

Datación absoluta de estructuras y edificios históricos: últimos avances

Jorge Sanjurjo-Sánchez

Instituto Universitario de Geología “Isidro Parga Pondal”, Universidade da Coruña, ESCI
jsanjurjo@udc.es

Resumen. La reconstrucción de la historia de un edificio representa una tarea difícil por diferentes razones. Por una parte, la documentación histórica existente suele ser escasa, incompleta o directamente se ha perdido, si bien respecto a estructuras o edificios prehistóricos ni tan siquiera ha existido. Esto hace necesario estudiar la estratigrafía de edificios y estructuras, lo que permite establecer una cronología relativa e identificar fases constructivas, reformas, etc. Sin embargo, alcanzar el objetivo final de conocer la cronología de estas estructuras resulta complejo debido a la escasez de materiales adecuados para la aplicación de técnicas absolutas de datación, la escasa variedad de métodos de datación absoluta que permiten trabajar en un rango de antigüedades que va de pocas décadas hasta algunos miles de años, y los problemas derivados de aplicar las pocas técnicas disponibles a materiales que resultan complejos, que pueden ser sustituidos o reutilizados y que pueden verse afectados por actividades humanas en algunos momentos de la historia de cada estructura. Algunos materiales de construcción (por ejemplo, ladrillos, madera) han sido utilizados habitualmente para la datación absoluta de estructuras, lo que no implica que existan problemas derivados de su uso para obtener cronologías absolutas.

En los últimos 20 años ha habido una enorme evolución en las posibilidades de aplicar procedimientos de datación absoluta a materiales de construcción. Los avances técnicos y metodológicos producidos en las últimas dos décadas han abierto un gran número de posibilidades en la datación en este ámbito. No obstante, la mayoría de estos avances son todavía poco conocidos por la comunidad arqueológica. Si bien el radiocarbono y la luminiscencia han sido las técnicas más exitosas, no todas sus aplicaciones actuales son conocidas, y otras técnicas como el arqueomagnetismo presentan nuevas posibilidades. El propósito de este trabajo es proporcionar una visión general de los últimos logros de las técnicas de datación absoluta disponibles en la actualidad para datar estructuras y materiales de construcción en estructuras arqueológicas e históricas.

Absolute dating of historic structures and buildings: latest developments

Abstract. Reconstructing the history of a building is a difficult task for different reasons. On the one hand, the existing historical documentation is usually scarce, incomplete or directly lost, although it has not even existed in prehistoric structures or buildings. This makes it necessary to study the stratigraphy of buildings and structures, which allows establishing a relative chronology and identifying construction phases, reforms, etc. However, achieving the ultimate goal of knowing the chronology of these structures is complex due to the scarcity of materials suitable for the application of absolute dating techniques, the scarce variety of absolute dating methods that allow to work in a range of antiquities that goes from a few decades to a few thousand years, and the problems of applying the few available techniques to materials that are complex, can be replaced or reused and can be affected by human activities at some point in the history of each structure. Some building materials (eg, bricks, wood) have been commonly used for the absolute dating of structures, which does not imply that there are problems derived from their use to obtain absolute chronologies.

In the last 20 years there has been a huge evolution in the possibilities of applying absolute dating procedures to building materials. The technical and methodological advances produced in the last two decades have opened a



great number of possibilities in the dating in this area. However, most of these advances are still little known by the archaeological community. Although radiocarbon and luminescence have been the most successful techniques, not all of their current applications are known and other techniques such as archeomagnetism present new possibilities. The purpose of this work is to provide an overview of the latest achievements of the absolute dating techniques available today to date structures and building materials in archaeological and historical structures.

1 Introducción

Los materiales de construcción están quizás entre los más antiguos usados por el hombre, al formar parte de todo tipo de estructuras (p.e. viviendas, tumbas). Tanto se trate de materiales naturales o mezclas de estos, su análisis puede proporcionar información diversa, incluso datos cronológicos. Algunos de esos materiales han sido habitualmente usados para datar construcciones con técnicas absolutas (p.e. madera, ladrillos), pero muchos otros no, a pesar de que pueden proporcionar una información más o menos exacta y precisa. En este trabajo se pretende proporcionar información del estado de la cuestión actual en la datación absoluta de materiales de construcción [San16].

2 Datación de edificios históricos: métodos y problemas

Debido a la falta de datos, los investigadores han utilizado varias técnicas para obtener información cronológica sobre edificios: estilos arquitectónicos, identificación de técnicas constructivas, estratigrafía de edificios, mensiocronología, o métodos de datación absoluta en algunos materiales. Los métodos de datación absolutos proporcionan rangos de edad para objetos arqueológicos, aunque su uso puede implicar algunos problemas, principalmente, cuando se pretende datar materiales que han podido ser reutilizados. En esos casos el resultado es una sobreestimación de la edad. También modificaciones deliberadas o accidentales en edificios o estructuras a lo largo de la historia pueden causar que se obtengan edades infraestimadas, si tales modificaciones no se han detectado a la hora de seleccionar los materiales a datar.

En materiales de construcción, las principales técnicas de datación absoluta son dendrocronología, radiocarbono y datación por luminiscencia. Es ampliamente conocido que tanto madera como ladrillos puede utilizarse para datar, pero en los últimos años algunos desarrollos han permitido aplicar estas técnicas a otros materiales que antes no se consideraban. Si bien el radiocarbono es aplicable a morteros cuando contienen materia orgánica o carbones (lo que no necesariamente proporciona la edad de una estructura), en los últimos años se han desarrollado varios procedimientos para datar los carbonatos en morteros de cal. También en luminiscencia (tradicionalmente usada para datar ladrillos), se han realizado avances en la datación de todo tipo de morteros, pero también otros materiales como adobe e incluso superficies de roca.

3 Datación de materiales reutilizables

La madera utilizada con diferentes fines en edificios puede datarse por dos métodos: dendrocronología y radiocarbono. La primera proporciona resultados más precisos, ya que utiliza los anillos de crecimiento de los árboles para fechar el año de la formación de la madera, pero requiere madera de cierto espesor y condiciones de conservación, mientras que el radiocarbono puede utilizarse en cantidades escasas de material. En dendrocronología existen cronologías de referencia ininterrumpidas hasta algunos miles de años en Europa, que permiten que esta técnica se adecuada para datar edificios hasta edades prehistóricas [Bai82, Sch89]. Sin embargo, esta técnica data la madera y no la estructura que la contiene. Siendo la madera un material reutilizable en ciertos casos, y que habitualmente es sustituida con el paso del tiempo debido a su deterioro, usarla en datación puede causar la sobreestimación o infraestimación de la edad de la estructura en cuestión. Además, la madera utilizada como material de construcción puede provenir de la parte exterior (madera más joven) o parte interior (madera más antigua) de un tronco de árbol, por lo que puede llegar a sobreestimar la edad en decenas de años o incluso siglos. Un ejemplo ilustrativo de esto es el estudio realizado en la Iglesia de la Natividad en Belén [Ber12].

El radiocarbono es el método alternativo para datar madera. Su mayor ventaja es que permite requiere muy escaso material y sus mayores desventajas es el que fragmentos muy pequeños de madera pueden proceder de maderas antiguas reaprovechadas (por lo que se sobreestimaría la edad) y que en el proceso de calibración de la edad, la baja pendiente de la curva de calibración en algunos tramos de la curva global para algunos períodos históricos, se traduce en un error elevado en la datación.

Los materiales cerámicos más comunes en los edificios son los ladrillos cocidos, pero los azulejos, los pavimentos cerámicos, tejas y tuberías de cerámica también han sido más o menos usados. En Europa, el ladrillo cocido se ha utilizado comúnmente desde el Imperio Romano y se puede considerar como material ubicuo de ese tiempo en muchas áreas de Europa y de la cuenca mediterránea. Estos materiales, y particularmente los ladrillos, son los más usados habitualmente en datación por luminiscencia en edificios. La termoluminiscencia (TL) como herramienta de datación se propuso en la década de 1950 [Dan53], y se desarrolló a partir de la década de 1970 por un grupo de investigación de la Universidad de



Oxford, dirigido por Martin Aitken, [Ait85], continuando su desarrollo y uso con una mejora de la precisión en los últimos quince años hasta el presente [Lir13].

La luminiscencia es la emisión de luz de materiales cristalinos (minerales). La radioactividad ionizante natural provoca la excitación de electrones de la banda de valencia de los átomos de cristales minerales, algunos de los cuales son capturados en "trampa de electrones", presentes en la red cristalina debido a imperfecciones e impurezas. Con el tiempo, más y más electrones serán capturados al permanecer un mineral expuesto a radiación ionizante. La liberación de electrones atrapados se produce en forma de fotones, que es proporcional a la radiación ionizante recibida por el mineral o luz y que puede producirse en laboratorio después de un estímulo en forma de luz o calor [Ait85]. Dicha correlación entre carga acumulada y tiempo de exposición a radiación ionizante permite calcular el periodo de tiempo transcurrido desde el último evento de puesta a cero, que en los materiales cerámicos corresponde a la cocción. El calentamiento de los minerales de la muestra libera los electrones atrapados dando como resultado una emisión de señal llamada termoluminiscencia (TL). Por lo tanto, la ecuación de la edad de luminiscencia es la relación entre la dosis de radiación total absorbida por los minerales (estimada como dosis equivalente por luminiscencia) y la tasa de radiación ionizante en el ambiente que rodea al material a datar.

En los últimos 20 años ha habido un desarrollo importante de la denominada luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) [Win06]. OSL también se han probado en ladrillos con éxito [Bai08]. En OSL, la luminiscencia de los minerales es estimulada por la exposición a la luz (generalmente diodos azules, LEDs) en lugar de calor. Entre las ventajas de la OSL están el que requiere menor cantidad de muestra y proporciona una mayor precisión. Generalmente, el mineral preferido tanto para TL u OSL es el cuarzo.

La datación de ladrillos puede implicar la sobreestimación de la edad de una estructura (si los ladrillos han sido reutilizados, [Bai08, Bla10]) o la infraestimación si la estructura datada ha estado expuesta a fuego por algún incendio o si en su entorno se ha modificado la estructura y por tanto la tasa de radiación que ha recibido el ladrillo seleccionado.

4 Materiales no reutilizables

En los últimos años ha habido algunas experiencias en el uso de ladrillos de adobe para obtener dataciones absolutas tanto por medio de radiocarbono como luminiscencia, si bien también se ha propuesto el uso de arqueomagnetismo. Este tipo de material resulta de gran interés al ser muy poco probable su reutilización. Con radiocarbono se ha intentado su datación sobre componentes orgánicos como carbones, o fragmentos de madera o fibras vegetales. El uso de madera ha proporcionado un peor resultado, dado que es un material con una elevada probabilidad de ser reutilizado [Haa87], pero el uso de fibras vegetales ha proporcionado un resultado alentador [Bur77, Bon01].

Recientemente, se han realizado pruebas con luminiscencia medida en el cuarzo extraído de ladrillos de adobe en Siria, con buen resultado, coincidentes con dataciones de radiocarbono y luminiscencia en otros materiales de los mismos yacimientos [San16a]. El uso de arqueomagnetismo, sin embargo, ha proporcionado resultados recientes desiguales. Si bien se ha constatado que podrían ser datados por este método [Ent12], algunos estudios no han permitido obtener resultados satisfactorios [Dow11].

5 Datación de morteros

Los morteros (de juntas, enlucidos y encalados) son probablemente el material de construcción más utilizado desde la antigüedad. Existen diferentes tipos de mortero tradicional, siendo los principales los de arcilla o tierra, yeso o más generalmente morteros de cal y arena (constituyendo la arena el agregante y la cal o carbonato cálcico el ligante). Los cementos Portland son morteros más modernos utilizados desde el siglo XIX pero muy similares al cemento o cemento romano (morteros pozzolana).

Los morteros de cal han sido los más utilizados históricamente y se han realizado estudios para datarlos en los últimos 50 años. La mayor tasa de éxito se ha conseguido con datación por radiocarbono y OSL, pero se han observado una serie de problemas más o menos genéricos, aún no del todo resueltos.

Los morteros pueden ser a priori datados por radiocarbono cuando contienen componentes orgánicos (p.e. carbones, fragmentos de hueso, materia orgánica), aunque la edad obtenida no necesariamente corresponde a la del mortero. En el caso de los morteros de cal y arena, desde hace unos 50 años se ha intentado datar los carbonatos formados por la cal durante el fraguado [Del64, Fol76]. Sin embargo, las pruebas empíricas han encontrado varias dificultades. El aglutinante de cal se forma tras disolverse la cal viva (CaO) en agua con lo que reacciona con CO₂ atmosférico disuelto en agua a medida que el mortero se endurece para formar carbonato cálcico [Hei97]. La cal procede de triturar y cocer fragmentos de roca caliza, dolomita o mármol en hornos a unos 900°C, lo que descompone la calcita liberándose CO₂. Sin embargo, normalmente no toda la calcita se descompone ya que el triturado de la roca muchas veces no es completo [Els16]. Por ello, esos fragmentos pueden ser incorporados al mortero, aportando carbono antiguo, sin ¹⁴C, lo que "envejecerá" en apariencia la edad del mortero en centenares o miles de años [Hei97]. Por otra parte, la piedra caliza o mármol triturados que se usa a veces también como agregante introduce más carbonato fósil difícil de separar del ligante [Pes12]. Además, el proceso de fraguado puede llegar a ser muy lento, dilatándose de años a décadas [Son89] dependiendo de la porosidad, profundidad, volumen de mortero, circulación de aire y contenido de agua dentro de un mortero [Van91, Ele02], lo que



resultará en infraestimaciones de la edad. Adicionalmente, la exposición a factores meteorológicos o ambientales puede causar disolución con posterior reprecipitación, lo que incorpora nuevo ^{14}C atmosférico y como resultado causará de nuevo un “rejuvenecimiento” aparente de la calcita [San11, San12, Hei97].

De estos tres posibles problemas, el primero es el más frecuente y la principal causa de que el uso del radiocarbono en morteros de cal y arena tienda a sobreestimar la edad. Por ello, se han propuesto y perfeccionado varios procedimientos analíticos y de separación de la calcita fósil. Estos son fundamentalmente procesos mecánicos, sugeridos y probados por [Naw05, Naw09, Mar11], entre otros, y procesos químicos combinados con procedimientos analíticos como los propuestos por Lindroos et al [Lin07] Heinemeier et [Hei10]. Este último parece tener una mayor tasa de éxito, pero es más lento y costoso.

La datación luminiscencia de morteros se ha venido realizando en cuarzo presente en el agregante, en morteros de cal y arena, cemento y tierra. En la mayor parte de estudios el resultado ha sido positivo, si bien el proceso implica algunas cautelas y aunque existe un pequeño porcentaje de casos en los que el resultado no ha sido aceptable. En el caso de la luminiscencia en morteros, se data la última exposición a la luz del cuarzo del agregante antes del fraguado o colocación del mortero. Sin embargo, si esa exposición a la luz es insuficiente se obtendrá una edad sobreestimada. Este es el principal problema de la luminiscencia, aunque diversos estudios han mostrado que ocurre en un determinado porcentaje de muestras [Goe03, Goe11, Fea08, Ste13, Urv15], y que, aun cuando se produce, en muchos casos es posible obtener una edad fiable. Esto se debe a que los procedimientos de OSL aplicados al proceso de datación permiten detectar la posible presencia de señal geológica residual en la muestra objeto de estudio. Además, la datación de varias muestras por estructura estudiada suele proporcionar un mejor resultado.

Al igual que ocurre con ladrillos de adobe, se ha propuesto el uso del arqueomagnetismo para la datación de morteros. Los morteros utilizados para murales y cementos también pueden adquirir una magnetización estable si tienen un contenido ferromagnético debido a qué en una masa o sustrato húmedo, las partículas magnéticas pueden alinearse con el campo magnético ambiental, y fijarse en esta posición cuando se seca la pintura o el cemento. En pinturas esto se conoce como magnetización remanente pictórica (PiRM) [Chi97], y es esencialmente el mismo mecanismo que ocurre en sedimentos marinos, conocidos como magnetización remanente post-deposicional (pDRM). Sin embargo, esta posibilidad se ha utilizado sólo para estudiar los campos arqueomagnéticos en murales y cementos antiguos más que para la datación [Chi97, Gog04].

6 Datación de bloques de roca

Uno de los materiales en los que se ha centrado el desarrollo de procedimientos de datación por luminiscencia en los últimos años es la datación de bloques de roca. Por supuesto, estos procedimientos no pretenden datar los bloques o sillares en sí, ya que su edad es la de la roca de la que proceden, si no que pretenden datar el momento de su colocación en la posición actual que estos pueden presentar en un edificio o estructura. Esta estrategia se presenta especialmente interesante en áreas en donde el uso de roca para construir ha sido habitual o al menos en períodos históricos en los que se ha empleado este material

El primer caso de estudio fue propuesto y ejecutado con éxito por Liritzis [Lir94] pero en rocas megalíticas. En este estudio se obtuvo una datación de una superficie de roca que había estado expuesta a la luz del día por última vez antes de la colocación de bloque en una estructura megalítica, de modo que dicha superficie quedaba protegida de la luz del día. Este enfoque se aplicó posteriormente a datar bloques de edificios históricos con buen resultado, si bien, el método es laborioso y requiere de la extracción, al menos parcial, de un bloque en condiciones de oscuridad. El uso de bloques de roca como material de construcción requiere la extracción en cantera, corte y trabajado los bloques de piedra, el transporte y el proceso de colocación en el pasado. Durante este proceso, la luz del día elimina la señal de luminiscencia (sensible a la luz), poniéndola a cero en las superficies del bloque hasta una profundidad variable, dependiendo de la transmitancia de la luz en los minerales de la roca en cuestión. Durante la construcción de un edificio la mayoría de las superficies de los bloques se colocan y desde ese momento permanecen protegidos de la luz (excepto la superficie exterior de una pared). Desde ese momento los minerales de la superficie acumulan señal luminiscente de forma proporcional al tiempo en que han estado colocados. Por lo tanto, la luminiscencia permite conocer la edad del momento en que se colocaron tales bloques de piedra en los edificios.

El tratamiento de la luminiscencia para la datación de las superficies de piedra requiere un muestreo muy cuidadoso, y un procesamiento y tratamiento de muestras específico, recomendándose incluso el uso de múltiples métodos para evaluar las dosis de radiación [Gre05, Vaf07, Lit11, Soh12]. Típicamente, los errores de edad varían entre el 5 y el 20% [Lir13].

Recientemente se ha propuesto una nueva estrategia y método para datar superficies por luminiscencia. Este método permite datar superficies de roca expuestas a la luz del día, fechando el momento de exposición. Esto es posible porque en una superficie de roca que es expuesta a la luz natural se elimina la señal luminiscente en los minerales de la superficie en minutos, pero más lentamente en profundidad (debido a la transparencia de los minerales). Por lo tanto, la señal de luminiscencia se puede medir a varias profundidades, hasta una profundidad a la que no hubo blanqueamiento [Soh12, Cha12]. Así, las señales existentes a cada profundidad (a pocos mm de la superficie de la piedra) dependen íntegramente del tiempo de exposición de la superficie de roca estudiada. Este enfoque parece un método prometedor, pero aún no se ha demostrado en la construcción de piedra, aunque sí ha proporcionado resultados muy prometedores en superficies de roca recientes (de décadas y siglos de antigüedad) [Cha12].



La datación por luminiscencia de superficies ha sido estudiada en varios tipos de rocas magmáticas (granito, basalto), sedimentarias (piedra caliza, arenisca) y metamórficas (esquisto, cuarcita, mármol) en varias zonas del mundo [Gal02, Lir07, Gre05, Vaf07, Lir11, Soh12] y en la mayor parte de casos es susceptible de ser aplicada.

7 Consideraciones finales

Aunque existen, a priori, varias posibilidades para fechar edificios históricos, como la existencia de documentación histórica, lo cierto es que en la práctica resulta enormemente complejo datar por estos medios por la falta de documentación o incluso porque muchos de estos edificios han sufrido alteraciones, modificaciones e incluso reconstrucciones parciales o totales en el pasado. Los métodos de datación absoluta proporcionan edades absolutas para diferentes materiales de construcción usados en estos edificios, si bien, datar los materiales no siempre implica datar las estructuras. En los últimos 20 años se han producido importantes desarrollos y avances en el uso de algunas técnicas de datación absoluta en materiales de construcción, sobre todo con radiocarbono y luminiscencia, lo que actualmente permite utilizar varios materiales en una misma estructura para obtener dataciones que permitan situar ésta en una horquilla de tiempo histórica. La madera puede ser fechada por dendrocronología y radiocarbono, mientras que los ladrillos pueden ser datados principalmente por luminiscencia. Sin embargo, estos materiales son sustituibles y reutilizables, por lo que pueden proporcionar edades infra o sobreestimadas. Ladrillos de adobe o morteros son algunos de los materiales a priori no reutilizables en los que se han concentrado esfuerzos en el desarrollo de procedimientos de datación, en los que también se han realizado experimentos con arqueomagnetismo. Los desarrollos recientes permiten la aplicación de luminiscencia para fechar casi todos los tipos de morteros (por ejemplo, cal, lodo, hormigón), mientras que el radiocarbono puede ser usado en el caso de morteros de cal o morteros que contienen materia orgánica. La datación por luminiscencia también ha sido probada con éxito para datar la colocación de bloques de roca en edificios, proporcionando una nueva herramienta a ser utilizada cuando otros materiales no están disponibles o no proporciona resultados fiables.

A pesar de todas estas nuevas posibilidades, el uso de los referidos métodos para datar estos materiales es aún escaso en la mayor parte de estudios sobre la historia y cronología de edificios del patrimonio histórico y es necesario establecer una mayor colaboración entre especialistas en datación y edificios, para identificar todos los problemas posibles, y así refinar los protocolos utilizados para cada caso de estudio.

Bibliografía

- [Ait85] Aitken M. J. (1985) *Thermoluminescence dating*, Academic Press, London.
- [Bai08] Bailiff I. K. (2008) Methodological developments in the luminescence dating of brick from English late-medieval and post-medieval buildings. *Archaeometry*, Vol. 49, Nr. 4, 2008, pp. 827-851.
- [Bai82] Baillie M. G. L. (1982) *Tree-Ring Dating and Archaeology*, The University of Chicago Press Ltd, London.
- [Ber12] Bernabei M., Bontadi J. (2012) Dendrochronological analysis of the timber structure of the Church of the Nativity in Bethlehem, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 13, Nr. 4, 2012, pp. 54-60.
- [Bla10] Blain S. (2010) An application of luminescence dating to building archaeology: The study of ceramic building materials in early medieval churches in north-western France and south-eastern England, *Arqueología de la Arquitectura*, Vol. 7, 2010, pp. 43-66.
- [Bon01] Bonani G., Haas H., Hawass Z., Lehner M., Nakhla S., Nolan, J. Wenke, R., Wölfli, W. (2001) Radiocarbon dates of Old and Middle Kingdom monuments in Egypt, *Radiocarbon*, Vol. 43, Nr. 3, 2001, pp. 1297-1320
- [Bur77] Burleigh R., Hewson A., Meeks N. (1977) British Museum natural radiocarbon measurements IX, *Radiocarbon*, Vol. 19, Nr. 2, 1977, pp. 143-160.
- [Cha12] Chapot M. S., Sohbaty R., Murray A. S., Pederson J. L., Rittenour T. M. (2012) Constraining the age of rock art by dating a rockfall event using sediment and rock-surface luminescence dating techniques, *Quaternary Geochronology* Vol. 13, Nr. 2-3, 2012, pp. 18-25.
- [Chi97] Chiari G., Lanza, R. (1997) Pictorial remanent magnetization as an indicator of secular variation of the Earth's magnetic field. *Physics of Earth Planet Interior*, Vol. 101, Nr. 2, 1997, 79-83.
- [Dan53] Daniels F., Boyd C.A., Saunders D.F. (1953) Thermoluminescence as a research tool, *Science* Vol. 117, 1953, pp. 343-349.
- [Del64] Delibrias G., Labeyrie J. (1964) Dating of old mortars by the carbon-14 method, *Nature*, Vol. 201, 1964, pp. 742.
- [Dow11] Downey W.S. (2011) Archaeomagnetic directional determinations on various archaeological materials from the Late Minoan Destruction site at Malia, Crete, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. 11, Nr. 1, 2011, pp. 21-31.
- [Ele02] Elert K., Rodriguez-Navarro C., Sebastian Pardo E., Hansen E., Cazalla O. (2002) Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings. *Studies in Conservation*, Vol. 47, Nr. 1, 2002, pp. 62-75.
- [Els06] Elsen, J. (2006) Microscopy of historic mortars – a review, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Nr. 8, 2006, pp. 1416-1424.
- [Ent12] Enterpinar P., Langereis C.G., Biggin A.J., Frangipane M., Matney T. Ökse T., Engin A. (2012) Archaeomagnetic study of five mounds from Upper Mesopotamia between 2500 and 700 BCE: Further evidence for an extremely



- strong geomagnetic field ca. 3000 years ago, *Earth Planetary Science Letters*, Vol. 357-358, Nr. 1, 2012, pp. 84-98.
- [Fea08] Feathers J.K. Johnson J., Kember S.R. (2008) Luminescence Dating of Monumental Stone Architecture at Chavín De Huántar, Perú, *Journal of Archaeological Method and Theory*, Vol. 15, Nr. 3, 2008, pp. 266–296.
- [Fol76] Folk R.L., Valastro S. Jr. (1976) Successful technique for dating of lime mortars by carbon-14, *Journal of Field Archaeology*, Vol. 3, Nr. 2, 1976, pp. 203-208.
- [Gal02] Galloway R.B. (2002) Luminescence lifetimes in quartz: dependence on annealing temperature prior to beta irradiation, *Radiation Measurements*, Vol. 35, Nr. 1, 2002, pp- 67–77.
- [Goe03] Goedicke C. (2003) Dating historical calcite mortar by blue OSL: results from known age samples, *Radiation Measurements*, Vol. 37, Nr. 4-5, 2003, pp. 409-415.
- [Goe11] Goedicke C. (2011) Dating mortar by optically stimulated luminescence: A feasibility study, *Geochronometria*, Vol. 38, Nr. 1, pp. 42-49.
- [Gog04] Goguitchaichvili A., Soler M.A. Znella E., Chiari G., Lanza R., Urrutia-Fucugauchi J., González T. (2004) Pre-Columbian mural paintings from Mesoamerica as geomagnetic field recorders, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, Nr. 12, 2004, L12607, pp. 1-4.
- [Gre05] Greilich S., Glasmacher G.A., Wagner G.A. (2005) Optical dating of granitic stone surfaces. *Archaeometry*, Vol. 47, Nr. 3, 2005, pp. 645–665.
- [Haa87] Haas H., Devine J.M., Wenke R., Lehner M., Wölfli W., Bonani, G. (1987) Radiocarbon chronology and the historical calendar in Egypt, en: Aurenche O., Evin J., Hours F. (eds.) *Chronologies in the Near East*, BAR International Series, Vol. 379, 1987, p 585–606.
- [Hei97] Heinemeier J, Jungner H, Lindroos A, Ringbom Å, von Konow T, Rud N. (1997) AMS 14C dating of lime mortar, *Nuclear Instruments Methods B*, Vol. 123, Nr. 1-4, 1997, pp. 487–95.
- [Hei10] Heinemeier, J., Ringbom, A., Lindroos, A., Sveinbjörnsdóttir, A.E. (2010) Successful AMS 14C dating of non-hydraulic lime mortars from the medieval churches of the Aland Islands, Finland, *Radiocarbon*, Vol. 52, Nr. 1, 2010, pp. 171-204.
- [Lin07] Lindroos A., Heinemeier J., Ringbom A., Braskén M., Sveinbjörnsdóttir A.E. (2007) Mortar dating using AMS 14C and sequential dissolution: examples from medieval, non-hydraulic lime mortars from the Aland Islands, SW Finland, *Radiocarbon*, Vol. 49, Nr. 1, 2007, pp. 47-67.
- [Lir94] Liritzis I., (1994) A new dating method by thermoluminescence of carved megalithic stone building, *Contes Rendues de l'Academie des Sciences*, Paris, Vol. 319, Nr. 2, 1994, pp. 603-610.
- [Lir07] Liritzis I., Sideris C., Vafiadou A., Mitsis J. (2007) Mineralogical petrological and radioactivity aspects of some building material from Egyptian Old Kingdom monuments, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 9, Nr. 1, 2007, pp. 1-13.
- [Lir11] Liritzis I., Laskaris N. (2011) A new mathematical approximation of sunlight attenuation in Rocks for surface luminescence dating. *Journal of Luminescence*, Vol. 131, Nr. 9, 2011, pp. 1874–1884.
- [Lir13] Liritzis I., Singhvi A.K., Feathers J. K., Wagner G.A., Kadereit A., Zacharias N., Li S.H. (2013) *Luminescence Dating in Archaeology, Anthropology, and Geoarchaeology. An Overview*. Springer, Heidelberg, Germany.
- [Mar11] Marzaioli F., Lubritto C., Nonni E., Passariello I., Capano M., Terrasi F. (2011) Mortar radiocarbon dating: preliminary accuracy evaluation of novel methodology, *Analytical Chemistry*, Vol. 83, Nr. 6, 2011, pp. 2038-2045.
- [Naw05] Nawrocka D., Michniewicz, J. Pawlyta A., Pazdur, A. (2005) Application of radiocarbon method for dating of lime mortars, *Geochronometria*, Vol. 24, 2005, pp. 109-115.
- [Naw09] Nawrocka D., Czernik J., Goslar T. (2009) C-14 dating of carbonate mortars from Polish and Israeli sites, *Radiocarbon*, Vol 51, Nr. 2, 2009. Pp. 857-866.
- [Pes12] Pesce G. L.A., Ball R.J. (2012) Dating of Old Lime Based Mixtures with the "Pure Lime Lumps" Technique, en: Nawrocka, D.N. (ed.) *Radiometric Dating*, InTech.
- [San11] Sanjurjo-Sánchez J., Alves, C.A.S. (2011) Decay effects of pollutants on materials applied in the built environment, en: Lichtfouse E., Schwarzbauer J., Robert D., (eds.) *Environmental Chemistry for a sustainable World*, Springer, Berlin, Germany, pp. 47-121.
- [San12] Sanjurjo-Sánchez J., Alves C. (2012) Decay effects of pollutants on stony materials in the built environment, *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 10, Nr. 2, 2012, pp. 131-143.
- [San16] Sanjurjo-Sánchez J. (2016) Dating historical buildings: an update on the possibilities of absolute dating methods, *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 10, 2016, pp. 620-635.
- [San15] Sanjurjo-Sánchez J., Montero Fenollós J.L. (2016) First test for luminescence dating of ancient mud-brick buildings from Northern of Mesopotamia, en: Daneels, A. (eds.) *Proceedings of the UISPP*, Archaeopress, Vol.2, 2016, pp. 45-52.
- [Sch89] Schweingruber F. H. (1989) *Tree Rings. Basics and Applications of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland.
- [Soh] Sohbat R., Murray A.S., Chapot M.S., Jain M., Pederson J. (2012) Optically stimulated luminescence (OSL) as a chronometer for surface exposure dating, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, Vol. 117, Nr. B9, 2012, B09202.



- [Son89] Sonninen, E., Erametsa, P. and Jungner, H., 1989. Dating of mortar and bricks: an example from Finland. *Archaeometry: proceedings of the 25th international symposium*, 99-107.
- [Ste13] Stella G., Fontana D., Gueli A.M., Troja S.O. (2013) Historical mortars dating from OSL signals of fine grain fraction enriched in quartz, *Geochronometria*, Vol. 40, Nr. 3, 2013, pp. 153-164.
- [Urb15] Urbanova P., Hourcade D., Ney C., Guibert P. (2015) Sources of uncertainties in OSL dating of archaeological mortars: The case study of the Roman amphitheatre “Palais-Gallien” in Bordeaux, *Radiation Measurements*, Vol. 72, Nr. 1, 2015, pp. 100-110.
- [Vaf07] Vafiadou A, Murray AS, Liritzis I. (2007) Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating investigations of rock and underlying soil from three case studies, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 34, Nr. 10, pp. 1659–1669.
- [Van91] Van Strydonck M., Dupas M. (1991) The classification and dating of lime mortars by chemical analysis and radiocarbon dating: a review, en: W.H. Waldren, J.A. Ensenyat, R.C. Kennard (eds.) *2nd Deya International Conference of Prehistory: recent developments in western Mediterranean prehistory: archaeological techniques, technology, and theory*, Tempus Reparatum, Oxford, pp. 5-43.
- [Win06] Wintle A.G., Murray A.S. (2006) A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols, *Radiation Measurements*, Vol. 41, pp. 369-391.