

# LA MONITORIZACIÓN DEL HIERRO ARQUEOLÓGICO SUMERGIDO Y LOS POSIBLES EFECTOS DE SU EXPOSICIÓN *IN SITU* AL PÚBLICO

## ESTUDIO DE LOS FALCONETES DE PUNTA SANTA ANNA, BLANES

**CARLA RIERA ANDREU** Universidad Externado de Colombia - Programa de Arqueología, Fundación Terra Firme, [c.rieraandreu@gmail.com](mailto:c.rieraandreu@gmail.com)

**CARLOS CABRERA** University of Oxford, School of Archaeology, [carlos.cabrera@arch.ox.ac.uk](mailto:carlos.cabrera@arch.ox.ac.uk)

**CARLES AGUILA** Departamento de Protección del Patrimonio Arqueológico Sumergido, FECDAS/CMAS, [arqueologia@fecdas.cat](mailto:arqueologia@fecdas.cat)

**RESUMEN** Actualmente, la conservación *in situ* del patrimonio cultural subacuático y las iniciativas que permiten su acceso público sin necesidad de trasladar los restos a un museo, se están consolidando como una opción válida de conservación y difusión de dicho patrimonio. La no extracción de los objetos evita la traumática exposición del material al medio aéreo, manteniendo el frágil equilibrio que ha permitido preservarlo hasta nuestros días. Sin embargo, esta opción de intervención y gestión plantea importantes retos en la conservación de los restos arqueológicos. En este sentido es necesario diseñar métodos para evaluar y controlar el estado de preservación de los objetos. Por un lado, es preciso identificar los posibles procesos de degradación que esté sufriendo el material junto con los factores causantes de las alteraciones. Por otro lado, debe evaluarse el impacto que pueda tener el público en la estabilidad de los restos arqueológicos así como en el entorno en el que se ubican. Tomando como caso de estudio unas piezas de artillería de hierro ubicadas en el yacimiento submarino de Punta Santa Anna (*Blanes*, España), se propone un método de evaluación del estado de preservación. Este consiste en monitorizar periódicamente el entorno y registrar datos relativos al proceso de corrosión; pH, potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y el espesor de la capa de concreción. El objetivo es determinar el ritmo de oxidación del metal e identificar los factores externos que inciden en este proceso. El análisis de estos datos permitirá diseñar estrategias de intervención *ad hoc* que garanticen una correcta conservación y gestión de éstos restos arqueológicos.

**PALABRAS CLAVE** Conservación *in situ*, monitorización periódica, corrosión del hierro, difusión

**ABSTRACT** Nowadays, *in situ* conservation of underwater cultural heritage (UCH) and projects that, without transferring the remains to a museum, allow public access to it are emerging as an effective alternative for the conservation and dissemination of the UCH. Maintaining these artefacts *in situ* (i.e. underwater) prevents their traumatic exposure to the aerial environment, maintaining the fragile equilibrium that allowed their preservation until now. However, this type of intervention and management poses significant challenges for the conservation of archaeological remains. In this sense it is necessary to devise methods to assess and monitor the preservation state of these artefacts. On the one hand, potential degradation processes that the material could be suffering along with the factors that cause them must be identified. On the other hand, the impact of public access in the stability of the archaeological remains and the marine environment in which they lay must be assessed.

Taking as a case study four iron cannons located at the Punta de Santa Anna underwater site (*Blanes*, Spain), a method for evaluating their preservation state is proposed. The method consists in periodically monitoring the environment and to record data in relation to the corrosion process; pH, corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) and thickness of the incrustation layer. The goal is to determine the oxidation rate of the metal and to identify external factors that influence this process. Data analysis will allow designing *ad hoc* intervention strategies that ensure the appropriate conservation and management of these archaeological remains.

**KEYWORDS** *In situ* conservation, periodic monitoring, iron corrosion, public outreach

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe un proyecto de conservación y difusión diseñado para el yacimiento arqueológico subacuático de Punta Santa Anna, ubicado en la costa de Blanes, España (figura 1). Este proyecto (Riera *et al.*, 2016) tiene su origen en dos iniciativas distintas. Por un lado, un trabajo final de máster (Riera, 2015) dedicado a la conservación *in situ* del patrimonio arqueológico subacuático, y centrado especialmente en los tratamientos de estabilización de los artefactos de hierro ubicados en ambientes submarinos. Por otro lado, las actividades de sensibilización dirigidas al colectivo submarinista, y realizadas desde el Departamento de Protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático de la FECDAS/CMAS en Barcelona (Aguilar, 2011) (figura 2). El proyecto se estructura en torno a la iniciativa de permitir el acceso público a este yacimiento arqueológico subacuático desde la responsabilidad de velar por la conservación del material arqueológico allí localizado. De esta manera, el objetivo principal es diseñar un proyecto en el que se dé prioridad a la difusión del patrimonio cultural al conjunto de la sociedad de la misma manera que se garantice la conservación de los objetos que componen el yacimiento. Es decir, que la difusión del patrimonio no ponga en peligro su conservación, o lo que es lo mismo, que las estrategias de conservación sean compatibles con su difusión.



1. Mapa con la localización de Blanes, localidad en la que se encuentra el yacimiento de Punta Santa Anna.



2. Visita a un pecio romano organizada por la FECDAS en colaboración con el CASC-MAC. © FECDAS/CMAS

## ANTECEDENTES

Durante muchos años, la tendencia habitual de intervención sobre el patrimonio arqueológico subacuático ha sido la extracción y el traslado sistemático de los restos a laboratorios y museos. En las últimas décadas, la conservación *in situ* ha cobrado protagonismo como opción de conservación; sin embargo, es necesario estudiar cuál es la mejor estrategia de intervención según las características de cada yacimiento en particular. En este sentido, existen múltiples experiencias de investigación centradas tanto en el seguimiento del estado de preservación de los materiales que permanecen en ambientes subacuáticos, como en el diseño de estrategias de difusión del patrimonio que se mantiene en un ambiente de acceso limitado. Con respecto a la conservación *in situ* de artefactos de hierro ubicados en ambientes submarinos, en la década de 1980 se empezó a realizar mediciones de parámetros electroquímicos para describir el proceso de corrosión. La protección catódica se aplicó como técnica para estabilizar grandes artefactos de hierro, y con la monitorización periódica se mostró la eficacia de los ánodos de sacrificio para ralentizar el proceso de corrosión estabilizando el material *in situ*. En relación a estas prácticas, se destacan las experiencias publicadas por los investigadores Ian Macleod, Vicky Richards o Cecilia Bartuli. En relación a la difusión del patrimonio arqueológico subacuático que permanece en el fondo marino, existen iniciativas que proponen permitir un acceso público al yacimiento. Conocer este patrimonio accediendo directamente a su emplazamiento original puede ser en muchos casos, un opción perfectamente válida para divulgar el patrimonio. Sin embargo, es necesario tener en cuenta muchos factores para diseñar el formato de visita más adecuado. En este sentido, el análisis de esta posibilidad de difusión así como las diferentes experiencias realizadas hasta la actualidad, se recogen en publicaciones de diferentes autores: Martijn Manders (2009), Carles Aguilar (2011), Rocio Castillo (2009) o Barbara Davidde (2002).

### EL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO SUBACUÁTICO DE PUNTA SANTA ANNA

El yacimiento que es objeto de este proyecto está formado por una bombardera y tres falconetes datados entorno a los siglos XV-XVI<sup>1</sup> (figura 3). Estos artefactos se encuentran a una profundidad de 15 metros, en una zona próxima a la costa y de fácil acceso para los submarinistas. Habitualmente estos restos son visitados por submarinistas deportivos aunque no exista ningún proyecto de gestión o difusión, ni de conservación o salvaguarda del patrimonio. Se puede considerar que, además de no ser apreciados como patrimonio cultural, estas piezas de artillería están a merced de la voluntad del público así como de los factores ambientales que caracterizan su entorno.

1. Este yacimiento, registrado en la carta arqueológica subacuática de Catalunya, fue severamente expoliado en las décadas anteriores; se conoce que además de estas piezas de artillería, había balas de cañón de piedra, restos de cerámica y defensas de elefante.



3. Estado actual de uno de los falconetes del yacimiento de Punta Santa Anna. © FECDAS/CMAS

### LA DIFUSIÓN DEL YACIMIENTO

Desde el punto de vista de la difusión de este patrimonio, se propone señalar este yacimiento como un punto de interés cultural, ofreciendo a los visitantes la posibilidad de contextualizar los restos y apreciar su valor histórico y arqueológico. A través de un club de submarinismo de la zona vinculado al proyecto, sería posible visitar el yacimiento de manera organizada, siguiendo un recorrido y teniendo acceso a un material didáctico realizado por un arqueólogo.

Para permitir al público, concretamente al colectivo submarinista, acceder a los yacimientos sumergidos *in situ*, es preciso destacar la necesidad de trabajar previamente su concienciación sobre el valor y responsabilidad de proteger el patrimonio cultural subacuático. Los submarinistas deportivos dominan el acceso a un ambiente que alberga gran cantidad de yacimientos, por lo tanto tienen un papel decisivo en la localización y protección de estos restos. Paralelamente, y desde el punto de vista de la conservación, el acceso del público al entorno de un yacimiento debe ser considerado como un potencial factor externo de degradación; desde los posibles actos vandálicos hasta la perturbación de la dinámica del entorno con la simple presencia de los submarinistas. Teniendo esto en cuenta, se hace evidente la necesidad de complementar los proyectos de visitas *in situ* con un proyecto de conservación de los restos visitados.

### LA CONSERVACIÓN DEL YACIMIENTO

El objetivo del proyecto de conservación es diseñar un método de control y evaluación del estado de preservación de los artefactos de hierro ubicados en el yacimiento de Punta Santa Anna. Este método consiste en la obtención de una serie de datos que describen el proceso de corrosión de las piezas de artillería y la dinámica del entorno. El análisis de estos datos permitirá comprender la relación establecida entre el metal que compone los artefactos, y los elementos que lo rodean. Con esto, se podrá determinar si el hierro está estable en ese ambiente en concreto o si, por el contrario, está sufriendo una degradación y, en este caso, se podrá señalar cuál es la causa de la alteración. El

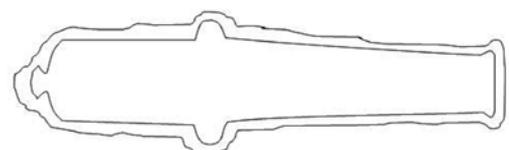
objetivo final de este método de evaluación es tener la información suficiente para que, una vez analizada, se pueda proponer una estrategia de conservación justificada y ajustada a las necesidades del material arqueológico ubicado en el yacimiento.

### OBTENCIÓN DE DATOS

La recopilación de datos propuesta consiste en una caracterización inicial y exhaustiva del entorno y de los artefactos, seguida de una monitorización periódica durante dos años. Los datos a registrar se han clasificado en tres grupos. El primero es el ENTORNO DEL YACIMIENTO; mediante descripciones, fotografías y mapas debe definirse la ubicación y orientación de los artefactos, el tipo de sedimento, las corrientes marinas y la fauna y flora característica, además deben registrarse las actividades antrópicas y los fenómenos meteorológicos que tienen incidencia en esta zona. Este grupo de datos pretende describir la dinámica del entorno entendiéndolo como un espacio contenedor de los restos arqueológicos; la presencia o ausencia de ciertos elementos pueden afectar directamente al material o pueden influir en la activación o inhibición de los procesos de alteración del material arqueológico. Después del estudio inicial realizado por arqueólogos y conservadores, el club de buceo vinculado al proyecto se encargará de realizar un control visual periódico del entorno y de los artefactos. Mediante una ficha de registro, deberá informar al equipo de profesionales sobre el funcionamiento de las visitas organizadas, el comportamiento de los visitantes y las posibles alteraciones que se detecten tanto en los artefactos como en el entorno (figura 4).

El segundo grupo es la SUPERFICIE METÁLICA DEL ARTEFACTO, este incluye el registro mensual de los datos relativos al proceso de corrosión del hierro; que representa el principal mecanismo de degradación de

<b>DATOS DE LA VISITA</b>	
<i>Valoración de comportamiento participantes:</i>	
TEMPERATURA AGUA:	Nº PARTICIPANTES:
<b>OBSERVACIONES DEL ENTORNO</b>	
<i>Anotar cambios o alteraciones en el entorno del yacimiento</i>	
<b>OBSERVACIONES DEL ARTEFACTO</b>	
<i>Anotar cambios o alteraciones en los artefactos</i>	
<b>ESQUEMA DE DAÑOS</b>	

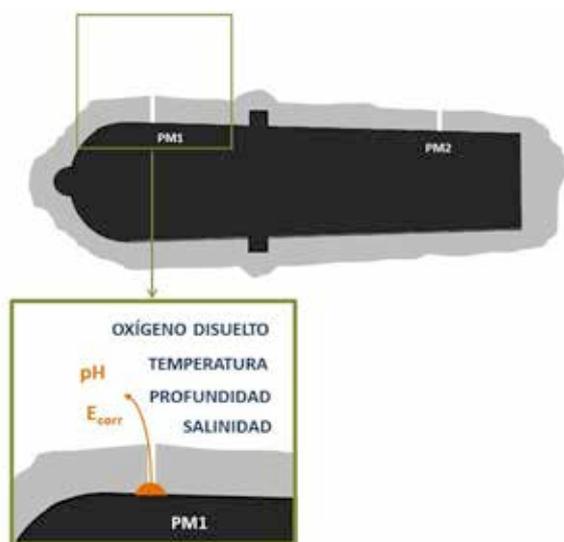


4. Ficha de registro del control visual y el funcionamiento de las visitas dirigidas por el club de buceo vinculado al proyecto.

este material depositado en ambientes submarinos. En primer lugar es necesario establecer en cada pieza de artillería dos puntos de medición; *PM1* y *PM2*, donde se realizarán sendas perforaciones a través de la capa de concreción hasta llegar a la superficie del artefacto<sup>2</sup>. A través de estas perforaciones se introducirán los electrodos que registrarán el valor del pH y del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). Además, a través de estas perforaciones, será posible determinar el grosor de la concreción<sup>3</sup> (figura 5). Este grupo de datos nos aportará información sobre la actividad y velocidad de la reacción de oxidación-reducción del hierro, de manera que se podrá determinar el ritmo de degradación. Finalmente, el tercer grupo de datos es el ENTORNO DE LOS ARTEFACTOS. Este está formado por los elementos del ambiente marino que pueden tener una influencia en el proceso de corrosión; la temperatura del agua, la profundidad, el contenido de oxígeno disuelto y la salinidad del agua. Los dos primeros serán medidos justo en los orificios de los puntos de medición (*PM*), mientras que para los otros dos será necesario tomar una muestra de agua para analizarla en un laboratorio. El registro mensual de estos valores permitirá observar su posible incidencia en la reacción de oxidación-reducción; de esta manera se podrá señalar si alguno de estos elementos está motivando el proceso de corrosión y, en consecuencia identificar la/s causa/s de un posible deterioro del hierro.

2. Los agujeros deben taparse después de cada registro de datos; el agua de mar actúa como electrolito incrementando el índice de corrosión del metal. Es necesario aplicar un material que actúe de barrera protectora, tal como suele ocurrir con la capa de concreción (Zambrano y Bethencourt, 2001, p. 87).

3. Con respecto a la metodología para registrar el pH y el  $E_{corr}$  de la superficie metálica de artefactos de hierro ubicados en ambientes submarinos, se recomienda (Bartuli *et al.*, 2008; Zambrano y Bethencourt, 2001; Gregory, 1999; Heldtberg *et al.*, 2004).

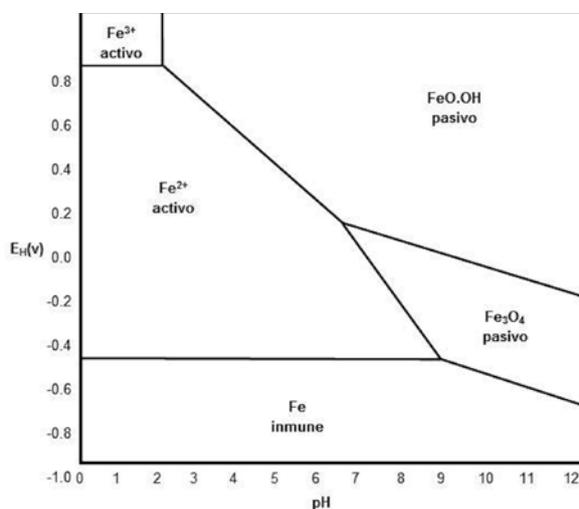


5. Diagrama de una pieza de artillería con los agujeros en los puntos de medición *PM*, y junto a los elementos a registrar del grupo entorno de los artefactos y superficie metálica del artefacto.

## ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Los datos recopilados a lo largo de los dos años de estudio se analizarán acorde a dos objetivos: entender el proceso de corrosión del hierro de los artefactos del yacimiento de Punta Santa Anna, e identificar los factores externos que puedan tener una influencia negativa en la preservación del hierro.

La descripción del proceso de corrosión se obtendrá con el diagrama de *Pourbaix* (figura 6), un mapa de estabilidad termodinámica que relaciona el potencial ( $E$ ) con el pH para determinar si el metal está en una región activa, pasiva o inmune (Macleod, 1989). Estos datos indicarán también la velocidad del proceso de corrosión, por lo que será posible hacer un pronóstico de la supervivencia del material en ese contexto concreto (Heldtberg *et al.*, 2004). El índice de corrosión de los artefactos ubicados en ambientes submarinos está sujeto a la dinámica de su entorno. Para poder señalar cuáles son los factores externos que pueden estar afectando al artefacto, debe entenderse el entorno subacuático como un sistema dinámico en el que interactúan múltiples factores, y en donde la modificación de un solo elemento puede tener incidencia en todo el sistema (Selwyn, 2006). El registro de la temperatura, la profundidad, el oxígeno disuelto y la salinidad, junto con la valoración de las visitas guiadas y el control visual por parte del club de submarinismo, aportará información suficiente para describir el entorno teniendo en cuenta los factores externos de alteración tanto naturales como antrópicos. En este punto del análisis de la información recopilada, será posible identificar la/s causa/s de la degradación del hierro, y plantear estrategias de intervención para la protección de los artefactos.



6. Diagrama de *Pourbaix* para hierro ( $10^{-6}M$ ) en ambiente submarino a  $25^{\circ}C$  (Adaptación de Heldtberg *et al.*, 2004, p. 80).

## RESULTADOS ESPERADOS – ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN

El análisis de los datos describirá el ritmo de degradación del hierro y la dinámica del entorno, lo que llevará a determinar el impacto del ambiente en la preservación de los artefactos. Los valores de pH y  $E_{corr}$  reflejarán el ritmo de corrosión, pudiendo mostrar diferentes escenarios. En el mejor de los casos, se observaría una reacción de oxidación-reducción lenta y regular definida por unos niveles mínimos del ritmo de corrosión (Bartuli *et al.*, 2008, p. 5) y (Gregory, 1999, p. 168). Esto indicaría que el entorno es estable y favorable para la preservación del material; entre otros factores, las actividades antrópicas realizadas en la zona, como son las visitas guiadas, no significarían una amenaza para la integridad del material. En este caso, la estrategia de intervención propuesta consistiría en un programa de monitorización menos frecuente a modo de seguimiento.

Por el contrario, se podría observar un proceso de corrosión elevado o irregular, lo que sugeriría que algún elemento del entorno está motivando la reacción de oxidación-reducción del hierro. Relacionando los datos registrados referentes a los elementos del entorno podría identificarse la posible causa de la degradación detectada. En el caso de ser consecuencia de las visitas de submarinistas, la estrategia se focalizaría en revisar el proyecto de difusión para valorar la opción de restringir o limitar el acceso al yacimiento (Davidde, 2002, p. 84; Stainforth, 2006, p. 52). En el caso de detectar que la propia dinámica del entorno no permitiese la preservación del hierro, se propondría una intervención sobre los propios artefactos; una protección catódica.

La protección catódica es un método de protección electroquímico utilizado para prevenir el proceso de corrosión de metales expuestos a entornos conductores como es el ambiente submarino (Bartuli *et al.*, 2008, p. 5-6.). Consiste en provocar un cambio de polaridad en el proceso de reducción-oxidación del hierro que se pretende proteger; mediante la colocación de unos ánodos de sacrificio, el objeto arqueológico metálico actúa como cátodo experimentando la reacción de reducción y ganando protección (Macleod, 1998, p. 117). Las múltiples experiencias publicadas sobre la aplicación de este método han demostrado su eficacia para rebajar el ritmo de corrosión a niveles mínimos o aceptables para garantizar la preservación del metal (Macleod, 1998; Gregory, 1999; Heldtberg *et al.*, 2004;

Bartuli *et al.*, 2008.). La implementación de este tratamiento implicaría un programa de mantenimiento de los ánodos, una supervisión de la efectividad a lo largo del tiempo y un estudio para evaluar el impacto los productos de oxidación de los ánodos sobre el entorno y el ecosistema (Heldtberg *et al.*, 2004, p. 76).

## CONCLUSIONES

El presente proyecto pretende juntar en un solo yacimiento las experiencias de difusión y de conservación realizadas sobre el patrimonio arqueológico sumergido que permanece *in situ*. El proyecto consiste en combinar las visitas de los submarinistas deportivos a las piezas de artillería, con un estudio y evaluación de la degradación del hierro del que están compuestas. El propósito es estudiar el estado del hierro para determinar si el ambiente en el que se encuentran los objetos permite su preservación, a la vez de evaluar si el acceso público al yacimiento es viable y no supone ninguna amenaza para el material arqueológico. El análisis de los datos recopilados aportará información suficiente para, en caso de ser necesaria, diseñar una estrategia de intervención capaz de mitigar las causas del posible deterioro. Siguiendo con la intención de compatibilizar el proyecto de conservación con el de difusión, la estrategia de intervención intentaría conciliar la posibilidad de continuar con las visitas *in situ* al yacimiento.

En relación a la temática del congreso, este proyecto se construye en concordancia a la idea de que los objetos arqueológicos y la información que estos transmiten deben llegar a la sociedad, a la vez que se persigue su conservación y salvaguarda. En este sentido, se apuesta para que la arqueología trabaje estrecha y conjuntamente con el campo de la difusión y el de la conservación del patrimonio cultural subacuático.

Finalmente, indicar que el proyecto Punta Santa Anna, podría ser una de las primeras iniciativas de este tipo en mediterráneo español. Los resultados obtenidos de este proyecto podrían ayudar a definir un protocolo de actuación aplicable a otros yacimientos presentes en las cartas arqueológicas sobre los que no exista un proyecto de difusión, gestión o conservación. Iniciativas de este tipo podrían contribuir a acercar la arqueología subacuática a la sociedad de una forma alternativa, a la vez que se atienden las necesidades de conservación y la responsabilidad de la salvaguarda del patrimonio.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, C. (2012) – La participación de las federaciones deportivas de buceo en la protección del patrimonio arqueológico subacuático: proyectos y experiencias de cooperación entre FECDAS/CMAS y CASC-MAC. In CASCALHEIRA, J.; GONÇALVES, C., eds., *Actas das IV Jornadas de Jovens em Investigação Arqueológica*. Vol. II. Faro: Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências Humanas e Sociais, Núcleo de Arqueologia e Paleoeologia, p. 44-48 (Promontoria monográfica, 16).
- BARTULI, C., PETRIAGGI, R., DAVIDDE, B., PALMISANO, E.; LINO, G. (2008) – *In situ* conservation by cathodic protection of cast iron findings in marine environment. *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 5, p. 1-8.
- CASTILLO, R. (2009) – Conservación *in situ* de yacimientos subacuáticos. *Revista de la Asociación Profesional de Museólogos de España*, 14, p. 9-41.
- DAVIDDE, B. (2002) – Underwater archaeological parks: a new perspective and a challenge for conservation - the Italian panorama. *The International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 31: 1, p. 83-88.
- GREGORY, D. (1999) – Monitoring the effect of sacrificial anodes on the large iron artefacts on Duart Point wreck, 1997. *The International Journal of Nautical Archaeology*, vol. 28: 2, p. 164-173.
- HELDTBERG, M.; MACLEOD, I.; RICHARDS, V. (2004) – Corrosion and cathodic protection of iron in seawater: a case study of the *James Matthews* (1841). In ASHTON, J.; HALLAM, D., ed., *Metal 04: International Conference on Metal Conservation*. Canberra: National Museum of Australia, p. 75-87.
- MACLEOD, I. (1989) – The application of corrosion science to the management of maritime archaeological sites. *Bulletin of the Australian Institute for Maritime Archaeology*, vol. 13: 2, p. 7-16.
- MACLEOD, I. (1998) – *In situ* corrosion studies on iron shipwrecks and cannon; the impact of water depth and archaeological activities on corrosion rates. In MOUREY, W; ROBIOLA, L., eds., *Metal 98: International Conference on Metals Conservation*. Malta: James and James, p. 116-124.
- MANDERS, M. (2009) – *In situ* Preservation: the preferred option. In *Museum International. ICOMOS*, 60: 4, p. 31-41.
- RIERA, C. (2015) – *Investigación de las actuales tendencias de conservación in situ en arqueología subacuática. Estudio y análisis sobre la protección física de los artefactos de hierro conservados en ambientes submarinos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia (Tesis de master).
- RIERA, C., AGUILAR, C; CABRERA, C. (2016) – Studying the cannons of *Punta Santa Anna*, Spain; *in situ* conservation, promoting public access and monitoring iron corrosion. In *Conservation and Management of Archaeological Sites*, vol. 18, p. 353-363.
- SELWYN, L. (2006) – Corrosion of metal artifacts in buried environments. *ASM Handbook*. Vol. 13C, p. 306-322.
- STAINFORTH, M. (2006) – *In situ* site stabilization: The William Salthouse case study. In GRENIER, R.; NUTLEY, D.; COCHRAN, I., eds., *Heritage at Risk - Special edition. Underwater Cultural Heritage at Risk: Managing Natural and Human Impacts*. Munchen: ICOMOS, p. 52-54.
- ZAMBRANO, L.; BETHENCOURT, M. (2001) – Conservación y registro arqueológico en el yacimiento submarino *Bucentaurie II* de La Caleta, Cádiz. *PH Boletín*, n.º 36, p. 83-90.