

El papel de la geocronología en el estudio del patrimonio y su contextualización

M. Isabel Sarró Moreno

Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH)
misabel.sarro@cenieh.es

Resumen: La cuantificación del tiempo es fundamental para nuestra comprensión de la evolución y de los procesos geológicos que dan forma a nuestro propio planeta.

La investigación científica que se vincula a la pregunta de cuándo sucedieron estos eventos (geocronología) es importante para tener una visión global y contextualizada que nos permita entender el porqué o el cómo sucedieron.

La geocronología está desarrollando nuevas aplicaciones tanto para la datación de eventos como para comprender procesos climáticos, geológicos, como erupciones volcánicas, procesos sedimentarios y deslizamientos de tierra y para propósitos arqueométricos.

Actualmente la prehistoria y las ciencias del patrimonio quieren conseguir una visión holística y científica de todo lo relacionado con ellas. Es por ello que se presentan varios trabajos enfocados desde un punto de vista transdisciplinar.

Palabras clave: Geociencias, geocronología, análisis isotópico, datación, luminiscencia, OSL, ESR, series del uranio.

Abstract: Quantifying time is clue to understand the evolution and the geological processes that shape our planet.

Scientific research that is linked to the question of when these events happened (geochronology), is important to have a global and contextualized vision that allows us to understand, why or how, the evolution and geological processes happened.

Geochronology is developing new applications both for dating events and for understanding climatic and geological processes, such as volcanic eruptions, sedimentary processes and landslides, and for archaeometric purposes.

Currently, prehistory and heritage sciences want to achieve a holistic and scientific vision of everything related to them. That is why several works focused from a transdisciplinary point of view are presented.

Keywords: Geosciences, geochronology, isotopic analysis, dating methods, luminiscence, OSL, ESR, uranium series.

Introducción

El concepto de patrimonio cultural se ha ido ampliando a lo largo del tiempo, pasando de ser la herencia cultural del pasado de una persona, mantenida hasta la actualidad y transmitida a las generaciones presentes, a incluir el patrimonio natural desde 1972 y el patrimonio inmaterial desde el 2003.

Hoy son varios los documentos internacionales que consolidan una visión amplia y plural del patrimonio cultural, valorando todas aquellas entidades materiales e inmateriales significativas y testimoniales de las distintas culturas, sin establecer límites temporales, espaciales y temáticos, considerando así las entidades de carácter tradicional, industrial, inmaterial, contemporáneo, subacuático y los paisajes culturales como garantes de un importante valor patrimonial. Todo ello implica que, si nos centramos en el término de la conservación del patrimonio, este ámbito es muy amplio y abarca múltiples disciplinas.

Nuestro patrimonio cultural es todo aquello que ha derivado del desarrollo y la diversificación de la cultura y de las habilidades humanas. Teniendo en cuenta esta premisa, el patrimonio cultural es nuestra herencia cultural y esta y su interpretación nos llevan a recorrer un viaje que va muy atrás en el tiempo. Además, el patrimonio natural, en el cual se desarrolla la actividad humana, ha sufrido cambios a lo largo del tiempo que han condicionado la actividad humana o ha sido transformada por ella.

Por tanto, estamos inmersos en un viaje en el tiempo en el que su cuantificación es fundamental para nuestra comprensión de la evolución planetaria, de los procesos geológicos que dan forma a nuestro propio planeta y de la evolución del hombre y su herencia cultural (figura 1).

La investigación científica que se vincula a la pregunta de cuándo sucedieron estos eventos, la geocronología, es importante para tener una visión global y contextualizada que nos permitirá entender los porqués o el cómo sucedieron. La integración de los registros geológicos mediante datación pone luz a las relaciones entre los componentes biológicos (antropológicos), climáticos y morfológicos de la Tierra.

Obviamente, si hablamos de geocronología hacemos referencia a un patrimonio tangible. Pero además consideramos el paleoclima y conceptos intangibles que pueden ser interpretados gracias a los resultados que se obtienen mediante dataciones.

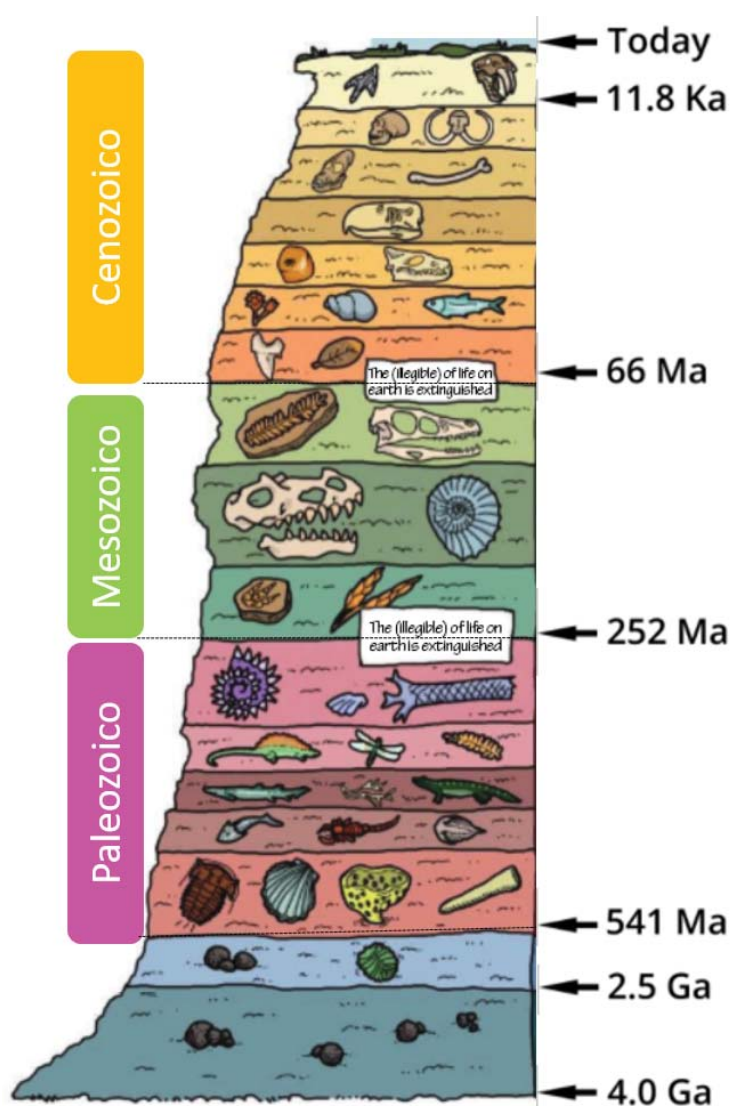


Figura 1. Unidades geocronológicas. Este tipo de contextualización ayuda a enmarcar sucesos en una línea temporal, con la importancia que ello tiene para realizar la interpretación del patrimonio.

La investigación científica del patrimonio cultural

Los objetivos importantes que se deben tener presentes son:

- Aumentar nuestro conocimiento y comprensión del patrimonio tangible.
- Reunir información, incluida evidencia física, para agregar valor cultural al patrimonio tangible e intangible.
- Ayudar a definir las condiciones, los límites, los riesgos y el potencial para la conservación sostenible y la gestión del patrimonio en general.

Estos objetivos hacen de la investigación científica del patrimonio una cadena de valor (figura 2) en la que se pone de manifiesto la visión integral que se debe tener del patrimonio.

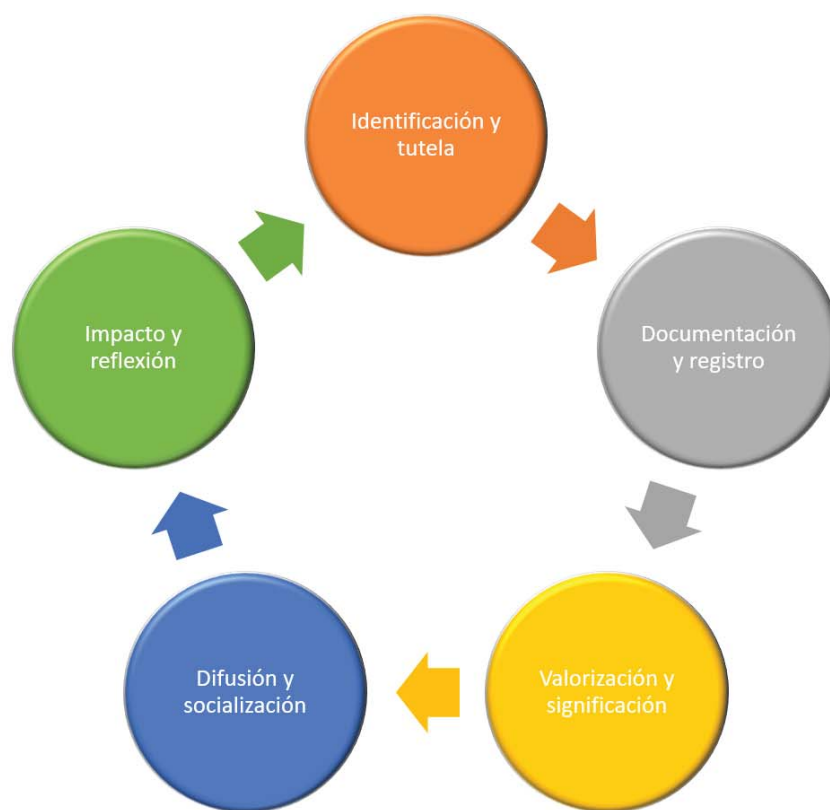


Figura 2. Ciclo completo de la cadena de valor de la investigación científica del patrimonio.

Aportación de las geociencias y la geocronología a la cadena de valor de la investigación científica del patrimonio

En palabras de Renfrew y Bahn (2008), la arqueología se ocupa de todo el espectro de la experiencia humana, y por tanto de su patrimonio cultural y natural. Esto hace de ella una disciplina fascinante a la vez que compleja. Si nos fijamos en la gran mayoría de los estudios en el ámbito de la contextualización del patrimonio, nos damos cuenta de que estos se centran en comprender su línea de tiempo, ya sea desde una vertiente de conocimiento de su pasado (arqueometría) o de su futuro (conservación).

Si nos centramos en el pasado (arqueometría) y nos fijamos en una línea de tiempo (figura 3) que ilustre el periodo en que los humanos hemos ido generando el patrimonio cultural, observamos que la mayor parte de esta línea está ocupada por periodos en los que la documentación y registro de la información la encontramos de forma indirecta, mediante la interpretación de datos obtenidos de múltiples disciplinas; de ahí la complejidad y, como consecuencia, la transdisciplinariedad desde la que se deben abordar este tipo de estudios.

Está claro que, como indica Pollard (1995: 242-247), la arqueología debe usar diversas técnicas y métodos desarrollados para otras disciplinas, de la A a la Z –desde la arquitectura hasta la zoología–. Asimismo, la ciencia de la conservación del patrimonio debe hacerlo en la misma medida e instaurarse la transdisciplinariedad como elemento necesario en cualquier abordaje, ya sea tanto en conservación preventiva como en curativa.

Reflexionando a partir de los trabajos sobre temas de patrimonio, nos daremos cuenta que la tendencia en arqueología es abordar la problemática pasada y futura simultáneamente –en entender, de una u otra forma, la línea del tiempo (Gould, 1987)–, de manera que se incluyan en todos los proyectos de arqueología temáticas relacionadas con la arqueometría para la interpretación del pasado y planes de conservación de los materiales y hallazgos encontrados. Volvemos, pues, a poner de manifiesto la importancia de la transdisciplinariedad y que esta nos lleva a nuevas vías de investigación que ayudarán a entender el patrimonio desde un punto de vista holístico.

Las geociencias, en este escenario, nos ofrecen un amplio rango de competencias, conocimientos y herramientas instrumentales relacionados con los materiales. Entre ellas, las técnicas de datación que aborda la geocronología. Esta es una disciplina de conocimiento que está a la vanguardia de los retos y desafíos técnicos que se vienen produciendo en este campo. En este ámbito se han desarrollado alternativas a la datación por radiocarbono, como la luminiscencia ópticamente estimulada (OSL), la termoluminiscencia (TL), la resonancia paramagnética electrónica (ESR) o los núclidos cosmogénicos. Todas están desarrollando nuevas aplicaciones tanto para la datación de eventos como para comprender procesos geológicos como erupciones volcánicas, procesos sedimentarios y deslizamientos de tierra, e, incluso, para propósitos arqueométricos. Es por ello que queremos documentar el papel de las geociencias y la geocronología en el estudio del patrimonio.

Este marco de transdisciplinariedad en arqueometría y conservación está haciendo que surjan centros específicos a nivel nacional, como el Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) como Infraestructura Científica Técnica y Singular (ICTS), y que se unan centros de carácter internacional en redes de infraestructuras para dar cobertura a esa transdisciplinariedad gracias a proyectos como E-RIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science) e IPERION HS (Integrating Platforms for the European Research Infrastructure ON Heritage Science). Estos nacen como continuación de proyectos previos para constituir infraestructuras europeas para

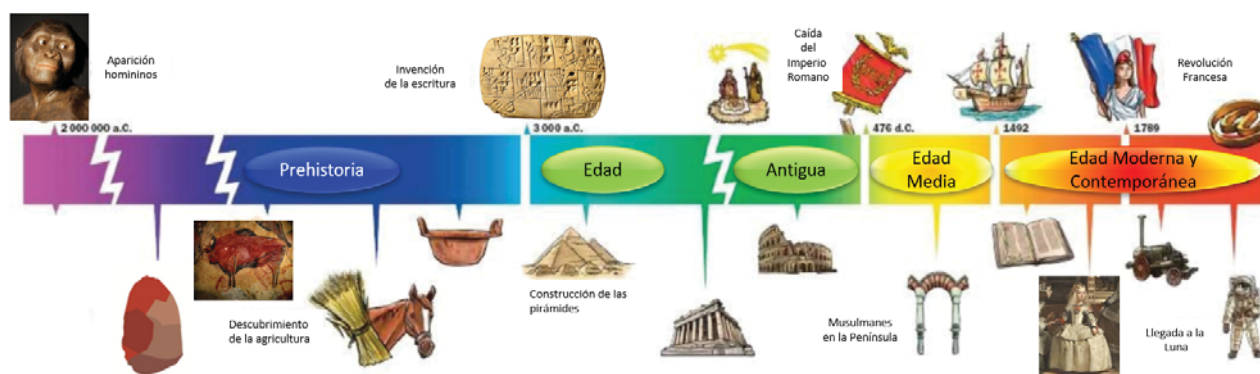


Figura 3. Representación de la línea del tiempo, desde la prehistoria e inicio de la evolución humana hasta la edad contemporánea.

la investigación del patrimonio y que actualmente están queriendo desarrollar los denominados servicios de datación universal, con diferentes finalidades en función de la pregunta a responder.

A continuación se presentan aquellas líneas de trabajo principales de geocronología cuya aplicación está vinculada al conocimiento del patrimonio cultural y natural.

Análisis isotópico y elementos traza: procedencia y autenticidad

Sirven para determinar la procedencia de un elemento importante en estudios arqueométricos. En muchos casos la tipología del objeto no es suficiente para indicar la procedencia o autenticidad de este, ya que los humanos, desde los más remotos tiempos, hemos copiado e imitado sistemáticamente objetos, ya sea por motivos estéticos, de utilidad o falsificación. Por tanto, una de las problemáticas más comunes en arqueología, con elementos descontextualizados o en casos con contexto, es el conocer la procedencia de los materiales y su autenticidad. La determinación por parte de expertos basada tan solo en el estilismo de las piezas puede llevar a errores, pero la información mineralógica y química ofrece métodos de diferenciación y establecimiento de grupos de referencia.

Actualmente, por ejemplo, el análisis de isótopos es uno de los métodos más exitosos para establecer el origen geográfico del plomo presente en metales antiguos y otros materiales, para los cuales se utilizan minerales que contienen plomo en su fabricación; por ejemplo, pigmentos, vidrio, esmalte y pintura.

Este método de procedencia se basa en comparaciones de tres relaciones de isótopos de plomo en materiales con los datos de isótopos de plomo disponibles para depósitos de mineral (Stos-Gale, Houghton y Speakman, 1995: 407-415; Gale y Stos-Gale, 2000: 503-584). Existen algunas bases de datos publicadas sobre ello y de gran utilidad para objetos arqueológicos.

Los índices de isótopos de plomo para las comparaciones deben medirse con mucha precisión –con un error general de $<0,1\%$ –. Actualmente solo hay dos técnicas disponibles que pueden proporcionar esta precisión e intercomparabilidad total: espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS) y espectrometría de masas de plasma acoplado por inducción multicolector (MC-ICP-MS) (Baker, Stos y Waight, 2006: 45-56).

Además de estos isótopos, cuando los depósitos en los que se encuentran las piezas son coetáneos o se quiere determinar procedencias de materias primas, la discriminación se afina empleando la identificación de elementos composicionales minoritarios, elementos traza o ultratrazas; esto se emplea para estudios metalúrgicos (Benvenuti *et al.*, 2013: 479-506), para la caracterización geoquímica de materias primas líticas (Tarriño y Terradas, 2013: 439-452; Olofsson y Rodushkin, 2011: 1142-1170) y para la autenticación de cristales o determinar diferentes tipos de producción de cristal (Degryse, Henderson y Hodgins, 2009: 200; Henderson, 2013: 352).

Datación mediante OSL (*Optically Stimulated Luminescence*)

El C14 es una de las técnicas más conocidas en el estudio del patrimonio, ya que se ha empleado en numerosas ocasiones para autenticar piezas o determinar la edad de determinados objetos arqueológicos. De hecho hay que tener presente que el impacto de la técnica de la datación por radiocarbono la ha convertido en uno de los descubrimientos más significativos en relación al estudio del patrimonio y la comprensión que el hombre tiene de su presente y de su pasado. Si bien tiene limitaciones, tales como que su uso debe centrarse en materiales orgánicos y la imposibilidad de datar más allá de los 50 000 años.

La problemática antes descrita queda resuelta con la técnica de OSL y sucesora de la termoluminiscencia (TL), ya que permite obtener dataciones más atrás en el tiempo. Y además emplea dos de los materiales que abundan en muchos sedimentos.

La datación por OSL se basa en el principio de medición de carga «atrapada» dentro de minerales de silicato, como el cuarzo y el feldespato, y permite llegar de forma estándar hasta los 200 000 años, siendo aplicable a muestras más antiguas mediante lo que se conoce como metodologías *long-range*. Se trata de un método del grupo de los paleodosimétricos, ya que se basa en la detección y cuantificación de los efectos de la radiactividad natural sobre muestras geológicas y arqueológicas.

Las medidas por OSL permiten determinar la cantidad de tiempo transcurrido desde que los granos de cuarzo o feldespato fueron expuestos a la luz solar por última vez (Aitken, 1985, 1998) o, en el caso del TL, cuando fueron calentados por última vez. Una y otra técnica difieren en que la primera la podemos aplicar en numerosos ambientes sedimentarios y se dispone de gran cantidad de material para datar, ya que se data el sedimento del sitio; y en la segunda se data el objeto de forma directa, pero se trata de una técnica destructiva no aplicable en todos los casos (figura 4).

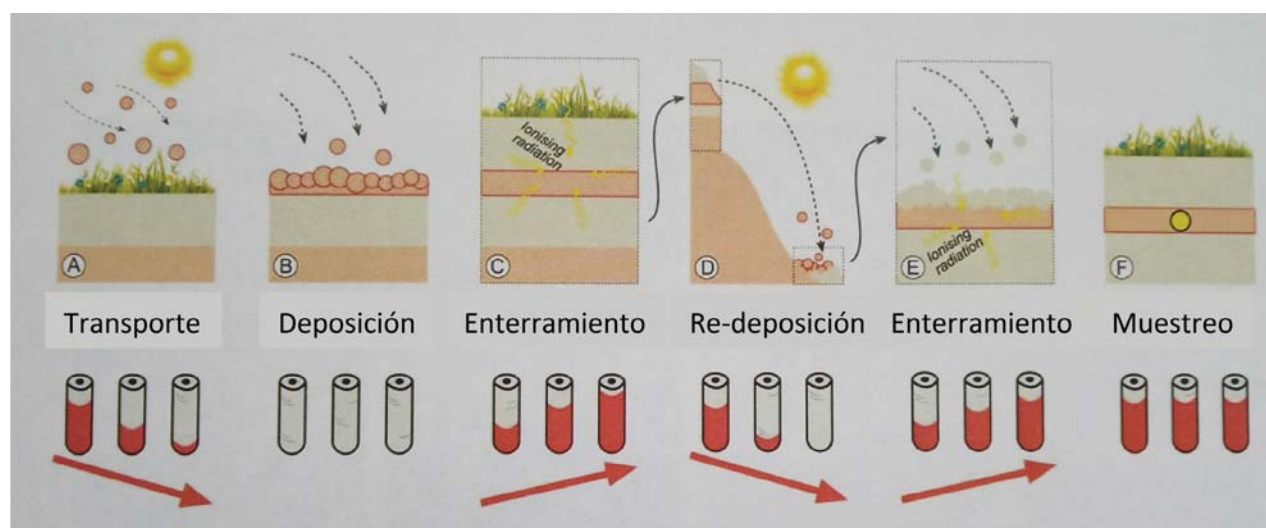


Figura 4. Acumulación y liberación de carga «atrapada» en los granos de mineral (modificado de Duller, 2008: 44). a) Durante el transporte los granos presentes en los sedimentos pierden la carga «atrapada» debido a la energía del sol. b) En el momento de la deposición la carga «atrapada» se ha liberado completamente, por lo que podríamos indicar, empleando el símil de una pila, que la batería está vacía y que los granos de mineral no tienen carga. c) Durante el enterramiento los granos de mineral comienzan de nuevo a cargarse, ya que la radiación ionizante natural va haciendo que vuelva a cargarse. d) y e) El proceso puede repetirse en numerosas ocasiones en escala de tiempo geológica dependiendo de donde se encuentren los sedimentos. f) El muestreo se realiza con tubos opacos para evitar que las cargas sean expuestas a luz solar y se pierda la carga, ya que es esta, en forma de luminiscencia, la que se va a «leer» en el laboratorio tras un proceso laborioso y específico de preparación de muestras que evita que la carga atrapada se pierda y pueda ser leída en los lectores de luminiscencia.

El OSL es aplicable en numerosos ambientes sedimentarios, eólicos, de costa, fluviales, glaciales y lacustres, lo que permite analizar gran cantidad de situaciones y dar información sobre procesos de formación y de superficie (Rhodes, 2011: 461-488; Roberts *et al.*, 2015: 41-60), de datación indirecta de fósiles (Jacobs *et al.*, 2008: 1808-1820) o piezas arqueológicas de madera atribuidas a neandertales y con una antigüedad de unos 90 000 años (Ríos-Garaizar *et al.*, 2018: 1-15) (figura 5).

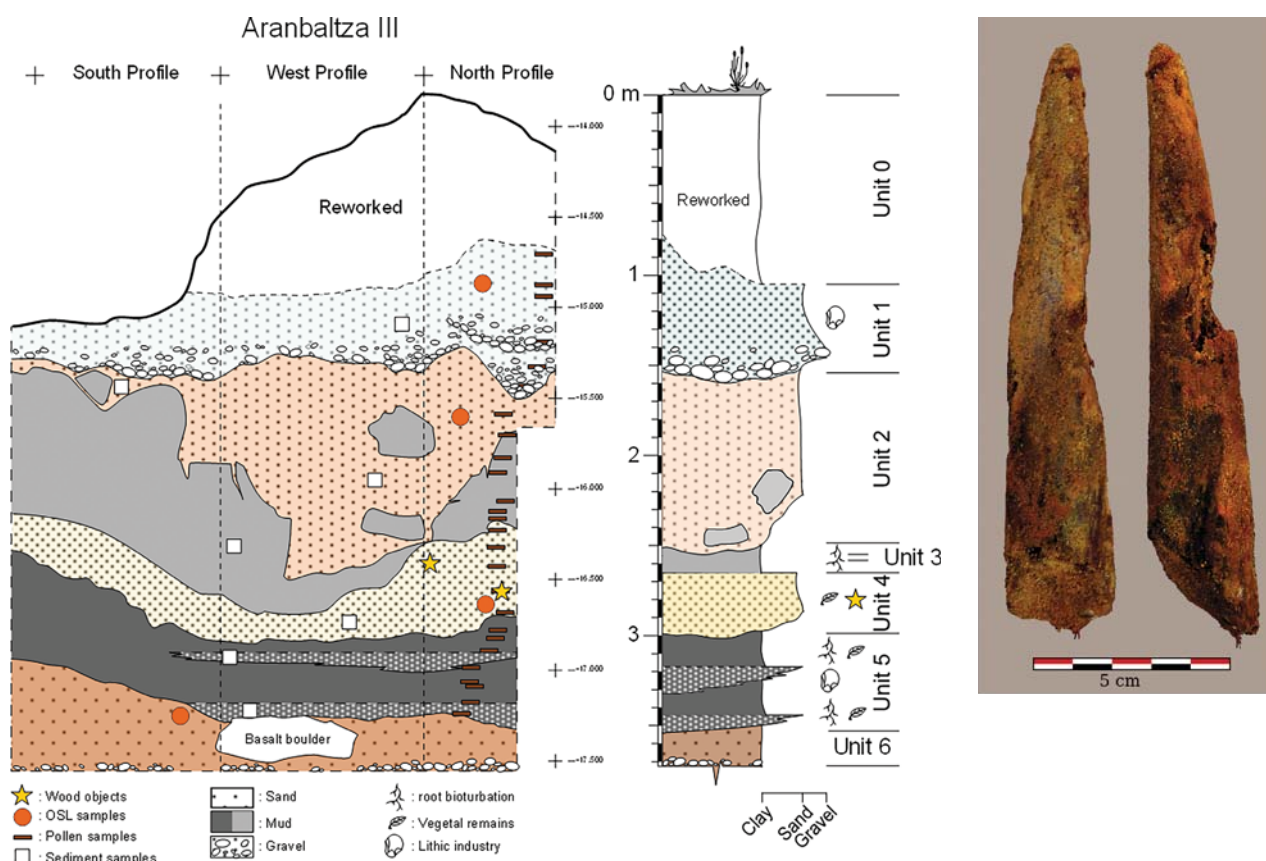


Figura 5. Litoestratigrafía y columna estratigráfica de Aranbaltza III. En la imagen se observa la zona de localización de utensilios de madera, la datación de muestras por OSL, las muestras de pólenes y la pieza a la que se ha atribuido la edad de 90 000 años (Ríos-Garaizar et al., 2018: 1-15).

En esta técnica, al ser aplicable al sedimento, no es necesaria la datación directa de la pieza; lo que hace es contextualizar la misma en una estratigrafía con cronologías que definen su antigüedad.

Otro tipo de aplicación permitir reconstruir la historia de edificios antiguos y murallas históricas mediante el empleo de la técnica sobre los morteros de cal (Sanjurjo-Sánchez, y Blanco, 2016). Ejemplo de ello es su utilización en el estudio de los ladrillos de la cúpula y una pared de la basílica románica de San Martín de Foz y en la restauración de morteros de cal de las antiguas murallas de la ciudad de Santiago de Compostela. Además, puede ser útil para reconstruir y ubicar estructuras urbanas, como las antiguas murallas de una ciudad, y puede permitir localizar el área máxima alcanzada por la primera muralla medieval en un lado de la ciudad de Santiago de Compostela (España). Además, estudios similares en otras zonas de la ciudad podrían permitir reconstruir una ubicación más completa de los primeros muros.

La técnica de OSL, en relación a los materiales, la antigüedad y la respuesta a responder, puede aplicar diversos métodos, entre ellos los conocidos como métodos *long-range*, que incluyen variantes de datación que pueden permitir en según qué casos ir más atrás en el tiempo –hasta casi un millón de años–. Algunas de ellas son: TT-OSL (*Thermically Transferred Optically Stimulated Luminiscence*), pIR-IRSL (*Post-Infrared - Infrared Stimulated Luminiscence*), MET-pIR-IRSL (*Multielevated Tem-Post-Infrared Stimulated Luminiscence*), VSL (*Violet Stimulated Luminiscence*) e IR-RF (*Infrared-Radiofluorescence*).

Datación por resonancia paramagnética electrónica

La resonancia paramagnética electrónica (*electron spin resonance*) es, como en el caso de la luminiscencia, un método paleodosimétrico, pero, en este caso, además de poder realizar la datación de muestras geológicas o arqueológicas, puede llevarse a cabo sobre muestras paleontológicas.

Esta técnica se empleó por vez primera como herramienta geocronológica en los años setenta (Ikeya, 1975: 48-50). Desde entonces se han desarrollado varias aplicaciones sobre otros materiales, convirtiéndolo en un método de referencia para datar materiales cuaternarios –hasta los últimos 2,6 millones de años– (Grün, 1989: 65-109; Ikeya, 1993; Duval, Falguères y Bahain, 2012: 412-417).

La técnica de ESR permite medir el comportamiento paramagnético de los materiales y tiene múltiples aplicaciones en diferentes áreas, como la química, la medicina, la física, la arqueología, la geología, etc.

En el caso específico del uso de ESR para materiales arqueológicos, paleontológicos y geológicos, el método se basa en que los materiales sometidos a radiación natural pueden adquirir un comportamiento paramagnético. En esta técnica el material se comporta como un dosímetro, que es capaz de detectarse porque quedan cargas «atrapadas» en los defectos cristalinos del mineral que forman los llamados «centros paramagnéticos», que generan una señal detectable por espectrometría ESR. La intensidad de la señal es directamente proporcional a la cantidad de centros presentes en la muestra analizada (Duval, 2013: 96-103).

Sus aplicaciones son variadas. Cabe destacar la datación, por ejemplo, en dientes fósiles, que nos indica la muerte y enterramiento de la pieza dental (Torres *et al.*, 2010: 680-705; Duval *et al.*, 2011: 7-24) o de cerámicas y sílex calentados (Porat y Schwarcz, 1991: 203-212; Bartoll e Ikeya, 1997: 981-984), entre otros.

Para ilustrar la datación de ESR y de cómo los fósiles «hablan», se ha elegido un ejemplo de los yacimientos de Atapuerca, Patrimonio Mundial de la UNESCO. Gran Dolina es un yacimiento excepcional con una característica relevante: en 1994 se encontraron restos fósiles en el nivel de TD6 que permitieron definir una nueva especie de homínido –*Homo antecessor*–, con una antigüedad estimada en base a técnicas de bioestadigrafía –a partir de microfauna– y cronoestadigrafía –a partir del paleomagnetismo– en unos 772-942 ka, lo que implicó documentar el más antiguo homínido identificado en el oeste de Europa y sugerido como especie antecesora de *Homo neanderthalensis* y *Homo sapiens* (Bermúdez de Castro *et al.*, 1997: 1392-1395; 2017: 157-171).

Inicialmente la técnica de ESR para la datación de fósiles es destructiva y es por ello que las dataciones directas sobre dientes fósiles suelen realizarse sobre fauna, como dientes de caballo, pero no sobre restos de homínidos. En el caso que se va a ilustrar, la combinación de la técnica de ESR con espectrometría de masas de alta resolución y ablación láser ha hecho que la técnica de ESR combinada sea semidestructiva y, por tanto, ha permitido la selección de un fragmento dental de entre los más de 160 restos encontrados para la datación directa de uno de los dientes de *Homo antecessor* del yacimiento (figura 6).

La técnica consistió en emplear la técnica de ESR sobre el esmalte dental y combinarlo con ablación láser y análisis de series de uranio empleando un sistema de espectrometría de masas multicollector (MC-ICPMS). Gracias a esta técnica combinada se obtuvieron fechas solapadas entre 767 000 y 799 000 años para el esmalte, lo que corroboraba la antigüedad del fósil y que es consistente con análisis previos mediante otras técnicas cronológicas.

Este hallazgo, así como la edad de *Homo naledi* (Dirks *et al.*, 2017: 1-59), ha utilizado técnicas combinadas para tener una lectura lo más fidedigna posible de los yacimientos y por tanto para

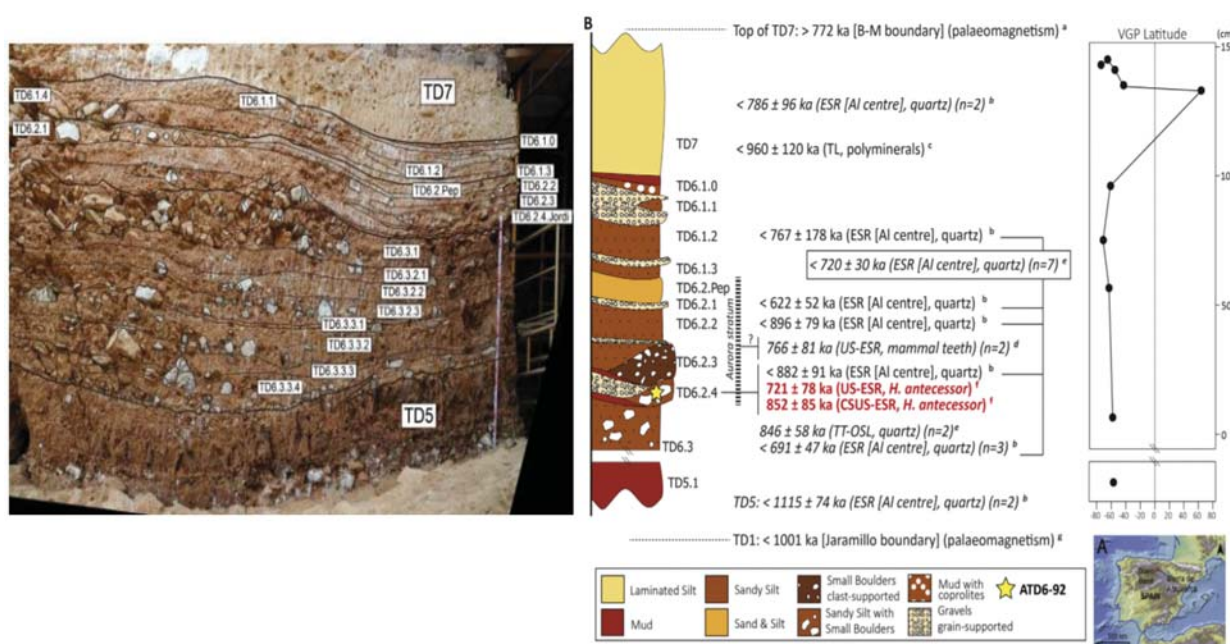


Figura 6. Imagen tomada del artículo de Duval *et al.*, 2018: 120-137. Representación de la estratigrafía del yacimiento, la cronoes-tratigrafía y la posición de la muestra ATD6-92 de Atapuerca dentro de la unidad TD6 donde se localizó. En cursivas aparecen las edades estimadas por diversas técnicas: a) Parés *et al.*, 2013: 4586-4595. b) Moreno *et al.*, 2015: 535-540. c) Berger *et al.*, 2008: 1-35. d) Falguères *et al.*, 1999: 343-352. e) Arnold *et al.*, 2015: 167-190. f) Duval *et al.*, 2018: 120-137. g) Parés *et al.*, 2018: 1-16.

la interpretación de los mismos y de los procesos de evolución humana, movimientos poblaciona-les y culturales.

Datación por series del uranio

En el apartado anterior ya se ha hecho referencia al equipamiento con el que se realiza la medida: se trata de un MC-ICPMS. Se ha optado por seleccionar un ejemplo vinculado al origen del simbo-lismo gráfico porque la certificación cronológica del arte prehistórico es un tema de importancia, que no puede dejarse solo al estilo o apariencia paleolítica de las pinturas o grabados rupestres (García-Díez y Ochoa, 2013: 611-634).

La peritación de los conjuntos parietales en muchos casos no es baladí, y tras el descubri-miento de grandes conjuntos también surgió la falsificación de otros de ellos. Esto último, la difi-cultad de contextualización cronológica de algunos conjuntos y la búsqueda de respuesta a uno de los temas centrales, como es el origen del simbolismo, ha hecho que se desarrollen estrategias y técnicas de datación absoluta para solventar estas cuestiones.

La técnica de series de uranio se fundamenta en las leyes físicas que rigen la desintegración radiactiva de los isótopos que forman las cadenas radiactivas naturales (figura 7). Son tres los isóto-pos naturales con vida media muy alta ($T_{1/2} = 7,10E8$ años). Estos son ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th .

¿En qué consiste la datación por series del uranio? En conocer la relación existente entre el uranio y el torio en una muestra. En el caso que se va a exponer se trata de ver esta relación en espeleotemas –formaciones de carbonatos formadas en cavidades– para determinar cuándo se for-maron. Esto se debe a que en la superficie de la tierra el uranio se encuentra principalmente en estado de oxidación U(VI) y puede estar asociado a carbonatos en forma de ión uranilo, soluble en medio acuoso. El torio, sin embargo, se encuentra en estado de oxidación Th(IV) y es insoluble

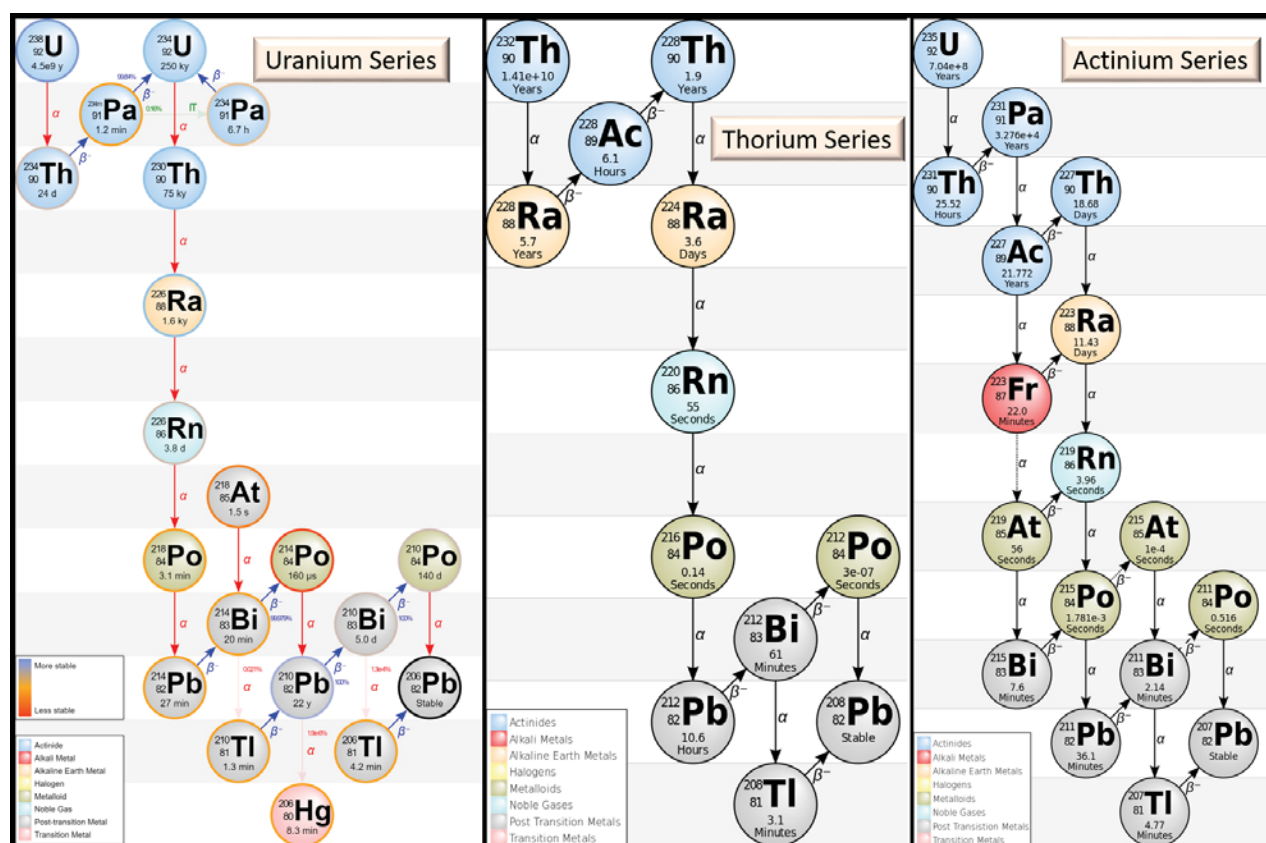


Figura 7. Cadenas radiactivas y vida media de los isótopos que se producen a lo largo del decaimiento natural.

en agua (Ivanovich y Harmon, 1992; Hoffmann, 2013: 87-92). Como consecuencia, las aguas continentales y marinas contienen uranio disuelto, pero no torio, por lo que el segundo no se incorporará en los carbonatos secundarios que forman espeleotemas, originando en ellos un desequilibrio entre el ^{230}Th y el U, que servirá para poder determinar la relación entre ambos e indicará el tiempo transcurrido desde la formación del mismo.

En el año 2008 comenzó un proyecto para la datación de arte parietal mediante el empleo de la datación de espeleotemas que cubren o sobre los que se encuentra el arte rupestre (Pike *et al.*, 2012: 1409-1413; Hoffmann *et al.*, 2016: 104-119).

Esta técnica permite de manera no destructiva retirar una pequeña parte del espeleotema sobre la pintura –cantidades inferiores a 10 mg de muestra– sin tocarla. Igualmente se puede realizar sobre espeleotemas sobre los que se ha realizado la pintura (figura 8).

Con una cantidad mínima de material se puede analizar en el laboratorio mediante espectrometría de masas multicolelector (MC-ICPMS) la relación entre el U-Th presente, dando como resultado una fecha de datación numérica que indicará, en el caso de que el espeleotema esté por encima, que la pintura se realizó antes de la fecha de formación del espeleotema; por tanto nos daría una edad mínima para la pintura. En el caso de que la pintura se encuentre realizada sobre un espeleotema y a su vez tenga crecimiento de este material calcítico por encima, podría datarse en forma de «bocadillo», dando una fecha entre un máximo –la datación del espeleotema sobre el que se asienta la pintura– y un mínimo.

Los primeros resultados de muestras tomadas sobre pinturas arrojaron resultados que podrían indicar la posibilidad de que los neandertales pudieron estar implicados en la ejecución de algunas de ellas (figura 9) y que la tradición de decorar cuevas se remonta al menos al período Auriñaciense, con edades mínimas de 40 800 años para un disco rojo, 37 300 años para una plantilla de mano y 35 600 años para un símbolo claviforme.

Posteriormente, y tras la obtención de nuevas fechas en otras cavidades, Hoffmann *et al.* (2018: 912-915) pusieron de manifiesto en la cueva de La Pasiega (Cantabria), Maltravieso (Extremadura) y Ardales (Andalucía) la existencia de pinturas datadas por esta técnica en al menos 64 800 años, lo que tiene importantes implicaciones en la interpretación de los orígenes del simbolismo, ya que adelanta en 20 000 las primeras dataciones y abre el debate científico. ¿Quiénes pintaron las cuevas? Hasta donde sabemos por registro fósil, los *Homo sapiens* no se encontraban en la península Ibérica en fechas de hace 65 000 años. Por tanto, la autoría de estas obras debe asignarse al menos a *Homo neanderthalensis*.



Figura 8. Imagen tomada del artículo de Hoffmann *et al.*, 2018: 912-915. Detalle de la zona muestreada y su localización sobre la pintura rupestre.

Y para terminar... el papel de la geocronología

Las geociencias y la geocronología como parte de la investigación del patrimonio cumplen con los tres objetivos expuestos inicialmente en el texto, como son aumentar nuestro conocimiento y comprensión del patrimonio, agregar valor cultural y ayudar a gestionar de forma sostenible el patrimonio.

Sobre todo aumenta nuestra comprensión del patrimonio, del tangible y del intangible, ya que nos ayuda a conocer procedencias de materiales, a datar patrimonio construido y a entender los procesos de cambio que se producen, a datar fósiles y/o contextualizarlos, y a datar espeleotemas que nos sirven a su vez para poner fecha a las pinturas de los primeros grupos humanos. Así, la geocronología nos ayuda a escribir la historia no escrita de nuestro pasado y cómo mejorar nuestro futuro y el del patrimonio que vamos dejando a nuestro paso.

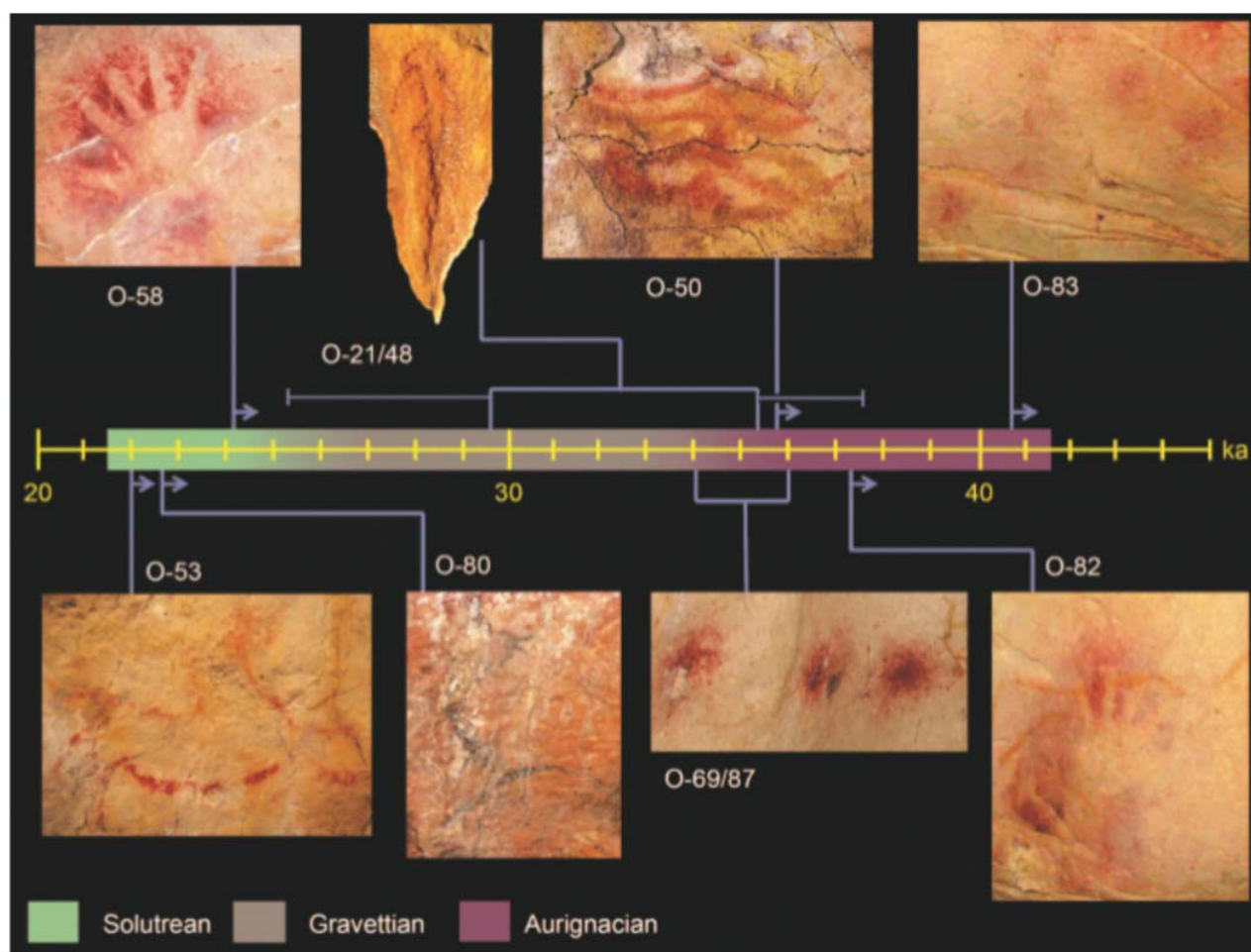


Figura 9. Imagen tomada del artículo de Hoffmann *et al.*, 2016: 104-119. Cronologías obtenidas para las muestras tomadas en: O-58. Mano en negativo de la cueva de El Castillo (Puente Viesgo, Cantabria); O-21/48. Antropomorfos en la cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias); O-50. Claviformes y O-53. Caballo de la cueva de Altamira (Santillana del Mar, Cantabria); O-83. Discos, O-80. Símbolo, O-69/87. Discos y O-82. Mano en negativo de la cueva de El Castillo (Puente Viesgo, Cantabria).

También nos permite abrir nuevas preguntas sobre temas intangibles y debates científicos de primer orden, como hemos visto a lo largo del trabajo.

Estas técnicas y áreas de investigación fomentan la transdisciplinariedad, enriquecen nuestro patrimonio cultural y aportan a la cadena de valor del patrimonio, tanto en el pasado (arqueometría) como en el futuro (conservación).

Agradecimientos

Agradecer al Museo del Prado y al Instituto de Patrimonio Cultural de España por la celebración de las jornadas de Ciencia y Arte en esta VII edición, y la proyección de tantos trabajos que dan luz a toda la cadena de valor del patrimonio, por darnos la oportunidad de mostrar técnicas y áreas de conocimiento que, a pesar de estar presentes, queremos que lo estén más.

Agradecer a todos los autores que aparecen en esta recopilación de textos y a todo el equipo del CENIEH, especialmente en este caso, a aquellos que participan de una u otra forma en geocronología, por lo aprendido en estos años de todos ellos.

The Role of Geochronology in Heritage Study and its Contextualization

Introduction

The concept of cultural heritage has broadened over time, shifting from meaning the cultural legacy of a person's past maintained to the present day and transmitted to current generations, to including natural heritage since 1972 and intangible heritage since 2003.

Today there are several international documents that consolidate a broad and plural view of cultural heritage, valuing all those significant and testimonial tangible and intangible entities of different cultures, without establishing time, space or thematic limits. They thus consider entities of a traditional, industrial, intangible, contemporary and underwater nature, along with cultural landscapes, as guarantors of an important heritage value. All this means that if we focus on the term “heritage conservation”, the field is very extensive and spans multiple disciplines.

Our cultural heritage is everything that has followed on from the development and diversification of culture and human skillsets. Considering this premise, cultural heritage is our cultural legacy and this and its interpretation take us on a journey that reaches far back in time. The natural heritage, where human activity is developed, has also undergone changes over time that have shaped human activity or been transformed by it.

We are therefore engaged in a journey in time in which its quantification is essential to our understanding

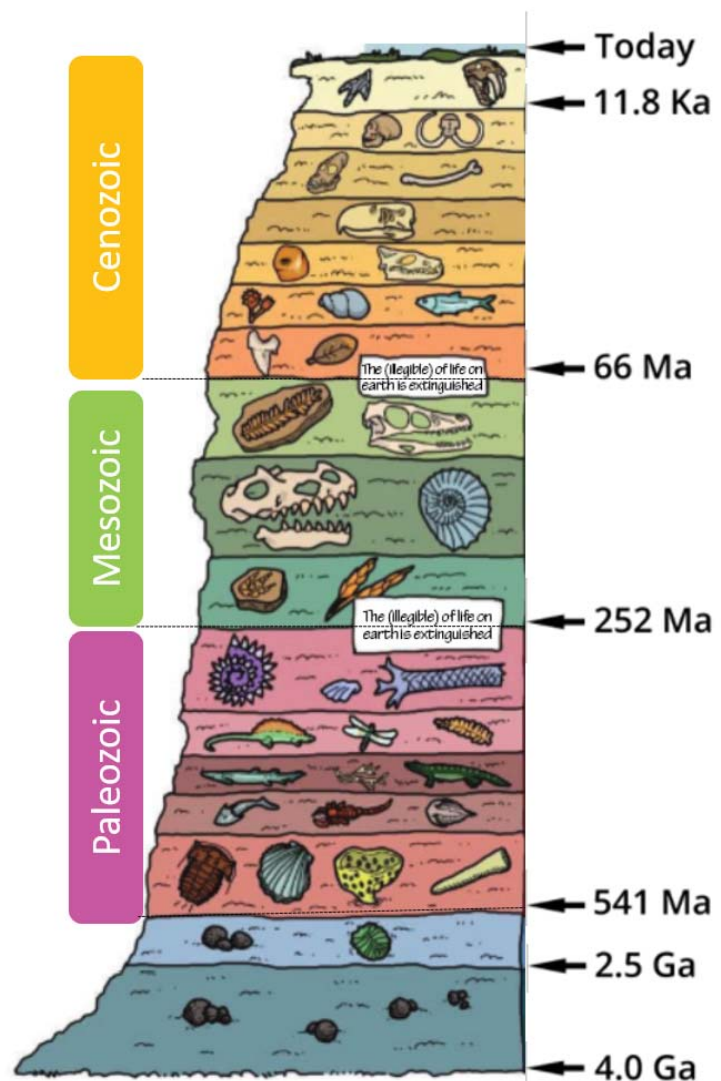


Figure 1. Geochronological units. This type of contextualisation helps frame events in a timeline, with the importance this has for heritage interpretation.

of planetary evolution, the geological processes that shape our very planet and the evolution of man and his cultural legacy (figure 1).

Scientific research linked to the question of when these events happened, in other words, geochronology, is important for gaining a global and contextualised insight that can allow us to understand why or how they occurred. The integration of geological records through dating throws light on the relationships between the Earth's biological (anthropological), climate and morphological components.

Obviously if we talk about geochronology we are referring to tangible heritage. But we are also considering the paleoclimate and intangible concepts that can be interpreted thanks to the results obtained through dating.

Scientific research on cultural heritage

The important objectives to keep in mind are to:

- Increase our knowledge and understanding of tangible heritage.
- Gather information, including physical evidence, to add cultural value to tangible and intangible heritage.
- Help define conditions, limits, risks and potential for sustainable conservation and overall heritage management.

These objectives make scientific heritage research a value chain (figure 2) that highlights the global view Heritage should have.

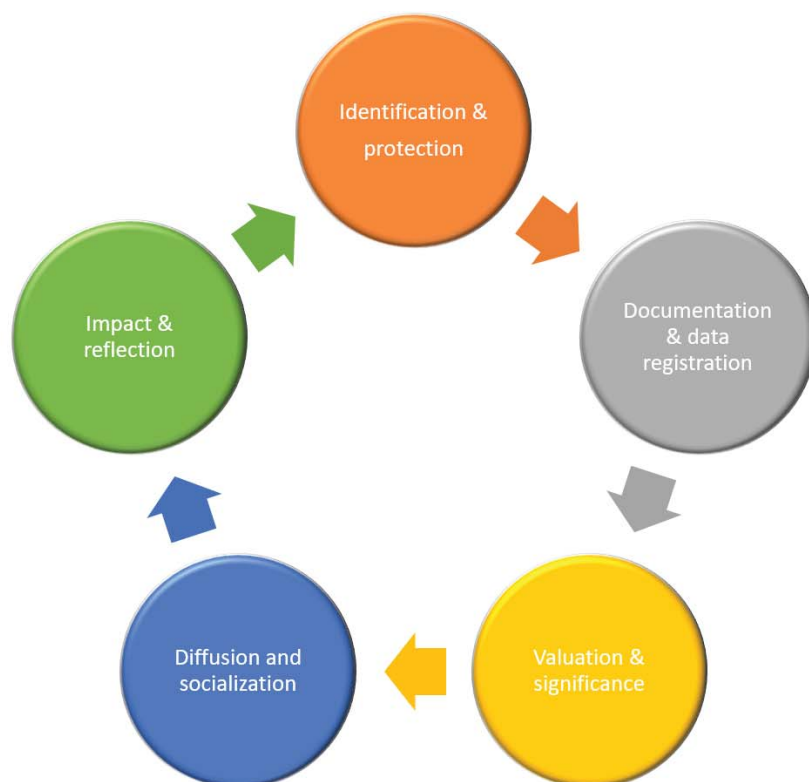


Figure 2. Complete cycle of the value chain of heritage scientific research.

Contribution of the geosciences and geochronology to the value chain of Heritage scientific research

In the words of Renfrew and Bahn (2008), archaeology covers the entire spectrum of human experience and hence its cultural and natural heritage. This makes it a fascinating yet complex discipline. If we look at the vast majority of studies within the field of heritage contextualization, we find that they focus on understanding its timeline, whether from a perspective of knowledge of its past (archaeometry) or future (conservation).

If we focus on the past (archaeometry) and a timeline (figure 3) that illustrates the period in which humans have been producing cultural heritage, we see that most of this line covers periods for when documenting and recording information is done indirectly, through the interpretation of data obtained from multiple disciplines. This explains the complexity and, consequently, transdisciplinarity from which this type of studies must be addressed.

Clearly, as Pollard points out (1995: 242-247), archaeology must leverage a variety of techniques and methods developed for other disciplines, from A to Z – in other words, from architecture to zoology. The science of heritage conservation must also do so to the same extent and transdisciplinarity must be established as a necessary element in any approach, whether preventive or curative conservation.

If we tap insights from work on heritage issues, we realise that the tendency in archaeology is to address past and future problems simultaneously, i.e., to understand the timeline in one way or another (Gould, 1987), so that themes relating to archaeometry are included across all archaeology projects for the interpretation of the past and conservation plans for materials and discoveries found. I would, therefore, once again stress the importance of transdisciplinarity and the fact that it leads to new avenues of research which can help us understand heritage from a holistic perspective.

In this scenario, the geosciences offer a wide range of skillsets, knowledge and instrumental tools related to materials. They include the dating techniques that address geochronology. This is a discipline of knowledge at the cutting-edge of the technical challenges and obstacles occurring in this field. Alternatives to radiocarbon dating have been developed in this area, such as optically stimulated luminescence (OSL), thermoluminescence (TL), electron spin resonance (ESR) and cosmogenic nuclides. All of these are developing new applications both for event dating and for understanding geological processes such as volcanic eruptions, sedimentary processes and landslides, and even for archaeometric purposes. That is why we want to document the role of the geosciences and geochronology in heritage study.

This framework of transdisciplinarity, in archaeometry and conservation, is prompting the emergence of research centres, such as the Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución

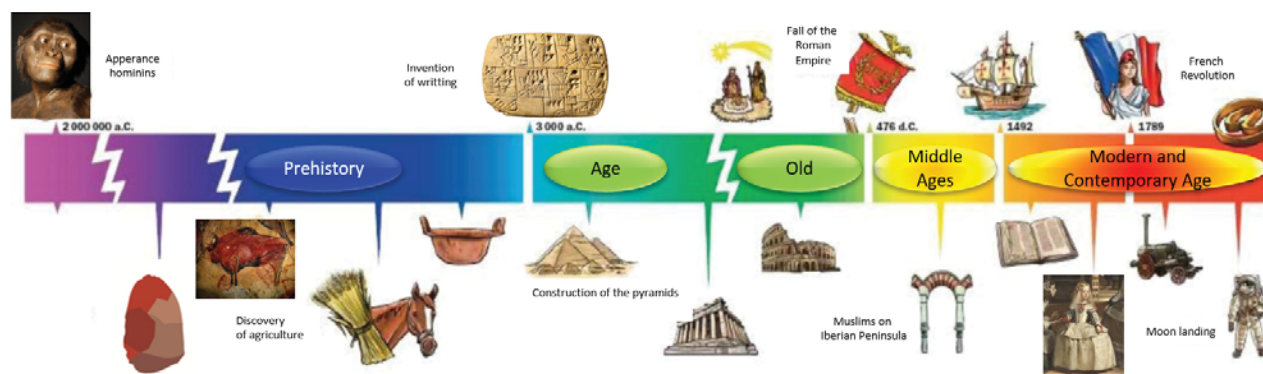


Figure 3. Representation of the timeline from prehistory and the start of human evolution through to the contemporary age.

Humana (CENIEH) as a Singular Scientific and Technical Infrastructure (ICTS), joining with international centres in infrastructure networks to cover this transdisciplinarity, thanks to projects like E-RIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science) and IPERION HS (Integrating Platforms for the European Research Infrastructure ON Heritage Science). They are emerging as a continuation of previous projects to constitute European infrastructures for heritage research and which are currently keen to develop so-called universal dating services, with different purposes depending on the question to be answered.

Below we present the core strands of work in geochronology whose application is related to knowledge of cultural and natural heritage.

Isotopic and trace element analyses: provenance and authenticity

In many cases, the typology of an object is not enough to indicate its provenance or authenticity, since humans have systematically copied and imitated objects throughout the ages, whether for aesthetic, use or forgery purposes. One of the most common problems in archaeology, with decontextualised elements or in cases with context, is therefore to establish the provenance of artefacts and their authenticity. Expert determination based solely on the style of pieces can lead to errors, but mineralogical and chemical information offers methods of differentiation and ways to establish reference groups.

For example, isotope analysis is at present the most successful method of establishing the geographical origin of lead present in ancient metals and other materials, for which minerals containing lead were used in their manufacture, for example: pigments, glass, glaze and paint.

This method of provenancing is based on comparisons of three lead isotope ratios in the artefacts, with the available lead isotope data for ore deposits (Stos-Gale, Houghton, and Speakman, 1995: 407-415; Gale, and Stos-Gale, 2000: 503-584). There are some databases published on this which are very useful for archaeological objects.

The lead isotope ratios for comparisons have to be measured very accurately - with an overall error of <0.1 %. At present there are only two techniques available that can provide this accuracy and total intercomparability: Thermal Ionisation Mass Spectrometry (TIMS) and Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (MC-ICP-MS) (Baker, Stos, and Waight, 2006: 45-56).

In addition to these isotopes, when the deposits in which the artefacts are found are coincidental or when you want to determine the provenance of raw materials, discrimination is fine-tuned using the identification of minority compositional elements, trace elements or ultra-trace elements. This is used for metallurgical studies (Benvenuti *et al.*, 2013: 479-506), for the geochemical characterisation of lithic raw materials (Tarriño, and Terradas, 2013: 439-452; Olofsson, and Rodushkin, 2011: 1142-1170) and to authenticate crystals or determine different types of glass production (Degryse, Henderson, and Hodgins, 2009: 200; Henderson, 2013: 352).

OSL dating (Optically Stimulated Luminescence)

Carbon-14 is one of the best-known techniques in heritage study, having been used many times to authenticate artefacts or ascertain the age of certain archaeological objects. Indeed, it is important to remember that the impact of the carbon dating technique has made it one of the most significant discoveries in relation to heritage study and man's understanding of his present and past. But it has limitations, such as the fact that its use must be focused on organic matter and its inability to date beyond 50 000-62 000 years.

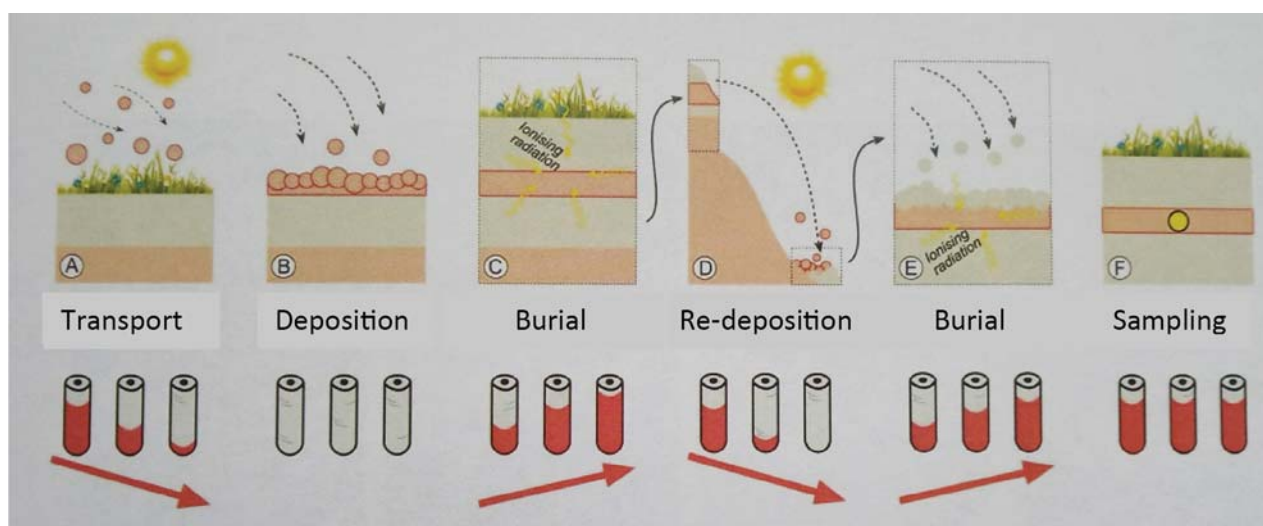


Figure 4. Accumulation and release of a charge “trapped” in ore grains (modification of Duller, 2008: 44). a) During transport the grains present in the sediments lose the “trapped” charge owing to the energy of the sun. b) At the time of deposition the “trapped” charge has been completely released, so we could indicate, employing the simile of a battery, that the battery is empty and the mineral grains are uncharged. c) During burial the mineral grains start to recharge, since the natural ionising radiation causes them to. d) and e) The process can be repeated numerous times in a geological time scale depending on where the sediments are located. f) The sampling is performed with opaque tubes to prevent the charges from being exposed to sunlight and losing their charge, since it is this, in the form of luminescence, that is going to be “read” in the laboratory following a laborious and specific sample-preparation process that prevents the trapped charge from being lost and to be able to be read in the luminescence readers.

These problems are resolved with the OSL, successor of thermoluminescence (TL), since it enables dating further back in time. It also taps two materials that abound in many sediments.

OSL dating is posited on the principle of measuring the charge “trapped” in silicate minerals such as quartz and feldspar and can reach in a standard fashion back 200 000 years. It can also be applied to older samples using what are known as long-range methodologies. It is a method in the paleodosimetric group, since it is based on the detection and quantification of the effects of natural radioactivity on geological and archaeological samples.

OSL measurements make it possible to determine the amount of time that has passed since quartz or feldspar grains were last exposed to sunlight (Aitken, 1985, 1998) or in the case of TL, when they were last heated. The two techniques differ in that we can apply the former in many sedimentary environments and there is a large amount of material available for dating, since the sediment from the site is dated. The latter dates the artefact directly, but is a destructive technique not applicable in all cases (figure 4).

OSL can be used across many sedimentary, wind, coastal, river, glacial or lake settings, enabling a large number of situations to be analysed and providing information on formation and surface processes (Rhodes, 2011: 461-488; Roberts *et al.*, 2015: 41-60), indirect fossil dating (Jacobs *et al.*, 2008: 1808-1820) and the dating of wooden archaeological artefacts attributed to Neanderthals and some 90 000 years old (Ríos-Garaizar *et al.*, 2018: 1-15) (figure 5).

In this technique, as it is applicable to sediment, direct dating of the artefact is not necessary; what it does is contextualise it in a stratigraphy with timelines that define its age.

Another type of application makes it possible to reconstruct the history of ancient buildings and historic walls by using the technique on lime mortars (Sanjurjo-Sánchez, and Blanco, 2016). Examples include its use in the study of the bricks of the dome and a wall of the Romanesque

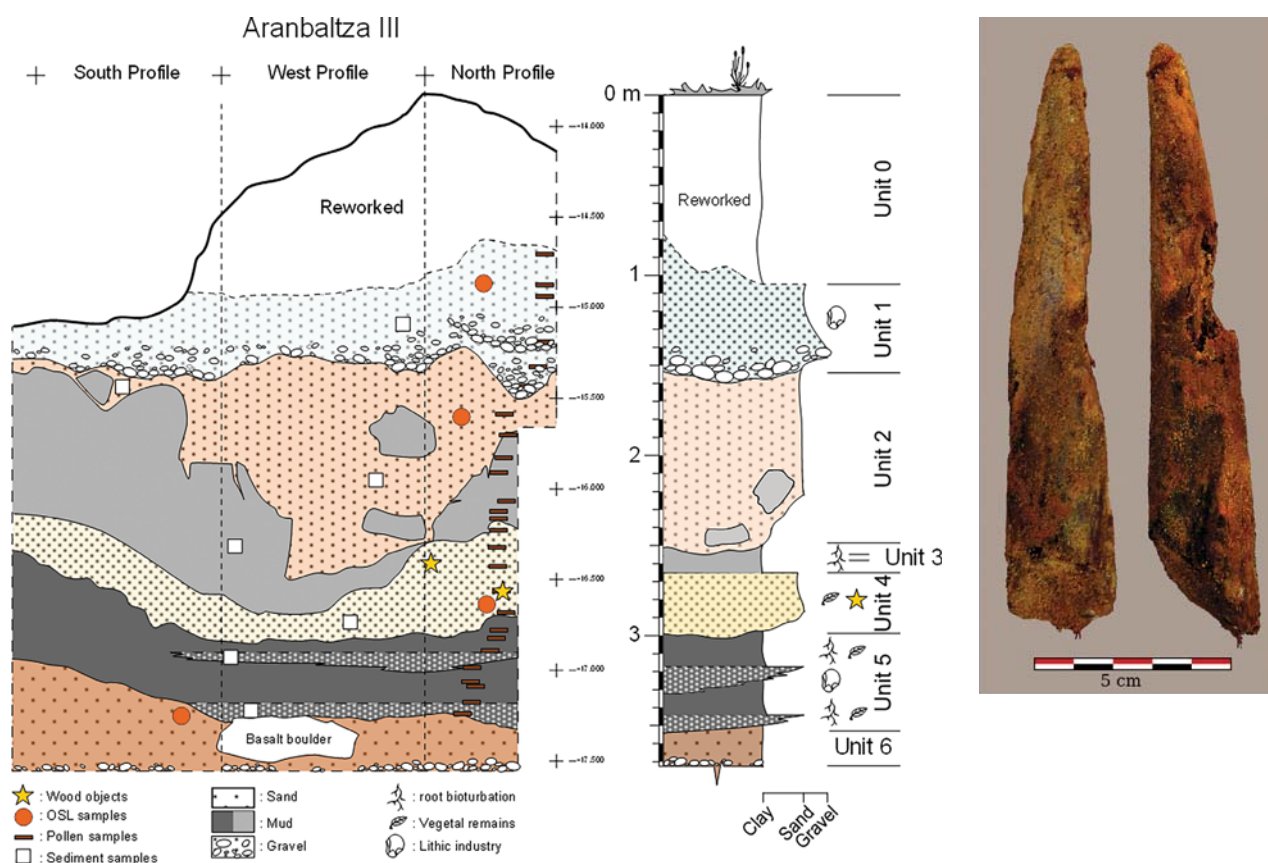


Figure 5. Lithostatigraphic panel and stratigraphic column of Aranbaltza III. The image shows the area where wooden utensils were located, OSL sample dating, the pollen samples and the artefact attributed an age of 90,000 years (Ríos-Garaizar *et al.*, 2018:1-15).

basilica of San Martiño de Foz and the restoration of lime mortars from the old walls of the city of Santiago de Compostela. It can also be used to reconstruct and position urban structures, such as old city walls, and makes it possible to locate the maximum area reached by the first medieval wall on one side of the city of Santiago de Compostela (Spain). In addition, similar studies in other parts of the city could make it possible to rebuild a more comprehensive position of the first walls.

In relation to materials, age and the answer to provide, OSL can apply various methods, including those known as long-range ones, which include dating variants that can, depending on the case, go further back in time, to nearly 1 000 000 years. They include: TT-OSL (thermally transferred optically stimulated luminescence), pIR-IRSL (post-IR infrared stimulated luminescence), MET-pIR-IRSL (multi-elevated-temperature post-IR infrared stimulated luminescence), VSL (violet stimulated luminescence) and IR-RF (infrared radiofluorescence).

ESR dating (Electron Spin Resonance)

ESR dating is, as in the case of luminescence, a paleodosimetric method, but in this case, in addition to being able to date geological and archaeological samples, it can be performed on paleontological samples.

This technique was first used as a geochronological tool in the 1970s (Ikeya, 1975: 48-50). Since then, several applications have been developed on other materials, making it a benchmark

method for dating quaternary materials up to the last 2.6 million years (Grün, 1989: 65-109; Ikeya, 1993; Duval, Falguères, and Bahain, 2012: 412-417).

The ESR technique makes it possible to measure the paramagnetic behaviour of materials and has multiple applications across different areas such as chemistry, medicine, physics, archaeology, geology, etc.

In the specific case of the use of ESR for archaeological, paleontological and geological artefacts, the method is based on the fact that materials subjected to natural radiation can acquire paramagnetic behaviour. In this technique, the material behaves as a dosimeter, capable of being detected because there are charges “trapped” in the crystal defects of the mineral that form what are known as “paramagnetic centres”, which produce a signal that can be detected through ESR spectrometry. Signal strength is directly proportional to the number of centres present in the analysed sample (Duval, 2013: 96-103).

Its applications are varied. Of note is dating in fossil teeth, for example, where it indicates the death and burial of the tooth (Torres *et al.*, 2010: 680-705; Duval *et al.*, 2011: 7-24) or burned ceramics and flint (Porat, and Schwarcz, 1991: 203-212; Bartoll, and Ikeya, 1997: 981-984), among others.

I have chosen an example from the World Heritage site of Atapuerca to illustrate ESR dating and the way fossils can “speak” to us. Gran Dolina is an exceptional site with one important feature: in 1994, fossil remains were found at level TD6 which enabled a new species of hominin to be defined, *Homo antecessor*, with an estimated age of around 772 000-942 000 years based on biostratigraphy (from microfauna) and chronostratigraphy (from paleomagnetism) techniques. The work involved documenting the oldest hominin identified in western Europe and suggested as a precursor species of *Homo neanderthalensis* and *Homo sapiens* (Bermúdez de Castro *et al.*, 1997: 1392-1395; 2017: 157-171).

Initially, the ESR technique for fossil dating is destructive, which is why direct dating on fossil teeth is usually performed on fauna, such as horse teeth, but not hominin remains. In the case illustrated here, the combination of the ESR technique with high-resolution mass spectrometry and laser ablation made the combined ESR technique semi-destructive and therefore allowed the selection of dental fragment from among the more than 160 remains found, for the direct dating of one of the *H. antecessor* teeth from the site (figure 6).

It involved using the ESR technique on the tooth enamel and combining it with laser ablation and a uranium-series analysis using a multicollector-inductively coupled plasma mass spectrometer (MC-ICPMS) system. This combined technique produced overlapping dates of between 767 000 and 799 000 years for the enamel, which corroborated the age of the fossil and was consistent with previous analyses using other chronological techniques.

This finding, as well as the age of *Homo naledi* (Dirks *et al.*, 2017: 1-59), leveraged combined techniques to give the most reliable possible reading of the site and, therefore, its interpretation and the processes of human evolution, population and cultural movements.

U-series dating

In the previous section, I referenced the equipment the measurement was taken with, i.e., an MC-ICPMS device. We chose to select an example related to the origin of graphic symbolism because the chronological certification of prehistoric art is an important issue which cannot be left solely up to the palaeolithic style or appearance of cave paintings or engravings (García-Díez, and Ochoa, 2013: 611-634).

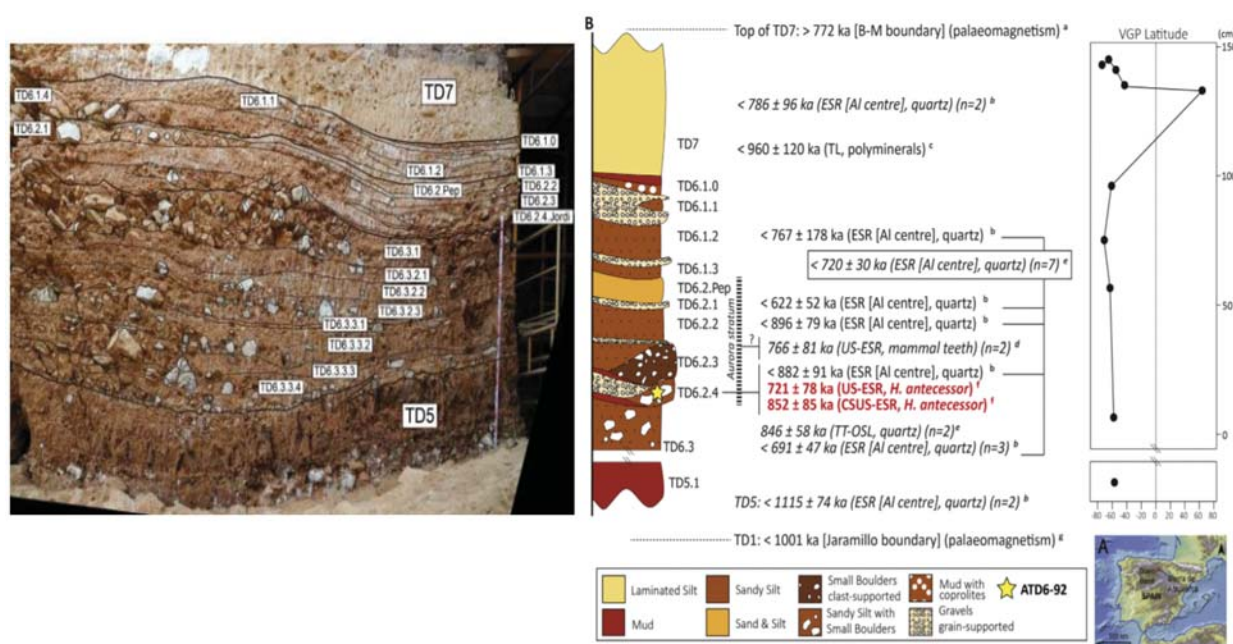


Figure 6. Image taken from the paper by Duval *et al.*, 2018: 120-137. Representation of the stratigraphy of the site, the chronostratigraphy and the position of the Atapuerca ATD6-92 sample within the TD6 unit where it was located. The estimated ages using various techniques appear in italics: a) Parés *et al.*, 2013: 4586-4595. b) Moreno *et al.*, 2015: 535-540. c) Berger *et al.*, 2008: 1-35. d) Falguères *et al.* 1999: 343-352. e) Arnold *et al.*, 2015: 167-190. f) Duval *et al.*, 2018: 120-137. g) Parés *et al.*, 2018: 1-16.

Expert appraisals of cave art series is not insignificant in many cases, and the discovery of large series was followed by the falsification of others. The latter, the difficulty of chronological contextualisation of certain series and the search for an answer to a central theme such as the origin of symbolism, sparked the development of absolute dating strategies and techniques to settle these questions.

The uranium-series technique is based on the physical laws governing the radioactive disintegration of isotopes that form natural radioactive chains (figure 7). There are three natural isotopes with a very long half-life ($T_{1/2} = 7.10E8$ years). They are ^{238}U , ^{235}U and ^{232}Th .

So what is uranium-series dating? It consists of knowing the relationship between the uranium and the thorium in a sample. In the case I will consider here, it involves seeing this relationship in speleothems, in other words, cave formations, to determine when they were formed. This is because uranium is mainly found in oxidation state U(VI) on the earth's surface and can be associated with carbonates in the form of uranyl ion, soluble in an aqueous medium. Thorium, however, is found in oxidation state Th(IV) and is water-insoluble (Ivanovich, and Harmon, 1992; Hoffmann, 2013: 87-92). As a result, continental and marine waters contain dissolved uranium but not thorium, and the latter will therefore not be included in the secondary carbonates that form speleothems, giving rise to an imbalance between ^{230}Th and U which we can use to determine the relationship between them and indicate the time that has elapsed since their formation.

In 2008, a project was started to date cave art by dating the speleothems on top of or below the drawings (Pike *et al.*, 2012: 1409-1413; Hoffmann *et al.*, 2016: 104-119).

This technique made it possible to remove a small part of the cave formation on top of the paint, in quantities below 10 mg of the sample, in a non-destructive fashion without touching it. It could also be used with speleothems the paintings had been made on top of (figure 8).

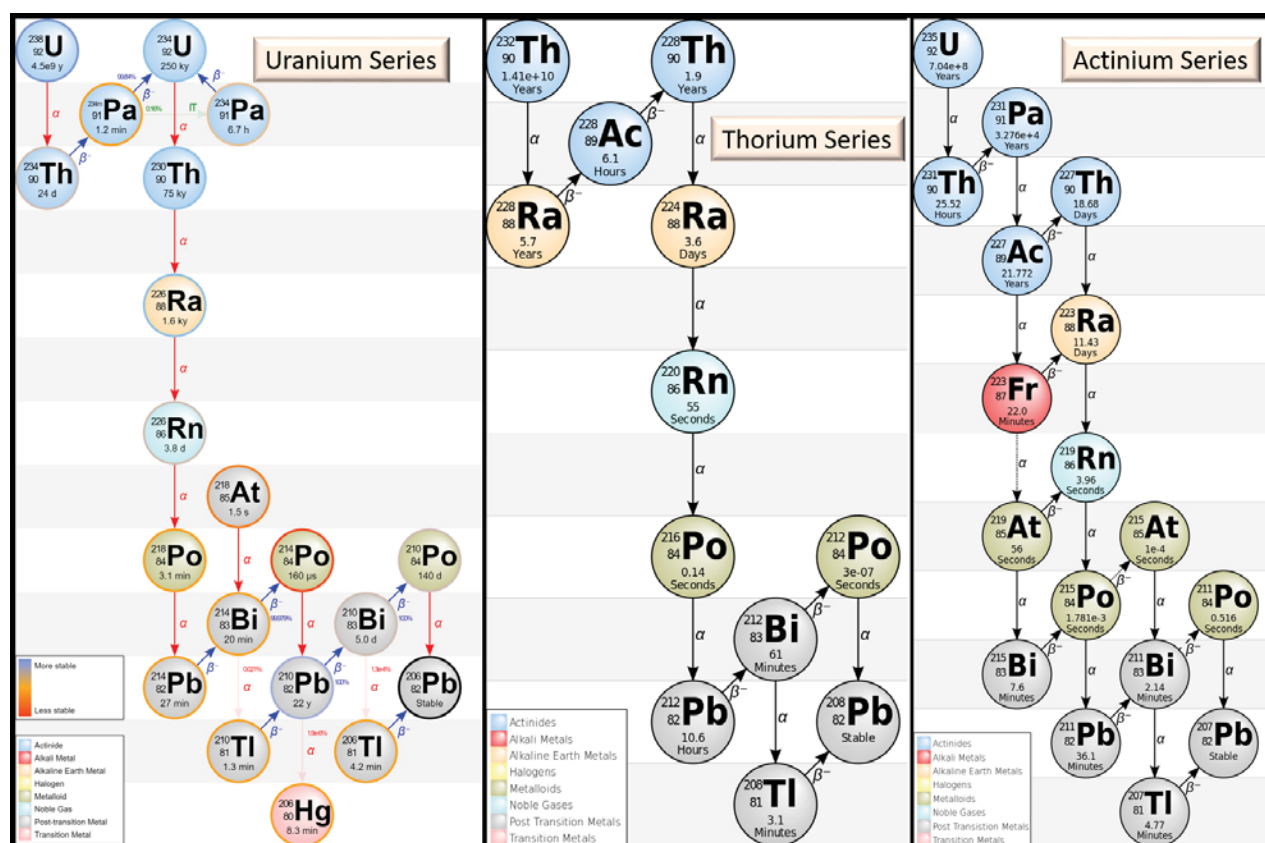


Figure 7. Radioactive chains and isotope half-lives produced during natural decay.

With a minimum amount of material, the relationship between the U and Th present could be analysed in the laboratory via multi-collector mass spectrometry (MC-ICPMS), resulting in a date that, if the speleothem were on top of the painting, would indicate that the latter was produced prior to the cave formation date and therefore giving us a minimum age for the painting. If the painting was produced on top of the speleothem and in turn had growth of this calcitic material above it, it could be “sandwich”-dated, providing a date somewhere between a maximum, i.e., the date of the speleothem on which the painting was made, and a minimum.

The first results of samples taken from the top of paintings yielded results that could indicate the possibility of Neanderthals being involved in the execution of some of them (figure 9) and that the tradition of decorating caves dates back at least to the Aurignacian period, with minimum ages of 40 800 years for a red disc, 37 300 years for a hand outline and 35 600 years for a claviform symbol.

Subsequently, and after obtaining new dates in other caves, Hoffmann, *et al.* (2018: 912-915) revealed the existence of paintings dating back at least 64 800 years in the La Pasiega (Cantabria), Maltravieso (Extremadura) and Ardales (Andalusia) caves. This has important implications for the interpretation of the origins of symbolism, since it is at least 20 000 years earlier than the first datings and opens up scientific debate. Who painted the caves? As far as we know from the fossil record, *Homo sapiens* were not found on the Iberian peninsula 65 000 years ago. The authorship of these works has therefore been attributed to *Homo neanderthalensis*.



Figure 8. Image taken from the paper by Hoffmann *et al.*, 2018: 912-915. Detail of the sampled area and its location on the cave painting.

And to finish... the role of geochronology

The geosciences and geochronology as part of Heritage Research fulfil the three objectives initially set out in the text: they increase our knowledge and understanding of heritage, add cultural value and aid in sustainable heritage management.

Above all, they boost our understanding of tangible and intangible heritage, helping us to know the provenance of materials, date built heritage and understand the processes of change that take place, date and/or contextualise fossils and date cave formations which in turn serve to date the paintings of the early human sapiens. So geochronology helps us write the unwritten history of our past and improve our future and that of the heritage we leave behind.

It also allows us to open up new questions around intangible issues and world-class scientific discussions as we have seen throughout the work.

These research techniques and areas promote transdisciplinarity, enrich our cultural heritage and contribute to the heritage value chain, both past (archaeometry) and future (conservation).

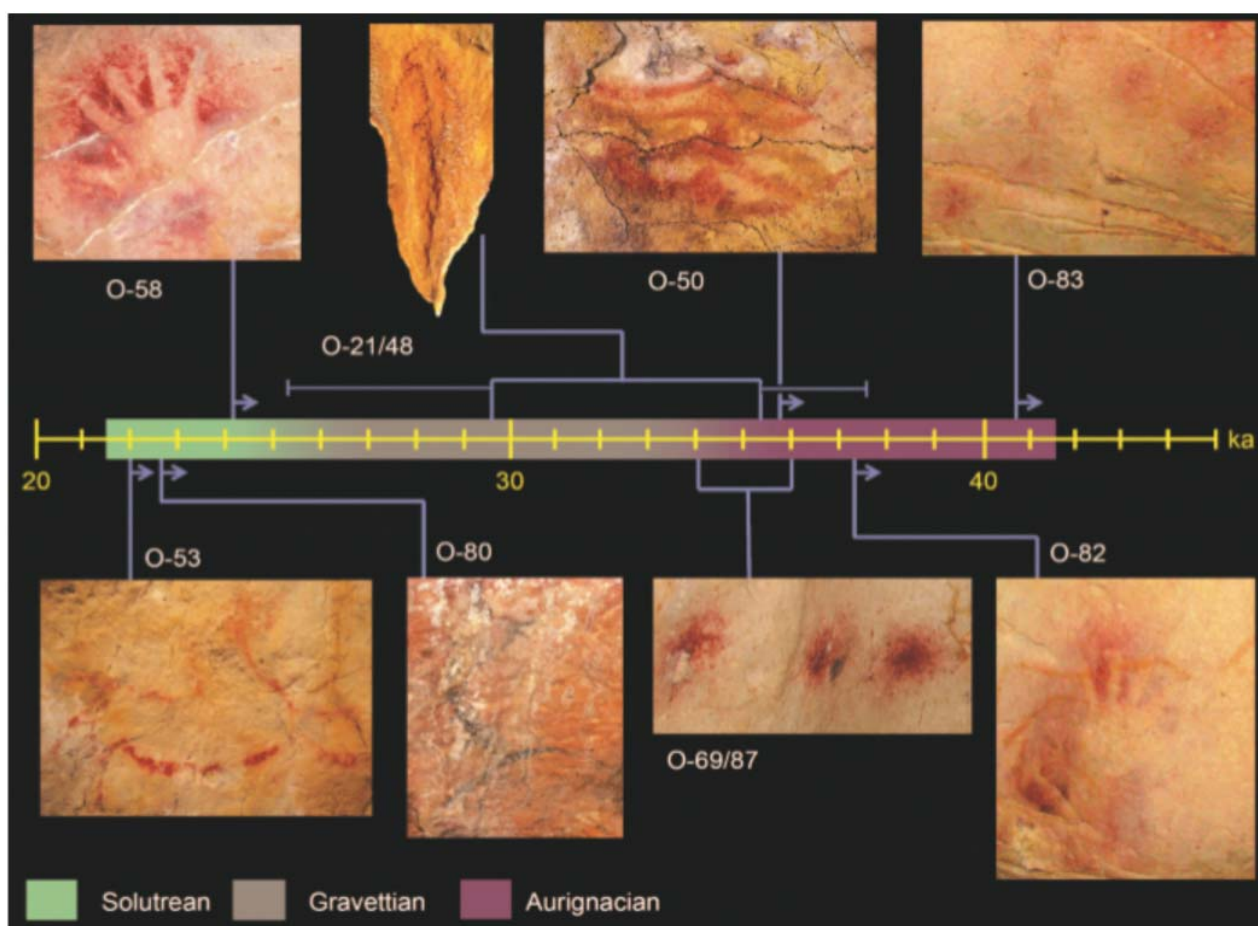


Figure 9. Image taken from the paper by Hoffmann *et al.*, 2016: 104-119. Timelines obtained for the samples taken in: O-58. Negative of a hand from El Castillo cave (Puente Viesgo, Cantabria); O-21/48. Anthropomorphs in the Tito Bustillo cave (Ribadesella, Asturias); O-50. Claviforms and O-53. Horse from the Altamira cave (Santillana del Mar, Cantabria); O-83. Discs, O-80. Symbol, O-69/87. Discs and O-82. Negative of a hand from El Castillo cave (Puente Viesgo, Cantabria).

Acknowledgements

The author would like to thank the Museo del Prado and the Instituto de Patrimonio Cultural de España for holding the seventh Science and Art congresses and promoting the outreach of many works that shed light on the entire heritage value chain. They have given us the opportunity to showcase techniques and areas of knowledge that, whilst being present, we would like to be better known.

I would also like to thank all the authors who appear in this compilation of texts and the entire CENIEH team, especially my colleagues who engage in geochronology in one way or another, for everything they have taught me over the years.

Bibliografía / Bibliography

- Aitken, M. J (1985): *Thermoluminescence Dating*. London: Academic Press.
- (1988): *An introduction to Optical Dating: The Dating of Quaternary Sediments By the use of Photon-Stimulated-Luminescence*. Oxford: Oxford University Press.
- Arnold, L. J. *et al.* (2015): «Evaluating the Suitability of Extended-range Luminescence Dating Techniques over Early and Middle Pleistocene Timescales: Published Datasets and Case Studies from Atapuerca, Spain», *Quaternary International*, vol. 389, pp. 167-190.

- Baker, J.; Stos, S., y Waight, T. (2006): «Lead Isotope Analysis of Archaeological Metals by Multiple-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry», *Archaeometry*, vol. 48, pp. 45-56.
- Bartoll, J., e Ikeya, M. (1997): «ESR Dating Pottery: A Trial», *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 48, pp. 981-984.
- Benvenuti, M. *et al.* (2013): «The Tungsten and Tin Signature of Iron Ores from Elba Island (Italy): A Tool for Provenance Studies of Iron Production in the Mediterranean Region», *Archaeometry*, vol. 55, pp. 479-506.
- Berger, L. R. *et al.* (2015): «*Homo naledi*, a New species of the Genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa», *eLife*, 4e09560, pp. 1-35.
- Bermúdez de Castro, J. M. *et al.* (1997): «A Hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain: Possible Ancestor to Neandertals and Modern Humans», *Science*, vol. 276, pp. 1392-1395.
- Bermúdez de Castro, J. M. *et al.* (2017): «Twentieth Anniversary of *Homo antecessor* (1997-2017): a review». *Evolutionary Anthropology*, vol. 26, pp. 157-171.
- Degryse, P.; Henderson, J., y Hodgings, G. (eds.) (2009): *Isotopes in Vitreous Materials*. Leuven: Leuven University Press.
- Dirks, P. H. *et al.* (2017): «The Age of *Homo naledi* and Associated Sediments in the Rising Star Cave, South Africa», *eLIFE*, vol. 6, e24231, pp. 1-35.
- Duller, G. T. A. (2008): *Luminiscence Dating-guidelines on using Luminescencedating in Archaeology*. English Heritage.
- Duval, M. (2013): «La datación por resonancia paramagnética electrónica», *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Edición de Marcos García y Lydia Zapata. Bilbao: Universidad del País Vasco, pp. 96-102.
- Duval, M.; Falguères, C., y Bahain, J. J. (2012): «Age of the Oldest Hominin Settlements in Spain: Contribution of the Combined U-series/ESR Dating Method Applied to Fossil Teeth», *Quaternary Geochronology*, vol. 10, pp. 412-417.
- Duval, M. *et al.* (2018): «The First Direct ESR Dating of a Hominin Tooth from Atapuerca Gran Dolina TD-6 (Spain) supports the antiquity of *Homo antecessor*», *Quaternary Geochronology*, vol. 47, pp. 120-137.
- Duval, M. *et al.* (2011): «Datación por ESR del yacimiento arqueológico del Pleistoceno inferior de Vallparadís (Terrassa, Cataluña, España)», *Trabajos de Prehistoria*, vol. 68, n.º 1, pp. 7-24.
- Falguères, C. *et al.* (1999): «Earliest Humans in Europe: The Age of TD6 gran Dolina, Atapuerca, Spain», *Journal of Human Evolution*, vol. 37, n.ºs 3-4, pp. 343-352.
- Gale, N. H., y Stos-Gale, Z. A. (2000): «Lead Isotope Analyses Applied to Provenance Studies», *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*. Edition of Enrico Ciliberto and Giuseppe Spoto. New York: Wiley, pp. 503-584.
- García-Díez, M., y Ochoa, B. (2013): «Arte prehistórico», *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Edición de Marcos García y Lydia Zapata. Bilbao: Universidad del País Vasco, pp. 611-634.
- Gould, Stephen J. (1987): *Time's Arrow, Time's Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Grün, R. (1989): «Electron Spin Resonance (ESR) Dating», *Quaternary International*, vol. 1, pp. 65-109.
- Henderson, J. (2013): *The Science and Archaeology of materials: An investigation of inorganic materials*. London: Routledge.
- Hoffmann, D. L. (2013): «La datación por las series de uranio», *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Edición de Marcos García y Lydia Zapata. Bilbao: Universidad del País Vasco, pp. 87-92.
- Hoffmann, D. L. *et al.* (2016): «Methods for U-series Dating CaCO₃ Crust Associated with Palaeolithic Cave Art and Application to Iberian Sites», *Quaternary Geochronology*, vol. 36, pp. 104-119.

- Hoffmann, D. L. *et al.* (2018): «U-Th Dating of Carbonate Crust Reveals Neandertal Origin of Iberian Cave Art», *Science*, vol. 359, pp. 912-915.
- Ikeya, M. (1975): «Dating a Stalactite by Electron Paramagnetic Resonance», *Nature*, vol. 225, pp. 48-50.
- (1993): *New Applications of Electron Spin Resonance-dating, Dosimetry and Microscopy*. World Scientific Publishing.
- Ivanovich, M., y Harmon, R. S. (1992): *Uranium Series Disequilibrium: Applications on Earth, Marine and Environmental Sciences*. Oxford: Oxford University Press.
- Jacobs, Z. *et al.* (2008): «Equivalent Dose Distributions from Single Grains of Quartz at Sibudu, South Africa: Context, Causes and Consequences for Optical Dating of Archaeological Deposits», *Journal of Archaeological Science*, vol. 35, pp. 1808-1820.
- Moreno, D. *et al.* (2015): «New Radiometric Dates on the Lowest Stratigraphical Section (TD1 to TD6) of Gran Dolina site (Atapuerca, Spain)», *Quaternary Geochronology*, vol. 30, pp. 535-540.
- Olofsson, A., y Rodushkin, I. (2011): «Provenancing Flint Artefacts with ICP-MS using REE Signatures and Pb Isotopes as Discriminants: Preliminary Results of a Case of Study from Northern Sweden», *Archaeometry*, vol. 53, n.º 6, pp. 1142-1170.
- Parés, J. M. *et al.* (2013): «Reassessing the Age of Atapuerca TD6 (Spain): New Paleomagnetic Results», *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, n.º 12, pp. 4586-4595.
- Parés, J. M. *et al.* (2018): «Chronology of the Cave Interior Sediments at Gran Dolina Archaeological Site, Atapuerca (Spain)», *Quaternary Science Review*, vol. 186, pp. 1-16.
- Pike, A. W. G. *et al.* (2012): «U-Series Dating of Paleolithic Art in 11 Caves in Spain», *Science*, vol. 336, pp. 1409-1413.
- Pollard, A. Mark (1995): «Why teach Heisenberg to Archaeologists?», *Antiquity*, vol. 69, pp. 242-247.
- Porat, N., y Schwarcz, H. P. (1991): «Use of Signal Subtraction Methods in ESR Dating of Burned Flint», *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, vol. 18, pp. 203-212.
- Renfrew, C., y Bahn, P. (2008): *Archaeology. Theories, Methods, and Practice*. New York: Thames and Hudson.
- Rhodes, E. J. (2011): «Optically Stimulated Luminescence Dating of Sediments over the Past 200 000 Years», *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 39, pp. 461-488.
- Ríos-Garaizar, J. *et al.* (2018): «A Middle Palaeolithic Wooden Digging Stick from Aranbaltza III, Spain» [en línea], *PLoS ONE*, vol. 13, n.º 3, pp. 1-15. Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195044>>.
- Roberts, R. G. *et al.* (2015): «Optical Dating in Archaeology: Thirty Years in Retrospect and Grant Challenges for the Future», *Journal of Archaeological Science*, vol. 56, pp. 41-60.
- Sanjurjo-Sánchez, J., y Blanco, R. (2011): «Luminescence Dating of Mortars from Ancient Architectural Elements», *Corals II Conference*.
- Stos-Gale, Z. A. *et al.* (1995): «Lead Isotope Analyses of Ores from the Western Mediterranean», *Archaeometry*, vol. 37, n.º 2, pp. 407-415.
- Tarriño, A., y Terradas, X. (2013): «Materias Primas Líticas», *Métodos y técnicas de análisis y estudio en arqueología prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. Edición de Marcos García y Lydia Zapata. Bilbao: Universidad del País Vasco, pp. 439-452.
- Torres, T. de *et al.* (2010): «Dating of the Hominid (*Homo neanderthalensis*) Remains Accumulation from El Sidrón Cave (Piloña, Asturias, North Spain): An Example of Multi-methodological Approach to the Dating of Upper Pleistocene Sites», *Archaeometry*, vol. 52, n.º 4, pp. 680-705.