

# MÉTODOS FÍSICO-QUÍMICOS DE DATACIÓN EN BIENES DE INTERÉS CULTURAL



AGUSTÍN GRAU CARLES

# MÉTODOS FÍSICO-QUÍMICOS DE DATACIÓN EN BIENES DE INTERÉS CULTURAL

AGUSTÍN GRAU CARLES



© 2013 Agustín Grau Carles

[agcarles25@yahoo.es](mailto:agcarles25@yahoo.es)

<http://www.academiabic.netau.net>

Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión, sin el permiso previo y por escrito del titular del copyright.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte la posibilidad de participar, en años pasados, en proyectos de investigación con grupos multidisciplinares, de los que he podido asimilar la forma de trabajo de ingenieros, químicos, biólogos y geólogos. El conocimiento transmitido de estas disciplinas me ha ayudado sin duda a la elaboración de este manual, en el que se juntan en muchos casos todas ellas. Deseo expresar mi gratitud a los museos de Ciencias Naturales de Madrid, al de los Orígenes en la antigua casa de San Isidro, al Arqueológico Regional y Nacional, al Paleontológico de Ambrona, al del Instituto Geominero de Madrid, al de la Escuela Superior de Ingenieros de Minas y al Naval de Madrid, por permitirme la publicación de las fotografías que aparecen en el texto. Debo también agradecer a mi padre Agustín Grau Malonda la revisión del texto.

## Prólogo

En términos generales, datar consiste en averiguar la edad de algo. Podría ser, por ejemplo, proporcionar una fecha para la formación de un mineral, determinar cuando se esculpió una estatua griega o cuando vivió un animal prehistórico. En este manual se explicarán en detalle los métodos físico-químicos existentes, que pueden emplearse para datar cualquier objeto o material del pasado.

El hecho de conocer la edad de los objetos del pasado es algo intrínseco al ser humano. En general, el visitante de un museo podrá ser ignorante sobre los detalles de la cultura que ha elaborado un objeto, pero deseará conocer al menos de donde procede y su fecha de elaboración aproximada. En realidad, es el mínimo de información que el visitante puede solicitar.

Evidentemente, dar fecha a un objeto puede ser una tarea trivial en el caso de que el arquitecto o artesano la proporcione mediante algún documento o directamente la plasme sobre su obra (epigrafía). La tarea puede ser algo más complicada cuando se trata de comparar la pieza con otras de características similares que hayan sido previamente datadas (tipología). Pero, la tarea de datación puede hacerse verdaderamente compleja, y en ocasiones imposible, cuando se trata de fechar algo de lo que no se cuenta con información adicional o se encuentra absolutamente descontextualizado. Un ejemplo histórico fue la determinación de la edad de la Tierra.

Aunque los intentos de datar la Tierra fueron muchos en el pasado, creyéndose en ocasiones que la fecha estaba completamente resuelta, la tarea fue ingente y llevó siglos en concretarse definitivamente. Hoy se acepta que la Tierra tiene 4.500 millones de años. Sin embargo, esta fecha, como cualquier otro valor empírico está sujeta análisis posteriores según avanza la técnica. Únicamente podemos afirmar que se trata del valor experimental más preciso de los que disponemos hasta el momento.

La datación de la Tierra es el ejemplo por antonomasia que nos permite ilustrar que datar puede ser en ocasiones una tarea extraordinariamente compleja. Los valores medidos pueden ser erróneos, muy controvertidos a pesar de ser correctos e incluso sujetos a variaciones importantes conforme avanza la técnica. La Tabla 0.1 muestra como han ido modificándose las estimaciones sobre la edad de la Tierra a lo largo de la historia.

Tres consideraciones importantes pueden extraerse del contenido de la Tabla 0.1. En primer lugar, confiar únicamente en las fuentes escritas, sin contrastar con la ciencia, proporcionó una edad para la Tierra, tan ridícula desde un punto de vista actual, de 6.000 años. En segundo lugar, aunque todo parezca correcto en una metodología científica, siempre puede existir algún parámetro desconocido que no se ha tenido en cuenta. Lord Kelvin, no incluyó en su modelo la energía suministrada por la desintegración radiactiva de los radioisótopos naturales presentes en el interior de la Tierra, por lo que su modelo, aunque conceptualmente correcto, carece de un parámetro esencial que finalmente deriva en un resultado erróneo. Por último, parece increíble que un dato como la edad de la Tierra no proceda del análisis de un objeto que pueda encontrarse en la Tierra, sino de un objeto exterior, en este caso un meteorito.

Son muchos los tratados de arqueología que distinguen los métodos de datación entre absolutos o relativos. Desde un punto de vista experimental, cualquier método físico-químico de datación puede ser absoluto o relativo dependiendo de la metodología empleada por el investigador que realiza la medida. Aunque un método se considere absoluto, por ejemplo, la datación por radiocarbono, siempre se puede recurrir a un patrón previamente calibrado por otros métodos para realizar la medida. En este caso, la medida sería relativa. Es más, en caso de disponer de un patrón de medida, que se sepa con seguridad bien calibrado, las medidas relativas serán, en la mayoría de los casos, más simples y precisas que las medidas absolutas.

**Tabla 0.1.** Evolución histórica sobre el valor de la edad de la Tierra

<b>Autor</b>	<b>Año publicacion</b>	<b>Edad propuesta</b>	<b>Fundamento del método</b>
Arzobispo J. Usher	Annales Veteris et Novi Testamenti 1659	4.004 a.C.	Fuente escrita. La Biblia
Conde de Buffon	1779	75.000 a	Modelo a escala estudia el ritmo de enfriamiento de la Tierra
Lord Kelvin	1862	20-400 Ma	Solidificación superficial de un objeto fundido de las dimensiones de la Tierra
C. Darwin	The Origin of the Species 1859	300 Ma	Ritmo de erosión de una colina en el Weald
E. Rutherford y B.B. Boltwood	1907	90-570 Ma	Modelo de desintegración radiactiva para el $^{238}\text{U}$
A. Holmes	The Age of the Earth 1927	1.600-3.000 Ma	Modelo de desintegración radiactiva para el $^{238}\text{U}$
C.C. Patterson	1956	4.555 Ma	Datación $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ en meteorito de Cañón del Diablo

Debido a que los métodos físico-químicos de datación generalmente emplean técnicas laboriosas de preparación de muestras y equipos electrónicos sofisticados, tiende a pensarse en ellos como los métodos más precisos y fiables. Conviene aclarar que otros procedimientos, basados en Ciencias como la Biología y la Geología o en disciplinas de Humanidades como la Filología o la tipología, pueden ofrecer al investigador datos indispensables para realizar la datación. La estratigrafía, la bioestratigrafía<sup>i</sup>, la palinología<sup>ii</sup>, la dendrocronología<sup>iii</sup> o la paleolingüística<sup>iv</sup>, aunque no emplean equipos sofisticados de medida, no han quedado en absoluto obsoletas. Estas modalidades de datación son hoy en día objeto de investigación y constante renovación, como podría ocurrir con cualquier otro método basado en la Física o la Química.

Cabría añadir que muchos de los métodos de datación y caracterización, originalmente desarrollados por físicos o químicos, han ido incorporándose como parte esencial a otras Ciencias. De esta forma, son los mismos geólogos o biólogos los que, con ayuda de ingenieros, desarrollan hoy en día los equipos y las nuevas técnicas de análisis sin la ayuda de físicos o químicos. A este grupo se han adherido recientemente también los arqueólogos. Son ya algunas las escuelas de arqueología en el extranjero que imparten clases prácticas sobre métodos de datación, contando con instalaciones y laboratorios de medida que serían la envidia de cualquier físico experimental.

No estaría de más, no obstante, que, al igual que geólogos, biólogos o arqueólogos han realizado el esfuerzo por incorporar la Física o la Química a sus procedimientos de medida, físicos y químicos conocieran lo mejor posible las aplicaciones a otras disciplinas. La mejora de los procedimientos de medida de muestras biológicas, geológicas o arqueológicas siempre será más asequible a físicos o químicos, que comprenden mejor los fundamentos del método, que a los mismos biólogos, geólogos o arqueólogos, muchas veces más preocupados por las consecuencias de los resultados experimentales, que por el rigor del procedimiento empleado para obtenerlos.

<sup>i</sup> La bioestratigrafía considera el estudio de la edad de los estratos a partir de los restos fósiles que se encuentran en ellos.

<sup>ii</sup> La palinología estudia el pasado a partir de los restos de polen que aparecen en los estratos.

<sup>iii</sup> La dendrocronología utiliza los anillos de crecimiento de los árboles para estudiar el pasado.

<sup>iv</sup> La paleolingüística considera la evolución de las lenguas como método de estudio del pasado.

Dada la variedad de métodos físico-químicos de datación, consideraremos en primer lugar los basados en la desintegración radiactiva. Dentro de estos distinguiremos entre los de origen cosmogénico y los de origen natural. Seguidamente trataremos los métodos que aplican técnicas dosimétricas para la evaluación de la edad de la muestra. A continuación, estudiaremos los métodos que se ocupan de las variaciones temporales del campo magnético terrestre. Después analizaremos los métodos puramente químicos. Finalmente, detallaremos como puede datarse una muestra después de someterla a reacciones nucleares.

Entendemos por desintegración radiactiva el proceso nuclear por el que un isótopo pasa espontáneamente a otro distinto emitiendo partículas cargadas y, en ocasiones, radiación electromagnética en forma de rayos  $\gamma$ . La palabra desintegración puede llevar a engaño. En realidad el radioisótopo no desaparece, sino que se transforma en otro. Son dos los tipos de desintegraciones radiactivas: beta y alfa.

Cabe preguntarse sobre cual es el criterio para conocer cuando un isótopo es estable o puede sufrir desintegración radiactiva. El hecho es que no se conocen leyes generales. Sin embargo, podemos afirmar que si un isótopo tiene exceso de neutrones, este sufrirá desintegración  $\beta^-$ . Por el contrario, si posee protones en exceso, se producirá captura electrónica y desintegración  $\beta^+$ . Es más, cuanto mayor sea el exceso de protones o neutrones, el periodo de semidesintegración será más corto (siempre que se comparen radioisótopos todos ellos de número másico impar o par). Para ilustrar estas afirmaciones con un ejemplo, hemos comparado los distintos isótopos del yodo en la Tabla 0.2.

**Tabla 0.2.** Desintegración nuclear y periodo de semidesintegración en distintos isótopos del yodo

Isótopo	Estructura Nuclear	Desintegración	$T_{1/2}^*$
$^{123}\text{I}$	exceso de protones	captura electrónica	13,22 h
$^{125}\text{I}$	exceso de protones	captura electrónica	59,39 d
$^{127}\text{I}$	Estable		
$^{129}\text{I}$	exceso de neutrones	$\beta^-$	16,1 Ma
$^{131}\text{I}$	exceso de neutrones	$\beta^-$	8,02 d
$^{133}\text{I}$	Exceso de neutrones	$\beta^-$	20,8 h

\* Periodos de semidesintegración tomados de la tabla de valores recomendados por el CEA/LHNB (2012)

Los isótopos radiactivos pueden generarse artificialmente en Centrales Nucleares o mediante aceleradores de iones. En el primer caso, un isótopo estable se somete a un flujo de neutrones, lo que produce la captura de un neutrón por parte del núcleo, generándose un radionucleido que sufre desintegración  $\beta^-$ . La captura de protones se consigue, por otra parte, haciendo colisionar los protones acelerados con isótopos estables, formándose radionucleidos  $\beta^+$  y de captura electrónica.

Los isótopos radiactivos tienen aplicaciones muy variadas. En el caso que deseemos usarlos para realizar dataciones, lo que realmente nos interesa es su capacidad de actuar como relojes. El mecanismo de funcionamiento de los relojes radiactivos es muy sencillo. Salvo algunas particularidades, su forma de operar es bastante similar a la de un reloj de arena. Como sabemos el reloj de arena se compone de dos recipientes unidos por un conducto muy fino, de forma que la arena caiga lentamente del recipiente superior al inferior. Para poner a cero el reloj sólo tenemos que situar toda la arena en el recipiente superior. En ese preciso instante comenzará a caer y a llenar el recipiente inferior. La analogía es la siguiente. Supongamos que los granos de arena en el recipiente superior son átomos del isótopo radiactivo  $^nX$ , mientras que los granos en el recipiente inferior átomos del isótopo hijo  $^mY$ . Dos formas de saber el tiempo que ha transcurrido consisten en pesar la arena que ha caído al recipiente inferior, o bien, pesar la arena que falta en el recipiente superior. Como veremos ambos métodos se emplean indistintamente. El primero de los casos es la base del método de datación K/Ar, mientras que mediante el segundo puede medirse el tiempo transcurrido en dataciones por radiocarbono.

La comparación de un reloj radiactivo con un reloj de arena es bastante aproximada, excepto en una salvedad. Los relojes radiactivos contienen una sofisticación que no está presente en los relojes de arena. Para que la analogía sea completa, el reloj de arena debería emitir un chasquido cada vez que un grano de arena pasa por el conducto estrecho que comunica el recipiente superior y el inferior. Esto equivaldría a la emisión de una partícula cargada por parte de isótopo radiactivo. Tendríamos dos métodos completamente diferentes de medir el tiempo: bien pesando la arena en el recipiente inferior o superior, bien contando los chasquidos que emiten los granos de arena al pasar por el estrechamiento. El primero de los métodos sería el utilizado para determinar la cantidad del isótopo radiactivo una muestra mediante un espectrómetro de masas, mientras que el segundo implicaría la utilización de un contador para radiaciones ionizantes.

Los relojes implicados en las técnicas dosimétricas poseen un funcionamiento algo distinto al del reloj de arena que hemos descrito anteriormente. Para visualizarlo es mejor pensar en una cesta, en la que van metiéndose progresivamente con el tiempo, pelotas de ping-pong. Si cada día introducimos, por ejemplo, 3 de estas pelotas en la cesta, al cabo de un tiempo, tendremos un número considerable de pelotas, el cual, por un simple cálculo puede proporcionarnos el tiempo que llevamos introduciendo pelotas en la cesta. Supongamos que al volcar la cesta contamos 384 pelotas. En ese caso el tiempo que ha transcurrido es 128 días. Todas las técnicas dosimétricas están basadas en este mismo principio. La termoluminiscencia, la luminiscencia por estimulación óptica o la resonancia paramagnética de espín, emplean un cociente para medir la edad. En él se divide la dosis total acumulada (paleodosis) entre la dosis anual. Cada una de las técnicas dosimétricas permite medir la dosis total acumulada, mientras que, para conocer la dosis anual se requiere de otros procedimientos de medida o de meras simulaciones por ordenador. En este último caso un observador exterior necesitará conocer el número de pelotas que introducimos diariamente en la cesta.

Las dataciones por medios exclusivamente físicos o químicos suelen apoyarse en otro tipo de medidas, tanto radiométricas como dosimétricas. Sin embargo, son de inestimable ayuda en multitud de ocasiones. Por ejemplo, la inversión de la polaridad magnética que tuvo lugar hace 780 ka, puede emplearse como frontera temporal en multitud de dataciones. Puede marcar la línea divisoria, como queda reflejado en los yacimientos de Atapuerca, para comparar sedimentos anteriores y posteriores a dicho acontecimiento. La inversión magnética no proporcionará fechas exactas a las unidades estratigráficas, que tendrán que datarse por otros medios radiométricos o dosimétricos, pero constituirá un apoyo muy valioso para verificar que las edades datadas son fiables.

España cuenta con yacimientos arqueológicos y paleontológicos de primera magnitud. Por ello, y a pesar de que los métodos de datación de cada capítulo cuentan con numerosos ejemplos prácticos extraídos de la numerosa bibliografía, se ha considerado apropiado dedicar un último capítulo a algunos de los yacimientos más relevantes de España. Con ello se pretende dar una visión global de como se aborda el problema de las dataciones desde un principio, una vez comenzada la excavación del yacimiento; de lo adecuadas y necesarias que pueden llegar a ser las dataciones en el estudio general de un yacimiento, y de la cantidad de información valiosa que se puede llegar a perder si descuidamos este aspecto.

Agustín Grau Carles



# Índice General

## Capítulo 1

<b>MÉTODOS DE DATACIÓN QUE TIENEN SU ORIGEN EN LA RADIACIÓN CÓSMICA</b> .....	1
1.1. RADIOISÓTOPOS GENERADOS EN LA ATMÓSFERA POR LA RADIACIÓN CÓSMICA.....	2
1.1.1. Carbono-14.....	2
1.1.1.1. Esquema de desintegración del $^{14}\text{C}$ .....	3
1.1.1.2. Producción y distribución del $^{14}\text{C}$ .....	3
1.1.1.3. El reloj radiactivo del $^{14}\text{C}$ .....	4
1.1.1.4. Los experimentos de Libby.....	7
1.1.1.5. Distorsiones de la escala de tiempos del radiocarbono.....	8
1.1.1.6. Equipos de medida.....	9
1.1.1.6.1. Contador de centelleo líquido.....	9
1.1.1.6.2. Contador proporcional.....	9
1.1.1.6.3. Espectrómetro de masas con acelerador (AMS).....	10
1.1.1.7. Preparación de muestras.....	11
1.1.1.7.1. Centelleo líquido.....	11
1.1.1.7.2. Contador proporcional.....	12
1.1.1.7.3. AMS.....	13
1.1.1.7.4. Pretratamiento de la muestra.....	14
1.1.1.8. Método de medida de la edad radiocarbónica convencional.....	18
1.1.1.9. Corrección por fraccionamiento isotópico.....	20
1.1.1.10. El fondo en medidas radiométricas.....	22
1.1.1.11. Otros errores en la edad radiocarbónica convencional.....	22
1.1.1.12. El programa CALIB.....	23
1.1.1.13. Aplicación de la estadística bayesiana en la datación.....	23
1.1.1.14. Datación aplicando la coincidencia de conteo o 'wigggle-match'.....	27
1.1.1.15. Datación de microfósiles procedentes de plantas.....	28
1.1.1.16. Datación de microfósiles de humanos y animales.....	28
1.1.1.17. Datación de restos de pelo.....	33
1.1.1.18. Datación de restos de carbón vegetal.....	34
1.1.1.19. Datación de restos de cal en morteros empleados en revestimiento de edificios.....	35
1.1.1.20. Datación de objetos de acero.....	36
1.1.1.21. Datación de restos orgánicos en cerámicas.....	37
1.1.1.22. Datación de pinturas rupestres.....	37
1.1.1.23. Datación de turbas.....	39
1.1.1.24. Datación del contenido orgánico de sedimentos y limos procedentes de ríos y lagos.....	41
1.1.1.25. La datación de conchas de moluscos.....	41
1.1.1.26. Datación de microfósiles marinos.....	42
1.1.1.27. Datación de aguas procedentes de acuíferos.....	44
1.1.1.28. Datación de corrientes marinas.....	45
1.1.1.29. Incertidumbre en la medida. Intercomparaciones.....	47
1.1.1.30. Laboratorios de datación por radiocarbono.....	47
1.1.2. Tritio.....	47
1.1.2.1. Esquema de desintegración del tritio.....	48
1.1.2.2. Producción y distribución del $^3\text{H}$ .....	48
1.1.2.3. El reloj radiactivo del $^3\text{H}$ .....	49
1.1.2.4. Equipos de medida.....	54
1.1.2.5. Medida del tritio por procedimientos radiométricos.....	55

1.1.2.6. Medida de los isótopos de helio y neón.....	57
1.1.2.7. Aplicación del método $^3\text{H}/^3\text{He}$ a la datación de aguas recientes.....	58
1.1.2.7.1. Datación de lagos y ríos.....	58
1.1.2.7.2. Datación de aguas subterráneas.....	58
1.1.2.7.3. Datación de corrientes marinas.....	58
1.1.2.7.4. Datación de hielos.....	59
1.1.2.7.5. Humedad en suelos.....	59
1.1.2.8. Incertidumbre en las medidas. Intercomparaciones.....	59
1.1.2.9. Laboratorios de datación de aguas por el método $^3\text{H}/^3\text{He}$ .....	59
1.1.3. Cloro-36.....	60
1.1.3.1. Esquema de desintegración del $^{36}\text{Cl}$ .....	60
1.1.3.2. Producción y distribución del $^{36}\text{Cl}$ .....	60
1.1.3.3. El reloj radiactivo del $^{36}\text{Cl}$ .....	61
1.1.3.4. Equipos de medida.....	67
1.1.3.5. Preparación de muestras.....	67
1.1.3.6. Datación de aguas fósiles.....	68
1.1.3.7. Medida de la concentración [ $^{36}\text{Cl}$ ] en aguas marinas.....	69
1.1.3.8. Datación de hielos.....	69
1.1.3.9. La evolución temporal de la concentración de $^{36}\text{Cl}$ .....	70
1.1.3.10. Incertidumbre en las medidas. Intercomparaciones.....	70
1.1.3.11. Laboratorios de datación por $^{36}\text{Cl}$ .....	71
1.1.4. Argón-39.....	71
1.1.4.1. Esquema de desintegración del $^{39}\text{Ar}$ .....	71
1.1.4.2. Producción y distribución del $^{39}\text{Ar}$ .....	72
1.1.4.3. El reloj radiactivo del $^{39}\text{Ar}$ .....	72
1.1.4.4. Equipos de medida.....	73
1.1.4.5. Preparación de muestras.....	74
1.1.4.6. Ejemplos de datación.....	74
1.1.4.7. Incertidumbre en las medidas. Intercomparaciones.....	75
1.1.4.8. Laboratorios de datación por $^{39}\text{Ar}$ .....	75
1.1.5. Kriptón-81.....	75
1.1.5.1. Esquema de desintegración del $^{81}\text{Kr}$ .....	76
1.1.5.2. Producción y distribución del $^{81}\text{Kr}$ .....	76
1.1.5.3. El reloj radiactivo del $^{81}\text{Kr}$ .....	77
1.1.5.4. Equipos de medida.....	78
1.1.5.4.1. Dispositivos AMS.....	78
1.1.5.4.2. Trampas de átomos.....	79
1.1.5.5. Preparación de muestras.....	81
1.1.5.6. Medida de $^{85}\text{Kr}$ por medios radiométricos.....	81
1.1.5.7. Datación de aguas fósiles.....	82
1.1.5.8. Incertidumbre en las medidas.....	82
1.1.5.9. Laboratorios de datación por $^{81}\text{Kr}$ .....	82
1.1.6. Yodo-129.....	83
1.1.6.1. Esquema de desintegración del $^{129}\text{I}$ .....	83
1.1.6.2. Producción y distribución del $^{129}\text{I}$ .....	84
1.1.6.3. El reloj radiactivo del $^{129}\text{I}$ .....	85
1.1.5.4. Equipos de medida.....	86
1.1.6.5. Preparación de muestras.....	89
1.1.6.7. Incertidumbre en la medida. Intercomparaciones.....	91
1.1.6.8. Laboratorios de medida de la concentración de $^{129}\text{I}$ natural en agua.....	91

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

