

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/286242684>

La dendrocronología métodos y aplicaciones

Data · December 2015

CITATIONS

0

READS

493

1 author:



[Emilia Gutiérrez](#)

University of Barcelona

199 PUBLICATIONS 4,545 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Snow avalanche cartography [View project](#)



DENTROPICAS [View project](#)

La dendrocronología: métodos y aplicaciones

Emilia Gutiérrez Merino

Dept. d'Ecologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona

Av Diagonal, 645. 08028 Barcelona.

Telf. +34934037143 Fax. +34934111438. e-mail: emgutierrez@ub.edu

- 1.- ¿Qué es la dendrocronología?
- 2.- Los árboles registran el paso del tiempo
 - 2.1.- Características peculiares de los árboles
 - 2.2.- El crecimiento de los árboles
 - 2.3.- La formación de los anillos
 - 2.4.- Tipos de anillos: estructura de la madera
 - 2.5.- El ritmo de crecimiento: regiones templadas, tropicales y mediterráneas
 - 2.6.- La sensibilidad del cámbium a los factores ambientales
 - 2.7.- Los factores limitantes son también uniformizadores
 - 2.8.- La huella del clima y la firma del tiempo
- 3.- Principios de la Dendrocronología
- 4.- Metodología
 - 4.1- El principio básico de la dendrocronología y su práctica: la datación cruzada
 - 4.2- Datación, datación cruzada y datación absoluta
 - 4.3.- Medición de los anillos y validación estadística de la datación
 - 4.4.- Construcción de la cronología maestra
- 5.- Aplicaciones de la Dendrocronología. La dendroarqueología
- 6.- Ventajas y limitaciones del registro dendrocronológico
- 7.- Bibliografía y diccionarios
- 8.- Programas estadísticos y portales de interés

1.- ¿Qué es la dendrocronología?

El nombre indica una relación muy estrecha entre los árboles y el tiempo. La palabra deriva del griego *dendron* –árbol-, *crono* –tiempo- y *logo* –conocimiento- y denomina una disciplina científica dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento anuales, extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento. El objetivo principal es establecer **cronologías o series maestras** (series promedio). Para ello, hace falta, primero, identificar y datar los anillos asignando a cada uno de ellos el año de calendario exacto en el cual se formó. Las series dendrocronológicas permiten la investigación en numerosos campos de la ciencia ya que constituyen un registro del tiempo y un archivo de los acontecimientos pasados, por ello también son muy útiles para datar acontecimientos siempre que hayan afectado a los árboles (perturbaciones), datar objetos y construcciones de madera.

Cómo citar este artículo:

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

2.- Los árboles registran el paso del tiempo

2.1.- Características peculiares de los árboles

Los árboles son plantas perennes con una gran cantidad de madera, son los organismos más grandes y longevos. Algunos ejemplares miden más de 100 m de altura. A su vez, se ha comprobado, contando sus anillos, que algunos árboles pueden vivir hasta los 9.550 como es el caso del abeto falso en Suecia. En España, los árboles vivos más viejos encontrados son individuos de *Pinus nigra* con unos 1000 años (Andalucía) y de *Pinus uncinata* con más de 800 años (Pirineo). La larga vida de los árboles y sus grandes dimensiones se deben a un crecimiento continuo sobre las estructuras ya formadas y a que los materiales de construcción, la celulosa y la lignina, son muy recalcitrantes a la descomposición. También son organismos inmóviles y allí donde nacen pasan toda la vida registrando aquellos acontecimientos que hayan podido afectar a sus procesos de crecimiento.

2.2.- El crecimiento de los árboles

El crecimiento de los árboles, como el de todos los organismos, es un proceso biológico que comporta un aumento del tamaño a lo largo del tiempo. El crecimiento se debe a la formación, diferenciación y expansión de nuevas células dando lugar a tejidos y órganos. El incremento es el aumento de tamaño en un intervalo de tiempo debido al crecimiento. El crecimiento de los árboles y de las plantas leñosas en general se debe a la actividad de los meristemas primarios y secundarios, unos tejidos formados por células no diferenciadas capaces de dividirse y generar nuevas células. Los primarios son los responsables del crecimiento en altura y los secundarios del crecimiento en grosor. El meristema secundario que da lugar al crecimiento en grosor por acumulación de madera es el cámbium (Fig. 1). Se trata de una fina capa de células que envuelve al árbol por debajo de la corteza del tronco, ramas y raíces. Su actividad produce capas sucesivas de xilema (madera) por la parte interna y por la parte externa el floema, que con el tiempo acabará formando parte de la corteza.

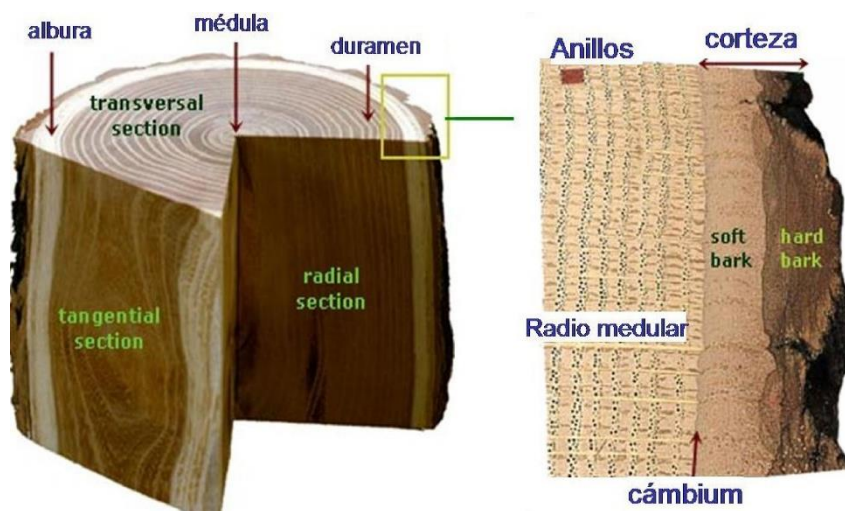


Figura 1.- Derecha, estructura de la madera del tronco de un roble vista según tres secciones de corte: transversal, radial y tangencial. La parte más oscura del interior es el duramen el cual está rodeado de una capa más clara, la albura. Los anillos muestran la típica disposición concéntrica alrededor de la médula (sección transversal). Izquierda, ampliación de la parte más externa del tronco. El cámbium está situado entre la madera y la corteza. El último anillo formado es el que se encuentra justo debajo de la corteza. Los poros que se observan al principio de los anillos son los vasos del sistema conductor de la savia bruta. Este tipo de estructura corresponde a maderas de anillo poroso. Fuente <http://www.woodanatomy.ch/macro.html>

2.3.- La formación de los anillos: el registro anual del tiempo

Pero el crecimiento de los árboles, como cualquier proceso de crecimiento, no es continuo y se detiene en algún momento debido a la limitación impuesta por algún factor externo o/y interno, formándose los anillos. En muchas zonas del planeta con una estacionalidad climática marcada, los árboles detienen el crecimiento durante la época desfavorable y lo vuelven a iniciar cuando las condiciones climáticas son otra vez favorables. Este patrón anual de actividad y reposo queda marcado en la estructura de la madera en forma de capas concéntricas anuales las cuales, en un corte transversal, se ven como anillos (Fig. 1 y 2).

En la formación del anillo anual, la producción de nuevas células de xilema (madera) es rápida al principio, se enlentece a medida que avanza el verano y, finalmente, se detiene cuando las temperaturas vuelven a ser bajas. Estas diferencias de velocidad en la formación de las células también quedan reflejadas en las características de la madera de los anillos. Así y debido a los cambios en el ritmo de la formación de un anillo, las células de la madera que lo forman también son distintas. La madera temprana, formada al principio del periodo de crecimiento, es distinta de la madera tardía, la formada al final, y por esta razón en el anillo anual de muchas especies se suelen distinguir dos bandas.

2.4.- Tipos de anillos: anatomía de la madera

En las coníferas o gimnospermas (pinos, abetos, etc) la madera temprana es más clara y está formada por células (traqueidas) más grandes de paredes celulares finas. Por el contrario, la madera tardía es más oscura y está formada por células más pequeñas de paredes celulares más gruesas. En estas especies la casi totalidad de la madera (95%), está formada por traqueidas pero las diferencias de tamaño y coloración entre la madera tardía de un anillo y la temprana del siguiente permiten la identificación y la datación de los anillos (Fig. 2 y 3).



Figura 2.- Testigo de madera pegado, pulido y datado sobre un soporte de madera. El último año de crecimiento todavía sin acabar es el 2003, justo debajo de la corteza. Cada anillo de crecimiento anual corresponde a una banda de madera temprana (banda clara) y otra de madera tardía (banda más oscura). Puede apreciarse la variabilidad en el grosor de los anillos (se han marcado los 6 últimos) así como en el grosor de la madera temprana y tardía. También puede observarse que hay bandas oscuras dentro de algunos anillos; estas bandas se forman como consecuencia de la parada del crecimiento durante el periodo favorable debido, normalmente a la falta de agua.

La estructura del anillo en las angiospermas, árboles planifolios, es más compleja ya que la diversidad de células que forman la madera es mayor que en las coníferas. Se distinguen 3 grandes grupos (Fig 1 y 3). Uno, especies de porosidad anular, como los robles y castaños, cuya madera temprana se distingue de la tardía por los grandes vasos conductores que se forman al inicio del periodo de crecimiento. Dos, especies de porosidad semidifusa, como el haya, el tamaño de los vasos es progresivamente más pequeño. Y tres, especies de porosidad difusa, como el chopo, cuyos vasos son de diámetro muy parecido a lo largo de todo el anillo. En cualquier caso, los anillos anuales se distinguen bien debido a las diferencias entre madera temprana y tardía en unos

casos o por la formación de unas células diferentes al final de anillo que son distintas y marcan el final del anillo.

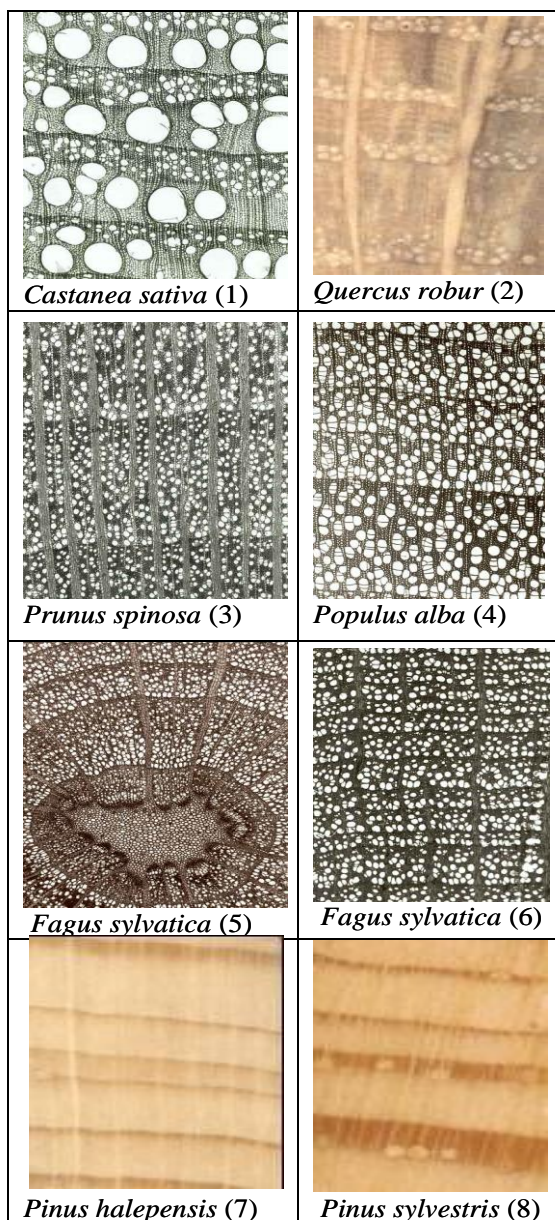


Figura 3.- Secciones transversales de madera de diferentes especies donde se puede apreciar la estructura de los anillos de crecimiento. Las figuras (1) y (2) corresponden a angiospermas de anillo poroso, los vasos son más grandes al principio del anillo. Las figuras (3) y (4) son angiospermas de anillo difuso, el tamaño de los vasos es muy similar en todo el anillo y el crecimiento anual queda marcado por las células del final que son más estrechas. Las figuras (5) y (6) corresponden a angiospermas de anillo semi difuso, el tamaño de los vasos disminuye progresivamente desde el inicio hasta el final del anillo. Las figuras (7) y (8) corresponden a gimnospermas en las que la casi totalidad de la madera está formada por traqueidas. Algunas de estas imágenes están sacadas de Schoch et al. (2004).

2.5.- El ritmo de crecimiento: regiones templadas, tropicales y mediterráneas

En las regiones templadas - frías, el periodo de crecimiento está muy bien delimitado porque la oscilación anual de la temperatura es muy grande. En estas regiones el periodo de crecimiento es corto, suele extenderse desde finales de primavera hasta el final del verano o principios del otoño. Como consecuencia, los anillos anuales no son muy anchos y tampoco hay grandes diferencias de grosor entre anillos.

En las zonas tropicales, la oscilación térmica anual es débil y la benignidad del clima permite, en general, un crecimiento continuo durante todo el año. Como consecuencia, la mayoría de las especies no forman anillos anuales claros. Sólo aquellas especies que crecen bajo alguna condición ambiental con fluctuaciones estacionales persistentes los presentan.

Cómo citar este artículo:

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

En las regiones de clima mediterráneo como la nuestra, situadas entre las zonas templadas y los desiertos subtropicales, confluyen especies de origen templado y boreal, como muchas coníferas (el pino albar, el pino negro, el abeto, etc.) y caducifolios (robles, haya, fresnos, olmo, etc.), y especies de origen subtropical o tropical, algunas de dichas especies conocidas como típicamente mediterráneas son la encina y el pino carrasco. Todas estas especies se alternan en el paisaje en función de los marcados gradientes climáticos existentes, tanto en altitud y como en latitud.

Bajo unas condiciones climáticas típicamente mediterráneas, el crecimiento de los árboles está limitado por las bajas temperaturas del invierno y la falta de agua en verano de manera que la primavera y el otoño suelen ser las épocas más favorables para el crecimiento. Esta estacionalidad determina un ritmo bimodal de la actividad del cámbium que se refleja en la estructura de la madera del anillo que muestra bandas intraanuales (falsos anillos) dificultando la identificación y la datación de los anillos anuales (Fig. 4). Además, como las temperaturas son altas durante muchos meses, el periodo de crecimiento puede ser muy largo y, si las precipitaciones son abundantes y están bien repartidas a lo largo del año, los anillos son muy anchos. No obstante, como la variabilidad ínter e intraanual climática es elevada también se producen diferencias grandes en el grosor de los anillos. En concreto, si las precipitaciones son escasas o no están bien repartidas a lo largo del año los anillos son más estrechos.

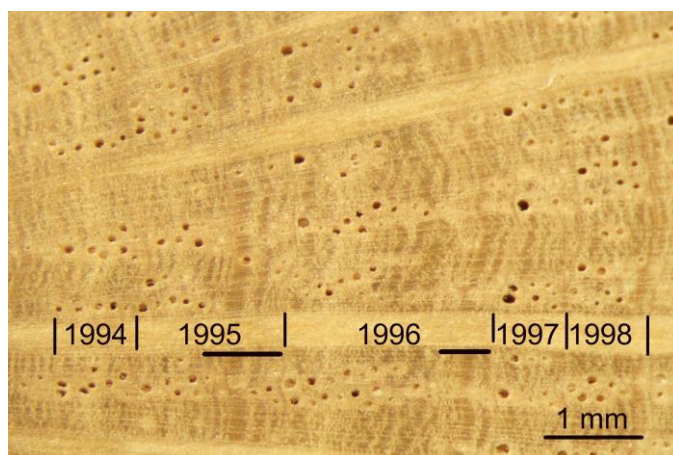


Figura 4.- Anillos de encina (*Quercus ilex*, Garraf-Barcelona). Nótese la dificultad para identificar los anillos, además dentro de cada anillo hay varias bandas que corresponden a paradas y posterior reiniciación del crecimiento según haya o no disponibilidad de agua (lluvias).

2.6.- La sensibilidad del crecimiento a los factores ambientales

En cualquier situación, la actividad del cámbium es muy sensible a los factores ambientales y esta sensibilidad queda reflejada en las características de los anillos formados. Por lo tanto, la variabilidad del clima, la composición atmosférica, las características físicas y químicas del suelo, etc. modifican la tasa de formación de nuevas células, su número, su tamaño y el material utilizado para construirlas, determinando, a su vez, las características físicas (grosor y densidad) y químicas (isótopos, metales pesados, etc.) de los anillos. Todas estas características pueden ser cuantificadas anual y estacionalmente separando las maderas tardía y temprana, anillo por anillo, y construir series temporales de distintas variables: series de grosor, de densidad, de isótopos, de metales pesados, etc. dependiendo de los objetivos de la investigación.

Pero además, el efecto de otros factores puede ser registrado por los anillos de otras maneras. Si el árbol, el cámbium, sufre alguna herida causada por el fuego, los animales, el hombre, los golpes de piedras y rocas, la nieve, etc.- el acontecimiento queda gravado en forma de cicatriz marcando el anillo del año correspondiente (Shigo 1983). Todas estas señales convenientemente datadas y

replicadas constituyen una cronología cuyo patrón temporal dependerá de la frecuencia con la que se produzca un determinado acontecimiento.

Existe otro conjunto de factores que causan una inclinación del tronco del árbol, por ejemplo procesos de reptación del suelo, las avalanchas de nieve, etc. La reacción del árbol es recuperar su verticalidad y para ello forma la llamada madera de reacción, distinta a la madera de los anillos normales. En las angiospermas, la madera de reacción se forma por el lado del tronco sobre el que actúa la fuerza que causa la inclinación y se llama de tensión. En las gimnospermas, se forma por el lado del tronco opuesto a dicha fuerza y se llama de compresión.

Los factores pueden variar de diferentes maneras con el tiempo y afectar de manera distinta a los árboles y de un lugar a otro. Algunos factores varían poco y lentamente a largo del tiempo, otros pueden variar de forma rápida y repetirse muchas o pocas veces, o pueden afectar de manera similar y simultánea a muchos árboles, o afectar a un solo árbol o a unos pocos.

2.7.- Los factores limitantes son también uniformizadores

De entre todos los factores, el clima es común a todos los árboles de una región determinada. La variabilidad interanual e intraanual del clima de dicha región afectará a todos los árboles y quedará reflejada de forma parecida en el anillo formado un año determinado por todos los árboles que habitan en la región. Esta similitud entre árboles es notable cuando las condiciones climáticas se vuelven especialmente limitantes para el crecimiento. Por ejemplo, si la disponibilidad de agua es, en un año determinado, el factor más limitante para el crecimiento debido a que las precipitaciones son escasas, todos los árboles de la zona afectada experimentarán un menor crecimiento por la no disponibilidad de agua. Esto es lo que pasa con mucha frecuencia en las regiones de clima mediterráneo y también en las semiáridas; pero además el anillo formado será todavía más estrecho en aquellos árboles que crezcan sobre un suelo esquelético o con poca capacidad para retener agua como pasa en los suelos arenosos (Fig. 6). Por el contrario, en las regiones frías como las boreales o en la alta montaña, el factor más limitante suelen ser las bajas temperaturas de los meses de verano. En nuestro contexto geográfico, mediterráneo y con marcados gradientes y diferencias de clima por el relieve, se dan prácticamente todas las situaciones anteriores.

2.8.- La huella del clima y la firma del tiempo

El clima es el factor ecológico más importante. La variabilidad climática anual imprime una señal clara de su historia en los anillos de los árboles afectando, por ejemplo, a su grosor relativo. Cuando el clima es muy limitante para el crecimiento, los anillos que se forman ese año son estrechos en la mayoría de los árboles de una región, es un año característico. Como resultado de la estrecha relación entre el crecimiento y el clima, las series de anillos anuales formados por los árboles que crecen bajo unas mismas condiciones climáticas presentan una sincronía, su patrón de variación temporal en el grosor es muy similar. Ese patrón o secuencia de anillos característicos (estrechos) es propio de un determinado periodo de tiempo: es la huella del clima que es reconocible a pesar de quedar gravada sobre las marcas de otros factores que también han afectado al crecimiento. Pero además, esta firma climática es la firma del tiempo, ya que es muy poco probable que un determinado patrón temporal se repita exactamente igual en otro periodo.



Figura 5.- Anillo característico del año 1879 en un pino negro (*Pinus uncinata*) del Pirineo.

3.- Principios de la dendrocronología

Cómo citar este artículo:

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

El principio del uniformitarismo

Se puede resumir con la siguiente frase: “el presente es la llave del pasado” y dice que los procesos biológicos y físicos que en la actualidad determinan el crecimiento de los árboles han operado de la misma manera en el pasado (Fritts 1976). Así, dado que estos procesos están gobernados por la física y la fisiología de los árboles, podemos asumir que su manera de actuar se mantiene a lo largo del tiempo. Como consecuencia, unas condiciones ambientales determinadas que producen en la actualidad una respuesta concreta en los árboles también habrán provocado la misma respuesta si dichas condiciones se han dado en el pasado. Este enunciado también se puede formular al revés, las condiciones ambientales que en la actualidad están asociadas a una determinada respuesta de los árboles han tenido que ser las mismas en el pasado si esa respuesta también se ha observado en el pasado. Este principio no es exclusivo de la dendrocronología, de hecho fue formulado por los geólogos en el sXIX estudiando los estratos geológicos y los procesos que los generan.

La dendrocronología además añade un nuevo giro a este principio “el pasado es la clave del futuro”. Es decir, si conocemos las condiciones ambientales que han operado en el pasado que han dejado su marca en los anillos de los árboles, analizándolas podemos hacer mejores predicciones y una gestión más precisa del medio para el futuro.

No obstante, este principio tiene limitaciones. En concreto, cuando no hay análogos en el pasado o en el presente. El primer problema es cuando las condiciones actuales no tienen análogo en el pasado. Si esto se produjera para algún tipo de información o señal registradas en los anillos las reconstrucciones sobre las condiciones pasadas quedarían invalidadas. El problema contrario, cuando las condiciones del pasado no tienen análogo en el presente no es tan grave puesto que sólo se invalidaría alguna de las condiciones pasadas.

El principio de los factores limitantes

Su formulación puede ser la siguiente: del conjunto de factores que intervienen en el proceso de crecimiento de los árboles, siempre suele haber uno que limita el proceso. Ya hemos comentado más arriba que la falta de agua suele ser el factor más limitante para el crecimiento, mientras que en los ambientes fríos, lo son las bajas temperaturas del verano. Así, cuando se analizan anillos que presentan una sincronía, ésta es debida al efecto de algún factor limitante común (Fritts 1976). Este principio se tiene muy en cuenta en el caso de las reconstrucciones climáticas. Según lo expuesto, es fácil imaginar que los factores climáticos son más limitantes si los árboles de una especie determinada se encuentran al límite del área de distribución geográfica de la especie o creciendo en condiciones poco favorables (Fig. 6).

Como resultado de los dos principios anteriores, tenemos el principio de la datación cruzada que también es una práctica. Esto es, que los árboles que han crecido bajo unas mismas condiciones climáticas mostrarán una sincronía en las características de sus anillos, los cuales mostrarán un patrón de variación común, normalmente como resultado de uno o unos pocos factores limitantes comunes. La datación cruzada es una práctica, la más importante del conjunto de métodos dendrocronológicos, su objetivo es detectar y corregir la falta de sincronización entre las series de anillos.

4.- Metodología

4.1- El principio básico de la dendrocronología y su práctica: la datación cruzada

Los árboles utilizados en la datación cruzada, crosdatación o ínter datación, deben formar anillos anuales. Y uno o unos pocos factores ambientales (climáticos) deben dominar limitando el crecimiento sobre una región grande. En estas condiciones, los árboles sensibles a la variabilidad

del clima reaccionan mostrando los efectos de dicho factor. Cuando los árboles crecen en condiciones óptimas, en el área del centro de su distribución geográfica, o fuera de ella pero en buenas condiciones ambientales, las series de anillos anuales suelen mostrar una baja variabilidad interanual, se trata de series complacientes (Fig. 6). Fuera de estas áreas o hábitats donde las condiciones ambientales (clima) no son tan benignas la variabilidad interanual es elevada como consecuencia del mayor efecto limitante de dichas condiciones sobre el crecimiento (series sensibles). Estas series son más fáciles de datar ya que presentan todo un conjunto de anillos característicos comunes a todos o a la mayoría de los árboles de la región.

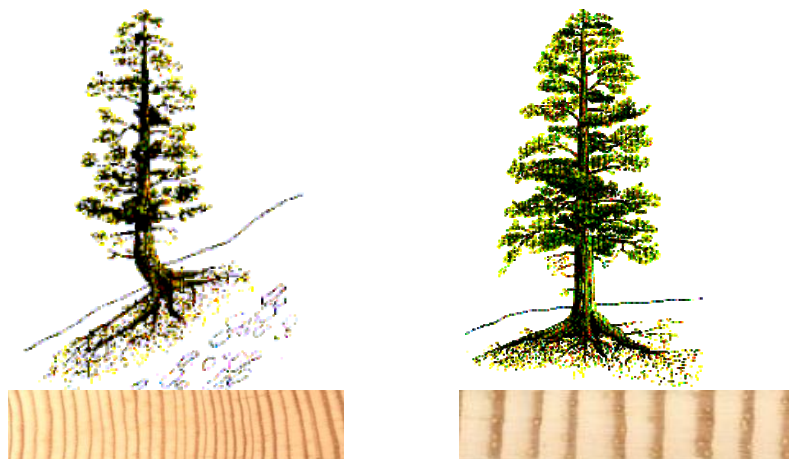


Figura 6.- Series de anillos sensibles (izquierda) y complacientes (derecha). Las series de anillos complacientes muestran una baja variabilidad, por ejemplo en el grosor, tal y como muestra la figura.

4.2- Datación, datación cruzada y datación absoluta

La datación de las secuencias de anillos de los árboles vivos viene facilitada porque es una secuencia que está anclada en el tiempo, ya que el último anillo corresponde al último año de crecimiento (Stokes & Smiley 1968). De manera que retrocediendo hacia atrás en la secuencia de anillos, es decir en el tiempo, se va asignando a cada uno de ellos el año de calendario durante el cual se formó. A medida que se hace esta asignación, se anotan también los anillos característicos como son los anillos estrechos, los muy anchos, los que tienen la madera tardía clara, anillos de helada, etc. Por ejemplo, en nuestra región, podemos reconocer en cualquier árbol el anillo de los años 1984 y 1986, por ser estrechos debido a la sequía, los de los 1931 y 1963 por el frío, el 1871 es un anillo de helada por haberse producido heladas tardías en la primavera. El anillo del año 1972 es característico por presentar la madera tardía clara como consecuencia de la ola de frío polar que llegó hasta los Pirineos y paró el metabolismo secundario de producción de lignina, sustancia que oscurece las células de la madera tardía.

Para estar seguros de que las dataciones individuales de las secuencias de anillos son correctas, se lleva a cabo la comparación de las dataciones individuales: es el proceso de interdatación o datación cruzada (Fig. 7). Para ello se comprueba, visualmente, si existe o no una sincronía de los anillos característicos de todos los árboles. La interdatación se basa en la sincronía que hay en el patrón de anillos característicos de los árboles que han crecido bajo las mismas condiciones climáticas durante un periodo común. Los cambios en el grosor de los anillos reflejan la respuesta de los árboles a la variabilidad del clima, teniendo en cuenta que de su respuesta depende su supervivencia y que no puede marchar del lugar donde nació.

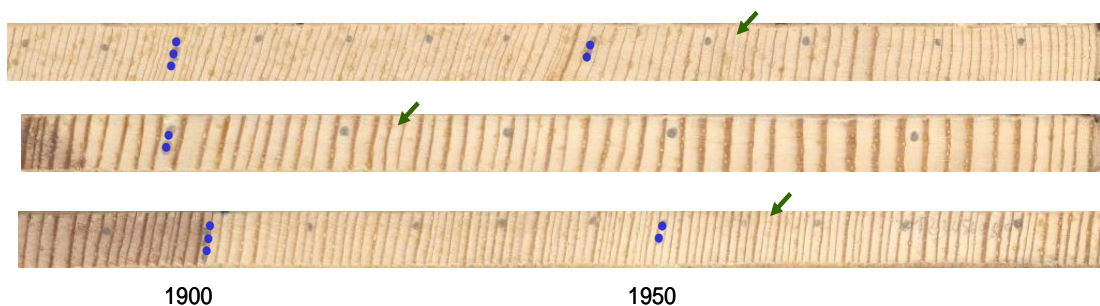


Figura 7.- La figura muestra 3 testigos de madera correctamente datados ya que los años característicos coinciden en todos ellos a pesar de las diferencias en el grosor de los anillos entre árboles. Por ejemplo, el anillo del año 1963 que es el que señala la flecha. La comparación de las dataciones (interdatación) asegura que las dataciones individuales son correctas y es fundamental para corregir errores de datación debido, por ejemplo a los anillos ausentes o dobles. Los 3 puntos señalan un cambio de siglo, en este caso el año 1900, los 2 puntos el medio siglo, el año 1950, y un único punto señala el cambio de década

4.3.- Medición de los anillos y validación estadística de la datación

Una vez que las series individuales se han datado e ínter datado se mide el grosor de los anillos. La validación estadística de las dataciones se lleva a cabo determinando el grado de sincronía entre las series mediante el coeficiente de correlación con un nivel de significación del 95% y 99%. El programa estadístico más utilizado es el COFECHA (Holmes 1983). Los pasos fundamentales que realiza este programa son:

- Eliminar la tendencia debida a la edad y calcular los residuos para que las series sean estacionarias, con la misma media.
- Comparar cada serie individual con la cronología maestra elaborada con el resto de series. Es decir, en la cronología maestra nunca interviene la serie que está siendo comparada. La comparación consiste en calcular el coeficiente de correlación, una medida del grado de sincronía entre series. El resultado nos da tantos coeficientes de correlación como series haya.
- Calcula la correlación entre la cronología maestra y cada serie por segmentos de años que el usuario puede especificar, por defecto son de 50 años ($r=0,328$; $p<0,01$). Además, computa el coeficiente de correlación desplazando la serie sobre la cronología maestra 10 posiciones hacia un lado y otras 10 posiciones hacia el otro, el objetivo es determinar si hay alguna posición que de una mejor correlación, en tal caso querría decir que hay anillos ausentes o que hay algún anillo repetido. También nos informa de potenciales errores de medición.
- A continuación la serie se desplaza 25 años hacia atrás, con lo cual hay una superposición de 25 con el segmento anterior, y se repite todo el proceso explicado en el punto 3. Y, así sucesivamente hasta que se analiza la serie en toda su longitud.

Los problemas de datación que se detectan se tienen que subsanar hasta conseguir una buena sincronización entre las series. Las series o los segmentos de algunas de ellas que no sincronicen bien se descartan pues una mala sincronización haría perder fiabilidad a la serie maestra, la cronología.

Así, la sincronía en las fluctuaciones interanuales y el patrón común de anillos característicos de los árboles de una región es lo que permite la ínter datación y finalmente la datación absoluta de los anillos, asignando de manera definitiva y precisa del año que corresponde a cada anillo.

Siguiendo este procedimiento de ínter datación pueden datarse de forma absoluta los anillos de los árboles muertos, de maderas viejas utilizadas en construcciones u objetos, etc. siempre y cuando las series de anillos tengan una superposición temporal de un número de años suficiente que nos permita reconocer el patrón temporal característico de la huella del clima. Al mismo tiempo, estas nuevas series datadas pueden incluirse en la cronología y alargarla más hacia atrás en el tiempo.

4.4.- Construcción de la cronología maestra

Modelo conceptual agregado del crecimiento de los árboles

La señal climática gravada en los anillos hace factible la validación de la datación. Pero esta señal no es la única que queda registrada. En los anillos se superponen muchas señales –información– que reflejan las variaciones de todos aquellos factores internos y externos que influyen en el crecimiento. Un modelo aditivo con el que se pretende considerar un conjunto de factores que pueden haber afectado al grosor de los anillos suele usarse en dendrocronología para describir la variabilidad de las series de crecimiento (Cook & Kairiukstis 1990). El modelo es bastante simple porque los factores se clasifican en grupos y porque tampoco considera las interacciones entre ellos. De todas maneras proporciona un marco conceptual de referencia para muchas aplicaciones en dendrocronología. La expresión matemática del mismo es:

$$G_t = T_t + C_t + a_1 \cdot P1_t + a_2 \cdot P2_t + \epsilon_t$$

Donde, G_t es la serie de valores del grosor observado (medido) del anillo del año t . T_t es la serie de valores predichos por una función de crecimiento que recoge la tendencia debida a la edad ya que los anillos son más estrechos a medida que el árbol va aumentando el diámetro. C_t es la serie de residuos, las diferencias entre los valores de la tendencia debida a la edad y los valores del grosor de los anillos observados; estas desviaciones con respecto a la tendencia se debe a los efectos del clima. $P1_t$ y $P2_t$ son cambios bruscos observados en las series de crecimiento anual debido al efecto de perturbaciones de distinta índole. Y ϵ_t es un término de error no atribuible a ninguno de los factores anteriores y que se considera una variabilidad aleatoria. De esta manera y según el objetivo del estudio, lo que se hace es extraer la señal que interese mediante la utilización de técnicas estadísticas y matemáticas considerando ruido el resto de señales (Fig. 8).

Estandarización de las series de grosor

La construcción de una cronología del grosor de los anillos se obtiene haciendo el promedio de todas las series individuales. No obstante, primero las series individuales tienen que ser comparables entre si haciendo que su media sea constante (series estacionarias, Fig. 8) de manera que todas las series tengan el mismo peso en el cómputo del promedio de todas las observaciones anuales. Para ello las series tienen que ser estandarizadas, eliminando la tendencia debida a la edad. La estandarización consiste en ajustar una función matemática que recoja dicha tendencia. El cociente o la diferencia para cada año entre los valores reales del grosor y los predichos por la función nos proporciona la serie de residuos cuya variabilidad se atribuye principalmente al clima. Estas series de residuos que se llaman índices de crecimiento en dendrocronología.

En la figura 8, la serie del grosor de los anillos, la serie del grosor de los anillos, G_t , muestra una tendencia, los anillos son cada vez más estrechos debido a la edad, T_t .

$$G_t = T_t \cdot \epsilon_t$$

Esta tendencia se puede caracterizar por una función exponencial negativa

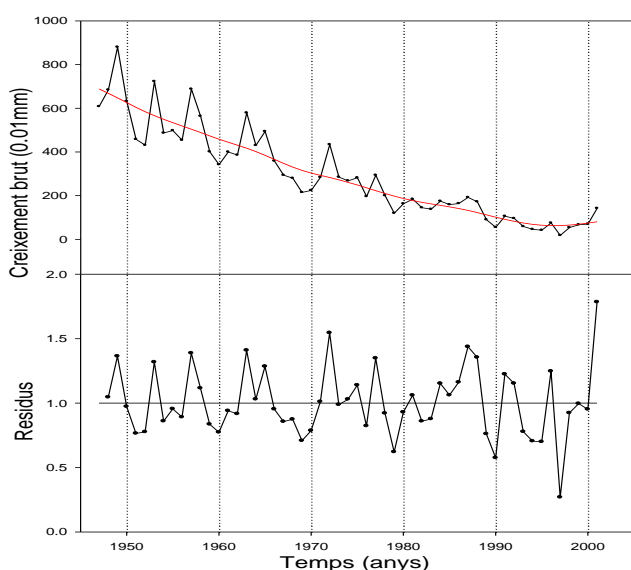
$$T_t = a \cdot e^{-bt} \rightarrow G_t = a \cdot e^{-bt} \cdot \epsilon_t$$

Cómo citar este artículo:

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

El cociente (o las diferencias) entre el grosor observado y el predicho por la función nos proporciona la serie de residuos o índices en dendrocronología.

$$\varepsilon_t = G_t / T_t$$



La serie del grosor de los anillos, G_t , muestra una tendencia debida a la edad, T_t , a hacer los anillos cada vez más estrechos.

$$G_t = T_t \cdot \varepsilon_t$$

Función exponencial negativa

$$T_t = a \cdot e^{-bt} \rightarrow G_t = a \cdot e^{-bt} \cdot \varepsilon_t$$

El cociente (o las diferencias) entre el grosor observado y el predicho por la función nos proporciona la serie de residuos o índices en dendrocronología.

$$\varepsilon_t = G_t / T_t$$

Figura 8.- Proceso de estandarización de las series de grosor. La serie de residuos es estacionaria en la media y puesto que se han calculado haciendo el cociente la media es igual a uno.

Una vez que todas las series se han estandarizado se hace la media, normalmente es una media ponderada que suaviza el valor de los años extremos, y se obtiene la cronología maestra (Fig. 9).

Esta cronología puede utilizarse para analizar las relaciones crecimiento-clima (función respuesta) y si la señal climática se mantiene para el periodo del cual se dispone de datos climáticos se puede llevar a cabo la reconstrucción de dicha señal (función de transferencia). También se puede utilizar para dataciones, etc. una vez que se determine el periodo para el cual es fiable.

Estimación de la fiabilidad de la cronología

Para numerosas aplicaciones, en particular en dendroclimatología, es muy importante saber para qué periodo es fiable la cronología que hemos obtenido. Determinar el periodo fiable es importante por dos razones fundamentales. Una, porque no todas las series tienen la misma longitud (Fig. 9) y dos, porque el grado de sincronización (determinado por el coeficiente de correlación) entre series puede variar y no ser significativo a lo largo del periodo cubierto por la cronología. En resumen, la fiabilidad de la cronología depende del número de series que intervengan y del grado de sincronía entre ellas. Para determinar la fiabilidad de la cronología se cuantifica la señal de la población expresada en nuestra cronología (EPS) que es una muestra de la población.

Al promediar las series, la variabilidad no común (o ruido) se anulará en una medida proporcional al número de series que se promedien. Por ejemplo, en una cronología donde intervinieran t árboles representados con una única serie cada uno de ellos, la varianza de cada serie de índices forma parte de la varianza común o señal ($r_{media\ entre\ árboles}$) y del ruido ($1 - r_{media\ entre$

árboles). Al hacer el promedio, el ruido se reduce a $(1 - r_{\text{media entre árboles}}) / t$ mientras que la varianza común no queda afectada.

Por lo tanto, la cronología media tiene una varianza total que es la suma de la señal más el ruido $(r_{\text{media entre árboles}} + (1 - r_{\text{media entre árboles}}) / t)$. Así, la varianza común (señal) de la cronología se expresa como una fracción de la varianza total (señal + ruido) que contiene. El cociente entre la varianza común (señal) dividido por la varianza total (señal + ruido) de dicha cronología cuantifica hasta qué grado esa cronología refleja a la perfecta hipotética cronología. Este concepto se denomina señal de la población expresada, EPS (del inglés Expressed Population Signal) cuya expresión es: $\text{EPS} = r_{\text{media entre árboles}} / t \cdot r_{\text{media entre árboles}} + (1 - r_{\text{media entre árboles}})$. Se considera que una cronología es fiable cuando el valor del $\text{EPS} \geq 0.85$. En el ejemplo de la Fig. 9 el periodo fiable va de 1710 a 2003.

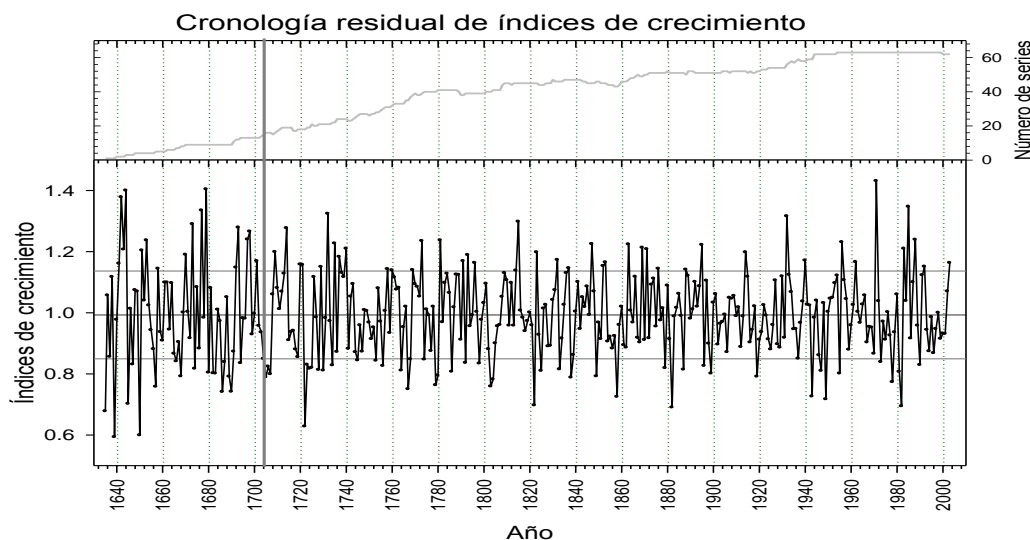


Figura 9.- Representación de una cronología de índices de crecimiento (abajo) y el número de series que intervienen cada año (arriba). La línea gris vertical delimita el periodo para el cual la cronología es fiable.

5.- Aplicaciones de la dendrocronología

La dendrocronología tiene aplicaciones en campos muy diferentes de la ciencia ya que como se ha expuesto los anillos contienen información de muchos factores. Esta información puede ser recuperada y, convenientemente analizada, permite el estudio y análisis de procesos ecológicos, geomorfológicos, climatológicos, arqueológicos, etc. en los dos ejes de variación de los mismos: el espacio y el tiempo.

En climatología y paleoclimatología. La señal climática gravada en los anillos de crecimiento se puede utilizar para reconstruir el clima del pasado para periodos de los cuales no se dispone de registros meteorológicos. En concreto, se pueden reconstruir las variables climáticas que más limitan el crecimiento de los árboles y muestran por lo tanto una influencia significativa sobre la formación de los anillos anuales de crecimiento los cuales registran dicha señal. En este tipo de estudios se utilizan cronologías maestras formadas por una gran cantidad de series de muchos árboles puesto que así se maximiza la señal climática común. Las reconstrucciones climáticas son de gran utilidad puesto que permiten analizar la evolución del clima del pasado, sus extremos y variaciones.

En **ecología**, la dendrocronología es muy útil para estudiar procesos que tienen lugar a escalas de tiempo largas como por ejemplo la sucesión ecológica. Los anillos permiten datar el año de germinación y muerte de los árboles, que son los dos procesos clave de la dinámica de las poblaciones. El análisis de las series anuales de crecimiento permite determinar el régimen de perturbaciones que ha afectado al bosque así como analizar los procesos de competencia y el efecto del clima.

En **geología**, los anillos de los árboles pueden registrar el efecto de los terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de terreno, caída de rocas, aludes de nieve, riadas, avance y retroceso de glaciares, etc. Todos estos fenómenos pueden ser datados gracias a las señales gravadas en los anillos de madera y determinar la frecuencia con la que dichos fenómenos suceden a lo largo del tiempo, el área afectada por tales fenómenos y, en ocasiones, su intensidad.

En **criminología**, la datación precisa de la madera de cuadros y esculturas ha permitido, en algunos casos, demostrar falsificaciones. En otros ámbitos, las marcas producidas en los árboles o bien objetos clavados en ellos pueden ser datados y contrastados con las declaraciones de propietarios en litigio. La tala ilegal de árboles, su muerte o debilitamiento por el efecto de contaminantes vertidos a la atmósfera, al agua o al suelo, o por la captación de agua, pueden ser datados con precisión estableciendo así la fecha (año o estación) del delito.

En **dendroarqueología**, el objetivo principal es la datación absoluta de construcciones y objetos arqueológicos (Fig. 10) (Baillie 1982). Precisamente, la datación absoluta de objetos de madera históricos y arqueológicos fue una de las primeras aplicaciones de la dendrocronología habiendo establecido previamente de una cronología maestra (serie promedio) de referencia local o regional. La cronología maestra se construye a partir de los árboles vivos (Fig. 11). La interdatación o datación cruzada de series de anillos permite validar las dataciones individuales de las muestras arqueológicas. A partir de aquí se pueden datar las series de anillos de muestras de maderas viejas siempre que haya una superposición temporal de dichas secuencias con la cronología de referencia y haya una buena sincronización en el patrón de variación temporal de los anillos. De esta manera, la cronología de referencia también se va alargando hacia atrás en el tiempo. Las cronologías permiten, por un lado, la datación de nuevas series (flotantes) y el estudio de la información climática y ambiental que está gravada en los anillos de crecimiento.

Los requisitos para llevar a cabo dataciones correctas en dendroarqueología son: (1) Disponer de cronologías maestras de árboles vivos largas, (2) Que los anillos tengan una señal climática común, y (3) Que las muestras arqueológicas tengan una serie suficientemente larga de anillos para poder datarlas.



Figura 10.- Edificaciones antiguas construidas con madera. A la derecha, muestreo de una viga para extraer un testimonio de madera (de Arkeolan).

Cómo citar este artículo:

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

La mayor contribución de la dendrocronología a la arqueología es el establecimiento de cronologías largas de anillos de crecimiento con diferentes especies (*Quercus* spp., *Pinus* spp. etc) para diferentes regiones. Su valor es doble ya que permiten la datación de objetos y construcciones arqueológicas y constituyen el estándar de referencia para llevar a cabo la calibración de las dataciones hechas con el carbono 14 (radiocarbono).

Estas cronologías han sido construidas a partir de árboles vivos longevos a cuyas series se han añadido las series obtenidas de maderas viejas y subfósiles después de haber asegurado el encaje perfecto para los periodos de tiempo comunes de superposición (Fig. 11).

Las cronologías largas de anillos de crecimiento proporcionan un registro único con resolución anual de años de calendario con las que ha sido posible contrastar y calibrar las fechas radio carbónicas. En un trabajo reciente de Reimer et al. (2004) se proporciona una nueva curva de calibración para la conversión de años de radiocarbono a años de calibración (calendario). Esta nueva curva ha sido refrendada internacionalmente y sustituye a las anteriores. Su fiabilidad comprende el periodo de 0-24.000 años antes del presente (BP), siendo el año 1950 el año 0 del presente (BP, Before Present, 0 cal BP = AD 1950). La calibración se ha hecho con muestras y series dendrocronológicas de anillos datados para los últimos 12.400 años. Para periodos anteriores la calibración se ha llevado a cabo con registros marinos (corales y foraminíferos). Los autores del trabajo publican en su artículo las curvas de calibración y remito a quien esté interesado al mismo.

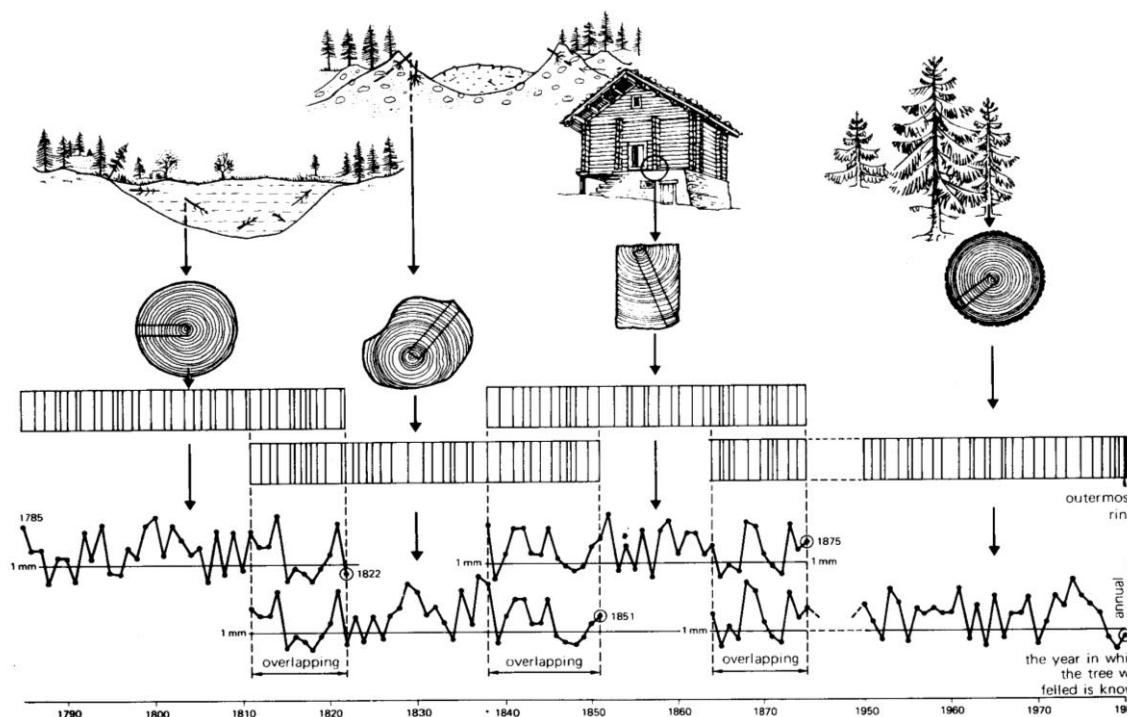


Figura 11.- Procedimiento para datar edificios u objetos de madera al mismo tiempo que se alarga la cronología hacia el pasado con maderas de diversas procedencias (de Schweingruber, 1988). Las poblaciones prehistóricas no empezaron a usar la madera de manera regular en sus construcciones hasta hace unos 5.000 años.

6.- Ventajas y limitaciones del registro dendrocronológico

En resumen, los árboles, y por extensión la madera, son archivos de información climática y ambiental con resolución anual y estacional. Los registros que contienen son de gran calidad, no pierden resolución en el pasado, tienen además una gran replicabilidad y están distribuidos por gran parte de la Tierra, de manera que registran la variabilidad espacial de la información temporal que guardan.

Por contra, los inconvenientes más grandes son su longitud limitada -comparada con otros registros naturales-, su baja durabilidad en muchos ambientes, y la superposición de información de muchos factores al mismo tiempo. En concreto, las limitaciones de la dendrocronología aplicada a la arqueología pueden resumirse como sigue:

- Como se ha explicado en el texto, en algunas áreas de la Tierra, por ej. en los trópicos, las especies no forman anillos con una periodicidad regular y no pueden ser datados.
- Las muestras de madera deben estar en buenas condiciones de manera que se preserve la estructura de los anillos. Además, las muestras tienen que tener un número mínimo de unos 30-80 anillos, dependiendo de la localidad, para poder estar seguros del anclaje (datación) de la serie con la cronología maestra.
- Por lo tanto, debe existir una cronología maestra para el área y de la especie a la cual pertenezca la muestra. No obstante, a veces se pueden utilizar series de otras especies.
- Los árboles viejos, milenarios, son escasos y en muchas zonas no se han preservado los árboles o sus restos en condiciones adecuadas ya que no se dan las condiciones ambientales propicias. Para otras zonas, centro y norte de Europa y Norteamérica se tiene cubierto todo el Holoceno.
- A medida que retrocedemos en el tiempo el número de series es más bajo (falta de replicación) y las dataciones son inciertas.

7.- Bibliografía y diccionarios

- Baillie MGL (1982). *Tree-Ring dating and archaeology*. Croom Helm, London.
- Cook ER and Kairiukstis LA (1990) *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Fritts HC (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press, New York..
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 68–78.
- Schweingruber FH (1988). *Tree Rings. Basics and applications of dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Reimer, P.J. y 28 autores más (2004). Intcal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal Kyr BP. *Radiocarbon*, 46(3): 1029–1058.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F.H., Kienast, F. (2004). *Wood anatomy of central European Species*. Online version: www.woodanatomy.ch
- Shigo AL (1983). *Tree defects: A Photo Guide*. US Forest Service General Tech. Report NE-82; 167 pages. <http://www.chesco.com/~treeman/hardtoget/ntb168/index.html>
- Stokes MA and Smiley TL (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press. Reproduced by The University of Arizona Press, Tucson (1996). 73 pp.

Online glossary of dendrocronology <http://www01.wsl.ch/glossary/>
Techno tree biology dictionary by Shigo <http://www.treedictionary.com/>

8.- Portales de interés: software, instituciones, banco de datos,

COFECHA (Holmes, 1983) Gratis: www.ltrr.arizona.edu o

TSAP de Frank Rinn: Se ha de comprar: <http://www.rinntech.com>

Portal de Henry Grissino-Mayer. Toda la información sobre dendrocronología, software, bibliografía, eventos, ... [The Ultimate Tree-Ring Web Pages http://web.utk.edu/~grissino/](http://web.utk.edu/~grissino/)

The Malcolm and Carolyn Wiener Laboratory for Aegean and Near Eastern Dendrochronology at Cornell University <http://dendro.cornell.edu/>

The Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona <http://www.ltrr.arizona.edu/>

Dendrix (Grupo de investigación en dendrocronología y dendroecología). Dept d'Ecologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona

- [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#)
- [Real Climate](#)
- [International Tree-Ring Data Bank](#)
- [Climate Prediction](#)
- [Carbon trust](#)
- [Siljanfors Forest Park](#)
- [Millennium Database Status](#)
- [Documentary archives](#)
- [Hungarian Instrumental and documentary archives](#)