



Métodos analíticos aplicados al estudio de artefactos metálicos provenientes de ambientes subacuáticos

Javier Reyes Trujeque¹, Helena Barba-Meinecke², Mayra Manrique Ortega¹, Isabel Silva León¹

Introducción

Un metal, es por definición una estructura simple que, a temperatura ambiente puede ser sólido, buen conductor de calor y electricidad, maleable y con brillo característico. Cuando los metales se combinan, forman aleaciones, mejorando sus propiedades físico-mecánicas, motivo por el cual suelen utilizarse para fabricar diferentes objetos. Sin duda alguna, el descubrimiento de los metales y el desarrollo de la metalurgia constituyó un salto cuantitativo en la historia de la humanidad (Askeland et al, 2010).

La elaboración de objetos de metal fundido fue desarrollada por las culturas del Viejo y Nuevo Mundo en diferentes momentos. A la llegada de los europeos al continente americano en el siglo XV existía ya una amplia tradición metalúrgica, enfocada principalmente en la confección de joyería, ornamentos y utensilios artesanales. Después de la conquista y colonización hispánica, los métodos para la extracción y fundición de metales en América se enriquecieron con los aportes tecnológicos del viejo continente, derivando en un intenso intercambio trasatlántico por más de tres siglos de materias primas (oro, plata y cobre) y objetos manufacturados como orfebrería, numismática, herramientas, utensilios, entre otros enseres de uso cotidiano.

Una parte importante de la historia de los metales se encuentra en los ambientes subacuáticos. En los mares y océanos existen innumerables pecios, yacimientos arqueológicos que son piezas

1. Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural del Centro de Investigación en Corrosión (LANCIC-CICORR), Universidad Autónoma de Campeche.

2. Oficina Península de Yucatán, Subdirección de Arqueología Subacuática (Sede Centro INAH-Campeche).

de un rompecabezas histórico de actividades marítimas en la época virreinal, entre ellas el intercambio comercial de bienes a través de rutas peligrosas de navegación, esto debido a las fuerzas de la naturaleza como las corrientes marinas, bajos, arrecifes y fenómenos hidrometeorológicos, o bien por los conflictos políticos entre las naciones y la piratería que asolaban naves, puertos y mares (Fernández et al, 2014). Inevitablemente, muchas embarcaciones con sus preciados cargamentos, incluyendo todo tipo de artefactos metálicos, junto con sus pasajeros y tripulación terminaron en el fondo del mar, formando contextos que hoy son objeto de estudio para la arqueología subacuática y otras disciplinas como la ciencia de los materiales.

El estudio del patrimonio metálico

La Subdirección de Arqueología Subacuática del Instituto Nacional de Antropología e Historia (SAS-INAH), ha desarrollado por más de cuatro décadas importantes proyectos para la identificación y registro de pecios en aguas del Golfo de México y Caribe Mexicano, recuperando un buen



Figura 1. Piezas metálicas provenientes de un pecio, exhibidas en el Museo de Arqueología Subacuática (MARSUB), Fuerte de San José el Alto, ciudad de San Francisco de Campeche.

número de artefactos metálicos (Reyes et al, 2021; Barba et al, 2020). Entre ellos destacan piezas de artillería, municiones, instrumentos náuticos, elementos estructurales de los navíos como: clavos, pernos, recubrimientos de aleación de cobre, así como de joyería y objetos de uso cotidiano (Figura 1). El estudio de estos elementos no es fácil, dada su naturaleza, las condiciones ambientales de su entorno y su estado de conservación; además, una vez extraídos de su contexto subacuático, los metales suelen presentar un acelerado proceso de corrosión si no se estabilizan y controlan adecuadamente para su resguardo, ya sea en bodegas de bienes culturales o en espacios para su puesta en valor, como museos y salas de exhibición.

Muchas veces, los criterios de conservación se definen a partir del diagnóstico de su estado de deterioro, lo que requiere el uso de métodos analíticos para evaluar y comparar modificaciones en las propiedades físicas y químicas de una aleación metálica. Así mismo, los estudios analíticos soportan interpretaciones arqueométricas que

permiten identificar tecnologías de fabricación, interpretar las condiciones de uso y determinar la importancia cultural de los bienes metálicos en función de su contexto histórico y cultural (Neft et al, 2013).

El estudio de los bienes culturales requiere del empleo de métodos de evaluación que no originen cambios en la composición química del objeto de estudio, ni modificaciones permanentes en sus propiedades físicas dado su importante valor histórico, por lo que no se puede poner en riesgo su integridad. Es necesario, por tanto, desarrollar protocolos específicos para el manejo de las piezas y su estudio. Estos protocolos deben considerar entre otros aspectos lo siguiente:

Naturaleza de la muestra: si es un material, orgánico, inorgánico, o si se requiere información química elemental o molecular,

Condiciones de almacenamiento y exhibición, así como la disponibilidad de transportar la muestra al laboratorio o analizarla directamente en su sitio de resguardo, lo que conlleva al empleo de equipos de medición portables,

El uso de métodos de evaluación no invasivos o mínimamente invasivos: de manera tal que la señal analítica pueda ser medida sin entrar en contacto directo con las muestras,

Evaluar la posibilidad de tomar (retirar) una muestra representativa para el análisis, y de no serlo, emplear un método de medición de carácter no destructivo que evite modificaciones físicas y químicas en el objeto bajo estudio.

Desde el punto de vista químico, existe una gran cantidad de métodos analíticos que pueden ser empleados para el estudio de los materiales metálicos, considerando los aspectos previamente descritos.

Los materiales metálicos, debido a su propia naturaleza sufren deterioro por corrosión, el cual es un proceso electroquímico. Su consecuencia final es la formación de una película de óxido sobre su superficie, la cual puede ser una capa compacta de propiedades protectoras que disminuye la corrosión, o por el contrario mostrar una estructura porosa que permite la difusión de agentes ambientales hacia el metal, acelerando el proceso corrosivo y, por consiguiente, de características no protectoras. En ambientes subacuáticos, los depósitos calizos se mezclan con los productos de corrosión, creando condiciones incluso más agresivas para la estructura metálica.

Un protocolo analítico para el estudio de artefactos metálicos puede comprender los siguientes aspectos:

Evaluación megascópica.

Consiste básicamente en hacer un registro de las piezas metálicas empleando técnicas fotográficas para describir el

aspecto general de la aleación, su color, presencia de productos de corrosión, depósitos e incrustaciones marinas y otros aspectos de deterioro perceptibles a simple vista.

Evaluación microscópica.

Permite obtener información general sobre la condición superficial del objeto metálico, de su textura y de la distribución estratigráfica de los productos de corrosión, así como de la microestructura de la matriz metálica que está directamente relacionada con sus tecnologías de fabricación (Figura 2). Entre sus variantes se tienen Microscopía Óptica (MO), Microscopía Digital, Microscopía Óptica Metalográfica y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (Arenas et al, 2009).

Análisis espectroscópico.

Incluye el uso de una amplia gama de métodos analíticos que miden modificaciones en la estructura de los enlaces químicos cuando absorben energía. Son considerados métodos de huella digital, ya que la señal analítica que miden son características de los enlaces asociados a la estructura de los compuestos químicos, por lo que no hay dos compuestos de diferente composición que produzcan la misma señal analítica (Aguilar Melo et al, 2019).



Figura 2. Equipo portátil para análisis mediante espectroscopía Raman, instalado en el Museo de Arqueología Subacuática (MARSUB).

Los métodos espectroscópicos pueden medir respuestas analíticas de estructuras moleculares en función de su naturaleza orgánica o inorgánica, y son de gran utilidad para el estudio de los metales, pues permiten estudiar la composición química y procesos de formación de los productos de corrosión, así como evaluar los mecanismos de corrosión que causan el deterioro de los artefactos metálicos. Entre las técnicas de análisis molecular se incluyen Espectrocolorimetría, Espectroscopía

UV Visibles, Espectroscopía de Infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR) y Espectroscopía Raman.

Los métodos espectroscópicos también son útiles para analizar la composición elemental de diversos tipos de muestras, algo de especial utilidad en el caso de metales, ya que los elementos químicos además de señalar la naturaleza de una aleación, proporcionan información sobre el uso de microaleantes empleados para mejorar las propiedades físico-mecánicas de la aleación, y cuyo uso en diferentes periodos históricos nos permiten establecer una línea de tiempo sobre el desarrollo tecnológico para la fabricación de artefactos metálicos. Así mismo, permiten identificar indicadores ambientales asociados al proceso de deterioro. Entre las técnicas de análisis elemental se tienen la Fluorescencia de Rayos X (FRX) y la Espectroscopía de Emisión de Rayos X (EDS), generalmente acoplada a un microscopio electrónico de barrido (Figura 3).

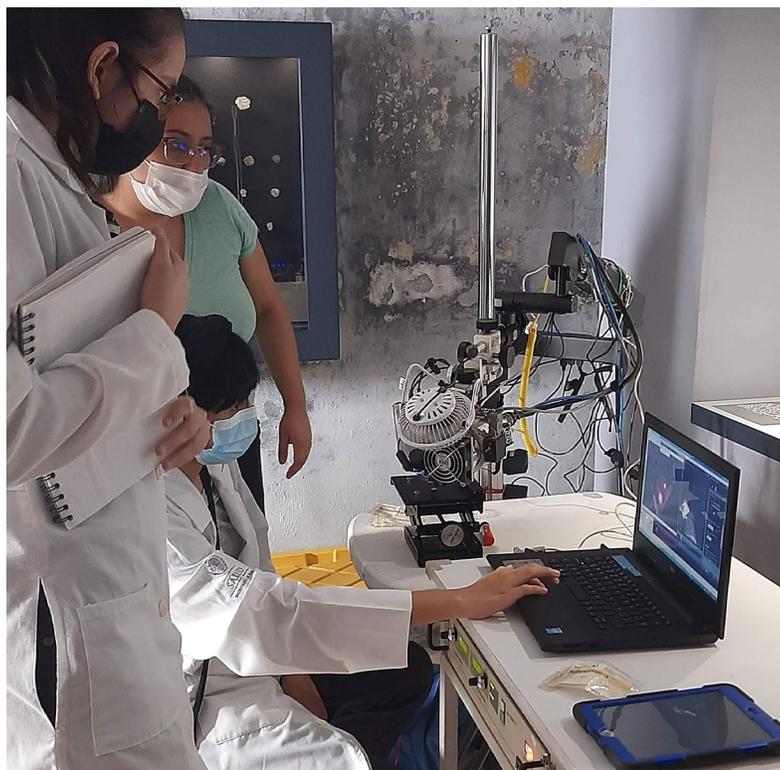


Figura 3. Sistema portátil de espectroscopía fluorescencia de rayos X usado para el análisis de piezas metálicas en el Museo de Arqueología Subacuática (MARSUB).

Análisis cristalográfico.

Una de las técnicas de análisis mineralógico de mayor utilidad en el estudio de artefactos metálicos es la Difracción de Rayos X (XRD), que como su nombre lo dice, mide el ángulo en el cual un haz de radiación de rayos X es difractado cuando pasa a través de una estructura cristalina. Este ángulo también constituye una huella digital del compuesto que es analizado, por lo que es ideal para el estudio de estructuras cristalinas. En este sentido, los productos de corrosión son películas de minerales de neoformación cuya estructura cristalina se forma durante la degradación electroquímica de la superficie metálica causada por agentes ambientales.

Consideraciones finales

Para realizar un estudio arqueométrico se requiere de una infraestructura científica altamente especializada, con personal capacitado y disponibilidad de métodos de medición que preferentemente cumplan con dos características fundamentales: que su uso no signifique daños en las piezas analizadas y que los equipos puedan ser portables para realizar estudios in situ.

A pesar de que estas condiciones parecen difíciles de cumplir, en años recientes la Universidad Autónoma de Campeche, a través del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural del Centro de Investigación en Corrosión (LANCIC-CICORR), ha creado un espacio especializado para el estudio del Patrimonio Cultural, que basa sus capacidades analíticas sobre el estudio de bienes culturales, desarrollando protocolos de investigación basados en el empleo de las técnicas arqueométricas descritas en este documento (Figura 4). Esto ha favorecido una asociación estratégica con la SAS-INAH, cuyo enfoque principal es el estudio de artefactos metálicos recuperados de pecios que se encuentran en aguas nacionales. Con ello se busca llevar a cabo estudios científicos de calidad que permitan interpretar la historia de los contextos arqueológicos subacuáticos a través de los objetos que los componen, al tiempo de establecer estrategias para su conservación a largo plazo y en concordancia con lo establecido en la Convención UNESCO 2001 sobre la protección del Patrimonio Cultural Subacuático (UNESCO, 2001).



Figura 4. Equipo de trabajo en el MARSUB durante el análisis de piezas metálicas provenientes de pecios rescatados por la Oficina península de Yucatán de la Subdirección de Arqueología Subacuática, INAH.

Agradecimientos

Esta contribución fue posible gracias a la colaboración con el Proyecto Integral para la Protección, Conservación, Investigación y Difusión del Patrimonio Cultural Sumergido de la Península de Yucatán, Sureste Mexicano (PIPY), de la SAS-INAH, y CONACYT, LANCIC LN314886.

Referencias

Aguilar-Melo V., Mitrani A., Casanova-González E., Manrique-Ortega M., Griselda Pérez-Ireta G., Ruvalcaba-Sil J. L., Tovalín-Ahumada A., Moscoso-Rincón, J., dro Sesheña-Hernández A., Lozada-Toledo J. (2019) "Molecular and X-ray Spectroscopies for Noninvasive Characterization of Mayan Green Stones from Bonampak, Chiapas". *Applied Spectroscopy*. 73, 9, pp. 1-13. DOI:10.1177/0003702819848478. Thousand Oaks, California, U.S.A.

Askeland D., Fulay P., Wrigth W. (2010). *The Science and Engineering of Materials*. Sixth Edition, pp 7-10. U.S.A.: ENGAGE Learnig Group.

Arenas J., Contreras, J., Ruvalcaba, J (2009). "Microstructural Study of Gilded Copper Artifacts from Chichen Itza Cenote". *Proceedings 2nd Latin-American Symposium of Physical and Chemical Methods in Archaeology, Art and Cultural Heritage Conservation and Archaeological and Art Issues in Materials Science*. IMRC 2009, CDMX, México.

Barba-Meinecke, Helena, Junco R., Reyes, J. (2020). "El Tesoro de Alacranes: Estudio Multidisciplinario del Pecio Ancla Macuca, Yucatán". *Arqueología Mexicana*. *Arqueología Subacuática en México* (16) pp. 58-63. CDMX, México: Editorial Raíces-INAH.

Fernández-Montblanc T., Izquierdo A., Bethencourt M. (2014). "Underwater Cultural Heritage risk assessment related to mean and extreme storm events: A modelling case study at the Bay of Cadiz". *Science, Technology and Cultural Heritage*. Rogerio Candeler (Ed.), pp. 83-88. London, U.K.: Taylor and Francis Group.

López Garrido, Pedro. (2012). "Procesos de transformación natural de contextos arqueológicos sumergidos en la costa de Campeche, Golfo de México". *Arqueología Marítima en México*. *Estudios interdisciplinarios en torno al Patrimonio Cultural Sumergido*. Vera Moya (Coord.), pp. 141-190. CDMX, México: INAH.

Neff, D., Reguer, S., Dillmann P. (2013). "Analytical Techniques for the Study of Corrosion of Metallic Heritage Artefacts: from Micrometer to Nanometer Scales". *EFC book, N° 65*. *Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Artefacts*. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing.

Reyes J., Silva, S., Pérez K., Hernández, K., Barba-Meinecke H. (2021). "El Análisis del Patrimonio Cultural en la Arqueología Subacuática". *Glifos*, 8 (27), pp. 668-75. San Francisco de Campeche, México: Centro INAH Campeche.

UNESCO. (2001). *La Convención de la UNESCO sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático*. París, Francia: UNESCO. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000126065_spa