

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

SECYR >>
Servicio de Conservación, Restauración y Estudios Científicos del Patrimonio Arqueológico



MINISTERIO DE CULTURA Y DEPORTE

ARQVA

Museo Nacional de Arqueología Subacuática



MUSEO
CASA DE LA MONEDA

UAM Universidad Autónoma de Madrid

Anejos nº 6 | 2022

Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras,
Vicerrectorado de Investigación
Universidad Autónoma de Madrid

Cuadernos
de Prehistoria
y Arqueología
de la Universidad Autónoma de Madrid

MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño
(eds.)



Universidad Autónoma
de Madrid

Departamento de Prehistoria y Arqueología
Facultad de Filosofía y Letras
Vicerrectorado de Investigación
Universidad Autónoma de Madrid

Índice

Presentación	15
SESIÓN I. CIENCIA Y TECNOLOGÍAS DE INVESTIGACIÓN DEL PATRIMONIO METÁLICO	
Electrochemical techniques for dating metallic heritage	21
Técnicas electroquímicas para la datación del patrimonio metálico	
ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	
Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal (Sancti Petri, Cádiz)	29
Characterization, diagnosis and conservation of copper ingots from the Arapal Wreck (Sancti Petri, Cadiz)	
ROCÍO MORÓN, MARÍA LLÜISA MATAS, LUIS CARLOS ZAMBRANO, FELIPE CEREZO Y MANUEL BETHENCOURT	
Estrategias innovadoras para la conservación preventiva de los objetos metálicos en colecciones de museos	39
Innovative strategies for the preventive conservation of metallic objects in museum collections	
MARÍA TERESA MOLINA, BLANCA RAMÍREZ, IVÁN DÍAZ Y EMILIO CANO	
Estudio de la efectividad del ácido tánico sobre piezas de hierro arqueológico	47
Study of the effectiveness of tannic acid on archaeological iron pieces	
TANIA PÉREZ TORDERA, ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ Y MONTSERRAT LASTRAS PÉREZ	
Estudio radiográfico de los metales arqueológicos de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz)	55
Radiographic study of the archaeological metals of Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz)	
INMACULADA DONATE, MIRIAM BUESO, ESTHER RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, SEBASTIÁN CELESTINO Y JOAQUÍN BARRIO	
Extrapolación de técnicas no habituales en la reproducción de elementos metálicos asociados al Patrimonio Documental	65
Extrapolation of unusual techniques in the reproduction of metallic elements associated with Documentary Heritage	
ÍÑIGO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, JUAN BERMEJO-SOLER, ESTÍBALIZ LAMA OCHOA Y M ^a DOLORES RODRÍGUEZ LASO	

Aportación de la técnica FIB-FESEM-EDX al estudio del patrimonio en metal	71
Contribution of FIB-FESEM-EDX technique to the study of Metal Heritage	
CARLA ÁLVAREZ ROMERO, CAROLINA MAI CEROVAZ, MARÍA TERESA DOMÉNECH-CARBÓ, ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ, MILAGROS BUENDÍA ORTUÑO Y TRINIDAD PASÍES OVIEDO	
Nueva metodología para la eliminación de la corrosión en patrimonio metálico arqueológico: buffers, quelantes, geles y emulsiones	81
New methodology for the elimination of corrosion in archaeological metal heritage: buffers, chelators, gels and emulsions	
SILVIA MARÍN ORTEGA	
Medida directa de potenciales de circuito abierto como técnica no invasiva de evaluación del grado de corrosión de objetos arqueológicos	87
Direct measurement of open circuit potentials as a non-invasive technique for evaluating the degree of corrosion of archaeological objects	
MARÍA AMPARO PEIRÓ RONDA Y ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	
Restauración virtual y recreación de uno de los jarros de bronce de la estancia del banquete (S-1) del yacimiento de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz), los medios digitales como continuidad de la restauración física	97
Virtual restoration and recreation of one of the bronze jugs from the banquet room (S-1) from the Casas del Turuñuelo site (Guareña, Badajoz), digital media as continuity of the physical restoration	
BÁRBARA MARTÍN GÓMEZ, ESTHER RODRÍGUEZ GONZÁLEZ Y SEBASTIÁN CELESTINO	
Estudio arqueológico y restauración de espuelas bajomedievales de Asturias	107
Archaeological study and restoration of late medieval spurs in Asturias	
SILVIA PÉREZ-DIEZ, BEATRIZ GARCÍA-ALONSO, LUIS J. FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, LARA LOBO, NEREA BORDEL, MAITE MAGUREGUI, NOELIA FERNÁNDEZ-CALDERÓN Y ALEJANDRO GARCÍA ÁLVAREZ-BUSTO	
Sesión II. MONEDAS Y PATRIMONIO NUMISMÁTICO: ESTUDIOS, PROYECTOS, RESTAURACIONES Y MUSEOS	
El Museo Casa de la Moneda. La colección de moneda islámica	117
The Museo Casa de la Moneda. The Islamic Coin Collection	
ALBERTO J. CANTO GARCÍA	
Composición y características de la acuñación de dos cecas hispanorromanas: análisis aplicados a las monedas de <i>Caesar Augusta</i> (Zaragoza) y <i>Emerita Augusta</i> (Mérida)	129
Composition and characteristics of the coinage of two Hispano-Roman mints: analysis applied to the coins of <i>Caesar Augusta</i> (Zaragoza) and <i>Emerita Augusta</i> (Merida)	
CRUCES BLÁZQUEZ CERRATO, MARTA GÓMEZ BARREIRO, JOSÉ MANUEL COMPAÑA PRIETO, JUAN GÓMEZ BARREIRO, CARMELO FERNÁNDEZ IBÁÑEZ, RUFO MARTÍN MATEO E INÉS PUENTE ORENCH	

<p>Patrimonio Industrial en el Museo de la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre de Madrid. Su conservación 139</p> <p>Industrial Heritage in the Museum of the Fábrica Nacional de Moneda y Timbre of Madrid. Its conservation</p> <p>SARA MARTÍN DE ANDRÉS Y BEATRIZ RUBIO VELASCO</p>	139
<p>La moneda en las <i>cetariae</i> de <i>Gadir-Gades</i> 149</p> <p>The coin in the <i>cetariae</i> of <i>Gadir-Gades</i></p> <p>ELENA MORENO PULIDO, ALICIA ARÉVALO GONZÁLEZ Y JOSÉ ÁNGEL EXPÓSITO ÁLVAREZ</p>	149
<p>Los criterios de intervención y el análisis científico en la restauración de un conjunto de monedas de plata emirales del yacimiento arqueológico La Ermita del Sacedal, en El Rebollar de El Boalo (Madrid) 159</p> <p>Intervention criteria and scientific analysis in conservation of a set of Emiral silver coins from the archaeological site La Ermita del Sacedal, el Rebollar de El Boalo (Madrid)</p> <p>ANA ISABEL PARDO NARANJO, MARÍA CRUZ MEDINA SÁNCHEZ Y MANUEL BLANCO DOMÍNGUEZ</p>	159
<p>El tesoro de monedas de plata de las taifas del siglo XI hallado en Jaén en 1914: proceso de restauración 167</p> <p>The treasure of silver coins from the taifa of the 11th century found in Jaen in 1914: restoration process</p> <p>ALBERTO J. CANTO GARCÍA, WIOLETA JABŁOŃSKA Y ANA ISABEL PARDO NARANJO</p>	167
<p>Tratamiento de conservación-estabilización aplicado al conjunto numismático recuperado de la Fragata <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i> 177</p> <p>Conservation and stabilization treatment applied to numismatic set recovered from the frigate <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i></p> <p>SOLEDAD DÍAZ MARTÍNEZ</p>	177
<p>Moneda y circulación monetaria en el ámbito minero del reborde meridional de la meseta sur. Un proyecto de investigación en marcha 185</p> <p>Currency and monetary circulation in the mining area of the southern edge of the southern plateau. An ongoing research project</p> <p>MAR ZARZALEJOS PRIETO Y ALICIA ARÉVALO GONZÁLEZ</p> <p>Con la colaboración de: JOAQUÍN BARRIO MARTÍN Y ANA ISABEL PARDO NARANJO</p>	185
<p>Intervención de urgencia de conjunto de monedas y vajilla de bronce de Pompeya. Una restauración de campaña junto al Vesubio 195</p> <p>Urgent intervention of a set of coins and bronze tableware from Pompeii. A campaign restoration next to Vesuvius</p> <p>BETLEM MARTÍNEZ PLA</p>	195
<p>Restauración y conservación de un conjunto de monedas (La Bienvenida) 205</p> <p>Restoration and conservation of a set of coins (La Bienvenida)</p> <p>FRANCISCO DEL PESO ROSADO</p>	205

SESIÓN III. PATRIMONIO METÁLICO ARQUEOLÓGICO

La experiencia de conservar metales: una labor de aprendizaje continuo 213 The experience of preserving metals: a work of continuous learning MARÍA ANTONIA MORENO CIFUENTES	213
Conservación. Propuesta metodológica para un caso práctico en el Pórtico Oriental de Plaza de Armas en <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) 223 Conservation. Methodological proposal for a practical case in the Portico Oriental of the Plaza de Armas in <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) INMACULADA C. MUÑOZ MATUTE Y ALEJANDRA DEL PINO CAMPOS	223
Arqueología y Restauración: un caso práctico en el Pórtico Oriental de la Plaza de Armas de <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) 231 Archaeology and Restoration: A practical example of the Pórtico Oriental of the Plaza de Armas in <i>Madīnat al-Zahrā</i> (Córdoba) MARÍA MUÑOZ MORA, WIOLETA JABŁOŃSKA Y ALEJANDRO UGOLINI SÁNCHEZ-BARROSO	231
Ciudad de México: un entorno excepcional para la corrosión de metales arqueológicos. Estudio de caso 239 Mexico City: an exceptional environment for archaeological metal corrosion. Case study ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO, TERESITA LÓPEZ ORTEGA Y JOSÉ ANTONIO LÓPEZ PALACIOS	239
Conservación y estudio arqueológico de piezas ibéricas y vacceo-romanas de bronce y hierro procedentes de <i>Dessobriga</i> (Palencia) 249 Conservation and archaeological study of Iberian and Vacceo-Roman bronze and iron pieces from <i>Dessobriga</i> (Palencia) ÁGUEDA SÁENZ-MARTÍNEZ, FRANCISCO DEL PESO-ROSADO, ESPERANZA MARTÍN-HERNÁNDEZ Y DAVID EXPÓSITO	249
Decoración incisa bajo siglos de corrosión metálica 257 Incised decoration under centuries of metallic corrosion LUCÍA GUTIÉRREZ GONZÁLEZ	257
El conjunto de estatuillas de bronce de la Tumba n.º 14, Oxirrinco (El-Bahnasa), Egipto 269 The set of bronze statuettes from Tomb no. 14, Oxirrinco (El-Bahnasa), Egypt BERNAT BURGAYA MARTÍNEZ	269
Estado de conservación y metodología de intervención de una selección de bronce del yacimiento Casas del Turuñuelo 279 State of conservation and intervention methodology of a selection of bronzes from the archaeological site Casas del Turuñuelo MARÍA CRUZ MEDINA SÁNCHEZ, MARÍA MUÑOZ MORA Y JOAQUÍN BARRIO MARTÍN	279

Un ataque microbiológico en objetos de hierro de época ibérica: proyecto interdisciplinar de investigación, intervención y conservación preventiva	289
A microbiological attack on iron objects from the Iberian period: interdisciplinary research, intervention and preventive conservation project	
RAMÓN CANAL ROCA, TRINIDAD PASÍES OVIEDO, JAIME VIVES-FERRÁNDIZ SÁNCHEZ, M ^a TERESA DOMÉNECH-CARBÓ, ROSA M ^a MONTES ESTELLÉS, JOSÉ ANTONIO MADRID GARCÍA Y ANTONIO DOMÉNECH-CARBÓ	
Propuesta para la conservación de una amplia colección de objetos arqueológicos de hierro	299
Proposal for the conservation of a wide collection of iron archaeological objects	
LAURA GARCÍA BOULLOSA	
Sistema expositivo en la colección de metales del Museo Foro Romano. Molinete (Cartagena)	309
Exhibition system in the metal collection of the Roman Forum Museum. Molinete (Cartagena)	
IZASKUN MARTÍNEZ PERIS	
Trabajos de conservación-restauración de cuatro tuberías de plomo de la ciudad romana de <i>Baetulo</i> (Badalona). Un caso de estudio interdisciplinar	319
Conservation-restoration work on four lead pipes in the Roman city of Baetulo (Badalona). An interdisciplinary case study	
ANNA BERTRAL ARIAS, ESTHER GURRI COSTA Y SANTIAGO RIERA MORA	
Métodos de limpieza sobre metales arqueológicos procedentes de medios marinos: clavos de hierro originarios del Pecio de Urbieta (Gernika, Vizcaya)	329
Cleaning methods on archaeological metals from marine environments: iron nails from the Urbieta Wreck (Gernika, Vizcaya)	
SARA MASTRAL-MOLINOS, AINARA ZORNOZA-ÍNDART, LAURA GARCÍA Y GIORGIO STUDER	
SESIÓN IV. PATRIMONIO METÁLICO HISTÓRICO, ARTÍSTICO Y RELIGIOSO	
Acciones de Conservación de Patrimonio Militar de Artillería: de la intervención mínima a la intervención funcional	341
Actions for the Conservation of Artillery Military Heritage: from minimal intervention to functional intervention	
ANAHÍ MEYER RIERA Y JAIME FERREIRA REGALADO	
Construcción de decisiones para la producción y restauración de «El caballito»	351
Decision making for the production and restoration of “El caballito”	
JANNEN CONTRERAS VARGAS	

Estudio de la colección de objetos metálicos de la Villa Rica de la Veracruz (Veracruz) 361
 Study of the collection of metallic objects of the Villa Rica de la Veracruz (Veracruz)

ÁNGEL ERNESTO GARCÍA ABAJO, JANNEN CONTRERAS VARGAS,
 DANIELA LIRA PACHECO Y GABRIELA PEÑUELAS GUERRERO

Patologías y restauración del grupo escultórico de la fuente de las Tres Gracias de Málaga 371
 Pathologies and restoration of a sculpture group in the fountain Tres Gracias at Malaga

DANIEL MORALES-MARTÍN, FERNANDO AGUA, MANUEL GARCÍA-HERAS,
 RAFAEL RUIZ DE LA LINDE Y M^a ÁNGELES VILLEGAS

Intervención sobre una empuñadura de una espada ropera procedente del sitio histórico de Panamá Viejo (Panamá): estado de conservación, análisis y restauración 379
 Intervention in the hilt of a rapier sword at the historic site of Panamá Viejo (Panama): state of conservation, analysis and restoration

BÁRBARA MARTÍN GÓMEZ, CRISTINA CABELLO BRIONES, MANUEL BLANCO DOMÍNGUEZ,
 M^a CRUZ MEDINA SÁNCHEZ, INMACULADA DONATE CARRETERO, JOAQUÍN BARRIO MARTÍN
 Y MARCELINA GODOY VALENCIA

Os pratos em estanho do Rio Arade, estratégias de conservação 387
 Tin dishes from Rio Arade, conservation strategies
 ANDREIA ROMÃO

SESIÓN V. PATRIMONIO METÁLICO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO, INDUSTRIAL Y URBANO

Documentación, conservación y restauración de una fuente escultórica de fundición: La diosa Fortuna de Daimiel (Ciudad Real) 395
 Documentation, conservation and restoration of a foundry sculptural fountain: The goddess Fortuna de Daimiel (Ciudad Real)

M^a ISABEL ANGULO BUJANDA, MANUEL M. BLANCO DOMÍNGUEZ Y MIGUEL TORRES MAS

Diagnóstico del estado de conservación de un conjunto de cepos de plomo de procedencia subacuática: uso de geles rígidos de agar-agar para su intervención 407
 Diagnosis of the conservation status of a set of lead traps from underwater origin: use of rigid agar-agar gels for their intervention

ELISA FERNÁNDEZ TUDELA, LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA Y MANUEL BETHENCOURT

Estudio, caracterización y diagnóstico de una fuente de peltre de procedencia subacuática depositada en el Museo de Cádiz 417
 Study, characterization and diagnosis of a pewter dish of underwater provenance deposited in the Cadiz Museum

MANUEL JESÚS GRUESO JIMÉNEZ Y LUIS CARLOS ZAMBRANO VALDIVIA

<p>La conservación de las culebrinas de bronce recuperadas de la fragata <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i></p> <p>The conservation of the bronze culverins recovered from the <i>Nuestra Señora de las Mercedes</i> frigate</p> <p>JUAN LUIS SIERRA MÉNDEZ</p>	427
<p>La Estación Central de Santiago de Chile. Arquitectura metálica y vanguardia decimonónica</p> <p>The Central Station of Santiago de Chile. Metallic architecture and nineteenth-century avant-garde</p> <p>MARÍA PAZ VALENZUELA BLOSSIN</p>	437
<p>Las jardineras tipo Monier en las Galerías Punta Begoña. Degradaciones y proceso de conservación</p> <p>The Monier-type planters in the Punta Begoña Galleries. Degradation and conservation process</p> <p>JUAN BERMEJO-SOLER, ÍÑIGO GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, ESTÍBALIZ LAMA OCHOA, NAGORE PRIETO-TABOADA Y M^a DOLORES RODRÍGUEZ LASO</p>	445
<p>Los inicios de la industria del hierro en Madrid en el siglo XIX: cerramientos de edificios reseñables</p> <p>The beginnings of the iron industry in Madrid in the 19th century: remarkable building enclosures</p> <p>SUSANA LÓPEZ GINESTAL Y SOLEDAD DÍAZ MARTÍNEZ</p>	453
<p>Restauración del Patrimonio Metálico Urbano: la escultura de la Flama Rotaria de la ciudad de Valencia</p> <p>Restoration of the Urban Metallic Heritage: the sculpture of the Rotary Flame of the city of Valencia</p> <p>PABLO GRIÑENA</p>	461
<p>Westfalia Manteigueira com Centrifugadora: desafios e soluções de conservação</p> <p>Westfalia Butter with Centrifuge: challenges and conservation solutions</p> <p>ANDREIA ROMÃO</p>	471

Caracterización, diagnóstico y conservación de los lingotes de cobre del Pecio Arapal (Sancti Petri, Cádiz)

Characterization, diagnosis and conservation of copper ingots from the Arapal Wreck (Sancti Petri, Cadiz)

ROCÍO MORÓN

Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH)
Universidad de Cádiz. Edificio Simón Bolívar
Avenida Duque de Nájera, 16. 11002 Cádiz
romorongonzalez@gmail.com

FELIPE CEREZO

Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Cádiz
Avenida Doctor Gómez Ulla, 1. 11003 Cádiz
felipe.cerezo@uca.es
<https://orcid.org/0000-0003-0025-1726>

MARÍA LLUISA MATAS

Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico (LEC-PH)
Universidad de Cádiz. Edificio Simón Bolívar
Avenida Duque de Nájera, 16. 11002 Cádiz
marialuisa.matas@uca.es
<https://orcid.org/0000-0002-5684-0290>

MANUEL BETHENCOURT

Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Universidad de Cádiz
Avenida República Saharaui s/n. 11510 Puerto Real (Cádiz)
manuel.bethencourt@uca.es
<https://orcid.org/0000-0002-0488-7097>

LUIS CARLOS ZAMBRANO

Museo de Cádiz
Plaza de Mina, s/n. 11004 Cádiz
luisc.zambrano@juntadeandalucia.es
<https://orcid.org/0000-0002-7456-8147>

Resumen

Se presenta un estudio arqueométrico y diagnóstico sobre 78 lingotes de cobre extraídos en el entorno del islote de Sancti Petri. El estudio epigráfico de algunas inscripciones, con numerales romanos y letras en mayúscula, así como la forma de los sellos, permiten circunscribirlos a la época Romano Imperial. El estudio metalográfico revela una estructura propia de la fabricación por fundición, con huecos en la matriz por la desgasificación producida durante la fusión y posterior enfriamiento del metal, así como la dispersión de inclusiones de óxido de cobre y ausencia de dendritas. Se ha distinguido una pequeña secuencia estratigráfica compuesta por cuprita y carbonatos de cobre. El análisis elemental desvela una aleación de Cu (99,8 %), con Sb, Ag y As como elementos mayoritarios, mostrando coincidencias con lingotes analizados por otros autores y posible origen en la península ibérica. Las alteraciones presentes han dependido de las condiciones en las que cada lingote ha permanecido en el medio, aerobio o anaerobio. Establecidas las alteraciones se han realizado una serie de trabajos encaminados a la conservación y restauración de las piezas.

Palabras clave: lingotes de cobre romanos, técnicas de análisis, diagnóstico, conservación

Abstract

An archaeometric and diagnostic study has been carried out on 78 copper ingots extracted in the surroundings of the islet of Sancti Petri. The epigraphic study of some of the inscriptions, with Roman numerals and capital letters, as well as the shape of the seals, allow us to circumscribe them to the Roman-Imperial period. The metallographic study reveals a structure typical of manufacture by casting, with holes in the matrix due to the degassing produced during the melting and subsequent cooling of the metal, as well as the dispersion of copper oxide inclusions and the absence of dendrites. A small stratigraphic sequence composed of cuprite and copper carbonates has been distinguished. The

elemental analysis, reveals a 99.8 % Cu alloy, with Sb, Ag and As as major elements, showing coincidences with ingots analyzed by other authors with possible origin in the Iberian Peninsula. The alterations products developed have depended on the conditions in which each ingot has remained in the environment, aerobic or anaerobic. Once the alterations were established, a series of works aimed at the conservation and restoration of the pieces were carried out.

Key words: Roman copper ingots, analytical techniques, diagnosis, conservation

1. Introducción

Los minerales cupríferos de la península ibérica han sido explotados desde la Prehistoria, dejando numerosos rastros de evolución en sus procesos de minería y metalurgia. En época romana se explotaron de forma intensiva, alcanzando niveles de producción sólo superados en época industrial (García, 2003). Entre sus evidencias arqueológicas predominan armas, herramientas, adornos, elementos votivos y estatuaria. Destacan también los hallazgos de materia prima en lingotes de cobre, como forma de acumulación de metal para su transporte y comercio, que en numerosas ocasiones se producía a través de las rutas marítimas de la época. Parte de este material terminó en los fondos marinos tras el naufragio de las embarcaciones que lo transportaban. En época romana los hallazgos de lingotes de cobre se producen en el Mediterráneo y costas atlánticas peninsulares, donde la circulación de metales por vía marítima fue muy activa. Ejemplos ampliamente estudiados se encuentran en los pecios de Chipiona, del Cobre, Sud-Lavezzi-2, Maguelone-1 o Planier-2. Si bien muchos de ellos aparecen descontextualizadas tras una extracción no regulada, los estudios arqueométricos y epigráficos revelan como origen principal el sur de la Península, concretamente las minas piríticas del suroeste y de Sierra Morena. A estos ejemplos se unió en 2017 una colección de 78 lingotes procedentes del Pecio Arapal que han dado contenido a este trabajo, cuyo objetivo fue la caracterización de la composición elemental del metal y la identificación de los procesos y productos de alteración que presentaban mediante técnicas que han permitido realizar el estudio arqueométrico y establecer un diagnóstico del estado de conservación y una metodología de intervención que facilite el estudio de las inscripciones y sellos presentes y su futura preservación.

2. Material y método

Los lingotes estaban dispersos en un área de 200 m² en el entorno de la isla de Sancti Petri (Cádiz) entre 7-9 metros de profundidad, en depresiones erosionadas en roca arenisca calcarenita zoomórfica (figura 1), algunos muy concrecionados, otros muy erosionados y también unidos a la roca o enterrados en la arena.

Se han empleado diversas técnicas analíticas en función de la información que se deseaba obtener: microscopía óptica, metalográfica y electrónica de barrido equipada con microanálisis de Rayos X (SEM-EDX), difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de Rayos X (FRX), espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (IPC-MS) o de emisión atómica por chispa (OES). Las muestras destructivas se tomaron del lingote AR-064. Pese a presentar mucha pérdida de material y un diámetro incompleto, contenía la sección estratigráfica completa y representativa de toda la colección.

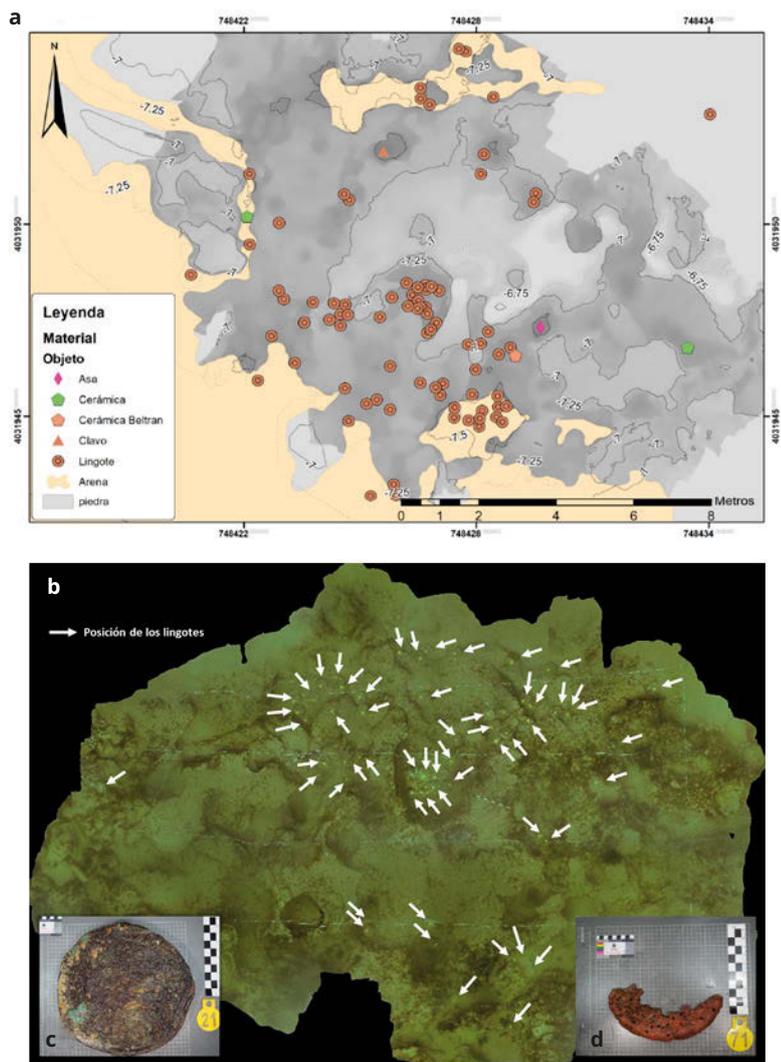


Figura 1. a. Localización de los materiales en el yacimiento en el que se representan los lingotes, los fragmentos de cerámica, un clavo y un asa moderna. b. Fotogrametría del yacimiento donde se aprecian los lingotes (señalados en blanco) dispersos entre la roca arenisca y en el sedimento arenoso. c-d. Diferente estado de los lingotes del Pecio Arapal representados por el lingote AR-012 (c) y AR-71 (d). (Felipe Cerezo)

Figure 1. a. Location of the materials in the site showing the ingots, ceramic fragments, a nail and a modern handle. b. Photogrammetry of the site showing the ingots (marked in white) scattered among the sandstone rock and in the sandy sediment. c-d. Different state of the ingots from the Arapal Wreck represented by ingot AR-012 (c) and AR-71 (d). (Felipe Cerezo)

3. Resultados y discusión

3.1. Descripción de los lingotes

Históricamente la tipología de los lingotes ha ido cambiando con las formas del horno y las lingoterías o la manera más cómoda de transportarlos y almacenarlos. Tylecote (1992) defiende una típica forma planoconvexa, mientras que Arboledas (2005) distingue entre troncocónicos (tipología I) y planoconvexos (tipología II). Los 78 lingotes se adscriben a la Edad Clásica, concretamente a la época Romano Imperial, y se relacionan con la tipología I, encajando en sus dimensiones, pesos, así como en otros aspectos de

su descripción formal. Se ha realizado una clasificación interna, distinguiendo a su vez dos patrones (tipos I.A y I.B) que, estando dentro de la misma tipología, tienen tamaños y perfiles no del todo idénticos. El criterio que se ha seguido para esta clasificación responde a sus dimensiones y formas. Los de tipo I.A tienen mayores dimensiones: diámetro medio de 38 cm, altura no mayor a 8 cm en los mejor conservados y peso medio de 26,2 kg. Los de tipo I.B presentan un diámetro medio de 32,5 cm, altura inferior a 7 cm y peso medio de 20 kg en los mejor conservados. Vallespín (1986) defiende que, a pesar de las diferencias de peso y ancho entre los lingotes, algunos pueden provenir del mismo molde. La sección transversal de sus perfiles puede indicar la forma del molde utilizado en la fundición. La altura de los lingotes va desde los 4 a los 8 cm (sin contar con los que presentan una gran erosión). Tylecote (1992) explica esta diferencia de altura de los lados suponiendo que los moldes fueron excavados en tierra y en pendiente. Las medidas y pesos de los lingotes del Pecio Arapal son muy similares a los de Chipiona y estos a su vez, a los valores de los de Sud-Lavezzi-2 (Domergue y Rico, 2010). Presentan una cara superior o anverso más o menos plana, con aspecto rugoso e irregular, mostrando en algunos casos pequeños orificios y protuberancias. El cobre fundido se vuelve poroso, formando agujeros o cráteres por la salida de burbujas de $H_2S(g)$ cuando el metal se enfría y se contrae (Marechal, 1997; Vallespín, 1986). Estas irregularidades son visibles también en los lingotes del Pecio del Cobre y de Chipiona. El reverso presenta una superficie porosa y áspera. Vallespín defiende que esta superficie se debe a las huellas dejadas por la arena cuando el metal fundido se vierte en un agujero en tierra. Por su parte, Rico *et alii* (2005) definen estas cavidades o alveolos asociados al enfriamiento como *nido de abeja-panal*. En la mayoría se distingue en el anverso una banda exterior lisa, que podría haberse producido por un enfriamiento rápido del metal cuando entra en contacto con el aire, creándose una temperatura diferencial entre el metal superficial y el metal subyacente (Domergue y Rico, 2010). Esta franja, que recorre todo el perímetro, también se aprecia en los lingotes de Plage de la Corniche-6 a Sete (Jezegou *et alii*, 2011). En el caso de los lingotes de Arapal, suponiendo que se trate de un fenómeno producido por el enfriamiento rápido, es posible que todos presentasen esta franja perimetral; pero debido a la erosión solo se aprecia en los mejor conservados, donde también se pueden observar algunas inscripciones. Para Marechal (1997) el aspecto «liso» del borde se explica porque cuando el metal entra en contacto con el molde de cerámica, arena, piedra o metal, en esta zona el metal se enfría más rápido y se «hincha» menos. Se trataría de un proceso físico y no mecánico, porque de otra manera se apreciarían otras marcas y no existiría la rugosidad presente. En los lingotes mejor conservados el borde no es totalmente liso. Probablemente se ha formado por un fenómeno físico de enfriamiento del metal fundido, que produce un replegado de la materia en los bordes, formándose ese aro concéntrico, que se aprovechará para realizar las inscripciones incisas. Mientras, en la zona interior se producen las burbujas que aportan un aspecto rugoso a su superficie.

3.2. Inscripciones y sellos

En un primer examen *de visu* solo se pudieron reconocer inscripciones o marcas en el anverso de algunos lingotes del tipo I.A, apareciendo algunas más sobre sus bordes tras los tratamientos de limpieza en lingotes de ambos tipos. Como se ha indicado las inscripciones incisas suelen aparecer en los bordes o en la franja perimétrica y pueden estar formadas por números o letras mayúsculas. Encontramos ambos tipos de marcas, que se repiten en varios lingotes distinguiéndose letras mayúsculas (R, N, D y A) y numerales romanos (CXX, III, X, XIII) (figura 2), así como otras marcas sin identificar debido al mal estado de la superficie. Los números podrían relacionarse con el peso o valor del lingote o bien con su número en un lote concreto. Mientras, las letras mayúsculas pueden apuntar al productor, dueño de la mina, comerciante o zona geográfica de producción. A falta de un estudio organoléptico, los sellos aparecen en el centro del anverso de los lingotes AR-017 y AR-040 ocultos tras una gruesa concreción. El resto

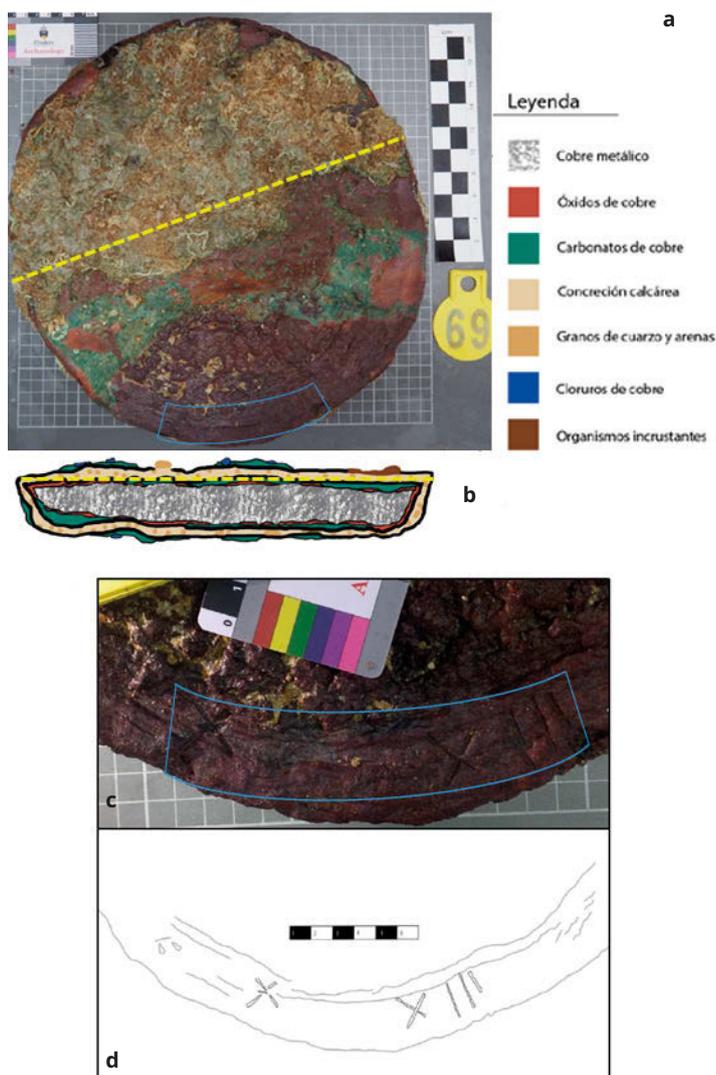


Figura 2. a. Lingote AR17-069, Tipo I.A, con diámetro máximo 43 mm y mínimo de 28,5 mm, altura máxima 6 cm y peso sin limpiar de 21,2 kg. b. Representación de la estratigráfica del lingote AR17-069. c-d. Detalle de la inscripción numeral X y XIII localizadas en el borde perimetral del lingote AR17-069 en su cara anversa. (Rocío Morón)

Figure 2. a. Ingot AR17-069, Type I.A, with maximum diameter 43 mm and minimum diameter 28.5 mm, maximum height 6 cm and uncleaned weight 21.2 kg. b. Stratigraphic representation of ingot AR17-069. c-d. Detail of the numeral inscription X and XIII located on the perimeter edge of ingot AR17-069 on its obverse side. (Rocío Morón)

de los lingotes son anepigráficos, bien porque no se les realizó inscripción, bien porque se ha perdido por los procesos corrosivos-erosivos del medio. Actualmente se está trabajando en esta fase documental.

3.3. Alteraciones

Resulta complicado establecer un único cuadro de alteración al tratarse de un conjunto tan grande, en el que cada lingote permaneció en unas condiciones ambientales singulares, afectado por procesos de alteración diferentes que pudieron ciclarse a lo largo del periodo de exposición al medio marino. Así,

los lingotes responden a varios cuadros de alteración, en unos casos relacionados con un medio aeróbico y en otros con un medio anaeróbico, propios de periodos alternantes de exposición y enterramiento. Además, no presentan un tipo de corrosión uniforme porque la pérdida de superficie metálica no es regular. Sin embargo, sí se puede considerar la erosión como el principal factor de alteración de los lingotes, protagonizada por los sedimentos removidos por las fuertes corrientes y el oleaje de la zona (Bethencourt *et alii*, 2018), que actúan como efecto abrasivo sobre el metal. Los desiguales efectos de la erosión sobre los lingotes, debido a la diferencia en la posición y localización de los mismos en el yacimiento, permite clasificarlos en varios cuadros de alteración en función de los porcentajes de concreción que presentan y de pérdida de materia:

- Grupo de 18 lingotes que no presentan concreción o no llega a cubrir más del 30 % de la superficie. Están erosionados y presentan pérdida de materia en diferentes grados. Se aprecian cráteres y cavidades que disminuyen su resistencia mecánica.
- Grupo de 28 lingotes concrecionados entre el 30-70 % que permanecían parcialmente enterrados, quedando una parte expuesta a un ambiente aeróbico y otra a un ambiente anaeróbico. Dentro de este grupo, se pueden distinguir algunas diferencias. En general, están erosionados y muestran una gruesa capa de concreción (figura 2). También se incluyen los que presentan erosión en toda la superficie, pero que posteriormente han desarrollado una capa de concreción mineral y biológica, debido a las fluctuaciones en el medio de enterramiento, quedando expuestos y enterrados de manera alternativa.
- Grupo de 32 lingotes con una gruesa capa de concreción en el 70-100 % de su superficie, que incorpora piedras, arenas del entorno y distintos tipos de organismos incrustantes. Esta colonización biológica y concreción mineral pudo actuar como una capa protectora, pudiendo llegar a situar al metal en la zona de pasividad del Diagrama de Pourbaix (Bethencourt *et alii*, 2018), pero también distorsiona sus formas y dimensiones reales y oculta la información arqueológica.

Teniendo en cuenta estos datos, algunos lingotes se depositaron inicialmente en medio anaeróbico tras un enterramiento rápido en el sedimento, momento cuando, sobre sus superficies se desarrollarían productos de corrosión (covellita-CuS, calcosita-Cu₂S) de color gris negruzco metálico. Posteriormente, debido a los cambios en la dinámica marina o geomorfología, serían expuestos de nuevo a un medio aerobio y a la erosión mecánica, formándose cuprita (Cu₂O), tenorita (CuO), cloruros de cobre (nantocita-CuCl, atacamita-Cu₂(OH)₃Cl, paratacamita-Cu₂(OH)₂Cl), y carbonatos básicos de cobre (malacquita-CuCO₃·Cu(OH)₂, azurita-Cu₃(CO₃)₂(OH)₂). Probablemente cuando el flujo erosivo fuese intenso, estos productos de corrosión se eliminarían parcial o totalmente, dejando descubierto al metal.

Observando la erosión y concreción *a posteriori* de muchos lingotes, puede plantearse otra hipótesis de deposición. Inicialmente estarían expuestos a flujos intensos de energía que provocarían erosión, para pasar posteriormente a un ambiente menos erosivo que permitiría la formación de óxidos, cloruros, carbonatos y de una capa de concreción mineral y biológica. Estos lingotes se caracterizan por aparecer concrecionados parcial o totalmente pero previamente erosionados, revelando su posición en el sustrato y sintomático de las fluctuaciones que han podido sufrir en periodos de enterramiento-desenterramiento en el sedimento propios de la zona (Bethencourt *et alii*, 2018).

3.4. Análisis composicional y metalográfico

En un análisis crítico de los resultados obtenidos por las técnicas FRX, ICP-MS y OES, concluimos que aquellos basados en IPC-MS, en los que se emplearon patrones normalizados de distintas

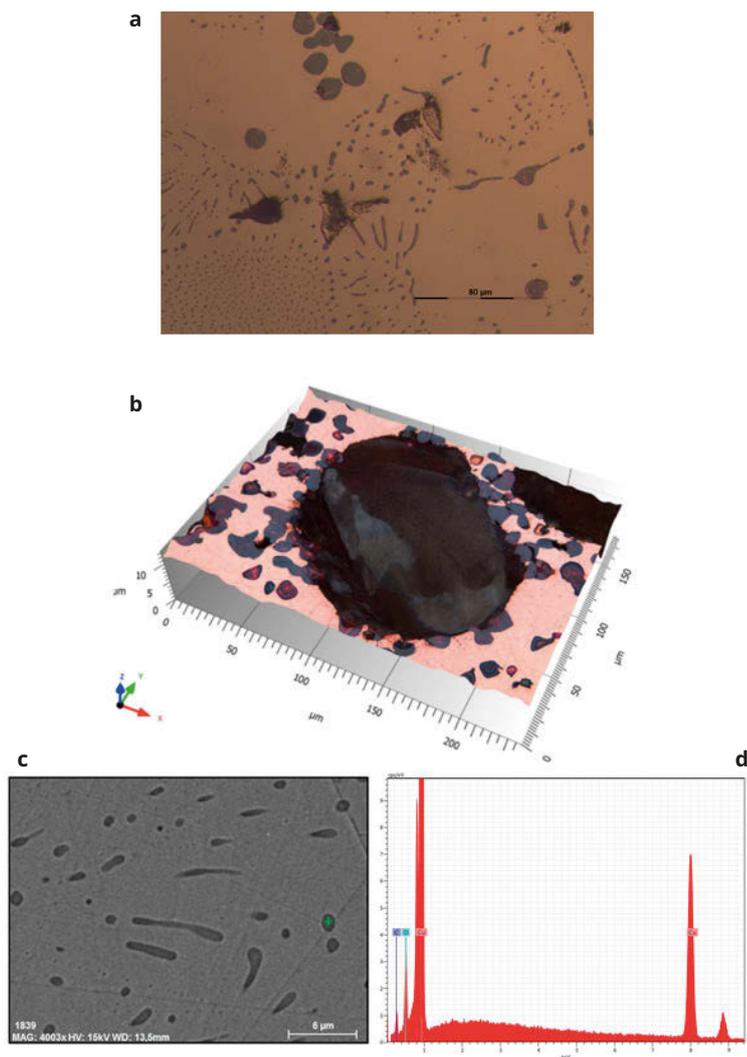


Figura 3. a. Imágenes de la muestra del lingote AR17-064 a 500 X, sin ataque metalográfico. Se aprecian inclusiones de formas globulares y aciculares, así como los límites o bordes de grano. b. Simulación 3D realizada con microscopio metalográfico sobre una inclusión con forma globular presente en la matriz. c-d. Resultado del análisis EDX (d) realizado sobre una inclusión con forma globular observada en SEM a 4003x (c). (Manuel Bethencourt)

Figure 3. a. Images of the AR17-064 ingot sample at 500 X, without metallographic attack. Inclusions of globular and acicular shapes can be observed, as well as the grain boundaries or edges. b. 3D simulation performed with metallographic microscopy on a globular shaped inclusion present in the matrix. c-d. Result of the EDX analysis (d) performed on a globular shaped inclusion observed in SEM at 4003x (c). (Manuel Bethencourt)

aleaciones base Cu, son los representativos. Los elementos mayoritarios en valores promedios fueron Sb (641 ± 60 mg/kg), Ag (183 ± 10 mg/kg) y As (176 ± 13 mg/kg), además de un $99,8 \pm 0,5$ %. Estos resultados muestran coincidencias con los resultados de los análisis de otros lingotes con posible origen en la Península (Plage de la Corniche-6 a Sete, Chipiona, Maguelone y Aljustrel). No obstante, algunos datos deben tomarse con precaución pues dependen de la sensibilidad de la técnica utilizada y el número de réplicas representativas.

La observación bajo microscopio estereoscópico muestra una notable dispersión de formas lenticulares por toda la superficie, a excepción de las capas más externas. Probablemente, estas formas se

correspondan con inclusiones de cuprita (Cu_2O) dispersas por la matriz de cobre, en el interior y en los bordes de granos. También se aprecia una pequeña secuencia estratigráfica en la zona más exterior de la muestra, que puede relacionarse con capas de alteración. La primera capa, más próxima al núcleo metálico, tiene un color morado-rojizo que incorpora cristales de distintos tamaños. Normalmente, la primera capa de alteración que se produce en el cobre es Cu_2O . Sobre esta se encuentra la capa más exterior de tonos verdosos y blancos, en la que también se distinguen distintos tamaños de granos. Esta capa está compuesta por malaquita ($\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$) (Díaz y García, 2011). En algunas zonas dentro de esta capa exterior se aprecian zonas más claras, posibles cloruros de cobre. En general, suelen aparecer en forma de depósitos y no como capa uniforme (Díaz y García, 2011). Esta secuencia revela cómo el cobre metálico sufrió un proceso de oxidación, cubriéndose de una capa de Cu_2O , seguida de una capa de carbonatos de cobre con incorporación de cloruros (CuCl y/o $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) de forma local. Sobre estas capas se desarrolló también una capa de CaCO_3 colonizada con organismos incrustantes, indicando un proceso de alteración propio de medios oxigenados (Bethencourt *et alii*, 2018).

Las imágenes obtenidas con microscopio metalográfico muestran similitudes con la metalografía de un lingote de cobre plano convexo de la Edad de Bronce donde aparecen inclusiones de Cu_2O con ausencia de dendritas (figura 3). También se distingue una microestructura con formas aciculares y nodulares. Además, existen poros de diferente tamaño dispersos por la totalidad de la muestra, que se pudieron observar a través de un perfil de rugosidad superficial aproximado. Este perfil demostró que se trataba de huecos posiblemente producidos por la desgasificación durante la fusión y posterior enfriamiento del metal.

Posteriormente, análisis puntuales en zonas seleccionadas de la muestra mediante SEM-EDX han confirmado estos resultados, revelando la presencia de óxido de cobre sobre las formas globulares (figura 3), y carbonatos de cobre y cloruros sobre el estrato de tonos verdosos. También se pudo distinguir calcio, carbono y silicio, elementos que forman parte de la concreción calcárea, de los sedimentos marinos en la capa más externa y, quizás, de los restos del molde de fundición.

3.5. Conservación

La remoción de las concreciones más duras se realizó con bisturí y microcincel. Posteriormente se realizó una limpieza química con EDTA 5 % en agar-agar y en carboximetilcelulosa y se realizaron ensayos con hexametafosfato 5 % en carboximetilcelulosa. Todas las pruebas se aplicaron a modo de papetas, con control periódico de su efectividad. Los lingotes se estabilizaron posteriormente en sesquicarbonato sódico al 5 %, se neutralizaron en agua desmineralizada, secaron y protegieron.

4. Conclusiones

Se ha realizado la caracterización y diagnóstico de 78 lingotes de cobre hallados en el entorno de la isla de Sancti Petri. La tipología discoidal troncocónica, caracterizada por un lado plano y el otro ligeramente convexo, la media de pesos y las distintas inscripciones representadas por numerales romanos y letras en mayúscula, así como la forma de los sellos similares a otros conjuntos de lingotes de cobre romanos, permiten adscribirlos a la época Romano Imperial.

Las técnicas analíticas revelan una aleación de Cu al 99,8 % con estructura propia de la fabricación por fundición, con huecos en la matriz por la desgasificación producida durante la fusión y posterior enfriamiento del metal, así como la dispersión de numerosas inclusiones de óxido de cobre, con ausencia de dendritas. También, se ha distinguido una pequeña secuencia estratigráfica compuesta

por cuprita y carbonatos de cobre. Tras el diagnóstico inicial sobre las alteraciones presentes (aeróbicas o anaeróbicas en función de su posición en el yacimiento) se han establecido protocolos de conservación habituales.

Agradecimientos

Trabajo realizado en el LEC-PH de la UCA, financiado por FEDER-MICIN EQC2018-004947-P.

Bibliografía

- Arboledas, L. (2005): *Minería y metalurgia romana en el alto Guadalquivir: aproximación desde las fuentes y el registro arqueológico*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., Izquierdo, A., González-Duarte, M.M. y Muñoz-Mas, C. (2018): "Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of UCH". *STOTEN*, 613-614: 98-114.
- Díaz, S. y García, E. (2011): *Técnicas metodológicas aplicadas a la conservación-restauración del patrimonio metálico*. Ministerio de Cultura. Subdirección General del Instituto del Patrimonio Cultural-España.
- García, J. (2003): *El papel de la minería y metalurgia en la Córdoba romana*. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Jezegou, M., Klein, S., Rico, C. y Domergue, C. (2011): "Les lingots de cuivre de l'épave romaine Plage de la Corniche 6 a Sete et le commerce du cuivre hispanique en Mediterranee occidentale". *Revue Archeologique de Narbonnaise. RAN*, 44-Dossier Metallurgie: 57-70.
- Marechal, J.F., (1997). "A propos d'un type nouveau de lingot de cuivre d'époque romaine". *BSNAF*: 383-393.
- Rico, C. y Domergue, C. (2010): "Nuevos documentos sobre el comercio de los metales hispánicos en la época romana. Los lingotes de Chipiona (Cádiz)". *HABIS*, 41: 163-184.
- Scott, D.A. (1991): *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute in association with Archetype Books.
- Tylecote, R. (1992): *A History of Metallurgy*. The Institute of Materials.
- Vallespin, O. (1986): "The Copper Wreck (pecio del Cobre)". *IJNA*, 15.4: 305-322.



MetalEspaña 2020/2021

III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico

Joaquín Barrio Martín
Milagros Buendía Ortuño (eds.)

El volumen 6 de la Serie Anejos a CuPAUAM recoge la publicación de las Actas del III Congreso de Conservación y Restauración del Patrimonio Metálico, *MetalEspaña 2020/2021*. Esta monografía es el resultado de las actividades científicas llevadas a cabo en los tres días de sesiones. En sus páginas se integran, de una manera muy equilibrada entre investigación e intervención, trabajos con unos contenidos multidisciplinarios en su carácter analítico, deontológico y técnico. Con ello se demuestra que la combinación de Ciencia, Tecnología Aplicada y Conservación-Restauración es la mejor manera de abordar la recuperación y cuidado de los objetos que componen el Patrimonio Metálico.

Las Actas que se editan en esta monografía han sido posibles gracias a la implicación y al trabajo conjunto de las tres instituciones organizadoras de *MetalEspaña 2020/2021*: Universidad Autónoma de Madrid (SECYR), la Subdirección General de los Museos Estatales (Museo Nacional de Arqueología Subacuática ARQVA) y la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre (Museo Casa de la Moneda).