


Química arqueológica. Una visión general de las tecnologías utilizadas durante la última década

Archaeological chemistry. An overview of the technologies used during the last decade

Diego Vargas ¹

Franklin Vargas ²

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas, Venezuela^{1,2}

dv.archaeo@gmail.com¹

vargas2212@gmail.com²

Fecha de recepción: 27/11/2024

Fecha de aceptación: 09/04/2025

Pág: 199 – 211

DOI: 10.5281/zenodo.18163586

Resumen

La química arqueológica se ocupa del análisis químico de las pruebas materiales obtenidas en los yacimientos arqueológicos. Recientemente, ha crecido hasta incluir materiales orgánicos, biológicos e inorgánicos. El análisis de cerámicas, pigmentos, textiles, materiales de construcción y desechos en contextos arqueológicos contribuyen a la reconstrucción histórica. La interacción entre química y arqueología, por extraño que parezca, rara vez se destaca como un campo de estudio separado, sino que se expresa en cada proceso de elucidación y restauración de fragmentos de investigación arqueológica. Este ensayo describe y discute principalmente la relación entre la química y la arqueología, y la importancia de sus técnicas experimentales, con el fin de obtener la máxima información sobre los diversos materiales que constituyen el patrimonio arqueológico universal. A pesar de que se trata de un área de investigación transdisciplinaria.

Palabras clave: antropología, arqueología, arqueometría, química analítica, restauración.



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Abstract

Archaeological chemistry is concerned with the chemical analysis of material evidence recovered from archaeological sites. Recently, it has come to include organic, biological and inorganic materials. The analysis of ceramics, pigments, textiles, construction materials and waste in archaeological contexts contribute to historical reconstruction. The interaction between chemistry and archaeology, strange as it may seem, is rarely highlighted as a separate field of study, but is expressed in each process of elucidation and restoration of fragments of archaeological research. This work mainly describes and discusses the relationship between chemistry and archaeology, and the importance of its experimental techniques, in order to obtain maximum information about the various materials that constitute the universal archaeological heritage. Although this is a transdisciplinary research area.

Keywords: Anthropology, archaeology, archaeometry, analytical chemistry, restoration.

Introducción

La arqueometría es el estudio de los materiales arqueológicos, basándose en metodologías analíticas procedentes de distintas disciplinas: química, geología, biología, entre otras. Es una rama reciente de las ciencias aplicadas utilizada para el diagnóstico de obras de arte de todas las épocas y estilos, proporciona contenidos adecuados y útiles para la conservación y preservación del patrimonio cultural. Además, esos contenidos han evolucionado en los últimos años. De este modo, los Congresos Internacionales de Arqueometría han abierto sus puertas a la sección de biomateriales desde el celebrado en 1996 en Urbana (Illinois, EEUU), aunque con un predominio de análisis de ADN, de isótopos estables o identificación de residuos como resinas o productos alimenticios, antraecológicos o arqueozoológicos en su vertiente paleoambiental (Montero et al., 2007). Los antecedentes de la arqueometría se remontan a las aportaciones de la geología, al análisis de materiales arqueológicos desde 1720, con el estudio microscópico de un fragmento de roca de Stonehenge. Asimismo, la microscopia también fue empleada a fines del siglo XIX para confirmar el origen local en Grecia de mármoles y cerámicas de Santorini. En México, en 1892, Ordóñez ya estudiaba obsidiana prehispánica con el uso de la microscopía (Gilson y Luciene, 2012; Howell y Vandenabeele, 2012).

Los primeros estudios petrográficos sistemáticos fueron realizados por Shepard en 1936, logrando la caracterización de cerámica de la región de Pecos. Simultáneamente con el estudio de piezas arqueológicas, se llevó a cabo un importante desarrollo en los campos de la física y la

química a finales del siglo XIX, con el descubrimiento de los rayos X (1895) y la radiactividad (1896), y hasta mediados del siglo XX, con el diseño de espectrómetros para medir fluorescencia y espectrometría de masas de los elementos químicos, entre otros tantos descubrimientos, que posibilitaron su aplicación desde finales de la década de los 50 en el campo de la arqueología.

Es significativo que se desarrolle un enfoque holístico y un diálogo sostenido entre arqueometristas y arqueólogos. Este enfoque, se logra mediante la ubicación de arqueometristas dentro de los departamentos de arqueología, con la supervisión conjunta de los estudiantes de doctorado y la plena participación de los técnicos en las excavaciones arqueológicas. De esta manera, pueden participar como socios iguales, en cada etapa del proyecto. Desde la formulación del problema y el diseño de la investigación, pasando por la recolección de muestras y el examen científico, hasta la interpretación de los datos y la publicación final. La arqueometría se encuentra en la interfaz entre las humanidades/ciencias sociales (por ejemplo, antropología, arqueología e historia del arte) y las ciencias naturales (por ejemplo, química, geología, bioquímica, geografía, física, etc.). Además de aplicar métodos analíticos para resolver cuestiones específicas en un proyecto de investigación particular, el desarrollo de nuevas técnicas se incluye en esta amplia área de investigación.

En el campo de la “arqueometría” diversas especialidades pueden distinguirse resolviendo una amplia gama de problemas. Por ejemplo, es posible utilizar técnicas de prospección y teleobservación para evaluar el subsuelo. Las ciencias de la conservación se superponen en parte con la arqueometría, así como la exploración analítica de objetos. Esto puede ser considerado una investigación arqueológica, pero los aspectos prácticos de la restauración de un artefacto generalmente no están incluidos en esto.

Fluorescencia de rayos x

La fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (ED-XRF) es una técnica multi-elemental, simultánea y no destructiva usada en la identificación de elementos químicos de las cerámicas. Por ello asume una gran importancia en el estudio de objetos artísticos, arqueológicos y patrimoniales en general en los que, además de su análisis y la consiguiente extracción de la información que pudiesen aportar, se persigue y pretende su conservación. En general, la caracterización química de los fragmentos puede proporcionar información útil sobre el origen de la materia prima, la calidad del revestimiento o indicios de la ocurrencia de pinturas, auxiliando a los estudios arqueológicos. Su objetivo es verificar la existencia de vestigios de pintura en los fragmentos, comprobar si existe algún tipo de tratamiento diferente en sus caras en relación con la pasta de la cerámica, construir gráficos bidimensionales para comprobar la similitud entre los elementos químicos en los fragmentos de la misma o de diferentes estratigrafías y cuantificar algunos de ellos, lo cual compone la pasta del muestreo recogido (Ikeoka et al., 2012; Iucci et al., 2010).

En cuanto a los estudios de caracterización, la técnica dominante para obtener información sobre la composición de la muestra es XRF (Fluorescencia de Rayos X). Esta técnica se basa en la interacción de los rayos X con el material a estudiar. Los materiales inorgánicos cuando se exponen a rayos X primarios, producen rayos X secundarios o fluorescentes que se analizan. Todos los elementos excepto el hidrógeno y el helio pueden producir rayos X secundarios. Además, los rayos X primarios provienen de varias fuentes, como un tubo, un sincrotrón o un isótopo radiactivo (principalmente Am-241). Estos rayos X secundarios son únicos para cada elemento, por lo que el espectro XRF tiene varios picos. La intensidad de cada pico se correlaciona con la cantidad de presencia del elemento en el artefacto. La resolución del instrumento depende de su fuente. En particular en microscopía electrónica de barrido, espectrometría de rayos X y catodoluminiscencia, donde se utilizan materiales de referencia para calibrarlo, comprobar y controlar la fiabilidad de los resultados (Chapoulie y Del-Solar, 2018, en Chapoulie et al. (2018)).

El análisis XRF es un método no destructivo, no invasivo y puede aplicarse a compuestos inorgánicos. Un equipo portátil permite al usuario realizar mediciones in situ en el sitio de excavación o en un museo, en artefactos que no pueden retirarse de su espacio de almacenamiento (Liritzis et al., 2020). Para analizar un pequeño detalle de un artefacto se utiliza un MicroXRF, y en el caso de áreas en pinturas o manuscritos un MacroXRF permite determinar la distribución espacial de elementos químicos en grandes superficies, lo que ayuda a los investigadores a inferir la presencia de ciertos pigmentos o mezclas en toda la superficie de una obra de arte (Ricciardi et al., 2016).

Difracción de Rayos X

Mediante los análisis XRD se puede medir con precisión la proporción de cada elemento presente dentro de la muestra. El estudio cualitativo de los minerales se ha vuelto mucho más conveniente desde el advenimiento de las técnicas de difracción de rayos X (Thomas, 2013). Los geólogos pueden usar XRD para realizar estudios de la tierra y explorar vastas regiones geográficas en la búsqueda de nuevos minerales. Una buena inversión debería centrarse en la creación y dotación de personal de centros especializados con orientación arqueométrica prioritaria. Los esfuerzos de investigación se concentran principalmente en la asignación de proyectos que solicitan servicios de análisis, y apenas se destinan fondos para una exploración básica orientada a mejorar la calidad de los datos y a comprender su alcance. Como, por ejemplo, el valor explicativo en función de las condiciones de recogida y procesos de formación del registro arqueológico del que proceden. Por otra parte, la oferta de servicios se está convirtiendo en obligatoria para los centros de investigación, que necesitan justificar sus inversiones de equipamiento y su desempeño. Aunque la disponibilidad para los estudios en arqueometría está aumentando, no está acompañada de la correspondiente exploración en esta área. Es necesario reorientar la investigación arqueológica, plantear nuevas perspectivas y buscar formulaciones al objeto de estudio de la arqueología.

En los últimos 30 años se han observado nuevos avances en esta esfera. Las principales cuestiones relacionadas con los hallazgos arqueológicos, como la naturaleza de los descubrimientos, cuándo, con qué fin, cómo y dónde se produjeron, revelan la necesidad de estudios arqueométricos. En este contexto, la arqueometría cerámica es importante a la hora de dilucidar las características de producción y, por tanto, la tecnología y el progreso de las civilizaciones, porque los productos de terracota generan una parte significativa de los hallazgos descubiertos en las excavaciones y/o análisis arqueológicos.

La difracción de rayos X (XRD) es la única técnica que permite obtener información de manera precisa y no destructiva, como la composición química, la estructura cristalina, el tamaño de los cristales, la deformación de redes, la orientación preferida y el espesor de las capas. La XRD es una de las técnicas más convenientes utilizadas en arqueometría cerámica y también para otros tipos de loza, ya que la determinación de minerales proporciona un conocimiento sustancial sobre las materias primas utilizadas en la producción. Esta información también podría utilizarse para los estudios de procedencia en arqueometría (junto con la composición química que se revelaría mediante diversas técnicas como la fluorescencia de rayos X, la espectrometría de absorción atómica y la de plasma acoplado inductivamente al espectrómetro de masas, entre otras).

Esta técnica, por su alta sensibilidad, permite determinar elementos que se encuentran en muy baja concentración y así cuantificar las pequeñas diferencias que pudiesen existir dentro de las arcillas. El análisis XRD puede medir con precisión la proporción de cada elemento presente dentro de la muestra. Se utiliza convenientemente en arqueometría de cerámica, y también para otros tipos de loza. Aquí la determinación de minerales proporciona un conocimiento sustancial sobre las materias primas utilizadas en su producción.

Termoluminiscencia (TL)

La TL se basa en el supuesto de que todos los objetos absorben la radiación ambiental natural en trampas de energía estructurales. Estas se vacían cada vez que el artefacto se calienta por encima de una temperatura crucial o se expone a la luz solar. Calentando el artefacto en condiciones controladas y midiendo la energía almacenada en estas trampas (los electrones atrapados escapan en forma de luz), un arqueometrista puede determinar la última vez que se calentó este objeto. Se aplica a varios materiales de origen arqueológico o geológico, como cerámica, sedimentos y suelos calentados, hornos, y se expande a otros asientos marinos, pedernales y rocas (principalmente granitos, areniscas y calcitas) (Liritzis, Galloway y Hong, 1997; Liritzis, Guilbert et al., 1997; Liritzis et al., 2020).

La primera aplicación se realizó en vasijas de cerámicas griegas en 1960. Esta se basó en la medición de la luminiscencia que se almacena en minerales de cuarzo. Desde entonces se han

estudiado las propiedades físicas de los materiales a datar y se han sugerido diversas técnicas de datación, en función de la preparación de las muestras y del tamaño de los granos de cuarzo utilizados. Zimmerman sugirió la técnica de grano fino, que utiliza tamaños de 1 a 8 μm con precisión de $\pm 3\%$, y la técnica de granos grandes de circón (Sutton y Zimmerman, 1976) con $\pm 15\text{-}20\%$ de exactitud (Seeley, 1975).

ICP-MS (Plasma Acoplado Inductivo – Espectrometría de Masas)

La muestra se atomiza e ioniza a temperaturas muy altas. A diferencia de otras técnicas de análisis, ICP-MS analiza la masa de iones de esta, en lugar de las emisiones de átomos excitados. Es bastante eficiente en la producción de iones positivos y por lo tanto se utiliza en la discriminación de isótopos elementales y límites de detección muy bajos (Thomas, 2013). El método se aplica en diversos materiales, cerámica, vidrio, obsidiana, metálicos (Artoli y Canovaro, 2020), huesos, pigmentos, objetos de arte (Gehres y Querré, 2018).

FTIR (Transformada de Fourier – Espectroscopía Infrarroja)

El análisis FTIR se basa en la vibración natural que tienen los átomos bajo enlaces covalentes. La molécula permanece quieta, pero los átomos cambian entre sí. Si una molécula ha sido expuesta a radiación infrarroja con una frecuencia igual a la vibración natural, esta absorbe energía. De hecho, este tipo de análisis implica la interacción de la radiación con vibraciones fundamentales moleculares, por lo que se incluye en la categoría de técnicas analíticas de espectroscopia vibracional. Cuando la muestra se irradia con un haz infrarrojo (IR cercano o medio), las moléculas comienzan a absorber esta radiación y cambian los niveles de energía vibratoria molecular. Esta técnica se puede utilizar para la identificación sencilla de compuestos moleculares o incluso para una determinación cualitativa y cuantitativa completa. Ejemplos notables de su uso son la caracterización de pigmentos (Silva et al., 2018, en Chapoulie et al. (2018)), el análisis de artículos históricos (Zotti et al., 2008), la evaluación de artefactos paleolíticos (Cârciumaru et al., 2012) y otros materiales arqueológicos.

Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es un tipo de técnica vibracional, basada en la dispersión inelástica de luz monocromática procedente principalmente de láseres monocromáticos. Cuando el rayo láser monocromático interactúa con las moléculas de una muestra, éste se dispersa y se desplaza. Este desplazamiento (*Raman Shift*) es único para cada tipo de moléculas, lo que da como resultado un espectro de huellas dactilares de cada composición química. Se diferencia del FTR en la forma en que se transfiere la energía a las moléculas. Aquí, la muestra se irradia con un rayo láser de infrarrojos visual o cercano. El fotón incidente tiene una energía más alta que la del estado vibratorio de la molécula y, por lo tanto, una parte de esta es absorbida, lo que genera una vibración molecular y la energía escariada se dispersa

como un nuevo fotón con una frecuencia reducida. Al igual que FTIR, la espectroscopía Raman se puede utilizar para análisis cualitativos y cuantitativos. Tanto Raman como FTIR deben usarse de forma complementaria para una caracterización completa de los modos vibratorios de una molécula. La espectroscopía Raman tiene varias aplicaciones en arqueología, como el análisis de arte rupestre, identificación de pigmentos, líticos, textiles, resinas y residuos orgánicos (Van der Weerd et al., 2004).

Por otra parte, la espectroscopía Raman ha sido utilizada para la caracterización de los pigmentos en los diseños. Se aplica a la superficie exterior de los fragmentos, así como a los cortes estratigráficos, para los que se ha utilizado un espectrómetro comercial LabRAM HR UV-Vis-NIR. La fuente de energía comúnmente utilizada es de 514 nm (Ar⁺ láser 0.03 mW-1), diámetros de 3 μm -20 μm . La técnica usada en superficies cerámicas y sobre micromuestras es no destructiva, con el fin de evitar el calentamiento y la consecuente degradación de la muestra; la potencia del láser se puede mantener baja.

Análisis isotópico

Los estudios isotópicos constituyen un campo de investigación en crecimiento a nivel mundial, debido a la amplia gama de temas que cubren, de los cuales sólo algunos se analizan en los párrafos siguientes. El enfoque isotópico del pasado humano ha sido utilizado por los arqueólogos desde los años 1970-80, inicialmente para la reconstrucción paleodietética realizado por DeNiro, con fines de trazar antiguas rutas de movilidad (DeNiro y Epstein, 1981). Debido a su importancia y al amplio alcance científico que cubre, el análisis de isótopos estables se ha convertido hoy en día en una subdisciplina propia (Bogaard y Outram, 2013). Los arqueólogos utilizan tradicionalmente esta técnica para investigaciones sobre dieta y movilidad (Silva-Pinto, et al. 2018, en Chapoulie et al. (2018)).

La variación química en el tejido duro representa variaciones en la ingesta alimentaria, la nutrición y las enfermedades, pero también en factores ambientales, revelando lugares de residencia y patrones de migración (Katzenberg, 2008). La investigación contemporánea sobre isótopos estables también ha comenzado a emplear sofisticados análisis estadísticos. Froehle, Kellner, y Schoeninger crearon un modelo multivariado para reconstruir la dieta humana, ampliando el de carbono anterior al agregar valores de nitrógeno del colágeno óseo al análisis (Froehle et al., 2012).

Fernandes y colaboradores en el 2015 utilizaron un modelo bayesiano para predecir con mayor precisión la fuente de proteína dietética en consumidores individuales (Fernandes et al., 2015). Por el término isótopos entendemos a las formas alternativas de ciertos elementos químicos que tienen números similares de protones y electrones en sus núcleos, pero difieren en su número de protones. Los isótopos estables, a diferencia de los inestables o radiactivos, no se desintegran con el tiempo. El análisis isotópico incluye el método de exploración masiva

de carbono (C), nitrógeno (N), azufre (S) y el recientemente explorado Zinc (Zn) y análisis incremental de dentina. El desglose de las proporciones de isótopos de carbono estables ($\delta^{13}C$) proporciona información sobre el consumo de las plantas; el nitrógeno ($\delta^{15}N$) refleja la ingesta de proteína animal.

Los análisis de azufre estable ($\delta^{34}S$) en un enfoque multi-isotópico brindan información sobre la ingesta de alimentos marinos y de agua dulce, mientras que el Zn se utiliza recientemente como un indicador del consumo de proteína animal (Jaouen et al., 2017). El análisis incremental de la dentina dental en el que se miden cortes consecutivos de ésta para determinar los valores isotópicos de C y N revela variaciones en las dietas infantiles (Beaumont y Montgomery, 2016; Beaumont et al., 2015), así como en las prácticas de lactancia y destete.

A diferencia del hueso, la dentina primaria no se remodela, proporcionando información sobre cambios radicales a corto plazo en la dieta que luego puede utilizarse para responder preguntas más detalladas. El método registra períodos específicos de escasez de alimentos y, por lo tanto, permite vincularse cronológica o causalmente a eventos históricos mencionados en registros escritos. Las proporciones de isótopos de Estroncio (Sr) que se encuentran en los dientes y huesos humanos reflejan directamente la composición del agua, las plantas y los animales consumidos, que a su vez reflejan la constitución fundamental de una región geográfica, por ejemplo (Slovak y Paytan, 2012). Al tener en cuenta los rangos isotópicos geoespecíficos, es posible evaluar la movilidad (Buzon et al., 2011).

Se han realizado análisis de las proporciones de isótopos de Estroncio (Sr) en casos seleccionados arqueológicamente. Estos datos pueden rastrear con precisión específica la movilidad de cada generación. Debido al hecho de que la composición isotópica del azufre también está determinada por el lecho rocoso local subyacente y las deposiciones atmosféricas, los isótopos de S también se utilizan en estudios de movilidad. Por lo tanto, una correlación de C , N , S y Sr puede ayudar a rastrear individuos al detectar si los datos reflejan una verdadera dieta marina o más bien un valor atípico debido a la migración (Vika, 2009). Es necesario reconstruir completamente una comprensión sólida de las formaciones geológicas junto con la biodisponibilidad de estroncio en cada sitio, antes de que alguien pueda ser identificado efectivamente como no local. El Sr rara vez identificará un origen único de un individuo no local, lo que puede restringir el método bajo ciertas condiciones.

Los isótopos de carbono también entran en la cadena alimentaria cuando los herbívoros consumen plantas, y los isótopos de oxígeno al consumir agua meteórica y de la dieta. Al examinar la proporción de isótopos $^{12}C/^{13}C$, es posible determinar si los animales comían predominantemente plantas $C3$ o $C4$. Las posibles fuentes de alimentos $C3$ incluyen arroz, tubérculos, frutas, nueces y muchas verduras, mientras que las fuentes de alimentos $C4$ incluyen el mijo y la caña de azúcar. Este proceso finaliza con la muerte del organismo; a partir de este momento los isótopos ya no se acumulan en este, sino que sufren degradación. Para obtener

mejores resultados, el investigador necesitaría conocer los niveles originales o una estimación de los mismos en el momento de su muerte.

Ejemplo: Estudios de Otzi

Las técnicas aplicadas y los materiales medidos incluyen: a) datación por radiocarbono (^{14}C) de ropa, arcos de madera y huesos (Bonani et al., 1994; Kutschera y Rom, 2000). b) Fluorescencia de rayos X (XRF) del cabello que revela rastros de cobre y arsénico, lo que implica su participación en la pirotecnología temprana de la fundición de cobre (Artoli y Canovaro, 2020) Radiografía de rayos X de todo su cuerpo que descubre la fatal flecha de pedernal en su hombro trasero izquierdo y otras lesiones (Macko et al., 1999) bioarqueología utilizada para decodificar la estructura genética del Hombre de Hielo a través del ADN, así como carbono, oxígeno, nitrógeno.

El análisis isotópico de estroncio en sus dientes y huesos demostró su origen en el sur de los Alpes (Italia), mientras que había comido tres comidas durante el último día, incluida una comida final aproximadamente dos horas antes de ser asesinado. Los métodos de ionización térmica (TIMS), plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y espectrometría de masas de gases incluyeron relaciones de isótopos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, para revelar el origen y el comportamiento de migración del Hombre de Hielo. Las muestras analizadas incluyen esmalte dental, huesos y contenido de su intestino, los cuales representan diferentes etapas ontogenéticas de desarrollo (Kutschera y Müller, 2003; Macko et al., 1999; Rollo et al., 2002), e) palinología del polen contenido en los alimentos consumidos por Ötzi, junto con otras pruebas paleopatológicas, los colegas pudieron reconstruir su agitado itinerario en las horas previas a su muerte y definieron el incidente de estas afinales de primavera/principios de verano. Así como el entorno arqueobotánico (Bortemschlager y Oeggl, 2000); f) reconstrucción virtual del Hombre de Hielo, mostrando cómo estaba equipado para las duras temperaturas de las altas montañas y su vestimenta. La información extremadamente significativa obtenida de estos análisis arqueométricos ha tenido un impacto en el turismo cultural a través del aumento del número de visitantes en el Tirol del Sur y especialmente en el museo Otzi.

Conclusiones

El uso de análisis arqueométricos para el estudio de la cerámica arqueológica es una metodología consolidada que facilita la caracterización y clasificación de esta clase de material con datos provenientes de las ciencias naturales, que cruza con la información de origen arqueológico. Esta técnica se ha extendido a los análisis petrográficos para la identificación de minerales presentes en las pastas cerámicas. Este tipo de investigación permite elucidar la procedencia de los conjuntos cerámicos y las características tecnológicas usadas en el diseño de ellos. En muchos casos, los resultados del análisis de cerámicas de yacimientos cercanos pueden ser infructuosos en cuanto a poder extraer conclusiones que pudieran relacionarlos o

diferenciarlos unos con otros. Ello requiere el uso de otras técnicas más precisas y sensibles que detecten elementos específicos y con presencia menor en las muestras. Por ejemplo, se realiza caracterización usando análisis por activación neutrónica y sobre los resultados se aplican técnicas estadísticas para buscar evidencias de relaciones entre las muestras clasificadas previamente (Aldazabal et al., 2010).

El material que resulta de un pretratamiento, es envasado en ampollas de cuarzo para su irradiación, junto con patrones y materiales para control de calidad. Esta técnica, por su alta sensibilidad, permite determinar elementos que se encuentran en muy baja concentración y así cuantificar las pequeñas diferencias que pudiesen existir dentro de las arcillas, tendiendo a una clasificación más específica de la materia prima utilizada.

No hay duda de la enorme cantidad de informes y datos que pueden extraerse del registro arqueológico hoy día y de las posibilidades de estudio y documentación del mismo con las técnicas disponibles. Esa información resulta básica en la demostración y clarificación de las hipótesis arqueológicas. Por tanto, el futuro inmediato de la arqueometría va a depender de la actitud más o menos crítica que la propia comunidad arqueológica tome hacia las aproximaciones de base experimental, la cual va a decidir en buena medida la clase de datos que se van a generar y el valor de los mismos en las interpretaciones y síntesis arqueológicas de las próximas décadas.

La arqueometría es una disciplina internacional científicamente establecida que investiga cuestiones científicas del patrimonio cultural; es una ciencia multidisciplinaria que desarrolla investigaciones y resuelve problemas arqueológicos. Con la ayuda de esta materia interdisciplinaria se descubren nuevos campos inexplorados, paisajes políticos, culturales y sociales, y se cubren vacíos científicos; porque la ciencia, aunque dividida en subgrupos, es unificada e indivisible. Los resultados de la arqueometría consisten en datos gráficos y estadísticos que simplifican y facilitan la posibilidad de comparar muestras culturales y recuperar la máxima información desde su microescala, obteniendo así conclusiones seguras, que pueden ser utilizadas globalmente por investigadores, científicos y funcionarios gubernamentales. Esto redundará en la difusión de la información y la globalización de la ciencia, el diálogo científico y administrativo, la promoción de las funciones administrativas y la conveniencia de los ciudadanos a un trato justo y adecuado.

Referencias

- Aldazabal, V., Silveira, M., y Micaelli, A. (2010). La cerámica del sitio Alero Las Mellizas, Lago Triful, Provincia de Neuquén. *Anales de Arqueología y Etnología*, 63-64, 177-195.
<https://bdigital.uncu.edu.ar/7442>

- Artoli, G., y Canovaro, C. (2020). Lia of prehistoric metals in the central mediterranean area: a review. *Archaeometry*, 62(1), 53-85.
- Beaumont, J., y Montgomery, J. (2016). The Great Irish Famine: Identifying Starvation in the Tissues of Victims Using Stable Isotope Analysis of Bone and Incremental Dentine Collagen. *PLoS ONE*, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160065>
- Beaumont, J., Montgomery, J., Buckberry, J., y Jay, M. (2015). Infant mortality and isotopic complexity: New approaches to stress, maternal health, and weaning: Infant Mortality and Isotopic Complexity. *American Journal of Physical Anthropology*, 157, 441-457. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22736>
- Bogaard, A., y Outram, A. (2013). Palaeodiet and beyond: stable isotopes in bioarchaeology. *World Archaeology*, 45(3), 333-337. <https://doi.org/10.1080/00438243.2013.829272>
- Bonani, G., Ivy, S., Hajdas, I., y Niklaus, T. (1994). Ams. 14 C Age Determinations of Tissue, Bone and Grass Samples from the Ötztal Ice Man. *Radiocarbon*, 36(2), 247-250. <https://doi.org/10.1017/S0033822200040534>
- Bortenschlager, S., y Oeggl, K. (2000). *The Iceman and his Natural Environment*. Springer Vienna, 4. ISBN: 9783211826607.
- Buzon, M., Conlee, C., y Bowen, G. (2011). Refining oxygen isotope analysis in the Nasca region of Peru: An investigation of water sources and archaeological samples. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21, 446-455. <https://doi.org/10.1002/oa.1151>
- Cârciumaru, M., Ion, R., Nițu, E., y Ștefănescu, R. (2012). New evidence of adhesive as hafting material on Middle and Upper Palaeolithic artefacts from Gura Cheii-Râșnov Cave (Romania). *Journal of Archaeological Science*, 39(7), 1942-1950. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.016>
- Chapoulie, R., Sepulveda, M., Del-Solar, N., y Wright, V. (2018). *Arqueometría. Estudios analíticos de materiales arqueológicos*. Institut français d'études andines, Universidad de Tarapacá, Université Bordeaux Maigne, ISBN (Print version): 978-612-4358-02-9. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.12740>
- DeNiro, M., y Epstein, S. (1981). Influence of the Diet on the Distribution of Nitrogen Isotopes in Animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 341-351.
- Fernandes, R., Grootes, P., Nadeau, M., y Nehlich, O. (2015). Quantitative diet reconstruction of a Neolithic population using a Bayesian mixing model (FRUITS): The case study of Ostorf (Germany). *American Journal of Physical Anthropology*, 158(2), 325-340.
- Froehle, A., Kellner, C., y Schoeninger, M. (2012). Multivariate carbon and nitrogen stable isotope model for the reconstruction of prehistoric human diet. *American Journal of Physical Anthropology*, 147, 352-369. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21651>
- Gehres, B., y Querré, G. (2018). Analysis of mica inclusions using LA-ICP-MS: A new approach for sourcing raw material of ceramics. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 21, 912-920. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.018>
- Gilson, V., y Luciene, D. (2012). Arqueometría: Mirada histórica de una ciencia en desarrollo. *Revista CPC, São Paulo*, 13, 107-133.

- Howell, E., y Vandenabeele, P. (2012). *Analytical Archaeometry. Selected Topics* (H. Edwards, Ed.). The Royal Society of Chemistry RSC. ISBN: 978-1-84973-162-1.
- Ikeoka, R., Appoloni, C., Parreira, P., Fabio, L., y Bandeira, A. (2012). PXRF and multivariate statistics analysis of pre-colonial pottery from northeast of Brazil. *X-Ray Spectrometry*, 41, 12-15. <https://doi.org/10.1002/xrs.1378>
- Iucci, E., Volzone, C., Morosi, M., y Zagorodny, N. (2010). Aporte del análisis textural por porosimetría de mercurio a la caracterización de la cerámica ordinaria del sitio El Molino (Dpto. de Belén, Catamarca). En *La arqueometría en Argentina y Latinoamérica*. ISBN 978-950-33-0849-3 (pp. 67-72).
- Jaouen, K., Herrscher, E., y Balter, V. (2017). Copper and zinc isotope ratios in human bone and enamel. *American Journal of Physical Anthropology*, 162(3), 491-500.
- Katzenberg, M. (2008). Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history. En M. A. Katzenberg y S. R. Saunders (Eds.), *Biological Anthropology of the Human Skeleton, Second Edition. Chapter 13*. John Wiley & Sons, Inc.
- Kutschera, W., y Müller, W. (2003). Isotope language of the Alpine Iceman investigated with AMS and MS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 204, 705-719. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00491-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00491-9)
- Kutschera, W., y Rom, W. (2000). Ötzi, the prehistoric Iceman. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 12(22), 164-165. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)01196-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)01196-9)
- Liritzis, I., Galloway, B., y Hong, G. (1997). Single aliquot dating of ceramics by green light stimulation of luminescence from quartz. *Nuclear Instruments and Methods B*, 132, 457-467.
- Liritzis, I., Guilbert, P., Foti, F., y Schvoerer, M. (1997). The Temple of apollo (Delphi) strengthens new thermoluminescence dating method. *Geoarchaeology International*, 12(5), 479-496.
- Liritzis, I., Laskaris, N., Vafiadou, A., Karapanagiotis, I., Volonakis, P., Papageorgopoulou, C., y Bratitsi, M. (2020). Archaeometry: an overview. *Scientific Culture*, 6(1), 49-98. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3625220>
- Macko, S., Lubec, G., Teschler, M., Andrusevich, V., y Engel, M. (1999). The Ice Man's diet as reflected by the stable nitrogen and carbon isotopic composition of his hair. *The FASEB Journal*, 13(3), 559-562. <https://doi.org/10.1096/fasebj.13.3.559>
- Montero, I., García, M., y López, E. (2007). Arqueometría: cambios y tendencias actuales. *Trabajos de Prehistoria*, 64(1), 23-40. <https://doi.org/10.3989/tp.2007.v64.i1.92>
- Ricciardi, P., Legrand, S., Bertolotti, G., y Janssens, K. (2016). Macro X-ray fluorescence (MA-XRF) scanning of illuminated manuscript fragments: potentialities and challenges. *Microchemical Journal*, 124, 785-791.
- Rollo, F., Ubaldi, M., Ermini, L., y Marota, I. (2002). Ötzi's last meals: DNA analysis of the intestinal content of the Neolithic glacier mummy from the Alps. *Anthropology*, 99(20), 12594-12599. <https://doi.org/10.1073/pnas.192184599>

- Seeley, M. (1975). Thermoluminescent dating in its application to archaeology: A review. *Journal of Archaeological Science*, 2(1), 17-43. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(75\)90044-8](https://doi.org/10.1016/0305-4403(75)90044-8)
- Slovak, N., y Paytan, A. (2012). Applications of Sr isotopes in archaeology. Handbook of environmental isotope geochemistry, advances in isotope geochemistry. *Springer Berlin Heidelberg*, 1, 743-768.
- Sutton, S., y Zimmerman, D. (1976). Thermoluminescent dating using zircon grains from archaeological ceramics. *Archaeometry*, 18(2), 125-134.
- Thomas, R. (2013). *Practical Guide to ICP-MS*. CRC Press. 3rd Edition. <https://doi.org/10.1201/b14923>
- Van der Weerd, J., Smith, G., Firth, S., y Clark, R. (2004). Identification of black pigments on prehistoric Southwest American potsherds by infrared and Raman microscopy. *Journal of Archaeological Science*, 31(10), 1429-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.03.008>
- Vika, E. (2009). Strangers in the grave? Investigating local provenance in a Greek Bronze Age mass burial using $\delta^{34}\text{S}$ analysis. *Journal of Archaeological Science*, 36, 2024-2028.
- Zotti, M., Ferroni, A., y Calvini, P. (2008). Microfungal biodeterioration of historic paper: Preliminary FTIR and microbiological analyses. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 62(2), 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.01.005>