

ESTUDIO METODOLÓGICO SOBRE REGISTRO DE ESCORIAS ARQUEOLÓGICAS EN CAMPO Y LABORATORIO. UN CASO DE ESTUDIO: EL *OPPIDUM* DE SIERRA BOYERA

METHODOLOGICAL STUDY ON REGISTRATION OF ARCHAEOLOGICAL SLAGS IN FIELD AND LABORATORY. A CASE STUDY: THE SIERRA BOYERA *OPPIDUM*

Pablo GONZÁLEZ ZAMBRANO*

Resumen

En el presente artículo se presenta el cuerpo metodológico llevado a cabo durante la intervención arqueológica de urgencia en el Oppidum de Sierra Boyera en 2021. Desarrollamos todo el proceso de documentación y registro de materiales relacionados con la actividad metalúrgica identificada en dicho yacimiento. Los estudios de laboratorio permitieron poner en contexto dichos hallazgos dentro del yacimiento gracias a la documentación realizada durante el proceso de excavación. Por lo que pudimos determinar la presencia de metalurgia tanto de base hierro como de base cobre en el Oppidum de Sierra Boyera.

Palabras clave

Registro, metodología, metalurgia, escorias, Oppidum de Sierra Boyera

Abstract

This article presents the methodological body carried out during the emergency archaeological intervention in the Sierra Boyera Oppidum in 2021. We develop the entire process of documentation and registration of materials related to the metallurgical activity identified in said site. The laboratory studies allowed these findings to be put into context within the site thanks to the documentation carried out during the excavation process. Therefore, we were able to determine the presence of both iron-based and copper-based metallurgy in the Sierra Boyera Oppidum.

Key words

Registration, methodology, metallurgy, slags, Oppidum de Sierra Boyera

INTRODUCCIÓN

La región del Norte de Córdoba ha sido durante los últimos tres milenios una zona caracterizada por la extracción minera y la producción metalúrgica, hecho que permanece grabado en el imaginario colectivo en la actualidad. El hallazgo del *Oppidum* de Sierra Boyera (Belmez, Córdoba; a partir de ahora OPSB), abrió una nueva vía en la investigación de la Protohistoria del Alto Valle del Guadiato que hasta ese momento permanecía inédita, ya que las romanas y posteriores poseen un mayor recorrido (Fig. 1). La ausencia de las fuentes a este respecto es uno de los grandes escollos con los que nos topamos al inicio de esta investigación, debido principalmente a que son autores grecolatinos posteriores los que aportan noticias sobre la riqueza minera de Sierra Morena Central, a través de descripciones muy escuetas y generales. Es por ello que debimos recurrir a fuentes arqueológicas, estudios arqueográficos de la región, también escasos, y dentro de la disciplina arqueológica aplicar metodologías arqueométricas al registro arqueometalúrgico del yacimiento, así como un esbozo del paisaje minero que nos permitirá ciertas conclusiones que veremos posteriormente.

Debemos apuntar que el yacimiento del OPSB se encuentra dentro de la cota de afección del actual embalse de Sierra Boyera por lo que pasa largas temporadas bajo sus aguas con todos los problemas de conservación que conlleva ello, y por supuesto de lectura estratigráfica, ya que pierde en torno a 8-10 cm de sedimento con cada subida y bajada del nivel del pantano.

* Universidad de Granada pgz1988@correo.ugr.es

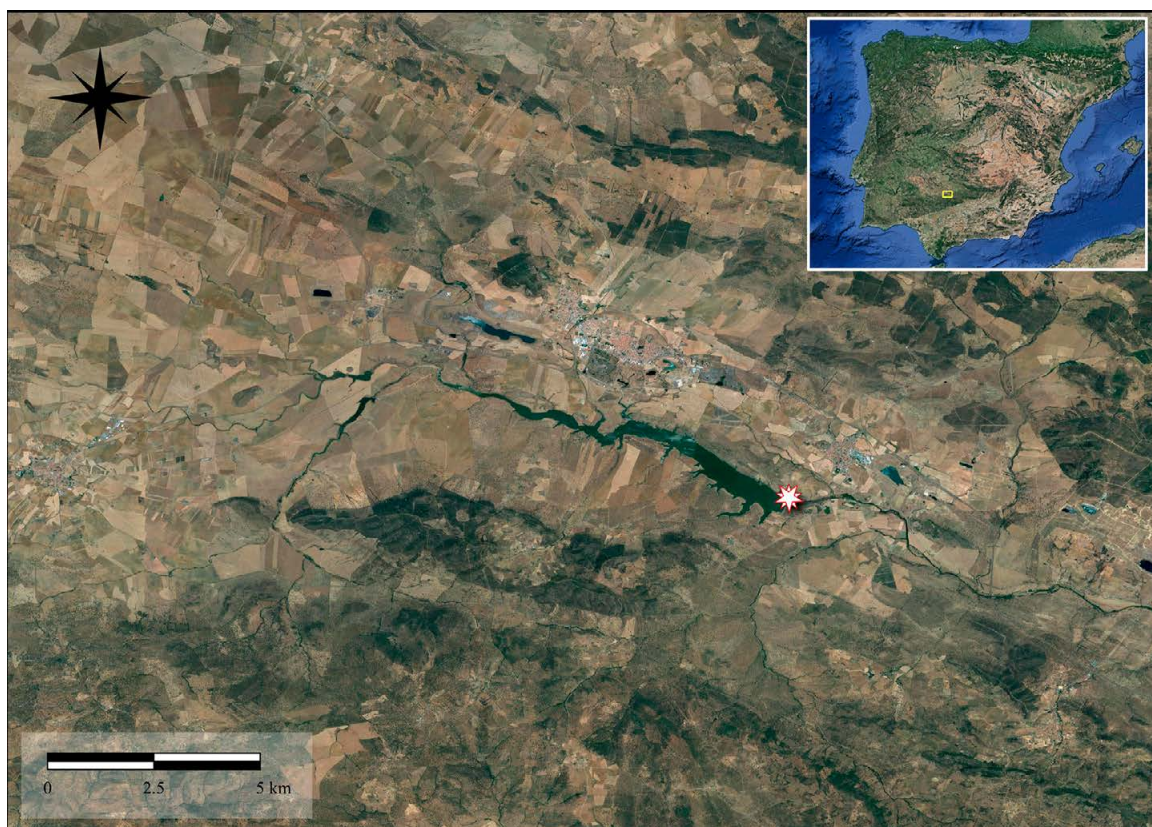


Fig. 1. Situación del Oppidum de Sierra Boyera.

Durante las intervenciones realizadas en dicho yacimiento en los años 2018 y 2019 bajo la dirección de D^a. A. Cristo-Ropero, se documentaron restos de actividad metalúrgica, pero sin poder identificar estructuras asociadas a esta. Es por ello por lo que se decidió intervenir en enero de 2021 con el objetivo de registrar la producción metalúrgica del sitio, y en tal caso ponerla en relación con el paisaje que rodea a este yacimiento, en este caso la intervención fue dirigida por D^a. M. Murillo Barroso. Este trabajo quedará circunscrito en términos cronológicos a los siglos IV-II a. C., datación realizada a partir cronología relativa en base a los elementos cerámicos hallados en los niveles y espacios donde se ha identificado algún tipo de actividad metalúrgica (Fig. 2).

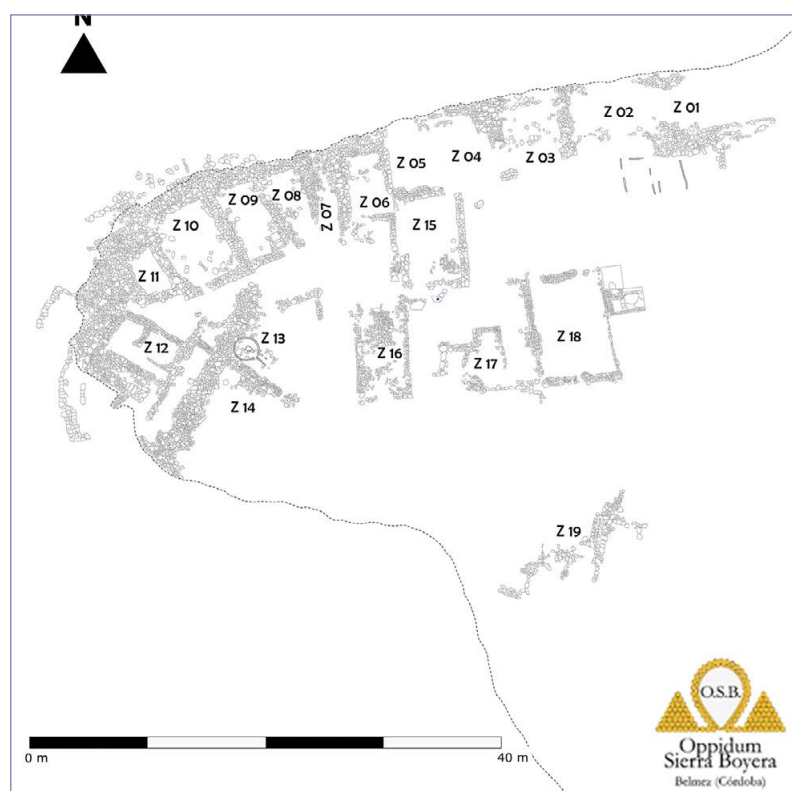


Fig. 2. Planimetría del sector NO del OPSB.

Esta cronología nos hizo prestar especial atención al mundo púnico, concretamente al periodo de toma de control político-económico de las minas que pudo lugar tras la I Guerra Púnica y la conquista de Roma en esta región tan rica en recursos mineros, en el que el control de las minas debió ser estatal, primeramente, púnico y luego romano (BLÁZQUEZ MARTÍNEZ 1989: 119). El interés de los bárquidas por los recursos mineros de Hispania se acentuó tras el fracaso del primer conflicto entre romanos y cartagineses, lo que obligo a estos últimos a replegarse a la península ibérica en busca de nuevos circuitos comerciales y zonas de extracción de materias primas (GONZÁLEZ WAGNER 1999: 264). Es en este marco donde se ubica el OPSB, en los albores de la llegada de Publio Cornelio Escipión a las costas de Ampurias en 218 a. C., y diera comienzo el fin del mundo fenicio-púnico en Hispania y comenzará el periodo romano. El interés por la minería de Hispania por parte de los romanos se pudo constatar por la conquista selectiva de enclaves de sumo interés en este aspecto, como Cástulo o Cartagena y otros de Sierra Morena Central (ARBOLEDAS MARTÍNEZ 2008: 72), así como la puesta en producción de nuevas minas, como la de La Loba (Fuenteobejuna) a escasos 14 km del OPSB, una vez que este ya había abandonado.

El hecho de que no apareciera cerámica romana de ningún tipo, ni apenas materiales de importación centro-mediterráneo nos hizo plantearnos si esta región se encontraría dentro de la órbita púnica, pero fuera de los circuitos comerciales romanos. Otro punto que debimos considerar fue si estábamos ante un yacimiento habitacional con un área productiva en sus afueras o en una fase de reocupación de época púnica exclusiva, con fines meramente productivos. Por lo que debíamos plantearnos también, si esta era un centro receptor de materias primas, transformación y redistribución, y si es un asentamiento especializado único o uno más dentro de una gran red de centros destinados a la producción minero-metalúrgica.

Plantear un estudio arqueometalúrgico con los resultados obtenidos de la excavación, pretende ser un acercamiento al poblamiento protohistórico del Norte de Córdoba, la producción minera y la presencia púnica en la zona.

Durante esta última intervención, se pudo documentar un taller de herrero, identificando los diferentes elementos de la producción metalúrgica como tres hornos de reducción, dos yunques de piedra, una fragua o toberas. En este trabajo nos centraremos en un subproducto de dicha producción como son las escorias, resultado de la reducción de minerales metalíferos tras un proceso a partir de las reacciones químicas que tienen lugar en el interior del horno entre la ganga del mineral, los fundentes, los materiales del horno y el combustible, que generalmente es carbón vegetal, dando como resultado una composición química de silicatos complejos. El objetivo principal de la escorificación es la separación de la ganga del mineral metálico, para ello se da un primer proceso de reducción en el que, debido a las condiciones del horno, en este caso de chimenea, se forma monóxido de carbono ($2CO$), al existir una falta de oxígeno ya que el horno se ha cargado no solo con carbón sino también con mineral y fundentes óseos, que aportan Ca para bajar la temperatura de reducción de los minerales presentes, metálicos, o no (GENER MORET 2010: 196-197).

Por tanto, las escorias aportan una información arqueológica abundantísima que permite determinar desde la temperatura alcanzada, la eficiencia del proceso de reducción o los minerales empleados. Es por ello por lo que su documentación minuciosa tanto *in situ* en el yacimiento como su tratamiento posterior en el laboratorio se antoja fundamental para entender un centro productivo como el que aquí tratamos. Aquí plantearemos el método empleado para su registro durante la intervención llevada a cabo en el OPSB.

La elección metódica establecida para este trabajo la hemos dividido en dos apartados con el fin alcanzar a los objetivos y constatar las hipótesis de partida planteadas en base a los datos obtenidos en dichas analíticas, lo que permitiría formular una interpretación tecnológica e histórica en base a simetría. Los criterios establecidos para definir cada uno de estos apartados han sido determinados a partir de las técnicas empleadas.

Los criterios establecidos para elegir, de entre el conjunto de posibles técnicas descriptivas y analíticas actualmente empleadas en arqueología (contextos de recuperación y descripción analítica), han sido seleccionados por el método, es decir el camino que nos llevará a conseguir los objetivos planteados inicialmente. Por lo que cada uno de estos procesos de documentación han sido determinados metodológicamente a partir de las técnicas empleadas en cada uno de los apartados de registro y descripción analítica (empíricas) de la cultura material y sus contextos, de cómo la metodología apropiada para alcanzar los objetivos planteados y las comprobaciones hipotéticas a despejar o reformular.

El primero de ellos será el método de recuperación que se aplicó en campo durante la intervención en el OPSB, en la que la documentación de parte del proceso metalúrgico presente en este yacimiento cobró especial importancia en el proceso de registro.

El segundo bloque versará sobre los procedimientos de inventario, catalogación, registro y analíticas realizadas en laboratorio del material relacionado con la actividad metalúrgica en general y de las escorias y los materiales escorificados en particular, convertido aquí en un método empírico de laboratorio que posibilite una lectura arqueométrica (cuantitativa) del registro recuperado, base imprescindible para la obtención de datos que permitan elaborar descripciones analíticas que sustenten la formulación de hipótesis y propuestas interpretativas.

MÉTODO DE EXCAVACIÓN Y REGISTRO DE CAMPO

La intervención de campo se llevó a cabo en la excavación del Sondeo 2 del OPSB en la campaña enero-febrero de 2021. Esta intervención tenía como principal objetivo la documentación de una estructura de adobe con planta circular y pilar central con un pasillo rectangular que se documentó en la prospección inicial, que fue interpretada como un horno cerámico. En dicha estructura aparecieron abundantes restos de escorias y materiales escorificados, que no parecían tener relación con la producción cerámica (CRISTO-ROPERO Y GONZÁLEZ-ZAMBRANO 2020: 43). Para poder documentar los diferentes usos de la estructura se planteó un sondeo de 7 x 5 m, con el lateral más largo en dirección Norte-Sur, si bien la excavación del sondeo no se ha concluido, llegando solo hasta unos 70/100 cm de profundidad. Antes de comentar la propia estrategia de documentación de los hallazgos metalúrgicos o de sus contextos de producción, debemos comentar el sistema de registro, tanto de las unidades estratigráficas como de los propios artefactos, ecofactos y niveles construidos.

Durante la intervención arqueológica se siguieron los principios de estratigrafía y metodología de E. C. Harris (1991) junto a A. Carandini (1997), con el objetivo de secuenciar diversos niveles antropizados o unidades estratigráficas, así como la secuenciación y ordenación de las fases, usos y abandonos del yacimiento. La identificación de las distintas unidades estratigráficas se realizó según las características intrínsecas como su color, la composición de la matriz, el tipo y cantidad de inclusiones, texturas, el relieve y la extensión de cada una de ellas, junto con otras de tipo indirecto como la tipología, morfología y posición de los artefactos o ecofactos que se encontraron en cada una de ellas.

Esta documentación se realizó mediante un sistema de fichas propias, en las que se realizaban una caracterización de la matriz, las inclusiones, las relaciones estratigráficas, la posible interpretación, la disposición y la extensión, así como el riesgo de contaminación, el tipo de excavación y muestras y las bolsas de tipología de material documentado. Para la documentación espacial de cada una, se realizaron fotografías individualizada y fotogrametrías diarias generales sobre las que se efectuaban las plantas de cada una de las fases, sobre las que se tomaban las cotas diarias.

En lo referente a los artefactos y ecofactos se realizó una recogida exhaustiva del material por unidades estratigráficas, así como la documentación de ciertos elementos relevantes, que se han ubicado dentro de las fotogrametrías diarias a partir de un sistema de coordenadas propio del sondeo.

En estas líneas nos detendremos en los elementos metalúrgicos documentados, principalmente las escorias, materiales escorificados y estructuras asociadas. Los artefactos fueron georeferenciados en el sondeo a partir de un sistema de localización de coordenadas propio, para los que se les dotó de un número de campo acompañado de la unidad estratigráfica a la que pertenecía, así como el día que se localizó (Fig. 3).



Fig. 3. Sistema de georreferenciación in situ de las escorias y materiales escorificados del sondeo 2 (izq). Toma de fotos de los materiales del sondeo 2 antes de ser recogidos (derch).

Esta información se plasmó en el croquis de la planta del sondeo en base a la fotogrametría del día anterior (con las alteraciones necesarias) en el que se incluía las cota máxima y mínima del artefacto. Su documentación se efectuó dentro del espacio del sondeo a partir de la fotografía, para lo que se prepararon carteles identificativos con el número asignado a cada uno de los elementos (Fig. 4).



Fig. 4. Resultado del mapeo de escorias realizado sobre la planta del Sondeo 2 (rojo: adobes escorificados y vitrificados, negro: escorias de hierro, verde (escorias de hierro con presencia de cobre).

Con el fin de llevar el control de los registros, así como los posibles errores de toma de cotas en campo, ya sea en el mismo día o en días sucesivos, se volcó la toda la información en tablas de registro, en las que aparecía las entradas referentes al número asignado en campo, el día de recogida, la cota diaria respecto al punto 0 del yacimiento, la cota relativa, la cota absoluta y fotografías. Para completar el registro del sondeo se dibujó una sección del sondeo, mediante de dibujo manual del perfil que permitió situar los artefactos relacionados con la actividad metalúrgica verticalmente.

La documentación de los distintos paramentos o unidades construidas conservadas se llevaron a cabo bajo los principios de estratigrafía de la arquitectura (MAÑANA-BORRAZÁS *et al.*, 2002), con la finalidad de poder determinar la secuenciación de construcción, uso, amortización y/o cambios de usos de los espacios y así reconstruir las distintas unidades de habitacionales o productivas del sitio en cada una de las fases de uso. También se ha realizado el muestreo de los sedimentos, con el objetivo de caracterizar la composición química y matriz de los mismos con el fin de determinar el impacto de la producción metalúrgica sobre los mismos. Está recogida se hizo mediante cucharas de plástico asépticas de diversos tamaños, dependiendo la localización del sedimento y se guardó en contenedores de PVC y/o aluminio aséptico que se guardaron a su vez en cajas de cartón opaco para evitar que se degradara con el exceso de temperatura o humedad. También se tomaron muestras orientadas al Norte y localizadas en el espacio para poder determinar la composición de los sedimentos de algunas de las zonas del yacimiento, y para una futura datación geomagnética con el fin de superar los problemas de datación por C14 que plantea el I Milenio a. C.

MÉTODO DE DESCRIPCIÓN, CATALOGACIÓN Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

Tras la excavación, se realizó el lavado mecánico, secado y catalogación de artefactos y ecofactos asociados a la producción metalúrgica, guardándose en bolsas de plástico con la identificación de la UE y número de campo si lo tuviera, para su correcta identificación. Tras la limpieza y catalogación de los materiales, se constató la existencia de artefactos relacionadas con la producción metalúrgica, tales como escorias, materiales escorificados y productos metálicos, lo que vino a confirmar lo que ya se había identificado en el propio yacimiento, posteriormente estos fueron trasladados a la Universidad de Granada para su estudio.

En la realización de un primer estudio, ante la cantidad de restos relacionados con la actividad metalúrgica (alrededor de 21 kg), se seleccionaron materiales de distinta naturaleza, principalmente escorias y materiales escorificados para elaborar muestras y ser analizadas posteriormente. Con ello se pretendió cubrir uno de los objetivos principales de esta investigación, que no es otro que un estudio analítico de los materiales relacionados con la actividad metalúrgica e intentar determinar los procesos tecnológicos llevados a cabo durante la producción.

Catalogación e inventariado

Primeramente, se inventariaron los materiales cuyo código se organizó con una sigla OPSB21 (*Oppidum* de Sierra Boyera intervención 2021), seguida de una serie separada en el que el primer campo indicaba sondeo, el segundo la UE a la que pertenece y el tercero, el número de muestra de laboratorio asignada. Como ejemplo tenemos la muestra 4 perteneciente a la UE 001 del Sondeo 2 de la intervención de 2021 del *Oppidum* de Sierra Boyera (Ej. OPSB21/S2/001/004). Las muestras se guardaron en bolsas de PVC individualizadas, identificables a partir de los códigos que se le asignó a cada una de ellas, como los anteriormente referidos. Dentro de cada una de estas bolsas se introdujeron acetatos identificativos metidos en bolsas, para evitar que con la fricción se perdiera el indeleble identificativo de la parte externa de la bolsa (Fig. 5).

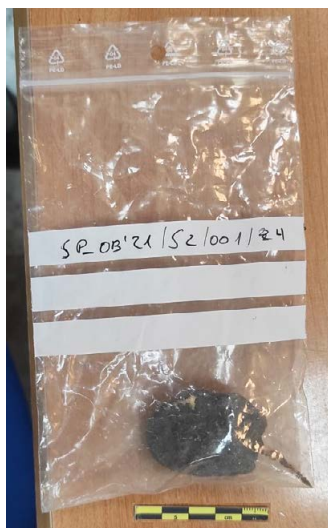


Fig. 5. Separación de las muestras en bolsas individualizadas con su respectivo código.

Seguidamente, se fotografiaron todos los materiales, tanto el anverso como el reverso con una escala métrica y posteriormente se fracturaron las escorias para observar la composición macroscópica de su matriz. Tras esto se confeccionó una base de datos con campos tanto cualitativos como cuantitativos, que siguiendo el orden de la tabla son; sigla, número de muestra, número dado en la excavación, año de la intervención, sondeo, unidad estratigráfica, día de recogida, cota del día, cota de campo, cota relativa, peso, porosidad, magnetismo, color matriz, color de la inclusión y observaciones, datos que serán plasmados mediante el programa FileMaker en una ficha individualizada que posibilita una consulta rápida y visual de todos los datos aportados. Estos principios están basados en el modelo de catalogación de escorias que publicó H. Bachmann en su obra *The identification of Slags from Archaeological Sites* en 1982, y que ha sido referencia en este tipo de trabajos durante las cuatro últimas décadas.

Tras la toma de datos y el correspondiente inventariado, se realizaron dos grupos a partir de los datos obtenidos a partir de un examen realizado mediante imanes con el objetivo de determinar su magnetismo. Se pudo comprobar que las muestras que presentaban mayor magnetismo eran aquellas de color negro en su matriz y que prácticamente carecían de inclusiones. Así se confeccionó un primer grupo con alto magnetismo y matriz negra sin inclusiones, y un segundo, de matriz gris oscuras con inclusiones de color blanquecino y que no presentaban magnetismo alguno (Fig. 6).

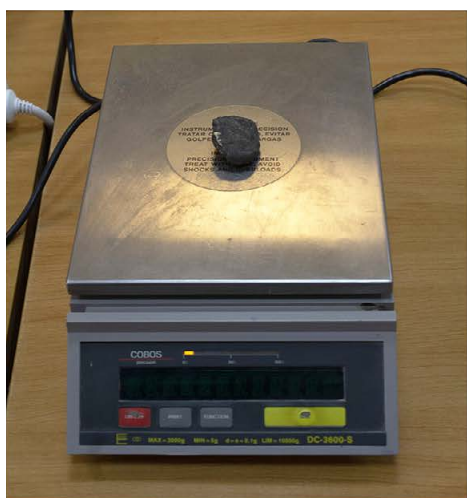


Fig. 6. Peso de precisión empleado para medir el magnetismo de las escorias (izq.). imanes utilizados para clasificar las escorias según su magnetismo.

Preparación de muestras

Las muestras seleccionadas para ser estudiadas en el microscopio óptico y en el microscopio electrónico de barrido (SEM) fueron 19, atendiendo a que hubiese una representación aceptable de cada uno de los dos grupos en los que dividimos el conjunto en un primer momento. Estas muestras fueron las mismas tanto para el microscopio óptico como para el microscopio electrónico de barrido, con el fin de conocer su composición química, la cual nos podría indicar las zonas de extracción del mineral empleado en su proceso de producción, el tipo de producción metalúrgica, así como el momento del proceso productivo que dio lugar a cada una de las escorias analizadas.

Una vez realizada la selección se procedió a su montaje. Primeramente, se extrajo mecánicamente con unas tenazas una porción de cada una de las muestras ya fracturadas. Al quedar visible la sección interna de los materiales escorificados se pudo completar el análisis macroscópico en lo referente a su color interno y porosidad, así como una rectificación en sus valores magnéticos, ya que algunas de ellas que presentaban un nulo o escaso magnetismo, se mostraron magnéticas en sus secciones (Fig. 7).



Fig. 7. Elementos para la preparación de las muestras (izq.) y pulidora empleada en el desbaste de las probetas (derch.).

Las muestras fueron montadas en frío en una probeta de 2,5 cm de diámetro, empleando para ello una resina en polvo (résine Mécaprex KM-U) y un endurecedor acrílico de polimerización en frío para ensayos metalográficos para incrustaciones de pulimentados (Technovit 4004). La muestra se coloca en la probeta, en la que se introduce una etiqueta con los datos de la misma y en su interior se vierten ambos componentes, los cuales se mezclan y se dejan endurecer, y una vez la muestra se encuentra en estado sólido se extrae la probeta. El segundo paso del procedimiento es su desbaste mecánico en la pulidora de disco (Hitech Europe Ap Serie) en la cual se van colocando los diferentes papeles de lija, con el fin de homogeneizar ambas caras quedando ambas superficies planas, utilizando agua como lubricante entre la probeta y la lija. Para esta primera parte se empleó un papel de lija de grano grueso (P120) para posteriormente disminuir el tamaño del grano de la lija (P400) y cambiando la dirección del desbaste perpendicularmente para borrar la dirección del rayado anterior, proceso que se repite con la lija de grano más fino (P800), tercera y última. Los valores de cada papel de lija pertenecen al número de rayas por unidad de longitud (Rovira Llorens y Gómez Ramos, 2003: 39, *opus cit*, Renzi, 2013, 157). Con la intención de eliminar cualquier superficie rayada y conseguir una totalmente pulida y apta para su estudio microscópico, se montará en la misma pulidora paños de fieltro sobre los que se vertió un líquido abrasivo de óxido de aluminio (Alumina N. 1, TECMICRO, S. L.) de partículas en suspensión de 1 μ .

El resultado de este proceso fueron 19 muestras pulidas que se analizaron en el microscopio óptico. Todo el proceso descrito se llevó a cabo en el laboratorio de Arqueometría del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Granada.

Microscopía óptica

Una vez preparadas las probetas, se continuó el trabajo con el microscopio óptico (Microscopio Lx 400, Trinocular, Infinity, Polarizing, Halogen 6V20W) (Fig. 8) para observar las principales zonas de interés de cada una de las muestras, registrando sus diferentes fases estructurales y poder advertir las principales características morfológicas de los principales componentes (óxidos y silicatos de hierro), inclusiones metálicas, corrosión, identificación de fundentes o porosidad (Gómez Ramos, 1999: 16).

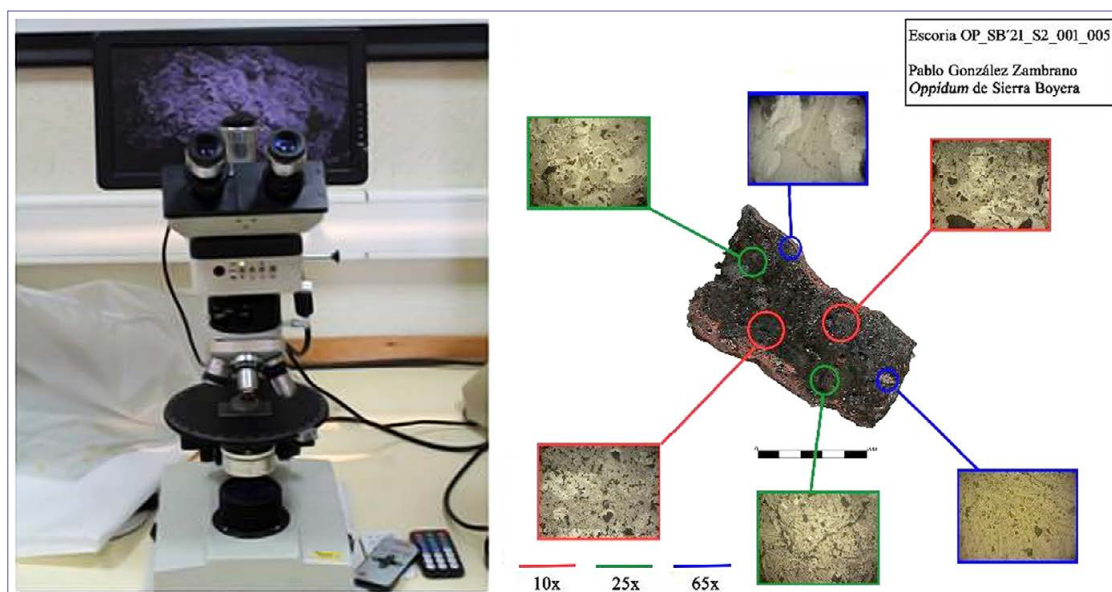


Fig. 8. Microscopio Lx 400 (izq.). Fotografía resultante obtenida (derch).

Con este objetivo se emplearon tres aumentos diferentes, 10x, 25x y 65x, cuyas imágenes pudieron ser capturadas por la cámara que lleva incorporada. Junto con el visionado de las imágenes se realizó un mapeo de la escoria sobre una imagen sobredimensionada de la muestra, para concretar los lugares de interés, previo al análisis con el microscopio electrónico de barrido (SEM), lo que permitió un trabajo más preciso posteriormente. Ello permitió una primera determinación de escorias en dos grupos, cerámicas y metalúrgicas, que coincidía con la primera división realizada a partir de los análisis macroscópicos efectuados en un primer momento. Este proceso también se realizó en el laboratorio de Arqueometría del Departamento de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada (Fig. 9).

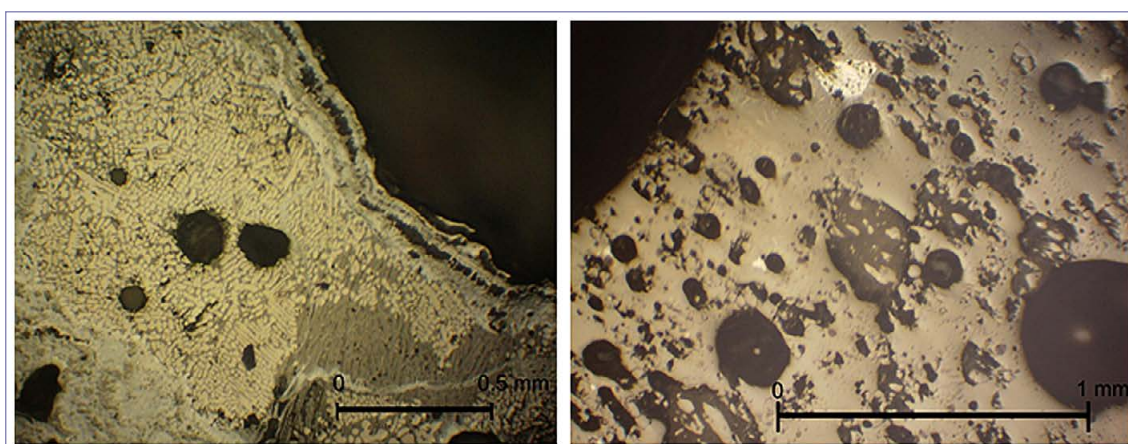


Fig. 9. Fotografías realizadas con microscopio optico. Escoria metalurgica en la que podemos observar en principio formaciones de fayalita y wustita (izq) y escoria ceramica en la que se puede ver una formación vítrea.

Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido supuso un verdadero cambio en los estudios metalúrgicos, ya que en ella se aunaban la observación topográfica de las superficies con gran cantidad de aumentos, con una resolución de entre 3 μm y 20 μm , pudiendo llegar entre los 20-50x hasta los 300.000x y con una gran profundidad (entre 100 μm y 500 μm) junto con microanálisis que no requerían la destrucción parcial de la muestra. En España su uso se generalizó a partir de la década de los 90, aunque ya se había introducido en la década anterior, lo que llevó a una revolución de la forma de estudiar y comprender los procesos metalúrgicos en contextos arqueológicos (PEREA *et al.*, 2008: 130-131) (RENZI 2013: 161) (MONTERO RUIZ y ROVIRA LLORENS 2010: 30-31).

El SEM permite precisar la composición química de las escorias y de las distintas fases que las constituyen, pues son reflejos de los procesos pirotécnicos que ha sufrido. El SEM (*Scanning Electron Microscopy*) representa una de las principales técnicas analíticas para el estudio de las escorias, ya que aporta imágenes de alta resolución, así como la composición química de zonas muy concretas mediante “pinchazos” muy localizados (Figs. 10 y 11) (RENZI 2013: 161-162) (GÓMEZ RAMOS 1999: 16-17). También arroja información microestructural, distribución de fases secundaria y permite analizar inclusiones que normalmente aparecen de forma aleatoria. Toda esta información permite inferir procesos tecnológicos como la reducción o la forja, o los minerales empleados, que permitirían conocer su lugar de procedencia. A este respecto, la aportación del SEM se antoja más precisa que la espectrometría por fluorescencia de rayos X (EDXRF), ya que esta técnica no siempre detecta inclusiones que se hallan en bajas concentraciones (FIGUEIREDO *et al.*, 2011: 326).

Este tipo de microscopio manda un fino haz de electrones focalizados que lleva a cabo un barrido del punto o área seleccionada a gran velocidad dando lugar a diferentes señales que son recogidas por los detectores de electrones secundarios que impactan en la superficie de la muestra con una energía por debajo de 50eV, mientras que las de electrones retrodispersados provienen del haz que rebota en la muestra a diferentes interacciones superiores a 50eV, aportando información acerca de la composición de la muestra a nivel cualitativo, que se refleja en un espectro de intensidad y cuyos datos en tantos por ciento son aportados por el programa en distintas tablas de cada uno de los puntos tomados (RENZI, 2013: 162).

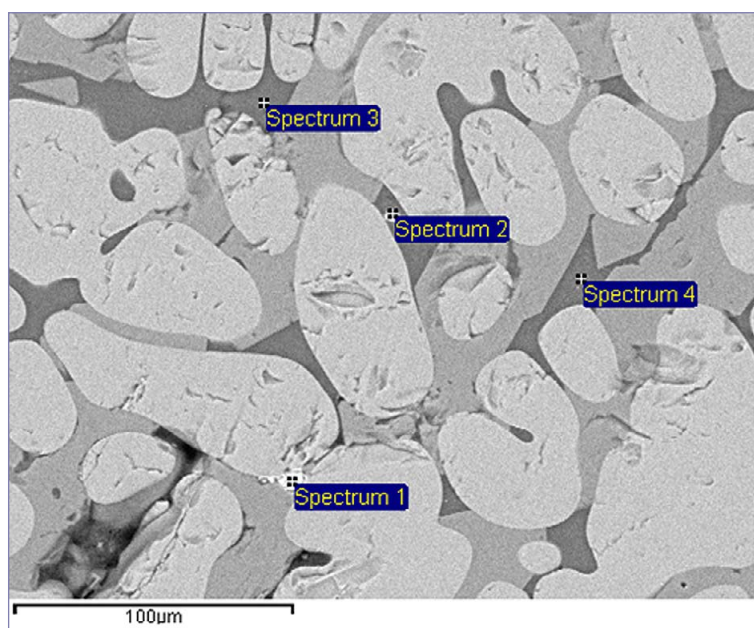


Fig. 10. Imagen SEM-EDX donde se señalan los puntos analizados (Spectrum).

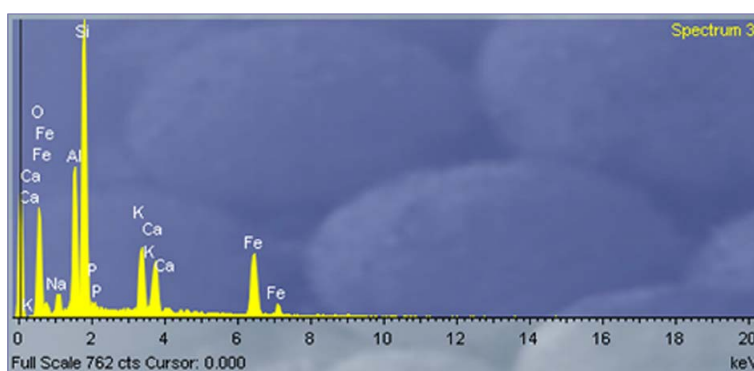


Fig. 11. Representación gráfica de los resultados obtenidos en uno de los spectrum analizados por SEM-EDX

Las probetas montadas fueron metalizadas con grafito para una mejor conducción de los electrones, antes de realizar cualquier análisis de SEM. Los análisis de SEM se realizaron en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada, nos arrojaron datos cualitativos en tantos por ciento de cada una de los puntos o zonas analizadas, así como fotografías de gran resolución. El equipo empleado fue el microscopio Electrónico de Barrido de Alta Resolución por emisión de campo (FESEM), modelo GEMINI de CARL ZEISS que está equipado con un Espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDX) Oxford Instrument (Fig. 12). El software de captación de imágenes es el SmartSEM y el de microanálisis el INCA.



Fig. 12. Equipo SEM-EDX empleado en los análisis de escorias de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Granada.

Los datos arrojados por el SEM se establecieron por la estructuras y áreas analizadas, por lo que los resultados en tantos por ciento de cada uno de los elementos se organizaron por las cristalizaciones identificadas, las inclusiones, las matrices vítreas y los análisis de áreas que determinaron la composición química global de la muestra.

Gracias a las cristalizaciones pudimos establecer la naturaleza de la escoria al registrar formaciones de fayalita, wustita o magnetita, mientras que los análisis de área aportaban una visión general de la composición de la muestra, en ambos casos se emplearon los porcentajes por componente (%Compound). Las inclusiones por su parte permitieron arrojar información del momento en el que se encontraba el proceso pirotécnico al poder identificar restos metálicos en el interior de las escorias. En este caso se utilizaron el porcentaje en peso (%Weight) de cada uno de los elementos que aparecieron en el espectro. Finalmente, las matrices nos aportaron información de las temperaturas alcanzadas en el proceso de producción de estas escorias, a partir del resultado en porcentaje elementos analizados con oxígeno añadido por estequiometría. El análisis de las temperaturas se efectuó a partir de un diagrama ternario de equilibrio de fases de base Al_2O_3 , SiO_2 y FeO , que permitió determinar la temperatura alcanzada en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), previa normalización de los datos en tantos por ciento de las matrices y de las áreas reducidas a estos tres elementos.

Registro de datos

Finalmente, con todos los datos recogidos, tanto en los procesos de campo como de laboratorio, se desarrolló un sistema de fichas que permitiera aunar toda la información generada de los artefactos estudiados, principalmente escorias y materiales escorificados.

Para ello se adaptó la primera tabla que realizamos sobre las características macroscópicas y físicas de las muestras que posteriormente se analizaron, a lo que le añadimos las fotografías realizadas tanto en el microscopio óptico como en el SEM, así como los resultados derivados del estudio analítico de este último a partir de diferentes tablas referentes a los parámetros de estudios anteriormente citados, así como sus diagramas ternarios de temperatura particulares.

Respecto a los objetos terminados de naturaleza metálica, se elaboraron unas fichas meramente descriptivas (peso, fotografía, longitud, anchura, espesor y estado de conservación), ya que sobre estos no se realizaron estudios analíticos, puesto que excedían los objetivos de este trabajo, pero sobre los que volveremos en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

El proceso de documentación y registro se antoja como un método básico dentro de la disciplina arqueológica, permitiendo posteriormente un correcto desarrollo de la investigación. Especial importancia si cabe en el estudio de las actividades metalúrgicas, las cuales no han gozado de un particular interés hasta las últimas décadas del siglo pasado, y no goza de tanto recorrido como el estudio de materiales metálicos ya finalizados o la propia cerámica. En el caso de las escorias, concretamente, el hecho de no poder conocer el proceso metalúrgico al que pertenece hasta que se le realizan las analíticas correspondientes, hacen más necesario aún su correcto registro tanto en campo como en laboratorio.

Es por ello, que en el desarrollo de la investigación de las escorias y materiales escorificados del OPSB realizamos un pormenorizado registro de estos subproductos de la producción metalúrgica, primero para entender su distribución en el propio yacimiento y en segundo lugar, con el fin de relacionarlos con los demás hallazgos y estructuras que se documentaron en su mismo contexto. Los resultados del microscopio óptico y del SEM-EDX nos aportaron suficiente información para responder a cuestiones que nos planteamos al inicio de la excavación en lo referente a si había actividad metalúrgica en el OPSB, de que tipo y que procesos metalúrgicos se estaban llevando a cabo. Esto junto con una relectura estratigráfica y una contextualización de los resultados analíticos del sondeo 2, plasmados en la planimetría con el consiguiente mapeo de los hallazgos, nos permitieron concluir que estábamos ante un taller de herrero en el que también se estaban realizando actividades metalúrgicas de base cobre, aunque en distintas fases. A esto debemos añadir que gracias a este proceso metódico pudimos identificar estructuras que no eran demasiado perceptible durante la excavación a causa de los procesos postdeposicionales a los que está sometido el yacimiento a causa del embalse, como pudieron los distintos hornos de reducción o la fosa de reducción documentada.

Esto fue posible gracias a todo el proceso metódico realizado desde el yacimiento y continuado en el laboratorio, el cual nos permitió volver sobre nuestros pasos y poder realizar una interpretación del sondeo en base a este proceso metodológico y empírico llevado a cabo sobre los restos de la producción metalúrgica documentada.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Pedro José Aguayo de Hoyos por todo el tiempo dedicado y los debates tenidos con el fin de ir siempre más allá de los datos. A Mercedes Murillo Barroso, por describirme un campo de la Arqueología totalmente desconocido para mí, así como al Proyecto “Metal y Ámbar II: Circulación de bronce y ámbar en el Sureste peninsular durante la Edad del Bronce” (PID2019-108289GB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033).

BIBLIOGRAFÍA

- ARBOLEDA MARTÍNEZ, L. (2008): Aspectos sociales y fiscales en las minas romanas del Alto Guadalquivir. *Pyrenae* n°39, vol. 2: 71-99. Barcelona.
- BACHMANN, H. (1982): *The Identification of slags from archeological sites*. Occasional Publication 6. Institute of Archaeology. Londres.

- BLÁZQUEZ MARTÍNEZ, J. M^a. (1989): Administración de las minas en época romana. Su evolución. *Minería y Metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y europeas* vol. II: 119-131.
- CARANDINI, A. (1997): *Historias en la tierra. Manual de excavación arqueológica*. Critica Grijalbo Mondadori. Barcelona.
- CRISTO-ROPERO, A. y GONZÁLEZ ZAMBRANO, P. (2020): Estructuras de combustión del *Oppidum* de Sierra Boyera. En Cordoba Toro, J. y González Zambrano, P.: *Pensando Andalucía. Una visión transdisciplinar II*: 37-56. UNO Editorial, Alicante.
- FIGUEIREDOA, E., ARAÚJOA, M., CORDEIRO SILVA, R. J., SENNA-MARTINEZ, J. C. (2007): Corrosion of bronze alloy with some lead content: implications in the archaeometallurgical study of Late Bronze Age metal artefacts from “Fraga dos Corvos” (North Portugal). *When archaeometry and conservation meet* Vol. 1: 61-66. Rijksmuseum.
- GENER MORET, M. (2010): Tecnología de la metalurgia del hierro. En Montero Ruiz, I.: *Manual de Arqueometalurgia*: 191-232. Museo Arqueológico Regional: Madrid.
- GÓMEZ RAMOS, P. (1999): *Obtención de metales en la prehistoria de la Península Ibérica*. BAR International Series 753. Oxford.
- GONZÁLEZ WAGNER, C. (1999): Los Bárquidas y la conquista de la Península Ibérica. *Gerión* nº17: 263-294. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- HARRIS, E. C. (1991): *Principios de estratigrafía arqueológica*, Crítica, Barcelona.
- MAÑANA-BORRAZÁS, P., BLANCO-ROTEA, R., AYÁN VILA, X. (2002): *Arquitectura 1: Bases teórico-metodológicas para una Arqueología de la Arquitectura*. TAPA (Trabajos de Arqueología e Patrimonio) 25, Universidad de Santiago de Compostela. Laboratorio de Arqueología y Formas Culturales.IS. Santiago de Compostela.
- MONTERO RUIZ, I., ROVIRA LLORENS, S. (2010): Introducción a la Arqueometalurgia. En Montero Ruiz, I.: *Manual de Arqueometalurgia*: 19-52. Comunidad de Madrid, Museo Arqueológico Regional, Madrid.
- PEREA CABEDA A., ARMBRUSTER, B., MONTERO RUIZ, I., ROVIRA LLORENS, S. (2008): Arqueometalurgia: historia y tecnología. En Saiz Jimenez, C. Rogerio Candelera, M. A: *La investigación sobre patrimonio cultural*: 129-142. Madrid.
- RENZI, M. (2013): *La Fonteta (Guardamar del Segura, Alicante) y la metalurgia fenicia de época arcaica en la Península Ibérica*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- ROVIRA LLORENS, S., GÓMEZ RAMOS, P. 2003: *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica*. III. Estudios metalográficos. Madrid.