

La dendrocronología y el carbono 14

en la datación de bienes culturales

EDUARDO RODRÍGUEZ TROBAJO
LABORATORIO DE DENDRODATACIÓN
CENTRO DE INVESTIGACIÓN FORESTAL, INIA.

La datación empírica de bienes histórico-artísticos es un dato fundamental de cara a su catalogación, intervención y rehabilitación, y de manera particular en el caso de la madera. La dendrocronología y el Carbono 14, dos métodos habituales de datación en el ámbito de la conservación, presentan notables diferencias en cuanto a la metodología y precisión de sus resultados.

La dendrodatación se basa en un fenómeno biológico específico de la madera y necesitará para su aplicación cierto número de muestras con características muy particulares. Como contrapartida, la precisión del resultado es óptima pues, con independencia de la antigüedad, se llega a determinar la edad en años sin ningún margen de error.

La radiodatación es un método fisicoquímico que se aplica a cualquier resto orgánico -no sólo a la madera- y las cantidades precisas para el análisis son, por lo general, inferiores a las necesarias en dendrodatación. Por el contrario, su precisión es relativa y estará sometida a un error experimental que, junto a otros factores como la calibración, introducen siempre un margen de imprecisión.

La elección del método dependerá, por tanto, del doble factor de las características del material y de la precisión necesaria en el estudio en curso. No obstante, hay que resaltar que entre ambos métodos existe una clara complementariedad, tal como se pone de manifiesto en el presente texto.

La datación dendrocronológica

FIGURA 1: La anatomía de cada especie de madera condiciona la aplicación de la dendrocronología: la A (pino) y la B (roble), son favorables, mientras la C (álamo) es inviable. Las 3 muestras proceden de la Alhambra (S. XIV-XV).

Fundamentos del método

La dendrocronología basa su estudio en las secuencias de anillos generadas por el árbol durante su crecimiento. Se trata de un fenómeno complejo en el que intervienen factores internos (genéticos) y externos (clima, enfermedades, competencia, etc), que se interrelacionan y producen una respuesta variable en cada árbol. Entre todos estos factores nuestro interés se centra en los factores climáticos por su capacidad de generar respuestas similares en árboles más o menos distantes entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo. Esta propiedad constituirá el fundamento de la dendrodatación. Una limitación importante del método es que no puede ser aplicado a cualquier especie arbórea. En efecto, la definición de los anillos debe ser patente como sucede en muchas coníferas, como el pino, o en las frondosas de anillo poroso, como el roble, pero el límite anular puede resultar indefinido en muchas frondosas de anillo difuso, como el álamo (figura 1). Por otra parte, la distribución geográfica de especies condiciona la aplicación: en Europa se han estudiado sobre todo el roble y el haya -centro y oeste-, el pino y otras coníferas -norte y este-, y el alerce en los Alpes. En la Europa mediterránea han predominado los estudios sobre coníferas, como los pinos, abetos, enebros y sabinas.

La datación dendrocronológica se basa, por tanto, en el estudio de una señal climática y sus posibilidades dependerán de la calidad de la misma. Si las variables climáticas (pluviosidad, temperatura, etc) actúan cerca del límite o umbral del crecimiento del árbol, la respuesta será operativa o *sensible*, pero si las condiciones son menos críticas, el árbol puede dar una respuesta *complaciente*, con un exceso de ruido debido a factores no climáticos, y esto podrá ser perjudicial para la datación. Así mismo, en condiciones muy limitantes la respuesta llegará a ser *hipersensible* y surgirán anomalías,

tales como anillos ausentes, dobles, etc., (figura 2), lo que con frecuencia hace también inviable la datación.

El procedimiento de datación

Una curva dendrocronológica es una representación gráfica de la secuencia de anillos del árbol con los años dispuestos en abscisas y los espesores en ordenadas (figura 3). Es posible optar por otras variables como la densidad máxima de cada anillo pero esto hará más compleja la medición. Una operación básica del método es la *sincronización*: entre todas las posibles comparaciones de dos curvas dendrocronológicas, sólo en una posición se podrá observar una similitud significativa entre ambas. Es evidente que este grado de similitud debe estar respaldado por una prueba objetiva que cuantifique la probabilidad de que no se ha producido por simple azar. Entre los test que son más utilizados citaremos el test W del coeficiente de coincidencia y el test del coeficiente de correlación. Hay que resaltar que la eficacia del ensayo depende estrechamente del número de años común a las dos series (figura 4). La sincronización permite la *interdatación* (*crossdating*) de las series comparadas ya que actúan como referencias mutuas, con independencia de que se conozca o no su datación absoluta. De este modo, cada serie que es datada puede servir a su vez de referencia para futuras dataciones. Hay que advertir que las secuencias sólo son válidas para especies afines con un comportamiento ecofisiológico muy parecido. Tal es el caso de las distintas especies del género *Pinus*, o las especies de roble albar y pedunculado. También se ha comprobado que, bajo condiciones particulares, es posible la heteroconexión entre roble y haya, o entre pino y sabiná.

A partir de un conjunto de curvas sincronizadas, se obtiene una *cronología media o local* que mejorará la señal climática al minimizar los efectos individuales de cada serie. En consecuencia, esta operación mejorará las posibilidades de datación, por lo que será deseable analizar al menos 10 muestras por estudio. No obstante, una *cronología local* reflejará sobre todo el microclima y otros factores de carácter local, y será preciso desarrollar una *red de cronologías de referencia*, al tiempo que se elaboran cronologías más largas mediante reiterados solapamientos de intervalos de creciente antigüedad (figura 5).

El proceso tiene como finalidad la creación de una *cronología absoluta* o datada, cuando haya sido enlazada, directa o indirectamente, con el momento presente. En gran parte de Europa, se ha

logrado la conexión de gran número de cronologías de roble en un único intervalo con 7.272 años de antigüedad. Asimismo en el SE de USA se dispone de una cronología absoluta de 8.685 años para el *Pinus longaeva*. Por el contrario, en el área mediterránea, donde la longevidad de los árboles es menor, no se ha superado con ninguna especie los 2.000 años. En España, la madera de pino es la más idónea para obtener cronologías de referencia, por ser el material más utilizado en construcción, y actualmente se dispone de cronologías que

superan los 1.000 años.

Una alternativa metodológica es la *cronología flotante*, es decir, de edad desconocida. Puede tratarse de una cronología difícil de datar o con mayor antigüedad que las cronologías absolutas existentes. Estas limitaciones son transitorias y este tipo de cronología, lejos de estar invalidadas, poseen una clara utilidad en los estudios arqueológicos. Así, al estudiar un yacimiento arqueológico o un edificio, se pueden detectar con precisión las *diferencias cronológicas relativas* entre sus fases o etapas; lo que pro-

FIGURA 2 : Anomalía de anillo parcialmente ausente en madera de pino laricio. Palacio de El Partal (La Alhambra).

FIGURA 3: Las 4 curvas dendrocronológicas se han representado haciendo coincidir los anillos de igual edad. En esta posición relativa, se dice que las curvas están sincronizadas, y manifiestan un cierto grado de similitud entre ellas, algo mayor entre las dos curvas superiores.

FIGURA 4: En el test W se calcula el coeficiente de confianza del 99,9% a partir del coeficiente de coincidencia entre dos curvas (ordenadas) y el número de anillos en común (abscisas).

porcionará una rica información cultural (figura 6).

Las condiciones de aplicación

Hay que resaltar que una dendrodatación se refiere siempre al año de tala de la madera analizada y que la precisión del resultado puede variar de acuerdo a las siguientes circunstancias (figura 7):

Tipo A: Cuando alguna(s) muestra(s) tiene(n) restos de corteza se puede determinar el año de apeo del árbol. Un caso equivalente es cuando se observa la forma redondeada de la gema del tronco. El resultado puede afinarse al máximo si se comprueba que el último anillo está completo (otoño-invierno) o incompleto (primavera-verano).

Tipo B: Cuando todas las muestras están incompletas por carecer de los anillos más externos, pero se trata de una especie con duramen bien definido - p.e., robles y castaños-, es posible una datación aproximada si se conserva el borde albura/duramen. En efecto, una estimación previa del total de años de la albura en árboles de la misma región permote estimar la edad a partir del último anillo del duramen. Los valores de albura en el roble europeo oscilan entre 10 y 34 ±7 años.

Tipo C: En el caso general de muestras incompletas, sin siquiera borde de duramen en las especies antedichas, el resultado se limitará necesariamente a un *terminus post quem*, es decir, una fecha límite anterior a la tala del árbol. No obstante, siempre se podrá estimar el número de anillos (años) perdidos, a partir de las características del despiece y labrado de la madera.

Finalmente, debemos mencionar dos fenómenos que pueden incidir sobre la fiabilidad de la datación: la reposición y la reutilización de material. Ambas operaciones suelen afectar a porciones menores del conjunto y podrán ser detectadas, por regla general, a través de un estudio más completo.

En síntesis, de lo expuesto se deduce que el resultado será siempre una *datación post quem*. Es obvio que la dendrodatación no podrá proporcionar el año de puesta en obra de un maderamen o de ejecución de una policromía sobre tabla: esto será siempre competencia de la interpretación arqueológica.

FIGURA 5: El procedimiento para alargar una cronología de árboles vivos hacia el pasado consiste en solapar cronologías parciales procedentes de edificios, excavaciones, yacimientos naturales, etc.

FIGURA 6: Croquis de los postes de cimentación de una cabaña en un asentamiento del Bronce tardío en el lago de Neuchatel (Suiza): la línea continua delimita la construcción original; a los 13 años se hacen reparaciones (línea de guiones) y a los 16 años se adiciona una nueva construcción (línea de puntos). Esta cronología flotante fue finalmente fechada en 1008 a.d. C. (fase original).

FIGURA 7: En este fragmento de roble se pueden apreciar los 3 tipos de datación. En el caso de madera de pino, u otra especie sin duramen bien diferenciado, no existirá la posibilidad del tipo B.

La datación del radiocarbono

Principios generales

Se inicia su aplicación a partir de 1950 cuando Libby desarrolla la idea de medir la radiactividad del ^{14}C de cualquier resto biológico como medio de estimar el tiempo transcurrido desde que cesó su actividad vital. Esta radiactividad depende, fundamentalmente, de la intensidad de los rayos cósmicos, que son los productores de ^{14}C en la estratosfera, desde donde se difunde, en forma de CO_2 , por el resto de la atmósfera. Como este isótopo del carbono experimenta también un proceso inverso de lenta desintegración, se producirá finalmente una *concentración de equilibrio*, cuyo valor ha resultado ser similar en toda la superficie terrestre (1 por 10^{12} respecto al ^{12}C). De este modo, existe un aporte continuo de ^{14}C atmosférico a la biosfera y, consecuentemente, la concentración en cada ser vivo será similar a la atmosférica (principio de simultaneidad). Sólo al cesar la vida el flujo de ^{14}C se interrumpirá y, a partir de ese momento, su concentración en el resto orgánico comenzará a disminuir por desintegración. Una importante consecuencia de todo el proceso descrito es la validez universal de este método de datación.

FIGURA 8: Desviación de largo período observada entre la radiodatación (ordenadas) y la dendrodatación (abscisas). Se aprecia como la datación ^{14}C tiende a dar fechas más modernas que la dendrodatación.

Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas se han descubierto diferentes fenómenos (fraccionamiento isotópico, efecto reservorio, etc.) que han obligado a introducir distintas correcciones en los cálculos de la edad; si bien el mayor desajuste del modelo se ha detectado al comprobar que la concentración del ^{14}C atmosférico no ha sido constante a lo largo del tiempo. Este fenómeno se ha podido estudiar en detalle con la medida del ^{14}C presente en los anillos de crecimiento del pino aristata y del roble europeo, que forman series datadas con más de 7.000 años (figura 8). Se ha averiguado, de este modo, que las variaciones del campo magnético terrestre, que actúa a modo de escudo frente a la radiación exterior, han sido la causa del incremento del ^{14}C hacia el pasado, a lo largo de un periodo de 9.000 años. Así mismo, las fluctuaciones de la actividad solar actuando sobre el campo magnético han originado oscilaciones de medio y corto periodo, inferiores al medio siglo. Y finalmente, la propia actividad humana ha influido también a través de la combustión masiva de carbón fosil, que ha provocado una notable caída del ^{14}C , y con los ensayos nucleares de las últimas décadas, que han tenido un efecto de signo contrario.

La aplicación del método

En la técnica convencional, la radiactividad se mide a partir del nivel actual de desintegración del ^{14}C . El material es transformado en carbono sólido, en un gas (CO_2 , acetileno o metano): método PGC, o en un líquido (benceno): método LSC. A partir de 1977, se introduce la técnica de espectrometría de aceleración de masas (método AMS), que mide la concentración del isótopo ^{14}C mediante el bombardeo de una muestra de grafito. Con esta innovación se reduce el tamaño de la muestra -mgrs. en lugar de grs- y el tiempo de medida, sólo 15 -120 m., frente a las 48 horas habituales en la técnica convencional.

La edad de una muestra (T) es calculada a partir de la actividad del radioisótopo (^{14}A), esto es, por el número de desintegraciones por gramo de carbono y unidad de tiempo, mediante la expresión:

$$T = - 8033 \ln \frac{^{14}\text{A}}{^{14}\text{A}_0}$$

siendo:

^{14}A : actividad actual medida

$^{14}\text{A}_0$: actividad original

Esta ecuación básica muestra que el tiempo depende de la razón $^{14}\text{A}/^{14}\text{A}_0$, es decir del valor relativo de ^{14}A . Conforme a esto, un error relativo de sólo 1% tendrá una repercusión de aprox. 80 años en la edad. Asimismo, se deduce que existirá en la práctica una edad límite de datación cuando ^{14}A llegue a ser menor que la radiactividad de fondo, debida al propio equipo y a la radiación cósmica no filtrada. Este límite de orden técnico se sitúa actualmente en torno a los 45.000 años.

Por otra parte, la medición de la desintegración está sometido, por su naturaleza, a un error experimental (desviación

típica, ó), que conforme al modelo teórico (Poisson) tiene un error relativo igual a $1/\sqrt{^{14}\text{A}}$. Así, con la reducción de ^{14}A debida a una mayor edad de la muestra, inevitablemente, el error relativo será también mayor. No obstante, este error puede ser aminorado, en buena medida, actuando sobre los factores que implican un incremento de ^{14}A : la cantidad de muestra y el tiempo de medición. Estas mejoras serán solo factibles en la técnica convencional, mientras que en la nueva técnica AMS, el error dependerá sobre todo de la estabilidad operativa del acelerador.

Tal como se expuso en el anterior apartado, existe la necesidad de aplicar una importante corrección a la edad ^{14}C así obtenida. Esta operación denominada *calibrado* se realiza mediante las *curvas de calibración* construidas a partir de los anillos de árboles. Una radiodatación con su error experimental, una vez corregidos darán una *edad calibrada*, más real que la anterior, pero también con un cierto error que dependerá bastante de la forma local de la curva de calibración. El caso más desfavorable se producirá cuando la curva presente fuertes oscilaciones llegando a generar varios intervalos disjuntos para una misma radiodatación (figura 9).

Finalmente, la contaminación de la muestra con restos de diferente(s) edad(es) suele tener un importante efecto de rebaja/incremento de la edad aparente. El efecto será más nocivo en muestras de bastante edad, si los contaminantes son modernos, como las raíces o las sustancias húmicas del suelo.

Por convención, todas las radiodataciones son expresadas como «antes del presente» (a.p.), tomando como referencia el año 1950. Asimismo se sigue utilizando en los cálculos el valor de la primera medición de $T_{1/2} = 5.568$ años (error: + 3%), con el fin de evitar una continua confusión entre los primeros ensayos y los más recientes. El resultado de la datación ^{14}C adopta una notación convencional como, por ejemplo: $T_{\text{conv}} = 1.400 \pm 40 \text{ BP (GrN-x) } 600-660 \text{ Cal.AD}^*$ Stuiver(1982): Radiocarbon 24 1-27.

Lectura: Se indica la edad aparente con el error estandar de 1σ (coeficiente de confianza, 68%). Esta edad (BP) se contabiliza a partir de 1950. Sigue del código del laboratorio entre parentesis y las fechas calibradas (Cal. AD), con la indicación de la referencia bibliográfica () de la curva de calibración.

Un método combinado de datación

Algunas relaciones metodológicas entre las dos técnicas de datación ya han sido evidenciadas. La calibración del ^{14}C solo ha sido posible gracias a la existencia previa de largas cronologías absolutas para la madera. Y a la inversa, bastantes estudios de dendrodatación, en los que sólo se han obtenido cronologías flotantes, se han apoyado en la datación ^{14}C para lograr su datación. Existen, no obstante, otras posibilidades de aplicación combinada de ambas técnicas a la madera, de modo que pueden mejorarse los resultados proporcionados por uno u otro método.

Mencionaremos aquí sólo algunas de estas opciones, que forman parte de una investigación actualmente en curso aplicada a bienes culturales de nuestro país. En primer lugar, el estudio dendrocronológico del material nos permite el conocimiento de sus secuencias de anillos, la interdatación entre fragmentos y, finalmente, la obtención de una muestra de tamaño lo más grande posible. De este modo, la radiodatación de esta muestra «elaborada» proporcionará un error experimental menor, conforme a los principios ya expuestos. Así, por ejemplo, si logramos incrementar 4 veces el tamaño de la muestra, el error se reducirá a la mitad.

Al mismo tiempo, la selección de un intervalo de anillos corto (10-20 años) dentro de la secuencia total disponible, puede servir para seleccionar la zona más favorable de la curva de calibración. En consecuencia, el resultado de la datación ^{14}C será óptimo, con un reducido intervalo de error en su edad, lo que va a significar una mejora de las posibilidades del ensayo de dendrodatación. Será, por tanto, la datación dendrocronológica la que finalmente proporcionará una edad con precisión anual, sin margen de error.

La táctica metodológica descrita adquiere especial relevancia cuando el material disponible es de notable antigüedad y se reduce a tan sólo uno o muy pocos fragmentos, si bien alguno de ellos reúne condiciones para la aplicación del procedimiento descrito. Este perfil de circunstancias es típico de los restos de madera más antigua que se conservan actualmente en nuestro país (figura 10). En efecto, a partir del siglo XII hacia atrás, se produce una brusca caída de la cantidad de madera conservada, y las cronologías absolutas de referencia encuentran

FIGURA 9: Las fluctuaciones de la curva de calibración pueden llevar a resultados complejos como el que se indica: a una edad ^{14}C (ordenadas) de 220 ± 50 a. p., le corresponden varios intervalos disjuntos de edades corregidas (abscisas): 150-210, 280-320 y 410-420 a. p.

así gran dificultad para su prolongación, si tratamos de aplicar una metodología convencional. Por ello, el procedimiento descrito constituye una buena alternativa para la consecución de cronologías de mayor antigüedad y, consecuentemente, el apoyo a una investigación cronológica más rigurosa del patrimonio altomedieval español.

Referencias básicas

- BOWMAN, S. (1990): Radiocarbon Dating. Interpreting the past. British Museum. Londres. 64 pp.
- ECKSTEIN, D. BAILLIE, M.G.L., EGGER, H. (1984): Dendrochronological dating. Handbook for arqueologists. Nº 2: European Science Foundation, Strasbourg, 55 pp.
- FRITTS, H.C. (1976): Tree-ring and climate. Academic Press. Londres. 567 pp.
- MOOK, W.G. y WATERBOLK, H.T. (1985): Handbook for arqueologists. Nº 3: Radiocarbon Dating European Science Foundation, Strasbourg, 65 pp.
- OTTAWAY, B.S. (1983): Archaeology, dendrochronology and the radiocarbon calibration curve. University of Edimburgh, Occasional paper nº 9, 100 pp.
- RODRÍGUEZ TROBAJO, E. RICHTER, K. (1985): Datación de edificios históricos mediante la dendrocronología. En: La madera en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural. Ministerio de Cultura. pp. 101-110.

FIGURA 10: Esta sección de roble pertenece a una aguja de un andamio utilizado durante la construcción de la ermita mozárabe de San Baudelio de Berlanga (S. XI). La pieza es idónea para una datación del edificio por estar totalmente empotrada bajo las capas del revoco y policromía del muro. La secuencia tiene 80 años y es completa, pues se ha conservado un fragmento de la corteza. La muestra para la datación ^{14}C , fue extraída de su duramen (contorno marcado), incluye un intervalo de 10 años, y su peso es de 283 grs.