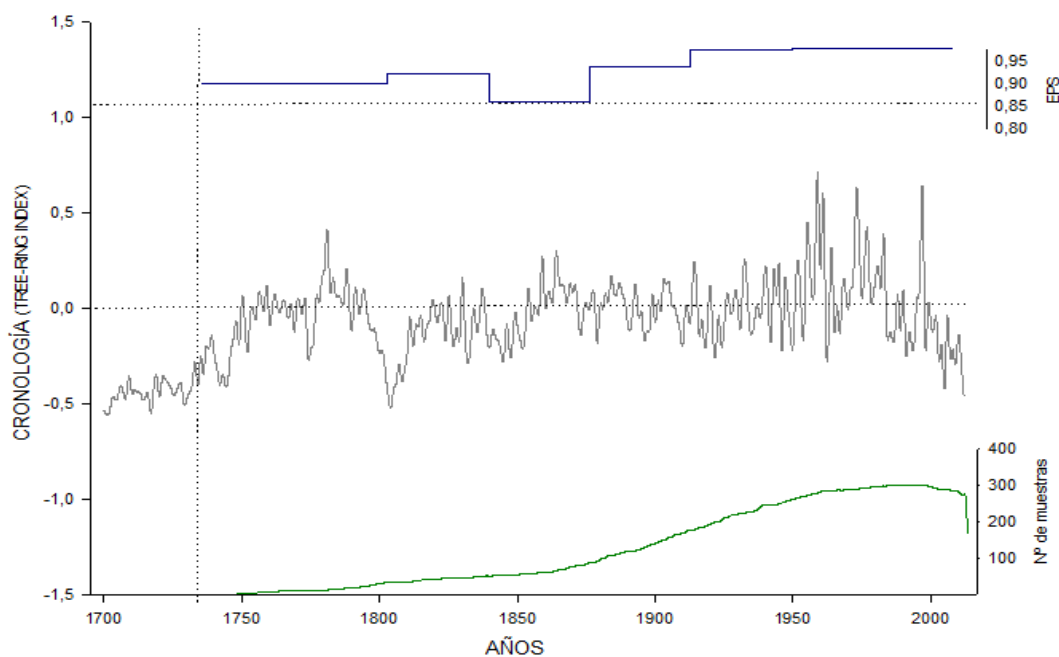


Fig. 6. Cronología (en gris); número de muestras (en verde) y EPS (en azul). Elaboración propia.

5.2.- Señal dendroclimática de SPI y SPEI

Las correlaciones entre la cronología y los índices de SPI y SPEI de 1 a 12 meses, que se muestran en la *figura 7*, revelan como ambos índices climáticos poseen una alta correlación. En primer lugar, se analizó la cronología generada con *latewood* y estandarizada por el método *BasPois* (*ModPoisLW*), frente al SPEI de agosto con tres meses de acumulación ($LW.BasPois - 3SPEI_{Agosto}$), obteniendo una correlación de $r = 0,55$; mientras que la misma cronología (*MosPoisLW*) frente al SPI de agosto con tres meses de acumulación ($LW.BasPois - 3SPI_{Agosto}$) alcanzaba un valor de $r = 0,61$.

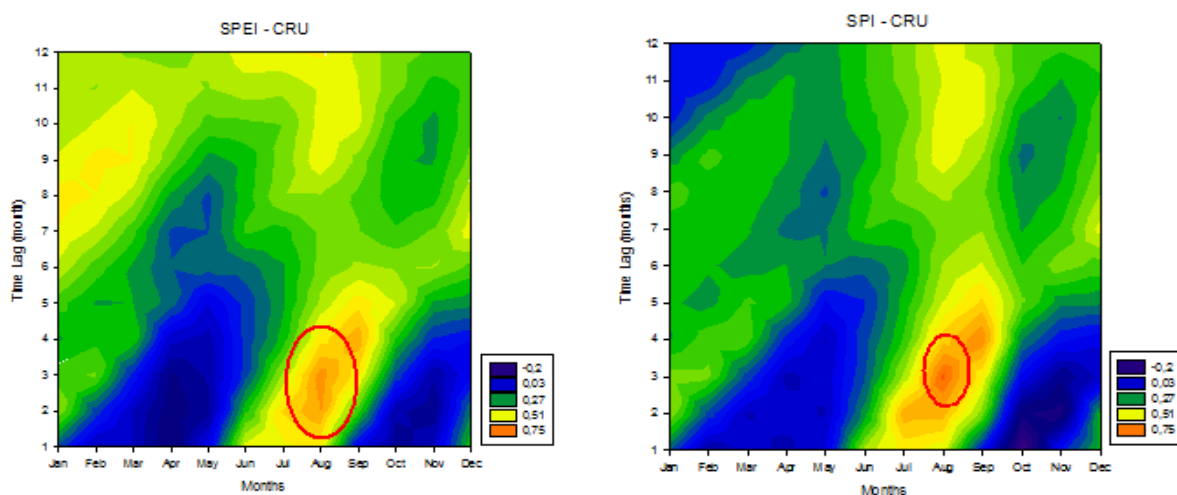


Fig.7. Correlación entre los índices SPI y SPEI y la cronología, para el periodo 1950-2012. Elaboración propia.

Se observó que la señal más consistente con ambos índices de sequía, está centrada en el mes de agosto con una acumulación de tres meses, lo que nos está indicando una coherencia en la respuesta al estrés producido por las sequías de verano. La señal más alta se produce con el índice SPI, con lo cual se ha optado por reconstruir el $3SPI_{Agosto}$.

5.3.- Calibración-verificación

La cronología nos reportó una buena correlación con los valores de SPI, mostrando la fuerte influencia que las precipitaciones de los meses de verano tienen sobre en las masas forestales de nuestra área de estudio.

El método de calibración-verificación es fundamental, pues nos indicará si la reconstrucción es fiable y si es estadísticamente significativa para el periodo estudiado. Para validarlo, *figura 8*, dividimos la cronología en dos subperiodos (1950-1981 y 1982-2012) y realizamos el *proceso de calibración-verificación*. Obtendremos que ambos son significativamente válidos para la reconstrucción final, siendo el coeficiente de determinación (R^2) del primer periodo de 0,26 y de 0,49 para el segundo periodo. Aunque se realiza este proceso en ambos subperiodos, el modelo final, en el que se basa la reconstrucción, utilizará el periodo completo, 1950-2012.

Las limitaciones impuestas por los datos instrumentales, y a pesar de que la base de datos del CRU abarca un periodo más amplio (1901-2013), en los cincuenta primeros años existía un bajo conjunto de estaciones climáticas en la zona estudiada, como hemos comentado anteriormente (González-Hidalgo et al., 2011). A pesar de ello, la correlación (r) de nuestro estudio es de 0,61; el coeficiente de determinación (R^2) es de 0,376, siendo similar a otras reconstrucciones de SPI ($R^2=0,40$ Tejedor et al., 2015; $R^2=0,46$ Akkemik et al. 2005; $R^2=0,34$ Levanič et al., 2013), el cual indica que el 37,6% de la variabilidad observada está explicada por el modelo de regresión lineal.

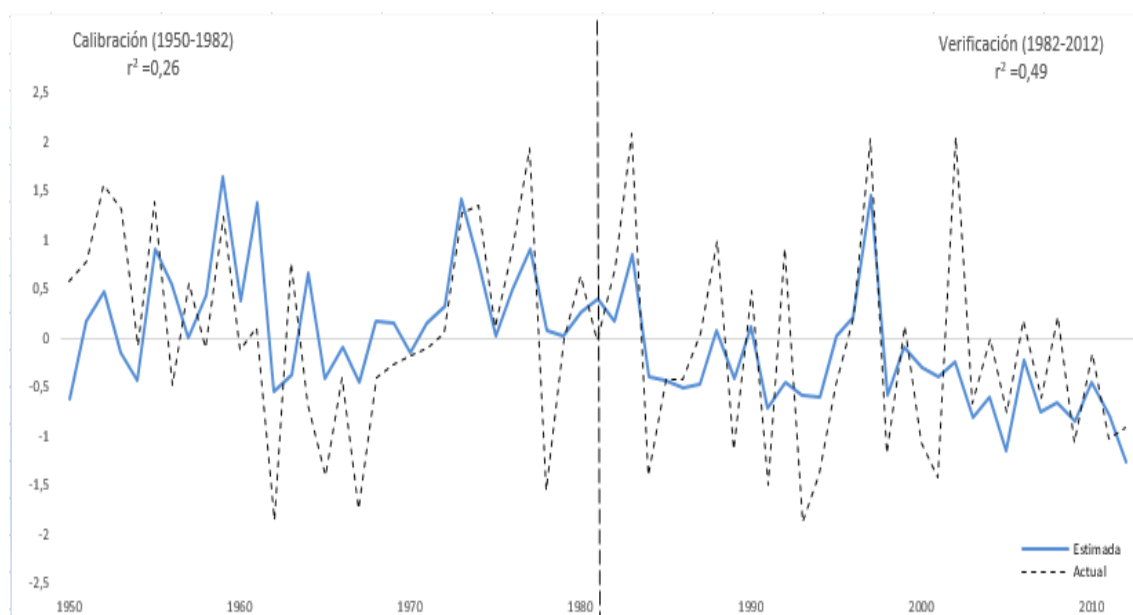


Fig.8. Calibración/verificación periodos 1950-1982 y 1982-2012. Elaboración propia.

La fiabilidad del modelo fue confirmada (fig.9) por la alta correlación ($r = 0,61$) entre la cronología realizada y la variable climática; por el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,37$), así como por los diferentes coeficientes calculados: la reducción del error ($RE = 0,41$) que proporciona una alta fiabilidad de la reconstrucción, el error cuadrático medio ($MSE = 0,74$), que será menor cuanto más elevado sea el valor de R^2 ; y por último, el test de significación que establece 44 acuerdos y 19 desacuerdos para el Modelo General de 1950 a 2012.

	Calibración 1950-1981	Verificación 1950-1981	Calibración 1982-2012	Verificación 1982-2012	Modelo General 1950-2012
Años	31	31	31	31	62
Correlación	0,513	0,705	0,705	0,513	0,613
Coefficiente de determinación (R²)	0,263	0,497	0,497	0,263	0,376
Error medio cuadrático (MSE)	0,603	0,765	0,514	0,932	0,748
Reducción del error	0,170	0,421	0,506	0,010	0,411
Test de significación	23+/8-	21+/11-	23+/8-	21+/11-	44+/19-

Fig.9. Estadísticos calibración/verificación – Reconstrucción 3SPI_{Agosto}. Elaboración propia.

5.4.- Reconstrucción climática

Para la realización de la reconstrucción climática se tomó los datos ya correlacionados del índice SPI (3SPI_{Agosto}) y la cronología de *latewood* por el área basal al cuadrado (*LW.BasPois*). Se realizó el proceso de calibración-verificación en ambos subperiodos, pero en el modelo final en el que se basa la reconstrucción se utilizará el periodo completo de 1950 a 2012.

De la representación de los datos obtenidos se procede a la sustitución de la fórmula resultante ($y = 2,4721x - 0,1226$), de la que se generó la reconstrucción climática, que en un principio se extendería hasta el año 1700, pero como establece el estadístico EPS, no es hasta 1735 cuando su valor supera 0,85. Por tanto, la reconstrucción comenzará en 1735 y concluirá en el año 2012.

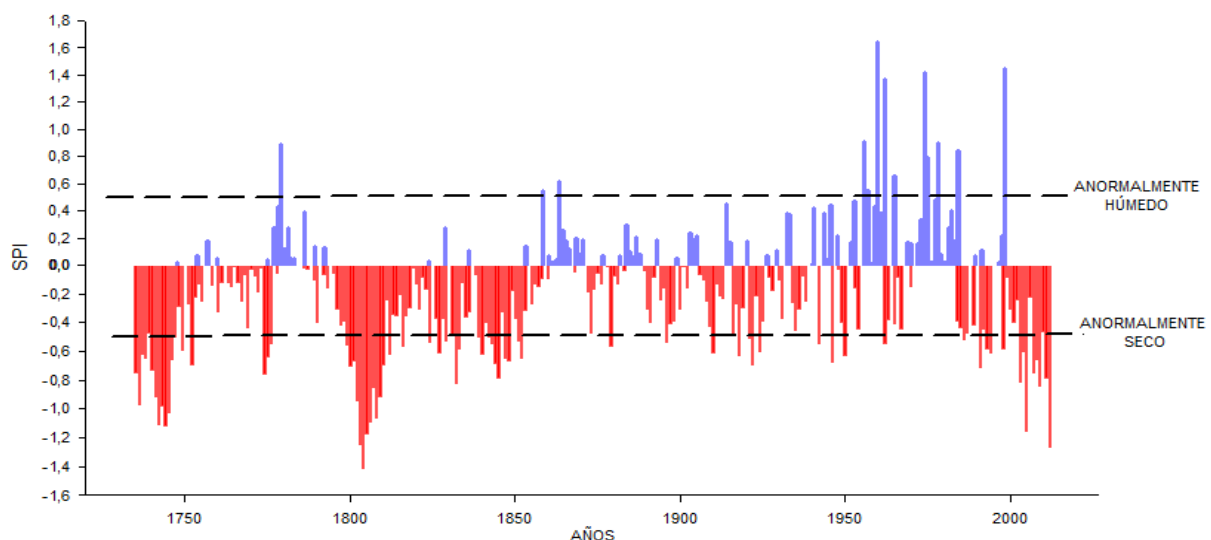


Fig.10. Reconstrucción climática periodo 1735-2012. Elaboración propia.

Como se muestra en el gráfico (*fig.10*) observamos que el periodo más seco corresponde a los años comprendidos entre los años 1795 y 1815; también destaca en la gráfica, un descenso de los valores a partir del año 2000. El año 2012 (-1,26) ha sido considerado por AEMET como el año más extremadamente seco y cálido en todo el país (Tejedor, et al., 2015). En el lapso de tiempo comprendido entre los siglos XVIII y XIX es cuando mayor número de eventos extremos se suceden. Se identificaron en la gráfica los periodos extremos reportados en la tabla de extremos (*fig.11*): cinco periodos secos en orden de gravedad: 1804, 1803, 1805, 1806 y 1808; de acuerdo con este proceso, también se identificaron cuatro periodos húmedos que en orden de intensidad son: 1959, 1997, 1973 y 1961.

La reconstrucción climática final se extenderá 277 años en el tiempo, y en ella se observará una respuesta (estadísticamente fiable) del crecimiento de la madera tardía (*latewood*) con respecto al clima, en concreto sobre las precipitaciones de los meses de verano, las de agosto y los tres meses anteriores. Es decir, con este estudio, podemos afirmar que las sequías que se producen en los meses de verano en el Sistema Ibérico influyen y condicionan el crecimiento de la madera tardía, y por tanto del anillo completo (del crecimiento en general) de los *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*.

5.5.- Episodios extremos

El *Índice de Precipitación Estandarizado* (SPI) es un valor comprendido entre 2 y -2. Los distintos valores son diferenciados otorgándoles una denominación concreta, por ejemplo, el mayor valor se denomina: excepcionalmente húmedo (*exceptionally moist*) y el menor valor: excepcionalmente seco (*exceptionally dry*). Dependiendo del valor reportado por este índice podemos advertir que fenómenos extremos se produjeron desde 1735 a 2012 (*fig. 11*).

	SIGLO XVIII	SIGLO XIX	SIGLO XX	SIGLO XXI
EXCEPCIONALMENTE HÚMEDO: SPI >= 2.0				
EXTREMADAMENTE HÚMEDO: 1.60 <= SPI < 1.99			1959 (1,64)	
MUY HÚMEDO: 1.30 <= SPI < 1.59			1961 (1,37)	
			1973 (1,41)	
			1997 (1,44)	
HUMEDAD MODERADA: 0.80 <= SPI < 1.29	1781 (0,89)			
ANORMALMENTE HÚMEDO: 0.51 <= SPI < 0.79		1864 (0,61)		
NORMAL: -0.50 <= SPI <= 0.50				
ANORMALMENTE SECO: -0.79 <= SPI < -0.51				
MODERADAMENTE SECO: -1.29 <= SPI < -0.80	1744 (-1,11)	1803 (-1,24) 1805 (-1,17) 1806 (-1,09) 1808 (-1,06)	1918 (-0,62) 1946 (-0,67) 1950 (-0,62) 1991 (-0,71) 1994 (-0,60)	2012 (-1,26) 2005 (-1,14)
MUY SECO: -1.59 <= SPI < -1.30		1804 (-1,41)		
EXTREMADAMENTE SECO: -1.99 <= SPI < -1.60				
EXCEPCIONALMENTE SECO: SPI <= -2.0				

Fig.11. Periodos húmedos y secos según rango establecido por el índice SPI. Elaboración propia.

Los siglos XIX y XX poseen el 31% y el 47% de todos los eventos extremos respectivamente, los valores se establecen entre extremadamente húmedo (*extremely moist*) y severamente seco (*severely dry*). Algunos autores consideran que puede estar relacionado con el final de la *Pequeña Edad del Hielo (PEH)* (Jones y Bradley, 1992). Pero otros autores consideran que en el noreste de España este episodio no estuvo relacionado con un aumento de la temperatura, sino con una disminución de la variabilidad interanual (Saz, 2003). Ambos siglos tuvieron una mayor recurrencia de eventos secos, aunque el siglo XIX presenta menor cantidad de episodios húmedos en comparación con su predecesor.

En el siglo XX, en concreto en los años 90, se observa un aumento de los periodos secos, los cuales podrían deberse al aumento de la actividad industrial y por tanto del cambio climático producido por el incremento de las actividades antrópicas. Mientras que el siglo XXI muestra, por el momento, un menor número de fenómenos extremos, a excepción del año 2012.

Los estudios paleoclimáticos muestran como los periodos secos son fenómenos frecuentes en la región mediterránea, lo que produce consecuencias ambientales y socio-económicas negativas (Martín-Vide y Barriendos, 1995; Rodrigo et al., 1999). Algunos de estos eventos extremos están relacionados con sucesos catastróficos. Por ejemplo, el periodo de 1743 a 1748 fue una época de escasas cosechas debido a las recurrentes sequías, lo que generó grandes pérdidas económicas y hambrunas, que se sucedieron durante los primeros años del siglo XIX (*hambres decimonónicas*), coincidiendo con los años de sequías más graves destacados en este estudio. En el año 1803 (-1,24) miles de personas murieron por falta de alimento (Tejedor et al., 2015).

6.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las conclusiones se han dividido en dos apartados, el primero dedicado a los resultados obtenidos en este proyecto y el segundo referido a la metodología y formación utilizada para la elaboración del estudio.

6.1.- Conclusiones sobre los resultados

De los resultados obtenidos podemos inferir la existencia de una relación positiva entre las precipitaciones de los meses de primavera y verano sobre el crecimiento del *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*, en concreto de la madera tardía. Es decir, los pinos responden de manera positiva y significativa a las precipitaciones de estos meses para generar posteriormente la madera tardía (*latewood*).

La alta correlación entre la cronología y el 3SPI_{Agosto}, indica una clara dependencia entre el crecimiento de los bosques y la precipitación de verano. Las precipitaciones de junio–agosto indican que el desarrollo fenológico de los anillos de crecimiento responde a las precipitaciones durante los tres meses más que a las temperaturas. Por lo que, en este estudio, se afirma que el clima, y en particular las precipitaciones estivales, influyen y limitan el crecimiento de la madera tardía del *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata* del Sistema Ibérico español.

Existen algunos inconvenientes que hay que tener en cuenta, la extracción de muestras es costosa y su procesado es laborioso porque las muestras deben estar en buenas condiciones para facilitar la visión de la estructura de los anillos. La Dendroclimatología permite aumentar el conocimiento sobre el clima del pasado, pero en las sucesivas calibraciones de los procesos dendrocronológicos se desechan grandes periodos de tiempo, si estos no poseen una alta significación. Estas pérdidas son debidas a los costosos procesos de recogida de muestras y de datación, por la falta de datos instrumentales, así como por la limitada existencia de árboles centenarios y milenarios debido a la alta antropización del medio ambiente.

Por todo ello, hay que ser conscientes y buscar más opciones para aumentar los periodos de las reconstrucciones climáticas. Algunos estudios advierten de la posibilidad de combinar los resultados obtenidos mediante esta y otras técnicas dendrocronológicas con muestras tomadas de árboles fosilizados, o materiales de construcción de edificios históricos (Esper et al., 2014).

Un ejemplo es la iglesia mozárabe de San Baudelio de Berlanga (Soria), que ofrece abundante madera de construcción, lo que ha permitido iniciar el análisis dendrocronológico y de *radiodatación* (Alonso, M. F. et al., 1997). Este novedoso proceso nos permitiría aumentar las reconstrucciones alargándolas en el tiempo, con lo que significará para la comunidad científica y para el conocimiento biogeográfico y climático.



Ilustración 8. Datación anillos material arqueológico/histórico.
Fuente: Bernabei, M. & Macchioni, N. (2012).

Basándonos en los estudios y datos comentados anteriormente, el aumento de la virulencia del cambio climático y de los eventos extremos, como el incremento de las sequías en el Sistema Ibérico, considerada zona vulnerable, provocará una disminución en el crecimiento de la madera tardía. Como hemos advertido en este proyecto, un descenso de las precipitaciones de verano afectará al crecimiento de los *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*.

Los árboles son un componente importante de la mayoría de los ecosistemas, son el soporte de múltiples especies, frenan la erosión del suelo, lidian con la deforestación, participan en el ciclo del agua, combaten el cambio climático mediante la transformación de dióxido de carbono y como hemos visto, guardan en su interior importante información climática y biogeográfica que nos debe servir de referencia para un próximo futuro. Las consecuencias negativas que reportaría su deterioro a la economía, a la sociedad, al medio ambiente y a los numerosos ecosistemas pueden ser muy graves.

6.2.- Conclusiones sobre la metodología empleada

Es evidente que todo el proceso descrito anteriormente no ha podido ser realizado por la autora de este trabajo, por razones de tiempo fundamentalmente, habiendo sido realizado por los miembros del equipo de investigación anteriormente citado. Sin embargo, el trabajo hacía necesario conocer el proceso de muestreo, preparación y medición de las técnicas dendrocronológicas, por lo que la autora ha participado en la extracción, preparación y medición de otras muestras durante el periodo de realización de este proyecto, conociendo de esta forma de primera mano la base de campo y las técnicas necesarias de esta disciplina.

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se ha tenido que realizar una serie de actividades y procesos formativos en técnicas dendrocronológicas y estadísticas, además de las geográficas de las que ya se disponía.

- Aprender y entender las técnicas empleadas, mediante las salidas de campo y las sesiones de laboratorio de los procesos de análisis dendrocronológico, imprescindibles para determinar los objetivos planteados.

- Se trata de técnicas complejas y sensibles, ya que el mínimo error informático o numérico supone la repetición del proceso completo. Explicación del funcionamiento del *microtono* y uso de la *mesa con lupa* para la medición y las dataciones, además de los softwares específicos dendrocronológicos: *CooRecorder 7.6* y *CDendro 7.6*.
- Los procesos estadísticos requieren de práctica, repetición y conocimientos matemáticos e informáticos. Al igual que en el caso anterior, son procesos largos e interrelacionados, por lo que, cualquier modificación o error supone la pérdida del proceso.
- Se emplearon softwares específicos como *Sigma plot 11.0* y *Excel 2016*, que son fundamentales para llevar a cabo este trabajo, para graficar y generar los resultados comentados anteriormente en la metodología; así como los del Sistema de Información Geográfica (*ArcGis 10.3*).

7.- BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS WEB

Akkemik, Ü., Da deviren., N., Aras, A. (2005). "A preliminary reconstruction (A.D. 1635–2000) of spring precipitation using oak tree rings in the western". *Black Sea region of Turkey. Int J Biometeorol*, 49(5):297–302.

Alonso, M. F., Zoreda, L. C., & Trobajo, E. R. (1997). "Cronología constructiva de la iglesia mozárabe de S. Baudelio de Berlanga (Soria): primeros resultados de dendrocronología y carbono-14". *Boletín de arqueología medieval*, (11), 249-264.

Bernabei, M., & Macchioni, N. (2012). *La datación dendrocronológica en el estudio de los edificios históricos*. Loggia, Arquitectura & Restauración, (24-25), 104-111.

Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Jones, P.D., Shiyatov, S.G., Vaganov, E.A. (2002). "Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals". *Holocene*, 12 (6), pp. 737-757.

Brubaker, L.B. (1986). "Responses of tree populations to climatic change". *Vegetatio*, 67: 119-130.

Camarero J.J., Guerrero- Campo J. y Gutiérrez E. (1997). "Fenología del anillo de crecimiento de *Pinus uncinata* Ram. y *Pinus sylvestris* en un gradiente altitudinal en los Pirineos centrales". *Pirineos*, 147, 3-26.

Camarero J.J., Guerrero J., Gutiérrez E., (1997) "Formaciones del anillo de crecimiento y clima: un ejemplo de modelos para *Pinus uncinata* ram. y *Pinus sylvestris* en los Pirineos Centrales". *Ecología*. Nº11. Pp. 235-254.

Camarero Martínez, J.J., y Gutiérrez Merino, E. (2008). *La respuesta del crecimiento de Pinus uncinata al clima en poblaciones relictas del Sistema Ibérico*. Zubía Monográfico, Logroño.

Ceballos, L. y Ruiz de la Torre, J. (1979). *Árboles y Arbustos de la España Peninsular*. ETSIM, Madrid.

Cook, E.R., Briffa, K.R., Jones, P.D. (1994). "Spatial regression methods in dendroclimatology: a review and comparison of two techniques". *International Journal of Climatology* 14, 379–402.

Constante García, V., Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Cornejo Oviedo, E. H., y Valencia Manzo, S. (2009). "Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila". *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.

Creber G.T. y Chaloner W. G. (1984). "Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees". *Bot. Rev.*, 50(4): 357-448.

Čufar, K., de Luis, M., Eckstein, D., Kajfez-Bogataj, L. (2008). "Reconstructing dry and wet summers in SE Slovenia from oak tree-ring series". *Int J Biometeorol* 52:607–615.

Davis, M.B. y Shaw, R.G. (2001). "Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change". *Science*, 292, 673–679.

De Luis, M., Novak, K., Čufar, K., Raventós, J. (2009). "Size mediated climate-growth relationships in *Pinus halepensis* and *Pinus pinea*". *Trees - Structure and Function*, 23 (5), pp. 1065-1073.

Erhart, Henry (1951). *La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Esquisse d'une théorie géologique et géochimique. Biostasie et rhéxistasie*. Masson, Paris 90 p, autres éditions en 1956, 1967 (177 p.)

Esper, J., Großjean, J., Camarero, J.J., García-Cervigón, A.I., Olano, J.M., González-Rouco, J.F., Domínguez-Castro, F., Büntgen, U. (2014). "Atlantic and Mediterranean synoptic drivers of central Spanish juniper growth". *Theoretical and Applied Climatology*.

Fritts, H.C., Guiot, J., Gordon, G.A., Schweingruber, F.H. (1990). "Methods of calibration, verification, and reconstruction". In *Methods of Dendrochronology*.

Fritts, H.C. (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press, London.

Génova, R. (1988). "Comparación de tres series dendrocronológicas del valle de Conangles (Pirineo central)". *Orsis: organismes i sistemes*, 3, 105-120.

Génova, M., & Martínez, D. (2001). *La dendrocronología como fuente de información de la dinámica forestal de Pinus nigra en Checa (Guadalajara)*. Congresos Forestales.

González-Hidalgo, J.C., Brunetti, M., de Luis, M. (2011). "A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945 November 2005)". *International Journal of Climatology*, 31 (5), pp. 715-731.

Gonzalez-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D., Brunetti, M., Cortesi, N. Motedas (2015). "A new monthly temperature database for mainland Spain and the trend in temperature (1951-2010)". *International Journal of Climatology*.

Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Stahle, D. W., Faulstich, H. L., Carrillo, C., & Leavitt, S. W. (2013). "North American monsoon precipitation reconstructe from tree-ring latewood". *Geophysical Research Letters*, 40(5), 954-958.

Gutiérrez, E. (1990). "Dendroecología de *Pinus sylvestris* L. en Cataluña". *Orsis: organismes i sistemes*, 5, 023-41.

Gutiérrez, E. (2009) *La dendrocronología: métodos y aplicaciones*. En "Arqueología nautica mediterrània". X. Nieto i M.A. Cau (eds.). Monografies del CASC. Generalitat de Catalunya. pp. 309-322.

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H. (2014). "Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset". *International Journal of Climatology*, 34 (3), pp. 623-642.

Holmes, R.L. (1983). "Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement". *Tree-Ring Bull* 43: 69–78.

IPCC, 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, p 996.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi: 10.1017/CBO9781107415324.

Jagels R., Hornbeck J. y Marden S. (1994) *Drought and cold stress-induced morphometric changes in tree rings of red spruce*. MAFES Tech. Bull. 159: 1-19.

Jones, P.D y Bradley, R.S. (1992) *Climatic variations over the last 500 years*. In: Bradley RS, Jones PD (eds) *Climate since AD 1500*. Routledge, London and New York, pp. 649–65.

Larsson L.A. (2012) CoRecorder & CDendroprogram. CybisElektronik & Data AB. Version 7.6.

Larson P. R. (1994) *The Vascular Cambium. Development and Structure*. Springer-Verlag, 725 pp., Berlin Heidelberg New York.

Levanič, T. Popa, I. Poljanšek, S. Nechita, C. (2013). "A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus Nigra*) tree-ring widths". *Int J Biometeorol* 57 (5): 703–714.

Loehle, C. y Leblanc, D. (1996). *Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review*. *Ecological Modeling*, 90: 1-31.

Martín-Vide, J., Vallvé, M.B. (1995): "The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain)". *Climatic Change*, 30 (2), 201-221

Martínez, J. J. C., y Merino, E. G. (2008). *La respuesta del crecimiento de "Pinus Uncinata" al clima en poblaciones relictas del sistema ibérico*. Zubía, (20), 61-96.

Parmesan, C. (2006). "Ecological and evolutionary responses to recent climate change". *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 37: 637-669

Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vázquez, D., Castro-Díez, Y: (1999): "A 500-year precipitation record in Southern Spain". *International Journal of Climatology*, 19 (11), 1233-1253.

Saz, M.A. y Creus, J. (2001). *El clima de La Rioja desde el siglo XV. Reconstrucciones dendroclimáticas del observatorio de Haro*. Zubía, monográfico 13: 41-64.

Saz, M.A. (2003) *Análisis de la evolución del clima en la mitad septentrional de España desde el siglo XV a partir de series dendroclimáticas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1105 pp.

Saz, M.A., Creus, J. y Cuadrat, J.M. (2003). "Mean summer temperatures: dendroclimatic reconstruction in Northeast of Spain. Comparison with other regional studies". *Geophysical Research Abstracts*, 5: 02791.

Saz, M.A., Tejedor, E., Cuadrat, J.M., De Luís, M., Serrano, R., Novak, K., Del Castillo, E., y Longares, L.A. (2015). *Evaluación del potencial para la reconstrucción multiproxy de episodios de sequía en el noroeste de España desde el siglo XVII*. XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles. Universidad de Zaragoza.

Stokes, M.A., Smiley, T.L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. 2nd ed. The University of Arizona Press, Tucson.

Tejedor, E., de Luis, M., Cuadrat, J.M., Esper, J., Saz, M.Á. (2015) "Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694". *International Journal of Biometeorology, Springer*. 12 pp.

Tejedor, E., De Luis, M., Cuadrat, J.M., Novak, K., Martínez, E., Serrano, R., Longares, L.A., Génova, M., y Saz, M.A. (2015). *Potencial dendroclimático de Pinus halepensis, P. pinaster, P. sylvestris, P. nigra y P. uncinata en el Sistema Ibérico Turoense*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Zaragoza.

Tejedor, E., Saz, M.A., Cuadrat, J.M., Esper, J., y De Luis, M. (2016). *Temperature variability of Iberian Range since 1602 inferred from tree-ring records*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Zaragoza.

Tomás, J. P., y Novau, J. C. (1976). "Climatología histórica y dendrocronología de Pinus Uncinata Ramond". *Cuadernos de investigación: Geografía e historia* (2), 17-30.

Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Morán, E., Azorín-Molina, C. (2011). "Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930–2006)". *Climate Research*, 31: 2102–2114.

Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. (2014). "Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe". *Environmental Research Letters*, 9 (4), art. no. 044001.

Villalba, R., Villagra, P. E., Boninsegna, J. A., Morales, M. S., y Moyano, V. (2000). "Dendroecología y dendroclimatología con especies del género Prosopis en Argentina". *Muldequina*, 9(2), 1-18.

Woodward, F.I. (1987). *Climate and Plant Distribution*. Cambridge Univ. Press. Cambridge.

Recursos web empleados

“National Drought Mitigation Center Website” Obtenido en: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/PredictingDrought.aspx> [Fecha consulta: 5/12/2015]

“La reconstrucción del clima de la época preinstrumental”. Obtenido en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=V3kMeQ4NZgwC&oi=fnd&pg=PA81&dq=dendrocronolog%C3%ADa&ots=OdCT2eRPHG&sig=jdkddJjxwgWmaEBuUPa1tw_tbc#v=onepage&q&f=false [Fecha consulta: 5/12/2015]

“Modelos dendroclimáticos para crecimiento radial forestal”. Obtenido en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000600003&lng=en&tlng=en. [Fecha consulta: 5/12/2015]

“Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México” Obtenido en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112015000100002&lng=en&tlng=en. [Fecha consulta: 5/12/2015]

Video: *El secreto de los árboles* 2014. Universidad de Zaragoza. Disponible en: <https://vimeo.com/105746777> [Fecha consulta: 5/12/2016]

La edad de los árboles. Disponible en: <http://www.jardibotanic.org/fotos/pdf/2.pdf> [Fecha consulta: 5/12/2016]

"La Guía de datos climáticos: Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)." Obtenido en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/palmer-drought-severity-index-pdsi>. [Fecha consulta: 16/03/2016]

“Índice de Precipitación Estandarizado-evapotranspiración (SPI)” Obtenido en: <http://sac.csic.es/spei/>
http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia/ayuda [Fecha consulta: 16/03/2016]

“Índice de evapotranspiración de precipitación normalizado (SPEI)”. Obtenido en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>. [Fecha consulta: 16/03/2016]

Base de datos *Climate Research Unit* (CRU TS V 3. 22). Disponible en: <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/3f8944800cc48e1cbc29a5ee12d8542d>
<http://ckan.snap.uaf.edu/es/dataset/historical-monthly-precipitation-products-10-min-cru-ts-3-22> [Fecha de consulta: 16/03/2016]

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Disponible en: <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=arn> [Fecha consulta: 16/03/2016]

“¿Cómo se mide el paso del tiempo utilizando los anillos de los árboles?” Obtenido en: <http://cienciaes.com/ciencianuestra/2010/11/24/dendrocronologia/> [Fecha consulta: 4/04/2016]

Repositorio Institucional de Documentos. Universidad de Zaragoza (ZAGUAN): Tejedor, E (2012) Trabajo Fin de Máster. *Modelización de la respuesta climática de Fagus sylvatica en el Parque Natural del Moncayo*. Directores Miguel Ángel Saz Sánchez y Martín de Luis Arillaga. Máster Universitario en: Tecnología de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Obtenido en: <https://zaguan.unizar.es/record/9426?ln=es> [Fecha consulta: 20/04/2016].

Catalogo florístico de la Provincia de Soria. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Luis_Benito_Alonso/publication/216034222_Catalogo_floristico_de_la_provincia_de_Soria/links/0fcfd5063546f78cf4000000.pdf [Fecha consulta: 19/05/2016]

Mapa topográfico de España: Instituto Geográfico Nacional (IGN). Disponible en: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesCartografia.do> [Fecha consulta: 1/06/2016]

Imágenes *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*. Disponible en: Imágenes de archivo. <http://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/.html> [Fecha consulta: 1/06/2016]

8.- CRONOGRAMA

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se han realizado diversas actividades y se han especificado cada una de las horas empleadas en cada uno de los procesos descritos a continuación:

- Lectura de bibliografía específica sobre la materia
- Tutorías y sesiones de aprendizaje con mi Director y con el grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales”
- Explicación y realización de los procesos matemáticos, estadísticos, dendrocronológicos y geográficos específicos que se deberán llevar a cabo, como la creación de gráficas y de mapas, así como de los dispuestos en la metodología anteriormente descrita
- También, se ha llevado a cabo salidas de campo, con la intención de aprender todo el conjunto de procesos necesarios para la extracción de muestras
- Se realizaron sesiones de laboratorio, donde se aprendió el funcionamiento de los softwares y hardware específicos en el análisis dendrocronológico
- Asimismo, se han invertido numerosas horas en el análisis y la comprensión de los datos obtenidos, ya que es fundamental para poder establecer los resultados
- Posteriormente, se comenzó con la redacción del Proyecto y su revisión, con el fin de subsanar posibles errores.

	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Lectura bibliografía	6	6	7	5	4	5	6
Tutorías y aprendizaje	3	3	5	3	3	9	12
Estudio y trabajos concretos	2	6	6	4	3	5	6
Salidas de campo				14			
Laboratorio		2	3			2	2
Análisis datos		2	3	4	4	8	3
Redacción TFG				10	10	19	22
Revisión y lectura final				1	4	4	10
Total	11 h	19 h	24 h	41 h	28 h	52 h	61 h

Fig. 12. Cronología. Horas empleadas en cada proceso de aprendizaje. Elaboración propia.

236 h