



LEC-PH

Laboratorio de Estudios y Conservación
del Patrimonio Histórico

ÍNDICE

1. EL LEC-PH	2
2. MOTIVACIÓN DE LA MEMORIA	2
3. PERSONAL	2
4. ACTIVIDADES	3
4.1. INVESTIGACIÓN	3
4.1.1. Participación en Proyectos de I+D+I solicitados por grupos del PAIDI	3
4.1.2. Participación en publicaciones (Anexo I)	5
4.1.3. Participación en congresos (Anexo I)	6
4.2. TRANSFERENCIA	6
4.3. DIVULGACIÓN	6
4.4. FORMACIÓN	7
4.4.1. Del personal del LEC-PH	7
4.4.2. De alumnado de Doctorado	7
4.4.3. Máster Tutorización de prácticas de empresa	8
ANEXO I. Productividad	
ANEXO II. Algunas Imágenes	

1. EL LEC-PH

La función principal del LEC-PH es ofrecer a los investigadores y profesionales, pertenecientes a la UCA y otras instituciones de investigación y empresas, una serie de servicios que comprenden desde la realización de estudios y análisis del patrimonio hasta la ejecución de proyectos de conservación y restauración del material cultural, histórico y arqueológico, contribuyendo a consolidar el área de especialización de “*El Valor Cultural del Mar*” del **Campus de Excelencia Internacional del Mar** (CEIMAR).

El LEC-PH, Servicio Periférico de Instituto de Investigación Marina INMAR, distribuye su trabajo en dos grandes secciones temáticas, absolutamente complementarias y necesitadas la una de la otra, que definen la denominación del laboratorio: el Laboratorio de Estudio de Materiales, situado en el Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM) y el Laboratorio de Conservación y Restauración de Materiales, emplazado en el Edificio Simón Bolívar.

2. MOTIVACIÓN DE LA MEMORIA

El objetivo de las **memorias de actividades anuales**, en esta ocasión la del año **2023**, es alienar al LEC-PH con los compromisos de transparencia de la UCA, con la finalidad de facilitar a todas las personas interesadas, miembros o no de nuestra comunidad universitaria, el acceso libre, de forma clara y resumida, a la información más relevante de nuestras actividades de investigación, transferencia, divulgación y formación, como garantía de una correcta gestión de los fondos públicos y rendición de cuentas a la sociedad.

Estas memorias son accesibles a través de la página web de LEC-PH (<https://lec-ph.uca.es/>).

3. PERSONAL

Durante 2023 el LEC-PH contó con tres profesionales, uno de plantilla y dos contratadas por distintos programas:

Manuel Bethencourt Núñez. Investigador responsable del LEC-PH. Es Catedrático de Universidad en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica de la Universidad de Cádiz y miembro del grupo del PAIDI TEP-231. Contrato: funcionario de carrea. Contacto: manuel.bethencourt@uca.es.

Elisa Fernández Tutela. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (UGR), Máster en Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico (UPO), Máster en Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Actualmente es doctoranda del programa Historia Arqueología Marítima

Hasta octubre de 2023 es Personal Técnico de Apoyo, logrando en esas fechas la plaza de coordinadora del Departamento de Conservación del Centro de Arqueología Subacuática del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Contrato UCA: laboral, desde 28/04/21 hasta 22/10/23. Contacto: elisa.fernandez.tudela@juntadeandalucia.es.

Marina Goñalons Lapiedra. Contratada con cargo al Programa Garantía Juvenil Quinta y Sexta Fase, y posteriormente Personal Técnico Investigador contratada por Capítulo VI a cargo del proyecto ARQUEOMALLORNAUTA. Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (UPV-EHU). Máster en Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Finalizado su contrato, continúa colaborando con el LEC-PH como profesional autónomo. Contrato UCA: laboral en prácticas, desde 31/03/21 hasta 31/03/23 y laboral, desde 01/06/23 hasta 31/09/23. Contacto: marina.gonalons@uca.es.

Por otro lado, el LEC-PH colabora con numerosos investigadores y grupos de investigación, nacionales y extranjeros. Durante el año 2023 han realizado estancias en el laboratorio el **Dr. Nicolás C. Ciarlo**, investigador adjunto del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina) y la **Dra. Diana Arano Robles**, conservadora-restauradora del Instituto Nacional de Antropología e Historia (México).

4. ACTIVIDADES

El LEC-PH da servicio a distintos grupos de investigación, administraciones públicas y empresas, y también desarrolla su propia labor de investigación, comprometiéndose con cada intervención, apostando por los criterios de adecuación, mínima intervención y mínimo impacto ecológico en sus tratamientos. También se compromete con la puesta en valor la importancia de la formación, difusión y la sensibilización de la sociedad para la preservación y estudio del patrimonio cultural; ofreciendo talleres, apoyo a estudiantes y visitas guiadas a las instalaciones. A continuación, se presentan de forma resumida las actividades llevadas a cabo durante el año 2023.

4.1. INVESTIGACIÓN

4.1.1. Participación en Proyectos de I+D+I solicitados por grupos PAIDI

- **Participación en proyectos de arqueología terrestre**

Necrópolis Megalítica de la Lentejuela (UCA). Este yacimiento es una necrópolis compuesta por más de cinco estructuras megalíticas que pueden encuadrarse entre el Neolítico Final y la Edad del Cobre. Dentro del proyecto (PGI de la Junta de Andalucía, 2022-2027), el LEC-PH ha participado en la elaboración del plan

conservación de estas estructuras y el posible material arqueológico asociado. Investigadores Responsables: Seraffín Becerra, Eduardo Vijande (grupo HUM-440).

Tratamiento del conjunto monetario de San Nicolás (Algeciras) (UCA). Este proyecto contempla la limpieza y estabilización de 106 monedas de aleación de cobre y plata con el objetivo de facilitar la conservación y posterior estudio por parte de los investigadores (Figura 1, Anexo II). Responsable: Alicia Arévalo (grupo HUM-440).

Tratamiento de un lote de 121 monedas de época romana (Granada). Este proyecto contempla la limpieza y estabilización de 121 monedas de aleación de cobre. Responsable: Alicia Arévalo (grupo HUM-440).

Limpieza y estabilización de conjunto de objetos de hierro del yacimiento Haza de Santa Catalina (Sanlúcar de Barrameda, Cádiz). Este proyecto contempla la limpieza y estabilización de diferentes objetos de hierro de procedencia terrestre. Responsable: José Antonio Ruiz Gil (grupo HUM-240).

Trabajos de modelado tridimensional mediante fotogrametría y escáner láser y cartografía temática mediante técnica hiperespectral con medios terrestres y/o aéreos llevados a cabo sobre los restos de un pecio en la Base Naval de La Carraca. Subactividad incluida en la Actividad Arqueológica Puntual "Prospección arqueológica y análisis de muestras en la zona intermareal de los caños de La Carraca". Expt. A-149/22 (1479). Responsable de la subactividad: Manuel Bethencourt Núñez (responsable del LEC-PH; grupo TEP-231).

- **Participación en proyectos de arqueología subacuática**

Arqueomallornauta (UCA). Este proyecto de colaboración entre la Universidad de Barcelona, Universidad de Cádiz, Universidad de las Islas Baleares y el Consell de Mallorca tiene como objetivo analizar el tráfico marítimo en Mallorca en la Antigüedad Tardía a través de los hallazgos subacuáticos. La UCA ha asumido a lo largo de 2023 los tratamientos de conservación de los distintos materiales (Figuras 2/3, Anexo II). Investigador Responsable: Darío Bernal (grupo HUM-440).

Entre las columnas de Hércules, arqueología subacuática de un espacio privilegiado. La Bahía de Algeciras (HERAKLES), Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020 (FEDER-UCA18-107327, Res. UCA/REC/12VPCT/2019). El Proyecto Herakles tiene como objetivo conocer el patrimonio arqueológico y subacuático en el Estrecho de Gibraltar desde la Bahía de Algeciras. Se han podido inventariar más de 150 pecios hundidos, desde el siglo V a.C. hasta la época contemporánea. Durante el 2023 se han realizado los procesos de estabilización y conservación del patrimonio arqueológico fruto del proyecto (Figuras 4/5, Anexo II). Investigador Responsable: Felipe Cerezo (grupo HUM-440).

- **Proyectos de arqueometría**

Vulnerability of Littoral Cultural Heritage to environmental agents: impact of Climate Change (VOLICHE). Plan Estatal, Retos, 01/01/2021-30/12/2023. Ref. PID2020-117812RB-I00.

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la vulnerabilidad del Patrimonio Cultural, tanto subacuático como emergido, las condiciones ambientales actuales y el efecto del impacto del cambio climático en su preservación in situ, estableciendo metodologías innovadoras aplicadas bajo una perspectiva holística, integrando el conocimiento de diferentes disciplinas e incluyendo la experiencia de las distintas partes interesadas y usuarios finales. Investigadores Responsables: Manuel Bethencourt (grupo TEP-231), Tomás Fernández-Montblanc (grupo RMN-205).

4.1.2. Participación en publicaciones (Anexo I)

N.C. Ciarlo*; J. Martí Solano; M. Bethencourt; E. Fernández Tudela; E.J. Toboso Suárez; R. González Gallero y A. Zuccolotto Villalobos. (2023), New remarks on the mid-17th-century gunfounding in Northern Europe: archaeometric analysis of scrap bronze ordnance recovered from a Dutch merchant vessel lost off Cadiz, Spain, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 15 (136). Revista JCR: Q1.

S. Solana Rubio, A. Salas Romero, F. Cerezo Andreo, R. Gallero, J. Rengel, L. Rioja, J. Callejo, M. Bethencourt*, Comparison between the employ of a multibeam echosounder on an unmanned surface vehicle and the traditional photo-grammetric as techniques for documentation and monitoring of shallow-water cultural heritage sites: A case of study in the Bay of Algeciras, *Journal of Marine Science and Engineering*, J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 1339, 1-20. Revista JCR: Q1.

D. Bernal-Casasola*, M.A. Cau-Ontiveros, P. Berni, A. Pecci, J.A. Retamosa, J.L. Portillo-Sotelo, J. Oviedo, E. Fernández-Tudela, M. Goñalons, E. García, J. Cardell. (2023), Ánforas tardorromanas, crismones y el oleum dulce ¿consagrado?: Reflexiones sobre el pecio mallorquín de Ses Fontanelles, ROMVLA 21 (*Revista del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo Olavide de Sevilla*). págs. 29-84.

(*corresponding author)

4.1.3. Participación en congresos

M. Goñalons, Propuesta de catalogación de la jarcia española durante las reformas borbónicas (siglo XVIII), I Workshop de Jóvenes Investigadoras en Patrimonio Marítimo y Subacuático de la Universidad de Cádiz, 24-25/05/2023, Cádiz.

E. Fernández, El papel de la Universidad de Cádiz en la investigación en conservación de patrimonio cultural subacuático (Conferencia Inaugural), I Workshop de Jóvenes Investigadoras en Patrimonio Marítimo y Subacuático de la Universidad de Cádiz. 24/05/2023.

4.2. TRANSFERENCIA

Contratos con el exterior (art. 83 LOU)

Análisis arqueológico-histórico de una colección de artefactos del cargamento del pecio Deltebre I (1813) (OT2023/152). Financiado por: Centro de Arqueología Subacuática de Cataluña. Responsable: M. Bethencourt.

Campaña batimétrica con sonda multihaz embarcada en un vehículo autónomo de superficie, en un polígono de 6,7 ha frente a Torregarcía, Almería (OT 2023/130). Financiado por: Universidad de Almería. Responsable: M. Bethencourt.

Asistencia técnica para el control arqueológico del dragado en las obras de ampliación de La Galera en el Puerto de Algeciras (OT2023/086). Financiado por: Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras. Responsable: F. Cerezo. Investigador participante del LEC-PH: M. Bethencourt.

4.3. DIVULGACIÓN

Noche Europea de los Investigadores, 29/09/2023. El LEC-PH participó con dos talleres.

II Jornadas de Orientación Profesional para alumnos y egresados del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Ponente: E. Fernández. 17/04/2023.

VII Jornadas profesionales en Conservación y Restauración (2023). . Organiza: Vicerrectorado de Estudiantes y Empleabilidad (Centro de Promoción de Empleo y Prácticas) y la Facultad de Bellas Artes (UGR). Título: "Conservación-Restauración de material arqueológico de procedencia subacuática en la Universidad de Cádiz". Ponente: E. Fernández. 12/05/2023.

4.4. FORMACIÓN

4.4.1. Del personal del LEC-PH

M. Goñalons: Conservación del material subacuático mueble (con especial referencia a los materiales recuperados del hundimiento de la fragata Nuestra Señora de las Mercedes), Curso del Instituto de Patrimonio Cultural de España, fechas de realización: 16/10/23 a 13/11/23 (40 horas).

M. Goñalons: MOOC: Patrimonio Cultural de Andalucía – [I23F-GC05], Curso de la Consejería de Justicia, Administración Local y Función Pública de la Junta de Andalucía, fecha de realización: 03/05/23 a 14/06/23 (20 horas).

M. Goñalons: Introducción a la Fotogrametría Digital y su Uso en Patrimonio. XX edición, Curso de la Universidad de Burgos, fecha de realización: 11/04/23 a 30/04/23 (30 horas).

M. Goñalons: III Jornadas de Egiptología y Turismo, Curso de las Universidades de Málaga, Luxor, Zagazig y Fundación del Antiguo Egipto, fecha de realización: 19/03/23 a 20/03/23 (15 horas).

4.4.2. De alumnado de Doctorado y Máster

Durante el año 2023 han continuado, y en su caso finalizado, los trabajos de investigación de las siguientes Tesis Doctorales:

- Historia y metalurgia de los revestimientos metálicos en embarcaciones de propulsión a vela de la España peninsular y americana circa 1780-1820. Alumna: Diana Arano Recio, Programa de Doctorado de Historia y Arqueología Marítimas. Directores: **M. Bethencourt**, **N. Ciarlo**, **G. Carrasco**. Defendida de octubre de 2023: Sobresaliente Cum Laude, Mención Europea.
- Diagnóstico de las alteraciones del plomo de procedencia subacuática y su caracterización a través de los cepos de plomo del Museo de Cádiz. Alumna: Elisa Fernández Tudela, Programa de Doctorado de Historia y Arqueología Marítimas. Directores: **M. Bethencourt**, **L.C. Zambrano**.
- Cambios y aportaciones de los navíos de 74 cañones de Romero Landa a la Construcción Naval Española del Siglo XVIII. Análisis histórico-arqueológico de los Ildefonsinos. Alumno: David Rafael Ruiz Blanco. Directores: **M. Bethencourt**, **N. Ciarlo**, **A. Crespo**.
- Del pasado a la modernidad, formas diversas de investigar lo antaño: una perspectiva histórica desde la arqueología marítima y subacuática de la Bahía de Santa Marta, Colombia. Alumno: Deyber José Hernández Martínez. Directores: **M. Bethencourt**, **N. Ciarlo**.

Durante el año 2023 han continuado los trabajos de investigación de los siguientes Trabajos Fin de Máster del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática.

- Estudio del comportamiento, mediante ensayos de corrosión, de seis muestras de forros de embarcaciones de cobre y aleación de cobre (latón). Alumna: Ana Bourrel Ortiz. Tutores: M. Bethencourt, N. Ciarlo. Defendida en septiembre de 2023. Apto.
- Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Alumna: Sara Ventura Acosta. Tutores: M. Bethencourt, E. Fernández.
- Caracterización y estudio arqueométrico de dos piezas de artillería de proveniencia subacuática. Alumno: Jesús Adrián Marcos San Fulgencio. Tutores: M. Bethencourt, N. Ciarlo.
- Empleo de vehículos autónomos para la evaluación de los cambios morfológicos en yacimientos subacuáticos. Alumna: Sara Franceschin. Tutor: M. Bethencourt.
- Comparación entre la fotogrametría digital y la batimetría obtenida con sondador multihaz montado en USV, como técnicas de documentación y supervisión de pecios de interés. Alumno: Juan Rengel Ortega. Tutor: M. Bethencourt.

4.4.3. Tutorización de prácticas de empresa

Realización de prácticas curriculares del Grado de Conservación de Bienes Culturales (UCA). Tareas: Investigación y Conservación de objetos arqueológicos de procedencia subacuática y terrestre. Tratamientos de limpieza, estabilización y protección de objetos cerámicos, metálicos y orgánicos en el LEC-PH. Alumna; Sofía Rengel. Tutora académica; Teresa López (UGR). Tutora de empresa: E. Fernández. Fecha de realización: 18/04/23 a 08/06/23.

Realización de prácticas curriculares del Máster de Arqueología Náutica y Subacuática (UCA). Tareas: Investigación y Conservación de objetos arqueológicos procedentes de la Bahía de Algeciras. Tratamientos de limpieza, estabilización y protección de objetos cerámicos, metálicos y orgánicos (Proyecto Herakles) en el LEC-PH. Alumna; Sara Ventura. Tutor académico; Felipe Cerezo Andreo (UCA). Tutora de empresa: E. Fernández. Fecha de realización: 01/07/23 a 15/07/23.

ANEXO I

Productividad

Participación en publicaciones



New remarks on the mid-17th-century gunfounding in Northern Europe: archaeometric analysis of scrap bronze ordnance recovered from a Dutch merchant vessel lost off Cadiz, Spain

Nicolás C. Ciarlo¹ · Josefa Martí Solano² · Manuel Bethencourt³ · Elisa Fernández Tudela⁴ · Ernesto J. Toboso Suárez⁵ · Raúl González Gallero⁶ · Andrés Zuccolotto Villalobos⁷

Received: 9 May 2023 / Accepted: 23 July 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2023

Abstract

This article deals with the study of an assemblage of scrap bronze guns recovered from the Delta III site, identified as a Dutch merchant ship lost in the port of Cadiz, Spain, about the third quarter of the seventeenth century. This kind of remains is seldom preserved and therefore stands as a unique source for addressing modern bronze gunfounding. Its main characteristics and drawbacks were outlined and discussed on historical and archaeological grounds. The gun remains and casting by-products were recorded, and pieces were identified through their design, decoration, and marks. A metallurgical study of selected samples was carried out by visual inspection and microstructural and chemical analyses by light microscopy and scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy. A better understanding of the quality and manufacturing process of the pieces and the conditioning factors of the failed casting was achieved by this approach. Results provided new insights into the gunfounding process, with emphasis on a renowned atelier of German bell and cannon founders, along with the associated international markets and recycling practices.

Keywords Bronze guns · Mid-seventeenth century · German gunfounding · Dutch shipwreck · Archaeometallurgy

Introduction

Bronze guns, foundry technology, and ships

The production of bronze guns through the seventeenth century was a remarkable and highly-demanded metallurgical activity. Culverins, cannons, perriers, and mortars, comprised the main smooth-bore muzzle-loading pieces which were used both for field and naval service, often interchangeably.¹ They were thoroughly used in vessels of most European maritime powers (England, France, Netherlands, and Spain) until the mid of this century when the increased demand for warships led to a period of transition to the pre-eminence of the less expensive cast iron naval ordnance (Alcalá-Zamora y Queipo de Llano 1970–1971:244; Kennard 1986:161; Lavery 1987:85–87; Boudriot and Berti 1992:26).

¹ For instance, British guns and other related supplies were in charge of the Board of Ordnance, which provisioned both the Army and the Navy. The same guns could often be used in either context and were usually cast in the same foundries (Lavery 1987:80).

✉ Nicolás C. Ciarlo
nciarlo@conicet.gov.ar

- ¹ National Scientific and Technical Research Council (CONICET) - Institute of Archaeology, Faculty of Philosophy and Letters, University of Buenos Aires, 217/221, 25 de Mayo St., 3rd floor (C1002ABE), Autonomous City of Buenos Aires, Argentina
- ² Underwater Archaeology Center, Andalusian Historical Heritage Institute (IAPH), Cadiz, Spain
- ³ Department of Materials Science, Metallurgical Engineering and Inorganic Chemistry, Faculty of Marine and Environmental Sciences, University of Cadiz, Cadiz, Spain
- ⁴ Marine Research Institute (INMAR), University of Cadiz, Cadiz, Spain
- ⁵ Gerión Arqueología, Cadiz, Spain
- ⁶ Faculty of Philosophy and Letters, University of Cadiz, Cadiz, Spain
- ⁷ Faculty of Habitat, Autonomous University of San Luis Potosi, San Luis Potosi, Mexico

Compared with cast iron pieces, bronze guns had several advantages: they show a better performance during firing; were less susceptible to burst (and if they explode, did not produce a deadly deflagration); were strongest and thinner, and therefore lighter; and their lifetime at sea was longer (Guilmartin 2005:28; López-Martín 2011:279; Ciarlo 2017:12–13). Unlike cast iron guns, a major drawback was their propensity to soften and sag or suffer another bore failure under continuous firing. However, this problem was hardly noticeable at that time. Bronze pieces were also easier to obtain: casting, rectifying, and decorating. Although gunfounders usually had to face manufacturing defects and failed castings, bronze could be readily re-cast without losing its desirable properties to obtain new sound pieces. As a recycling practice, melting down of bronze artefacts to cast operative guns was not unusual during the modern period.

The development of bronze naval ordnance, covering social, economic, political, and technical issues related to this process has been widely addressed (e.g. Lavery 1987; McConnell 1989; Boudriot and Berti 1992; Meide 2002; Hoskins 2003; Guilmartin 2005; Beltrame Ridella 2011; Ciarlo 2017; Brinck 2020a; Pascoe 2021; and references therein). Bronze guns are widespread across Europe and overseas, and numerous seventeenth-century pieces were located in wreck sites (and other underwater archaeological contexts) and subjected to detailed studies (e.g. Bravo Pérez and Bravo Soto 1990; L'Hour et al. 1990; Keith et al. 1997; Bound et al. 1998; Cates and Chamberlain 1998; Christoffersen 1998; Guilmartin 2005; van Duivenvoorde 2010; Brinck and Ridella 2016; Mihajlović et al. 2018; Brinck 2008, 2020a, 2020b; Oliver Laso and Ramírez Pernía 2021; Pascoe 2021).² Information has contributed to the assessment of wreck sites and a better understanding of the foundry technology.

The studies developed on ordnance associated with shipwrecks, fortifications, and other on-land sites, along with collections from museums, mostly deal with complete and often well-preserved guns, from a macroscopic and morpho-functional standpoint. Guidelines to gather information from pieces on a systematic ground have helped scholars in this venue (e.g. Roth 1989). The characterisation of the chemical composition of bronze guns is also a well-developed research theme (e.g. Riederer 1977; Forshell 1992:125–144;

Samuels 1992; Northover 2011; Ashkenazi et al. 2017).³ However, studies on the casting process and associated defects based on a microstructural analysis of archaeological remains are comparatively less frequent (e.g. Gilmour and Northover 2003; Żabiński et al. 2021; Iddan et al. 2022).

The ships' cargo and other elements in stowage, from unused goods to unserviceable or discarded objects, can provide valuable data on commercial and technological issues. Nonetheless, no previous work has been developed on failed casting products transported on board ships as scrap. In this regard, through the study of fragmented bronze guns recovered from the Delta III site, this article provides novel information to better understand the challenges of seventeenth-century bronze gunfounding.

A case of study: the cargo of the Delta III site

The Delta III site was located in 2014 in the port of Cadiz, Spain (WGS84: 36° 32' 38.46" N, 6° 16' 3.26" W).⁴ The remains were recorded at a depth of 12 to 15 m, during an archaeological impact assessment developed for the construction of the new container terminal, under the direction of JM Higuera-Milena Castellano. The initial assessment conducted by M Gallardo Abárzuza comprised test pits surveys and a basic record of the remains. Thereafter, in 2016 a complete excavation of the ship's hull structure and its associated material culture was coordinated by R González Gallero. At this time, seven cast-iron guns identified as of Swedish origin, an anchor, and a bronze swivel gun (falconet) were temporarily retrieved and recorded (González Gallero 2016). In 2020, E Toboso Suárez led the record and relocation of the structural wooden remains to an underwater depot for guaranteeing their preservation.

The architectural traits of the lower hull stand for a plank-first shipbuilding system, a traditional method carried out at the northern Netherlands dockyards. Moreover, the dendrological studies of the structural remains suggest the ship was built using timbers from the west of Germany during the second half of the seventeenth century (González Gallero and Toboso Suárez 2021). This data and the provenance of associated material culture remains such as clay pipes and crucibles (Reig Gómez 2019; González Gallero 2023), among others, allowed suggesting this wreck site corresponds to a mid-to-late

² The transport of bronze guns in stowage was not unusual, as pieces located at the hold of late-sixteenth and seventeenth-century shipwrecks attest to (e.g. Keith et al. 1997; Ridella et al. 2016). Old ordnance was also carried on board as cargo, to be sold or gifted. For instance, six culverin-type guns from the 60-gun galleon *Santissimo Sacramento* (1668) were dated from the mid-to-late sixteenth century (Brown 2005).

³ The archaeometric studies of iron guns and ammunition have also provided unique data for the understanding of materials and casting technology (e.g. Crossley 1975; Bethencourt et al. 2013; Ciarlo and Argüeso 2019).

⁴ The location refers to the archaeological site. Coordinates were taken with a standard GPS by one of the authors (RGG).

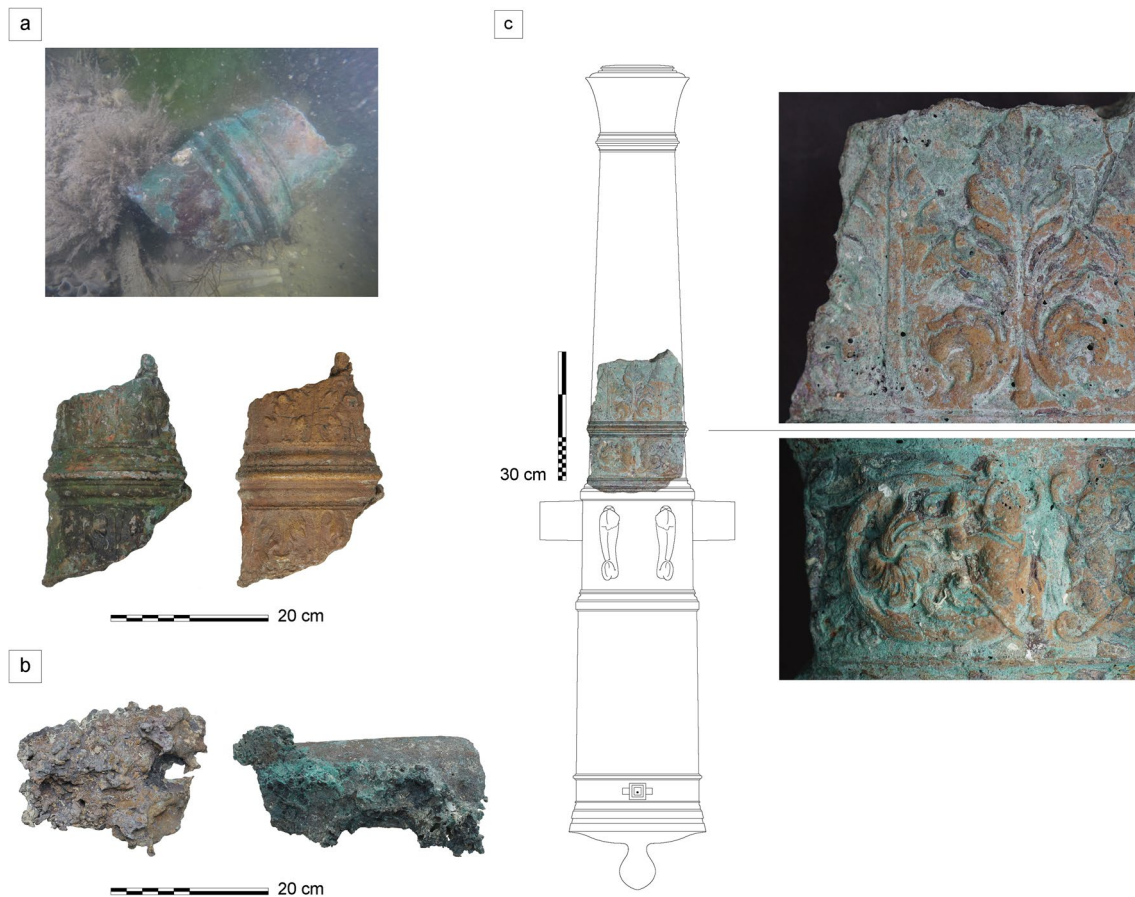


Fig. 1 Bronze cannon remains recovered from the Delta III site: **a** in situ; in the lab, just after its retrieval from the site; and after stabilisation (No. DIII-822); **b** amorphous bronze lump (No. D3-20-6) and part of a barrel welded to a casting by-product (No. D3-20-9); and **c** chase fragment of piece No. D3-20-11, with a decoration combining acanthus leaves and figurative motifs. The drawing is a sim-

plified version of a gun cast by German founder Albert Benningk in Lübeck (1669), now located at the Army History Museum (Heeresgeschichtliches Museum), in Vienna, and illustrated by Boenheim (1884:32–33; see also Peterson 2014a:977–978). Images: R González Gallero and CAS-IAPH archive (a); and NC Ciarlo (b, c)

seventeenth-century Dutch merchantman (see González Gallero 2016, for a primary assessment of the entire collection).

More than a hundred fragmented bronze guns and casting by-products (lumps) were located at the ship's hold, mainly at the stern area, and in the surroundings of the hull's structure. They were recorded and partially retrieved in 2016 and moved to the lab of the Centre for Underwater Archaeology of Andalusia belonging to the Andalusian Institute of Historical Heritage (CAS-IAPH) for their preservation and study (Fig. 1). Moreover, in 2020, an array of similar remains scattered in the area—not directly associated with the wooden remains—was also retrieved to the surface. Environmental conditions prevailing in the navigation channel where the wreck site is located may have occasioned a dispersion of the remains, especially those of small dimensions. Therefore, the recovered bronze objects from the excavation area likely constitute only a portion of the original cargo.

During the stabilization process carried out in 2016–2019 at the CAS-IAPH, several samples were selected for analysis aiming to assess the alloy's quality and manufacturing process of these defective pieces. Additional samples were obtained from the remains recovered in 2020 after they were stabilised. The entire collection will be finally moved to the Archaeological Museum of Cadiz. The characterisation studies were developed at the Laboratory of Studies and Conservation of Culture Heritage (LEC-PH) of the University of Cadiz, under one of the author's (MBN) supervision.

The studied materials represent but a sample of the vessel's cargo. From archaeological interventions, a total of 40 bronze gun parts and 120 casting by-products were retrieved and catalogued. The size of most fragments ranges from ca. 20 to 40 cm in length and corresponds to gun barrel pieces, yet bigger pieces were also recovered. The bronze lump remains are amorphous. In total, they weigh 1443 kg and 22 kg, respectively. As guns' parts

Table 1 A brief description of guns and other bronze casting remains sampled for characterisation studies. *This sample was originally catalogued as NTC/12/DR/270

Object ID	Category	General description	Weight (kg)	Additional information
DIII-835	Gun and lump	Two small parts of a gun barrel fused by an amorphous casting by-product	44	
DIII-847	Gun	First and second reinforces. It is broken ahead of the chase astragal and fillets	509	The cascable, dolphins and left cascable are broken/miscast. The breech ogee and chase have decorative motifs. The barrel exhibits the coat of arms of Hamburg
DIII-S/D*	Gun and lump	Part of the chase (broken) and muzzle, with a casting mass welded to its surface	69	The mouth, face of the muzzle, and muzzle astragal and fillets are preserved with a certain degree of detail
D3-20-01	Gun	The fore part of the muzzle	32.5	
D3-20-02	Gun	Barrel fragment	43	Corresponds to a section of the first (most likely) or second reinforce-ring and ogee
D3-20-03	Gun	Barrel fragment	17	
D3-20-04	Gun	Barrel fragment	14.5	
D3-20-06	Lump	Amorphous casting by-product	5	
D3-20-08	Gun	Chase fragment	18	Part of the trunnion ring and the chase astragal and fillets are preserved, with decoration (mermaids and acanthus leaves)
D3-20-09	Gun	Barrel fragment	74	Probably part of the chase, associated with an amorphous casting by-product
D3-20-10	Gun	Barrel fragment	38	
D3-20-11	Gun	Chase fragment	28	Presents similar features to specimen D3-20-08
D3-20-14	Gun and lump	Barrel fragments (3) welded together by an amorphous casting by-product	214	The larger fragment shows a change in the wall's thickness possibly associated with a reinforced transition

regard, the identification of their traits (e.g. design, decoration, and marks) was constrained by the fragmentary and irregular aspect of most pieces (see below). Aiming to develop a technological assessment, a total of thirteen pieces comprising gun remains and casting by-products were selected for microstructural and chemical analyses (Table 1).

Characterisation methods and techniques

Macroscopic exam

An examination of the main characteristics of the bronze remains retrieved from the Delta III site was developed by visual inspection. For guns, in particular, the aim was to identify a series of features to appraise their type, provenance, and period. The ornamentation of some less fractured pieces was also valuable for assessing the style of a particular founder or atelier. The observed features in the guns' fragments and the amorphous casting by-products helped to determine the most likely nature of the recovered scraps. The sampling for the materials' characterisation was done based on this preliminary non-destructive testing.

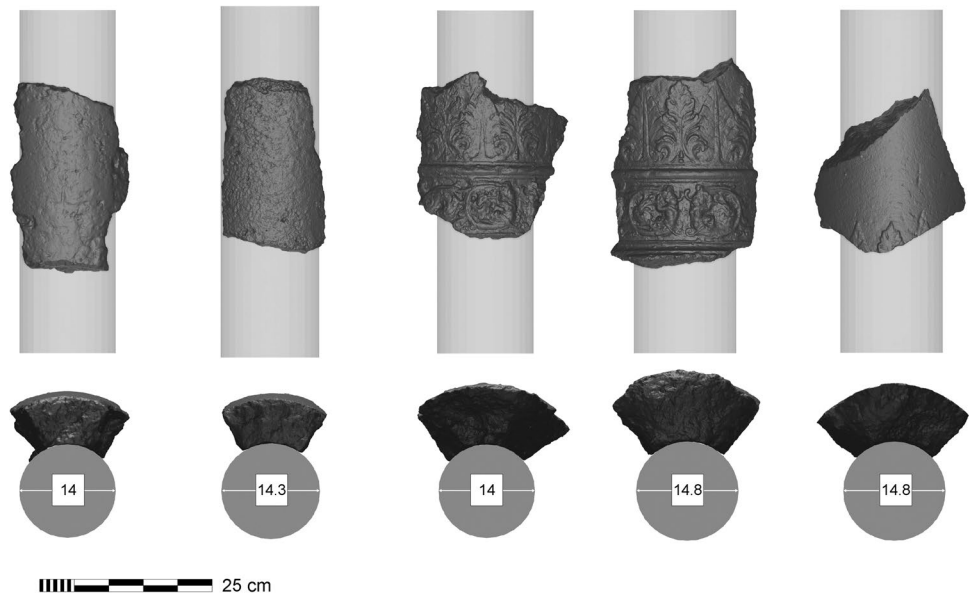
Microscopic and chemical analysis

For guns, two different groups were defined for sampling. The remains exhibiting heterogeneous attributes associated with a failed casting, including welded amorphous by-products ($n=6$), were analysed in two to four different areas to examine their material characteristics. On the other hand, small pieces that did not present significant observable differences ($n=6$) were sampled in one place only. An isolated amorphous by-product was also studied separately.

The samples were studied applying the following methods and techniques: metallographic examination by light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM); and elemental composition analysis using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), for major and minor constituents, the latter in a concentration above 0.1%. The used instrumentation, respectively, were an inverted metallographic microscope Leica DMi8 A and a FEI Nova NanoSEM 450 with EDAX. Statistical analysis of compositional data was carried out with XLSTAT software.

Specimens were prepared and analysed following international standards (e.g. Vander Voort 2004). For LM, samples were obtained using a common hacksaw and a Dremel 300 Series with abrasive cutting discs. Each specimen was

Fig. 2 Bore diameter estimation (in cm) of some of the larger and better-preserved barrel fragments (left to right: gun nos. D3-20-3, D3-20-4, D3-20-8, D3-20-11, and D3-20-12). Image: E Fernández Tudela



embedded in resin and its surface was ground and polished with a Tegramin 30 automatic equipment. For SEM–EDX, specimens were observed on polished areas of the core material that show no corrosion. Images based on secondary and backscattered electrons were obtained, the latter to assess the composition differences of the alloy microconstituents. For semi-quantitative analysis of major and minor elements (above 1 wt%), a minimum of five spot measures (at a $\times 250$ magnification) were developed in each specimen. Point determinations and elemental distribution maps were also produced to characterise the different phases and microconstituents of the materials' microstructure.

Moreover, the liquidus temperature (LT) of the material of five specimens was determined using Thermo-Calc Software (v. 2023a) and the TCCU5 thermodynamic and properties database for Cu-based alloys.

Results

Classification, design, decoration, and marks of guns

The remains from the Delta III site seem to correspond either to culverins or, most likely, cannons (see below). A range of calibres from about 18 to 24 pounds was roughly estimated based on the preserved bore radial segments of the larger and better-preserved (non-deformed) barrel fragments. Their diameters range from ca. 140 to 148 mm (Fig. 2).

From the whole collection, only nine samples show decorative floral motifs on their surface, with prevailing Renaissance/Baroque acanthus leaf linear moulding. These leaves form two main patterns: isolated and differently

spaced from each other; and alternated with lanceolate or rounded leaves, in a frieze design. The first decoration was recorded in the breech ogee of two specimens, nos. SP-082 and DIII-847 (pattern no. 1), and the second, was observed in areas most likely corresponding to the chase and muzzle of six pieces, nos. SP-117, DIII-822, DIII-838, D3-20-8, D3-20-11, and D3-20-12 (pattern no. 2). Combined with the latter, a third decoration consists of figurative motifs, also forming a frieze design, which is displayed between the second reinforce-ring and ogee and the chase astragal of pieces nos. DIII-838, D3-20-8, and D3-20-11 (pattern no. 3). A single piece of this assemblage (no. DIII-834) is distinguished by a decoration with military motifs (a gun with its carriage, and pikes or flagpoles for banners) at the end of the chase, just before the muzzle astragal and fillets (pattern no. 4).

Gun no. DIII-847 is the largest piece recovered from the site, with a length of 118 cm. The remains comprise about two-thirds of a complete gun: the chase, cascable, dolphins, and right trunnion, are not preserved (broken/miscast). However, the recorded features—some showed by other guns' fragments—allowed us to circumscribe its origin and date. The breech ogee is decorated with a series of acanthus leaves finishing with an accused scroll (pattern no. 1). The touch-hole is recessed in a square-shaped vent pan and an emblem is observed between the vent astragal and fillets and the first reinforce-ring and ogee. The latter encompasses a castle with three towers, with a cross on top of the central one and a Marian star on each side tower; in the upper part, it has a crested helmet, three peacock feathers, six banners of arms, and mantling; and it is all surrounded by olive branches (Fig. 3). This emblem corresponds to one of the variants of the coat of arms of the Free and Hanseatic City of Hamburg

Fig. 3 Image of gun No. DIII-847: **a** detail of the coat of arms; and **b** drawing of the middle coat of arms of Hamburg (Mittleres Wappen der Freien und Hansestadt Hamburg, from: https://www.wikiwand.com/de/Landeswappen_Hamburgs). Image: NC Ciarlo



(i.e. middle arms, *Mittleres Wappen*), suggesting the gun was an express order to the city for defence or parade/salute purposes.

The signature of particular Renaissance gunfounders or their workshops was usually well represented in the design of gun breeches—along with the features of other decorative motifs—which were transmitted with minor or major changes from one generation to another (see López-Martín 2011:324–330, 342–352). The breech design and decoration and other attributes of gun no. DIII-847 show similarities with pieces cast by German bell and cannon founders of the renowned atelier established by Matthias Benningk (also, Benning or Benninck) in the Free and Hanseatic City of Lübeck, north of Germany (see Kennard 1986:40). A common trait in various bronze guns cast by the sons of Reinhard Benningk, Gerdt (1601–1643) and Hermann (the Elder, 1618–1668), is a pineapple-like cascade, yet this part was not preserved in the studied gun. Albert Benningk

(1637–1695), the son of the latter, was also a prominent founder that slightly changed this particular design on their guns (López-Martín 2011:349–350).

Other characteristics of guns from Benningk's workshop can also be suggestive (Fig. 4). A bronze 6-pdr gun cast by Hermann the Elder in Lübeck (1643) and located at the Armémuseum (gun no. AM.010003, also A-189), in Stockholm, has a breech ogee decoration, vent pan, and dolphins similar to those observed in gun no. DIII-847. There is another piece made by this founder in 1662, a bronze 12-pdr gun nowadays displayed at the Museum for Hamburg History (Museum für Hamburgische Geschichte, gun no. 1911, 548), in Hamburg. It shows the coat of arms of Hamburg along with six coats of arms of the civilian delegates in charge of the towns' artillery (so-called *Artillerie-herren*) in the first reinforce and also has a comparable breech. A quite similar Benningk's gun, also cast in 1662, is at the Royal Artillery Museum (former Firepower Museum), in Larkhill,

Fig. 4 A comparison of piece no. DIII-847 with mid-seventeenth-century German bronze guns: **a** general view of the gun; **b** decorative motifs of the breech ogee (left and centre) and gun no. 116, Royal Danish Arsenal Museum (Peterson 2014b:74) (right); **c** views of the breech and vent pan (left and centre) and gun no. AM.010003, Swedish Army Museum (Peterson 2014b:405) (right); and **d** detail of the tail of the right dolphin (left) and gun no. AM.010003 (Peterson 2014b:406) (right). Image: NC Ciarlo and J Martí Solano



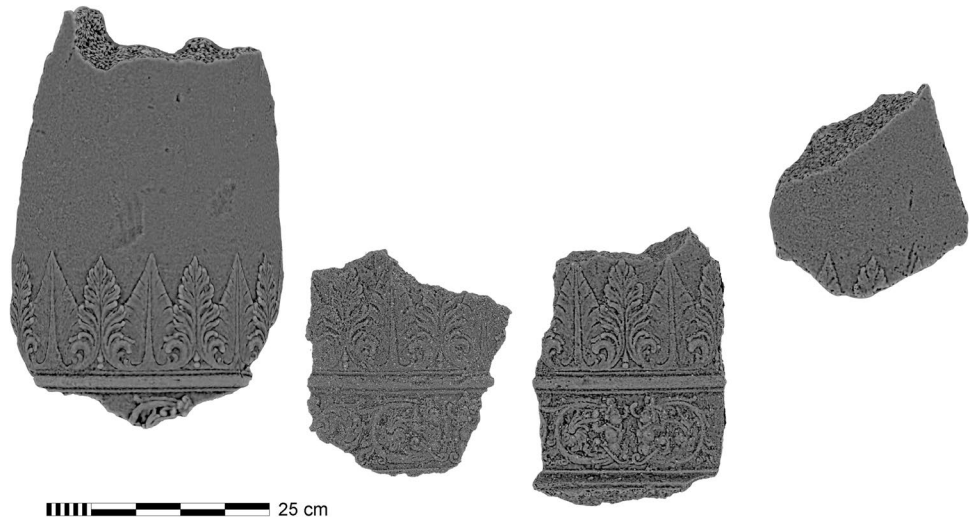
UK (gun no. II-159). Other attributes shared by both pieces attest to certain stylistic continuity for at least two decades. Moreover, this kind of breach is exhibited by a 12-pdr gun (unidentified founder), that displays the name of Christian Albrecht together with the coats of arms of the Holstein-Gottorp dukes and bishopric of Lübeck, located at the Royal Danish Arsenal Museum (Tøjhusmuseet), in Copenhagen (gun no. 116) (see Peterson 2014a, pp. 315–317, 882; 2014b, pp. 74–77, 405–406).

The second and third decorative patterns were recorded together in three barrel fragments of comparable characteristics (nos. DIII-838, D3-20–8, D3-20–11). The anthropomorphic figures resemble mermaids, which are paired in a specular position, i.e. facing each other. Similarities

in their design suggest they could proceed from the same workshop (Fig. 5). A 12-pdr bronze gun located at the Armémuseum (unidentified founder) has decorative motifs at the second reinforce-ring and ogee and the muzzle astragal and fillets that resemble the mentioned decoration. The name “Sophia Amalia” is placed below a coat of arms at the first reinforce. The dolphins, breach, and cascable of this gun are also comparable with the traits of the studied pieces (Peterson 2014b:339–341).

Motifs depicted in gun no. DIII-834 at the end of the chase (pattern no. 4) are rather unclear given the irregular surface finishing. However, a resemblance with the decoration shown by the *Pallas*, a 24-pdr bronze gun cast by Albert Benningk in Lübeck (1679) and located at the

Fig. 5 3D models of guns: front view of four -barrel pieces showing decoration patterns nos. 2 and 3 (left to right: gun nos. DIII-838, D3-20-8, D3-20-11, and D3-20-12). Image: E Fernández Tudela



German History Museum (Deutsche Historische Museum), in Berlin, is noticeable (Peterson 2014a:865–866).

Defects: surface examination

In general, pieces show some degree of porosity, mostly pinholes concentrated at the surface or in a layer just below it. Shrinkage cavities or pipes were also recorded in a few samples. Possible misruns were not seen but in one gun (e.g. dolphins of gun no. DIII-847). Cracks (hot tears⁵ and cold tears) and veining were observed, but they are not common defects. Sponginess (or honeycombing) was also recorded in several gun fragments. Some deformation could be appreciated in barrel fragments as well (e.g. oval-shaped bores). At least one piece also exhibits clear signs of extensive vitrification. Amorphous by-products appear in isolation and as well as welded to guns' parts, usually with encrusted charcoal remains (Figs. 6 and 7). All these features are associated with a failed casting. The microstructural and chemical characterisation of selected specimens provided further data in this regard (see below).

Only a minor quantity of the assemblage shows no clear evidence of severe casting defects. Despite being fragmented and having veining, no porosity, cracks, deformation, misruns, or sponginess, among other defects, were noticed (Fig. 7k). They might correspond either to fractured old guns or to discarded partially well-cast products. One of these remnants (no. D3-20-02) was also analysed for comparative purposes.

⁵ Hot tearing is also referred to as hot cracking, hot shortness, and hot brittleness (Campbell 2011:465).

Material characterisation

The gun remains and casting by-products (isolated and linked to barrel parts) from the Delta III site selected for metallurgical examination were described in Table 1. At a microstructural level, analysed specimens show an as-cast microstructure, with no evidence of further thermo-mechanical alteration. The matrix is composed either of a uniform, single alpha (α) phase fcc grains (a solid solution of tin dissolved in copper) or, as was observed in most cases, a copper-rich α phase with different amounts of a tin-rich eutectoid alpha + delta ($\alpha + \delta$) phase distributed at the boundaries of the copper-rich grains (Fig. 8 a to e). The harder and less ductile δ phase is transformed from the α phase in bronzes with tin content above ca. 11% (Nielsen 2019). Although, in practice, the tin-rich eutectoid occurs in bronzes with a much less percentage, given the micro-segregation of tin during the non-equilibrium solidification (Pero-Sanz Elorz 2000:216–217; Murphy 2001:76; Scott and Schwab 2019:146).

This $\alpha + \delta$ phase was observed in both guns' fragments and amorphous by-products with a tin content as low as 1.5% (specimen DIII-847, specimen #3), but in a large degree in samples above ca. 2–3%. Moreover, a thin outer layer (ca. 1 mm thick) with a high content of tin was detected in droplets (specimens DIII-835_#3 and #4). The copper, tin, and lead particular distribution in the microstructure of samples was observed by a mapping analysis (Fig. 9). Given its mechanical properties, the extensive $\alpha + \delta$ phase patches present in amorphous by-products would have made this material unsuitable for guns (see Murphy 2001:91–92).

Samples have different microstructural characteristics linked to the solidification process (see Murphy 2001:91; Rajpitak 1983:74–76, for a description of microstructures of low-tin bronzes). In general, most gun barrels have a coarse as-cast microstructure, showing no coring, evidence



Fig. 6 Macroscopic casting defects observed at the remains surface: **a** cracks: cold tear; **b** sponginess; **c** misrun (unfilled dolphin); **d** vitrification; **e** open shrinkage cavities or pipes; **f** mould collapse; **g** gas

porosity: blowholes; **h** metal drops; **i** deformation; **j** charcoal incrustation; and **k** gas porosity: pinholes. Image: NC Ciarlo

related to a slow cooling process that allowed a homogenization of the cast (see Fig. 8 a and c). On the other hand, a dendritic and finer microstructure was observed in samples corresponding to by-products, which would

have been subjected to a faster cooling rate (see Fig. 8e). An acicular structure associated with an even more quick solidification was also recorded in the outer layers of droplets (see Fig. 8f).



Fig. 7 A detailed view of macroscopic casting defects in a selection of pieces: **a** gas porosity: pinholes; **b** cracks: cold tear; **c** vitrification; **d** sponginess; **e** open shrinkage cavities or pipes; **f** mould collapse; **g**

gas porosity: blowholes; **h** metal drops; **i** massive crack; **j** charcoal incrustation; and **k** veining (mould cracking?). Image: NC Ciarlo

Most samples present a third lead-rich phase as inclusions distributed at the grain boundaries, associated with the pools of tin-rich eutectoid. This content is also reflected in the

overall composition of samples (see below). Moreover, evidence of gas and shrinkage porosity, mainly micro-pores and micro-shrinkage of different sizes, was observed in several

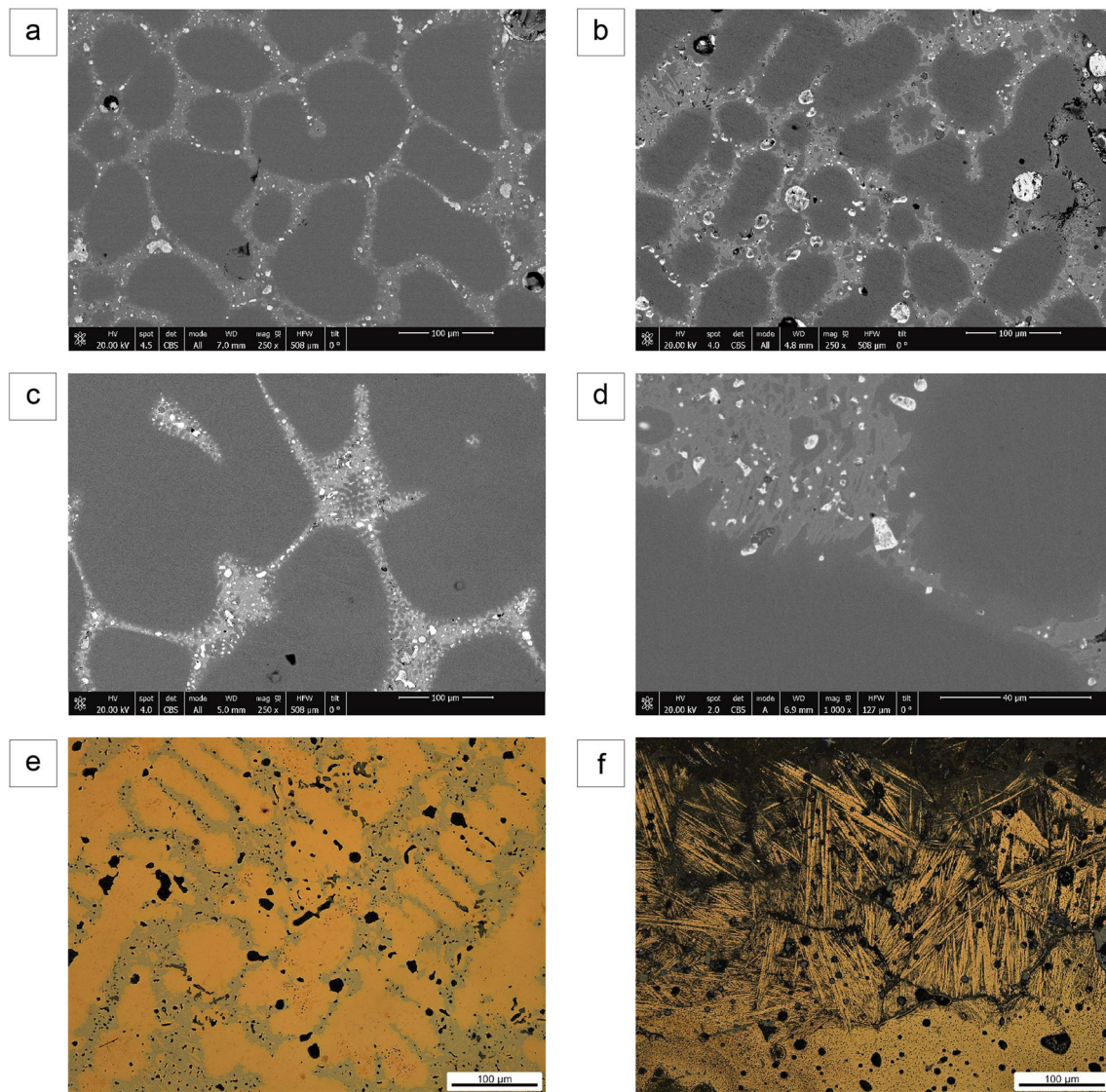


Fig. 8 As-cast bronze microstructures of an α -phase solid solution with intergranular pools of $\alpha+\delta$ phases: (a–d) SEM images (BSE mode) of specimens DIII-835_#2, DIII-S/D_#2, DIII-847_#4, and

D3-20-09_#1; and (e–f) LM photomicrographs of specimens D3-20-6_#2 and DIII-835_#3. Images: J González García (a–d) and NC Ciarlo (e–f)

remains. Gas porosity is associated with the evolution of oxygen and hydrogen absorbed from the furnace atmosphere (see Campbell 2011:310–311). Identified pores resulted in part from the evolving of these gases due to the decrease of their solubility during solidification, which could not escape freely. Moreover, extensive surface porosity observed through the outer layers of several gun barrel fragments is most likely related to the reaction of the hot metal and the moisture of the mould during pouring (Fig. 10 a and b). On the other hand, shrinkage porosity is generated by the contraction of the molten metal during solidification. This phenomenon usually occurs when molten metal is excessively hot and in the areas of the mould poorly fed (e.g. the gun's breech) (Murphy 2001:92–93). Although the lead

content would have promoted a pressure-tight alloy, it has not sufficed to counteract the shrinkage porosity expected for long-freezing-range bronzes in sections above 50 mm thick (see Murphy 2001:78) (Fig. 10c to f).

The matrix elemental composition of specimens is summarized in Table 2. For each sample, individual results and means values are listed. Carbon and oxygen were not quantified.

The material used to cast the analysed guns was bronze with small amounts of lead. No zinc nor other minor elements were detected. A bar plot and binary diagram of the mean composition of samples depict the proportion of the main elements (Fig. 11). Based on a triangular plot of Cu, Sn, and Pb data, significant differences between gun barrel fragments and

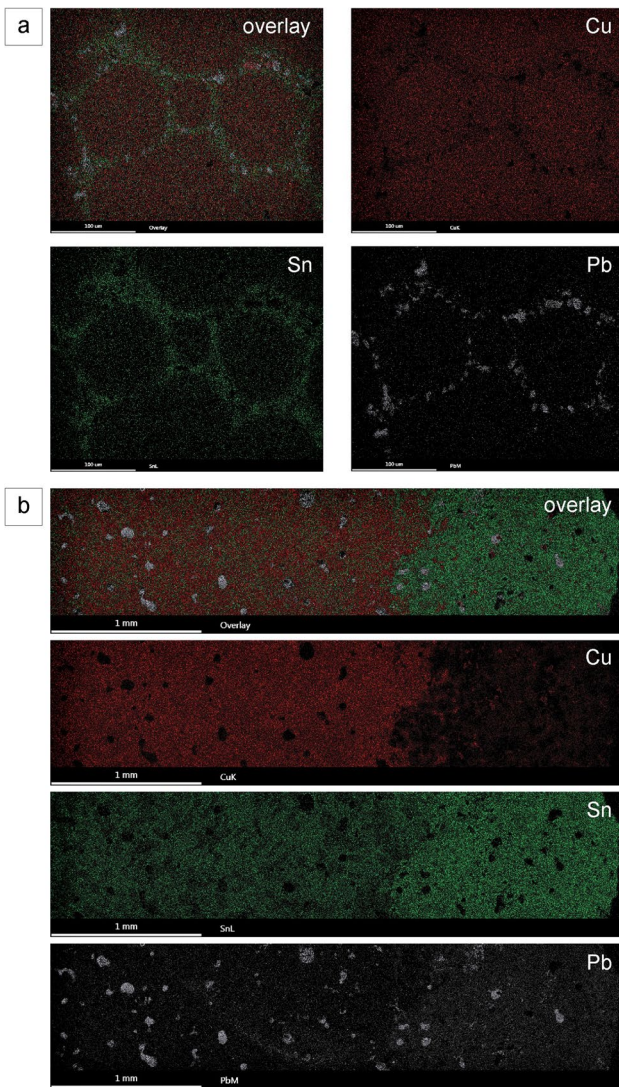


Fig. 9 EDX mapping of alloying elements: **a** Cu, Sn, and Pb distribution in the α and $\alpha + \delta$ phases of specimen DIII-835_#5; and **b** Sn concentration at the outer layer of specimen DIII-835_#4. Images: J González García

casting by-products were observed, with a certain degree of overlapping. Moreover, as expected, the compositional range of gun remains shows a comparatively lower dispersion of values (Fig. 12). The similarities in the composition of gun nos. D3-20-04, D3-20-10, D3-20-8, and D3-20-11 are noteworthy; the latter two, in particular, show the same decorative pattern.

The values are relatively homogeneous within each metallographic specimen. However, differences in the matrix mean composition are appreciated both within each gun and more noticeably between barrel fragments, which have been made in bronzes ranging from about 1 to 6.5% tin and up to 2% lead. Moreover, a higher heterogeneity was recorded between these remains and the associated casting by-products. The

latter also show notable differences if amorphous masses of bronze (mostly from ca. 8 to 13% tin and up to 4.5% lead) and droplets (ca. 16 to 19% tin and up to 5.5% lead) are compared to each other. Given the range of compositions, the gun remains and casting by-products (DIII-835_#1, DIII-835_#2, DIII-835_#3, DIII-847_#1, and D3-20-02_#1) also present dissimilar melting points. In general, the LT of guns' material is in the range of 1029 °C to 1081 °C, while the by-products are around 868 °C and 1017 °C.

A discussion, in the light of seventeenth-century European bronze guns

On classification, date, and provenance

Broadly speaking, smooth-bore guns used on ships dominated through the age of sail (Lavery 1987:83). Different genres were developed over time: culverins, cannons (or cannons of battery), and perriers (*pedreros*) comprise the three main genres of European bronze guns. Mortars were either included within the last genre or considered a separate one. This basic classification was established based on the length, calibre, and shot of pieces, as it is described in Collado's *Platica manual de artilleria* (1592) and illustrated in Sardi's treatise *L'artiglieria* (1621) (Fig. 13a). Along with a regional variation, a diversity of guns can be appreciated within each type. This situation prevailed until the mid-to-late seventeenth century when artillery was progressively standardised (see Meide 2002:1–6) (Fig. 13b).

Bronze guns stood as both high-technology weapons and works of art, expensive sculptures which stood as vehicles of power and wealth (see López-Martín 2011). They were usually profusely decorated, exhibiting a wide diversity of motifs on their surface. Along with the moulded rings (i.e. reinforces' ring and ogees; and the vent, chase, and muzzle astragal and fillets), they showed other traits such as a pair of lifting handles known as dolphins; floral patterns (e.g. acanthus leaf) or abstract decoration in relief; the gun's name; and meaningful phrases (Meide 2002:16–30). In general, a progressive simplification of ornamental motifs was developed over time seeking to save time and increased production.

Along with aesthetic features, bronze guns frequently show other marks, such as the date of manufacture, calibre, weight, founder's name, ruler's coats of arms or monogram, cypher or armorial device of the Master-General of the Ordnance (or alike). Together with later proof marks, they can provide valuable data about the biography of each object and its context. Several seventeenth-century bronze guns associated with wreck sites and displayed at museums attest to this complex decoration and marking practice (e.g. Keith et al.

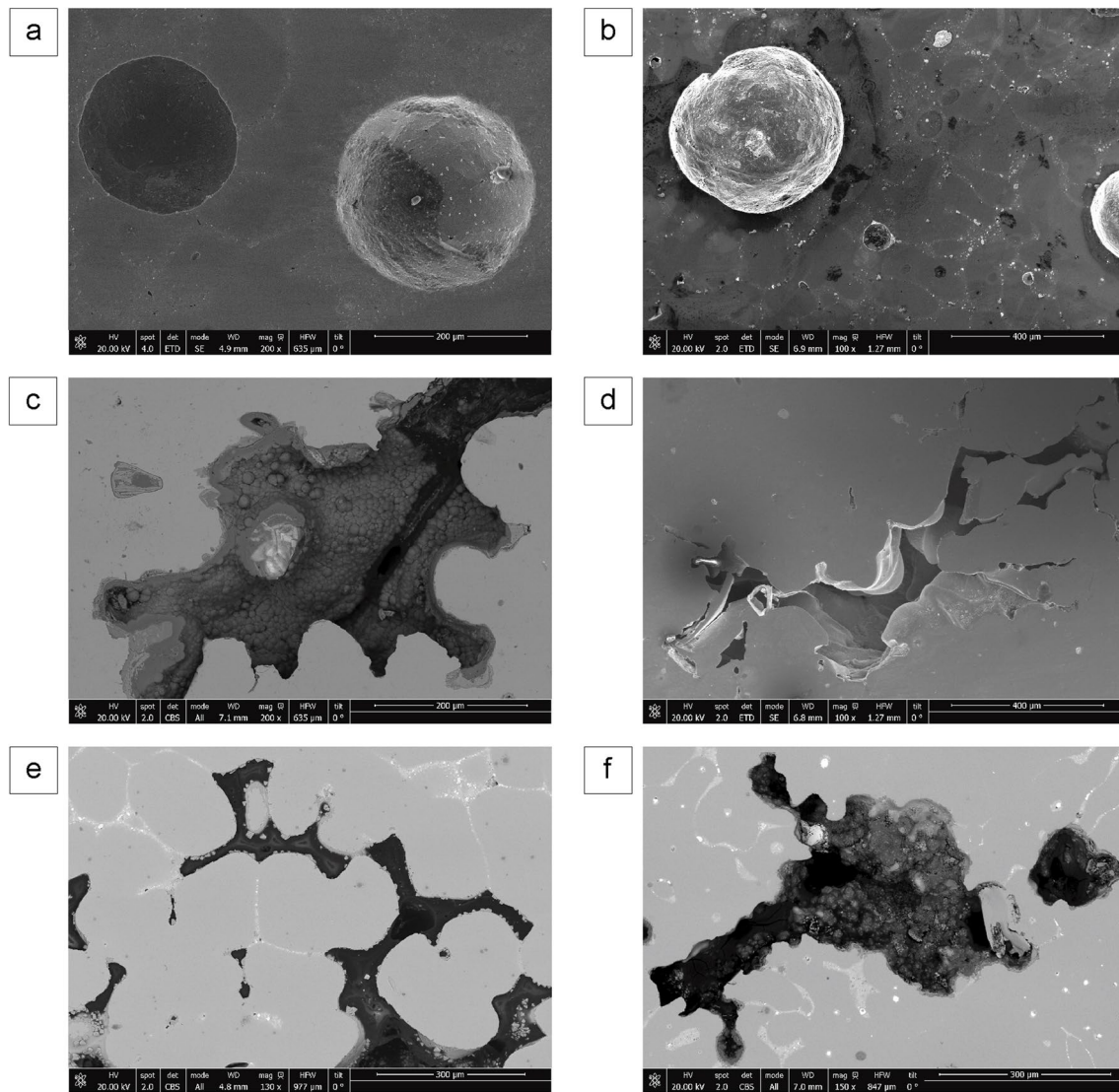


Fig. 10 A selection of SEM images (SE and BSE modes) showing microstructural defects: (a, b) gas micro-porosity in specimens DIII-S/D_#3 and DIII-835_#2; and (c–f) micro-shrinkage porosity in

specimens D3-20-04_#1, D3-20-10_#1, D3-20-09_#1, and D3-20-11_#1, respectively. Images: J González García

1997; Ortiz Sotelo 2012–2013; Peterson 2014a, b; Oliver Laso and Ramírez Pernía 2021).

As pieces from the Delta III site are concerned, their design, decoration, and marks suggest they were likely cast by a member of Benningk's family around the second or third quarter of the seventeenth century. Other remains recovered from the Delta III site were also identified as of German origin, such as an assembly of crucibles from Hesse (González Gallero 2023). As was referred to above, the shipwreck was identified as a mid-to-late seventeenth-century Dutch merchantman.

The Dutch-Flemish merchants played an active commercial role in Southern Spain and the Hispanic-American trade system during this period and thereafter, using the port city of Cadiz as a nexus point with overseas territories

in the Americas (Crespo Solana 2014). Aguilar Escobar (2008) demonstrates that a large part of the demand for raw material to the Royal Artillery Factory of Seville (*Real Fábrica de Artillería de Sevilla*) throughout the seventeenth and eighteenth centuries was fulfilled with old bronze (*metal ligado* or *bronce viejo*) from useless guns or failure castings. Moreover, at Seville was settled the Habet family, of German origin, which obtained a large contract with the Spanish government from 1650 to 1717 to supply copper from the Americas and Europe (González Enciso 2013:291; see also Aguilar Escobar 2008, for further data on Habet's family business). That the old bronze from the Delta III site was meant for this local market and foundry should be taken into consideration.

Table 2 EDX data (wt%) of main and minor alloying elements of analysed guns and casting by-products. The mean and standard deviation (σ) of values are referred to in bold. Percentages of copper were rounded to the nearest whole number, and minor elements to one decimal place

Object ID_EDX spot number	Specimen #1			Specimen #2			Specimen #3			Specimen #4			
	Cu	Sn	Pb	Cu	Pb	Sn	Cu	Pb	Sn	Cu	Pb	Sn	Pb
DIII-835	Barrel (inner layer)			By-product (amorphous mass)			By-product (droplet)			By-product (droplet)			
DIII-835 (1)	96	3.8	0.6	91.1	7.3	1.6	67.3	24.6	8.1	81.6	16.4	2.1	
DIII-835 (2)	94	4.6	1.4	91.0	7.4	1.7	81.9	14.1	4.1	80.5	16.6	2.9	
DIII-835 (3)	95	4.0	1.0	89.1	8.9	2.1	71.1	23.5	5.4	80.2	16.3	3.4	
DIII-835 (4)	94	4.7	1.4	90.5	7.9	1.6	78.9	15.3	5.8	80.7	16.2	3.2	
DIII-835 (5)	95	4.3	0.9	87.8	9.4	2.8	78.3	17.3	4.4	79.0	16.8	4.2	
DIII-835 (mean)	95	4.3	1.1	89.9	8.2	1.9	75.5	18.9	5.6	80.4	16.5	3.2	
DIII-835 (σ)	0.6	0.4	0.3	1.3	0.8	0.4	5.4	4.3	1.4	0.8	0.2	0.7	
DIII-847	Chase (outer layer)			Chase (inner layer)			Chase (inner layer)			Chase (inner layer)			
DIII-847 (1)	99	0.8	n.d	93.5	5.3	1.2	98.6	1.0	0.4	96.4	3.1	0.6	
DIII-847 (2)	99	1.2	n.d	94.1	5.0	1.0	98.0	1.6	0.5	95.9	3.4	0.6	
DIII-847 (3)	100	0.0	n.d	90.5	7.5	2.0	98.2	1.4	0.4	95.4	4.0	0.6	
DIII-847 (4)	99	0.8	n.d	94.4	5.0	0.6	98.0	1.4	0.5	96.1	3.6	0.4	
DIII-847 (5)	99	1.1	n.d	94.6	4.6	0.8	97.8	1.8	0.4	95.6	3.7	0.7	
DIII-847 (mean)	99	0.7	n.d	93.4	5.5	1.1	98.1	1.5	0.4	95.9	3.6	0.6	
DIII-847 (σ)	0.4	0.4	0.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.3	0.0	0.3	0.3	0.1	
DIII-S/D	Chase (outer layer)			By-product (amorphous mass)			By-product (amorphous mass)						
DIII-S/D (1)	94	4.8	1.3	86.2	10.5	3.3	88.3	9.3	2.5	-	-	-	
DIII-S/D (2)	94	5.0	1.3	86.7	10.0	3.3	89.5	8.1	2.4	-	-	-	
DIII-S/D (3)	93	5.7	1.3	85.7	10.1	4.2	87.8	8.8	3.4	-	-	-	
DIII-S/D (4)	95	4.5	0.9	87.1	10.3	2.6	88.4	8.4	3.2	-	-	-	
DIII-S/D (5)	92	6.5	1.8	87.3	10.5	2.2	87.5	9.6	2.9	-	-	-	
DIII-S/D (mean)	93	5.3	1.3	86.6	10.3	3.1	88.3	8.8	2.9	-	-	-	
DIII-S/D (σ)	1.0	0.7	0.3	0.6	0.2	0.7	0.7	0.5	0.4	-	-	-	
D3-20-01	Muzzle (inner layer)			Muzzle (bore)									
D3-20-01 (1)	94	4.2	1.8	93.9	4.7	1.5	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (2)	96	2.8	0.8	93.8	4.7	1.5	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (3)	95	4.1	1.3	94.1	4.6	1.3	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (4)	95	4.0	1.4	91.9	5.8	2.3	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (5)	95	3.7	0.9	92.7	5.3	2.1	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (mean)	95	3.8	1.2	93.3	5.0	1.7	-	-	-	-	-	-	
D3-20-01 (σ)	0.8	0.5	0.4	0.9	0.5	0.4	-	-	-	-	-	-	
D3-20-02	2nd reinforce (outer layer)												
D3-20-02 (1)	90	7.7	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Table 2 (continued)

Object ID_EDX spot number	Specimen #1			Specimen #2			Specimen #3			Specimen #4		
	Cu	Sn	Pb	Cu	Sn	Pb	Cu	Sn	Pb	Cu	Sn	Pb
D3-20-02 (2)	91	6.1	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-02 (3)	92	6.8	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-02 (4)	92	6.3	1.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-02 (5)	92	6.5	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-02 (mean)	91	6.7	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-02 (σ)	1.0	0.6	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03	Barrel (bore, a burr)			-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (1)	85	12.4	2.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (2)	89	9.3	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (3)	83	13.7	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (4)	84	13.3	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (5)	83	13.5	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (mean)	85	12.4	2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-03 (σ)	2.3	1.7	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04	Barrel (outer layer)			-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (1)	93	5.8	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (2)	93	6.5	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (3)	94	5.7	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (4)	94	5.8	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (5)	93	5.8	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (mean)	94	5.9	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-04 (σ)	0.3	0.3	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06	By-product (amorphous mass)			-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (1)	83	12.6	4.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (2)	84	12.8	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (3)	81	14.1	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (4)	82	12.0	5.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (5)	82	13.3	4.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (mean)	82	13.0	4.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-06 (σ)	0.9	0.7	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08	Chase (bore)			-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (1)	93	5.7	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (2)	93	6.1	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (3)	94	5.8	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (4)	93	5.9	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 2 (continued)

Object ID_EDX spot number	Specimen #1			Specimen #2			Specimen #3			Specimen #4			
	Cu	Sn	Pb	Cu	Pb	Sn	Cu	Pb	Sn	Cu	Pb	Sn	Pb
D3-20-08 (5)	94	6.1	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (mean)	93	5.9	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-08 (σ)	0.3	0.2	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-09	Chase (surface, a burr)			Chase (inner layer)			Chase (outer layer)						
D3-20-09 (1)	93	5.6	1.0	96.2	3.0	0.8	97.8	2.0	0.2	-	-	-	-
D3-20-09 (2)	93	6.0	1.4	97.1	2.4	0.5	97.8	2.0	0.2	-	-	-	-
D3-20-09 (3)	93	5.5	1.2	97.6	2.0	0.4	97.8	2.0	0.2	-	-	-	-
D3-20-09 (4)	91	7.0	2.2	97.1	2.4	0.5	97.5	2.4	0.2	-	-	-	-
D3-20-09 (5)	94	5.3	1.2	97.8	1.8	0.4	97.3	2.2	0.4	-	-	-	-
D3-20-09 (mean)	93	5.9	1.4	97.2	2.3	0.5	97.6	2.1	0.2	-	-	-	-
D3-20-09 (σ)	1.0	0.6	0.4	0.6	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	-	-	-	-
D3-20-10	Barrel (outer layer)												
D3-20-10 (1)	93	6.0	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (2)	94	6.0	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (3)	94	5.8	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (4)	94	6.2	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (5)	93	6.1	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (mean)	94	6.0	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-10 (σ)	0.3	0.1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11	Chase (bore)												
D3-20-11 (1)	93	6.3	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (2)	92	7.0	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (3)	93	6.4	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (4)	93	6.4	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (5)	94	5.5	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (mean)	93	6.3	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-11 (σ)	0.7	0.5	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-20-14	2nd reinforce (inner layer)			1st reinforce (outer layer)			By-product (amorphous mass)						
D3-20-14 (1)	95	4.4	0.5	95.1	4.3	0.7	95.1	4.3	0.6	-	-	-	-
D3-20-14 (2)	95	4.4	0.3	93.1	3.3	3.6	97.1	2.4	0.4	-	-	-	-
D3-20-14 (3)	93	6.4	0.6	92.0	4.9	3.1	97.1	2.6	0.3	-	-	-	-
D3-20-14 (4)	96	4.2	0.3	93.8	4.6	1.6	97.4	2.3	0.3	-	-	-	-
D3-20-14 (5)	95	4.6	0.3	94.8	4.8	0.5	98.1	1.8	0.1	-	-	-	-
D3-20-14 (mean)	95	4.8	0.4	93.7	4.4	1.9	97.0	2.7	0.3	-	-	-	-
D3-20-14 (σ)	0.9	0.8	0.1	1.1	0.6	1.2	1.0	0.9	0.2	-	-	-	-

The gunfounding process

Given each piece was cast in an individual mould, every bronze gun was indeed unique—notwithstanding, quite similar “serial” pieces were produced by particular gunfounders using a single wooden template (see López-Martín 2011:361–362). In *Pirotechnia*, Vannoccio Biringuccio (1540) made a technical description of the gunfounding process as nobody previously had done before, providing guidelines for making bronze guns as fine as possible.⁶ Until the nineteenth century, three other works are worth mentioning. The throughout-illustrated study of Pierre Surirey de Saint-Remy, first published in 1697, stand out (Saint-Remy 1707). It was the basis for the classical Diderot’s *Encyclopédie* contribution on “Fonderie des Canons” (Diderot and d’Alembert 1767). In the late-eighteenth century, the French mathematician Gaspard Monge also published a technical treatise on gunfounding (Monge 1793–1794). The described methods to cast hollow guns differ little in essence (Murphy 2001:85).

Accounts on the moulding and casting processes were developed by combining data from documentary sources and archaeological evidence (e.g. Guilmartin 2005; Barker 1983; Keith et al. 1997; Keith and Rodriguez 2001; Kennard 1986; Murphy 2001; Hoskins 2003; López-Martín 2011). Casting a bronze gun was a highly skilled practice that comprised several interdependent phases, involving important technical operations. The success of the whole relied on the strict accomplishment of every step, which is summarized below.⁷

Preparation of the pattern and mould (step 1)

Guided by a drawing of the gun to be obtained, a full-sized pattern or model of the gun (i.e. the positive) was carefully built in wood or clay. If not all were made of wood, it was advisable to use a thick tapered wooden spindle which was wound around with rope and coated with several layers of clay or another suitable compound to achieve the desired thickness. Once dried, the trunnions, dolphins, ornaments (cornices and rings), and other decorations made of clay or wax were added to its surface and removed when the

spindle was drawn out. At this phase, a full-size template or strickle board helped to obtain a uniform profile (Fig. 14, items A to E).

The mould was made around the model, first covering it with ashes or a fatty substance for acting as a demoulding agent (e.g. tallow), and then applying a coat of fine loam to guarantee the fidelity of the product’s outer details, which was enlarged by several layers of fine quality clay that resist the fire well.⁸ The exterior coatings were reinforced with iron wires, rods, and bands, also covered with clay. After drying, the pattern was removed from the inside, and the gates and vents were drilled at the feeding head (casting bell). The mould was elaborated in three or more separated parts, joined together: one for the body (the jacket or principal mould), one for the breech-cascable (it closed the mould at the bottom), and one for the bore (the core, attached inside with chaplets). Each part was individually baked with charcoal or wood, any crack was replastered, and the mould’s inside was cleaned with care and covered with ashes (Fig. 14, items F to Q). Guaranteeing an adequate strengthening and drying of the mould was of most critical importance.

Turn on the kiln and melting of the alloy (step 2)

This process was developed in reverberatory furnaces using charcoal as fuel. Fine copper and tin (unalloyed) were melted and mixed. Also, bronze from scrap pieces and a minor amount of other metal elements could be added (see below). The type of bronze was defined according to the proportions (by weight) of fine metals. If old bronze was supplemented, a rough estimation based on the expected composition of each type of artefact was done. A test to assess the quality of the molten metal could be carried out and an adjustment of the ratio of metals developed if needed. A critical aim was to achieve a complete and homogeneous melting with the desirable quality.

Pouring the molten bronze and cooling (step 3)

The mould was placed in an upright position and breech-down in a pit at the foot of the furnace, where it was buried with rammed earth.⁹ There, it was fed through a reservoir chamber placed above the muzzle (i.e. the feeding head), which received the molten metal through a pouring channel (Fig. 15). Once it was filled beyond the muzzle, the addition

⁶ The English and commented edition of this treatise by Smith and Gnuci (1990) is referenced here.

⁷ Here is described the conventional procedure of seventeenth-century hollow casting. Experimental or uncommon methods were also proposed (e.g. Firrufino 1648:101–103), but their application was limited. Composite guns (iron-lead-copper) retrieved from the *Batavia* (1629) wreck site stand out (Green 1980). Local technical variations linked to operational and economic conditions should also be considered, as the Dutch and English non-standard bronze guns associated with the Portuguese galleon *Sacramento* (1668) attest to (Guilmartin 1982:134–138; Hoskins 2003:45–46). However, only a few other Dutch composite guns are known worldwide (Brinck 2020a:27).

⁸ The desired physical qualities of clay and alternative acceptable compounds for making moulds are also mentioned by Biringuccio (Smith and Gnuci 1990:218–220).

⁹ This upward position was the most effective to favour the material soundness at the gun’s critical part, the breech, which was subjected to the greatest internal stresses (Guilmartin 1982:140; Murphy 2001:94).

Fig. 11 Mean composition of samples: **a** bar plot of the Cu–Sn–Pb content; and **b** comparison of Cu and Sn of the gun remains (blue) and casting by-products (red); differences in the Pb amount are indicated by the circles' diameter. Images: A. Zuccolotto



of tin would counterbalance the deficiency of this element in the last areas to solidify (inverse segregation) and improve the alloy's fluidity to avoid sponginess and porosity.¹⁰ The heavy-weight torrent of molten metal was a significant stressor for the mould, therefore the pouring had to be done very carefully and an adequate filling of the feeding head

was essential. The solidification process was developed at room temperature for several days, for such slow cooling conditions made it possible to obtain a relatively homogeneous material.

Breaking the mould, finishing, and proofing (step 4)

Once cooled, the mould was lifted, disassembled, and broken. Then, the core was extracted, the feeding head and any excess material from the gun sawn off, the vent or

¹⁰ According to Barker, this addition lowered the melting point of the alloy guaranteeing the function of the reservoir but would have not affected the composition of the actual casting (Barker 1982:71).

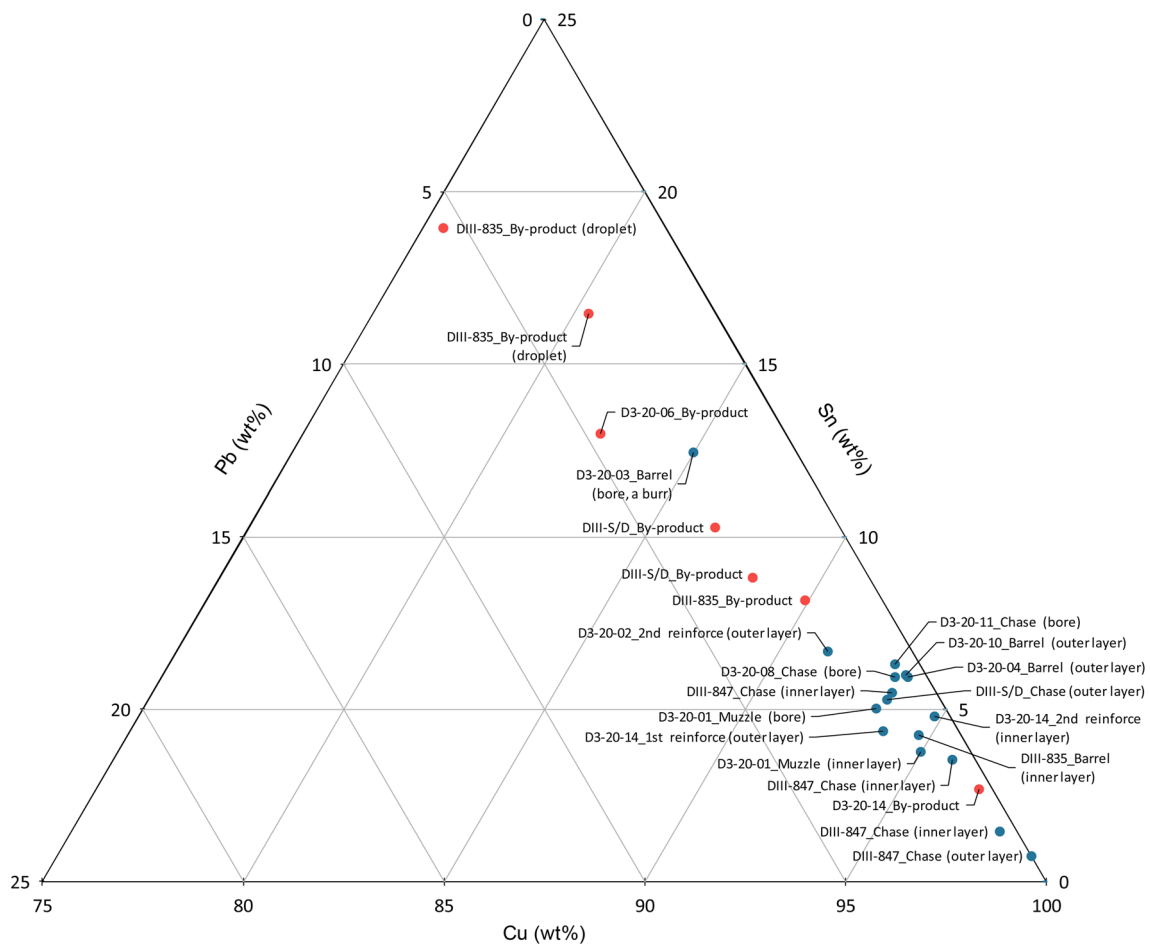
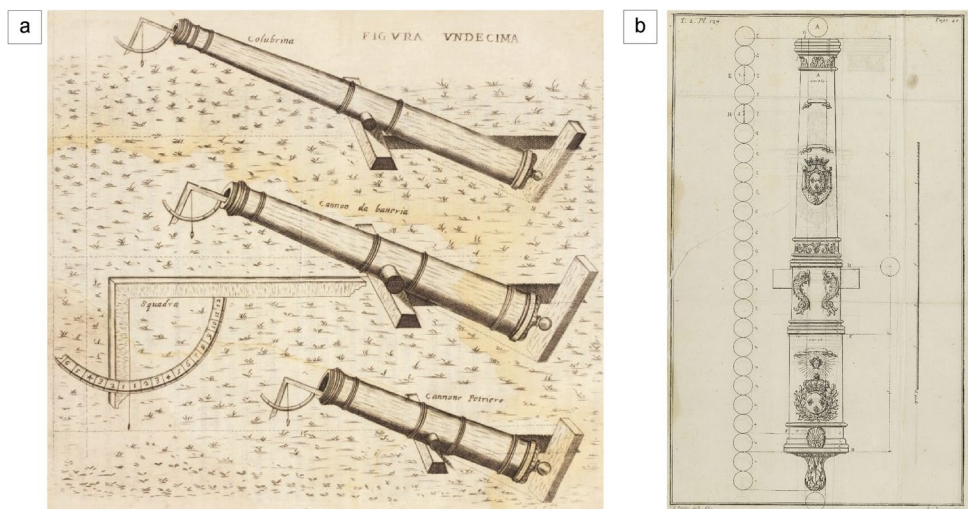


Fig. 12 Triangular plot of Cu, Sn, and Pb of the gun remains (blue) and casting by-products (red). Image: A. Zuccolotto

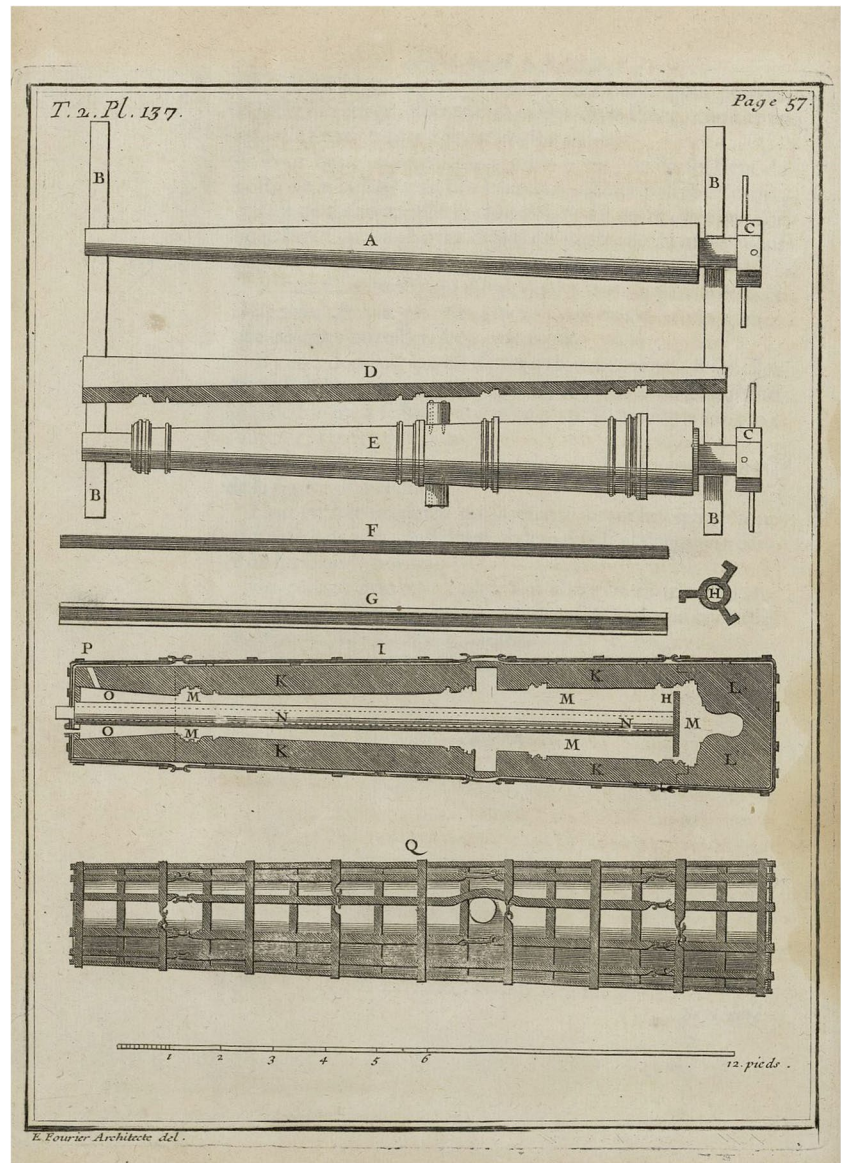
Fig. 13 Early-to-late bronze artillery: **a** a comparison between an early seventeenth-century culverin, cannon, and perrier, from Sardi's treatise *L'artiglieria* (1621, plate 11); and **b** a scale drawing of a French 24-pdr bronze gun from 1685, whose main dimensions are well established in proportion to its calibre (Saint-Remy 1707: plate 127; see also plate 147, where a 4 to 36-pdr guns series is depicted)



touchhole cleared or drilled, and the entire surface removed from imperfections. Given its implications for the gun's accuracy, the rectification of the bore was carried out to

achieve a smooth surface. Moreover, the pieces underwent a strict quality assessment comprising a visual inspection and mechanical sound test to identify possible surface and

Fig. 14 Items involved in the mould preparation, including the wooden spindle (A), template or strickle board (D), the full-sized pattern of the barrel (E), the iron rod (F) for the core (G), the iron chaplet (H), and the finished clay mould of the barrel and breech-cascable: detailed inner view (I) and external appearance (Q); also note the feeding head above the muzzle (O) (Saint-Remy 1707: plate 137)



inner flows. For the gun to be accepted for service, a final proof firing was developed.

Minor and significant foundry defects or a complete failed casting might have been related to different interdependent factors during steps 1, 2, and 3. This situation, reflected by the remains recovered from the Delta III site, is further assessed in the next section.

On the casting defects and failed products

Gunfounding was a very complex practice. Obtaining a sound casting demanded a large expertise and rigorous control of several interrelated variables in every stage of the process. Errors were not unusual and their consequences on products covered from outer surface imperfections such as

porosity to inner blowholes, cracks, and misruns (incomplete casting), among other defects. A gun's barrel was not equally stressed in its radius and circumference during firing (see Murphy 2001:73–75, for an analysis of stress distribution). Therefore, while the slight surface deficiencies were evident and non-catastrophic for the gun's performance, internal defects were imperceptible to the naked eye and could have made the product unsuitable for service or useless at all.¹¹ The situations were not homogeneous and the acceptance

¹¹ Mechanical properties of bronze castings are also conditioned by other microstructural characteristics such as dendrite arm spacing, macro- and micro-segregation, morphology and distribution of inclusions, which in turn are conditioned by the casting technique (Taşlıçukur et al. 2012).

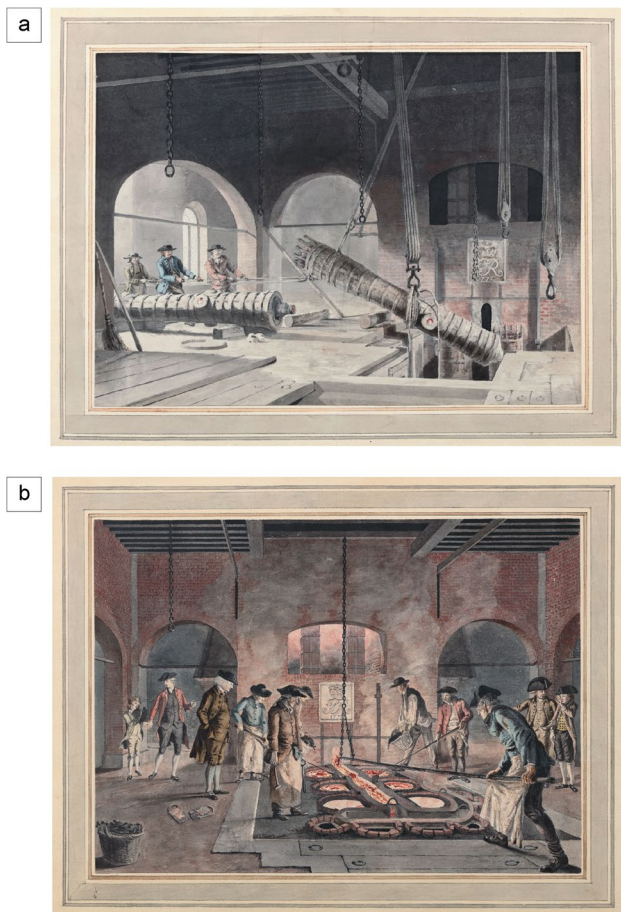


Fig. 15 A depiction of two stages of the gunfounding process at the Woolwich arsenal, of about mid-to-late 1770s, from Jan Verbruggen's collection of foundry drawings: **a** the setting up of moulds; and **b** the pouring of molten metal. The authorship of these drawings is debated between Jan Verbruggen and Paul Sandby. Courtesy of the Semeijns de Vries van Doesburgh Foundation (<https://janverbruggen.com/the-foundry-drawings-2/>)

or rejection of a deficient piece depended much on the type and location of flaws, the quality standards and its destiny.¹²

The well-known major technical constraints in casting suitable large bronze objects were probably solved by the early fifteenth century (Guilmartin 2021). This empirical knowledge was closely linked to bell founding practice, further developed and later addressed in renowned metallurgical and artillery treatises.¹³ Indeed, Biringuccio

¹² Some defects in ships' guns, such as a deviation in the bore alignment and inner gas voids shown by a *media-culebrina* (demiculverin) recovered from *El Gran Grifon* (1588), could seriously affect their effectiveness in action, yet it passed for service (Martin 1984:284–285).

¹³ This fruitful nexus between both industries remained for a while; to some extent, the production of bronze guns in continental Europe during the sixteenth century was still in charge of bell founders (Hoskins 2003:46–47). On the other hand, López Martín posed that bell founders made guns at an early stage, but once gunfounding was developed, it was more usual to find gunfounders casting bells and other items than vice versa (López Martín 2011:365–367).

stated that accidents were not occasioned by fortune, but by human errors associated with misinformation, negligence, shortcuts, and savings during the process (Smith and Gnuci 1990:214–216). Based on this work and subsequent studies on gunfounding and naval ordnance (e.g. Sardi 1621:49–51; Barker 1983:70–71; Martin 1984:279–282; Murphy 2001:91–94; Hoskins 2003:29–51; López-Martín 2011:352–356) and metal casting technology (e.g. Campbell 2011; Sertucha and Lacaze 2022), a series of interrelated human and material failure factors and mid-term consequences and potential defects in products were summarized or inferred (Table 3).

Among studied bronze pieces from other sites (see above), minor defects on guns' surface were reported in a cannon from *La Belle* (1686) most likely cast at the Rochefort foundry between 1670 and 1679 (Keith et al. 1997:149) and the French guns recovered from the 90-gun warship HMS *Association* (1707), cast in 1638 and exhibiting blow holes and shrinkage sinks (Upton 1970, cited in Tylecote 1976:96).¹⁴

Guns severely damaged by a fire or a blast were also recorded in different contexts. Evidence of artefacts subjected to intense heat during the fire at the Grand Storehouse (Tower of London) in 1841 stands for the first case (Fig. 16a). The account of the salvaging of the 90-gun Danish ship HDMS *Dannebrog* (1710) is also intriguing. In 1711, twelve tons of fragmented bronze guns were recovered and melted down to re-cast smaller pieces. This debris seemed to result from the damage suffered when the vessel burnt and exploded (Christoffersen 1998:145). The inspection of three fragmented bronze pieces, two of them cast in 1604, from the VOC ship *Nassau* (1606) led authors to suggest that their condition could be the result of the heat suffered during the ship's burning (Bound et al. 1998:90–91, 101–102) (Fig. 16b). Another gun alleged to be subjected to firing was found isolated in an underwater context, near Fågelskär, in Stockholm's central archipelago and is nowadays hosted in the Swedish Army Museum (Armémuseum). It was cast in 1616 and displays the coat of arms of the Duke Johan of Östergötland (1606–1618), Sweden (Roth 2021) (Fig. 16c). Some details of the last two specimens also resemble those exhibited by failed castings (see above).

Scraps of bronze guns from the period were also found in inland archaeological sites, such as the remains of the Swedish castle of Kronoberg, ca. 1440 s to 1650 s (Smålands Museum – DigitalMuseum, pieces Nos. M

¹⁴ Defective and/or broken bronze guns have been also reported in several sixteenth-century shipwrecks (e.g. Martin 1972:63; Mihajlović et al. 2018:14–17). If this evidence stands for old pieces transported as cargo/ballast, guns exploded on board during firing or post-depositional processes, is an issue not easy to solve. In certain underwater contexts, mechanical and erosion conditions can also largely affect bronze guns (see van Duivenvoorde 2010).

Table 3 Common failure factors and undesirable functional and aesthetical defects associated with gunfounding, with emphasis on mould making and actual casting (melting, pouring, solidification, and cooling)

Failure factors	Mid-term consequences	Defects on the products
Employment of a low-quality (e.g. low refractoriness), non-uniform clay or earth for making the mould	Mould shrinks and cracks after drying or baking (most could be replastered)	Surface defects (e.g. veins/rat tails); mould partial break (due to pressure of molten metal); fusion (between the metal and the clay); and swell
Incomplete drying of moulds layers or partial baking of the finished mould	Surface coldness and moisture (that suddenly boiled once in contact with molten metal from the kiln)	Gas porosity (e.g. pinholes, blowholes, blisters); surface sponginess; incomplete casting; and mould harm
Deficient reinforcement of the mould or locking of mould parts' unions	Mould structural weakness	Mould break or collapse
Narrow or small vents	Insufficient room for gases to escape (i.e. poor venting)	Scares (shallow blows); and gas porosity
Improper cleaning of the mould's inner surface (e.g. residues of the model and holes)	Adhering molten metal to the mould's walls	Rough or irregular surface, coarse decoration
Asymmetrical mould or misalignment of the mould's parts (e.g. inaccurate siting of the chaplets)	Irregular axis; core deviation; incorrect assembling	Irregular gun's metal thickness (at the foot or head); off-centred or awry bore; shift or mismatch of the breech; and flash (fins/burrs)
Cracking of the core surface (e.g. because of low-quality clay)	Penetration of the molten bronze through the fissures	Non-smooth or irregular bore surface
Low-compression of the base and earth used to cover the well where the mould is placed	Weak foundation and external support; instability of the mould	Mould displacement, break, or collapse
Poor heating of the furnace; unsuitable managing of fusion times; inadequate alloy composition	Material not completely melted; low fluidity alloy poured into the mould	Sponginess; shrinkage porosity; misruns (incomplete casting); and cold shuts (round edge laps at the surface)
Excessive heating of the furnace	High pouring temperature of molten metal	Fusion; and rat tails and buckles
Insufficient charging material	Underpour (not enough feeding material to offset metal contraction during cooling)	Incomplete casting; and shrinkage porosity and outer cracks or depressions, especially at the muzzle
Not well-controlled pouring of the molten metal	Slow, interrupted, or excessive pouring rate; inadequate filling of the feeding head	Gas porosity; sponginess; cold shuts; and washes (due to erosion of the mould surface)
Uneven or uncontrolled chilling of the mould	Early cooling while pouring; different solidification rates in mould parts; residual (internal) stresses	Misruns; shrinkage porosity; hot tears (during solidification); cold tears (during solid state cooling); and warpage

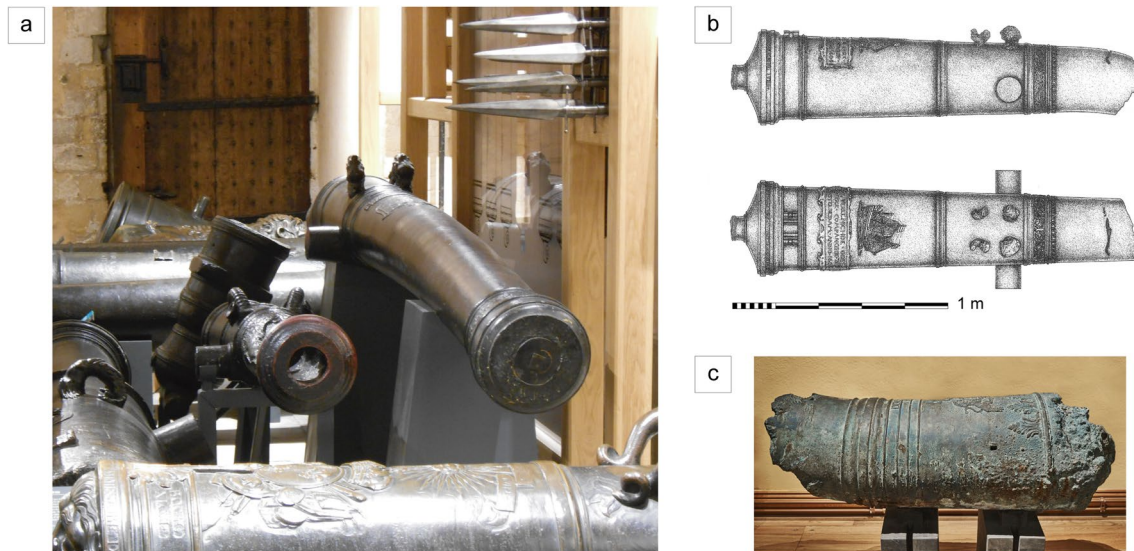


Fig. 16 **a** A ca. 1600 Spanish 12-pdr bronze demi-culverin whose chase was bent by fire, hosted at the Tower of London; **b** remains of one of the damaged bronze cannons recovered from the *Nassau* (1606); and **c** bronze gun recovered from an underwater site in Swe-

den. Images: **a**) NC Ciarlo (see also Blackmore 1976:146–147); **b**) after Bound et al. (1998: Fig. 39); and **c**) A Svedberg, © Armémuseum – DigitalMuseum (<https://digitalmuseum.se/0211810758646/hertig-johans-eldror>); licence: CC BY)

17000–1953 and M 17000–174), a fragment of a Tudor falconet from the Parish of St Saviour, in Jersey, Channel Islands (Waterhouse 2013:91–92, Fig. 4), and a section of a barrel located near the fortress of the Mancera island, in Valdivia, Chile. This piece, most likely from the early-to-mid seventeenth century, shows part of the founder's name on its surface: ...A | *TEXEDA*... for Alexo de Texeda, i.e. Alejo de Tejada (Carabias Amor et al. 2023).

The occurrence of this fragmentary and scarce record is most likely related to the fact that bronze scrap was usually melted down to re-cast guns or other pieces such as statues and coins (see below). Most of the re-cast old bronze proceeded from obsolete pieces, damaged or exploded guns, and/or failed castings. Useless guns would be expected to be shipped in one piece and fragmented in the foundry before smelting. On the other hand, blast guns should show some evidence of the crack or fracture pattern from inside-out typical of blow-up pieces, most likely near the breech or first and second reinforces (e.g. McConnell 1988: Fig. 15). Pieces showing gunfire injuries, for instance by a direct hit, usually present localised damage (Brinck 2020a:85, Fig. 78).

Neither situation is reflected in the remains of the Delta III site. On the contrary, a series of casting imperfections associated with a failed production was recorded by a surface eye-naked examination and microstructural characterisation. These recorded defects were in form, discontinuity, and microstructure, as defined by Murphy (2001:89). While some degree of gas and shrinkage porosity can be considered typical of cast bronzes from the period, macroscopic

and microscopic features attest to an unusually high level of imperfections. Given their extension, they resulted in catastrophic consequences for the final products, making them completely useless. Altogether, outer and inner flaws recorded in the analysed samples point in the same direction. Were these defective castings in the hands of the master founder or an apprentice? This is hard to assess. Regardless, the analysed assemblage indicates that the failed products were likely the result of a combination of factors across the casting process, related to human decisions, technical means, and raw materials.

On the quality of bronze alloys

According to Biringuccio, in the art of casting the proper and true alloying element for copper is fine tin. The bronze composition was determined by the kind of work (e.g. statues, bells, guns), which in turn relied on the judgment and experience of each founder (Smith and Gnuci 1990:210–211). Until the eighteenth century, there was no common agreement on the desirable composition for guns; the discretion of each founder prevailed, therefore no standard, uniform composition was obtained. Moreover, quality issues arising from applying diverse mixing criteria were not unusual (see Aguilar Escobar 2008:174–175, for the Spanish case).

By the time of Sardi, a bronze alloy of about 100 pounds of fine copper to 8–10 pounds of fine tin was considered optimal (Sardi 1621:47–48). Monge also acknowledged that the copper-tin proportion should not be above 10 to 1 to obtain the desirable properties (Monge 1793–1794:54).

In practice, the applied formulas for casting bronze guns were not homogeneous (see Duponchelle 1932:40; Aguilar Escobar 2008:175–178; Ringer et al. 2013:8; López-Martín 2011:276–277). Riederer assessed the copper-tin-lead ratios of guns from the Museum of Military History, at the Vienna Arsenal, discussing the most common ranges (88–93% copper, 7–11% tin, and 0–2% lead) and detrimental deviations (Riederer 1977:40). Other post-medieval European guns analysed by Gilmour and Northover (2003) show tin contents ranging mainly between 5 and 10%. Higher values of tin (up to 14%) were also reported (Browne 1960, cited in Tylecote 1976:96; Forshell 1984, cited in López-Martín 2011:278).

This variability is related to several non-exclusive factors such as differences in the founders' preferences, the non-standardised methods for mixing, the heterogeneity of raw materials, and the usual combination of fine metals and old bronze (see below). Moreover, differences can be observed between gun genres of a particular context (McConnell 1988:15). Likewise, a certain range in the concentration of the alloying elements within each piece is expected in sound bronze guns, given the material characteristics, production process, and gun's area—e.g. tin and lead tend to accumulate in the breech area, while the higher content of copper is distributed at the muzzle (Forshell 1992:125, 137). This inner heterogeneity was reported in small pieces to a lesser degree, in particular across their wall's thickness (e.g. Iddan et al. 2022:9, 12).

The bronze of guns often contained minor proportions of other metal elements such as lead, zinc, and also iron impurities. For instance, all five Dutch cannons recovered from the *Batavia* (1629) wreck site have substantial impurities which seemed to proceed from the refined copper and/or were accidentally introduced during casting (Samuels 1992:98, table 6). On the other hand, by an *ex professo* addition of lead or zinc, gunfounders sought to improve some mechanical and aesthetical properties of their products (Meide 2002:31). Those complex alloys were not free of inconveniences if not well proportioned, demanding further care during casting (Duponchelle 1932:41). For assessing the rough copper-tin ratio and impurities, the founders applied a qualitative test based on the colour and brittleness of a chip. In this regard, Firrufino stated that a reddish-blue short shiver stands for a leaded-bronze alloy, which was considered dangerous for guns (Firrufino 1648:111). This caution was likely grounded in the lower tensile strength and ductility of these bronzes. However, as lead adds pressure tightness and acts as a lubricant, in small quantities, it would have contributed to the gun's soundness and machinability (Tylecote 1976:96; Murphy 2001:76; Campbell 2011:310; Witzke 2023:5).¹⁵ Lead present in reported European guns

from the period is usually below 1%, and up to 2% (Riederer 1977:37–38; Gilmour and Northover 2003:4; Ringer et al. 2013:9).

Summing up, differences in alloy composition and the presence of impurities were not uncommon in bronze guns from the period. The heterogeneity degree in the elemental composition of barrel fragments from the Delta III site, however, may indicate either a deficient production, the application of a non-standard formula, the use of scrap material, and/or other irregularities during the casting process. It is worth mentioning the low tin content some pieces exhibited (e.g. gun No. DIII-847), which would have been inconvenient for its manufacture and use.

Melting down of old metal in bronze foundries for casting serviceable ordnance

Recycling could be broadly defined as the re-utilisation of certain manufactured goods, once used or considered scrap (e.g. a failed casting), as raw material to obtain a new product, similar or different to the original. This and other stages of the artefacts' life cycle or *chaîne opératoire* have been widely addressed through the study of archaeological remains (Thomas and Saussus 2020; Bray 2022; among others).

Melting down failed castings and old bronze pieces for re-casting new serviceable ordnance was a usual practice in England, Spain, and other European countries during the seventeenth century and thereafter (Wilson 1988:93; Aguilar Escobar 2008; among others). For instance, the picture provided by Lavery for the British vessels suggests that the use of old bronze to cast new guns was intensified by the hand of an increasing use of cast iron pieces to equip most but the largest ships (1st and 2nd rates) since about the 1750s (Lavery 1987:85–86).

Not only unserviceable guns were selected for this purpose, but also other pieces such as bells and statues (López-Martín 2011:279–280). As their copper-tin proportions were not within the usual range of gun alloys, gunfounders needed to adjust the proportions to obtain a suitable product. Pollard mentioned that church bells were melted down to cast cannons in Revolutionary France. Experiments carried out by chemists around 1790 allowed them to separate copper from the tin of bells, and estimate the content of copper recovered on quantitative grounds (Pollard 2013:339–340; see also Monge 1793–1794:54–58).¹⁶ In the preceding century, to obtain the appropriate proportions for guns, this data was roughly estimated by bell- and gunfounders.

¹⁵ The addition of lead in higher quantities, even if it was prejudicial, was acknowledged as a formula to reduce the cost of guns (López-Martín 2011:357).

¹⁶ Reciprocally, commemorative bells were cast with bronze guns taken as war trophies (Smith and Gnuci 1990:223). Also, scrap guns have been used to cast statues and other items (Roth 2021).

Fig. 17 A Renaissance view of the interior of a gun foundry: Pulvis Pyrius (Invention of Gunpowder), plate 3 from *Nova Reperta*, based on a design of Flemish artist Jan van der Straet, known as Johannes Stradanus (1523–1605), and later engraved by Philip Galle for the print series, ca. 1580–1605. Courtesy of the Smithsonian Libraries and Archives (ID: SIL-nouareperta00stra_0009, <https://library.si.edu/image-gallery/110721>)



A late sixteenth-century engraving depicting the interior of a foundry provides a snapshot of the various activities related to gunfounding. One, in particular, attests to the recycling of old bronze. In the background, through the middle arch, a man is melting down parts of broken guns which were hoarded in a pile near the furnace (Fig. 17).

This practice provides the most likely explanatory framework for the final destiny of bronze scrap recovered from the Delta III site. Moreover, the masses of amorphous bronze and barrel pieces welded together suggests that they could have even resulted from an early failed attempt to recast broken guns, which were only partially melted down. To melt down, some of the failed products carried on board the vessel should have been fragmented into smaller pieces. The size heterogeneity of the studied materials suggests that no specific criterion was followed before they were stowage, and at least part of the cargo was shipped in the as-cast condition.

Conclusion

This study allowed us to better understand the available knowledge and activities associated with gunfounding. It was a laborious, expensive, dangerous, and difficult art. In particular, macroscopic and microstructural data obtained from the scrap bronze remains retrieved from the Delta III site have provided new insights into the quality of the materials used and the factors involved in the failed castings.

The design, decoration, and marks of various gun fragments point to a two-fold possibility: at least part of the

assemblage was most likely cast in the same foundry and linked to a renowned family of seventeenth-century German bell and gunfounders. Meant to be melted down and re-cast into new pieces, the scraps of bronze guns were left halfway resting in the bottom of the Bay of Cadiz. That the failed products were not meet the required quality to melt down at this workshop and/or it was more profitable to sell them as bronze scrap to foreign foundries, among other possibilities, should be further explored. Their final destination also deserves additional attention, given the well-known practice of recycling old bronze in foundries such as the Royal Artillery Factory of Seville.

Analysed evidence attests to the challenges and drawbacks that specialised founders usually faced at workshops of the time. Despite the large empirical knowledge and skills they had, reflected in the impressive products that survived up to nowadays, and the acknowledged importance of bronze guns for ships, armies, and states, the outcomes of this research support the idea that seventeenth-century bronze gunfounding was still far from being a standardised practice.

Acknowledgements The authors are very grateful to Lina Berglund (Thermo-Calc Software AB), Mercedes Gallardo Abárzuza and José M. Higuera-Milena Castellano (Tanit Gestión Arqueológica S.C.), Juan González García (University of Cadiz), Giovanni Luigi Ernst (Pro Heraldica), Malcolm Mercer and Richard Noyce (Tower of London), Igor Mihajlović (Croatian Conservation Institute), Peter Northover (Research Laboratory for Archaeology and the History of Art), Luis Miguel Rodríguez Jaren (University of Cadiz), Jan Schlürmann (Schleswig-Holstein State Parliament), Joanne Thomson (Royal Artillery Museum), and Ralf Weichmann (Museum for Hamburg History), for their support and information provided. Also, a special thanks to Ben van Doesburgh (Semeijns de Vries van Doesburgh foundation), Trina Brown, and Erin Clements Rushing (Smithsonian Libraries and Archives), for their generous assistance with Figs. 15 and 17. To the

anonymous reviewer, whose valuable insights allowed us to improve the original draft.

Author contribution Conceptualization: Nicolás C. Ciarlo; Methodology: Nicolás C. Ciarlo and Manuel Bethencourt; Formal analysis and investigation: Nicolás C. Ciarlo and Josefa Martí Solano; Conservation and digital recording of samples: Elisa Fernández Tudela; Statistical analysis of compositional data: Andrés Zuccolotto Villalobos; Writing—original draft preparation: Nicolás C. Ciarlo and Josefa Martí Solano; Writing—review and editing: Nicolás C. Ciarlo; Funding acquisition: Nicolás C. Ciarlo and Manuel Bethencourt; Resources: Nicolás C. Ciarlo, Josefa Martí Solano, Manuel Bethencourt, Ernesto J. Toboso Suárez, and Raúl González Gallero; Fieldwork coordination: Ernesto J. Toboso Suárez, and Raúl González Gallero; Supervision of reported work: Nicolás C. Ciarlo and Josefa Martí Solano. All authors agree to publish this article.

Funding This research was developed with the support of the Society for Archaeological Sciences, through the SAS ECR Research Support Award (2021), granted to Nicolás C. Ciarlo. His studies at the University of Cadiz were also supported by the National Scientific and Technical Research Council (CONICET), through the Support Program for International Research Stays. The equipment and funding to conduct the characterisation of samples were provided by Manuel Bethencourt, chair of the Laboratory of Studies and Conservation of Culture Heritage (LEC-PH) at the University of Cadiz, through a grant from the Spanish State Research Agency, Ministry of Science, Innovation and Universities (State Plan I + D + i 2017–2020, EQC2018-004947-P).

Data availability Research data are available at the Underwater Archaeology Center of the Andalusian Historical Heritage Institute, and at the Department of Materials Science, Metallurgical Engineering and Inorganic Chemistry, Faculty of Marine and Environmental Sciences, University of Cadiz, in Cadiz, Spain. Further information not included in this article is attainable to the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

Competing interests The authors declare no competing interests.

References

- Aguilar Escobar A (2008) La Real Fundación de Sevilla (1717–1808). Doctoral dissertation, Department of Modern History, Faculty of Geography and History, National Distance Education University. <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:GeoHis-Aguilar/Documento.pdf>. Accessed 8 May 2023
- Alcalá-Zamora y Queipo de Llano J. (1970–1971) Velas y cañones en la política septentrional de Felipe II. Cuadernos de Historia Jerónimo Zurita 23–24:225–244
- Ashkenazi D, Cvikel D, Langgut D, Rosen B, Galili E (2017) Artillery and rigging artefacts from the Megadim wreck-site, Israel. J Archaeol Sci Rep 14:91–105. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.031>
- Barker R (1983) Bronze cannon founders: comments upon Guilmartin 1974, 1982. Int J Naut Archaeol 12(1):67–74. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1983.tb00112.x>
- Beltrame C, Ridella RG (eds) (2011) Ships and Guns The sea ordnance in Venice and in Europe between the 15th and the 17th century. Oxbow Books, Oxford
- Bethencourt M, Hernández MA, Martínez EA, Abreu CM (2013) Apuntes sobre la evolución histórica de la metalurgia armamentística española de los siglos XVII a XIX a través de la caracterización de balas de cañón. Proceedings of the IV Congreso Latinoamericano de Conservación y Restauración de Metal. Instituto del Patrimonio Cultural de España and Grupo Español de Conservación, Madrid, pp. 391–399
- Biringuccio V (1540) De la Pirotechnia. Venice: C. Navò. <https://library.si.edu/digital-library/book/delapirotechnia00biri>. Accessed 8 May 2023
- Blackmore HL (1976) The Armouries of the Tower of London (Vol. 1: Ordnance). H.M. Stationery Office, London
- Boenheim W (1884) Die sammlung alter geschütze im K. K. Artillerie-Arsenale zu Wien. In: Freiherrn von Helfert JA (dir.) Mittheilungen der k. k. Central-Commission zur Erforschung und Erhaltung der Kunst- und historischen Denkmale. k. k. Hof- und Staatsdruckerei, Vienna, pp. 20–40
- Boudriot J, Berti H (1992) Artillerie de Mer France 1650–1850. ANCRE, Paris
- Bound M, Soo Hing O, Pickford N (1998) The Dutch East Indiaman Nassau, lost at the Battle of Cape Rachado, Straits of Malacca, 1606. In: Bound M (ed) Excavating Ships of War The International Maritime Archaeology Series. Vol. 2. Anthony Nelson Publishers, Shropshire, pp 84–105
- Bray P (2022) Is a focus on ‘recycling’ useful? A wider look at metal mutability and the chemical character of copper alloys. Archaeometry 64(S1):87–97. <https://doi.org/10.1111/arcm.12753>
- Bravo Pérez J, Bravo Soto J (1990) L’épave “Isleos de Santa Catalina”. Naufrage d’un navire français à Ceuta (1692). Cahiers D’archéologie Subaquatique 9:55–74
- Brinck N (2008) Ordnance for the Zeven Provinciën. J Ordnance Soc 20:25–33
- Brinck N (2020a) Guns of the Netherlands: Dutch cannon and other old guns in the Netherlands. Amersfoort: Cultural Heritage Agency of the Netherlands. <https://www.cultureelerfgoed.nl/publicaties/publicaties/2020a/01/01/kanonnen-van-nederland>. Accessed 8 May 2023
- Brinck N (2020b) Dutch guns from the Straits of Messina and their relation to three ‘Spanish’ guns on Terschelling. J Ordnance Soc 27:44–52
- Brinck N, Ridella RG (2016) A cannon cast for the Republic of Genoa from a Dutch flagship. Magazine 16:35–40
- Brown RR (2005) Seis canhões do século XVI provenientes do Santíssimo Sacramento: uma reestimativa. Navigator 1(2):21–34 (<http://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/navigator/article/view/169/145>)
- Campbell J (2011) Complete Casting Handbook. Metal Casting Processes, Metallurgy Techniques and Design. Elsevier, Oxford
- Carabias Amor D, Simonetti Vicuña R, Ciarlo NC, Adán Alfaro L, Godoy Gallardo M, Letelier Pardo D (2023) Explorando evidencias arqueológicas del siglo XVIII en los ambientes marinos y fluviales de la jurisdicción de la Plaza de Valdivia, Chile. Proceedings of the I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática. University of Cadiz, Cadiz (In press)
- Cates M, Chamberlain D (1998) Stirling Castle, 1703. In: Bound M (ed) Excavating Ships of War. The International Maritime Archaeology Series, Vol. 2. Anthony Nelson Publishers, Shropshire, pp 125–141
- Christoffersen J (1998) The warship Dannebrog. In: Bound M (ed) Excavating Ships of War. The International Maritime Archaeology Series, Vol. 2. Anthony Nelson Publishers, Shropshire, pp 142–148
- Ciarlo NC (2017) Una síntesis histórica y propuesta para el estudio arqueológico de la artillería de las Armadas europeas del siglo XVIII. Revista de Arqueología Histórica Argentina y

- Latinoamericana 11(1):5–42. <https://plarci.org/index.php/RAHAYL/article/view/90>
- Ciarlo NC, Argüeso A (2019) Archaeometric and archaeometallurgical studies on historical shipwrecks: research experiences in Argentina. *J Marit Archaeol* 14(1):127–150. <https://doi.org/10.1007/s11457-018-9203-5>
- Collado L (1592) *Platica Manual de Artilleria*. Milan: Pablo Gotardo Poncio. <https://bvpb.mcu.es/es/consulta/registro.do?id=406612>
- Crespo Solana A (2014) A Network-Based Merchant Empire: Dutch Trade in the Hispanic Atlantic (1680–1740). In: Oostindie G, Roitman JV (eds) *Dutch Atlantic Connections, 1680–1800*. Linking Empires, Bridging Borders. Brill, Leiden, pp 139–158
- Crossley D (1975) Cannon-manufacture at Pippingford, Sussex: the excavation of two iron furnaces of c. 1717. *Post-Medieval Archaeol* 9(1):1–37. <https://doi.org/10.1179/pma.1975.001>
- Diderot D, d'Alembert J (eds) (1767). *Recueil de planches sur les sciences, les arts libéraux, et les arts mécaniques, avec leur explication*, Vol. 4. Briasson, David, & Le Breton, Paris. <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/77432>
- Duponchelle J (1932) *Manual del fundidor de metales*. Imp. Guinart y Pujolar, Barcelona
- Firrufino JC (1648) *El perfecto artillero: theorica y practica*. Juan Martín De Barrio, Madrid. <http://bdh.bne.es/bnesearch/detalle/bdh0000013324>
- Forshell H (1992) The inception of copper mining in Falun. *Theses and Papers in Archaeology B:2*. Stockholm University, Stockholm
- González Enciso A (2013) Asentistas y fabricantes: el abastecimiento de armas y municiones al Estado en los siglos XVII y XVIII. *Studia historica: Historia Moderna* 35:269–303. <https://doi.org/10.14201/shhmo201335269303>
- González Gallero R (2023) La exportación de los crisoles a través de la Compañía Holandesa de las Indias Orientales: El caso del Delta III. In: Cerezo Andreo F, Pérez-Reverte Mañas C (eds) *Proceedings of the I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática*. University of Cadiz, Cadiz (In press)
- González Gallero R, Toboso Suárez EJ (2021) El pecio denominado Delta III: Análisis de su arquitectura naval. In: Cerezo Andreo F, Pérez-Reverte Mañas C (eds) *Book of Abstracts, I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática*. University of Cadiz, Cadiz, pp. 122–125. <http://hdl.handle.net/10498/25256>
- Green JN (1980) The armament from the Batavia. 1. Two composite guns. *Int J Naut Archaeol* 9(1):43–51. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1980.tb01271.x>
- Guilmartin JF (1982) The cannon of the Batavia and the Sacramento: early modern cannon founding reconsidered. *Int J Naut Archaeol* 11(2):133–144. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1982.tb00068.x>
- Guilmartin JF (2005) Exploiting the guns of the Santíssimo Sacramento: an analysis of early modern naval ordnance, gunnery and gunfounding. In: Guilmartin JF (ed) *Materializing the Military*. Bernard Finn and Bart Hacker, London, pp 21–45
- Guilmartin JF (2021) The gunpowder revolution, c. 1300–1650. *Encyclopaedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/military-technology/The-gunpowder-revolution-c-1300-1650>. Accessed 8 May 2023
- Gilmour P, Northover P (2003) The metallurgy of artillery. In *Archaeometallurgy in Europe: international conference*. Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, pp. 253–261
- Hoskins SG (2003) *16th Century Cast-Bronze Ordnance at the Museu de Angra do Heroísmo*. Master dissertation, Texas A&M University. <https://nautarch.tamu.edu/Theses/pdf-files/Hoskins-MA2004.pdf>
- Iddan N, Ashkenazi D, Klein S, Cvikel D (2022) Metallurgical analysis of a bronze powder chamber retrieved from an underwater excavation in Akko (Israel): an application of novel minimally destructive field multi-focal metallography. *Archaeol Anthropol Sci* 14:131. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01594-3>
- Keith DH, Carlin W, de Bry J (1997) A bronze cannon from La Belle, 1686: its construction, conservation and display. *Int J Naut Archaeol* 26(2):144–158. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1997.tb01326.x>
- Keith D, Rodriguez J (2001) From the inside out: Moulding and casting the bore of a 17th century bronze cannon. *J Ordnance Soc* 13:63–72
- Kennard AN (1986) *Gunfounding and gunfounders: a directory of cannon founders from earliest times to 1850*. Arms and Armour Press, London
- Lavery B (1987) *The Arming and Fitting of English Ships of War, 1600–1815*. Conway Maritime Press, London
- L'Hour M, Long L, Rieth E (1990) The wreck of an 'experimental' ship of the 'Oost-Indische Compagnie': The Mauritius (1609). *Int J Naut Archaeol* 19(1):63–73. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1990.tb00235.x>
- López-Martín FJ (2011) *Esculturas para la guerra. La creación y evolución de la artillería hasta el s XVII*. Ministerio de Defensa and Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid
- Martin CJM (1972) El Gran Grifon. An Armada wreck on Fair Isle. *Int J Naut Archaeol* 1:59–71. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1972.tb00676.x>
- Martin CJM (1984) *The equipment and fighting potential of the Spanish Armada*. Doctoral dissertation, University of St Andrews, Fife, Scotland. <http://hdl.handle.net/10023/10991>
- McConnell D (1988) *British Smooth-bore Artillery*. National Historic Parks and Sites Branch, Parks Canada, Ottawa
- Meide C (2002) *The Development and Design of Bronze Ordnance, Sixteenth through Nineteenth Centuries*. LAMP Artifact Study No. 2. Lighthouse Archaeological Maritime Program, St. Augustine Lighthouse & Museum, St. Augustine, Florida. https://www.academia.edu/3245770/The_Development_and_Design_of_Bronze_Ordnance_Sixteenth_through_Nineteenth_Centuries. Accessed 8 May 2023
- Mihajlović I, Miholjek I, Bezak J (2018) The recent discovery of three shipwrecks with bronze ordnance – Sveti Pavao, Brečine and Vis Harbour (Croatia). *J Ordnance Soc* 25:5–23
- Monge G (1793–1794) *Description de l'art de fabriquer les canons*. Paris: Imprimerie du Comité de Salut Public, An 2. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56990q.image>
- Murphy S (2001) The technology of casting cannon. *J Ordnance Soc* 13:73–95
- Nielsen WD Jr (2019) *Metallurgy of Copper-Base Alloys*. Copper Development Association Inc, USA (https://www.copper.org/resources/properties/703_5/)
- Northover P (2011) Appendix 1: Gun Metallurgy. In: Hildred A (ed) *Weapons of Warre: the armaments of the Mary Rose Archaeology of the Mary Rose*, Vol. 3. The Mary Rose Trust, Portsmouth, pp 946–960
- Oliver Laso JJ, Ramírez Pernía A (2021) «Bernardino de Texeda me fecit»: Artillería virreinal del Perú a finales del siglo XVI. *Gladius* 41:153–176. <https://doi.org/10.3989/gladius.2021.09>
- Ortiz Sotelo J (2012–2013) *Cañones peruanos en la Academia Naval de los Estados Unidos. Derroteros de la Mar del Sur 20–21:63–72*
- Pascoe D (2021) *Archaeological evidence for the development of Royal Naval gunnery from 1545 – 1811; analysing change through technology and culture*. Doctoral dissertation, Bournemouth University. http://eprints.bournemouth.ac.uk/36802/1/PASCOE%2C%20Daniel_Ph.D._2021.pdf. Accessed 8 May 2023
- Peterson ML (2014a) *Encyclopaedia of Markings and Decoration on Artillery*, part 3 (Large Green Album). <https://www.teddytucker.com/artillery-encyclopaedia>. Accessed 8 May 2023

- Peterson ML (2014b) Encyclopaedia of Markings and Decoration on Artillery, part 4 (Large Green Album). <https://www.teddytucker.com/artillery-encyclopaedia>. Accessed 8 May 2023
- Pollard AM (2013) From Bells to Cannon – the Beginnings of Archaeometallurgy in the 18th Century. *Oxf J Archaeol* 32(3):335–341. <https://doi.org/10.1111/ojoa.12018>
- Pero-Sanz Elorz JA (2000) Ciencia e Ingeniería de Materiales: estructura, transformaciones, propiedades y selección. CIE Inversiones Editoriales – Dossat 2000, Madrid
- Rajpitak W (1983) The development of copper alloy metallurgy in Thailand in the pre-Buddhist period, with special reference to high-tin bronzes. Doctoral dissertation, Vol. 1, Faculty of Science, University of London. https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1317506/1/243239_Voll1.pdf
- Riederer J (1977) Die Zusammensetzung der Bronzebeschütze des Heeresgeschichtlichen Museums im Wiener Arsenal. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 2:27–40 (<https://www.smb.museum/museen-einrichtungen/rathgen-forschungslabor/forschung/publikationen/bba/>)
- Ridella RG, Alzaga García M, Enríquez Macías G, Gallardo Abárzuza M, Higuera-Milena Castellano JM, Ciacchella F (2016) The Cadiz-Delta II wreck: the “San Giorgio”, a Genoese merchantman sunk by Francis Drake in 1587. *Archeologia Postmedievale* 20:11–64
- Ringer I, Barkóczy P, Kovács Á, Pásztor L (2013) Examination of the Microstructure of the Findings from Cannon Foundry Sárospatak. *Mater Sci Forum* 729:7–12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.7>
- Roth R (1989) A proposed standard in the reporting of historic artillery. *Int J Naut Archaeol* 18(3):191–202. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1989.tb00196.x>
- Roth T (2021) Hertig Johans eldrör. Armémuseum (DigitaltMuseum, 4.13.8). <https://digitaltmuseum.se/0211810758646/hertig-johans-eldror>. Accessed 8 May 2023
- Reig Gómez A (2019) Las pipas de fumar y su valor arqueológico. Aproximación al estudio de las pipas extraídas en el pecio Delta III. In: Barrientos Márquez MM, Gullón Abao AJ (eds) *América y el mar*. Editorial UCA, Cadiz, pp. 279–294
- Saint-Remy P (1707) *Mémoires d’artillerie*. Vol. 2., 2nd ed. (1st ed., 1697). Paris: chez Rigaud. <https://bibliotecavirtual.defensa.gob.es/BVMDefensa/es/consulta/registro.do?id=124619>. Accessed 8 May 2023
- Samuels LE (1992) Australia’s Contribution to Archaeometallurgy. *Mater Charact* 29:69–109. [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(92\)90108-T](https://doi.org/10.1016/1044-5803(92)90108-T)
- Sardi P (1621) *L’artiglieria di Pietro Sardi romano divisa in tre libri*. Venice: Giovanni Guerrigli. https://books.google.es/books?id=_PFqicvInf4C&pg=PP5&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false. Accessed 8 May 2023
- Scott DA, Schwab R (2019) *Metallography in Archaeology and Art*. Cultural Heritage Science. Cham, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11265-3>
- Sertucha J, Lacaze J (2022) Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons—An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. *Metals* 12:504. <https://doi.org/10.3390/met12030504>
- Smith CS, Gnuci MT (1990) *The Pirotechnia of Vannoccio Biringuccio: the classic sixteenth-century treatise on metals and metallurgy*. Dover Publications Inc, New York
- Taşlıçukur Z, Altuğ GS, Polat Ş, Atapek ŞH, Türedi E (2012) A microstructural study on CuSn10 bronze produced by sand and investment casting techniques. *Proceedings of the XXI International Conference on Metallurgy and Materials* (CD format). Brno
- Thomas N, Saussus L (2020). Cycle de l’objet, recyclage de la matière: Réparer, détourner, fondre et refondre le cuivre et ses alliages (V^e-XVIII^e siècle), In: Henigfeld Y, Husi P, Ravoire F (eds) *L’objet au Moyen Âge et à l’époque moderne: Fabriquer, échanger, consommer et recycler* (Proceedings of the XI^e congrès de la Société d’archéologie médiévale, moderne et contemporaine, 28th and 29th May 2015, Bayeux). Caen: Presses universitaires de Caen, pp. 355–368
- Tylecote RFT (1976) *A history of metallurgy*. The Metals Society, London
- Vander Voort GF (ed) (2004) *ASM Handbook, Vol. 9 (Metallography and Microstructures)*. ASM International, Materials Park, OH
- van Duivenvoorde W (2010) *The Armament of Australia’s VOC Ships*. Report—Department of Maritime Archaeology, Western Australian Museum, No. 258. Western Australian Museum, Fremantle. https://museum.wa.gov.au/maritime-archaeology-db/sites/default/files/no._258_vocshipsarmament.pdf. Accessed 8 May 2023
- Waterhouse R (2013) Tudor bronze guns of the Channel Islands. *Société Jersiaise Ann Bull* 31:82–109
- Wilson GM (1988) The Commonwealth Gun. *Int J Naut Archaeol* 17(1):81–99. <https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.1988.tb00625.x>
- Witzke P (2023) Information about addition of lead in various metals (White Paper). https://media.bossard.com/-/media/bossard-group/website/documents/white-paper/bossard_white_paper_addition-of-lead-in-various-metals_en.pdf?la=en-at. Accessed 8 May 2023
- Żabiński G, Strzyż P, Goryczka T, Krzysztof A, Miśta-Jakubowska E (2021) A copper alloy light cannon from Grodno: an example of early firearms from Eastern Europe. *Herit Sci* 9:67. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00534-z>

Publisher’s note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.

Article

Comparison between the Employment of a Multibeam Echosounder on an Unmanned Surface Vehicle and Traditional Photogrammetry as Techniques for Documentation and Monitoring of Shallow-Water Cultural Heritage Sites: A Case Study in the Bay of Algeciras

Soledad Solana Rubio ¹, Alberto Salas Romero ¹, Felipe Cerezo Andreo ¹ , Raúl González Gallero ¹ , Juan Rengel ², Luis Rioja ², Joaquín Callejo ³  and Manuel Bethencourt ^{4,*} 

¹ Department of History, Geography and Philosophy, International Campus of Excellence of the Sea (CEI-MAR), University of Cadiz, 11003 Cadiz, Spain; soledad.solana@uca.es (S.S.R.); alberto.salas@uca.es (A.S.R.); felipe.cerezo@uca.es (F.C.A.); raul.gonzalez@uca.es (R.G.G.)

² Spanish Hydrographic Office, 11007 Cadiz, Spain; juanrengelo@gmail.com (J.R.); lmriogal@gmail.com (L.R.)

³ Institute of Marine Research, International Campus of Excellence of the Sea (CEI-MAR), University of Cadiz, 11003 Cadiz, Spain; joaquin.callejo@uca.es

⁴ Department of Materials Science, Metallurgical Engineering and Inorganic Chemistry, International Campus of Excellence of the Sea (CEI-MAR), University of Cadiz, 11003 Cadiz, Spain

* Correspondence: manuel.bethencourt@uca.es; Tel.: +34-956016792



Citation: Solana Rubio, S.; Salas Romero, A.; Cerezo Andreo, F.; González Gallero, R.; Rengel, J.; Rioja, L.; Callejo, J.; Bethencourt, M. Comparison between the Employment of a Multibeam Echosounder on an Unmanned Surface Vehicle and Traditional Photogrammetry as Techniques for Documentation and Monitoring of Shallow-Water Cultural Heritage Sites: A Case Study in the Bay of Algeciras. *J. Mar. Sci. Eng.* **2023**, *11*, 1339. <https://doi.org/10.3390/jmse11071339>

Academic Editor: Xianbo Xiang

Received: 31 May 2023

Revised: 26 June 2023

Accepted: 28 June 2023

Published: 30 June 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Over the last few years, due to various climatic, anthropogenic, and environmental factors, a large amount of submerged heritage has been unearthed and exposed to deterioration processes in the Bay of Algeciras. These impacts can be more severe in shallow waters, where the cultural heritage is more vulnerable to natural and human-induced impacts. This makes it urgent to document cultural heritage at risk of disappearing using different techniques whose efficiencies in the archaeological record need to be determined and compared. For this purpose, we have documented a shipwreck in the Bay of Algeciras using two techniques: photogrammetry and a multibeam echosounder. The photogrammetric method consists of obtaining a 3D model from numerous photographs taken of an object or a site. The processing software creates three-dimensional points from two-dimensional points found in the photographs that are equivalent to each other. Multibeam echosounders are capable of providing side scan imagery information in addition to generating contour maps and 3D perspectives of the surveyed area and can be installed in an unmanned surface vehicle. As a result, we have obtained two 3D visualisations of the shipwreck, i.e., digital copies, that are being used both for the analysis of its naval architecture and for its dissemination. Through the comparison of the two techniques, we have concluded that while a multibeam echosounder provides a detailed digital terrain model of the seabed, photogrammetry performed by divers gives the highest resolution data on objects and structures. In conclusion, our results demonstrate the benefits of this combined approach for accurately documenting and monitoring shipwrecks in shallow waters, providing valuable information for conservation and management efforts.

Keywords: underwater cultural heritage; shallow waters; unmanned surface vehicles; multibeam echosounder; photogrammetry

1. Introduction

The Bay of Algeciras coastline, with more than 40 km in length, has material evidence of exceptional Underwater Cultural Heritage (UCH) as wrecks, ports, anchorages, etc. This UCH comes from the historical relationships, maintained over millennia, of the societies established in the area surrounding the Strait of Gibraltar with and by the sea.

The conservation of the UCH is crucial as an intangible asset that brings responses from our past and has an outstanding universal value from a historical, aesthetic, ethnological or anthropological point of view. In addition, the sustainable exploitation of UCH will increase the relevance of cultural tourism within maritime tourism. Moreover, UCH plays a key role in sustainable development as an important economic engine, which has been recognized by the European Union (EU), the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) or the International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). In this sense, among the strategic objectives of the major economic programs, tourism, leisure, and other cultural activities have been identified as one of the major priorities and opportunities for Spain and Europe.

The formation process, preservation and future perspectives of conservation of the UCH located in coastal areas under the influence of the littoral process cannot be properly undertaken without considering and monitoring the particularities of the surrounding environment. The specific and particular physical–chemical conditions of the underwater environment have allowed, in several cases, the remains to reach a certain degree of stability, permitting each site to be unique [1,2]. Although a deeper theoretical–methodological development is still unclosed, the great dynamism to which these types of deposits are subjected is better understood. This step forward represents a remarkable conceptual advance over the usual and outdated notion of wrecks as “time capsules”, frozen spatially and chronologically. The complex processes operating in an underwater archaeological site and conditioning its state result from the permanent interaction of many agents acting on it [2–5], mainly the intensity and direction of the currents and waves, as well as sedimentary and geochemical processes.

With the increasing number of shipwrecks and other submerged structures uncovered recently in the Bay of Algeciras [6], Figure 1, it becomes necessary to develop alternative methods of storage, conservation and stabilization of these archaeological sites. Rule Number 1 of the Annex to the 2001 UNESCO Convention on the Protection of Underwater Cultural Heritage [7] states that “The protection of Underwater Cultural Heritage through in situ preservation shall be considered as the first option”.

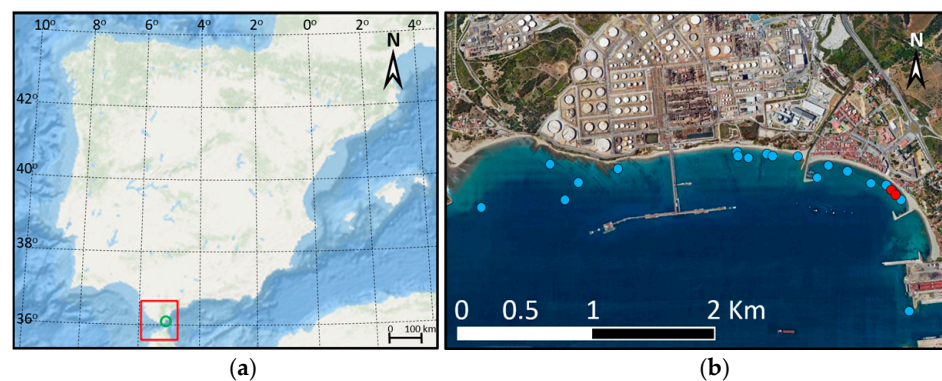


Figure 1. Location of the study area: (a) Red square: Strait of Gibraltar; green circle: Bay of Algeciras, Spain. (b) Blue dots are shipwrecks located in the northern part of the Bay. Red dots: two shipwrecks from this paper, located in Puente Mayorga: *Puente Mayorga IV* and a contemporary shipwreck.

In the last years, several projects [8–11] have shown the close relationship between the degree of conservation of the UCH and the marine environmental conditions and concluded that the environmental or anthropic parameters that affect underwater archaeological sites demand immediate actions based on their knowledge and adequate monitoring to prevent the irreversible destruction of the remains and to ensure their long-term stability. In this sense, physical variables are considered a key factor for the in situ preservation of UCH [12] due to their direct impact on the integrity of fragile materials and the de-contextualization of objects and their ability to modulate or control other factors such as sedimentary dynamics, geochemical conditions and biological activity [13]. However, the analysis of the impact

of these parameters on the UCH has been performed without evaluating their changes in the long term. This fact is especially relevant in the context of global warming due to Climate Change (CC). The problem of CC and its influence on the conservation of the world's natural and cultural heritage was pointed out by UNESCO [7], highlighting the need for future research, the development of a legal framework, and interrelationships with other international organizations, such as the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Because of the CC, changes in the wind and low-pressure systems can increase the frequency and intensity of extreme events such as a storm in the next century [14]. The projected rise in global mean sea level ranges from 0.43 to 0.82 m for the best-case (RCP2.6) and worst-case (RCP8.5) at the end of this century. The sea surface temperature is also expected to increase from 0.05 to 0.5 °C decade⁻¹ [15]. These changes are not homogeneous in time and space; therefore, their impact on UCH will not be homogenous either. In the study area, the Bay of Algeciras, the sea level is expected to increase by 0.6 m at the end of the century, and the frequency of flooding events will increase up to 500 times for the RCP8.5 scenario [16]. The yearly mean sea surface temperature is projected to increase by almost 3 °C by 2100 along the Alboran Sea coast, particularly in summer [17].

In this context: (i) the high density of cultural heritage assets on the coast of the Bay of Algeciras; (ii) its social and economic relevance; (iii) the threatening impact of climatic factors contributing to its deterioration; and (iv) the necessity of long-term preservation; the option of in situ protection and monitoring for the required initial environmental characterization can have an unaffordable cost in some cases. Therefore, it is also necessary to develop new tools and methodologies that help identify and prioritize those sites where the in situ protection program or other actions (prospecting, excavation and archaeological documentation) should be implemented to mitigate the loss of archaeological information. The design, development and deployment of autonomous ocean platforms for the observation, exploration and monitoring of marine and oceanic environments have grown exponentially with the lowering of production costs and technological developments brought about by the digital revolution. With the advent of the digital revolution, which has generalized the use of electronic circuits and TTL technology, unmanned vehicles with different degrees of autonomy, marine as Unmanned Surface Vehicles (USV) or underwater as Autonomous Underwater Vehicles (AUV), as well as Remotely Operated Vehicles (ROV), and more recently aerial as Unmanned Aerial Systems (UAS), have begun to revolutionize the exploration of the marine environment and coasts, generally offering observation platforms at a lower cost, free of risks for operators, and capable of obtaining more information in less time [18,19]. Remote sensing tools operating from unmanned vehicles and satellites are contributing to the integration of terrestrial and marine datasets for the assessment of geohazards in coastal and marine areas, with special reference to tsunamis and storms, coastal and marine landslides and sea-level rise-related hazards [20]. In the specific case of USVs, they have been extensively used in archaeological and archaeometric missions, including studies of coastal evolution in shallow waters in areas of high historical interest [21–24].

These new platforms and the observations they make are essential for documenting the state, variability and changing conditions of the oceans under climate change and other anthropogenic pressures, as well as the effect of such changes on ecosystems or the cultural heritage that remains there. This knowledge is crucial for understanding, predicting and ultimately mitigating and adapting to present and future adverse impacts. These impacts can be more severe in shallow water, where cultural heritage sites are most vulnerable to natural and human-induced impacts, making it critical to document and monitor them over time. Multibeam Echosounders (MBES) and photogrammetry are two techniques commonly used for mapping and documenting underwater sites [25,26]. While MBES provides a detailed digital terrain model of the seabed and can be installed in a USV, photogrammetry performed by divers can provide the highest resolution data on objects and structures. Integrating these techniques can provide a more comprehensive and accurate representation of the site. In this study, we present a case study of the integration of MBES and photogrammetry for the documentation and monitoring of cultural heritage

sites in the shallow waters of the Bay of Algeciras. The results demonstrate the benefits of using this combined approach for accurately documenting and monitoring cultural heritage sites in shallow waters, providing valuable information for conservation and management efforts.

Therefore, this paper focuses on comparative experimental fieldwork at two submerged sites. The site of *Puente Mayorga IV* contains the remains of a probable gunboat used during the sieges of Gibraltar at the end of the 18th century. Its original construction system and the scarce knowledge of this type of small craft make it very interesting for archaeological and naval history research. For these reasons of originality and exceptionality, we decided to undertake an excavation to obtain detailed planimetry in order to study its naval construction. During this process, priority was given to non-intrusive techniques in the documentation, such as digital methods or real measurements in situ. The contemporary shipwreck is located very close to the *Puente Mayorga IV* shipwreck. This structure, from the end of the 20th century, is at a very shallow depth, and we have used it, especially as a control element for satellite or aerial measurements in the framework of experimentation with different techniques for recording the UCH of the area.

2. Materials and Methods

2.1. Unmanned Vehicles and Sensors

Data were collected by using two unmanned vehicles from the University of Cadiz Peripheral Drone Service (www.dron.uca.es, accessed on 1 April 2023), Figure 2: a DJI Matrice 300 RTK UAS and a Maritime Robotics Otter Pro USV. The Matrice 300 UAS incorporated a Zenmuse P1 sensor for precision photogrammetry in flight, with a horizontal accuracy of 3 cm and a vertical accuracy of 5 cm, a global mechanical shutter with a shutter speed of 1/2000 s, and a 4.4 μm pixel size. The data were post-processed using the commercial software Pix4D Postflight Terra, a suite for UAS mapping. Several studies have used active remotely sensed imagery collected by UAS to visually detect and record shipwrecks in shallow water, and more recently, results based on hyperspectral technology and LiDAR bathymetry have been published [27–29]. Data obtained with UAS on the contemporary shipwreck have been used to calibrate other measurements obtained by Google Earth, bathymetric probes and divers.

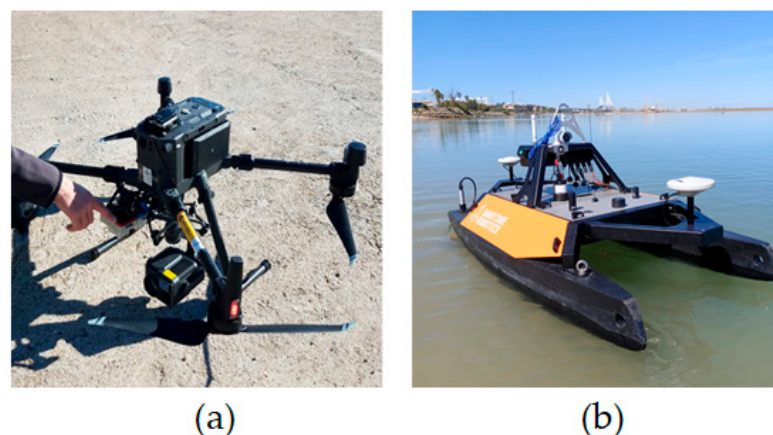


Figure 2. (a) DJI Matrice 300 RTK UAS; (b) Maritime Robotics Otter Pro USV.

Regarding the Otter Pro USV, it was the vehicle in charge of autonomously carrying out the bathymetric work. This USV is a small catamaran with a footprint of $200 \times 108 \times 81.5$ cm and a weight of 63 kg, adequate for bathymetric surveys in sheltered waters (such as shallow-water coasts, harbour areas, lakes, canals, rivers and ponds). The USV is controlled by Maritime Robotics' Vehicle Control Station (VCS), a graphical user interface with several control modes, such as course and speed control, heading control, or waypoint control.

The integration between the onboard control systems and the MBES allows autonomous bathymetric work to be carried out. The hydrographic work was conducted

with a Norbit iWBMS MBES coupled to an Applanix Position and Orientation System for Marine Vessels (POS MV). Some technical specifications of the MBES are a swath coverage between 5 and 210°, a range resolution of less than 10 mm, a number of beams between 256 and 512, an operating frequency selectable at 200, 400 or 700 KHz, a resolution (across × along) of 0.9° × 1.9° at 400 KHz and 0.5° × 1.0° at 700 KHz, a heading accuracy of 0.08° (Real Time Kinematic, RTK), pitch/roll accuracy of 0.03° and heave accuracy of 2 cm or 2%. For post-processing correction of the bathymetric data, velocity profiles were obtained with an AML Base2 sound profiler, launched automatically from a winch on board the USV. Finally, the Applanix POS MV provides accurate navigation and attitude data to correct the effects of USV motion during survey operations, combining the IMU (Inertial Measurement Unit) and GNSS (Global Navigation Satellite System) sensor data into an integrated navigation system. The appropriate topographic measurements guaranteed the quality of the positioning data in conjunction with the DGPS RTK positioning system and NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) corrections from the Andalusian Positioning Network and the movement sensor.

Two calibrations were performed before data acquisition: (1) the calibration of the Applanix positioning system and inertial system, performing the “turns of 8” for adjustment in the offset of the equipment and adjustments in the heading of the boat; and (2) the calibration of the Norbit sounder, following the standards set by the International Hydrographic Organization (IHO) for Special Order areas [30] and performing the relevant calibration lines to adjust the pitch, yaw and roll of the sounder. Following this standard, the maximum allowable vertical uncertainty in vertical measurements was calculated with the following formula: “*a*” (the portion of the uncertainty that does not vary with the depth, 0.25 m Special Order) and “*b*” (coefficient that represents that portion of the uncertainty that varies with the depth, 0.0075 Special Order), together with the depth “*d*”, the parameters that have to be introduced in the formula of the Total Vertical Uncertainty (TVU):

$$TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \quad (1)$$

A project of lines was prepared to cover the archaeological remains to be studied and to guarantee a good overlap between the lines to achieve a good data resolution, which in our case was 100%. We used a working speed of 2 knots, which we recommend for working in shallow waters. The data were recorded at a frequency of 700 kHz with a beam aperture of 90°. The registration time was 45 min.

There are numerous studies in the literature on the use of MBES for imaging submerged shipwrecks from conventionally manned vessels [31–35]. However, we do not know of any study in which this combination of technologies, MBES plus USV and photogrammetry, has been used in the dimensional study of a shipwreck.

2.2. Google Earth

As a first approach, we used Google Earth (GE) for the acquisition of dimensions and shape information for the contemporary shipwreck. Other authors have already proposed the use of GE as a tool to identify abandoned ships and shipwrecks [36]. GE is a geographic information system that displays a virtual three-dimensional globe that allows the visualization of multiple cartographies, based on satellite images, aerial photography and GIS data. Among other tools available through the desktop application, GE includes a distance measurement tool.

2.3. Bathymetric Data Collection and Post-Processing

The USV has two computers. The first one is used to control the vessel’s movement and speed according to the preplanned lines and orders received by radio. The second one is used for running the MBES and to record the position, attitude, sound velocity at the transducer, time and depth. This computer also records the Sound Velocity Profiles (SVP) when they are obtained.

MBES are the best tool for depth calculation, together with mapping the seabed, because they obtain the complete seafloor insonification with a good resolution. The latter mainly depends on the distance from the MBES transducer to the bottom and the frequency of the sound rays; the higher the frequency, the better. In our case study, that distance was under 3 m, and the frequency was 700 KHz, the highest of our equipment. We achieved good results in spite of the physical limitation of the sound propagation, which prevented us from obtaining more detail on the smallest elements of the wreck.

The MBES principle of operation is based on a transmission pulse directed towards the seafloor. This pulse is narrow along the heading direction of the vessel and wide across the course. After the reflection of the sound by the seabed, the receiving beams are electronically generated. The two-way travel time between transmission and reception is computed by seabed detection algorithms. With the application of ray tracing correction due to the refraction of the sound rays, it is possible to determine (a) the depth and (b) the transversal distance from the USV nadir to the small insonified area by each beam.

The transmitted beam is wide across the USV course and narrow along it, only 1° ; on the other hand, the beams electronically formed during the reception phase are wide along the course, near 180° , and narrow across it, only 0.5° . The intersections of the unique transmitted beam in the seabed with the X electronically reception beams are the small areas (footprints) where X soundings are measured. In our case, X was 512 in order to reach the best resolution possible of the wreck.

Since depths are measured from a floating USV with six possible degrees of freedom (three translations and three rotations), for accurate computation of depth measurement and its associated positioning, precise measurements of latitude, longitude, heave, roll, pitch and heading are also recorded by the Applanix IMU, as described in Section 2.1.

To gather complete information about the seabed by MBES, a planned survey with transect lines is needed. It consisted of some parallel lines to the wreck's keel and another set of lines across, centered in the position of the wreck. Its length was longer than the keel, about 50 m, and the separation among them was only 3 m, to ensure that the overlap was 100% and to prevent any gap or area without data due to the true track of the USV.

Data processing was performed with two software packages for comparison: the HySweep module of the Hypack software (version 2020) and the NaviModel Producer software from EIVA (product no: NM.PRO). Once the data were acquired, a bathymetric surface was generated with the real minimum height, although a CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator) surface was previously generated with the confidence criteria, and a filter was applied to clean up the very erroneous data above the 95% confidence level. The rest of the data was cleaned manually.

2.4. Photogrammetry and Post-Processing

Photogrammetry is a recording technique that has been used in underwater archaeology since the 1970s [37], although the first experiments were made as early as the 1960s [38,39], because it makes it possible to obtain a 3D model of any object by taking photographs from different angles. As long as visibility conditions allow, it is a method by which a virtual visualisation of any site can be obtained, requiring less dive time than traditional archaeological drawing and sparing the subjective aspects of the archaeological process [38].

Photogrammetry uses a variety of algorithms and techniques to perform image processing and three-dimensional reconstruction. Some of the algorithms used include:

- Feature matching is used to correlate key points between different images using algorithms like SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) or SURF (Speeded-Up Robust Features). These algorithms find key points in the images and compare them to establish correspondences [40,41].
- Triangulation is used to calculate the three-dimensional position of a point from the images. One of the most common algorithms is the Delaunay Triangulation method,

which uses corresponding spots in multiple images to calculate the 3D position of the points of interest [42].

- Bundle adjustment is an algorithm used to adjust the camera parameters and improve the accuracy of the 3D model. Bundle adjustment methods, such as the least squares method, estimate the camera parameters and 3D points that minimize the discrepancies between the observed 2D projections and the estimated 2D projections in the 3D model [43].
- Image fusion is used to combine multiple overlapping images into a single panoramic or mosaic image. These algorithms perform image alignment and correction to achieve smooth and seamless transitions between the images [44].
- Outlier point filtering is used to improve the accuracy and quality of the 3D model by identifying and removing points that do not fit well with the model or have a high discrepancy compared to other points [45].

A GNSS device was used to take various control points on the site. This operation was carried out by three divers and a 4-metre pole attached to the top of the GS receiver or GNSS antenna. This end of the pole, which was out of the water and on the surface, was operated by one diver, while another diver placed the lower part of the pole, submerged, at the exact point on the shipwreck whose coordinates were to be recorded. The third diver, on the boat, recorded each point with the GNSS pad.

For the photogrammetric documentation of *Puente Mayorga IV*, a total of 1650 photographs were taken over the shipwreck, covering an area of 54.4 m² in a “grid” pattern (Figure 3). This means that zenith photographs were taken over the site at an altitude of 1.1 m, making 18 lines longitudinal to the axis of the shipwreck, and then a second coverage was performed, with 39 lines transversal to the previous ones [39]. The overlap between the photographs was at least 60%, leaving a distance between the longitudinal lines of approximately 65 cm. The spacing of the transverse lines varied widely, ranging from 20 to 60 cm, and several lines at different altitudes overlapped to document all the details of the shipwreck’s frames. The camera used was a GoPro Hero 7 Silver with a resolution of 3648 × 2736 pixels and a focal length of 3 mm. In addition, thirteen control points were marked on the shipwreck, the coordinates of which were recorded with a Leica GS18 GNSS in the ETRS89/UTM zone 30N coordinate system to fix the 3D model in its correct spatial relationship [39].

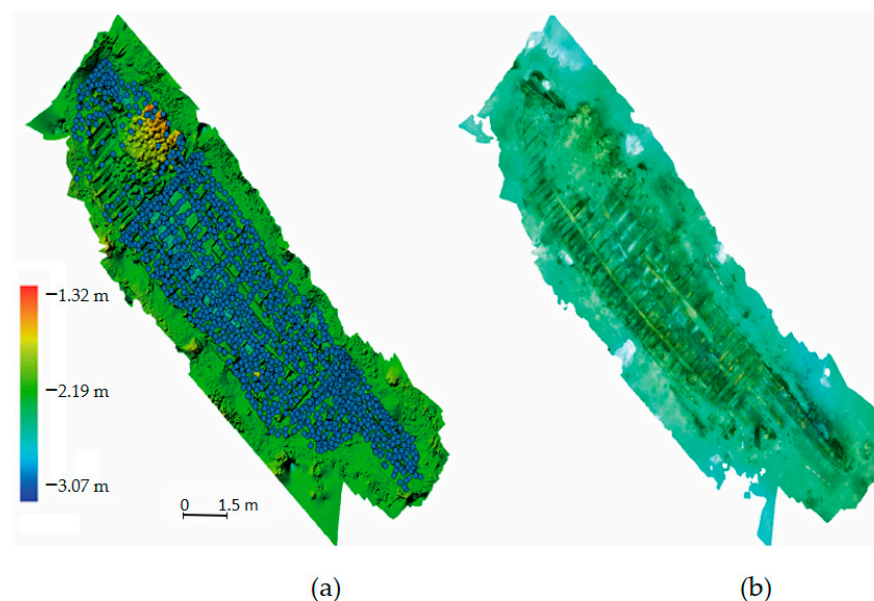


Figure 3. (a) Location of each of the photographs used in the photogrammetric model of the shipwreck *Puente Mayorga IV*; (b) Resulting orthoimage.

The dive time required to take the photographs was one hour and twenty-nine minutes. If we take into account the time for setting the scales, the North arrow, the control measurements, the setting of the control points, and the taking of their coordinates, one hour more must be added. At this point, it should be noted that the results obtained with photogrammetry, which provides a good visualisation of the shipwreck in which many details of its naval architecture can be observed, are because the site was excavated and cleaned before the photographs were taken.

In other words, without prior excavation, photogrammetry only outlines the shipwreck and displays those details that are not buried. Therefore, if we want to compare results between detailed photogrammetries such as the one of *Puente Mayorga IV*, the excavation time (21 days) must be taken into account.

For the subsequent processing of the photogrammetry, the Agisoft Metashape Pro software version 1.8.3 from Agisoft was used.

3. Results

3.1. Aerial Measurement

The selected coastline was examined with GE at an eye altitude of about 150 m. The range of dates for which suitable imagery was available was between 31 December 1985 and 24 September 2022, for a total of 30 different dates. Of these, the shipwreck was only visible on six dates: 12 September 2012, 4 October 2012, 27 May 2015, 6 May 2020, 18 June 2020 and 2 March 2022, as shown in Figure 4.



Figure 4. Images of the contemporary shipwreck on different dates at an eye altitude of 50 m.

Finally, we chose the image on the day of 27 May 2015, as the control image, as it was the sharpest. In the latter, it was possible to take the first measurements, one on the longitudinal axis of the length (line 4) and four on the transverse axis along the beam (lines 1 to 3) (Figure 5a). These locations were maintained for the rest of the measurements. Measurements were taken in duplicate, rotating the image 180° in GE, Table 1. However, none of the images show the remains of the historic shipwreck.

Table 1. Measurements acquired with various methods on the contemporary shipwreck.

Measurement	Google Earth ¹	UAS ¹	Divers ¹
1	7.19	7.49	7.49
2	7.14	7.49	7.49
3	7.19	7.49	7.51
4	18.86	18.94	18.97

¹ Expressed in meters.

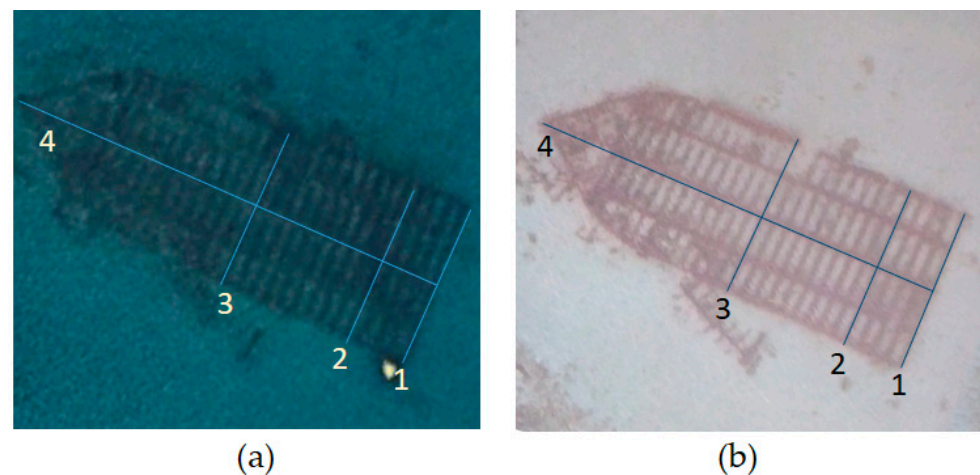


Figure 5. Measurements acquired on the image of the contemporary shipwreck, measurements, one on the longitudinal axis of the length (line 4) and four on the transverse axis along the beam (lines 1 to 3), in (a) Google Earth; (b) Orthophoto acquired by UAS.

Once the contemporary shipwreck was located, the area was surveyed by a UAS flight at a 50-metre altitude (Figure 5b). The image obtained is sharper and allows more precise measurements to be taken in the Pix4D software (Table 1).

Finally, a third measurement was carried out by divers using a tape measure (Table 1). These measurements can then be compared with those obtained with the bathymetric sounder.

Although, in general, the data obtained by either technique correlates well, the measurements obtained by Google Earth are the most inaccurate due to the low resolution of the images. The measurements obtained by UAS and divers are very similar, with differences in the worst case of 3 cm. However, while the measurements obtained by UAS are zenithal, divers can measure other dimensions of the shipwreck, such as the thickness of the frames. These are, in any case, averages that will help us compare the results obtained on the historical shipwreck using photogrammetry, bathymetry and the use of divers.

3.2. Bathymetric Survey

Once the bathymetric survey data were acquired, they were post-processed with different bathymetric software (Figure 6). A series of filters and reductions were applied to these raw data to obtain quality-corrected data. We worked with two types of files. On the one hand, S7K files are formed by the bathymetry data obtained from the multibeam sounder and the navigation data obtained from the Applanix inertial system, which works with RTK corrections. When loading the S7K files, we will automatically obtain velocity, heading, roll, pitch, heave, swell, RTK tide, position and the bathymetry data itself, as well as sound speed data from the SV gauge for the sounding head. On the other hand, the SVP files corresponding to the sound velocity profiles contain the depth and sound velocity data at each depth.

After a profile analysis, five lines were detected with a lack of RTK correction, probably due to a loss of receiving corrections from the reference station, although the system has maintained the differential correction. In this bathymetric survey, a large overlap was used so that by removing these five lines, there is no significant loss of data.

After processing the bathymetric data, a set of high-quality data with which we carried out a Digital Terrain Model (DTM) was obtained with a 3 cm resolution, and we were ready for the measurement of the structural elements that can be distinguished from the shipwreck as well as for the comparison with another DTM obtained from a different source of data, in our case properly treated photographic images, as already indicated. DTMs using bathymetric data are hereafter referred to as Digital Bathymetric Models (DBM) to distinguish them from Digital Elevation Models (DEM), a term usually reserved for terrestrial elevation data [46]. Finally, the data density of the blocks was very good, meeting the IHO standards for a Special Order survey due to the overlap that was made during

the acquisition. At this point, the phase of editing and manipulation of the obtained data is shown (Figure 7), which allows a 3D graphic representation to be made and the final product to be achieved.

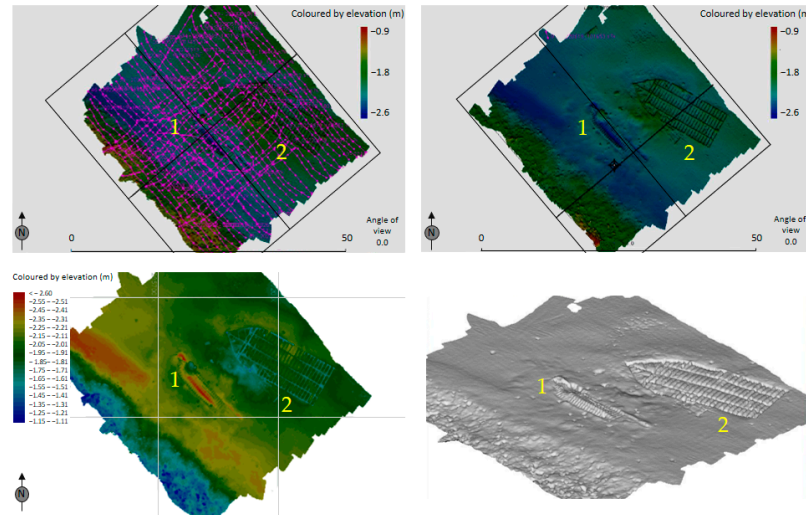


Figure 6. Some images of the post-processing of the bathymetric data, performed in this case with the Hysweep software, version 2020 (multibeam editor). In 1: *Puente Mayorga IV*, 2: Contemporary shipwreck.

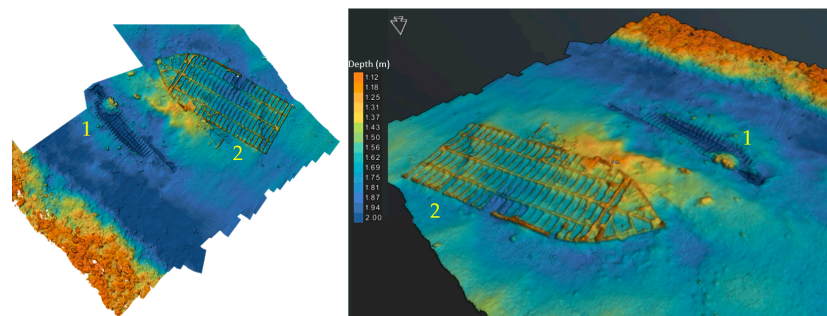


Figure 7. A 3D graphic representation. In 1: *Puente Mayorga IV*, 2: Contemporary shipwreck.

To get an idea of the goodness of the measurements made on the DBM, the same four measurements were taken on the contemporary shipwreck, following the lines that were used in the estimations made in Google Earth, with UAS or by divers, showing differences of a few centimeters with the measurements acquired by UAS or divers (Figure 8). The measures in the DBM are shown in Table 2.

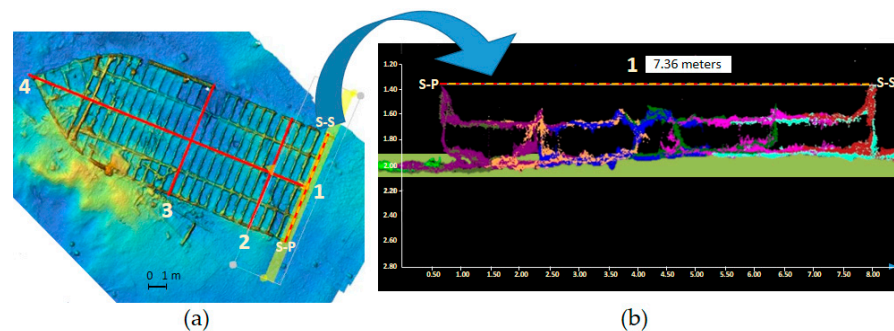


Figure 8. (a) Measurements made on the bathymetry in different areas of the contemporary wreck (lines 1 to 4). (b) Detail of the dimensions of line 1 as seen from the stern, from the Stern-port Side (S-P) to the Stern-starboard Side (S-S).

Table 2. Measurements (expressed in meters) acquired based on the results of bathymetry performed with USV on the contemporary shipwreck.

Measurement	USV
1	7.36
2	7.42
3	7.53
4	19.03

In the case of the *Puente Mayorga IV* shipwreck, five measurement lines were chosen, longitudinal and transversal to the shipwreck (Figure 9a). Having carried out two post-processings of the data, we obtained two DBMs that we are going to compare with each other and with the DEM acquired from photogrammetry. We have made this comparison with CARIS HIPS/GIS software, which has allowed us to generate five graphs in which we have represented the DBM in blue (EIVA) and red (HySweep) and the DEM of the photogrammetry in green. The small differences between the two DBMs are mainly due to the perception of the operator, since the raw data of origin are the same, as are the corrections applied by the tide, movement of the USV, and variation of the speed of sound in the water column. Therefore, we have only made measurements of the five predetermined distances in the shipwreck in one of the two DBMs. Additionally, we have also made distance estimations in the point cloud processed with CARIS, and finally, we have taken the same measurements in the DEM of the photogrammetry, yielding small differences without a fixed pattern being appreciated between them, although the DEM always gives the lowest measurements and the point cloud the highest, and those of the DBM between the two, which show the coherence of both data sources and all their processes. Table 3 shows the measurements taken in the different models and bathymetric point clouds. In the case of line 5, the profile shows a higher error in Z than in X–Y, but only on the starboard side (Figure 9b).

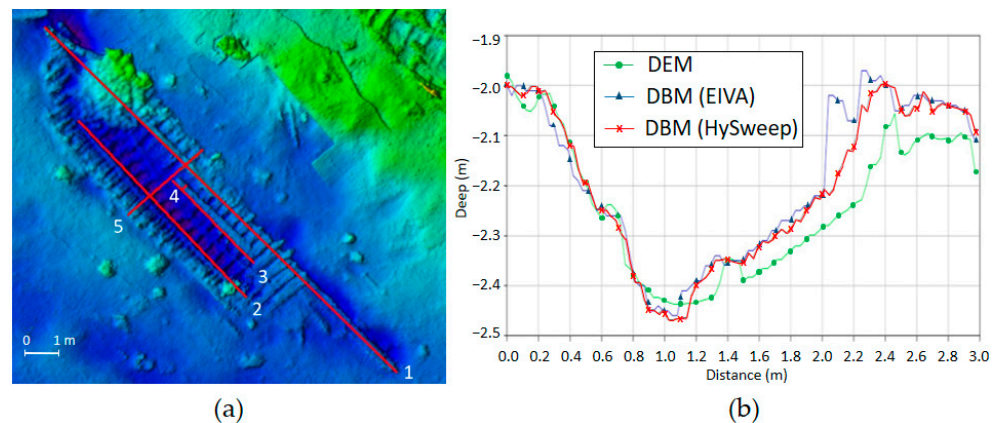


Figure 9. (a) Measurements acquired on the image of *Puente Mayorga IV* in the bathymetric product. (b) Comparative profiles obtained in line 5. DEM in green, DBM’s in blue (EIVA) and red (HySweep).

Table 3. Measurements acquired with the various methods on the contemporary shipwreck.

<i>Puente Mayorga IV</i>	DEM ¹	DBM ¹	Point Cloud ¹
1	15.02	15.08	15.11
2	7.57	7.51	7.47
3	3.42	3.49	3.55
4	0.18	0.21	0.21
5	2.98	3.00	3.03

¹ Expressed in meters.

3.3. Photogrammetric Processing

In addition to positioning metric scales before the photographs were taken, which allowed the model to be scaled in the subsequent processing, significant parts of the shipwreck in a good state of preservation were measured. This made it possible to obtain a highly detailed record of the naval architecture and to check the possible margin of error of the photogrammetry. This last task was achieved by using a level drawing frame with a laser pointer to obtain the X, Y and Z coordinates of each recording point. Measurements were taken with tape measures, a carpenter's ruler, a calliper, a pencil and polyester paper boards. These measures can be spared if the GPS positioning of the control points is accurate. In our case, the thirteen recorded points were enough to correct the scale and distortion of the 3D model [39], although we still took measurements to check the reliability of the two methods [47].

After calibration of the lens [48], their alignment was set to high quality, with the limit of Tie Points at 10,000 and Key Points at 40,000. As a result, 1646 photographs were aligned, generating 954,164 points in a time of 3 h, 7 min and 5 s, obtaining a first point cloud in which the shipwreck could already be visualised. After optimising the alignment (1 min and 7 s), the points that were not part of the shipwreck were cleaned, thus reducing the weight of the model and the processing time in the following steps. We then input the coordinates we had taken with the GNSS at the 13 control points, as well as the markers for scaling the model, using the photographs on which the control points and the metric scales were shown. For the dense cloud building, also in high quality, 6 h and 57 min were needed, obtaining 172,719,340 points. After a second cleaning, in which the points that were not part of the shipwreck were removed, the 3D Model was processed. After 4 h and 5 min, the model was complete, with 28,633,665 faces and 14,355,693 vertices, allowing a mesh visualisation of the shipwreck. The final step, which took 32 min and 15 s, was to generate the texture, that is, to apply the colour and texture information from the photographs to the model. The final resolution of the model is 0.48 mm/pix. After orienting the model in zenith projection, the orthomosaic and the DEM were generated. For the first one, Mosaic was selected as the Blending mode to keep the information of each photograph. The resolution set was 1 mm/pix and after 33 min and 56 s, an orthoimage of $15,979 \times 4450$ pixels was obtained. The DEM had a resolution of 0.961 mm/pix, a density of 1.08 points/mm², and a size of $17,253 \times 16,867$, with a processing time of 3 min and 9 s. The total processing time was 15 h, 19 min and 32 s on a computer with a CPU Intel (R) Core (TM) i9-10920X 3.50 GHz, 64 GB of RAM, and a graphic card NVIDIA Quadro RTX 400, with the platform Windows 10 x64.

Taking control points with GNSS was very useful to check the metric validity of the model. In this case, we have taken 13 control points distributed regularly over the shipwreck in an ETRS 89 UTM30 coordinate system (Figure 10a). Once the coordinates of the points were entered into the 3D model, a series of metric errors were detected by the photogrammetric processing software. The measurements in X, Y and Z accumulate a residual squared metric error of 16.86 cm for the entire model (Table 4). This is due to the deformation that the software applied to adapt the model to the coordinates entered. However, this error is reduced as we reduce the number of control points, and we were able to verify that five or six control points are enough to have a corrected model.

On the other hand, direct measurements were taken at the underwater site of *Puente Mayorga IV* to compare the data that could be provided by photogrammetry, the GNSS system, and the actual measurement in the field (Figure 10b). These dimensions, expressed in Control Line 1 and Control Line 2, show us that the model, despite accumulating a metric error of more than 10 cm, is consistent in its internal measurements since the discrepancies between measurements are 3 or 4 cm, attributable to a human or technical error of the equipment used.

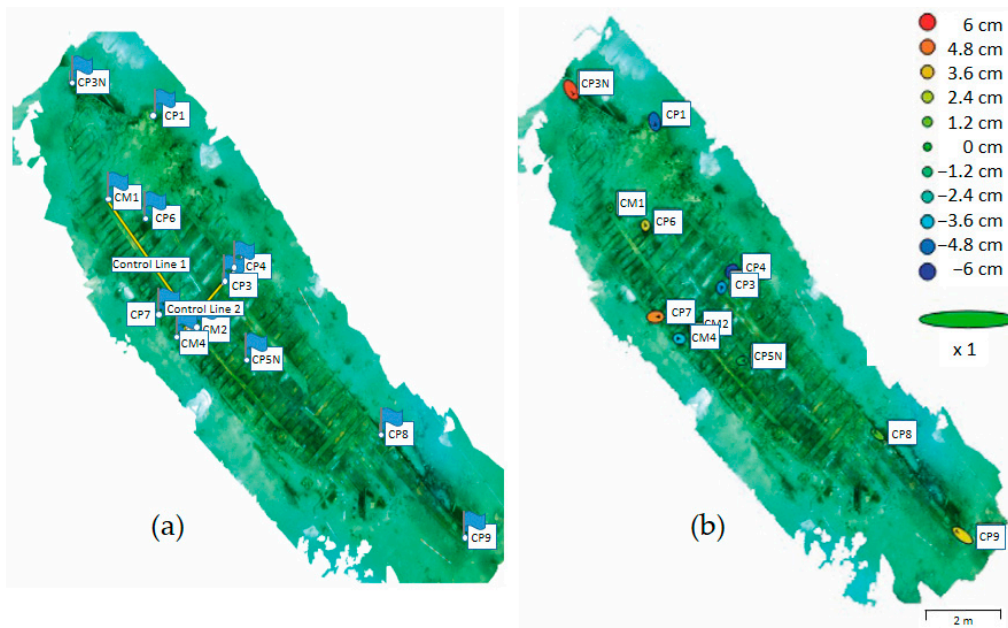


Figure 10. (a) Location of control lines and points on the shipwreck. (b) The error margin of each control point according to the calculations made by the software.

Table 4. GNSS coordinates of each control point and RMES error calculated by the photogrammetric processing software. *: Coordinate system used: ETRS89_UTM_30; International identification code of this coordinate system: EPSG: 25830.

Point Name	X	Y	Z	X Error (cm)	Y Error (cm)	Z Error (cm)	Total Error (cm)	
CP1	285,705.468	4,0063,89.146	−1.504	4.30	−14.46	−4.81	15.84	
CP2	285,703.475	4,006,389.853	−2.238	0	0	0	0	
CP3N	285,703.217	4,006,389.879	−1.963	13.20	−17.04	5.35	22.21	
CP4	285,707.557	4,006,385.691	−2.018	−4.79	−3.12	−5.45	7.90	
CP5N	285,707.739	4,006,383.642	−2.434	13.11	1.02	−0.69	13.17	
CP6	285,705.245	4,006,386.734	−2.39	0.72	−2.02	2.96	3.68	
CP7	285,705.423	4,006,384.639	−2.103	18.50	1.03	4.39	19.04	
CP8	285,711.479	4,006,381.911	−2.17	−17.07	11.48	1.03	20.59	
CP9	285,713.786	4,006,379.583	−2.071	−31.07	20.15	3.17	37.17	
CM1	285,704.309	4,006,387.14	−2.218	0.80	−2.13	0.58	2.35	
CM2	285,706.469	4,006,384.388	−2.285	10.87	1.33	0.71	10.97	
CM3	285,707.257	4,006,385.298	−2.092	0.85	2.32	−4.02	4.72	
CM4	285,706.192	4,006,384.139	−2.068	−9.46	1.42	−3.29	10.12	
* ETRS89_UTM_30 (EPSG: 25830)				Total RMSE	13.53	9.43	3.5237	16.8637

These data show that the control measurements made in the central area of the shipwreck on its axial and transverse axes present a good fit between the three measurement methods (Table 5). The same is true for the control points located in the central zone of the shipwreck, where the RMSE value is lower.

The most problematic areas of the photogrammetric model are the margins or ends of the model, which are where the control points CP3N, CP8 and CP9 are located. These points have the highest RMSE value, which is due to the optical distortion produced by the type of lens used to generate the model. With “flatter” lenses, the results will be metrically more reliable in their entirety.

Table 5. Correlation of the control measures used to rectify the model, expressed in Control Line 1 and Control Line 2.

Control Measure Line	Metashape Model	DGPS Coordinates	In Situ Measures
Control Line 1—CM1—CM2	3.53	3.5	3.48
Control Line 2—CM1—CM2	1.63	1.57	1.6

4. Discussion

Studying a submerged archaeological site without its alteration should be considered a fundamental premise. In order to keep archaeological sites intact while obtaining as much information as possible, remote sensors play a fundamental role. There are different types of sensors: passive sensors use the electromagnetic spectrum, such as photogrammetry, while active sensors transmit and receive sound (e.g., multibeam sounders). Both have strengths and weaknesses; therefore, depending on the shipwreck to be studied, environmental conditions, resources and time, one or the other can be used, or even both.

In this contribution, we have studied two wrecks, one historical and one contemporary. The contemporary shipwreck is on the bottom and has no documentary value, but it was used to validate the techniques. The *Puente Mayorga IV* shipwreck was completely buried. One side of the wooden hull of the ship, together with dozens of projectiles concreted in a large mound next to the starboard bow area, were preserved. The excavation of the wreckage, before the photogrammetry and MBES work, involved three weeks of work with divers. For both techniques, the wreckage must emerge sufficiently from the seabed. These techniques have already been used together with success in [49], where high-resolution sonar and a photogrammetric system were integrated to compare objects on the bottom of a lake as a complete, high-potential, simple and fast monitoring method for inland waters.

Before assessing the feasibility of one technique or another, it is necessary to establish which parameters will be used to compare both techniques: safety for the researchers, degree of autonomy, speed and ease of installation, calibration and design of the data acquisition method, data acquisition and its processing time, economic cost, and finally the quality of the data obtained.

The main limitation of photogrammetry, based on underwater photography, is water turbidity. Thus, in areas such as marshes or river mouths, little or no visibility due to suspended sediment present throughout the water column hinders the realization of photographs. Within open sea areas, water clarity or turbidity will be conditioned by depth, type of bottom, plankton, currents, wind and prevailing waves, proximity to mouths and estuaries, etc. Another major limitation of photogrammetry is working depth. This parameter not only hinders the georeferencing and orientation of the digital model of the shipwreck, but also when depth increases, reduces the time spent by divers, increases their risks, and causes light to be lost and colours to be attenuated or disappear, starting with the lower frequencies. This can be solved by using artificial light or an ROV [50].

For multibeam echo sounder bathymetry, there are two types of uncertainties to take into account: uncertainty in the position of the soundings (positioning uncertainty) and uncertainty in the determination of depth (vertical uncertainty). The regulations established by the IHO determine limit values that help check if the order used is correct. For Special Order surveys, the position of the soundings must be determined with a maximum Total Horizontal Maximum Uncertainty (THU) of 2 m depth at a 95% confidence level. The vertical uncertainty of a sounding is understood as the uncertainty of the reduced depths. Hence, it is necessary to combine all the errors made with depth determination. The formula described in Section 2.4 will be used to calculate, at a 95% confidence level, the maximum allowable TVU. As with the rest of the acoustic sounding systems, multibeam echo sounders can accumulate several errors that can degrade the accuracy of position and depth. Some of the most common are instrumental errors of the sounder itself; GPS errors; errors in the measurement of tides; errors in the measurement of the speed of sound; and errors due to the ship's inertial movements (pitch, roll and heave).

As aforementioned, the photogrammetry consisted of more than 1600 photographs systematically taken over an hour and a half by divers with an underwater camera. With favourable environmental and meteorological conditions, the acquisition of photographs of the shipwreck followed a pre-designed pattern, obtaining the greatest detail of the shipwreck and its cargo. Subsequently, with the help of specialized software (Futtock), the images were post-processed for 15 h to generate a 3D digital model of the shipwreck, which allowed the study of the naval architecture of the shipwreck and its linkage. The smaller the separation between the photo acquisition lines and the slower the speed to cross these lines, the more time is demanded for data acquisition through photographs, approximately three times longer than a bathymetric work from USV.

On the other hand, the MBES system aboard USV was used to obtain acoustic information on the seafloor. This approach allowed us to measure seafloor depth and represent its cartography, as well as detect georeferenced objects. In this case, the fieldwork was completely autonomous and lasted 45 min, while the post-processing with software took two hours. Additionally, while diving always involves some risk for archaeologists, the risk of an accident is non-existent for technicians working with an MBES installed on a USV since it carries out the work in a programmed manner.

Regarding economic efforts, a distinction must be made between the costs associated with equipment and those related to its operators. The equipment needed to perform the photogrammetry (including a rigid inflatable boat) is much cheaper than the multibeam sonar carried out by an autonomous surface vehicle. In terms of personnel, only two technicians located on land were needed for the USV and the bathymetry, while photogrammetry was carried out by two divers plus the person in charge of the boat, increasing the cost of this item. Post-processing time was also much less in the bathymetric work. Additionally, we valued not only the price of each specific software to analyse data but also the ease of use. Thus, there is a clear advantage for photogrammetry since it does not require acquisition software, and the post-processing is much cheaper and easier to handle than the MBES system. In addition, photogrammetry needs fewer auxiliary data to obtain a good result since it only demands a series of control points whose geographical coordinates are established with GNSS equipment. Nevertheless, MBES forces us to know the position of the sensor and the speed of sound in the water at all times, its movement with the prevailing swell, the height of the tide, the installation parameters of the antennas of the positioning equipment and the transducer of the sonar, as well as the sound velocity profile in the water column.

In terms of environmental and meteorological conditions, both systems have their limitations. As already mentioned, the biggest enemy of photogrammetry is turbidity, which can hamper its use. On the contrary, turbidity practically does not interfere with the effectiveness of MBES. Therefore, this technique can be used as long as the weather conditions are good since waves affect the navigation of the USV and the quality of the obtained data. In any case, in this work, the conditions were excellent for the use of both techniques.

Finally, the quality and comparability of the results can be considered the fundamental points of the study. In principle, the DEM resulting from photogrammetry offers great detail of the smaller elements of the shipwreck and therefore could offer better accuracy in the measurements. With large dimensions, it is preferable to use the model generated by the MBES system. This model is not subject to the distortions of the photogrammetric model, which are produced by the non-integration of the measurements. An example of distortion is the use of a measuring tape to measure the distance between points without any orientation between them. Another is the coordinates of the control points, which are obtained either from a buoy located in the more or less approximate vertical of the point or with a pole of several meters that, supported on them, must emerge from the water with difficulty, in any case, to do it in the same vertical.

For instance, this distortion could be observed on the right-hand side of the transverse profiles of the shipwreck (lines 4 and 5 in Figure 9a) (Figure 11), since models from both

techniques presented some distance among them. On the contrary, the longitudinal profiles (lines 1, 2 and 3 in Figure 9a) show that the two models are very close to each other (Figure 12). Profiles 1 and 2 have a good fit between the DEM (in green) and the two DBM (blue and red). In profile 3, a small displacement in X–Y can be observed between the two models, causing the DEM profile not to be carried out on the ceiling stringer but near the keel, giving rise to the appearance of the saw teeth of the floors and clearances (floor spacing). Moreover, as can be observed in profile 5, the two models on the starboard side of the shipwreck have an appreciable difference in Z, something that does not occur on the port side as in profile 2.

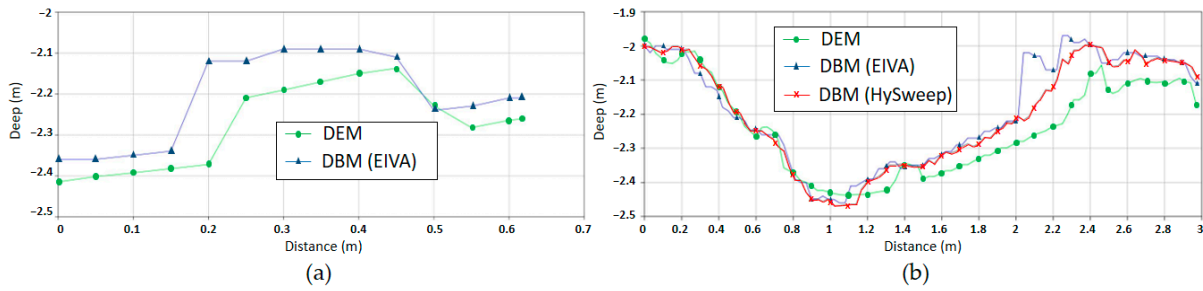


Figure 11. Transverse profiles carried out on the *Puente Mayorga IV* shipwreck, following the numbering presented in Figure 9a: (a) line 4; (b) line 5.

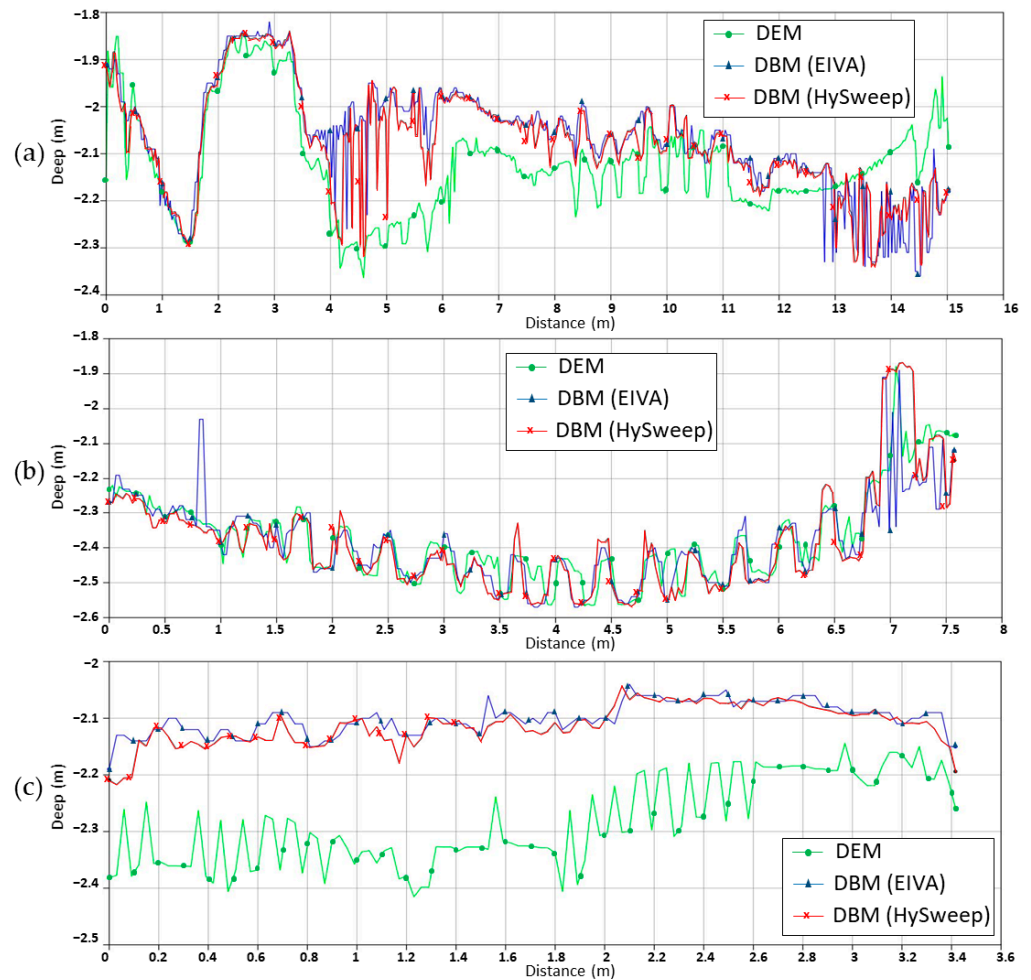


Figure 12. Longitudinal profiles carried out on the *Puente Mayorga IV* shipwreck, following the numbering presented in Figure 9a: (a) line 1, (b) line 2, and (c) line 3.

Since the MBES system requires the emission of an acoustic wave and its reception in multiple beams, it is very difficult to penetrate the small gaps between the frames or floors. For this reason, the models are almost coincidental on the floors. The photogrammetric DEM is better adjusted for clearances than the DBM. Moreover, since the latter is designed to detect the minimum depth of each beam, it will be affected by shadows generated from behind by obstacles such as frames, excluding when the beam is incident directly on the vertical. This problem could be improved by making more data acquisition lines, i.e., increasing the density of lines by decreasing the separation between them, closing the beams to give higher resolution, and obtaining data in other scanning directions in addition to those in two perpendicular directions.

Either way, even if the number of lines is increased, the physical limitation of acoustic propagation is imposed. Thus, the greater the distance to the shipwreck, the lower the resolution achieved and the fewer details obtained from the wreckage using an MBES system. For greater depths, this problem could be solved or reduced by using an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) instead of a USV, which allows one to get very close to the objective shipwreck.

The use of photogrammetry is widespread among archaeologists due to its simplicity and low economic requirements, but this is not the case for MBES. Although it is more complex and expensive, MBES can be used in the study and monitoring of submerged archaeological sites in shallow waters, as it complements photogrammetry and sometimes even replaces it when water turbidity does not allow its use. In the best of cases and whenever possible, both techniques should be combined, as has been demonstrated in this work. Therefore, an effective joint work protocol would be (1) to obtain a DEM with MBES of a wide study area, to know the general geo-morphological dynamics, and to establish a specific documentation priority for sites that are in the process of being unearthed; (2) Once the intervention priorities have been defined, detailed documentation is carried out on some underwater archaeological sites using photogrammetry, as long as the water clarity allows it. (3) Afterwards, the site is covered and the control points of the tumulus are defined, or if it is left uncovered, the control points are archaeological features identified in the fieldwork. (4) Finally, the first MBES documentation of the site and the immediate surroundings is carried out, which will serve as a base model for (5) Monitoring at least once in every warm and cold season in those areas of concentration of shipwrecks with USV.

5. Conclusions

Within the framework of the virtual documentation projects, we have developed a non-intrusive methodology for the documentation of the UCH. In this contribution, we prioritize exploration over recovery and innovation by using geophysical techniques that map the seabed without altering the UCH, identifying what is buried, what is anomalous and at what depth, as well as helping to monitor its degree of preservation. Once it is, our number one concern is to leave the underwater archaeological artefacts in their original location and to document them through interventions in which we establish a proportionate ratio between the impact caused and the scientific information obtained. Our specific action is therefore based on graphic documentation using various techniques (photogrammetry, MBES, video, 360° video, scanning, drawing, etc.). Once processed and studied, these results give rise to virtual models that we use to continue researching the UCH or to communicate it to society.

To date, we have seen how photogrammetry offers greater detail in the documentation of singular elements of the naval architecture of wrecks. In contrast, the use of MBES does not achieve this level of detail. Comparing the two techniques would be complicated and may even be unrealistic in archaeological research given the differences in data acquisition principles (acoustic vs. optical data). However, the complementary use of both techniques is of great interest since MBES with USV covers large areas with a high-resolution level of detail. This aspect is very useful for large-scale monitoring of coastal sites that are at risk of

quick burial/covering due to changes produced by climatic change. Data acquisition and post-processing are fast, and sea work is safe and agile as long as wave conditions allow the USV to navigate. Likewise, the use of photogrammetry for the detailed documentation of shipwrecks is necessary if we want to accurately assess aspects of historical interest but, above all, to know millimetric losses and deterioration, which in the medium term affect this heritage. Photogrammetry allows us to know if this or that object has been removed or if the timber has been displaced, and MBES allows us to know if the entire site is being displaced, covered, or eroded. Nevertheless, photogrammetry requires adequate water transparency and longer times of data collection and post-processing, and since it is carried out by divers, risks that could be eliminated by using an ROV are present.

Therefore, the complementary use of both techniques is very productive. In our experience, the joint use of the techniques is useful for monitoring and controlling the deterioration processes of coastal underwater sites in shallow waters in scenarios of anthropic hazards or climate change. Photogrammetry provides the first level of detail necessary to establish control points for site deterioration as well as to obtain archaeological data. Once photogrammetric recording has been carried out, sites can generally be covered with sandbags or re-entered to ensure better preservation. Thereafter, the use of MBES from a USV, which is more economical, safe and effective in covering large areas, is an excellent tool to carry out periodic monitoring of the sites, checking the measures or control elements established in the detailed photogrammetric documentation or the evolution of burial tumulus if the sites have been covered for their protection.

In conclusion, we would like to recall that prioritizing non-intrusive techniques over intrusive ones offers not only the possibility to perform constant monitoring of archaeological sites and to document numerous underwater archaeological sites in a short time and effectively but also helps heritage managers prioritize the order of intervention on different archaeological sites according to the risk they present. Acting quickly and efficiently in the field is essential to protecting a unique heritage that is at risk.

Author Contributions: Conceptualization, M.B.; methodology, F.C.A., M.B., S.S.R. and J.C.; software, S.S.R., J.R. and L.R.; validation, S.S.R., A.S.R., J.R., R.G.G. and F.C.A.; formal analysis, J.R. and L.R.; investigation, M.B.; resources, M.B.; data curation, L.R. and J.C.; writing—original draft preparation, M.B.; writing—review and editing, M.B., F.C.A., J.R.; visualization, M.B.; supervision, M.B.; project administration, M.B. and F.C.A.; funding acquisition, M.B. and F.C.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by: (1) Ministry of Science and Innovation, Spain, through the project “Vulnerability of littoral cultural heritage to environmental agents: impact of climate change (VOLICHE)” (PID2020-117812RB-I00/AEI /10.13039/501100011033); (2) European Regional Development Fund (FEDER), EU, Interreg V-A Spain-Portugal program (POCTEP) 2014–2020, through the project “KTTSeaDrones” (0622-KTTSEADRONES-5-E). (3) 2014–2020 ERDF Operational Programme and the Department of Economy, Knowledge, Business and University of the Regional Government of Andalusia, Spain, through the project “Between the Pillars of Hercules, underwater archaeology of a privileged space. The Bay of Algeciras (HERAKLES)”. (FEDER-UCA18-107327).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data is unavailable due to privacy.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Florian, M.L.E. The underwater environment. In *Conservation of Marine Archaeological Objects*; Pearson, C., Ed.; Butterworths: New York, NY, USA, 1987; pp. 1–20.
2. Bethencourt, M.; Fernández-Montblanc, T.; Izquierdo, A.; González-Duarte, M.M.; Muñoz-Mas, C. Study of the influence of physical, chemical and biological conditions that influence the deterioration and protection of Underwater Cultural Heritage. *Sci. Total Environ.* **2018**, *613–614*, 98–114. [[CrossRef](#)]

3. Cámara, B.; Alvarez de Buergo, M.; Bethencourt, M.; Fernández-Montblanc, T.; La Russa, M.F.; Ricca, M.; Fort, R. Biodeterioration of marble in an underwater environment. *Sci. Total Environ.* **2017**, *609*, 109–122. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Ciarlo, N.C. Methodology for the study of ferrous artefacts corroded in an underwater environment. A case of analysis: The Hoorn site concretions. *Zaranda* **2006**, *2*, 87–106.
5. Fernández-Montblanc, T.; Bethencourt, M.; Izquierdo, A. Underwater Cultural heritage risk assessment methodology for wave-induced hazards: The showcase of the Bay of Cádiz. *Front. Mar. Sci.* **2022**, *9*, 1–18. [[CrossRef](#)]
6. Cerezo Andreo, F.; González-Gallero, R.; Ciarlo, N.; Bettencourt, J.; Pérez-Reverte, C.; Solana Rubio, S.; Fernández-Tudela, E. Primeros resultados de los pecios modernos de la Bahía de Algeciras. Áreas de Puente Mayorga y el Rinconcillo. Proyecto Herakles. In Proceedings of the CIANYS 2021—I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática, Cádiz, Spain, 21 October 2021.
7. UNESCO. 2007: Climate Change and World Heritage, World Heritage Centre du Patrimoine Mondial, Paris, Rapport n° 22, WHC-06/30.COM/7.1. 55p. Available online: <https://whc.unesco.org/en/climatechange/> (accessed on 11 May 2023).
8. Palma, P. Monitoring of Shipwreck Sites. *Int. J. Naut. Archaeol.* **2005**, *34*, 323–331. [[CrossRef](#)]
9. Nyström Godfrey, I.; Bergstrand, T.; Petersson, H.; Bohm, C.; Christensson, E.; Gjelstrup Björdal, C.; Gregory, D.; MacLeod, I.; Peacock, E.E.; Richard, V. The RAAR Project—Heritage Management Aspects on Reburial After Ten Years of Work. *Conserv. MGMT Arch. Sites* **2012**, *14*, 360–371. [[CrossRef](#)]
10. Dix, J.; Cazenave, P.W.; Lambkin, D.O.; Rangecroft, T.; Pater, C.; Oxley, I. Sedimentation-erosion modelling as a tool for underwater cultural heritage management. In *MACHU Final Report*; Manders, M., Oosting, R., Brouwers, W., Eds.; Educom Publishers: Rotterdam, The Netherlands, 2009; pp. 48–54.
11. Bethencourt, M.; Tomas, F.M.; Izquierdo, A. ARQUEOMONITOR: Contribución de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el deterioro y salvaguarda del Patrimonio Cultural Subacuático: Influencia sobre las velocidades de corrosión en la artillería de dos pecios asociados a la Batalla de Trafalgar (1805). In *Arqueología Subacuática Española*; Nieto Prieto, X., Bethencourt Núñez, M., Eds.; Editorial UCA: Cádiz, Spain, 2014; Volume II, pp. 331–342.
12. Quinn, R.; Smyth, T.A.G. Processes and patterns of flow, erosion, and deposition at shipwreck sites: A computational fluid dynamic simulation. *Archaeol. Anthropol. Sci.* **2018**, *10*, 1429–1442. [[CrossRef](#)]
13. Ruuskanen, A.T.; Kraufvelin, P.; Alvic, R.; Díaz, E.R.; Honkonen, J.; Kanerva, J.; Karell, K.; Kekäläinen, P.; Lappalainen, J.; Mikkola, R.; et al. Benthic conditions around a historic shipwreck: Vrouw Maria (1771) in the northern Baltic proper. *Cont. Shelf Res.* **2015**, *98*, 1–12. [[CrossRef](#)]
14. Vousdoukas, M.I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Verlaan, M.; Feyen, L. Extreme sea levels on the rise along Europe’s coasts. *Earth’s Future* **2017**, *5*, 304–323. [[CrossRef](#)]
15. Alexander, M.A.; Scott, J.D.; Friedland, K.D.; Mills, K.E.; Nye, J.A.; Pershing, A.J. Projected sea surface temperatures over the 21st century: Changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystem regions of Northern Oceans. *Elem. Sci. Anthr.* **2018**, *6*, 9. [[CrossRef](#)]
16. European Environment Agency. 2019. Available online: <https://www.eea.europa.eu/ims/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations> (accessed on 20 January 2023).
17. Darmaraki, S.; Somot, S.; Sevault, F.; Nabat, P.; Cabos Narvaez, W.D.; Cavicchia, L.; Djurdjevic, V.; Li, L.; Sannino, G.; Sein, D.V. Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Clim. Dyn.* **2019**, *53*, 1371–1392. [[CrossRef](#)]
18. Wu, G.; Zhao, M.; Cong, Y.; Hu, Z.; Li, G. Algorithm of Berthing and Maneuvering for Catamaran Unmanned Surface Vehicle Based on Ship Maneuverability. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 289. [[CrossRef](#)]
19. Bethencourt, M. El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales. In *Conocimiento y Transferencia de Tecnología Sobre Sistemas de Monitorización Aéreas y Acuáticas para el Desarrollo Transfronterizo de Ciencias Marinas y Pesqueras: Proyecto KTTSeaDrones*; Ayuntamiento de Isla Cristina: Huelva, Spain, 2022; pp. 28–65.
20. Prampolini, M.; Savini, A.; Fogliani, F.; Soldati, M. Seven Good Reasons for Integrating Terrestrial and Marine Spatial Datasets in Changing Environments. *Water* **2020**, *12*, 2221. [[CrossRef](#)]
21. Aucelli, P.; Cinque, A.; Mattei, G.; Pappone, G. Historical sea level changes and effects on the coasts of Sorrento Peninsula (Gulf of Naples): New constrains from recent geoarchaeological investigations. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **2016**, *463*, 112–125. [[CrossRef](#)]
22. Mattei, G.; Troisi, S.; Aucelli, P.P.C.; Pappone, G.; Peluso, F.; Stefanile, M. Multiscale reconstruction of natural and archaeological underwater landscape by optical and acoustic sensors. In Proceedings of the 2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), Bari, Italy, 8–10 October 2018; pp. 46–49.
23. Aucelli, P.; Cinque, A.; Mattei, G.; Pappone, G.; Stefanile, M. Coastal landscape evolution of Naples (Southern Italy) since the Roman period from archaeological and geomorphological data at Palazzo degli Spiriti site. *Quat. Int.* **2018**, *483*, 23–38. [[CrossRef](#)]
24. Pappone, G.; Aucelli, P.P.C.; Mattei, G.; Peluso, F.; Stefanile, M.; Carola, A. A Detailed Reconstruction of the Roman Landscape and the Submerged Archaeological Structure at “Castel dell’Ovo islet” (Naples, Southern Italy). *Geosciences* **2019**, *9*, 170. [[CrossRef](#)]
25. Pierre, D.; Merad, D.; Hijazi, B.; Gaoua, L.; Nawaf, M.M.; Saccone, M.; Chemisky, B.; Seinturier, J.; Sourisseau, J.C.; Gambin, T.; et al. Underwater Photogrammetry and Object Modeling: A Case Study of Xlendi Wreck in Malta. *Sensors* **2015**, *12*, 30351–30384.
26. Zhong, H. Underwater cultural heritage and the disputed South China Sea. *China Inf.* **2020**, *34*, 361–382. [[CrossRef](#)]
27. Guyot, A.; Lennon, M.; Thomas, N.; Gueguen, S.; Petit, T.; Lorho, T.; Cassen, S.; Hubert-Moy, L. Airborne Hyperspectral Imaging for Submerged Archaeological Mapping in Shallow Water Environments. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 2237. [[CrossRef](#)]

28. Shih, P.T.Y.; Chen, Y.H.; Chen, J.C. Historic Shipwreck Study in Dongsha Atoll with Bathymetric LiDAR. *Archaeol. Prospect.* **2014**, *21*, 139–146. [CrossRef]
29. Doneus, M.; Miholjek, I.; Mandlbürger, G.; Doneus, N.; Verhoeven, G.; Briese, C.; Pregesbauer, M. Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2015**, *40*, 99–107. [CrossRef]
30. S-44. IHO Standards for Hydrographic Surveys (Edition 6.1.0, October 2022). Available online: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.1.0.pdf/ (accessed on 11 May 2023).
31. Calder, B.; Forbes, B.; Mallace, D. Marine heritage monitoring with high-resolution survey tools: Scapa flow 2001–2006. In Proceedings of the U.S. Hydro Conference, Norfolk, VA, USA, 14 May 2007.
32. Quinn, R.; Boland, D. The role of time-lapse bathymetric surveys in assessing morphological change at shipwreck sites. *J. Archaeol. Sci.* **2010**, *27*, 2838–2946. [CrossRef]
33. Plets, R.; Quinn, R.; Forsythe, W.; Westley, K.; Bell, T.; Benetti, S.; McGrath, F.; Robinson, R. Using multibeam echo-sounder data to identify shipwreck sites: Archaeological assessment of the Joint Irish Bathymetric Survey data. *Int. J. Naut. Archaeol.* **2011**, *40*, 87–98. [CrossRef]
34. Westley, K.; Plets, R.; Quinn, R.; McGonigle, C.; Sacchetti, F.; Dale, M.; McNary, R.; Clements, A. Optimising protocols for high-definition imaging of historic shipwrecks using multibeam echosounder. *Archaeol. Anthropol. Sci.* **2019**, *11*, 3629–3645. [CrossRef]
35. Majcher, J.; Quinn, R.; Plets, R.; Coughlan, M.; McGonigle, C.; Sacchetti, F.; Westley, K. Spatial and temporal variability in geomorphic change at tidally influenced shipwreck sites: The use of time-lapse multibeam data for the assessment of site formation processes. *Geoarchaeology* **2021**, *36*, 429–454. [CrossRef]
36. Payne, M.R.; Turner, A. Remote sensing of boat abandonment using Google Earth. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2023**, *30*, 15616–15622. [CrossRef]
37. Drap, P. Underwater Photogrammetry for Archaeology. In *Special Applications of Photogrammetry*, 1st ed.; da Silva, D.C., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012; pp. 111–136.
38. Mcallister, M. The Problem with ‘Digital Realism’ in Underwater Archaeology: Photogrammetric Digital 3D Visualization and Interpretation. *J. Mar. Archaeol.* **2021**, *22*, 253–275. [CrossRef]
39. Yamafune, K.; Torres, R.; Castro, F. Multi-Image Photogrammetry to Record and Reconstruct Underwater Shipwreck Sites. *J. Archaeol. Method Theory* **2017**, *24*, 703–725. [CrossRef]
40. Lowe, D. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Int. J. Comput. Vis.* **2004**, *60*, 91–110. [CrossRef]
41. Bay, H.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. SURF: Speeded up robust features. In *Computer Vision—ECCV 2006. Lecture Notes in Computer Science*; Leonardis, A., Bischof, H., Pinz, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006; Volume 3951, pp. 404–417.
42. Simena, D.; Bañón, J. A review on Delaunay Triangulation with application on computer vision. *Int. J. Comput. Sci. Eng.* **2014**, *3*, 9–18.
43. Triggs, B.; McLauchlan, P.; Hartley, R. Bundle Adjustment—A Modern Synthesis. In *Vision Algorithms’99*; Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000; pp. 298–372.
44. Amolins, K.; Zhang, Y.; Dare, P. Wavelet based image fusion techniques—An introduction, review and comparison. *J. Photogramm. Remote Sens.* **2007**, *62*, 249–263. [CrossRef]
45. Fei, B.; Yang, W.; Chen, W.M.; Li, Z.; Li, Y.; Ma, T.; Hu, X.; Ma, L. Comprehensive Review of Deep Learning-Based 3D Point Cloud Completion Processing and Analysis. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2022**, *23*, 22862–22883. [CrossRef]
46. Lecours, V.; Dolan, M.; Micallef, A.; Lucieer, V. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 3207–3244. [CrossRef]
47. Pollio, J. Underwater Mapping with Photography and SONAR. *Photogramm. Eng.* **1971**, *37*, 955–968.
48. Pollio, J. *Application of Underwater Photogrammetry*; Informal Report 68–52; Naval Oceanographic Office: John C. Stennis Space Center, MS, USA, 1968; p. 46.
49. Pose, S.; Reitmann, S.; Licht, G.J.; Grab, T.; Fieback, T. AI-Prepared Autonomous Freshwater Monitoring and Sea Ground Detection by an Autonomous Surface Vehicle. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 860. [CrossRef]
50. Price, D.M.; Robert, K.; Callaway, A.; Lo Lacono, C.; Hall, R.A.; Huvenne, V.A.I. Using 3D photogrammetry from ROV video to quantify cold-water coral reef structural complexity and investigate its influence on biodiversity and community assemblage. *Coral Reefs* **2019**, *38*, 1007–1021. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

FUNDUS ECCLESIAE. EVIDENCIAS
MATERIALES DE LAS ACTIVIDADES
ECONÓMICAS DE LA IGLESIA EN *HISPANIA*
DURANTE LA ANTIGÜEDAD TARDÍA Y
ALTA EDAD MEDIA

ISABEL MARÍA SÁNCHEZ RAMOS y
YOLANDA PEÑA CERVANTES
(Coordinadoras)

RO
MV
LA

21
2022

SEMINARIO DE ARQUEOLOGÍA
UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE. SEVILLA

ROMVLA

Revista del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla

La revista ROMVLA es una publicación científica de carácter anual dedicada fundamentalmente a la publicación de trabajos de investigación inéditos en el campo de la Arqueología, con especial atención a la Arqueología de la provincia de Sevilla y su entorno. Igualmente actúa como órgano de difusión científica del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla lo que incluye la difusión de los resultados de los diferentes Proyectos de Investigación que se desarrollan en el mismo.

Número 21. 2022

Revista indexada en: Index Islamicus, DIALNET, LATINDEX. Catálogo v1.0 (2002 - 2017).

Directores: Rafael Hidalgo (Universidad Pablo de Olavide)
Pilar León-Castro (Universidad de Sevilla)

Secretarios: Inmaculada Carrasco (Universidad Pablo de Olavide)
Adalberto Ottati (Universidad Pablo de Olavide)

Comité de redacción

A. Corrales (Universidad Pablo de Olavide), C. Fabiao (Universidade de Lisboa), P. Mateos (Instituto de Arqueología de Mérida. CSIC), C. Márquez (Universidad de Córdoba), T. Nogales (Museo Nacional de Arte Romano de Mérida), P. Ortiz (Universidad Pablo de Olavide), A. Ottati (Universidad Pablo de Olavide), I. Sánchez (Universidad Pablo de Olavide), F. Teichner (Universität Marburg), S. Vargas (Universidad de Sevilla), S. Vinci (UNED).

Comité científico

L. Abad (Universidad de Alicante), A. Arévalo (Universidad de Cádiz), F. Arnold (Deutsches Archäologisches Institut. Madrid), J. Beltrán (Universidad de Sevilla), M. Bendala (Fundación Pastor, Spain), J. Campos (Universidad de Huelva), H. Catarino (Universidade de Lisboa), H. Dessales (École Normale Supérieure de Paris), M. C. Fuertes (Consejería de Cultura. Junta de Andalucía), P. Gros (Université de Aix-en-Provence), J. M. Gurt (Universidad de Barcelona), H. V. Hesberg (Deutsches Archäologisches Institut. Roma), J. L. Jiménez Salvador (Universidad de Valencia), S. Keay (University of Southampton), M. Kulikowski (University of Tennessee-Knoxville), G. López Monteagudo (CSIC), J. M. Luzón (Universidad Complutense de Madrid), R. Mar (Universidad Rovira i Virgili), W. Mierse (University of Vermont), B. Mora (Universidad de Málaga), P. Moret (Université de Toulouse-Le Mirail), M. Orfila (Universidad de Granada), S. Panzram (Universität Hamburg), P. Pensabene (Università di Roma La Sapienza), Y. Peña (UNED), A. Pérez-Juez (Boston University in Spain), A. Pizzo (Escuela Española de Historia y Arqueología en Roma-CSIC), F. Quesada (Universidad Autónoma de Madrid), A. M. Reggiani (Ministero per i Beni e le Attività Culturali), P. Rodríguez Oliva (Universidad de Málaga), P. Rouillard (CNRS. Maison René-Ginouès. Nanterre), M. A. Tabales (Universidad de Sevilla), T. Tortosa (Instituto de Arqueología de Mérida CSIC), W. Trillmich (Deutsches Archäologisches Institut), A. Ventura (Universidad de Córdoba), A. Viscogliosi (Università di Roma La Sapienza).

Patrocinada: Vicerrectorado de Investigación, Transferencia y Doctorado de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla

Edición, publicación y distribución

Seminario de Arqueología
Universidad Pablo de Olavide de Sevilla
Carretera de Utrera, km. 1 · 41013 Sevilla (España)
Telf.: 954 977 932 • E-mail: romula@upo.es

Dirección y redacción

Seminario de Arqueología
Universidad Pablo de Olavide de Sevilla
Carretera de Utrera, km. 1 · 41013 Sevilla (España)

Diseño: Diseño y Comunicación S.L.

Maquetación e impresión: Imprenta SAND, S. L. · www.imprentasand.com

Depósito Legal: SE-075-04

ISSN: 1695-4076



© 2023 "Romula". Revista del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

Las opiniones y comentarios expuestos por los autores de las colaboraciones recogidas en la revista son responsabilidad exclusiva de los mismos. Esta publicación estará disponible online a través de la plataforma de Revistas Científicas de la Universidad Pablo de Olavide. La difusión de los trabajos publicados se registrará de acuerdo con la licencia Creative Commons by-nc-sa. En todo caso, se mencionará siempre que el trabajo ha sido publicado originalmente en la revista ROMVLA.

Í N D I C E

- WINE AND OIL PRODUCTION IN 4TH-7TH CENTURY MONASTERIES OF THE EASTERN MEDITERRANEAN**
PRODUCCIÓN DE VINO Y ACEITE EN LOS MONASTERIOS DEL MEDITERRÁNEO ORIENTAL, SIGLOS IV-VII
Tamara Lewit 7
- ÁNFORAS TARDORROMANAS, CRISMONES Y EL *OLEUM DULCE*: REFLEXIONES SOBRE EL PECIO MALLORQUÍN DE SES FONTANELLES**
LATE ROMAN AMPHORAE, CHRISMONS, AND *OLEUM DULCE*: REFLECTIONS ON THE MALLORCAN WRECK OF SES FONTANELLES
Darío Bernal-Casasola, Miguel Ángel Cau-Ontiveros, Piero Berni, Alessandra Pecci, José Alberto Retamosa, José L. Portillo-Sotelo, Javier Oviedo, Elisa Fernández Tudela, Marina Goñalons Lapiedra, Enrique García Rianza, Jaume Cardell 29
- LAS ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y ECONÓMICAS EN LAS SEDES EPISCOPALES DURANTE LA ANTIGÜEDAD TARDÍA. *BARCINO* Y OTROS MODELOS MEDITERRÁNEOS**
PRODUCTIVE AND ECONOMIC ACTIVITIES IN EPISCOPAL GROUPS DURING LATE ANTIQUITY. *BARCINO* AND OTHER MEDITERRANEAN MODELS
Julia Beltrán de Heredia Bercero 85
- ACTIVIDADES PRODUCTIVAS EN ÁMBITOS ECLESIASTICOS TARDOANTIGUOS EN *VALENTIA* Y SU ENTORNO TERRITORIAL**
PRODUCTIVE ACTIVITIES IN LATE ANCIENT ECCLESIASTICAL AREAS IN VALENTIA AND ITS TERRITORIAL ENVIRONMENT
Albert Vicent Ribera i Lacomba, Miquel Rosselló Mesquida 117
- LA PRODUCCIÓN VITIVINÍCOLA EN LA CIUDAD ALTOMEDIEVAL DE OLÈRDOLA Y SU TÉRMINO CASTRAL (*PENEDÈS, BARCELONA*)**
WINE PRODUCTION IN THE EARLY MEDIEVAL TOWN OF OLÈRDOLA AND ITS *TERMINUS CASTRALIS* (*PENEDÈS, BARCELONA*)
Núria Molist, Xavier Esteve, Alessandra Pecci, Gisela Ripoll 141
- CONJUNTOS ECLESIASTICOS Y PRODUCCIÓN EN ÁMBITO RURAL EN LA TARRACONENSE ORIENTAL (SIGLOS V-VIII): PANORAMA GENERAL Y ESTUDIO DE CASOS**
ECCLESIASTICAL ENSEMBLES AND PRODUCTION IN RURAL CONTEXTS IN EASTERN TARRACONENSIS (5TH-8TH CENTURIES): OVERVIEW AND CASE STUDIES
Jordi Gibert Rebull, Jordi Roig Buxó 167

MONASTERIOS Y ALMUNIAS DE CÓRDOBA. EL CONTROL PRODUCTIVO DE LA PERIFERIA URBANA EN ÉPOCA TARDOANTIGUA Y OMEYA
MONASTERIES AND ALMUNIAS OF CÓRDOBA. PRODUCTIVE CONTROL OF THE URBAN PERIPHERY IN LATE ANTIQUITY AND THE Umayyad PERIOD

Jesús Atenciano-Crespillo, Rafael Blanco-Guzmán

225

EN BUSCA DE LAS EVIDENCIAS MATERIALES DE LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS IMPULSADAS POR LA IGLESIA. ALGUNAS CONSIDERACIONES DE CARÁCTER GENERAL
IN SEARCH OF MATERIAL EVIDENCE OF THE ECONOMIC ACTIVITIES PROMOTED BY THE CHURCH. SOME GENERAL CONSIDERATIONS

Yolanda Peña Cervantes, Isabel Sánchez Ramos

257

ÁNFORAS TARDORROMANAS, CRISMONES Y EL *OLEUM DULCE*: REFLEXIONES SOBRE EL PECIO MALLORQUÍN DE SES FONTANELLES

LATE ROMAN AMPHORAE, CHRISMONS, AND *OLEUM DULCE*: REFLECTIONS ON THE MALLORCAN WRECK OF SES FONTANELLES

Darío Bernal-Casasola

Universidad de Cádiz. dario.bernal@uca.es

Miguel Ángel Cau-Ontiveros

ICREA/ERAAUB, IAUB, Universitat de Barcelona (UB)
macau@ub.edu

Piero Berni

Institut Català d'Arqueologia Classica. pberni@icac.cat

Alessandra Pecci

ERAAUB, IAUB, Universitat de Barcelona (UB)
alepecci@gmail.com

José Alberto Retamosa

Universidad de Cádiz. jose.retamosa@uca.es

José L. Portillo-Sotelo

Universidad de Cádiz. joseluis.portillo@uca.es

Javier Oviedo

Universidad de Cádiz. javier.oviedo@uca.es

Elisa Fernández Tudela

Universidad de Cádiz (elisa.tudela@uca.es)

Marina Goñalons Lapiedra

Universidad de Cádiz. marina.gonalons@uca.es

Enrique García Ríaza

Universitat de les Illes Balears. garcia.riaza@uib.es

Jaume Cardell

Consell de Mallorca. jacardell@conselldemallorca.net

Resumen

La finalización de la excavación arqueológica del cargamento del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (2021-2022), hundido en aguas de Mallorca avanzado el s. IV, permitió identificar que una parte significativa de las ánforas eran olearias y que procedían de talleres litorales de la Cartaginense, habiendo sido denominadas Ses Fontanelles I – Dr. 23 cartagineses. Además de su excepcionalidad tipológica, las mismas portaban *tituli picti* alusivos al *oleum dulce* y al *oleum viride*, junto a los datos de los agentes comerciales, y sobre la argamasa que hermetizaba sus *opercula* se ha documentado un excepcional sello compuesto por un crismón y por algunos elementos antropomícos alusivos a dos

personajes de la *gens Flavia*. Se presenta por primera vez en estas páginas el cargamento de aceite y la epigrafía anfórica asociada a estos envases olearios, reflexionando sobre la posibilidad de que nos encontremos ante un cargamento mixto (aceite, salazones y vino), al menos parte del cual quizás estuvo bajo control de alguna autoridad eclesiástica, con la posible implicación de los obispados o monasterios del sudeste hispánico, en unos momentos muy tempranos en los que estas evidencias cobran aún mayor importancia.

Palabras-clave: talleres eclesiásticos, Antigüedad tardía, epigrafía anfórica, aceite, *Carthago Spartaria*.

Abstract

The completion of the archaeological excavation of the late Roman wreck of Ses Fontanelles (2021-2022), sunk in Mallorcan waters in the late 4th century, made it possible to identify that a significant part of the amphorae were oil containers, which came from coastal workshops of the Carthaginian area, having been named Ses Fontanelles I – Dr. 23 Carthaginian. In addition to their typological exceptionality, they bore *tituli picti* alluding to *oleum dulce* and *oleum viride*, together with the details of the commercial agents, and on the mortar that sealed their *opercula*, an exceptional seal has been documented, composed of a Chrismon and some nominal elements alluding to two characters from the *gens Flavia*. For the first time, in these pages we present the problem of the oil shipment and the amphorae epigraphy associated with these oil containers, reflecting on the possibility that we are dealing with a mixed shipment (oil, salted fish and wine), at least part of which was under the control of some ecclesiastical authority, with perhaps the possible involvement of the bishoprics or monasteries of southeastern Spain at a very early time, in which these evidence become even more important.

Keywords: ecclesiastical workshops, Late Antiquity, amphorae epigraphy, oil, *Carthago Spartaria*.

1. EL PECIO DE SES FONTANELLES: SÍNTESIS DE LAS INVESTIGACIONES Y DE LA CRONOLOGÍA DEL PECIO¹

De manera fortuita, un temporal permitió el descubrimiento de un pecio en una de las playas más concurridas de Palma de Mallorca en verano del año 2019 (*Fig. 1a*). Tras un primer diagnóstico del hallazgo se pudo realizar una valoración

¹ Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto ARQUEO-MALLORNAUTA desarrollado a través de un Convenio Interinstitucional entre la Universitat de Barcelona, la Universitat de Cádiz, la Universitat de les Illes Balears y el Consell de Mallorca. Asimismo, es parte de los proyectos GARVM III (PID2019-108948RB-I00/ AEI / 10.13039/501100011033) del Gobierno de España/Feder; GARVMTRANSFER (PDC2021-121356-I00), de la convocatoria de Prueba de Concepto 2021 del Ministerio de Ciencia e Innovación; y GARVM IV (PID2022-138814OB-I00). El trabajo también se enmarca

en el proyecto "Arqueología y Arqueometría aplicadas al estudio de la cerámica y el poblamiento de la ciudad romana de *Pollentia* y su hinterland (Mallorca, islas Baleares)" (ARQCERPOL) (PID2021-123223NB-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa". Este trabajo es parte de las actividades del Equip de Recerca Arqueològica i Arqueomètrica de la Universitat de Barcelona (ERAAUB) financiado por la DIUE de la Generalitat de Catalunya a través de la AGAUR (2021 SGR 00696).

arqueológica y arqueométrica preliminar del naufragio en 2020, habiéndose podido precisar que el cargamento mixto procedía con mucha probabilidad de algún puerto de la zona costera de la Cartaginense (triángulo Cartagena – Mazarrón – Águilas) y que el mismo se fechaba a inicios de época tardorromana (BERNAL-CASASOLA y CAU, 2020). El interés y la singularidad del hallazgo eran notables, pues además de tratarse del primer pecio conocido procedente del área de *Carthago Spartaria* hundido en el *Mare Nostrum*, parte de las ánforas que constituían la carga mayoritaria estaban completas, todavía selladas con los *opercula* y con *tituli picti* conservados (Fig. 1b), además de que buena parte del casco de la embarcación estaba en un excelente estado de conservación, con diversos elementos de la arquitectura naval *in situ*.

Por ello, el Consell de Mallorca encargó el diseño y ejecución de un proyecto interdisciplinar que, con el acrónimo ARQUEOMALLORNAUTA, ha integrado a especialistas de diversas instituciones (coordinados por las universidades de Barcelona, Cádiz, Islas Baleares y el citado Consell), con el objetivo de realizar un estudio integral del hallazgo y proceder a su extracción y conservación (CARDELL *et al.*, e.p.). Actualmente, el yacimiento se encuentra en fase de estudio y de finalización de la excavación de cara a la extracción de la embarcación en los próximos meses, si bien por su interés se ha decidido presentar de manera preliminar y progresiva los principales temas vinculados con su estudio y algunos aspectos histórico-arqueológicos. El lector podrá encontrar un primer trabajo donde se presentó una síntesis general de la arquitectura naval del pecio, del cargamento y las líneas de investigación derivadas de los trabajos de 2019 y 2020 (MUNAR *et al.*, 2022), a la cual remitimos para el contexto general del yacimiento, a fin de evitar reiteraciones innecesarias en estas páginas. Se han realizado sendas síntesis de los resultados procedentes de la campaña de finales de 2021 e inicios de 2022, la cual permitió la excavación de la parte central y de popa del cargamento –pues el tercio de proa fue el excavado durante la fase de diagnóstico– en proceso de edición en las fechas de redacción de estas páginas, incluyendo un trabajo más detallado (DE JUAN *et al.*, e.p.) y otro de corte más sintético (BERNAL *et al.*, e.p. a).

En relación con el cargamento, que es la parte del pecio que más interesa en este trabajo, cabe indicar que, por un lado, se ha presentado la síntesis general de las ánforas que lo componen, que, a pesar de proceder de una única zona de manufactura y responder a una tradición tecnológica afín –algo además corroborado por el análisis petrográfico de las cerámicas–, es heterogéneo, ya que integra ánforas salazoneras, olearias y vinarias, todas ellas, como señalamos, procedentes posiblemente de talleres del sudeste hispánico (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. b; CAU *et al.*, e.p. a). También se han sintetizado los resultados de la caracterización

arqueométrica realizada sobre una veintena de ánforas, como parte de un análisis general *multi proxy* de los artefactos del cargamento y de la embarcación (CAU *et al.*, e.p. b). Y se han realizado sendos estudios sobre las ánforas del cargamento. El primero, centrado en el estudio de las inscripciones pintadas (*tituli picti*) que aluden a la flor de *liquamen*, una salsa de pescado fermentado que transportaban las ánforas del tipo Almagro 51c ubicadas en el tercio de proa, permitió identificar

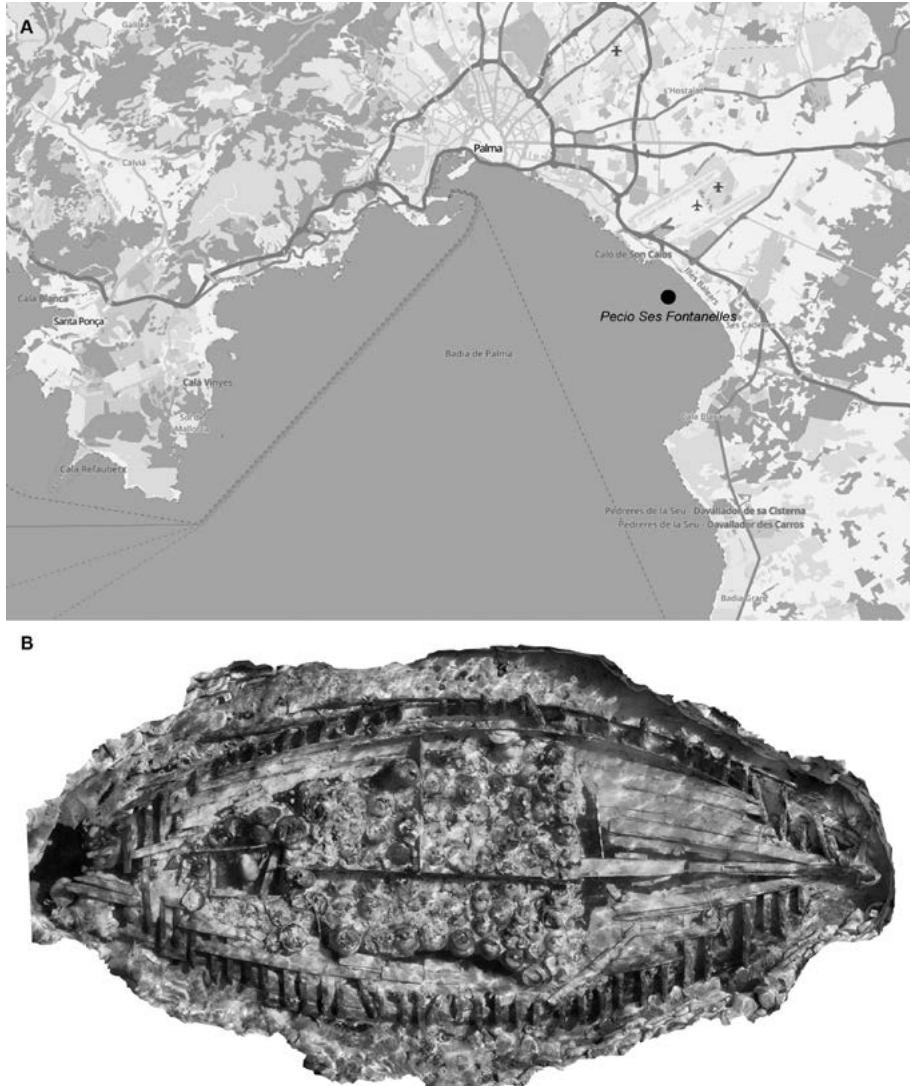


Fig. 1. Localización del pecio de Ses Fontanelles en la bahía de Palma (A), y fotogrametría con el cargamento de la parte central y de popa *in situ* (B) (Plano y fotografía: Autores).

a dos personajes vinculados con el producto, *Alunnius* y *Ausonius*, escritos sistemáticamente en las casi 40 inscripciones recuperadas (39 para ser exactos), y reproducidos por dos escribas diversos, como se colige de la identificación de dos *manus* (SOLER *et al.*, 2021). El segundo sobre las ánforas vinarias, pertenecientes de diversos tipos, pero que constituyen la parte minoritaria del cargamento (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. c). El tercer estudio se centra en las ánforas de aceite, al que dedicamos estas páginas y con el que completamos al menos una primera aproximación a cada uno de los tres productos que conformaban el cargamento principal del barco naufragado en Ses Fontanelles.

Respecto a la cronología del hundimiento, todos los indicios disponibles hasta la fecha apuntan a una fecha de momentos avanzados del s. IV d. C. Inicialmente, se tendió a relacionar el hallazgo con el famoso Cabrera III por diversos factores (carácter heterogéneo del pecio, coincidencia de algunos tipos anfóricos...), de ahí que la cronología preliminar se centrara entre la segunda mitad del s. III y el s. IV d. C. (BERNAL-CASASOLA y CAU, 2020). El posterior estudio paleográfico de los *tituli picti* asociados a las Almagro 51c y los paralelos epigráficos localizados en diversos soportes permitieron proponer unas fechas para el hundimiento entre mediados o la segunda mitad del s. IV d. C. (SOLER *et al.*, 2021, 302-303). Actualmente está en fase de desarrollo una amplia batería de dataciones absolutas por diversas técnicas. De ellas, solamente hay dos disponibles por el momento, realizadas respectivamente sobre sendos fragmentos del abarrote utilizado para la estiba de las ánforas, usado para amortiguar los vaivenes del viaje. En el caso de uno de los restos vegetales utilizados (*Poaceae*), la cronología obtenida ha sido del 250/295 o el 310/408; mientras que el sarmiento de vid analizado ha aportado unas fechas entre el 238 y el 382, ambas calibradas a 2 sigma con el 95,4 % de fiabilidad. Los resultados obtenidos son, por tanto, homogéneos, apuntando por sí solos a una cronología entre la segunda mitad del s. III y finales del s. IV o inicios del s. V d. C.². Por su parte, la cronología de las ánforas no permite precisar más, pues presentan amplios periodos de producción: las Almagro 51c se conocen desde el 175 al 500/525 en su producción bética, y entre el 200-500 y el 175/450 en la *Lusitania* meridional y occidental respectivamente; las Matagallares I entre el 200 y el 300, y las Keay XIX béticas entre el 250 y el 500 –de las cuales se han recuperado únicamente dos ejemplares como parte de las vituallas de la tripulación (BERNAL-CASASOLA, 2019, 584, fig. 15)–; y las Dressel 23 entre el 280 y el 600 (BERNI y MOROS, 2017).

2. Informe 0223-AR-227V-3 del CIRAM (Martillac, Francia), de 21 de marzo de 2023 (P. ROSSETTI). Muestras M-5 (CIRAM 6372) y M-6 (CIRAM-6373).

Por todo lo comentado y teniendo presente algún *terminus post quem* evidente (como el aportado por el inicio de la producción de las Dressel 23), el carácter no muy evolucionado tipológicamente de algunas de las ánforas aparecidas (con fondos aún huecos en las salsarias y amplios fondos planos en las vinarias que abogan por un estadio intermedio de la producción) y la paleografía de los *tituli picti* ya comentada, la fecha más probable del hundimiento que se puede proponer en el estado actual de las investigaciones es de mediados o de la segunda mitad del s. IV d. C. (350-400 *circa*).

2. DE LAS ÁNFORAS OLEARIAS TARDORROMANAS DE LA CARTAGINENSE (SES FONTANELLES I – DR. 23 CARTAGINENSES)

La denominación otorgada a este tipo de ánfora deriva del hallazgo de un ejemplar completo en la campaña de 2019, similar a las ánforas olearias tardías del Guadalquivir, pero con sus singularidades, que definimos con el nombre del pecio: Ses Fontanelles I o SF I (BERNAL-CASASOLA y CAU, 2020; BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. a; CAU *et al.*, e.p. a; MUNAR *et al.*, 2022, *Fig. 6*; SOLER *et al.*, 2021, 308-309), nomenclatura que ha sido utilizada asimismo para definir a otras cuatro formas de fondo plano recuperadas en las excavaciones³.

Inicialmente definida solo a través de un ejemplar completo (DSF-002⁴) recuperado en la campaña de 2019, la finalización de la excavación del pecio ha permitido disponer de más de un centenar de ejemplares, completos y fragmentarios, para poder precisar las primeras apreciaciones tipológicas indicadas en los trabajos citados en el párrafo precedente. Presentamos a continuación una serie de 12 ejemplares íntegros o prácticamente completos que constituyen la base de las valoraciones morfológicas que a continuación comentaremos (*Figs. 2 y 3*). Para establecer los parámetros básicos en cuanto a dimensiones de esta forma hemos seleccionado 10 ejemplares, cuyas dimensiones sintetizamos en la *Figura 4*, y que son extensivas al centenar aproximado de ánforas que hemos utilizado como referencia tras su documentación arqueográfica⁵.

Las ánforas Ses Fontanelles I parecen inspirarse en las Dressel 23 béticas. Constituyen ejemplares de dimensiones medias, alcanzando entre los 60-70 cm

3. Denominadas respectivamente SF II, SF III, SF IV y SF V (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. c).

4. Todos los ítems recuperados durante las excavaciones fueron denominados con la fórmula DSF (= Derehcte Ses Fontanelles) y una sigla, que es la que utilizamos para referirnos a cada una de las ánforas a título particular.

5. Concretamente 47 individuos identificados por tercios superiores o bocas (DSF-3, 12, 19, 52, 90, 91, 92, 147, 469, 305, 307, 335, 341, 344A, 345, 352, 367, 399A, 399B, 399C,

399D, 399E, 400A, 400B, 403C, 426A, 448, 460, 468B, 470, 474, 475, 476, 479, 496, 499, 500, 502, 503, 504, 510B, 511, 512, 515, 522, 523B, 555), 42 fondos (DSF-56, 95, 96, 148, 149, 264, 304, 308, 309, 311, 314, 315, 316, 318, 319A, 322, 331, 333, 334A, 335B, 342, 343, 344B, 346B, 349, 351, 352B, 354, 399H, 399I, 399J, 400C, 421, 465, 468C, 474, 480, 505, 518, 519, 523C, 540D), 7 asas (DSF-311, 313, 317B, 319B, 344C, 388, 453C) y 2 paredes con marcas de cuerdas (DSF-321, 335).

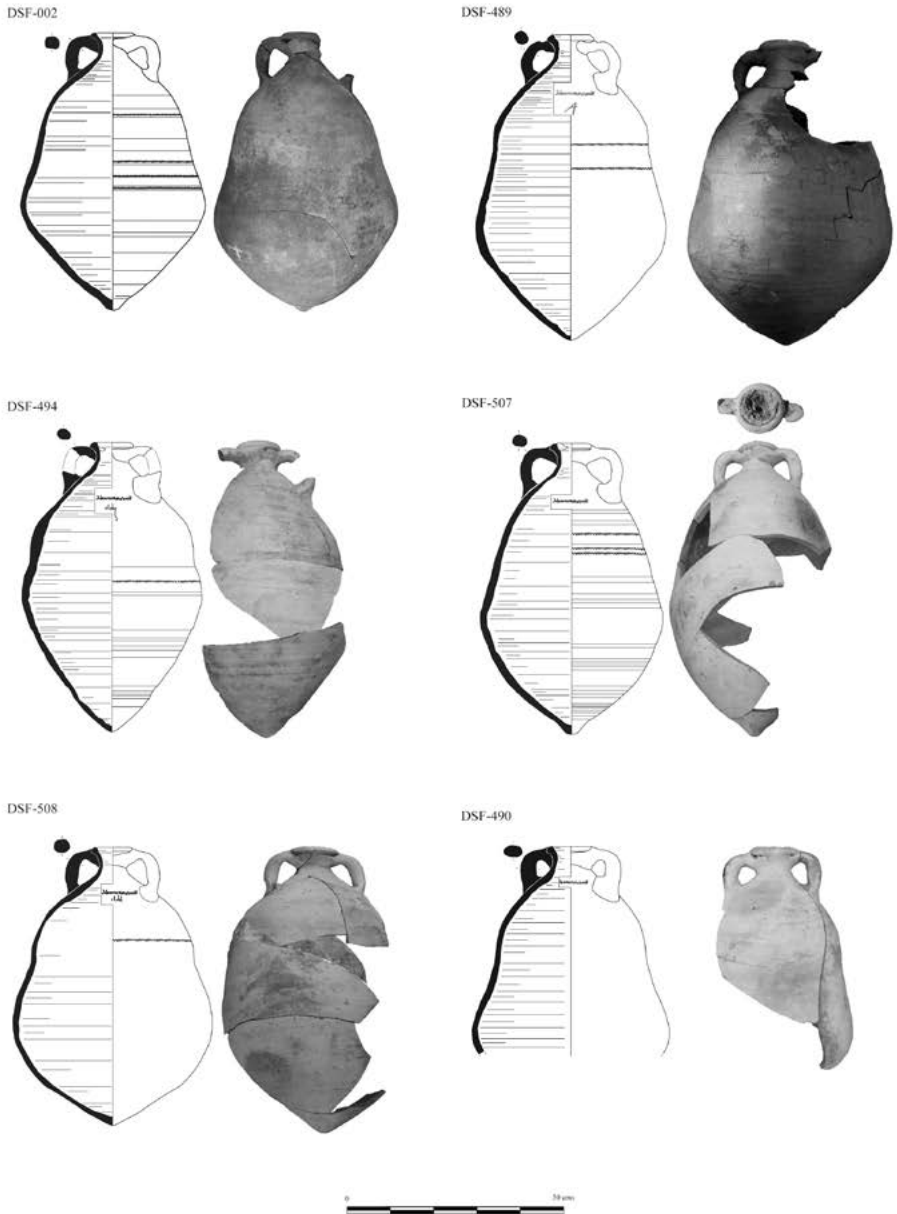


Fig. 2. Ejemplares de la forma Ses Fontanelles I / Dressel 23 cartaginenses (Imagen: Autores).

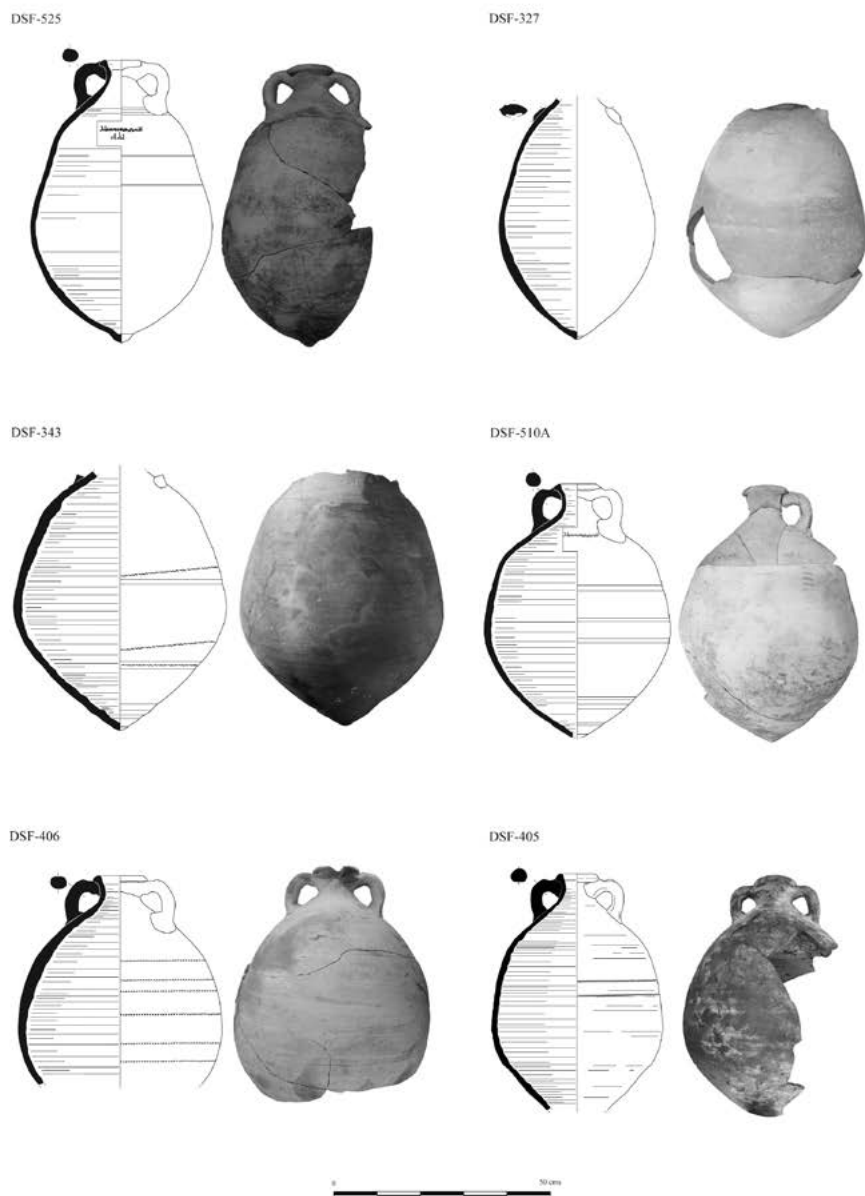


Fig. 3. Ejemplares de la forma Ses Fontanelles I / Dressel 23 cartaginenses (Imagen: Autores).

de altura, siendo frecuentes los valores intermedios en este intervalo; y con notable anchura, que oscila entre los 40,5 y los 47,5 cm. Su peso en vacío es de unos 14 kg. Son, por tanto, algo mayores que las Dressel 23 meridionales a las cuales imitan, que tienen entre 45 y 54 cm de altura y 33-37 cm de anchura máxima (BERNI y MOROS, 2017).

Como se puede verificar con detalle en los ejemplares fragmentarios ilustrados en la figura 5, la boca es muy estrecha, propia de contenedores destinados al transporte de líquidos, con valores que se sitúan entre los 8 y los 9 cm de diámetro. El borde constituye la natural continuidad de la pared, que se exvasa y redondea semicircularmente al exterior, generando un característico apuntamiento en la mayor parte de las ocasiones, como también una sensible carena en la parte alta de la pared interior, destinada a facilitar el encaje del *operculum* (Fig. 5, DSF-474, 475, 499). En ocasiones, la característica sección semicircular del borde es sustituida por morfologías más ovales (Fig. 5, DSF-499, 500) o subcuadrangulares (Fig. 5, DSF-470). Las asas constituyen un elemento muy definitorio de esta forma, siendo claramente reconocibles gracias a su sección de tendencia circular, con algunas variantes: subcuadrada (DSF-002), subcircular (DSF-508, 525) u ovalada (DSF-500). En la zona dorsal presentan ocasionalmente –en torno al 20 %– una acusada acanaladura, que permite su rápida identificación (Fig. 5, DSF-344A, 504). Diversos ejemplares presentan una característica digitación en la parte superior del asa, junto al borde (Fig. 5, DSF-400B, 469), realizada durante el proceso de adherencia de las asas para facilitar su encaje. También es frecuente en esta forma que las asas generen rebabas en torno al cuello, presentes en casi todos los ejemplares (Fig. 5), lo cual denota la escasa pericia de los alfareros que tenían que recurrir a este antiestético sistema para garantizar la funcionalidad de estas. Suelen presentar una trayectoria de cuarto de círculo (Fig. 5, DSF-341, 426A, 469, 503), aunque en otros casos las mismas, muy macizas, son más verticales, con un acusado giro en la parte superior para unirse con el cuello, generando amplias rebabas de unión (Fig. 5, DSF-003, 400B, 470, 474, 499, 500, 504). Son pequeñas, entre 2,5 y 3,5 cm de grosor. A nivel fragmentario y sin las asas es prácticamente imposible la distinción tipológica de esta forma con las Almagro 51c, de dimensiones muy similares y con bocas, bordes y cuellos muy afines. Conocemos la manufactura de estas ánforas olearias en la *figlina* de El Mojón (área de Mazarrón), donde se reconocen con claridad gracias a las secciones circulares de las asas, habiendo pasado desapercibidas en dicho taller por su carácter fragmentario, consideradas como “Almagro 51c fusiformes” (BERROCAL, 2012, 263-264, fig. 7, parte central inferior).

El cuerpo del recipiente presenta una tendencia “alimonada”, como permite verificar su tercio inferior, que es claramente apuntado en todas las ocasiones. Se advierten dos tendencias: un cuerpo bitruncocónico, con una sinuosidad muy acusada en la mitad superior (DSF-002, 489, 490, 508), en ocasiones más disimulada (DSF-327, 494, 507, 525), resultado de un defectuoso torneado; o bien una panza de tendencia más globular y menos “alimonada”, aunque siempre con el extremo inferior muy apuntado (DSF-510A, 406, 343, 405). Otra de las características que permiten identificar estas ánforas en estado fragmentario es el grosor de su pared, que es notable, especialmente en la zona de la panza, llegando a alcanzar entre 1,5 y casi 3 cm, el cual a veces es muy irregular, como se puede comprobar en algunos de los perfiles completos conservados. Todas estas características recuerdan la tradición de sus ancestros, las Dressel 20.

Un detalle que presentan las SF I –y en general todas las ánforas del pecio mallorquín– es la presencia de marcas de cuerda en la zona del cuerpo, recorriendo la práctica totalidad de este (Fig. 6). Suele tratarse de una cuerda simple, aunque en ocasiones son múltiples o están anudadas. Se conservan parcialmente, de forma que algunos envases solo permiten vislumbrar la presencia de una cuerda (DSF-494, 508), mientras que en otros se identifican dos (DSF-405, 489), tres (DSF-507) o cuatro (DSF-002), hasta llegar a seis en el caso del ánfora ilustrada en la figura 6, *supra* (DSF-406). Posiblemente por un torneado poco cuidado y por la escasa pericia de algunos *figuli* fue necesario recurrir a este sistema de “cosido superficial” tras el torneado para

Tipo	Ejemplar (DSF + nº)	Altura total (cm)	Anchura total (cm)	Ø boca (cm)	Ø base (cm)	Altura asa (cm)	Anchura asa (cm)	Capacidad (litros)	Titulus pictus
Ses Fontanelles I / Dressel 23 cartaginenses	002	64,5	43	8	3	2,8	3,3	40,51	-
	405	57c	40,5	8	-	3	3,7	32,45c	-
	406	50c	47,5	9	-	2,7	3,5	46,06c	-
	489	71	44	8,8	2,6	3	3,1	45,77	X
	490	48c	46	8,4	-	2,7	4,3	42,22c	X
	494	66	41,5	8	5	2,5	3	36,2	X
	507	67,5	42	7,6	4	2,7	3,4	37,33	X
	508	64	47	7,8	3,2	3	3,5	48,25	X
	510A	59	43	8,2	5	3,3	3,4	37,34	X
	525	65	42,4	9	6,2	3	3,5	39,62	X

Fig. 4. Síntesis de los principales parámetros y dimensiones de las ánforas objeto de estudio (c = conservada) (Tabla: Autores).

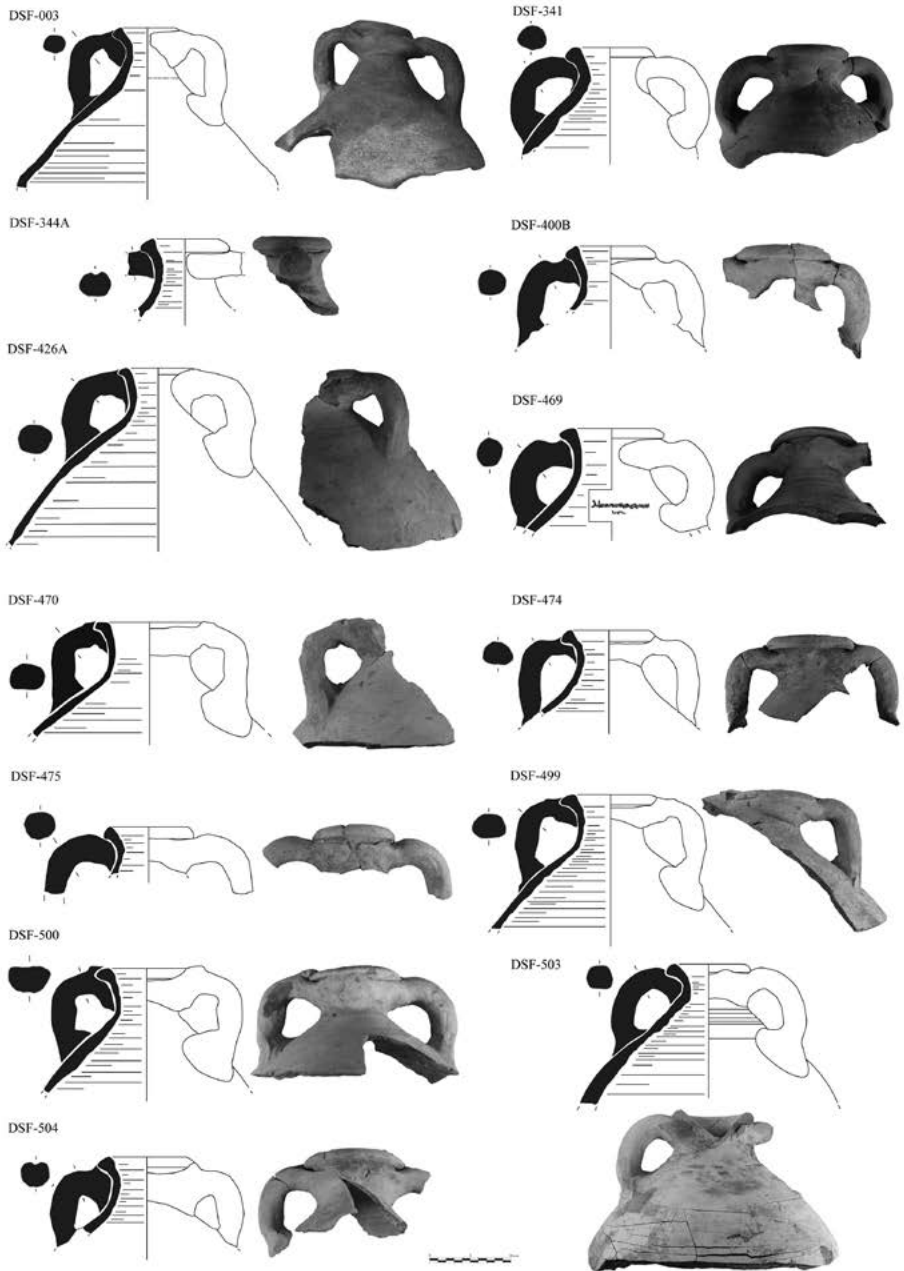


Fig. 5. Selección de bocas y cuartos superiores de ánforas del tipo Ses Fontanelles I (Imagen: Autores).

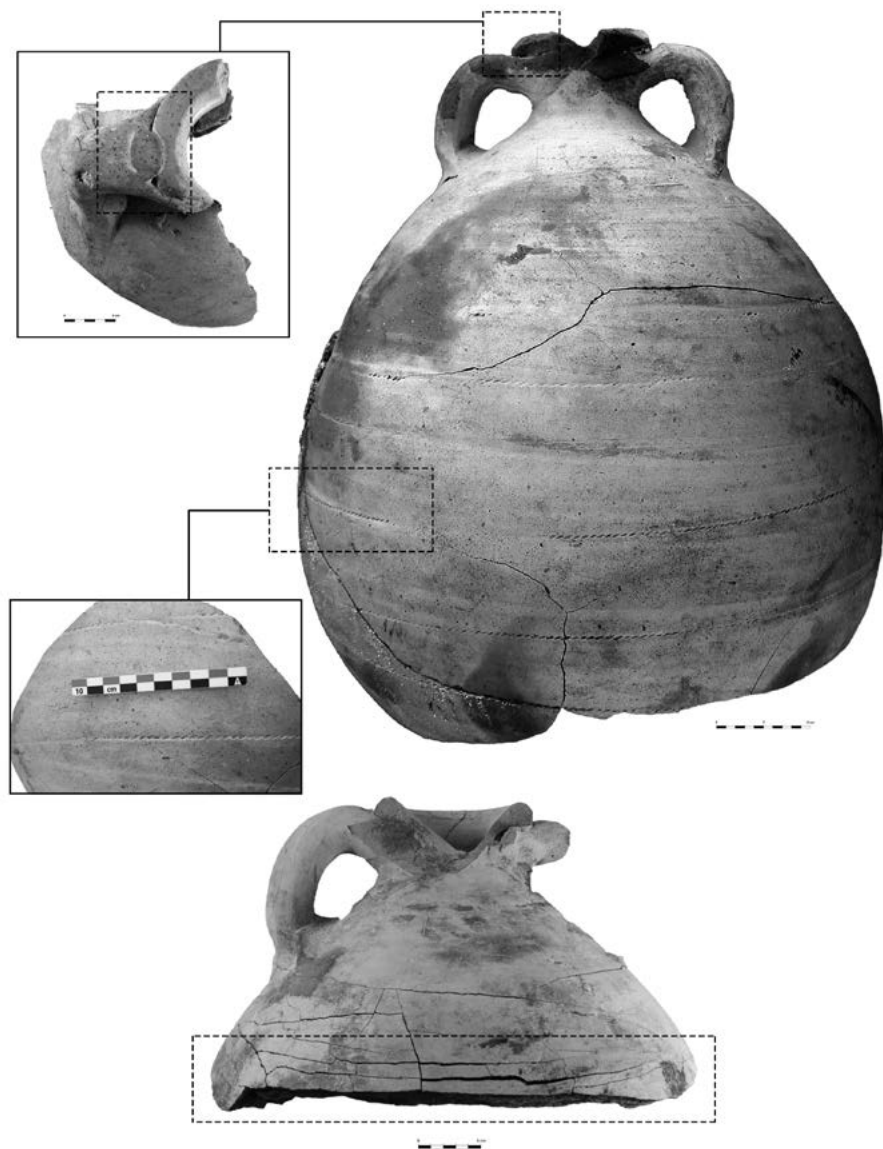


Fig. 6. Detalles de ánforas Ses Fontanelles I con las marcas de cuerda (DSF-406) y con el habitual exfoliado de sus paredes (DSF-503) (Imagen: Autores).

asegurar el ensamblaje de las diversas partes del cuerpo. Una costumbre poco habitual en *Hispania*, donde se conoce especialmente en el mundo púnico y tardopúnico ebusitano, área geográfica con la cual quizás haya que relacionar en el futuro a los artesanos fabricantes de estas piezas, conocedores tal vez de esta técnica propia de dicho ámbito insular. De manera esporádica también se ha identificado esta técnica en algunas ánforas olearias béticas.

Posiblemente como resultado del torneado y de la cocción poco cuidadas, uno de los problemas que presentan estas ánforas es el habitual craquelado de su pared y la exfoliación superficial (*Fig. 6, infra*), una constatación exclusiva en este pecio en los envases del tipo Ses Fontanelles I, que ha provocado que muchas de ellas se hayan conservado en pésimas condiciones, tanto en contexto subacuático como tras su extracción y posterior desalado y conservación. No insistimos más, pues así se ha indicado en trabajos precedentes sobre la poco cuidada ejecución y los deficientes procesos tecnológicos de torneado y cocción de estas ánforas de la Cartaginense (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. b), lo que destila la falta de una tradición alfarera centenaria en la zona de manufactura, frente a lo que sucede en el Valle del Guadalquivir o en otras áreas de *Hispania*.

El tercio inferior de las ánforas aparece sistemáticamente rematado en un extremo apuntado que impedía que los envases se pudiesen mantener por sí solos en posición vertical. Estos pivotes apuntados, en ocasiones, se rematan con un tenue apuntamiento de la base (*Fig. 7, DSF-308, 314, 342A, 352B, 523C*), mientras que en otras ocasiones sí se conserva un “pezón” o pequeño abotonamiento apuntado destacado (*Fig. 7, DSF-354, 400C, 518*), que a veces se diferencia de la parte baja de la panza por una clara carena o línea de sutura (*Fig. 7, DSF-355, 470*), confirmando que, al menos en algunas ocasiones, esta zona del envase se torneó por separado y se adhirió a la panza durante la fase de torneado. Este detalle formal del pivote, apuntado y abotonado, confirma también un claro parentesco de las SF I con las Dressel 23 del Valle del Guadalquivir, cuya producción se sitúa como ya sabemos entre el 280 y el 600 (BERNI y MOROS, 2017).

Por último, y en relación con la capacidad de las SF I⁶, contamos con al menos 7 ejemplares completos que han permitido realizar una estimación fiable considerando el ánfora llena hasta la mitad del cuello (*Fig. 4, DSF-002, 489, 494, 507, 508, 510A y 525*). No se observa un valor estandarizado, sino que el volumen oscila bastante, entre los 36,2 y los 48,25 l, con una notable variación entre prácticamente cada envase (36,2; 37,3; 39,6; 40,5, 45,7 y 48,3), con una correspondencia bastante aproximada a múltiplos de las libras de 327 gr (124,

6. Para la determinación del volumen interior de las ánforas se ha utilizado la aplicación *CAPACITY – Calcul de*

Capacité de la *Université Libre de Bruxelles* (<https://capacity.ulb.be/>).

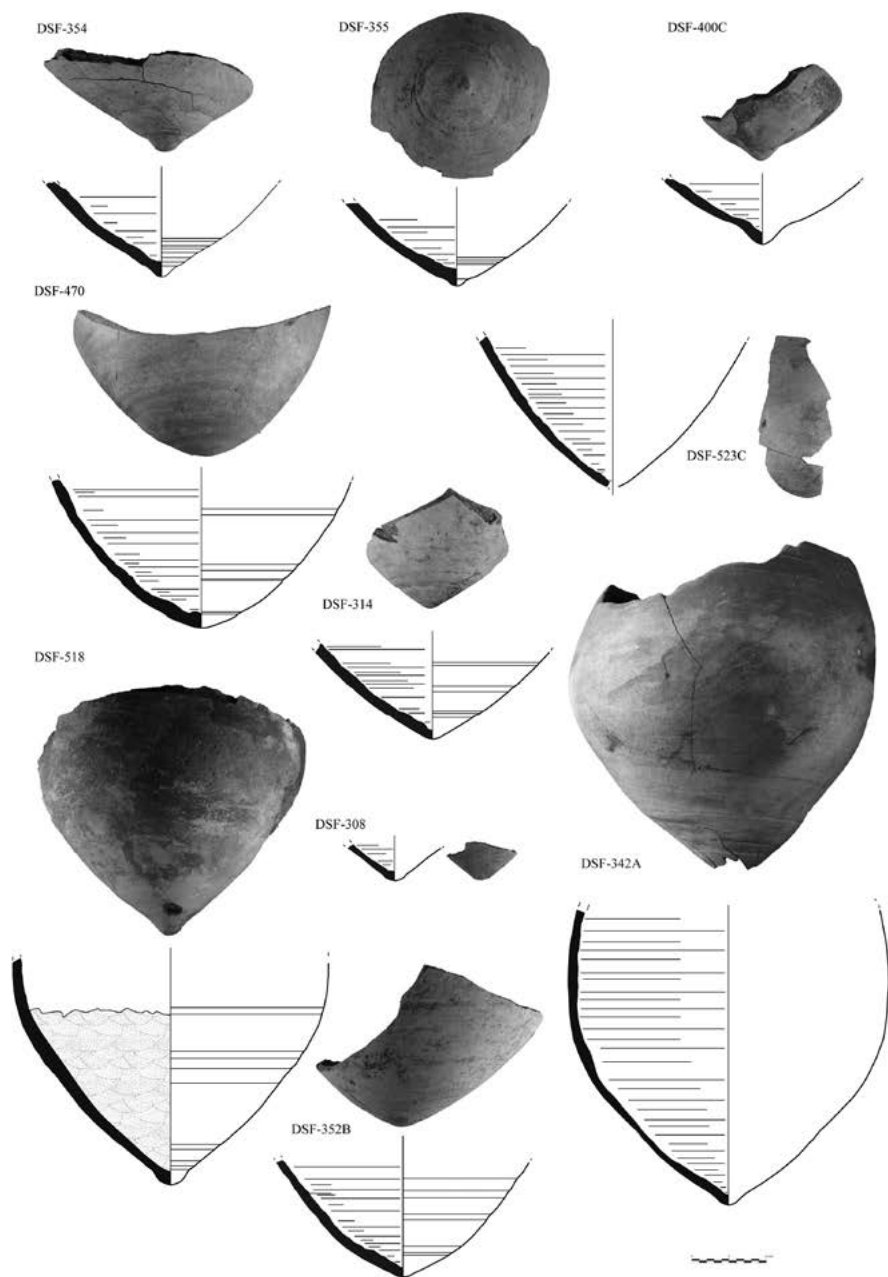


Fig. 7. Selección de pivotes de ánforas del tipo Ses Fontanelles I (Imagen: Autores).

140, 111, 114, 147,5, 114 y 121 respectivamente). Es difícil, por tanto, establecer un peso medio estándar para esta forma a tenor de tanta variabilidad, aunque, si realizamos la media aritmética, el contenido estándar de la forma rondaría los 40,72 l.

Respecto a la verificación del contenido de las ánforas, en los primeros trabajos se apostó por un contenido oleario a tenor de dos indicadores (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. b). El primero indirecto, derivado de las variables tipológicas de las ánforas (morfología ovoide de la panza, asas de sección circular y extremo apuntado del fondo), inspiradas en los modelos olearios del Valle del Guadalquivir, cuyo contenido es claramente aceite. A ello también parecía contribuir indirectamente la ausencia de resina visible en los ejemplares de SF I frente a las ánforas vinarias y a las Almagro 51c que sí fueron claramente impermeabilizadas con resina o pez. Y el segundo criterio, directo, fue la ejecución de orgánicos (Cromatografía de Gases / Espectrometría de Masas) en la pieza epónima de esta forma (DSF-002). Este análisis confirmó la elevada presencia de ácido oleico (C_{18:1}) y ácido palmítico (C_{16:0}), entre los ácidos grasos, además del C_{9:0} entre los de cadena corta. El ácido azelaico era el más abundante entre los ácidos dicarboxílicos, y el β- sitosterol estaba presente en trazas (PECCI, 2020, 114). En general, este perfil lipídico sugería un contenido de aceite vegetal, aunque los análisis realizados no han permitido la identificación de los triacilgliceroles (TAGs), por lo que no fue posible confirmar al 100 % que dicho óleo fuera de oliva (PECCI, 2020, 115; CAU *et al.*, e.p. b).

Además, contamos con los *tituli picti*, sobre los que volveremos en los siguientes apartados. En la primera excavación de 2019, ninguna de las SF I proporcionó resto alguno de inscripciones pintadas, lo que resultaba sorprendente considerando que el resto de formas presentaban inscripciones, habiéndonos planteado que quizás al proceder los materiales recuperados del segundo piso, el más expuesto y fragmentado, problemas de conservación explicaran dicha ausencia (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. c). La continuación de la excavación del cargamento en 2021 y 2022 ha cambiado radicalmente dicha percepción inicial, confirmando que las ánforas Ses Fontanelles I tenían inscripciones pintadas en *atramentum* (Fig. 8). En esta sede, nos interesa recalcar únicamente dos aspectos de los *tituli picti*⁷, sobre los cuales volveremos más adelante. El primero es la tipología de las inscripciones, divididas en dos líneas: la primera de ellas alusiva a los agentes comerciales, a través de la fórmula *Alunni et Ausonii NN*, que es la misma conocida y ya identificada en las Almagro 51c (SOLER *et al.*, 2021, 303-

7. Cuestión que está siendo tratada de manera monográfica con el objeto de publicar un artículo sobre las restantes

inscripciones del pecio, encabezado Dr. P. BERNI, que completará el ya publicado (SOLER *et al.*, 2021).

305); y la segunda citando expresamente el contenido del envase, refiriéndose en ambos casos al aceite, pero de diverso tipo *ol(eum) dul(ce)*, con algunas variantes (Fig. 8, DSF- 344A, 475, 479, 493), que parece el mayoritario, y *(oleum) vir(ide)* (Fig. 8, DSF-469, 504). No aparecen inscripciones de carácter ponderal, que sí estaban presentes en las ánforas tanto salsarias como vinarias (SOLER *et al.*, 2021), y que, por otro lado, eran la norma en sus predecesoras las Dressel 20 béticas.

Completando la epigrafía anfórica, cabe indicar la documentación de una serie de marcas sobre la argamasa de hermetización de los tapones, en las que se identificaban tanto elementos nominales como un crismón, y que serán tratadas de manera específica en uno de los apartados de este trabajo.

Por último, conviene mencionar la identificación de restos de una masa viscosa de color blanquecino, saponificada y en relación únicamente con este tipo de ánforas (Figs. 9, 10 y 22). Se trata de productos derivados de la degradación del aceite en medio marino, que se conocen en otros yacimientos como es el caso del pecio alicantino de La Albufereta, cargado con ánforas Dressel 20 (FERNÁNDEZ IZQUIERDO *et al.*, 2017, 105-106, lám. I B). Actualmente, están en fase de estudio arqueométrico, conservándose tanto restos de una sustancia blanca jabonosa como de mineralizaciones amarillentas sobre la misma, de diversa morfología. En cualquier caso, la relación de estas sustancias con materias de carácter oleaginoso es muy probable.

3. ANTES DEL ESTUDIO DE LA EPIGRAFÍA ANFÓRICA DE LAS SF I: TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

Las evidencias de epigrafía anfórica asociadas a las ánforas Ses Fontanelles I se dividen en dos grupos netamente diferenciados. Por un lado, las inscripciones pintadas (*tituli picti*) ya comentadas, siempre en *atramentum* –tinta negra– de las que se han recuperado diecisiete ejemplares legibles asociadas a esta forma⁸, una selección de las cuales hemos ilustrado anteriormente (Fig. 8). Además, durante el desarrollo de la excavación, se pudo constatar que buena parte de las ánforas se encontraban hermetizadas, aún con sus tapones *in situ*, sobre los que se había depositado una capa de fina argamasa⁹ (Figs. 10 y 21). También se pudo constatar que el contexto de enterramiento había provocado procesos de endurecimiento de la arena que tapaba las ánforas, de manera que,

8. DSF-308, 314, 344, 362, 469, 475, 479, 489, 490, 493, 494, 503, 504, 507, 508, 510A, 525.

9. Que tradicionalmente denominamos “puzzolana” en el argot arqueológico cotidiano -por analogías a la materia

prima empleada en la hermetización de las ánforas itálicas del área campana-, sin serlo propiamente ya que no siempre es de origen volcánico.

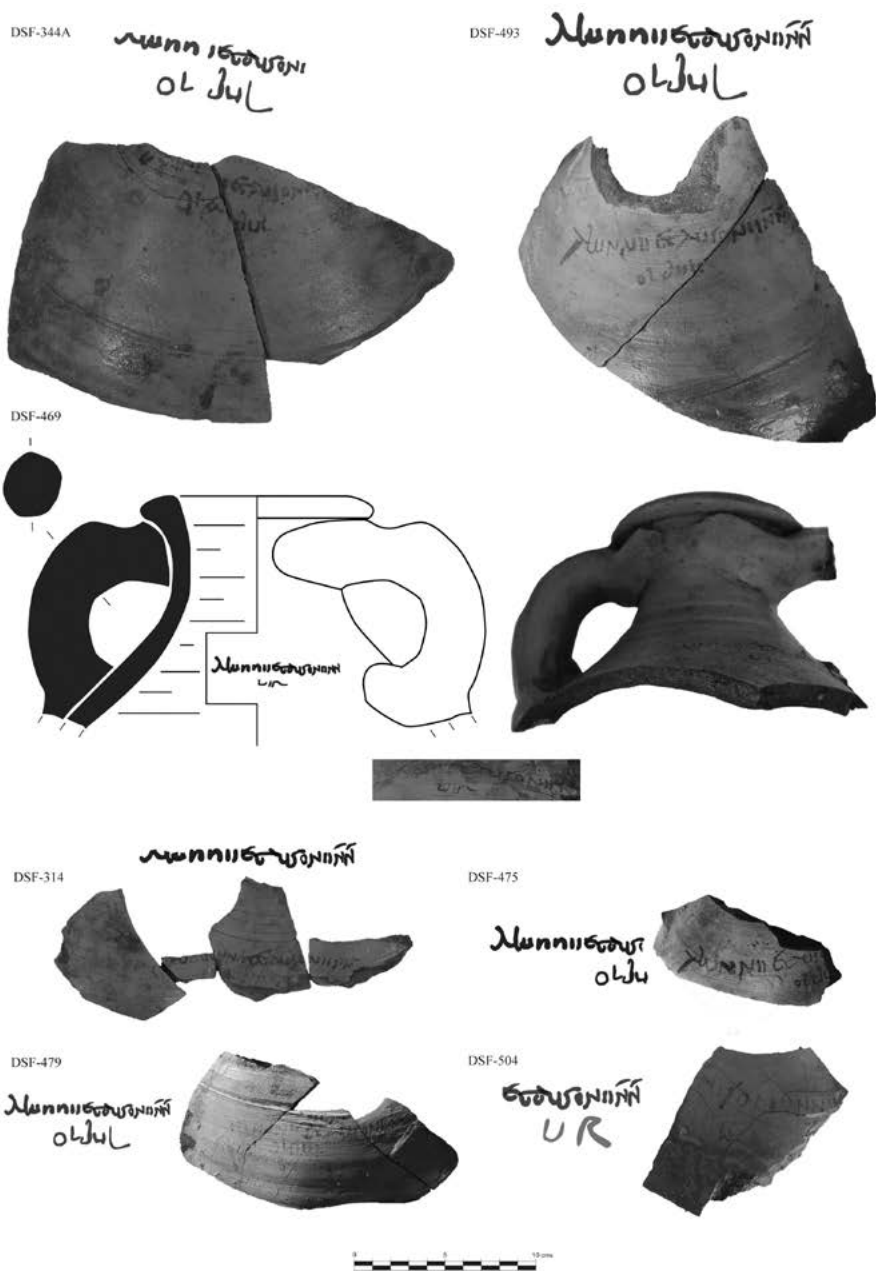


Fig. 8. Selección de tituli picti asociados a las ánforas Ses Fontanelles I (Imagen: Autores).

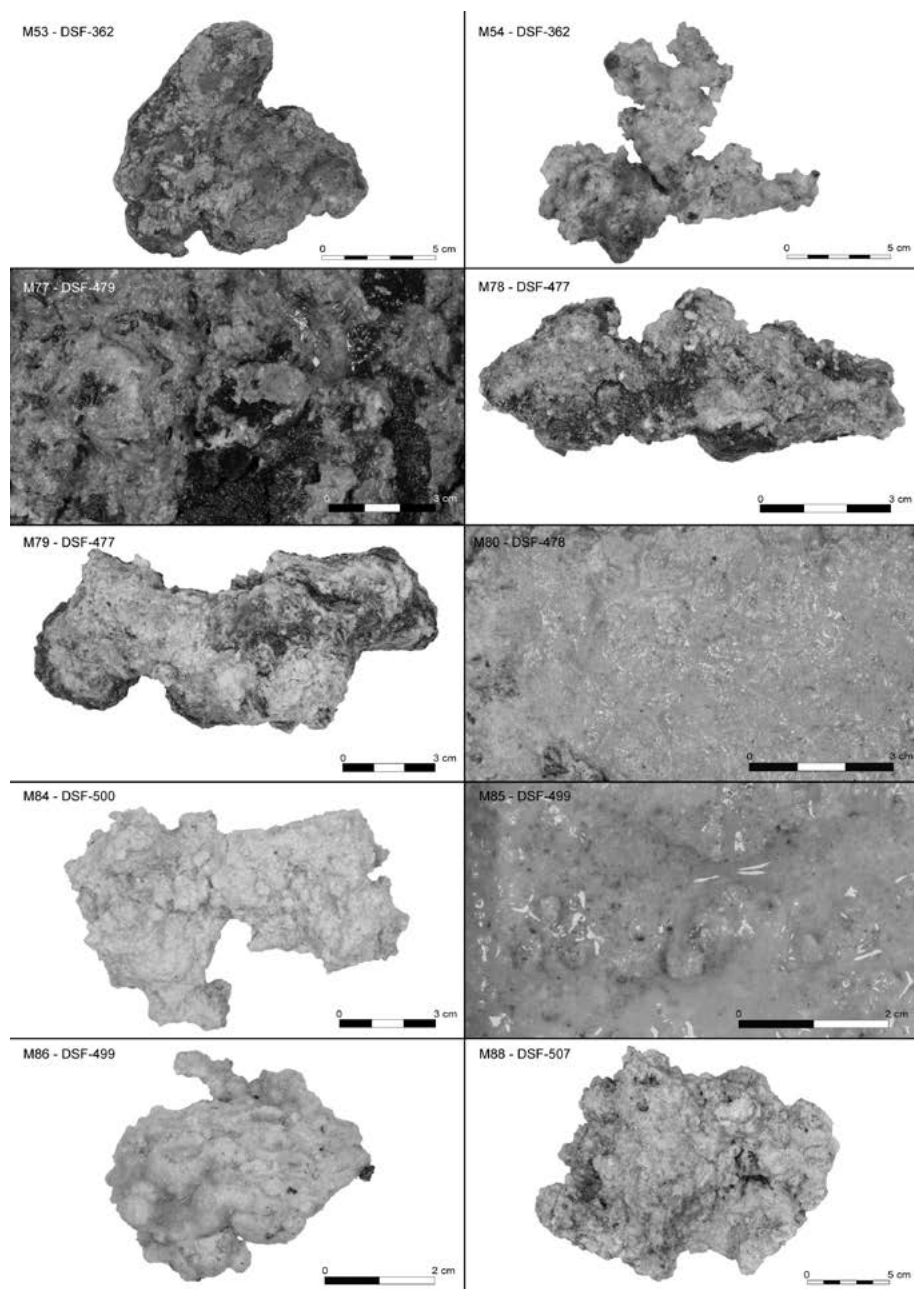


Fig. 9. Restos saponificados relacionados con la descomposición del aceite, documentados en diversas ánforas olearias del tipo SF I (Imagen: Autores).



Fig. 10. Detalle fotogramétrico de la parte central del cargamento *in situ*, donde se aprecian las bocas de algunas SF I con los restos de argamasa y las adherencias de sedimento (Fotografía: Autores).

en algunos casos, como ahora veremos, dicho sedimento compactado había reproducido, en positivo, la grafía que en su momento se grabó en negativo con un *signaculum* al estampar la argamasa en fresco. Es por ello que en este segundo grupo de elementos epigráficos distinguimos entre la argamasa sellada sobre los tapones –mucho peor conservada– y los positivados de dichos sellos conservados gracias al sedimento compactado, mucho más legibles (Fig. 11). Ambos grupos de epígrafes tuvieron que ser sometidos a procesos de conservación-restauración para garantizar su preservación¹⁰, que es la razón que da sentido a este epígrafe del artículo.

Los trabajos de conservación han tenido como objetivo principal la consolidación y protección del conjunto de improntas de sellos conservadas en el sedimento solidificado y de los *tituli picti* preservados en las ánforas de aceite denominadas Ses Fontanelles I, procedentes de contexto subacuático. Las medidas de conservación y acondicionamiento dieron comienzo durante

10. Aquellos de menor tamaño (*tituli* en fragmentos de dimensiones inferiores a 40 x 40 cm, la argamasa sellada y los positivados de los sellos) han sido tratados en el LABAP-LECPH (Laboratorio de Arqueología y Prehistoria

– Laboratorio de Estudios y Conservación del Patrimonio Histórico) de la Universidad de Cádiz durante el año 2022 y 2023.

INTERPRETACIÓN DE LA EPIGRAFÍA ANFÓRICA	Nº INVENTARIO	DIMENSIONES L (long. Max) x A (anch. Max) x G (gros, Max)	OBSERVACIONES	PROPUESTA DE INTERVENCIÓN	
Argamasa sellada legible <i>in situ</i> , sobre opérculo	DSF-476 (M-73)	7'68 x 7'68 x 2cm	Tapón de corcho o madera con restos de argamasa. Se aprecian detalles del sello original	Consolidación	
Positivado de sello en sedimento compactado <i>in situ</i> , sobre opérculo	DSF-405 (M-33)	5'9 x 5'9 x 3'4cm	Tapón de corcho o madera con restos de argamasa. No se aprecia sello conservado		
	DSF-504 (M-87)	6'1 x 6'1 x 1'6cm	Tapón de corcho o madera conservado solo la mitad con restos de argamasa. No se aprecia sello conservado		
	DSF-522 (M-100)	6'98 x 6'98 x 2'98cm	Tapón de corcho o madera con restos de argamasa. No se aprecia sello conservado		
	DSF-469 (M-74)	7'99 x 8'05 x 2cm	Fragmentado en tres partes. Se conserva sello con crismón central y epígrafes en los bordes		Consolidación y unión de fragmentos
	DSF-507 (M-89)	8'4 x 6'5 x 2'9cm	Apenas se conservan detalles del sello		Consolidación
Positivado de sello en sedimento compactado, en posición secundaria	DSF-487	11'2 x 8'9 x 5'3cm	Se conserva el sello completo con pérdida de detalle en algunos de los epígrafes	Consolidación	
	DSF-521	12'85 x 1'1 x 7cm	Se conserva el sello casi completo, con elementos muy erosionados. Posiblemente asociado a siete SF I (DSF-117)		
	DSF-523	15'31 x 11'45 x 6'2cm	Se conserva el 40 % aprox. del sello con elementos muy erosionados. Asociado a un fondo de SF I y a un tercio superior de Almagro 51c		
	DSF-568	8'1 x 7'4 x 2cm	Apenas se conservan detalles del sello		
	DSF-569	8'66 x 6'68 x 2'81cm	No se conservan detalles del sello		

Fig. 11. Elementos conservados del sistema de sellado de ánforas tipo Ses Fontanelles I formado por sedimento con detalles de sello, tapones de corcho o madera y restos de argamasa (Tabla: Autores).

la campaña de excavación a finales de 2021. A medida que estos elementos fueron recuperados del yacimiento se realizaron las primeras tareas de acondicionamiento y documentación por parte del equipo de conservación y arqueología. Para asegurar la estabilidad de este conjunto, se almacenaron de manera individual en recipientes herméticos y se dio comienzo al tratamiento de desalación. En esta fase, se llevó a cabo una primera evaluación del estado de conservación, confirmándose la fragilidad tanto del conjunto de improntas de sellos conservadas en sedimento del propio yacimiento compactado como de los *tituli picti*, siendo esta última categoría la que presenta peor resistencia mecánica y cohesión de la pasta. Durante esta fase también se realizó un proceso preliminar de documentación gráfica de todo el conjunto.

Para su traslado hasta la Universidad de Cádiz se acondicionaron todos los elementos de manera individual, conservando una pequeña cantidad de agua que permitiese su conservación en húmedo durante todo el trayecto y mediante el empleo de materiales de embalaje para evitar el movimiento. A su llegada al laboratorio, se realizó la documentación previa a los tratamientos y se acondicionaron los materiales en baños acuosos para continuar con los tratamientos de desalación. Durante este proceso, que ha durado meses, se llevaron a cabo los estudios previos y el diagnóstico del estado de conservación con el objetivo de establecer una propuesta de intervención. Una vez finalizado el tratamiento de desalación, y tras realizar unas primeras pruebas de secado, se estableció el secado controlado a temperatura ambiente como mejor opción para los sellos y cerámica con *tituli picti*.

La documentación fotográfica de la epigrafía anfórica se ha implementado con métodos fotogramétricos que permiten documentar detalles superficiales menos visibles a simple vista (*Fig. 12*). Esta metodología, junto a otras como la *Reflectance Transformation Imaging* (RTI), han sido empleadas en la última década para el estudio de sellos y marcas en diversos materiales (ALTARATZ *et al.*, 2019; CARRERO-PAZOS y ESPINOSA-ESPINOSA, 2018; FERNÁNDEZ-TUDELA *et al.*, 2022; LECH *et al.*, 2021; SOLEM y NAU, 2020; TORREGROSA-FUENTES *et al.*, 2018). Además, los datos obtenidos se pueden trabajar posteriormente con diferentes programas informáticos para obtener información adicional como la comparativa entre diferentes marcas de un mismo sello a través de software de procesamiento de nubes de puntos o la reconstrucción del sello original a través del modelado 3D.

En el caso de las improntas de sellos conservadas en restos de sedimento compactado el objetivo fue evaluar la resistencia mecánica de estos elementos y la eficacia de posibles productos de consolidación. Como ya hemos indicado,

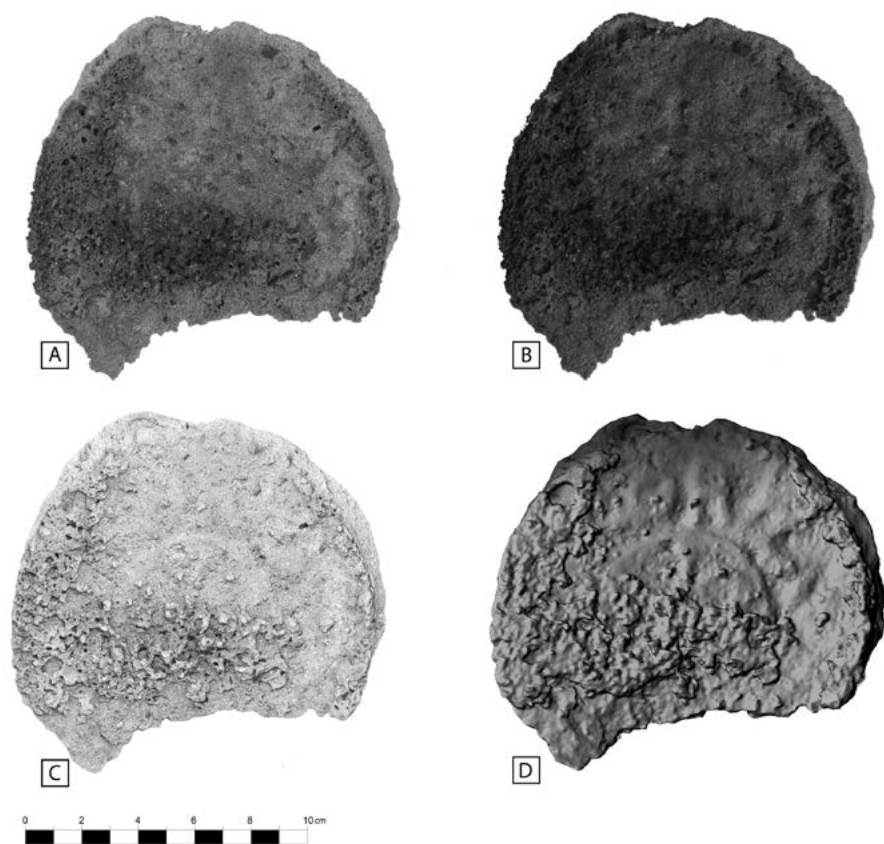


Fig. 12. Operculum del ánfora DSF-476 (M-73) bajo diferentes modos de visualización, donde se pueden apreciar detalles de la impronta del sello: fotografía convencional (A); luz rasante (B); modelo fotogramétrico (C); y MDE a partir de modelo fotogramétrico (D) (Fotografías: Autores).

se conservan un total de siete individuos que conservan detalles procedentes de los sellos originales, cuya morfología es irregular y caprichosa, derivada de los procesos postdeposicionales (Fig. 13, especialmente la DSF-523).

Además de ellos, se conservan numerosos tapones de materia orgánica (corcho o madera), sobre los que se vertió argamasa o mortero para hermetizar el envase antes del transporte. En algunos no se conservan restos legibles de sellado (Fig. 14 A), mientras que en otros sí, aunque muy erosionados, siendo perceptible el círculo concéntrico interior y parte de alguna letra aislada (Fig. 14 B). Da la impresión de que las condiciones de conservación de estas marcas sobre la argamasa son totalmente excepcionales debido a su deficiente conservación postdeposicional, por lo que no es posible saber si todas o solamente una

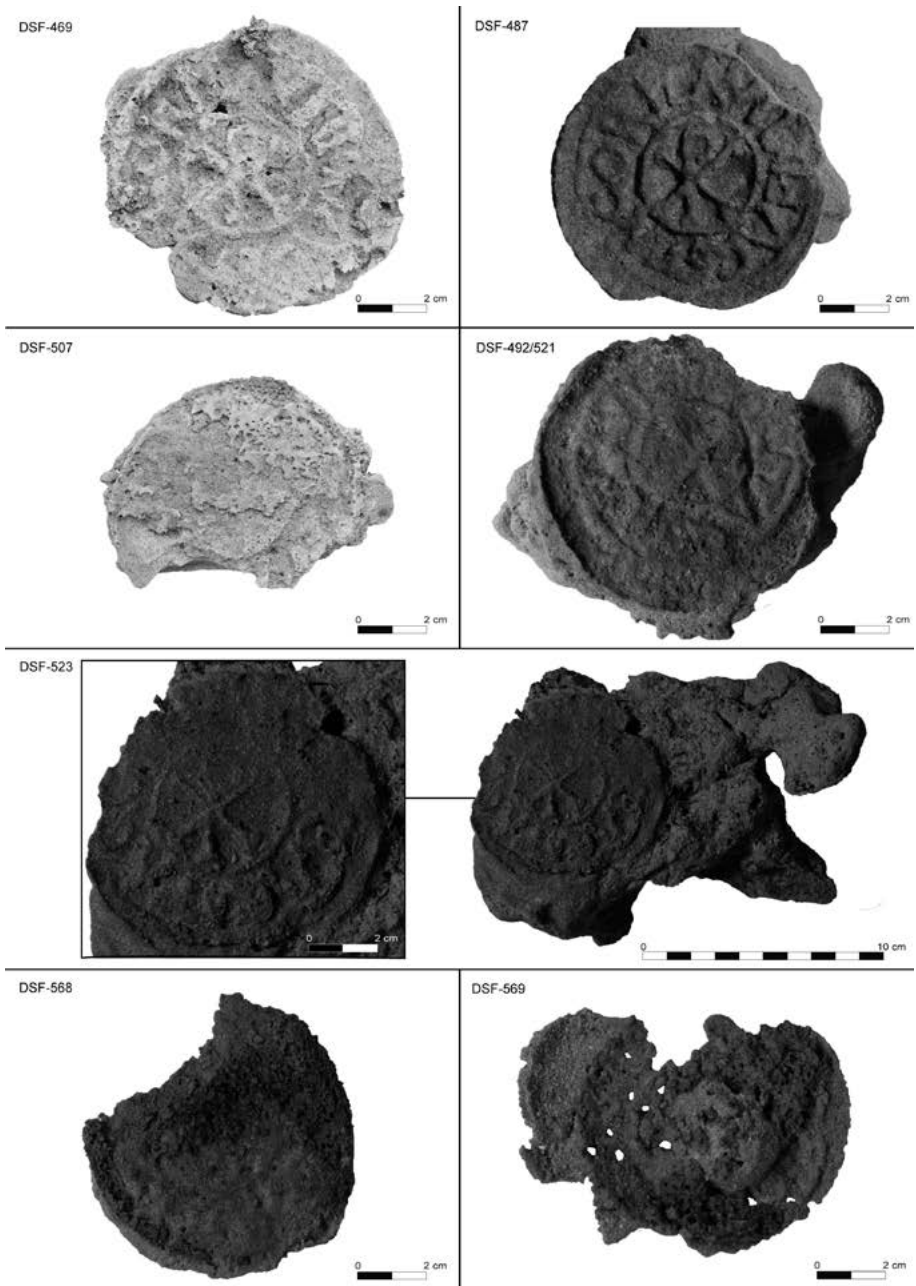


Fig. 13. Detalles de los siete positivos de los sellos en sedimento compactado, donde se puede apreciar su irregularidad trasera (Fotografías: Autores).

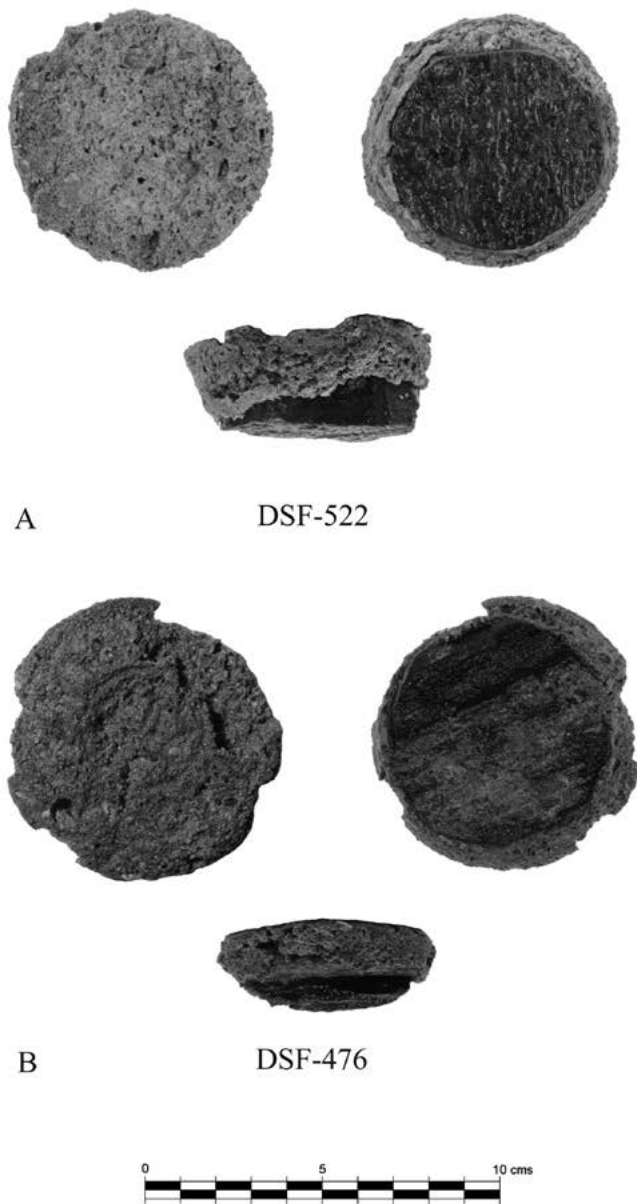


Fig. 14. Tapones cubiertos por argamasa sin restos epigráficos visibles (A.- DSF-522) y con tenues evidencias epigráficas (B.- DSF-476) (Fotografías: Autores).

parte de las ánforas olearias las llevaban. Por último, cabe comentar que queda demostrada la asociación de las marcas sobre los *opercula* y los *tituli picti*, ya que en varias ánforas se conservan restos de ambos registros, especialmente bien legibles en los casos de las DSF-469 y DSF-507 (Fig. 21).

En relación con los procesos de conservación de los sedimentos compactados sellados, estos elementos cuentan con una resistencia estructural óptima. Sin embargo, a nivel superficial presentan disgregación y escasa cohesión de los granos, lo que podría ocasionar la pérdida de detalles del relieve. Por este motivo, se optó por aplicar un consolidante compatible para aportar resistencia. La fase experimental, realizada sobre pequeños fragmentos originales sin detalles del sello, tuvo como objetivo seleccionar tanto el producto consolidante como el método de aplicación. Los productos seleccionados fueron una resina acrílica (Paraloid B-72) y productos a base de silicato de etilo con diferentes características -Nano Estel, Estel 1000 y Estel 1200- (CHEN *et al.*, 2016; GEMELLI *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2013). Tras las pruebas realizadas se seleccionó la resina acrílica, Paraloid B-72 al 10 %, aplicada mediante inmersión como mejor opción (Fig. 15). La eficacia se comprobó mediante el uso de métodos mecánicos que permitieron evaluar la resistencia superficial adquirida (Fig. 16). El Paraloid B-72 es una resina acrílica ampliamente empleada en Patrimonio Histórico y en especial en conservación y restauración arqueológica.

En el caso de los tapones que conservan argamasa o sedimento adherido, se optó por el método acetona-colofonia. Este resulta eficaz en el tratamiento de materiales mixtos orgánicos-inorgánicos, ya que permite consolidar el material orgánico sin afectar al resto de componentes (FOLGUEIRA y SAN CLAUDIO, 2015; GIACHI *et al.*, 2011). El primer paso es impregnar los objetos en el disolvente, en ese caso acetona, y de manera progresiva se añade la colofonia hasta alcanzar la saturación del baño. La colofonia es una resina natural de pino que se introduce en la estructura del material orgánico ocupando el espacio del agua y de los elementos perdidos, aportando la resistencia estructural perdida durante los procesos de alteración del material orgánico.

PARÁMETROS	PARALOID B72	ESTEL 1000	ESTEL 1200	NANO ESTEL
Disolvente	Acetona	White Spirit	Alcohol	Agua
Aplicación (inmersión)	10 %	100 %	100 %	100 %
Peeling test	Resistencia total al arrastre	Resistencia alta	No resistente	Resistencia media
Abrasión mecánica	Resistencia alta	Resistencia media	No resistente	No resistente

Fig. 15. Consolidantes empleados para las pruebas de tratamiento (Tabla: Autores).

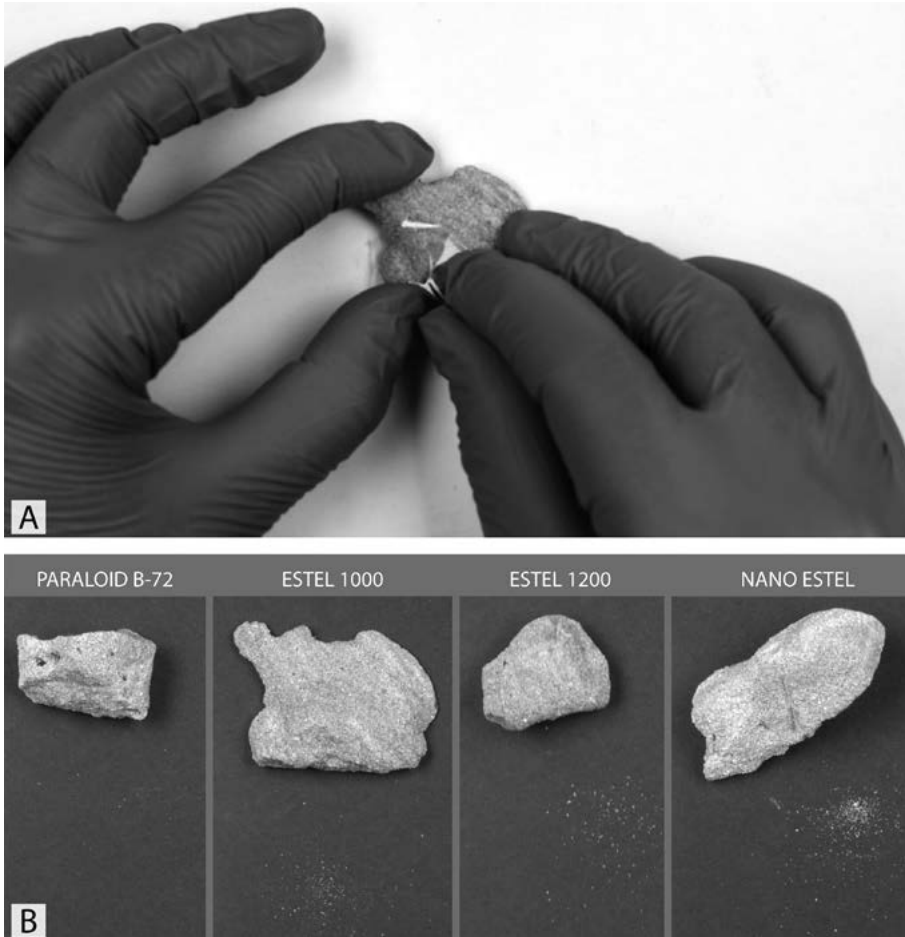


Fig. 16. Ensayos de evaluar de resistencia mecánica de muestras de sedimentos tratadas: *peeling test* (A) y muestras tras la prueba de abrasión superficial donde se aprecia el desprendimiento de material (B) (Fotografías: Autores).

Para la protección de los *tituli picti*, proceso aún en estado de estudio, se ha optado por una metodología similar, a través de la cual se ha comparado la eficacia de dos consolidantes a base de resina acrílica (Paraloid B-72) y nanosilices (Nano Estel) (IBRAHIM *et al.*, 2022; RUFFOLO *et al.*, 2020), ambos compatibles con las materiales constituyentes, cerámica y posible tinta a base de pigmentos vegetales o animales con diferentes aglutinantes que no se conservan tras su alteración (AGUILERA y BERNI, 1998; MARTÍNEZ *et al.*, 1998). Estos *tituli picti* son estables químicamente, pero ofrecen una resistencia mecánica muy baja. El método de aplicación más eficaz en este caso es la impregnación mediante pulverización o el goteo, evitando en todo caso la aplicación mediante

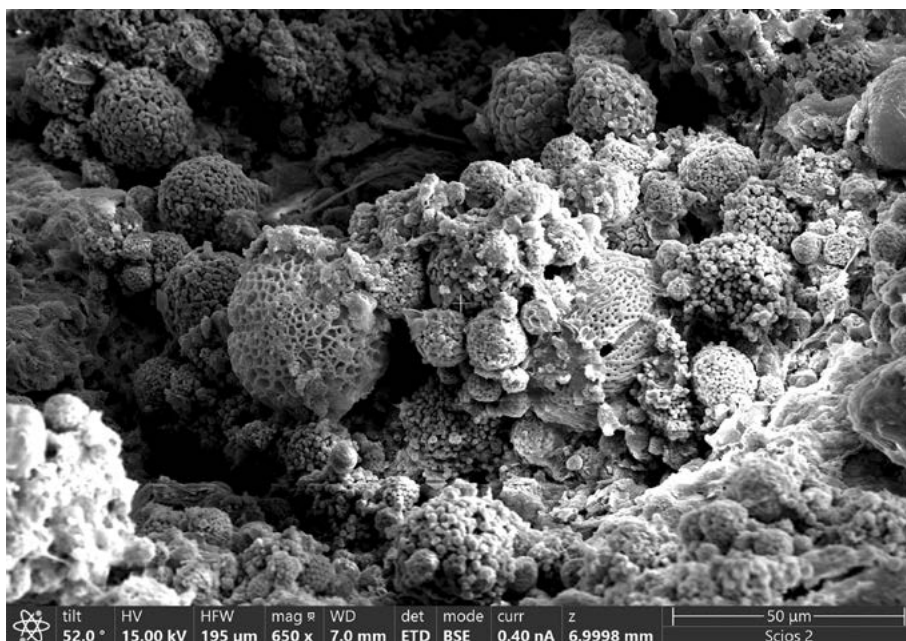


Fig. 17. Imagen de Microscopio electrónico de Barrido de una de las ánforas (DSF-469) donde se observan detalles de la superficie cerámica con elementos de alteración por contaminación del propio yacimiento (agregados esféricos de pirita framboidal) y posibles granos de polen de olivo, junto a la zona final del primer registro del *titulus pictus* (Fotografías: Autores).

brocha para evitar entrar en contacto con los *tituli picti*. Antes de comenzar con los ensayos de eficacia en fragmentos cerámicos de las mismas tipologías (sin *tituli picti*) se realizaron ensayos en muestras sin tratar para identificar las características de dureza y microdureza superficial, color, brillo, la porosidad accesible al agua y resistencia superficial (*peeling test*).

Durante los análisis previos realizados en una de las muestras mediante Microscopio Electrónico de Barrido, se han conseguido identificar algunos detalles relacionados con las alteraciones presentes en las cerámicas y los productos de alteración procedentes del yacimiento, así como algunos aspectos que podrían estar estrechamente relacionados con el producto transportado, el aceite, o con el entorno en el cual se llenaron las ánforas, al tratarse de polen reticulado de olivo (Fig. 17). Actualmente estos mismos ensayos se están llevando a cabo sobre muestras ya tratadas para identificar el consolidante más idóneo.

4. DE LOS *TITULI PICTI* DE LAS ÁNFORAS OLEARIAS: *OLEUM DULCE*, *OLEUM VIRIDE*

Las ánforas olearias Ses Fontanelles I, como ya hemos comentado, son imitaciones de la bien conocida Dressel 23, manufacturada en el interior y en la costa de la Bética (BERNI, 1998, 57-62; BERNI y MOROS, 2012), producidas en la provincia *Carthaginiensis* y comercializadas durante época bajoimperial. Su presencia en el cargamento de la nave junto a otros envases de igual procedencia geográfica (Almagro 51c, ánforas de fondo plano) para diversas clases de contenidos, resulta un hecho muy relevante para la investigación, que marca un punto de referencia histórica al poner de relieve, por primera vez, la economía polivalente de un territorio que resultaba en este sentido muy desconocido.

Como ya hemos indicado, la primera campaña de excavación proporcionó pocos individuos de la forma Ses Fontanelles I, al haberse centrado los trabajos en la extracción del material cerámico depositado en la proa de la embarcación. Pronto, los análisis de contenido ratificaron su empleo para transportar aceite, y el estudio pormenorizado de la cerámica y los rasgos formales confirmaron que, en realidad, se trataba de imitaciones de la homóloga bética bajoimperial de cuerpo “alimonado”, pero fabricada toscamente con toques regionales propios y característicos de los talleres del entorno de *Carthago Spartaria*. La segunda campaña de excavación proporcionó el grueso de los envases olearios, concentrados, como era de esperar, en la parte central del casco de la nave –como luego veremos–, por su mayor peso. Por otro lado, ya conocemos el volumen del ánfora olearia cartaginense (Fig. 4), claramente superior al valor estándar de su homóloga bética, con 31 l de capacidad media (MOLINA y MATEO, 2018, 304). Podemos incluso adelantar, a falta de confirmación, que la forma Ses Fontanelles I parece que ya había sido documentada con anterioridad por un ejemplar completo de la Basílica Paleocristiana de Tarragona, ilustrado por primera vez por Pascual (1964-65, fig. 8.2), nombrado seguidamente como Almagro 55, para finalmente definirse como del tipo Keay XIV: esta forma, conocida solo por una única pieza completa, se dató entre el s. IV y mediados del V (KEAY, 1984, 147), sin evidencia de paralelos en *Hispania*, pero dentro de la amplia familia de variantes olearias tardorromanas de inspiración bética.

Las inscripciones pintadas preservadas en las ánforas olearias Ses Fontanelles I muestran un sistema de etiquetado calcado respecto a las ya publicadas en las Almagro 51c (SOLER *et al.*, 2021). La única diferencia estriba en el nombre del producto envasado (“*liquaminis Flos*”, en las de *garum*), siempre escrito en la segunda línea y con el texto centrado respecto al del renglón superior donde

aparecen los nombres de Alunnio y Ausonio. Este hecho se explicaría por formar parte ambos productos de los lotes de ánforas adquiridos por un posible mismo propietario, lo cual resulta comprensible teniendo en cuenta que fueron ellos a quienes correspondía decidir cómo debían etiquetarse sus ánforas.

Las inscripciones a tinta preservadas sobre los envases olearios aportan otra novedad significativa, puesto que, por primera vez, se constatan varias calidades de aceite en un mismo tipo de ánfora: *oleum dulce* y *oleum viride* (Fig. 8). Alunnio y Ausonio pudieron haber adquirido aceites de diversa calidad con un posible doble propósito que trataremos de justificar en las siguientes líneas. Solamente en dos ejemplares (DSF-469 y 504) tenemos la palabra abreviada “*vir*” de “(*oleum*) *vir(ide)*”, sin la deseable indicación explícita al sustantivo “aceite” a su izquierda. La otra mención se contabiliza en una decena de ejemplares con el texto “*ol(eum) dul(ce)*” abreviado siempre de la misma manera (DSF-344A; DSF-475, DSF-479, DSF-490, DSF-493, DSF-494, DSF-507, DSF-508, DSF-525). No creemos que estas inscripciones abreviadas se refieran a preparados de aceitunas, “*ol(ivae) dul(cis)*” y “(*olivae*) *vir(idis)*”, debiendo, no obstante, tener presente que ambos desarrollos serían lecturas válidas en el contexto de la formulación ambigua utilizada en el etiquetado de estas ánforas. La ausencia generalizada de huesos de aceituna durante las excavaciones, limitada a escasísimos ejemplares, parece reforzar esta idea, ya que si las SF I hubiesen contenido aceitunas en conserva se habrían recuperado a millares. Por otro lado, como ya se ha explicado antes, se han identificado restos de aceite saponificado en forma de masa viscosa de color blanquecino en algunos ejemplares SF I.

A favor del aceite como contenido original tenemos constancia, desde hace poco tiempo, de *tituli picti* alusivos al *oleum dulce* sobre sendos cuellos de ánforas Dressel 23 béticas halladas en el fondeadero de la cala de Aiguablava (Begur), donde los sondeos y excavaciones del CASC han documentado un total de siete yacimientos de diferentes épocas. Este material en concreto pertenece al pecio tardorromano Aiguablava V, yacimiento con un cargamento mixto de ánforas africanas, béticas y orientales (VIVAR y GELL, 2015). Las dos inscripciones han sido recientemente publicadas con un detallado estudio (MAYORAL *et al.*, 2022). En una de ellas se lee claramente “*oleu(m) dulce*” con una etiqueta en tinta negra y una paleografía evolucionada y pareja a nuestras inscripciones en *atramentum* de Ses Fontanelles. El otro individuo tiene escrito en tinta roja dos letras capitales OD, enmarcadas posiblemente en un recuadro, que los autores desarrollan con coherencia como “*O(leum) D(ulce)*”, para registrar de manera alternativa el mismo contenido con las siglas.

No obstante, también se sabe por antiguos hallazgos de Roma estudiados por Dressel que las ánforas Dressel 23 podían transportar olivas como contenido alternativo. Dos pequeñas ánforas de la forma 23 de Dressel halladas en el Esquilino tenían registrado en el vientre la inscripción “*olivas / colombares*”, con letras grandes realizadas en *rubrum* o tinta roja (CIL XV 4803). PLINIO (N.H, XV, 4) describe quince clases de aceitunas, entre ellas las *colymbades*, que se ponían a remojo solas, bañadas en salmuera, sin ningún otro aditamento. Llama la atención la paleografía de los *tituli* que se asemeja más al tipo de escritura capital clásica que a las letras evolucionadas de la epigrafía anfórica hispana del s. IV en adelante. Este detalle podría llevar a pensar en la reutilización de los recipientes hispanos para almacenar preparados de aceitunas elaboradas en el mercado de consumo, lo que, de ser cierto, desligaría la naturaleza del producto con la provincia de origen de las ánforas. Por otro lado, otra ánfora pequeña de la misma forma, posiblemente también del Esquilino, con transcripción, pero sin dibujo, tenía escrita con letras grandes en *rubrum* su contenido a base de aceitunas, que Dressel leyó con ciertas dudas como “*olivas / sallitas*” (CIL XV 4804).

El aceite hispano corriente destinado a la alimentación ocupó la mayor parte de la producción durante época imperial, con la Dressel 20 bética del *Monte Testaccio* como principal contenedor de transporte (RODRÍGUEZ ALMEIDA, 1984). Esta ánfora estuvo fuertemente etiquetada bajo el control de la administración imperial, al tratarse de un producto estratégico para el Estado romano, como es bien conocido. Sin embargo, el famoso envase globular carece en su compleja titulación de la mención explícita al aceite de oliva y sin ningún atributo que describa la calidad, por lo que fue, probablemente, un aceite común u ordinario adecuado para la comida, elaborado con el uso de aceitunas ya maduras o caídas del árbol, recogidas entre enero y marzo. PLINIO EL VIEJO (N.H, XV, 8) estableció una jerarquía de los aceites de mejor calidad, situando el aceite bético en segundo lugar, tras el original de la región de Venafro, y en disputa muy reñida con el proveniente de *Histria* en el Adriático, colocando después de estos el de suelo africano. A estas tres zonas productoras, Venafro, *Histria* y Córdoba, aludía en la misma época MARCIAL (Ep. XII 63, 1 y 98, 1-3). Cabe pensar, pues, que la Dressel 20 transportase *oleum cibarium*, de sabor un tanto acre, barato y el de mayor consumo, que no podía conservarse más de un año. Este aceite estándar de calidad se destinaba a la preparación en la cocina de platos elaborados y fritos. APICIO (*De Re Coquinaria*, I, 4), el famoso gastrónomo romano del s. I d. C., dedica una de sus recetas a explicar cómo falsificar el *oleum liburnicum* de la *Dalmacia* romana si se agregaban hierbas aromáticas al llamado *oleum*

spanum. Por debajo en calidad y precio se encontraba el *oleum maturum*, usado por las clases menos pudientes para cocinar y conservar alimentos, o incluso empleado como combustible para lámparas. Cabe suponer que el aceite bético de calidad superior se comercializara durante época imperial en envases de igual forma, pero de capacidad inferior, la llamada Dressel 20 *parva* (BERNI, 1998, 36), que, por desgracia, no se han encontrado en el vertedero annonario de Roma, por lo que resulta muy difícil poder dar con algún ejemplar escrito para cotejar esta hipótesis, que consideramos razonable. Por consiguiente, cabe preguntarse si las Dressel 20 *parvae* que acompañan a las Dressel 20 grandes en el cargamento del pecio de Cabrera III –ca. 257 d. C. – (BOST *et al.*, 1992) estuvieron destinadas a la venta del aceite bético más caro.

La construcción de las murallas aurelianas (271-275 d. C.) puso fin al complejo de *borrea* levantado a espaldas de la *Porticus Aemilia* y, por consiguiente, al abandono del *Monte Testaccio* (AGUILERA, 2002). Debido a este hecho histórico, carecemos de documentos epigráficos sobre el sistema de etiquetado del ánfora Dressel 23, que reemplazó a la Dressel 20 altoimperial a partir de finales del s. III d. C. (BERNI, 1998, 55). Desconocemos la razón del nuevo paradigma económico que consistió en particionar el módulo mayor estándar por otro equivalente, pero de capacidad inferior (Dressel 20 = 76 l; Dressel 23 = 31 l; Tejarillo I = 16 l; véase MOLINA y MATEO, 2018). Aunque carecemos de datos para tal afirmación, la rigurosa titulación de la Dressel 20 pudo haber sido sustituida por otro etiquetaje más simple y menos preciso a ojos de la administración romana, con la adopción de la Dressel 23 junto a la Tejarillo I. Hasta la fecha, las pocas inscripciones pintadas que nos han llegado en circunstancias excepcionales solamente registran referencias a dos tipos de aceites de oliva de calidad especial y sin rastro por escrito sobre el aceite estándar que dio larga fama a la Bética.

El *oleum viride* del ánfora de Ses Fontanelles sería hoy etiquetado como aceite de oliva virgen extra, elaborado con las aceitunas sanas cuando apenas están iniciando su proceso de maduración, lo que hace que su jugo tenga un color verdoso y que su sabor sea más amargo y afrutado. En tiempos de los romanos se preparaba en diciembre con las aceitunas de color cambiante, cuando empiezan a envejecer, proporcionando aceite con sabor más suave, pues cuanto más madura la aceituna más grasiento y menos agradable es el aceite al paladar (PLINIO, N.H. XV, 2). Para COLUMELA (*De Re Rustica*, XII, 52) el verde era el más rentable por producirse en grandes cantidades y venderse más caro. En la cocina de APICIO aparecen dos adjetivos calificando el aceite, *purum* y *viridem*, pero el sentido de “aceite verde” está más cerca de “aceite recién

exprimido” que en el sentido estricto de un “aceite fresco”: “Echas en aceite las aceitunas tomadas del árbol, y estarán en el momento que quieras tal como si recién arrancadas del árbol. De estas, si quisieras, harás aceite verde” (*De Re Coquinaria*, I, 28). De la primera y muy ligera presión se obtenía *olei flos*¹¹, y a partir de una segunda y más intensa presión se obtenía *oleum sequens*.

Por otro lado, el *oleum dulce* carece de referencias en las fuentes de los agrónomos clásicos. PLINIO (N.H., XV, 4) incluye entre sus quince clases de aceitunas las “dulzonas”, que secas resultan más dulces que las uvas pasas. En el Edicto sobre Precios Máximos del año 301, promulgado por el emperador Diocleciano, se fija el coste en denarios del aceite de aceitunas no maduras o verdes (40 denarios por sextario itálico = 0,547 l), del aceite de segunda calidad (24 denarios por sextario), del común u ordinario (12 denarios por sextario) y del aceite de rábano (8 denarios por sextario).

Por los motivos que exponemos a continuación, tomando la cultura moderna, creemos que puede tratarse de un aceite de oliva virgen de calidad, pero expresado con otro adjetivo en las ánforas por sus propiedades organolépticas de sabor y olor. En la cultura actual del olivar, el término dulce se asocia al gusto y al olor, en contraposición al aceite acre dotado de un olor y sabor más fuertes (MONTORO DEL ARCO, 2021). Se trata pues de una especie de aceite virgen de calidad que se extrae por simple presión y sin ayuda de agua hirviendo. En las primeras ediciones del DRAE del s. XIX (s.v. aceite) el virgen obtiene el apelativo latino de *oleum purissimum*. Dentro de los aceites superfinos o vírgenes de la *Vierge de Aix*, el aceite comercial de primera calidad es verdoso, de sabor dulce y olor poco pronunciado (MORELL Y TERRY, 1889, 39). Cabe pues asociar este término a un aceite de calidad, junto a las propiedades organolépticas de sabor y olor, o del grado de acidez. De este modo, su sabor se distingue del acre, fuerte, y rancio, y su olor es de aceituna fresca, por su extrema finura y exquisito gusto, lo que trae de nuevo a colación el testimonio de Columela con relación al *oleum viride*, el más reputado en el s. I entre los romanos.

Con la información analizada hasta ahora queda demostrado el empleo del vocablo *oleum dulce* en producciones de Dressel 23 bética y cartaginense circunscritas a un fenómeno económico de sumo interés para época cristiana temprana. Cabe además tener en cuenta que los ejemplares de Ses Fontanelles estaban precintados con un tapón impreso con el motivo del crismón (*Fig. 13*), por

11. Esta calidad de aceite aparece indicada sobre ánfora en dos Dressel 6B con las inscripciones “olei Histr(ici) / flos” y “olei flos” halladas en el Magdalensberg (MAIER-MAIER, 1992, 120), además de otras de la misma tipología con el

apelativo de olei flos: “Olei Histr(ici) flos] / p(lena) p(ondo) C[---]”, “Olei Praet[uttiani] flos] / p(lena)-p(ondo) [---] / C(ai) Aemili N[---]”; además de otro ejemplar con la constatación de “Olei-cib(arii)-P(ondo)[---]” (Piccottini, 2000-01).

lo que este tipo especial de aceite podría haber tenido una finalidad religiosa. Los testimonios hispanos aludidos son los únicos que conocemos sobre ánfora para las provincias romanas de Occidente, pero no son una excepción, pues el aceite dulce también está presente en otras ánforas de la vertiente oriental del Mediterráneo, con un valor religioso mucho más claro, aunque, eso sí, para un período histórico diferente al nuestro, ya en pleno s. VI d. C. Se trata de inscripciones cristianas en griego con un fuerte valor simbólico religioso, escritas en tinta negra o roja sobre ánforas de diferentes tipos. Destaca la Late Roman Amphora 2 con amplias áreas de producción repartidas en el Egeo y las regiones del Mar Negro (PEACOCK y WILLIAMS, 1986, forma 43).

Los textos en griego de las inscripciones orientales son variados y, mayoritariamente, se datan por la paleografía en el s. VI (DERDA, 1992). Contienen alusiones cristianas de carácter religioso, números de significado incierto, y a veces un nombre con la referencia de la iglesia o monasterio donde se llenó el ánfora, cuyo producto se menciona más adelante. Las ánforas aparecen normalmente etiquetadas con un producto en singular “aceite dulce”, con algunas excepciones, “aceite mezclado con sal”, “aceite salado” y “aceite sagrado” con claro propósito ritual. Por otro lado, la mención “aceite sagrado dulce” aparece en un ánfora hallada en *Sucidava* en el Danubio –Rumanía– (DERDA, 1992, 138, nota 21). Al parecer, estos aceites habrían sido producidos en haciendas pertenecientes a monasterios (o iglesias), siendo allí donde se escribieron las etiquetas pintadas en los cuellos de las ánforas, lo que explicaría el carácter religioso de la primera parte de los textos presente en todas las inscripciones.

Llegados a este punto, parece plausible plantear que las ánforas olearias de Ses Fontanelles transportaron, como mínimo, dos tipos de aceites vírgenes de primera calidad y aptos para el consumo: *oleum viride* para uso alimentario directo y *oleum dulce*, quizás para algún tipo de práctica religiosa cristiana. Los tapones de mortero de cal con el símbolo del cristograma precintaban ambos tipos de envases olearios. El monograma de Cristo sobre ánforas olearias producidas en la Cartaginense es un hecho novedoso que merece un análisis más detallado y profundo. Pero este símbolo también lo tenemos documentado en *tituli picti* de color rojo sobre el cuello y vientre de dos ánforas Dressel 23 que nos han llegado de las antiguas colecciones de Roma (CIL XV 4885 y 4888).

Entre los posibles usos religiosos del “aceite santo” para tener en cuenta se incluyen la unción y la iluminación de lámparas (LEJAVITZER, 2016). Los hebreos utilizaban el aceite más puro para alimentar el candelabro sagrado, la *menorah*: «manda a los hijos de Israel que traigan el aceite más puro de los árboles de las olivas [...] para que siempre arda la lucerna (Éxodo, 27, 20); “Manda a los hijos

de Israel a que te traigan aceite purísimo de oliva y luminoso para que siempre estén encendidas las lámparas” (Levítico, 24, 2-4). El cristianismo hizo suyas estas prácticas hebraicas, al simbolizar el aceite de oliva la gracia divina, la gloria, la purificación y la abundancia. El aceite consagrado se utilizó en las lucernas para alumbrar santos y mártires en los templos, así como en los sacramentos de la ordenación sacerdotal, la unción de los enfermos y en el bautismo.

5. DE LAS MARCAS EN LOS TAPONES: CRISMONES Y ELEMENTOS ONOMÁSTICOS DE LA *GENS FLAVIA*

El hallazgo más novedoso de la última campaña de excavación del pecio de Ses Fontanelles ha sido el conjunto de tapones sellados y de improntas de estos con el motivo del crismón en las bocas de las ánforas olearias de origen cartaginense (Fig. 13). El monograma de Cristo, formado por las letras griegas *chi* (X) y *rho* (P), ha servido adicionalmente para corroborar la datación *post quem* del hundimiento: es en el año 312 tras la victoria de Constantino en la batalla de Puente Milvio, cuando se asume el crismón como símbolo constantiniano en monedas y estandartes romanos (BRUUN, 1962; EUS., VC, II, 6, 2). El uso oficial del crismón como atributo de propaganda política y militar quedó consolidado con el Edicto de Milán del año 313 d. C., cuando los emperadores Licinio y Constantino establecieron la “tolerancia del cristianismo” en el Imperio Romano. El crismón en los tapones de ánforas respondería, por tanto, a la explosión iconográfica del monograma de Cristo en pleno s. IV d. C., la etapa de apogeo e impulso definitivo del cristianismo sobre la sociedad romana, expresada en la cultura material a través de la epigrafía en diferentes soportes (estandartes militares, monedas, pintura mural, mosaicos, sarcófagos y objetos cotidianos).

Al conocido uso que los cristianos hicieron de este símbolo, por ejemplo, en contextos funerario y doméstico, cabe también añadir el comercio de alimentos con un trasfondo religioso, sobre lo cual se han escrito algunos trabajos previos, a los que remitimos para el contexto general de la implicación de las autoridades eclesiásticas en la producción y comercio de aceites, vinos y productos haliéuticos, que se encuentra especialmente bien documentado en ámbito norteafricano y en la *Pars Orientis* (BERNAL-CASASOLA, 2010). La costumbre de sellar tapones de ánfora con el sagrado monograma, o incluso una cruz, está bien constatada durante el período bizantino inicial en Egipto y en diversos contextos del norte de África tunecino (THOMAS, 2018). Los tapones se usaban comúnmente en ánforas de vino y se relacionan con comunidades monásticas y cristianas. El motivo central aparece habitualmente rodeado por una inscripción

circular en latín con el texto “*Spes in Deo*” (esperanza en Dios), así como otras expresiones de carácter religioso escritas en griego.

La costumbre de precintar las bocas de las ánforas romanas con tapones sellados se conoce por el material arqueológico desde época tardorrepblicana. La mayor parte de los tapones publicados pertenecen a ánforas del sur de Italia y la razón de su conservación se debe al empleo de la ya citada puzolana (*pulvis puteolanus*; PLIN., N.H, IX, 25) y a las propiedades hidráulicas de este polvo volcánico que, mezclado con cal y arena, resultaba resistente al agua. Las ánforas hispanas se taponaron con mortero de cal, una sustancia de gran dureza a corto plazo, siendo raros los ejemplares que han sobrevivido intactos en los yacimientos terrestres y subacuáticos. La técnica de taponamiento se llevaba a cabo con el soporte de tapaderas de cerámica (*opercula*) realizadas bien *ex profeso* bien recortando y reutilizando fragmentos cerámicos (BERNAL-CASASOLA y SÁEZ, 2008), aunque también se utilizaba como sucede en Ses Fontanelles la madera o el corcho, sobre los que se vertía la capa terrosa con mortero o cal que al secarse quedaba fuertemente adherida en el interior de la boca del ánfora (BERNI y GOROSTIDI, 2013, 175 y fig. 4). El objeto marcador podía estar fabricado en madera con el sello en semicírculo (DJAOU, 2011), o con un disco de plomo en círculo completo adherido a un mango de madera (BERNI y GOROSTIDI, 2013, 177 y fig. 6). De este modo, la mercancía quedaba protegida y se garantizaba su envío al punto de destino. Cuando aparecen escritas indicaciones onomásticas, estas se vinculan a los comerciantes relacionados con la venta del ánfora (HESNARD y GIANFROTTA, 1989; BERNI y GOROSTIDI, 2013). Los tapones de las ánforas itálicas llevaban normalmente inscripciones en relieve que producían matrices con las letras huecas. Los sellos de los tapones itálicos en puzolana se ordenan en tres categorías (HESNARD y GIANFROTTA, 1989, 395): los que contienen solo nombres, los que contienen un motivo y los que combinan letras y motivos. Los sellos de Ses Fontanelles encajan en la tercera clasificación, dando continuidad a una antigua tradición romana en el Bajo Imperio.

Como ya sabemos, en total se han recuperado siete positivados legibles de los tapones sellados, ya comentados en el apartado precedente (*Figs. 11 y 13*), todos muy similares entre sí y con la misma impronta en relieve, pero con diferentes estados de conservación. Como se ha indicado, estos tapones sellados aparecieron incrustados únicamente en las bocas de las ánforas de aceite, y, como ya hemos señalado, asociados tanto a los envases etiquetados con *oleum dulce* (aceite especial, quizás consagrado para el culto cristiano), como a los sellados junto al rótulo *oleum viride* (destinado al consumo gastronómico).

La matriz original tuvo forma discoidal con las letras y el motivo figurado grabadas en negativo y separados entre dos círculos concéntricos¹². El campo epigráfico ocupaba la mayor parte del anverso, con la inscripción nominal de lectura inversa y en sentido horario. El anillo interior contiene el símbolo del crismón formado por la unión de la X (*chi*) y P (*rbo*)¹³, quedando la cabeza de la P alineada con la letra A del gentilicio FLAVI en el texto del anillo exterior. Como resultado del sellado, tenemos en los tapones la huella inversa con letras capitales cuadradas en negativo, orientadas en sentido horario y envolviendo el símbolo cristiano.

El campo epigráfico no se encuentra subdividido por signos de interpunción. Aun así, la fórmula de la inscripción circular es clara, y registra una sociedad familiar constituida por dos miembros de la *gens Flavia*. La única dificultad nos viene dada por el mal estado de conservación de las letras¹⁴ que forman el *cognomen* abreviado del primer individuo. En consecuencia, la transcripción diplomática y la propuesta de lectura que resulta más viable en el estado actual de la investigación es la siguiente (*Fig. 18*):

FLAVI +İBAC ET ACOR
Flavi(orum) +İbaç(--) et Acor(isti)

El texto problemático +İBAC del primer *cognomen* no se conserva en buen estado en todos los tapones, solamente la letra “A” es segura a la vista, por lo que resulta difícil ofrecer una lectura concluyente. Las letras del segundo personaje se distinguen con claridad juntando todos los tapones, de modo que el nombre abreviado se puede desarrollar sin problemas como *Acor(isti)*. El nombre *Acoristus*, o la forma más común *Achoristus*, es de origen griego y se reitera entre esclavos y libertos (SOLIN, 1982, 1274). El único paralelo onomástico hispano que conocemos viene de una estela funeraria con epitafio, datada entre finales del s. II y comienzos del III d. C., hallada en la colonia romana de *Salaria* (Úbeda la Vieja, Jaén) del *Conventus Carthaginensis* (GONZÁLEZ ROMÁN, 1991, IV). En conformidad con la naturaleza servil del segundo nombre es lícito pensar en una *societas* formada por dos libertos.

El nombre *Flavius* resulta de la expansión en la onomástica personal de los llamados *nomina* imperiales, siendo el gentilicio de la dinastía de Constantino, con una notable pervivencia hispana en el período tardoantiguo (ss. IV-VI d. C.),

12. Las medidas del diámetro exterior oscilan entre los 6,3 (DSF-523), 6,5 (DSF-469), 6,68 (DSF-569), 6,99 (487, 521), 7,1 (DSF-507) y 7,6 cm (DSF-568); y las del diámetro inferior entre los 3,3 (DSF-568), 3,4 (DSF-507), 3,45 (DSF-487), 3,48 (DSF-521), 3,5 (DSF-523) y 3,7 cm (DSF-469).

13. Cuyas dimensiones lineales oscilan entre los 2,65 (DSF-523), 2,75 (DSF-521), 2,9 (DSF-469) y 2,91 (DSF-487).

14. De tamaño similar, entre 1,13 (DSF-523), 1,14 (DSF-469), 1,24 (DSF-487), 1,29 (DSF-521) y 1,3 cm (DSF-568).



Fig. 18. Detalle de la parte epigráfica de dos de los positivados accidentales de la inscripción sobre los taponos (A.-DSF-487 y DSF-523), y dibujo interpretativo de su posible lectura (B) (Fotografías y dibujo: Autores).

principalmente en la Bética y Tarraconense (GALLEGO FRANCO, 2001a; 2001b; 2001c). En las fuentes epigráficas hispanas de carácter paleocristiano el gentilicio se asocia con frecuencia a miembros de las altas jerarquías de la administración imperial. Igualmente, cabe recordar el caso de las inscripciones en ladrillo del s. V d. C. distribuidas por las provincias de Córdoba, Sevilla y Jaén, que se han interpretado como posibles alusiones a obispos astigitanos, como el relativo a *Flavius Chionius* (CIL II2/5, 461-463, 559, 206, 980, 1000, 1349, 1350).

En la composición formal y de contenido de los tapones sellados de Ses Fontanelles existe cierta analogía con un sello marcador de plomo usado para precintar los tapones de las ánforas Dressel 20 durante el reinado de Marco Aurelio (BERNI y GOROSTIDI, 2013). El cuño está firmado por la *societas Iuliorum* que aparece destacada en el centro de la circunferencia sobre la imagen del ánfora globular, emblema del comercio del aceite bético, representada como *signum*, es decir, el propio objeto dentro del sello. Los socios participantes, *C. Iul(i) Val(eriani) et (C. Iuli) Iul(iani)*, rodean la imagen simbólica del anillo interior. Estos dos personajes se encuentran registrados en un *titulus pictus* β del *Monte Testaccio*, junto a un tercer socio, *Hermeros* (BLÁZQUEZ y REMESAL, 2014, n. 113), lo que corrobora por un lado su condición de libertos, mientras que, por otro, identifica una sociedad de comerciantes de aceite bético. Los *tituli picti* nominales de tradición altoimperial ponen en evidencia el papel relevante de los libertos en las actividades comerciales, tanto a título individual, como formando una *societas* con o sin vinculación familiar.

Debemos en este punto preguntarnos cuál fue el papel económico de los dos *Flavii* registrados en los tapones de las ánforas olearias documentadas en el pecio mallorquín, así como la relación existente con la pareja Alunnio y Ausonio que capitalizan las etiquetas pintadas en las ánforas de aceite y *garum* del cargamento anfórico de Ses Fontanelles. Estos dos *cognomina* de origen servil aparecen siempre expresados en los *tituli picti* con la fórmula “*Alunnii et Ausonii NN*”. Las letras NN con elipsis indican seguramente un plural, que no desarrollamos en el primer estudio a falta de datos más precisos (SOLER *et al.*, 2021, 291). Sin embargo, ahora, gracias a la conexión entre *tituli picti* y tapones sellados, se abre la hipótesis de que la abreviatura NN, pudiera desarrollarse como “*nostrorum duorum*” en referencia a los dos Flavios como patronos de Alunnio y Ausonio. Es simplemente una hipótesis, difícilmente demostrable en el estado actual del conocimiento puesto que son posibles también otras interpretaciones. Quizás no hubo una dependencia entre *Alunnus* y *Ausonius* y los Flavios y simplemente los primeros compraron el aceite a los segundos, mientras que obtuvieron el *liquamen* y el vino de otros productores de la región.

6. ÁNFORAS OLEARIAS EN CONTEXTO: REFLEXIONES SOBRE LA ESTIBA DEL CARGAMENTO

Una vez analizadas en detalle las ánforas SF I, desde un punto de vista tipológico, arqueométrico y epigráfico, conviene reflexionar brevemente sobre su relación con las demás mercancías objeto de transporte.

Por una parte, si tenemos presente la estimación global con la cual trabajamos actualmente para el cargamento del pecio de Ses Fontanelles, que es de unas 323 ánforas, es posible calcular el volumen de mercancía transportado, teniendo en cuenta que se ha propuesto que el 52,6 % eran ánforas de *garum* (170 NMI), el 33,7 % de aceite (109 NMI), el 12,7 % de vino (41 NMI) y el 1 % eran quizás alimentos para la tripulación (3 Keay XIX malacitanas, según la estimación general (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. b). Si nos atenemos a la cantidad de ánforas transportadas, el aceite no parecería haber constituido el cargamento principal. No obstante, y como se ha planteado en otras ocasiones, especialmente para época tardorromana por la mayor variabilidad en la capacidad de las ánforas (BERNAL-CASASOLA y BONIFAY, 2010), es necesario realizar el cálculo de los productos transportados, que era lo realmente importante. Aplicada dicha corrección al pecio de Ses Fontanelles, las cifras varían notablemente: 4438,5 litros de aceite, 3332 litros de *liquamen* almacenado en Almagro 51c¹⁵ y 1090,6 litros de vino¹⁶. O lo que es lo mismo: de los 8861 litros aproximados de productos transportados, el 50,1 % era aceite, el 37,6 % eran salsas fermentadas de pescado y solo el 12,3 % era vino. Por tanto, el aceite envasado en las ánforas SF I fue el objeto fundamental de este flete comercial.

En segundo lugar, es importante reflexionar sobre la estiba de las mercancías. Sabemos gracias a la excavación que las ánforas estaban apiladas en dos alturas, encontrándose el piso superior muy deteriorado por su mayor exposición a la erosión marina, teniendo presente que cíclicamente el barco se tapa y destapa como consecuencia de los temporales, al estar enterrado a apenas dos metros de profundidad (MUNAR *et al.*, 2022). Durante la campaña de 2021-2022 se pudo realizar un posicionamiento muy preciso de las ánforas en relación con el casco de la embarcación, verificándose con claridad que las olearias se ubicaron en la parte central de la bodega: concretamente en el sector intermedio del barco, entre el primer mamparo de proa y el inicio de la caja del pozo de la sentina

15. Considerando un contenido neto para estos envases de 60 libras atendiendo a la inscripción ponderal conocida y al peso real de las ánforas (SOLIER *et al.*, 2021, 298).

16. Teniendo en cuenta un contenido medio de 26,6 l usando la media del contenido de las 9 ánforas vinarias de diversa tipología recuperadas (BERNAL-CASASOLA *et al.*, e.p. c, figura 3).

en la capa superior (Fig. 19a); y en el mismo lugar, con algunas SF I dispuestas algo más a popa en el sector de estribor (Fig. 19b). La conclusión es, por tanto, evidente: las ánforas con mayor peso (SF I, 40,7 l/unidad) se situaron en la zona central del barco, mientras que en la proa las más livianas, las de *liquamen* (19,6 l), encontrándose algunas de estas últimas y las vinarias, de peso intermedio (26,6 l), repartidas entre las demás.

La segunda cuestión importante es la derivada de los contextos de hallazgo de las marcas sobre los tapones y de los positivados de estas en el sedimento concrecionado: la dispersión de los siete ejemplares localizados (Fig. 20) ilustra su asociación exclusiva con las ánforas de aceite del tipo SF I. También es posible indicar que no parece existir diferencia de estiba alguna entre las ánforas olearias por tipo de aceite (*dulce/viride*) pues se constata la presencia conjunta de ambas en el área de estribor, entre mamparos (DSF-469, *vir* y DSF475 *dulce*), y la dispersión de ambas en las restantes zonas compartimentadas (Fig. 20). Asimismo, ha sido posible verificar que las ánforas con inscripciones alusivas al *oleum viride* estaban también selladas con crismones (DSF-469), como también lo estaban las que contenían *oleum dulce* (DSF-507), debiendo haber sido estas últimas mayoritarias, si tenemos en cuenta la mayor presencia de *tituli picti* alusivos a este producto, en una relación 1 a 4¹⁷.

7. EL PROBLEMA DE LA PRESENCIA DEL CRISMÓN: ¿SÍMBOLO DE PODER O HIPOTÉTICA IMPLICACIÓN DE TALLERES ECLESIASTICOS?

En primer lugar, queremos recalcar la importancia del hallazgo del pecio de Ses Fontanelles, que es relevante a nivel global desde diversos puntos de vista.

En primer lugar, por la proveniencia y singularidad del cargamento, con más de 300 ánforas cuya tipología era desconocida en la bibliografía de referencia, habiéndose definido un tipo nuevo de ánfora olearia, tratada en detalle en estas páginas: la denominada Ses Fontanelles I; y cuatro tipos de ánforas vinarias (SF II, III, IV y V), sobre las cuales habrá que reflexionar en detalle en el futuro intentando localizarlas tanto en centros de producción como en los de consumo, en la línea que desde hace años están desarrollando con éxito algunos investigadores (QUEVEDO, 2015, 2021; GARCÍA ABOAL, 2021), panorama para el cual Ses Fontanelles abre un horizonte muy prometedor, ante un escenario

17. Solamente dos ejemplares mencionan el (*oleum*) sin referencias al contenido (DSF-308, 314, 362, 489, 490, *viride*) (DSF-469, 504), frente a ocho alusivas al *dulce* 503, 508, 510A). (DSF-327, 344, 475, 479, 493, 494, 507, 525) y a otras tantas

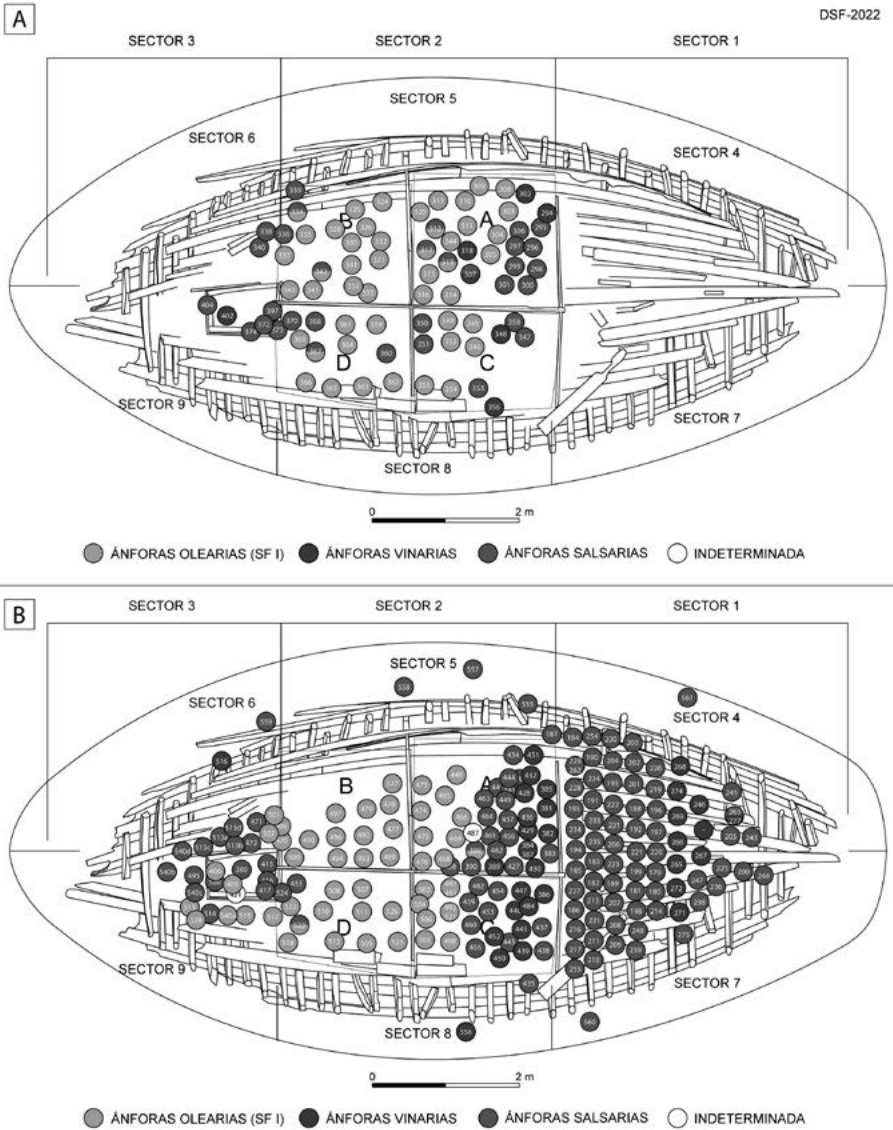


Fig. 19. Ubicación de las ánforas por tipos de contenidos en el piso superior (A) e inferior (B) del pecio Ses Fontanelles (Imagen: Autores).

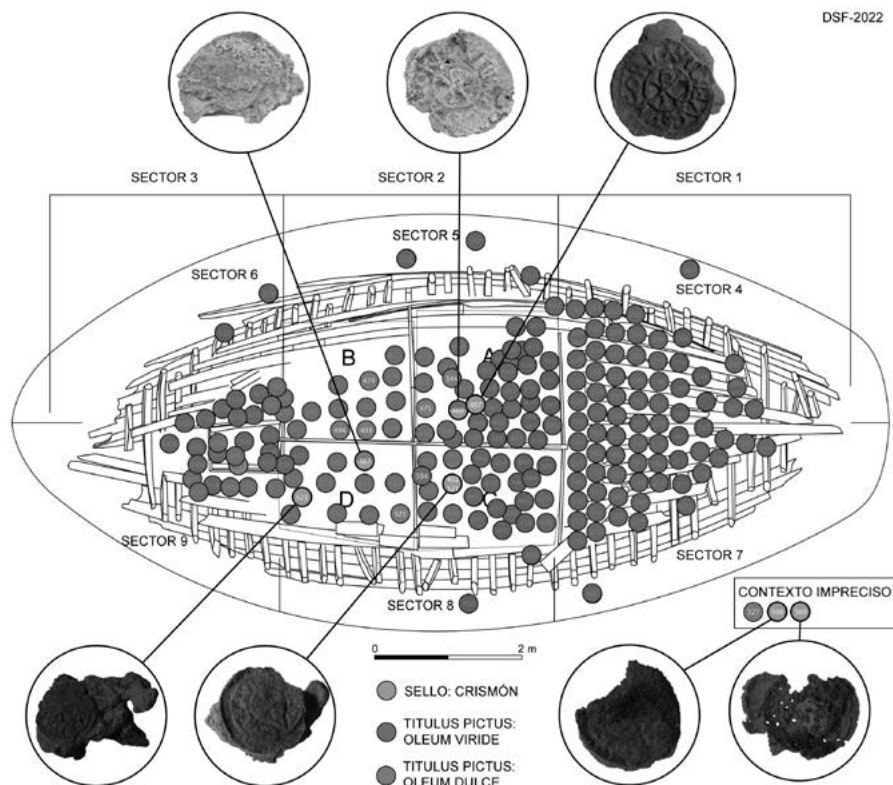


Fig. 20. Ubicación de las marcas con crismones y de los *tituli* alusivos al *oleum dulce* y al *oleum viride* en el piso inferior de la bodega del barco (Imagen: Autores).

totalmente desconocido para el siglo IV en el área del sudeste hispánico, y que afecta a todos los alimentos comercializados en ánforas por vía marítima (aceite, salazones de pescado y vino).

En segundo término, es relevante por su cronología (mediados o segunda mitad del s. IV), desde una doble perspectiva. Por una parte, porque existen aún escasas evidencias de pecios conocidos en estas fechas: apenas 28 de 1259 en el clásico *corpus* de Parker (1992, 14, figs. 3-5), de los que prácticamente no hay ninguno bético, tratándose además Ses Fontanelles del primero con una carga procedente del sudeste de la península ibérica. Y, por otra, por tratarse de una de las primeras evidencias hispánicas del empleo del crismón, si tenemos presente el escaso tiempo transcurrido entre las fechas oficiales del empleo del monograma constantiniano en la nueva semántica imperial –como mínimo a partir del Edicto

de Milán (313), pero sobre todo desde el Edicto de Tesalónica (380) con la oficialización de la religión cristiana– y las del hundimiento de nuestro pecio. Son escasos los datos en *Hispania* sobre las primeras evidencias del cristianismo primitivo y también del uso del crismón, tratándose en la mayor parte de los casos de materiales importados, sobre todo monedas y cerámicas –sigilatas africanas y lucernas–. Efectivamente, las sigilatas africanas estampadas con motivos del estilo A iii de Hayes aparecen decoradas con crismones a partir del s. V en adelante (HAYES, 1972, 273-277), y las lucernas a partir del 440 c. (BARBERA y PETRIAGGI, 1993, 374-376). Precisamente de Cartagena procede una lucerna africana con reflector decorada con un crismón, recuperada en un contexto de mediados del s. VI, aunque se plantea que el objeto pudo ser muy anterior (VIZCAÍNO y BUSTAMANTE, 2022, 13-14). Además, la novedad de los “crismones” de Ses Fontanelles es que constituyen elementos genuinamente hispánicos, no iconografía en elementos importados como sucede en los mosaicos, en los sarcófagos o en los elementos de toréutica profusamente decorados, abriendo una interesante línea de investigación en este sentido.

En tercer lugar, Ses Fontanelles constituye el pecio con más inscripciones en ánforas conocido en la península ibérica, donde solo La Albufereta I en Alicante y Pecio Gandolfo en Almería se acercan con menos de la mitad: unas 80 en total en el pecio mallorquín, un aspecto importante que trasciende más allá de la riquísima información aportada por el estudio epigráfico, en fase de desarrollo, pues constituye un buen ejemplo de cómo la práctica totalidad de las ánforas estaban etiquetadas: si pudiese parecer que solo el 25 % aprox. de las ánforas del pecio presentan inscripciones, pensamos que en las demás no se han conservado por motivos ambientales (degradación del piso superior y erosión posdeposicional en el inferior). Un buen ejemplo junto a otros terrestres como la *Bottega del Garum* de Pompeya (BERNAL-CASASOLA *et al.*, 2014) y el irremplazable *Testaccio* de Roma que parecen indicar que esta era la tendencia normal en los fletes comerciales (inscripciones en la totalidad de las ánforas), siendo una tendencia asumida hoy en día por muchos investigadores (PEÑA, 2021, 87). Además, en Ses Fontanelles se produce la paradoja de contar con casi todo el aparato epigráfico del que contaban las ánforas: *tituli picti* y tapones sobre los *opercula* con sello (Fig. 21), una combinación prácticamente única a nivel atlántico-mediterráneo. Elementos, además, magnificados, si cabe más aún por la progresiva “rarificación” de la epigrafía anfórica a partir del s. III d. C. en adelante.

Las ánforas olearias, objeto del presente trabajo, presentan varias singularidades, como hemos visto en detalle en las páginas precedentes. La primera es que contenían, como mínimo, dos productos: *oleum dulce* y *oleum*

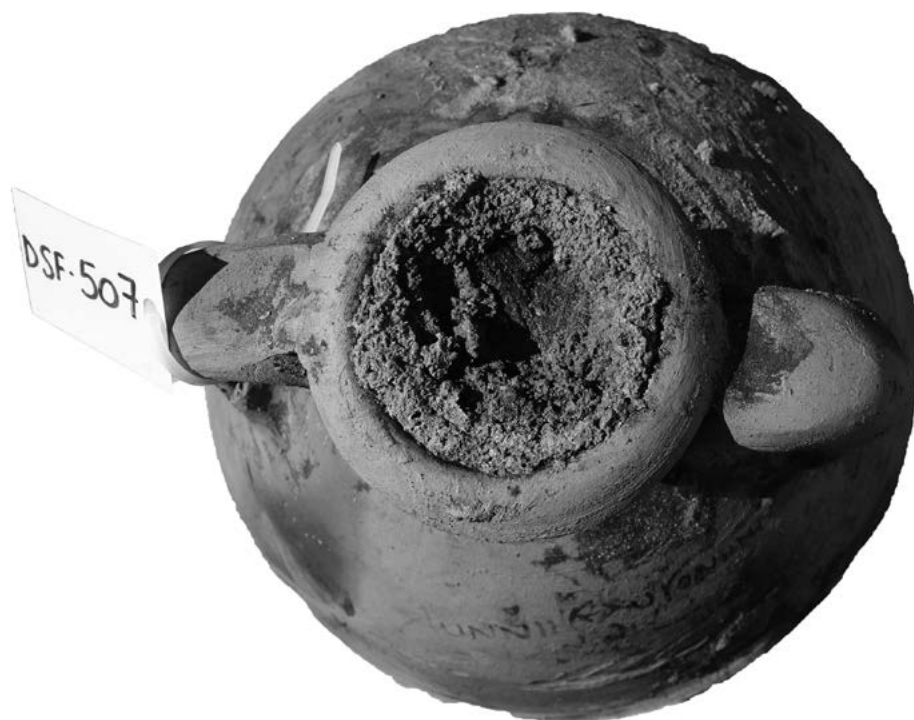


Fig. 21. Detalle de una de las ánforas del pecio (DSF-507) con el *titulus pictus* y el *operculum* aún in situ, en el cual se aprecia la marca circular de la impronta con el *signaculum*, parcialmente perdida por la erosión (Fotografía: Autores).

viride. Ya hemos comentado anteriormente cómo no se apreció ni durante la excavación ni durante el estudio posterior diferencia significativa alguna entre las ánforas que envasaron ambos productos, ni a nivel tipológico ni de su estiba en la embarcación (Fig. 22). Tampoco ha sido posible determinar, al menos hasta la fecha, una diferencia significativa entre el tipo de residuos interiores resultado de la degradación del producto, al menos desde un punto de vista macroscópico, aunque esta es una de las líneas de investigación a desarrollar en el futuro, desde una perspectiva arqueométrica (intentar determinar las diferencias entre la composición de uno y de otro). Y la segunda son las inscripciones sobre la capa de argamasa de hermetización de los tapones de las ánforas, que se han conservado de manera “milagrosa” en siete ocasiones gracias a la mineralización del sedimento que cubrió las ánforas y que generó un positivado de dichas marcas: sin esta constatación totalmente accidental, no habríamos sabido que las ánforas se sellaron tras su precintado. De ahí que hayamos dedicado muchos esfuerzos a su restauración, sintetizada en un apartado de este trabajo, sin lo cual no se habrían conservado. Conocemos pocos

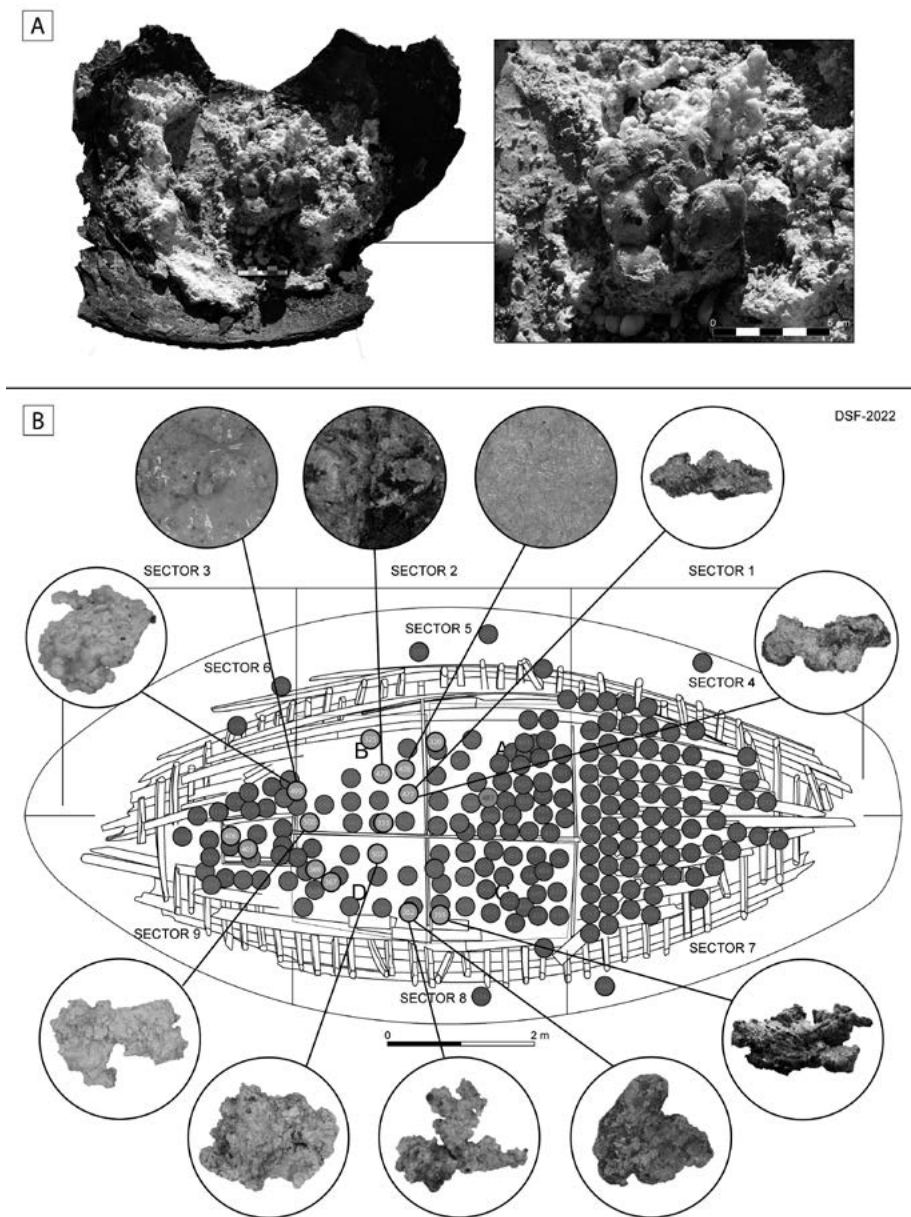


Fig. 22. Restos de aceite dentro de una de las SF I (A.- DSF-362) y dispersión de las muestras de la degradación del aceite en las ánforas situadas en la parte central de la embarcación (B) (Imagen: Autores).

paralelos de este tipo de sellos sobre *opercula* en *Hispania*, entre los cuales destaca un ejemplar con la *menorab* precisamente de Mazarrón (MARTÍNEZ e INIESTA, 2007, 182), único conocido en su género que sepamos (BERNAL-CASASOLA, 2010, 31, fig. 6 B; QUEVEDO, 2021, 217), que denota que este tipo de sistema de precintado de las ánforas era habitual en el extremo costero meridional de la península ibérica¹⁸. Esta constatación constituye otro argumento indirecto que vincula el pecio mallorquín con la región del sudeste hispánico.

Como ya se ha comentado, la lectura del sello no está del todo resuelta: se ha podido restituir la fórmula epigráfica, pero el texto solamente se lee de manera parcial, tratándose de dos personajes (*mercatores*), el segundo seguro (*Acoristus*) y el primero ilegible, ambos de la *Gens Flavia*, que ahora es posible vincular hipotéticamente con los agentes comerciales citados en los *tituli picti* (*Alunnius* y *Ausonius*), que se referirían a ellos en las inscripciones pintadas (*nostrorum*). Y con ello, entramos en la parte más interesante y quizás también la más problemática, como es la presencia del crismón en la parte central, en torno a la que se desarrollaban los nombres de los dos patronos flavios. La pregunta que surge es si la sistemática representación del monograma constantiniano vincula, de alguna manera, a todos estos personajes con la Iglesia o si por el contrario nada tuvo que ver y el crismón fue utilizado como símbolo imperial o de la *nobilitas*. Tal y como en el paralelo mencionado de época medio imperial de la *societas Iuliorum* en la cual se representaba un ánfora olearia en su parte central, aquí la *societas Flaviorum* decidió hacer bien visible el motivo que desde unas décadas antes caracterizaba la vida cotidiana del Imperio. Descartando que los crismones no tuviesen una simbología clara y bien definida, como pasa con toda la iconografía de época antigua, existen dos posibilidades. La primera, que los dos flavios formasen parte de la *nobilitas cristiana* y, como tales, hubiesen elegido el monograma como emblema de una nueva época, marcada por Constantino, sin mayores pretensiones ideológicas. La segunda hipótesis es que tras el crismón se escondan los intereses de una autoridad eclesiástica implicada en el comercio de alimentos. Ambas hipótesis deben quedar necesariamente abiertas. Cabe, además, advertir, como se hizo hace unos años (BERNAL-CASASOLA, 2010) sobre la dificultad de asociar con claridad al estamento eclesiástico en aspectos vinculados a la producción y al comercio transmediterráneo de mercancías en la Antigüedad Tardía, debido

18. Agradecemos a A. QUEVEDO haber puesto en nuestro conocimiento la existencia de un sello similar a los nuestros con crismón procedente de Mazarrón, actualmente en fase de estudio por los excavadores, habiendo sido presentado en el *Congreso de Arqueología de la Región de Murcia*

(Murcia, marzo de 2023), a cargo de M.J. MORCILLO, O. BRIONES y A.I. CORRALIZA, con el título "Sondeo arqueológico en la zona sur de la calle Corredera del puerto de Mazarrón", en fase de publicación actualmente.

especialmente a la parquedad de evidencias arqueológicas, aspecto este agravado en Occidente debido a la escasez de documentos epigráficos.

La utilización del crismón o monograma *chi-ro* como nuevo símbolo del poder imperial bajo Constantino nos retrotrae a la batalla del Puente de Milvio en el 312 d. C. y la visión o sueño que tuvo la noche anterior a enfrentarse a Magencio. Sabemos por algunos autores cristianos, como Eusebio de Cesarea y Lactancio, que en esa visión habría sido incitado a atacar y a colocar el crismón en los escudos de su ejército. Después de la victoria, Constantino adoptó el crismón y el *labarum* como símbolo personal y dinástico, utilizando el símbolo en monedas y otras expresiones de poder y también como elemento ornamental en la esfera más privada.

El crismón, aunque no era un símbolo nuevo, fue a partir del siglo IV perfectamente reconocible en todo el Imperio con el nuevo significado que le había conferido el cristianismo y que había sido oficializado por parte del poder imperial. Cabe, por tanto, una interpretación posible que relacione la presencia del crismón en las ánforas de Ses Fontanelles con los *Flavii*, con la casa imperial, o al menos con la *nobilitas*. Asimismo, cabe considerar la posibilidad de que pudiera tener que ver con un cargamento con destino militar, si se atiende a la profusión del crismón en monedas constantinianas con leyenda *Virtus Exercitus*, *Gloria Exercitus*, *Concordia Militum*, como exaltación del ejército al frente del cual se encontraba el emperador, como ha sido muy bien señalado (ROBLES, 2015).

En relación con la segunda hipótesis posible, curiosamente las ánforas selladas con el crismón son solo las olearias, que constituyen el elemento fundamental de la carga del pecio, las cuales aparecen rotuladas con dos tipos diversos de aceite, uno de los productos, junto al vino, consagrados por la iglesia y dedicado a múltiples usos religiosos, como es bien sabido. Esta es una antigua hipótesis que saltó a la palestra hace muchos años cuando fueron recuperadas en Roma diversas inscripciones de carácter cristiano pintadas en ánforas (PENSABENE, 1981). A partir de ahí surgió una corriente que consideraba que los productos transportados en ánforas orientales (vinos y aceites de Chipre, Cilicia, El Egeo, *Palaestina*, Egipto...) eran consagrados y destinados a tareas religiosas, aunque para algunos pudieron también haber tenido un sentido profiláctico para emplazar el cargamento del barco bajo protección divina (interesantes ejemplos y reflexiones en PIERI, 2005, 78-83, fig. 37). La continuidad del estudio de los *tituli picti* orientales ha permitido verificar que además de las fórmulas o invocaciones religiosas (*incipit*, *notaricon*, monogramas o fórmulas del tipo “María, madre de Cristo”, “la Gracia de Dios

es un beneficio”...) se menciona el lugar de procedencia del producto: De Stephanos, De Theodoros, De Apollinarios, De Santa María, De San Isidoro, De San Menas....., alusivos tanto a propietarios particulares como a instituciones de carácter religioso, posiblemente monasterios (FOURNET, 2021, 66-73). También se han utilizado algunos grafitos en forma de pez asociados a ánforas vinarias lusitanas procedentes de la *figlina* del Porto dos Cacos (tipo Lusitana 9/Sado 2) para proponer el vino de uso eucarístico como paleocontenido de estos envases (FÁBIAO, 1998, 191-192).

Este tema fue tratado hace años de manera global, integrando a otras categorías cerámicas y poniendo sobre la mesa cómo la Iglesia, especialmente a partir del s. IV, a través de los obispados y de los monasterios, tuvo una notable implicación en la producción y comercio de bienes de primera necesidad, aspectos especialmente bien ilustrados en el norte de África (*Byzacena* y *Zeugitania*) y en la *Pars Orientis* del Imperio, con ejemplos tales como los *Late Roman Unguentaria* de talleres de la Anatolia meridional, los citados *tituli picti* de las ánforas orientales o los grafitos pre-cocción *in collo* de algunas producciones anfóricas norteafricanas tardías, excepcionalmente identificadas en el pecio de La Palud (BERNAL-CASASOLA, 2010). En el ámbito de *Carthago Spartaria*, que nos interesa especialmente en estas páginas debido a la procedencia del cargamento del pecio de Ses Fontanelles de esta microrregión, tenemos un paralelo estupendo, aunque más tardío (ss. VI y VII d. C.): la presencia de ungüentarios orientales, procedentes de talleres del sur de Anatolia, con sellos pre-cocción, que esconden tras de sí anagramas de funcionarios tanto imperiales como eclesiásticos, de los cuales se conocen ejemplos clarividentes en otros lugares como los sellos relativos a los obispos Seneciano de Rodas, Erasino de Iasos o el *anagnostes* de Éfeso, cuya interpretación es o bien que se trata de productos consagrados, o bien que los objetos proceden de talleres eclesiásticos (VIZCAÍNO y PÉREZ, 2008, con la bibliografía específica).

En Ses Fontanelles, además de los crismones, tenemos la referencia explícita al *oleum dulce* o “sweet oil”, que como indican diversos autores era un aceite especial, bien conocido en ánforas orientales, que aparece junto a otros aceites que se consideran de carácter religioso (DERDA, 1992). Esto abriría la posibilidad de una vinculación del cargamento de Ses Fontanelles con ciertos dominios eclesiásticos sin que sea posible precisar más: el cargamento de aceite comercializado por estos *Flavii mercatores* pudiera o bien proceder de dominios eclesiásticos (el obispado, monasterios o iglesias), siendo comercializado por seglares; o bien de aceites obtenidos en *torcularia* eclesiásticos, comercializados bajo control económico de la Iglesia. Y en cualquiera de ambas posibilidades

podría tratarse, además, de aceites destinados a un uso litúrgico. Como indican los *tituli*, además del posible aceite para fines sacros, los agentes comerciales que trabajaban para los *Flavii* también se encargaron de comercializar para sus posibles patronos productos haliéuticos y, quizás, vino en reducidas cantidades. Volvemos a recordar el tapón con argamasa citado anteriormente procedente de Mazarrón en el que se representó una *menorah*, cuyo sentido religioso es evidente: bien indicando que se trataba de productos *kosher* para la comunidad judía o bien que eran ellos mismos los productores y/o comerciantes, como parece que pasaba también durante el Alto Imperio (BERNAL-CASASOLA, 2009, 14-15, fig. 8). Otros hallazgos de época tardorromana parecen indicar que estos productos para la comunidad judía envasados en ánforas eran comunes, como indican los sellos con el candelabro de siete brazos en ánforas vinarias documentadas en Roma (BERNAL-CASASOLA, 2010, 29, fig. 3 A) o los *tituli picti* en hebreo de época tardorromana (GONZÁLEZ-CESTEROS *et al.*, 2016).

Pensamos además que los *tituli picti* de Ses Fontanelles se adecuan más al sistema “romano” que al propio de los *dipinti* tardoantiguos comentados anteriormente debido a las fechas del naufragio, anteriores a la generalización de las inscripciones de carácter religioso propias de las ánforas bizantinas de los siglos V a VII d. C. Desde esta perspectiva, un paralelo cercano para el pecio de Ses Fontanelles es el denominado Marzamemi 2, hundido en la costa sudoriental de Sicilia en la primera mitad del s. VI, cargado con parte del mobiliario litúrgico pétreo de una iglesia: columnas completas (basas, fustes, capiteles), canceles y el púlpito, cuyos responsables de la comercialización son fáciles de dilucidar (RUSSELL y LEIDWANGER, 2020). También se ha propuesto que hubiese sido fletado por el estamento eclesiástico el famoso Yassi Ada B, hundido frente a las costas de Anatolia en el s. VII d. C., y aparentemente cargado con alimentos para el suministro de las tropas bizantinas a través de la *annona militaris* (PEÑA, 2021, 79 y 81).

Otra cuestión importante es plantearnos el lugar de manufactura del aceite contenido en las ánforas SF I, que evidentemente debió proceder de alguna de las *villae* productivas del entorno de *Carthago Spartaria* (ANTOLINOS, 2019), existiendo múltiples candidatas (Fig. 23). Ante la ausencia de ánforas aceiteras conocidas de producción cartaginense, se ha planteado tradicionalmente, con toda lógica, que el aceite manufacturado en los *torcularia* murcianos del *binterland* pudo haberse destinado bien al mercado regional o bien a su traslado en odres del interior a la costa para su envasado en ánforas en el litoral antes del inicio de las travesías marítimas (QUEVEDO, 2021, 208). Una mirada atenta a alguna de las *villae* con producción olearia, como es el caso



Fig. 23. Mapa de la región de Murcia con la distribución de las villae con evidencias de producción vinaria y olearia (elaboración propia a partir de ANTOINOS, 2019, 85, fig. 3) y con la posible zona de manufactura de las ánforas en el foco productivo de Águilas - Mazarrón.

de la de Los Villaricos en Mula, que presenta unas espectaculares instalaciones de prensado (GONZÁLEZ FERNÁNDEZ *et al.*, 2018), permite verificar un modelo productivo perfectamente compatible con los hallazgos de Ses Fontanelles. Por un lado, la mayor importancia de los *torcularia* en este asentamiento rural se fecha especialmente en el s. IV y en parte del V d. C.; además los excavadores citan la existencia de “varios fragmentos de ánforas de cuerpo de tendencia globular y pivote apuntado de producción local que no habíamos identificado hasta ahora en el yacimiento y que tipológicamente podrían asemejarse a la forma Dressel 23” (GONZÁLEZ FERNÁNDEZ *et al.*, 2018, 97), que pensamos han de corresponderse con nuestras Ses Fontanelles I, candidatas para el transporte del *oleum* producido localmente; y en tercer lugar la transformación que sufre el espacio en época tardorromana, momentos en los que se transforma el ámbito productivo en una posible iglesia –con la consecuente invasión funeraria perimetral–. Esta transformación de la almazara en edificio religioso nos permite también interrogarnos sobre quiénes eran sus antiguos propietarios,

seculares o religiosos. Esta constatación de la villa de Los Villaricos de Mula abre una interesante línea de investigación en estos ámbitos productivos oleícolas rurales, en los que cuando se proceda al estudio de detalle de las ánforas permitirán determinar los procesos de transporte del *oleum cartaginense* de las tierras murcianas del interior a la costa, y determinar a través de los análisis de “pastas” si proceden de talleres alfareros del litoral (cinturón litoral alfarero de Águilas – Mazarrón) o si bien existen *figlinae* interiores asociadas a las *villae*.

Será tarea del futuro indagar sobre la importancia del obispado de Cartagena en la Antigüedad Tardía, especialmente en relación con la producción y comercio de alimentos. Sabemos que el obispado estaba implantado al menos desde inicios del s. IV, como atestigua la presencia del presbítero *Eutyches* en el Concilio de Elvira en representación de la sede episcopal cartagenera (GUILLEN y GONZÁLEZ BLANCO, 1985). No podemos descartar la procedencia del cargamento de otros yacimientos del litoral murciano, como es el caso de la importante Isla del Fraile, enclave productivo muy activo en estas fechas (QUEVEDO y HERNÁNDEZ, 2020), y que además está junto al foco alfarero Águilas-Mazarrón, que sin duda producían ánforas parecidas a las documentadas en Ses Fontanelles, y las hermetizaban con sistemas similares.

Asimismo, una idea que lanzamos para futuras investigaciones es la del destino del cargamento, aunque desconocemos si la embarcación iba rumbo a Mallorca y naufragó, o bien si se trataba de un comercio a media/larga distancia. En caso de que el destino hubiesen sido las Baleares, es posible que si el aceite se destinara a funciones litúrgicas hubiera sido distribuido en algunas de las comunidades religiosas, bien conocidas para fechas más tardías en *Cabrera* (RIERA, 2017) y en otros enclaves de la isla (MAS et al., 2020), que habrían recibido en tal caso un lote notable de aceite en las basílicas para su uso religioso y funerario, aunque en el estado actual de la investigación no puede pasar de ser una mera hipótesis de trabajo.

Contamos con múltiples indicios, especialmente las indicaciones religiosas de los ya mencionados *tituli* de las ánforas con motivos cristológicos y expresiones teológicas¹⁹, en algunos de los cuales la relación con monasterios egipcios y de otras localidades parece demostrada²⁰; o las decenas de ejemplos de conexiones entre instalaciones productivas y complejos basilicales, especialmente en el África tunecina y en Oriente, aunque también en la orilla norte del Mediterráneo²¹ o en *Hispania*, como hemos citado a lo largo de estas

19. Como por ejemplo la africana con *titulus pictus* en griego de San Lorenzo Maggiore en Milán (PENA, 2021, 81, con bibliografía).

20. Tal y como sucede con los *dipinti* en los *spatbeia* del tipo 3, con muchas referencias a estas instalaciones religiosas (BONIFAY, 2021, 284).

páginas.

El pecio de Ses Fontanelles, aunque no se dispone de datos concluyentes y la investigación continúa, podría unirse, con toda la prudencia y reservas necesarias, a esta aún escueta, pero creciente, lista de indicios que pudieran evidenciar las relaciones entre los talleres eclesiásticos y la economía y el comercio tardoantiguos, constituyendo los prolegómenos de una tendencia mucho mejor conocida en época medieval, como el lector tendrá ocasión de comprobar en otras páginas de esta monografía.

21. Así sucede, entre muchos otros, en Samos, donde las ánforas de los tipos LRA 1 y LRA 2 aparecen asiduamente en las cocinas del complejo eclesiástico y en un entorno con multitud de prensas de aceite y vino (POLLA *et al.*, 2021,

151); o en Chim y Khalde cerca de Beirut, donde las instalaciones artesanales para producción de alimentos parecen estar en manos de la Iglesia, en un entorno con basílicas de culto (REYNOLDS, 2021, 323-324).

Bibliografía

- AGUILERA MARTÍN, A. (2002): *El Monte Testaccio y la llanura subaventina. Topografía extra portam Trigeminam*. Roma.
- AGUILERA MARTÍN, A y BERNI MILLET, P. (1998): "Las cifras hispánicas", en: MATEU IBARS, J., ed., *Calligraphia et typographia. Aritmética et numerica. Chronologia*. Barcelona, 257-282.
- ALTARATZ, D., CAINE, M. y MAGGEN, M. (2019): "Combining RTI & SFM. A Multi-Faceted approach to Inscription Analysis", *Electronic Imaging and the Visual Arts EVA*, 97-105.
- ANTOLINOS MARÍN, J.A. (2019): "Villae, recursos naturales y explotación del territorio en el *ager Carthaginiensis*", en: NOGUERA, J.M., MIQUEL, L.E. DE y MARTÍNEZ, S. coords., *Villae. Vida y producción rural en el sureste de Hispania*. Murcia, 82-95.
- BARBERA, M. y PETRIAGGI, R. (1993): *Museo Nazionale Romano. Le lucerne tardo-antiche di produzione africana*. Roma.
- BERNAL-CASASOLA, D. (2009): "Ánforas, pesquerías y conservas entre la Baetica y el Adriático. Pinceladas para futuras investigaciones arqueológicas", en: PESVENTO, S. y CARRE, M.B., eds., *Olío e pesce in época romana. Produzione e commercio nelle regioni dell'Alto Adriatico, Antenor Quaderni* 15. Roma, 3-24.
- BERNAL-CASASOLA, D. (2010): "Iglesia, producción y comercio en el Mediterráneo tardoantiguo. De las ánforas a los talleres eclesiásticos", en: MENGHELLI, S., SANTORO, S., PASQUINUCCI, M. y GUIDUCCI, G. eds., *LRCW 3. International Conference on Late Roman Coarse Wares, Cooking Wares & Amphorae in the Mediterranean: archaeology and archaeometry. Comparison between Western and Eastern Mediterranean*. British Archaeological Reports, I.S 2185 (I). Oxford, 19-31.
- BERNAL-CASASOLA, D. (2019): "Ánforas tardorromanas en Hispania. Claves de identificación", en: FERNÁNDEZ OCHOA, C., MORILLO CERDÁN, A. y ZARZALEJOS PRIETO, M., eds., *Manual de cerámica romana IV. Producciones cerámicas de época medio-imperial y tardorromana*. Cádiz, 549-670.
- BERNAL-CASASOLA, D. y BONIFAY, M. (2010): "Importaciones y consumo alimenticio en las ciudades tardorromanas del Mediterráneo noroccidental (siglos VI-VIII): la aportación de las ánforas", en: GARCÍA, A., coord., *I Congreso Internacional Espacios urbanos en el Occidente Mediterráneo, s. V – VIII*. Toledo, 91-114.
- BERNAL-CASASOLA, D. y CAU ONTIVEROS, M.Á. (coords.) (2020): *Estudio preliminar del cargamento del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma de Mallorca): inventario, catalogación y primeras analíticas*. Memoria inédita depositada en el Consell de Mallorca.
- BERNAL-CASASOLA, D., CAU ONTIVEROS, M.Á., DE JUAN, C., MUNAR LLABRÉS, S., CARDELL, J., y GARCÍA RIAZA, E. (en prensa a): "Digging in shallow waters: The unique late Roman wreck at Ses Fontanelles (Palma de Mallorca, Balearic Islands)", en: *Under the Mediterranean II. International Conference*, Malta (2022).
- BERNAL-CASASOLA, D., CAU ONTIVEROS, M.Á., PORTILLO-SOTELO, J.L., RETAMOSA GÁMEZ, J.A., FANTUZZI, L., MUNAR I LLABRÉS, S., DE JUAN, C., CARDELL PERELLÓ, J., PECCI, A., VALENZUELA, A., GARCÍA RIAZA, E. y BERNI MILLET, P. (en prensa b): "Ánforas tardorromanas de la Carthaginensis en Mallorca: primera valoración del cargamento del pecio de Ses Fontanelles", en: STRUTT, K. et alii eds., *Archaeologies of the Roman Mediterranean. Papers Presented in Honour of Prof. Simon Keay*, *Archaeopress*.
- BERNAL-CASASOLA, D., CAU ONTIVEROS, M.Á., CARDELL, J., GARCÍA RIAZA, E., PECCI, A., RETAMOSA, J.A., PORTILLO-SOTELO, J.L., FANTUZZI, L., OVIEDO, J., DE JUAN, C., MUNAR, S., BERNI, P. y MOYA, J.A. (en prensa c): "Ánforas vinarias de la Cartaginense: aportaciones del pecio mallorquín de Ses Fontanelles", en: *Actas del III Colloqui Internacional d'Arqueologia Romana. El vi a l'Antiguitat. Economia, producció i comerç al Mediterrani*, Badalona (2022).
- BERNAL-CASASOLA, D., COTTICA, D., GARCÍA-VARGAS, E., TONIOLO, L., RODRÍGUEZ-SANTANA, C.G., ACQUA, C., MARLASCA, R., SÁEZ, A.M., VARGAS, J.M., SCREMEN, F. y LANDI, S. (2014): "Un contexto excepcional en Pompeya: la pila de ánforas de la Bottega del Garum (I, 12, 8). Avance de un estudio interdisciplinar", en: *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta* 43. Bonn, 219-232.
- BERNAL-CASASOLA, D., y SÁEZ ROMERO, A.M. (2008): "Opérculos y ánforas romanas en el Círculo del Estrecho. Precisiones tipológicas, cronológicas y funcionales", en: *Rei Cretariae Romanae Fautorum Acta* 40. Oxford, 455-472.
- BERNI MILLET, P. (1998): *Las ánforas de aceite de la Bética y su presencia en la Cataluña romana*. Barcelona.
- BERNI MILLET, P. y GOROSTIDI PI, D. (2013): "C. Iulius Valerianus et C. Iulius Iulianus: mercatores del aceite bético en un signaculum de plomo para ánforas Dressel 20", *Journal of Roman Archaeology* 26, 167-190.
- BERNI MILLET, P. y MOROS DÍAZ, J. (2012): "Los sellos *in planta pedis* de las ánforas olearias béticas Dressel 23 (primera mitad siglo V d.C.)", *Archivo Español de Arqueología* 85, 193-219.
- BERNI MILLET, P. y MOROS DÍAZ, J. (2017): "Dressel 23 (Valle del Guadalquivir)", en: *Amphorae ex Hispania. Paisajes de producción y de consumo* (<http://amphorae.icac.cat/amphora/dressel-23-guadalquivir-valley>), 23 mayo 2017.
- BERRÓCAL CAPARRÓS, M.C. (2012): "Producciones anfóricas en la costa meridional de Carthago-Spartaria", en: BERNAL-CASASOLA, D. y RIBERA I LACOMBA, A., eds., *Cerámicas hispanorromanas II. Producciones regionales*. Cádiz, 255-277.
- BLÁZQUEZ MARTÍNEZ, J.M. y REMESAL RODRÍGUEZ, J. (2014): *Estudios sobre el Monte Testaccio (Roma) VI*. Barcelona.
- BONIFAY, M. (2021): "African amphora contents: an update", en: BERNAL-CASASOLA, D., BONIFAY, M., PECCI, A. y LEITCH, V., eds., *Roman Amphora Contents. Reflecting on the Maritime Trade of Food-stuffs in Antiquity. In honour of Miguel Beltrán Lloris, Roman and Late Antique Mediterranean Pottery* 17. Oxford, 281-297.
- BOST, J.-P., CAMPO, M., COLLS, D., GUERRERO, V. y MAVEY, F. (1992): *L'épave Cabrera III (Majorque)*. Paris.

- BRUNN, P. (1962): "The Christian Signs on the Coins of Constantine", *Arctos*, 3, 5-35.
- CARDELL PERELLÓ, J., BERNAL-CASASOLA, D., CAU ONTIVEROS, M.Á. y GARCÍA RIAZA, E. (en prensa): "Arqueomallorriauta. Un proyecto de investigación sobre el comercio y el tráfico marítimo mallorquín en la Antigüedad Tardía", en: CEREZO ANDREO, F., PÉREZ-REVERTE MAÑAS, C. y SOLANA RUBIO, S., eds., *Actas del I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática*, Cádiz.
- CARRERO-PAZOS, M. y ESPINOSA-ESPINOSA, D. (2018): "Tailoring 3D modelling techniques for epigraphic texts restitution. Case studies in deteriorated roman inscriptions", *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 10.
- CAU ONTIVEROS, M.Á., BERNAL-CASASOLA, D., FANTUZZI, L., RETAMOS, J.A., PORTILLO-SOTELO, J.L., PECCI, A., VALENZUELA, A., MUNAR LLABRÉS, S., CARDELL, J. y GARCÍA RIAZA, E. (en prensa a): "First approach to the typology and provenance of the amphorae from Ses Fontanelles shipwreck (Mallorca, Balearic Islands)", en: *VI Congreso Internacional de la Sociedad de Estudios de la Cerámica Antigua en Hispania*, Zaragoza (2022).
- CAU ONTIVEROS, M.Á., BERNAL CASASOLA, D., PECCI, A., FANTUZZI, L., PICORNELL, L.L., VALENZUELA, A., RETAMOS, J.A., PORTILLO-SOTELO, J.L., CARDELL, J., MUNAR LLABRÉS, S. y GARCÍA RIAZA, E. (en prensa b): "Multianalytical approach to the exceptional Late Roman shipwreck of Ses Fontanelles (Mallorca, Balearic Islands)", *Archaeological & Anthropological Sciences*.
- CHEN, W., DAI, P., YUAN, P. y ZHANG, J. (2016): "Effect of inorganic silicate consolidation on the mechanical and durability performance of sandstone used in historical sites", *Construction and Building Materials* 121, 445-452.
- DE JUAN FUERTES, C., MUNAR LLABRÉS, S., CAU ONTIVEROS, M.Á., BERNAL CASASOLA, D., FERNÁNDEZ TUDELA, E., RETAMOS GÁMEZ, J.A., PORTILLO-SOTELO, J.L., SAN CLAUDIO SANTA CRUZ, M., TALAVERA MONTES, A.J., SANTOLÁRIA I SARABIA, J., GUAL DE TORRELLA ROCA, X., RENDINA, S., MOYA MONTOYA, J.A., CARDELL PERELLÓ, J. y GARCÍA RIAZA, E. (en prensa): "Excavación subacuática del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma de Mallorca, islas Baleares)", en: CAU ONTIVEROS, M.Á., ed., *Las islas Baleares durante la Antigüedad Tardía: historia y arqueología*.
- DERDA, T. (1992): "Inscriptions with the Formula θεου χαρις κερδος on Late Roman Amphorae", *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik* 94, 135-152.
- DJAOU, D. (2011): "Découverte d'un double sceau en bois à date consulaire (épave de Tiboulen de Maire, Marseille)", en: *SPEACG. Actes du Congrès d'Arles* 2011. Marseille, 625-632.
- FABIÃO, C. (1998): "O vinho na Lusitânia: reflexões em torno de um problema arqueológico", *Revista Portuguesa de Arqueologia* 1.1, 69-198.
- FERNÁNDEZ IZQUIERDO, A., BERNI MILLET, P. y AGUILERA MARTÍN, A. (2017): "El pecio romano Albufereta I (siglo I d.C.): el cargamento", en: AZUAR, R. y INGLESE, O., eds., *Carta Arqueológica Subacuática de Alicante I. Fondeadero de Lucentum (Babía de l'Albufereta, Alicante)*. Alicante, 99-114.
- FERNÁNDEZ-TUDELA, E., ZAMBRANO, L.C., LAGÓSTENA, L.G. y BETHENCOURT, M. (2022): "Documentation and analysis of a Roman anchor stock and its iconographic and epigraphic sealed elements", *Virtual Archaeology Review* 13 (26), 147-162.
- FOLGUEIRA, V. y SAN CLAUDIO, M. (2015): "El método de la acetona—Colofonia para el tratamiento de la madera empapada en objetos compuestos de madera y metal", *Metalespaña*, 155-161.
- FOURNET, J.-L. (2021): "How late Antique dipinti contribute to a better knowledge of amphora contents", en: BERNAL-CASASOLA, D., BONIFAY, M., PECCI, A. y LEITCH, V., eds., *Roman Amphora Contents. Reflecting on the Maritime Trade of Foodstuffs in Antiquity. In honour of Miguel Beltrán Lloris*. Oxford, 63-76.
- GALLEGO FRANCO, H. (2001a): "El nomen flavius en las estructuras onomásticas y sociales de la provincia tarraconense. Un estudio de las fuentes epigráficas", *Hispania Antiqua* 25, 211-250.
- GALLEGO FRANCO, H. (2001b): "El nomen flavius en Lusitania", *Espacio, tiempo y forma. Serie II, Historia antigua* 14, 69-94.
- GALLEGO FRANCO, H. (2001c): "Los Flavii en las estructuras sociales de la Bética", *Florentia iliberritana. Revista de estudios de Antigüedad Clásica* 12, 163-198.
- GARCÍA-ABOAL, M.V. (2021): "Un nuevo tipo de ánfora tardorromana en Cartagena", *Spal* 30.1, 222-240.
- GEMELLI, G.M.C., ZARZUELA, R., ALARCÓN-CASTELLANO, F., MOSQUERA, M.J. y GIL, M.L.A. (2021): "Alkoxysilane-based consolidation treatments: Laboratory and 3-years In-Situ assessment tests on biocalcarene stone from Roman Theatre (Cádiz)". *Construction and Building Materials* 312 (doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125398).
- GIACI, G., CAPRETTI, C., DONATO, I. D., MACCHIONI, N., y PIZZO, B. (2011): "New trials in the consolidation of waterlogged archaeological wood with different acetone-carried products", *Journal of Archaeological Science* 38 (11), 2957-2967.
- GONZÁLEZ-CESTEROS, H., DE ALMEIDA, R.R. y CURBERA, J. (2016): "Special fish products for the Jewish community? A painted inscription from a Beltrán 72 amphora from Augusta Emerita (Mérida, Spain)", *Herom. Journal on Hellenistic and Roman Material Culture* 5.2, 197-236.
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ MATELLANA, F. y ZAPATA PARRA, J.A. (2018): "La villa romana de Los Villaricos (Mula, Murcia): un gran centro productor de aceite en la Hispania Tarraconense", *Archivo Español de Arqueología* 91, 89-113.
- GONZÁLEZ ROMÁN, C. (1991): "Inscripciones romanas de la provincia de Jaén. IV", *Florentia iliberritana. Revista de estudios de Antigüedad Clásica* 2, 225-240.
- GUILLEN PÉREZ, G. y GONZÁLEZ BLANCO, A. (1985): "Perspectivas de la geografía eclesiástica antigua del S.E. peninsular", *Antigüedad y Cristianismo* II, 107-117.

- HAYES, J.W. (1972): *Late Roman Pottery. A Catalogue of Roman fine wares*. Londres.
- HESNARD, A. y GIANFROTTA, P.A. (1989): "Les bouchons d'amphore en pouzzolane," en: *Anyfore romane e storia economica: un decennio di ricerche*. Roma, 393-441.
- IBRAHIM, M., MOHAMED, W. y MOHAMED, H. (2022): "Evaluation of The Efficacy of Traditional and Nano Paraloid B72 for Pottery Consolidation", *International Journal of Conservation Science* 13, 15-30.
- KEAY, S.J. (1984): *Late Roman amphorae in the Western Mediterranean. A typology and economic study: the Catalan evidence*. Oxford.
- LECH, P., MATERA, M., y ZAKRZEWSKI, P. (2021): "Using Reflectance Transformation Imaging (RTI) to document ancient amphora stamps from Tanais, Russia. Reflections on first approach to their digitalization", *Journal of Archaeological Science: Reports* 36.
- LEJWITZER, A. (2016): "Usos materiales y simbólicos del aceite de oliva en Roma imperial", *Revista Iberoamericana de Viticultura, Agroindustria y Ruralidad* 3.8, 5-23.
- MAIER-MAIDL, V. (1992): *Stempel und Inschriften auf Amphoren vom Magdalensberg: wirtschaftliche Aspekte*. Archäologische Forschungen zu den Grabungen auf dem Magdalensberg 11. Kärntner Museumsschriften 73. Klagenfurt.
- MARTÍNEZ, J., FERRERO, J.L., ROLDÁN, C., y ÁLAMO, J. (1998): "Los tituli picti, estudio sobre el *atramentum* y su composición", en: *Conservas, aceite y vino de la Bética en el Imperio Romano IV*. Écija, 1221-1229.
- MARTÍNEZ ALCALDE, M. e INIESTA SANMARTÍN, A. (2007): *Factoría romana de salazones. Guía del Museo Arqueológico Municipal de Mazarrón*. Mazarrón.
- MAS FLORIT, C., CAU ONTIVEROS, M.Á. y ALCALDE, S. (2020): "Buildings of Faith: Early Christianity in the countryside of the Balearics (Spain)", *Journal of Roman Archaeology* 33, 271-290 (<https://doi.org/10.1017/S1047759420001014>).
- MAVORAL PEÑALVA, J., TREMOLEDA I TRILLA, Q., GELI MAURI, R. y VIVAR LOMBARTE, G. (2022): "Una aproximación al contenido de las ánforas Dressel 23: estudio de dos *tituli picti* aparecidos en el pecio Aiguablava V", en: *De la costa al interior: las cerámicas de importación en Hispania 2*. V Congreso Internacional de la SECAH, Alcalá de Henares. Madrid, 719-728.
- MOLINA VIDAL, J. y MATEO CORREDOR, D. (2018): "The Roman Amphorae Average Capacity (AC)", *Oxford Journal of Archaeology* 37 (3), 299-31.
- MONTORO DEL ARCO, E.T. (2021): "Del «aceite de comer» al «aceite de oliva virgen extra». Terminología fraseológica histórica asociada a la calidad del aceite de oliva", en: DE BERNI, M., ed., *Corpus y estudio diacrónico del discurso especializado en español*. Berlín, 183-225.
- MORELL y TERRY, L. (1889): *Elaboración y comercio del aceite de olivas*. Memoria presentada a la Excm. Diputación Provincial de Granada.
- MUNAR LIABRÉS, S., CARDELL, J., DE JUAN, C., CAU, M.Á., BERNAL-CASASOLA, D., PICORNELL, LL. y GARCÍA RUAZ, E. (2022): "Ses Fontanelles shipwreck (Mallorca, Balearic Islands): an exceptional Late Roman boat and its cargo", *Journal of Maritime Archaeology* 17, 487-505.
- PARKER, A.J. (1992): *Ancient shipwrecks of the Mediterranean and the Roman provinces*. Oxford.
- PASCUAL, R. (1964-65): "Las ánforas de la necrópolis paleocristiana de Tarragona", *Boletín Arqueológico de Tarragona* 64-65, 3-27.
- PEACOCK, D.P.S. y WILLIAMS, D.F. (1986): *Amphorae and the Roman Economy: an Introductory Guide*. London.
- PECCI, A. (2020): "Análisis de residuos orgánicos de ánforas", en: BERNAL-CASASOLA D. y CAU ONTIVEROS, M.Á., coords., *Estudio preliminar del cargamento del pecio tardorromano de Ses Fontanelles (Palma de Mallorca): inventario, catalogación y primeras analíticas*. Memoria inédita depositada en el Consell de Mallorca, 113-122.
- PENSABENE, P. (1981): "Anfore tarde con iscrizioni dal Palatino", *Rivista di Studi Liguri* XLVII, 189-213.
- PEÑA, J.T. (2021): "The reuse of transport amphorae as packaging containers in the Roman world: an overview", en: BERNAL-CASASOLA, D., BONIFAY, M., PECCI, A. y LEITCH, V., eds., *Roman Amphora Contents. Reflecting on the Maritime Trade of Foodstuffs in Antiquity. In honour of Miguel Beltrán Lloris, Roman and Late Antique Mediterranean Pottery* 17. Oxford, 77-91.
- PICCOTTINI, G. (2000/01): «Neues zum Wein- und Lebensmittelimport in die Stadt auf den Magdalensberg, Kärnten», *Archaeologia Austriaca* 84/85, 373-385.
- PIERI, D. (2005): *Le commerce du vin oriental à l'époque byzantine (Ve-VIII siècles). Le témoignage des amphores en Gaule*. Beirut.
- POLLA, S., SPRINGER, A., GRUBER, B., TUSLOVA, P. y WEISSOVA, B. (2021): "Inland trade and consumption in context. A case study on the organic residue analysis of transport amphorae from the Balkan Peninsula (Yambol District, south-eastern Bulgaria)", en: BERNAL-CASASOLA, D., BONIFAY, M., PECCI, A. y LEITCH, V., eds., *Roman Amphora Contents. Reflecting on the Maritime Trade of Foodstuffs in Antiquity. In honour of Miguel Beltrán Lloris, Roman and Late Antique Mediterranean Pottery* 17. Oxford, 149-160.
- QUEVEDO, A. (2015): *Contextos cerámicos y transformaciones urbanas en Carthago Nova (s. II-III d.C.)*. Oxford.
- QUEVEDO, A. (2021): "La producción anfórica de *Carthago Nova* y su territorio: estado de la cuestión", *Spal* 30.1, 196-221.
- QUEVEDO, A. y HERNÁNDEZ GARCÍA, J.D. (2020): "Arqueología de la Hispania tardoantigua: un nuevo proyecto de investigación en La Isla del Fraile (Águilas)", *Saguntum* 52, 135-152.
- REYNOLDS, P. (2021): "The oil supply in the Roman East: identifying modes of production, containers and contents in the eastern Empire", en: BERNAL-CASASOLA, D., BONIFAY, M., PECCI, A. y LEITCH, V., eds., *Roman Amphora Contents. Reflecting on the Maritime*

- Trade of Foodstuffs in Antiquity. In honour of Miguel Beltrán Lloris*. Oxford, 307-354.
- RIERA RULLÁN, M. (2017): *El monacat insular de la Mediterrània occidental. El monastir de Cabrera (Balears, segles V-VIII)*. Studia Archaeologiae Christianae 1. Barcelona.
- ROBLES CARRICHE, A. (2015): "Hoc signo victor eris: el crismón como nuevo símbolo del poder imperial. Su reflejo en las acuñaciones monetales de la dinastía constantiniana", *Antesleria*, 4, 297-310.
- RODRÍGUEZ ALMEIDA, E. (1984): *Il Monte Testaccio: ambiente, storia, materiali*. Roma.
- RUFFOLO, S., ROVELLA, N., ARCUDI, A., CRUPI, V., MAJOLINO, D., OSANNA, M. y LA RUSSA, M. (2020): "New insights to assess the consolidation of stone materials used in built heritage: The case study of ancient graffiti (Tituli Picti) in the archaeological site of Pompeii", *Heritage Science* 8, 49.
- RUSSELL, B. y LEIDWANGER, J. (2020): "The Energetics of Lost Cargoes: A New Perspective on the Late Antique Marzamemi 2 Wreck", *Memoirs of the American Academy in Rome* 65, 194-260.
- SOLEM, D.-Ø. E. y NAU, E. (2020): "Two New Ways of Documenting Miniature Incisions Using a Combination of Image-Based Modelling and Reflectance Transformation Imaging", *Remote Sensing* 12 (10).
- SOLER I NICOLAU, A., FONT JAUME, A., BERNI MILLET, P., GARCÍA RIAZA, E., BERNAL-CASASOLA, D., CAU ONTIVEROS, M.Á., CARDELL PERELLÓ, J. y MUNAR LLABRÉS, S. (2021): "El singular conjunto de tituli picti del pecio de Ses Fontanelles (Mallorca, islas Baleares) y su contribución a la epigrafía anfórica tardorromana hispánica", *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad Autónoma de Madrid* 47-1, 287-317.
- SOLIN, H. (1982): *Die griechischen Personennamen in Rom. Ein Namenbuch, Band III*. Berlín.
- THOMAS, R. (2018): "Naukratis: Ptolemaic, Roman and Byzantine amphorae and stoppers (2018)", en: VILLING, A., BERGERON, M., BOUROGIANNIS, G., JOHNSTON, A., LECLÈRE, E., MASSON, A. y THOMAS, R., eds., *Naukratis: Greeks in Egypt. The British Museum, Online Research Catalogue*.
- TORREGROSA-FUENTES, D., SPAIRANI BARRIO, Y., HUESCA TORTOSA, J.A., CUEVAS GONZÁLEZ, J. y TORREGROSA FUENTES, A.J. (2018): "Application of automated photogrammetry and lighting techniques with GIS tools for visualisation and analysis of a slab with anthropomorphic reliefs", *Virtual Archaeology Review* 9.19, 114-124.
- VIVAR, G. y GELI, R. (2015): *Memòria de l'excavació del derelicta Aiguablava*. Begur, Baix Empordà.
- VIZCAINO, J. y BUSTAMANTE, M. (2022): "Cerámica y luz en el cristianismo de la Antigüedad Tardía. A propósito de un nuevo ejemplar de lucerna de asa plástica con crismón", *Hispania Sacra* LXXIV, 7-19.
- VIZCAINO, J. y PÉREZ, I. (2008): "Ungüentarios bizantinos con sello epigráfico en *Carthago Spartaria*", *Archivo Español de Arqueología* 81, 151-176.
- ZHAO, J., LUO, H., WANG, L., LI, W., ZHOU, T. y RONG, B. (2013): "TEOS/PDMS-OH hybrid material for the consolidation of damaged pottery", *Heritage Science* 1(1): 12.

ANEXO II

Algunas imágenes

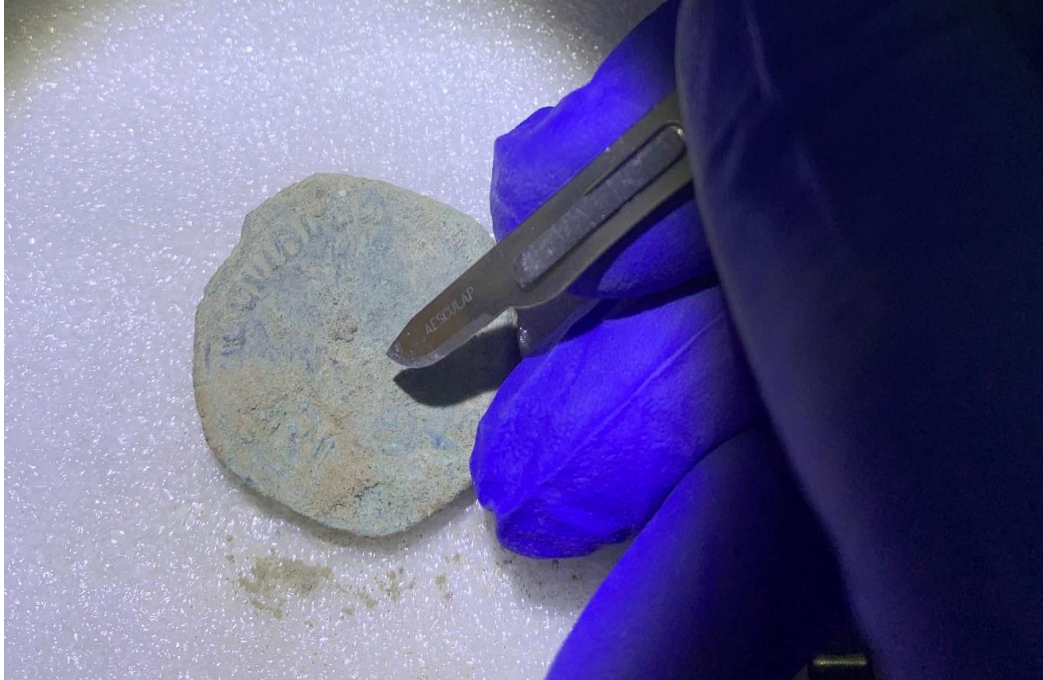


Figura 1. Limpieza mecánica de la colección numismática de San Nicolás (Algeciras). Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Consolidación de las inscripciones de la colección de tituli picti del pecio Ses Fontanelles (Proyecto ARQUEOMALLORNAUTA). Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Sistema de consolidación de la colección de cuero del pecio Ses Fontanelles (Proyecto ARQUEOMALLORNAUTA). Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Consolidación mediante plastinación de una pieza orgánica del pecio Puente Mayorga IV (Proyecto HERAKLES). Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Diseño de estructura de sujeción para tratamiento de pieza orgánica del pecio Puente Mayorga IV (Proyecto HERAKLES). Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. M. Goñalons (centro) y E. Fernández (derecha) realizando un TAC a un taladro de madera del pecio Ses Fontanelles en el Hospital Universitario Puerta del Mar, Cádiz (Proyecto ARQUEOMALLORNAUTA). Fuente: Elaboración propia.