

MEZCLA DE MINERALES Y COBRE ARSENICAL DURANTE EL CALCOLÍTICO. EL EXCEPCIONAL CASO DE AGUA AMARGA (LA FUENSANTA, LORCA)

* **Nicolau Escanilla Artigas**

Departament de Prehistòria, ASOME, Universitat Autònoma de Barcelona

** **David Bourgarit**

*** **Benoît Mille**

Centre de Recherche et Restauration des Musées de France (C2RMF) 3CNRS-UMR 7055 Préhistoire et Technologie, Nanterre

PALABRAS CLAVE

Calcolítico
Valle del Guadalentín
Minerales de cobre
Reducción
Crisol
Escoria
Cobre arsenical

KEY WORDS

Copper Age
Guadalentín valley
Copper ores
Smelting
Crucible
Slag
Arsenical copper

RESUMEN

En la caracterización arqueometalúrgica del poblado del Calcolítico de Agua Amarga (La Fuensanta, Lorca), los minerales y residuos metalúrgicos son descritos y clasificados de forma preliminar. Esta clasificación se ha puesto en relación con la primera metalurgia de la península Ibérica basada en la reducción en crisoles. Una selección de materiales ha sido analizada mediante pFRX, PIXE, XRD, microscopía óptica y MEB-EDS. El excepcional registro de Agua Amarga permite responder cuestiones largamente debatidas respecto a la obtención de cobre arsenical durante el Calcolítico. Reconstruir las estrategias de abastecimiento de mineral de cobre en Agua Amarga ha sido posible gracias a la prospección regional arqueominera y el estudio geoquímico de los depósitos de cobre.

ABSTRACT

In the study of metallurgical debris of the Copper Age settlement of Agua Amarga (La Fuensanta, Lorca), a preliminary description of the different types of debris has been made. This classification has been related to the first metallurgy documented in Iberian Peninsula based on crucible smelting. A selection of materials has been analysed through pFRX, PIXE, XRD, optical microscopy and SEM-EDS. The exceptionality of materials of Agua Amarga allows us to answer questions highly debated about arsenical copper production during Copper Age. Reconstructing ore supplies at Agua Amarga was achieved thanks to regional archaeomining survey and geochemical study of copper deposits.

* nescanilla@gmail.com

** david.bourgarit@culture.gouv.fr

*** benoit.mille@culture.gouv.fr

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la minería y reducción de cobre durante el Calcolítico en la fachada litoral y prelitoral de Murcia no ha generado el mismo interés que en otras zonas peninsulares. Ello, pese a conocer desde antiguo yacimientos como Parazuelos (Lorca) y La Ciñuela (Mazarrón) (SIRET y SIRET 1887). Durante los años 80 y 90 del siglo XX se obtuvieron evidencias de producción metalúrgica en otros poblados como Carboneros y el Cerro de la Virgen de la Moneda, en Totana (AYALA, 1991; SAN NICOLÁS, 1988), en el Cerro de las Víboras de Bagil (EIROA, 1998), el Cerro de las Viñas de Coy (AYALA, 1991) y el Cerro de la Virgen de la Salud, en Lorca (EIROA, 2005). También en el poblado del Calcolítico bajo la actual ciudad de Lorca han ido apareciendo de forma recurrente minerales, escorias, vasijas de reducción y restos de fundición en los últimos 30 años de excavaciones urbanas (Fig. 1).¹

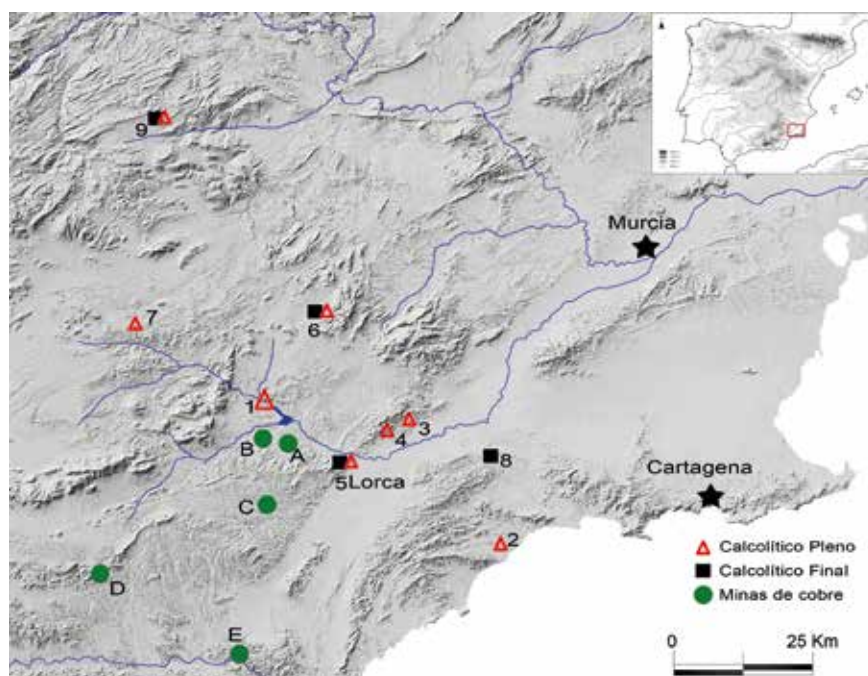


Figura 1. Mapa de los principales sitios nombrados en el texto. 1: Agua Amarga. 2: Parazuelos. 3: Carboneros. 4: Cerro de la Salud. 5: Casco urbano de Lorca. 6: Cerro de las Viñas. 7: El Estrecho. 8: La Ciñuela. 9: Cerro de las Víboras. A: Rambla Roja. B: Rincón de Tostones. C: Minas de Merzu. D: Minas de arsénico de Oria. E: Cerro Minado.

Los residuos metalúrgicos son el testimonio de la transformación del mineral en metal. La investigación sobre este tipo de residuos ha permitido reconstruir el proceso tecnológico empleado durante el Calcolítico (KEESMANN *et al.*, 1991; MÜLLER *et al.*, 2007, 2006; ROVIRA, 2005, 2002; SÁEZ *et al.*, 2003). Este proceso, a modo genérico, se caracteriza por la reducción de minerales en contenedores cerámicos, conocidos como vasijas de reducción (*crucible smelting*), y el poco control sobre las condiciones de temperatura y oxígeno durante el proceso de reducción. La práctica de esta metalurgia se visibiliza arqueológicamente con restos de las vasijas con capas de escoria adheridas y pequeños nódulos de escoria que han sido fracturados para recuperar el cobre de su interior. El poco control sobre las condiciones atmosféricas del reactor provoca que el estudio de estos residuos sea

¹ Parte de los resultados de las investigaciones que aquí se exponen fueron presentados en formato póster en *Archaeometallurgy in Europe IV*, celebrado en Madrid del 3 al 6 de junio de 2015 (ESCANILLA *et al.*, 2015) y forman parte de la investigación doctoral más amplia realizada por uno de nosotros (ESCANILLA, 2016).

extremadamente complejo, ya que son muy heterogéneos y pueden mostrar un gran número de fases minerales.

Hay otro aspecto del que nos informan los residuos metalúrgicos y que ha sido menos explorado en la arqueometalurgia peninsular. Se trata de conocer de qué modo los minerales aparecen representados en la escoria y en el metal atrapado en ella (KEESMANN *et al.*, 1991; MÜLLER *et al.*, 2004; SÁEZ *et al.*, 2003). Este acercamiento es factible cuando, como en Agua Amarga, encontramos escorias parcialmente licuadas que conservan restos del mineral original. Este acercamiento es el que nos permitirá discernir si los minerales encontrados en el poblado de Agua Amarga fueron realmente utilizados para la obtención de cobre y cómo se utilizaron.

En el Guadalentín, el proceso de producción de cobre durante el Calcolítico nos es en gran medida desconocido. El desconocimiento procede tanto de la ausencia de publicaciones sobre los contextos y materiales asociados a las prácticas metalúrgicas, como de los procesos tecnológicos que se dieron lugar. Respecto al primero, creemos necesaria una puesta al día que nos permita situar la metalurgia en un marco de prácticas sociales coherente (CASTRO *et al.*, 1996). Seguir considerando el Calcolítico como un *unicum* inmutable durante mil años debe ponerse en cuestión tras los estudios recientes en yacimientos como Los Millares (Almería), Valencia de La Concepción (Sevilla) o Cabezo Juré (Huelva). Los procesos transformativos relacionados con el Campaniforme y cómo afectan a las prácticas socioeconómicas, entre ellas la producción minero-metalúrgica, merecen una revisión.

El conocimiento de la metalurgia calcolítica del Guadalentín había sido abordado de manera muy puntual antes de nuestro trabajo. Se disponía con los primigenios análisis de L. SIRET (1887, p. 270, tabla 1) sobre Parazuelos, el estudio parcial varios residuos de Carboneros (MONTERO, 1994; SAN NICOLÁS, 1988) y, más recientes, los estudios con microscopía electrónica de varios residuos de Agua Amarga y una vasija de reducción de La Ciñuela (ROVIRA, 2002, 2001; ROVIRA *et al.*, 1997). Una rápida observación a estos estudios permite constatar ciertas diferencias respecto a otros yacimientos del sudeste como Almizaraque (DELIBES de CASTRO *et al.*, 1991, 1989; MÜLLER *et al.*, 2004) y Los Millares (KEESMANN *et al.*, 1991). La primera es la diferencial presencia de escorias, con más de 500 gramos recogidos en superficie. En los residuos murcianos se detecta la presencia de fases sulfuradas y fayalita, mientras que la delafosita, una de las principales fases de los residuos de Almizaraque no ha sido identificada (ROVIRA, 2002). Ello implica ciertas divergencias tanto en la materia prima utilizada, con presencia de sulfuros, como en las condiciones reductoras de la operación. En este sentido la ausencia de delafosita combinada con la presencia de fayalita indicaría unas condiciones puntualmente más reductoras (HAUPTMANN, 2007).

Uno de los cuestionamientos que ha generado un intenso debate en torno a la metalurgia calcolítica es la producción intencional o accidental de cobre arsenical (MONTERO, 1994; MONTERO *et al.*, 2013; THORNTON y ROBERTS, 2009). La producción intencional de cobre arsenical ha sido identificada en Próximo Oriente y la Meseta Iraniana en cronologías del IV milenio cal ANE, poco después de las primeras evidencias de reducción de minerales de cobre (HAUPTMANN *et al.*, 2003). En Europa, la aleación de cobre arsenical es la dominante durante el Calcolítico en toda Europa hasta la aparición del bronce estannífero (JUNGHANS *et al.*, 1974). Apenas hay evidencias directas de cómo

se conseguía este cobre arsenical. Una de ellas es la explotación exclusiva de Ross Island (Killarney, Irlanda) durante el Campaniforme en las islas británicas, siendo esta una de las pocas minas que podía aportar arseniatos de cobre como mineral (IXER y PATTRICK, 2003). Esta estrategia minera, lejos de ser puntual, parece repetirse en diferentes puntos de Europa en este mismo período. Por otro lado, en el centro y este de Europa también se observa la explotación de arseniatos o cobres grises (*fahlerz*) en indicadores químicos de los metales, con una mayor concentración en níquel y antimonio (MERKEL, 2010).

En el caso de la península Ibérica se consideraba que esta aleación se produjo de manera accidental durante el Calcolítico y la Edad del Bronce (MONTERO, 1994; MONTERO *et al.*, 2013). Esta lectura se basaba en el estudio químico de los minerales de la depresión de Vera (Almería) y en la distribución *log-normal*² del arsénico en los artefactos metálicos peninsulares. Sin embargo, algunas recurrencias, como la mayor concentración de arsénico en ciertos tipos de objetos (HOOK *et al.*, 1991; MÜLLER *et al.*, 2007) y al parcial conocimiento de la distribución de arsénico en los depósitos de cobre, obligaban a una mejor comprensión de este fenómeno. Así, el objetivo general del estudio realizado, del que presentamos aquí la parte correspondiente a Agua Amarga, ha sido la caracterización geoquímica de los depósitos de cobre en las fachadas litoral y prelitoral de Murcia y su relación con la minería y metalurgia calcolíticas (DELGADO *et al.*, 2014; ESCANILLA, 2016; ESCANILLA y DELGADO, 2015). Uno de los principales resultados del trabajo es que la distribución del arsénico en el sudeste no es aleatoria ni generalizada entre los recursos naturales de cobre, sino que se da en zonas muy concretas afectadas por procesos epigenéticos neógenos. La producción metálica, consecuencia de una recolección arbitraria de minerales de cobre, no daría como resultado la obtención sistemática de cobre arsenical, como se observa durante el Calcolítico y la Edad del Bronce en el Guadalentín. En este sentido, el estudio de los materiales de Agua Amarga permite un acercamiento único, al documentarse la producción de cobre arsenical en una zona rica en pequeños depósitos de cobre, pero sin arsénico en sus minerales.

2. EL YACIMIENTO DE AGUA AMARGA Y SU ENTORNO

Agua Amarga (La Fuensanta, Lorca),³ con sus 0,25 hectáreas, se establece en un pequeño cerro en forma un espolón, sobre la margen derecha del río Luchena en la confluencia con la rambla Cañada de las Retamas (Lám. 1). Aunque el poblado es conocido desde la década de los ochenta del siglo XX, nunca ha sido objeto de excavaciones arqueológicas. Sin embargo, sí encontramos estudios muy puntuales de materiales superficiales, primero por M. M. AYALA (1991) que nombró el yaci-

2 La distribución *log-normal* tiende a darse en la distribución de los minerales en su estado natural y es utilizada por la minería moderna para estimar las reservas de un depósito mineral (LIMPERT *et al.*, 2001).

3 Este yacimiento aparece citado como Ojos del Luchena por M. M. Ayala (1991, p. 363, 52-O LUC C SUP) y como Los Crisoles por S. Rovira (2002). Aquí se utiliza el nombre con el que aparece en la Carta Arqueológica (SÁNCHEZ *et al.*, 2010).

miento como Ojos del Luchena y posteriormente por S. ROVIRA (2002) quien lo cita como Los Crisoles. El yacimiento sin embargo está registrado en la Carta Arqueológica como Agua Amarga, y así se cita en la publicación en las prospecciones arqueológicas del río Corneros (SÁNCHEZ *et al.*, 2010).



Lámina 1. Vista de la confluencia de la rambla de las Retamas y el río Luchena desde Agua Amarga.

Geológicamente se asienta sobre calizas margosas blancas eocénicas que le da un aspecto de playa al sedimento. Todo el flanco septentrional y oriental queda cortado en vertical por el río, que en este punto forma un meandro. La ladera sur también es bastante abrupta aunque se documentan materiales en ella. El acceso natural sería por el oeste. Se observan varios tramos de muro y sus descubridores afirman que tuvo estructuras de tipo defensivo y de habitación (GRIS y GRIS, 2007, p. 16).

La situación de Agua Amarga debe entenderse bajo el prisma de las principales vías de comunicación durante el Calcolítico (LOMBA, 2001, p. 15; 1996). Su posición, muy cerca del interfluvio entre el río Corneros y el río Luchena le aseguraba dos de las principales vías de comunicación con el valle del Guadalentín durante el Calcolítico, la vía hacia la alta Andalucía y el paso de Lorca hacia Cehegín y Caravaca. La gran densidad de asentamientos en las inmediaciones denota la importancia que tuvo esta zona durante el Calcolítico. Además, el pequeño poblado de Agua Amarga se encuentra flanqueado por asentamientos de gran extensión como El Capitán, tres kilómetros al norte,

Puentes a ocho kilómetros al sur y el poblado de La Gasolinera a cinco kilómetros al oeste (GRIS, 2006; LOMBA, 2001, p. 15; SÁNCHEZ *et al.*, 2010).

El yacimiento solo ha sido prospectado, aunque se detectan varios expolios en las laderas que han afectado el depósito arqueológico. Parte del material de estos expolios de finales de los años 80 se depositó en el Museo Arqueológico de Lorca (MUAL) y ha podido ser revisado.⁴ Toda la cima y las laderas sur y oeste muestran materiales arqueológicos. En base a los materiales cerámicos recuperados de las escombreras de los expolios, se ha establecido una cronología del Calcolítico antiguo y pleno (GRIS y GRIS, 2007). La cerámica presenta formas abiertas tipo fuentes, platos y también vasos de paredes rectas. En la cerámica observada no aparecen elementos de presión, ni tampoco se han observado sistemas de presión perforados verticalmente. Algunos fragmentos sí tienen restos de almagra. Entre los materiales recuperados no se menciona la presencia de elementos diagnósticos como cerámica campaniforme o pintada, artefactos metálicos y/o puntas de flecha de sílex.⁵ En su superficie se recogieron hace varios años varios quilogramos de residuos metalúrgicos con una representación completa y abundante de todas las fases del proceso de reducción de cobre. Parte de esos materiales fueron devueltos al yacimiento y el resto depositados en MUAL.

Los depósitos minerales de cobre más cercanos al poblado se localizan en la sierra de la Torrequilla. Aunque la minería en esta zona siempre ha sido secundaria respecto a los grandes distritos mineros, conviene resaltar que solo en el área lorquina encontramos 25 indicios de cobre registrados por el IGME, que se elevan a 40 al incluir el área de Vélez-Rubio (IGME, 2000). Todos ellos son pequeños depósitos de cobre que nunca dieron lugar a una explotación industrial. El más conocido, por su explotación durante los años cincuenta del siglo XX por B. García Ruiz (2001) es el de las Minas de Merzu S. A. en Nogalte, que incluye la mina Adela y la mina Santa Primitiva. De estas minas conviene recordar el descubrimiento de un esqueleto humano durante la re-explotación moderna de la mina Santa Primitiva y que podría indicar su posible explotación prehistórica. Actualmente ambas

⁴ Agradezco a Juana Ponce y Andrés Martínez la disponibilidad y la facilidad para acceder a estos materiales.

⁵ Información complementada con la ficha del yacimiento de la Carta Arqueológica de la Región de Murcia.

minas han sido totalmente tapadas por labores agrícolas y su prospección superficial no permitió confirmar su explotación prehistórica. A menos de diez kilómetros de Agua Amarga encontramos otros depósitos como Rambla Roja y Cortijo de los Tostones. Son pequeñas mineralizaciones sinsedimentarias de morfología estratiforme y de tipo *red beds*. El cobre aparece en diseminaciones, impregnaciones y relleno de diaclasas en niveles detríticos de coloración blanquecina o gris-amarillenta, en el seno de la serie de conglomerados, areniscas y arcillas rojizas (IGME, 2000, p. 33).

3. EL REGISTRO ARQUEOMETALÚRGICO

3.1. Minerales

El estudio de los minerales es uno de los ejes fundamentales sobre los que se basa la interpretación de la metalurgia de Agua Amarga. A partir de su composición química y la comparación de los depósitos de cobre del valle del Guadalentín podemos plantear aspectos tales como si existió una selección consciente de los depósitos explotados y si se observa una preferencia por un tipo de mineral de cobre concreto. Debemos precisar que cuando hablamos de minerales no nos ajustamos a la realidad. Lo que normalmente se explota en las minas es un compuesto de diferentes minerales que llamamos rocas. Un mineral tiene una composición química ordenada y está representado por una fórmula química, mientras que las rocas pueden estar formadas por varios minerales. El o los minerales de cobre pueden estar acompañados de otros muchos minerales (de sílice, calcio, hierro, cobalto, etc.) en pequeños fragmentos de rocas. Es una separación que ya encontramos en la obra de G. Agrícola en el siglo XVI (AGRÍCOLA *et al.*, 1950) y que muchas veces olvidamos pese a su trascendencia para la metalurgia prehistórica.

Simplificando, podemos distinguir 4 grandes tipos de mineral en las minas del valle del Guadalentín. Esta clasificación tiene en cuenta los principales elementos metálicos y semimetálicos que acompañan al cobre: el hierro, el arsénico y el sulfuro.

Los óxidos y carbonatos de cobre son minerales que en altas leyes en cobre apenas contienen impurezas. Igualmente, en mineralizaciones de suficiente potencia podrán separarse fácilmente de la ganga, por lo que su reducción no generará en principio escorias. Se ha propuesto que este tipo de minerales serían los primeros en ser beneficiados, dado que se encuentran en la parte más superficial de los depósitos de cobre y son fáciles de reducir. Este tipo de mineral está muy repartido en la región pero no es muy abundante. En la mayoría de ocasiones la ley en cobre es muy baja al tratarse solo de impregnaciones o diseminaciones sobre la roca encajante.

Los arseniatos de cobre, igual que los anteriores se trata de minerales secundarios donde el cobre aparece en paragénesis con el arsénico. La ausencia de sulfuro y otros elementos en la composición base del mineral favorece que también sean muy fáciles de reducir aunque la toxicidad del arsénico y su alta volatilidad (en temperaturas bajas y condiciones oxidantes) debe tenerse en cuenta. Su presencia en el valle del Guadalentín está restringida al entorno de la sierra de las Moreras y, alejándo-

nos un poco más, en algunos depósitos concretos de Cartagena (Filón Consuelo) y Huércal-Overa (Cerro Minado). Todas ellas son mineralizaciones que se han visto afectadas por procesos hidrotermales epigenéticos a la formación inicial del depósito mineral.

Los minerales ferrocupríferos son los minerales más abundantes en la región. Se encuentran tanto en depósitos *gossanificados* de hierro, como en pequeñas explotaciones filonianas. Los carbonatos de cobre se distribuyen en pequeñas vetas de tipo *stockwork* o rellenan fisuras entre hidróxidos de hierro como la goethita o hematites. Este tipo de minerales casi siempre aparece acompañado de relictos de calcopirita, covellina o calcosina, por lo que no es raro encontrar impurezas de sulfuro en los análisis químicos. En algunos casos, cuando la mineralización se ha visto afectada por procesos epigenéticos cercanos (normalmente hidrotermales), también pueden contener impurezas elevadas en arsénico. Las minas del entorno de Agua Amarga están dominadas por minerales polimetálicos de cobre y hierro, aunque los mayores depósitos están en la fachada litoral murciana.

Los minerales primarios de cobre y sulfuro: es un tipo de mineral que encontramos frecuentemente como relictos o acompañando a los demás minerales arriba descritos. La ausencia de grandes depósitos de cobre en el Guadalentín impide la formación de mineralizaciones masivas como las que se dan en la Faja Pirítica Ibérica, pero sí hay documentadas algunas bolsadas de consideración en minas como Las Tres Niñas, en Morata. Son minerales que acostumbran a encontrarse en profundidad, donde no han sido transformados por los procesos atmosféricos. Aun así, hay algunos casos como como en la mina Rambla Roja donde se conservan pequeñas vetas superficiales de calcopirita de hasta medio centímetro de espesor.

Estos tipos de mineral arriba descritos pueden encontrarse, en ocasiones, de forma conjunta en una sola mineralización formando minerales muy complejos. La mejor separación geoquímica se da entre los minerales con arsénico y aquellos que no lo tienen. La composición química de los minerales es un indicador para conocer la composición de base del metal que se estaba produciendo en la prehistoria. Pero para ello es necesario conjugar su estudio con el de los residuos metalúrgicos. En el depósito del MUAL se conservan 12 fragmentos de mineral de cobre y otros 12 fueron recogidos en prospecciones superficiales, sumando un total de 140 gramos. Visualmente destacan los

fragmentos de minerales ferrocupríferos, en los que la malaquita rellena fisuras de la mineralización principal de hidróxidos de hierro. Junto a ellos aparecen otros minerales de cobre (Lám. 2), tanto encajados en ganga cuarzosa como en ganga calcítica y con relictos de mineral primario.

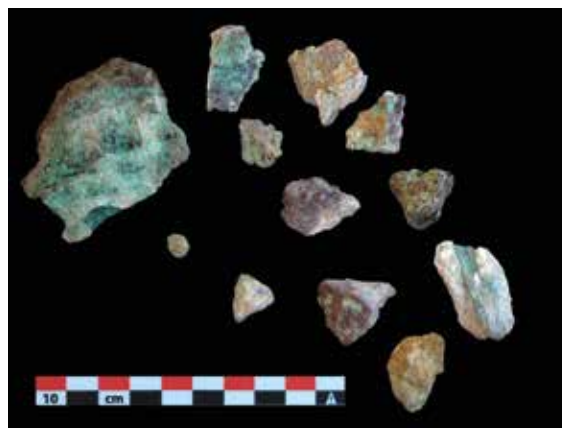


Lámina 2. Selección de minerales analizados procedentes del poblado de Agua Amarga.

En una primera inspección visual, la mayoría de minerales aparentaban lo que se considera descartes por su baja riqueza en cobre. Tras los análisis químicos se ha comprobado que con una concentración manual similar a la prehistórica es posible obtener una alta ley en cobre con ellos. Como veremos en los resultados de los análisis, la ganga en la que encajan y su aspecto exterior son indicadores de la composición química general del mineral.

3.2. Residuos metalúrgicos

En Agua Amarga aparece un registro completo de residuos metalúrgicos que ha sido dividido en cerámicas utilizadas para la reducción o fundición de cobre, conglomerados de horno, que incluyen minerales parcialmente fundidos, escorias y también nódulos de cobre.

Vasijas de reducción / Crisoles / Moldes

Este conjunto engloba los contenedores cerámicos utilizados en la obtención de cobre. Estos pueden pertenecer a tres procesos pirotecnológicos, la reducción de cobre, la fundición de cobre o el vertido del metal líquido para su solidificación. Aunque en una metalurgia desarrollada cada uno de ellos desarrolla sus propias morfometrías y materias primas específicas, en

la metalurgia «inmadura» del Calcolítico su correcta discriminación es, a veces, muy compleja (MÜLLER *et al.*, 2004; ROVIRA y RENZI, 2010).

En Agua Amarga, la presencia de cerámicas de uso metalúrgico está muy bien atestiguada tanto por vasijas de reducción como crisoles. Entre los registrados en el MUAL y los recogidos en prospecciones superficiales conocemos 44 fragmentos y un peso global de 850 gramos. Su abundancia propició que en un principio el yacimiento fuera conocido como Los Crisoles, y así aparece en los primeros análisis arqueometalúrgicos realizados por S. Rovira (2002). En el sudeste, durante el Calcolítico, se considera que la reducción se efectuaba principalmente en contenedores cerámicos abiertos que eran depositados en pequeñas cubetas u hogares excavados en el suelo (ROVIRA, 2005). Los contenedores cerámicos documentados pueden tener un diámetro variable entre 10 y 40 centímetros, utilizándose cerámica común de formas abiertas. Asimismo su grosor no tiende a superar un centímetro, presentan una alteración térmica, que puede ser muy intensa, del interior hacia el exterior y su cara interna aparece recubierta por una capa escorificada de varios milímetros de espesor (MÜLLER *et al.*, 2004, 2006; RENZI, 2010).

Las vasijas de reducción del yacimiento tienden a cumplir los parámetros descritos, con grosores inferiores a los 2 centímetros y una fina capa de escoria de 1 o 2 milímetros. Esta capa puede aumentar su grosor por fracturas durante el proceso de reducción o por una acumulación sucesiva de adherencias. Este es el ejemplo de una de las vasijas estudiadas (Lám. 3).

En cuanto a los contenedores identificados como crisoles, acostumbran a presentar un mayor grosor en las paredes que las vasijas de reducción, en torno a los 2 centímetros. La capa escorificada que recubre su superficie interna es menor y muestra una transición bien definida con la matriz cerámica (MÜLLER *et al.*, 2006, 2007). En ocasiones, la identificación como cerámica metalúrgica solo se da a partir de pequeñas manchas dispersas de sales de cobre o por la termoalteración de la superficie cerámica. En esta se evidencia la formación de porosidades, normalmente en la parte superior de las paredes y/o en el borde. Cuando se dispone de un plano de fractura reciente o una sección pulida se observa un cambio gradual en la matriz cerámica. Algunas cerámicas que han sido identificadas como crisoles, también pudieron servir como protomoldes. Son cerámicas de tendencia oval o tra-

pezoidal, donde el refundido del metal proporcionaría una preforma a la que moldear mediante batido y recocido (MÜLLER *et al.*, 2007; NOCETE, 2004). Para el Calcolítico, este tipo cerámico solo ha sido documentado en el sudoeste, pero no puede descartarse que algunos fragmentos de Agua Amarga funcionaran como tales (Lám. 4). Si la función de crisol y molde se asocia a un solo proceso metalúrgico, algunos contenedores cerámicos pudieron funcionar de forma alterna como vasijas de reducción y como crisoles (MORENO *et al.*, 2010; MÜLLER *et al.*, 2006).

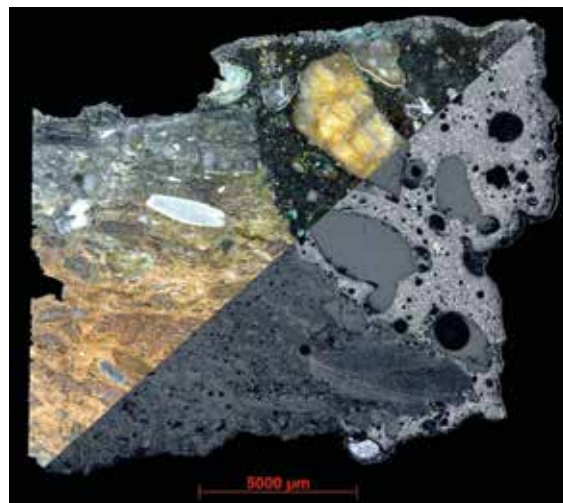


Lámina 3. Imagen mixta de la sección pulida de AG03. En la diagonal superior vemos la imagen al microscopio en campo oscuro, mientras que en la diagonal inferior la imagen se observa en campo claro. Se puede observar como la capa de escoria, muy fina en la cara interna derecha sufre un proceso de derrame al fracturarse la cerámica. En la zona inferior derecha observamos una lágrima de calcosina de 1 milímetro de diámetro que se ha segregado por su mayor densidad y menor temperatura de fusión.



Lámina 4. Vista en perspectiva y en sección del crisol y posible proto molde.

El número de crisoles, a partir de la revisión de los materiales del MUAL, sería inferior al de los fragmentos de reducción, pero también están representados. Un gran fragmento (AG09)⁶ ha podido ser analizado químicamente por nosotros y está a la espera de su estudio al microscopio (Lám. 5). Se ha estimado un diámetro de la base externa de 10 centímetros, e interna de 7 centímetros. El fondo tiene un grosor de 1,4 centímetros, mientras que las paredes son sensiblemente más estrechas, llegando a un centímetro de grosor en el límite superior conservado. No conserva el perfil completo, pero la huella de la termoalteración de la pasta cerámica indica que la carga no superó los dos centímetros de altura, donde el diámetro interno sería de 13 centímetros. Así, le podemos calcular una capacidad posible de 175 centímetros cúbicos⁷ y que según la densidad del cobre (8,96 gr/cm³) podría haber contenido hasta 1,5 kilogramos de metal. Seguramente el volumen de cobre refundido o refinado sería muy inferior, ya que la zona termoalterada indica el punto afectado por el calor, eso es, de la mezcla de metal y carbón.

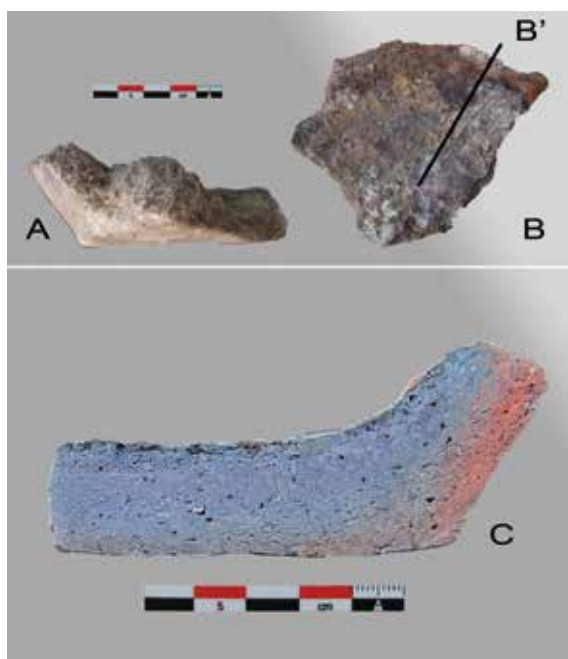


Lámina 5. Vistas generales y de sección del probable crisol AG09.

Además de estos dos grupos se han documentado otro tipo de residuos cerámicos. Se trata de fragmentos

de arcilla parcialmente fundidos por el calor que no parecen haber formado parte de un recipiente cerámico. Son fragmentos de superficies planas pero sin paredes delimitadas y donde la capa de escorificación se engrosa en uno de sus extremos, fundiendo a su vez la matriz arcillosa y los granos de micaesquistos y sílice que actúan de desgrasantes. El grado de alteración de la matriz y la cantidad de burbujas de gas que se presenta como interfase sugieren su posición cercana a la entrada de oxígeno en el reactor y en la zona donde se alcanzaron las temperaturas más elevadas. De forma genérica pueden considerarse como restos de paredes de la estructura de combustión.

Escorias / Conglomerados de horno

El tipo de residuo más numeroso de Agua Amarga son las escorias. Estas pueden clasificarse entre los conglomerados de horno y escorias (BACHMANN, 1982). En no pocas ocasiones su discriminación solo es posible a partir del cálculo de su densidad y su posterior estudio microscópico por lo que normalmente se utiliza el término escoria de forma indiscriminada. El registro de Agua Amarga entra dentro de las definiciones propuestas para las escorias del Calcolítico (Lám. 6). Se trata de escorias inmaduras y de baja calidad, por lo general de menos de 10 gramos de peso (aunque alguna supera los 50 gramos). La composición mineralógica de este tipo de escorias es muy heterogénea y su viscosidad es muy alta. Debido a ello, el cobre quedaba atrapado en su interior y era necesaria su trituración para recuperar los nódulos de mayores dimensiones (ROVIRA, 2005; ROVIRA y AMBERT, 2002; ROVIRA y MONTERO, 2013). Este tipo de escorias se asocia a una reducción llevada a cabo en contenedores cerámicos (HAUPTMANN, 2007). Algunas de las escorias recuperadas en Agua Amarga y otros yacimientos del Calcolítico de la fachada litoral y prelitoral murciana todavía conservan pequeños relictos de la matriz cerámica a la cual quedaron adheridas.

A partir de la densidad y la composición química general de una selección de estas escorias se han podido clasificar en tres tipos: El primero de ellos se corresponde con conglomerados de reducción ricos en cuarzo sin fundir. Son residuos poco densos, y muy viscosos, con predominio de cuarzo y restos

⁶ Su peso no se considera en los contajes anteriores.

⁷ Para el cálculo de la capacidad se ha seguido la propuesta de C. Velasco (2012).

de mineral medio licuados. Sus granos son visibles macroscópicamente, llegando hasta el centímetro de longitud (Lám. 7). El segundo se define como escorias de reducción porosas. Dominan los óxidos de hierro junto a silicatos. Tanto en superficie como en el interior encontramos grandes vacuolas confiriéndole una densidad menor y una mayor irregularidad que en el grupo de escorias más densas. En algunas ocasiones, estos residuos muestran un exceso de sílice que ha impedido que se licuen totalmente. Este exceso es observable a partir de granos milimétricos de mineral o ganga parcialmente fundidos. Finalmente el tercer tipo representa las escorias de reducción con una mayor densidad. En ellas dominan los óxidos de hierro y tienen una estructura más homogénea. Se trata de escorias que han licuado casi todos sus componentes y con un valor de viscosidad suficiente para que el cobre se separe por densidad de los componentes silíceos y férricos. Aun así, los análisis químicos muestran que se conservan importantes cantidades de cobre en su interior.

Metal

El único registro metálico procedente de Agua Amarga es un gran nódulo de cobre de 1 centímetro de diámetro, sección planoconvexa y 3 gramos de peso (Lám. 8) conservado en el MUAL. Su morfología lo distancia de las gotas de fundición halladas en poblados como Almizaraque (MÜLLER *et al.*, 2006) y posiblemente se trate de uno de los nódulos recuperados de la escoria tras el proceso de reducción. La composición del metal producido en Agua Amarga nos es conocida a partir del estudio al microscopio óptico y electrónico de los residuos de reducción y que veremos más adelante. Simplemente avanzar que todo el metal obtenido en el poblado se clasifica como cobre arsenical, con concentraciones relativamente elevadas de arsénico.

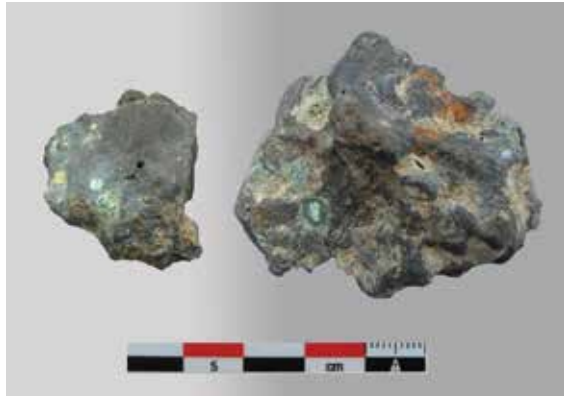


Lámina 6. Escorias de Agua Amarga.

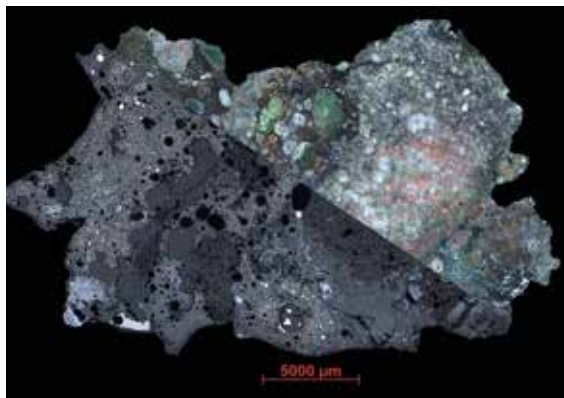


Lámina 7. Imagen mixta de la sección pulida de AG07. En la diagonal superior vemos la imagen al microscopio en campo oscuro, mientras que en la diagonal inferior la imagen se observa en campo claro. En este conglomerado es posible observar macroscópicamente grandes granos de sílice y restos de mineral parcialmente fundidos. La parte fundida está dominada por una matriz vidriada de silicatos de Ca-Al-Fe en la que han cristalizado óxidos de hierro tipo magnetita. En la esquina inferior izquierda se observa una segregación azulada que se corresponde con calcosina. Junto a ella una capa de mata con inclusiones de speiss. El cobre metálico solo es visible en el campo claro y se identifica como los puntos amarillos brillantes. μ



Lámina 8. Gran nódulo de cobre procedente de Agua Amarga.

4. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para el trabajo analítico se han utilizado las técnicas de fluorescencia de rayos-X (pFRX) y la emisión de rayos-X inducido por partículas (PIXE-AGLAE) para conocer la composición química elemental, la DRX (difracción de rayos-X) para identificar la mineralogía presente, y la microscopía óptica (OM) y electrónica (MEB-EDS) para la observación y caracterización de las fases cristalinas.⁸

El conjunto analizado de Agua Amarga se compone de 9 minerales y 17 residuos metalúrgicos representando prácticamente todo el registro metalúrgico de Agua Amarga. Todo el conjunto de materiales ha sido analizado químicamente y sobre una selección de 4 minerales y 13 residuos hemos realizado análisis de DRX. El estudio de las fases presentes mediante microscopía óptica y electrónica se ha restringido a una vasija de reducción (AG03), 2 paredes de la estructura de reducción (AG06 y AG11), 1 conglomerado de horno (AG07), 1 escoria porosa (AG15) y dos escorias densas (AG13 y AG20).

Para el estudio químico se ha priorizado conocer la composición global (*bulk analysis*) sobre muestras en polvo. En los minerales se ha triturado un fragmento, seleccionando después las zonas más enriquecidas. Esta selección ha sido molida en un mortero para homogeneizar la muestra. El objetivo en nuestro caso no era solo conocer las impurezas del cobre, sino la riqueza o ley del mineral y la ganga que era susceptible de ser introducida en la carga del reactor. Gracias al estudio geoquímico de los minerales del Guadalentín, los resultados nos permiten comparar su composición con las posibles fuentes de abastecimiento. Las muestras para el análisis químico sobre residuos metalúrgicos han tenido un proceso de preparación similar, intentando en este caso obtener una parte representativa de la parte escorificada. Las mismas muestras utilizadas en el estudio químico han sido aprovechadas para su estudio en DRX. La utilización de técnicas no destructivas permite que todavía puedan utilizarse en un futuro para el análisis con isótopos de plomo. Para el estudio en el microscopio se ha trabajado con secciones pulidas de las escorias y cerámicas metalúrgicas, que para su análisis en el MEB-EDS han sido recubiertos por una película de grafito.

5. RESULTADOS

Los minerales de Agua Amarga pueden dividirse en tres clases (Fig. 2, Tabla 1). Los carbonatos de cobre en los que este es la sustancia principal (AG08), los minerales ferrocupríferos, que son los más abundantes (AG25, AG04, AG05, AG26 y AG28), y los arseniatos de cobre (AG01, AG02 y AG29). Sorprendentemente, los carbonatos de cobre son la clase menos representada. Estos minerales se han considerado como los más explotados por la metalurgia calcolítica del sudeste por su presencia en las capas superficiales de los depósitos minerales (ROVIRA, 2005).

⁸ Todos los análisis se han realizado en el *Centre de Recherche et Restauration des Musées de France* gracias a una beca para estancias predoctorales de la Generalitat de Cataluña (BE-DGR). Las condiciones de trabajo y la metodología empleada se describen detalladamente en N. Escanilla (2016).

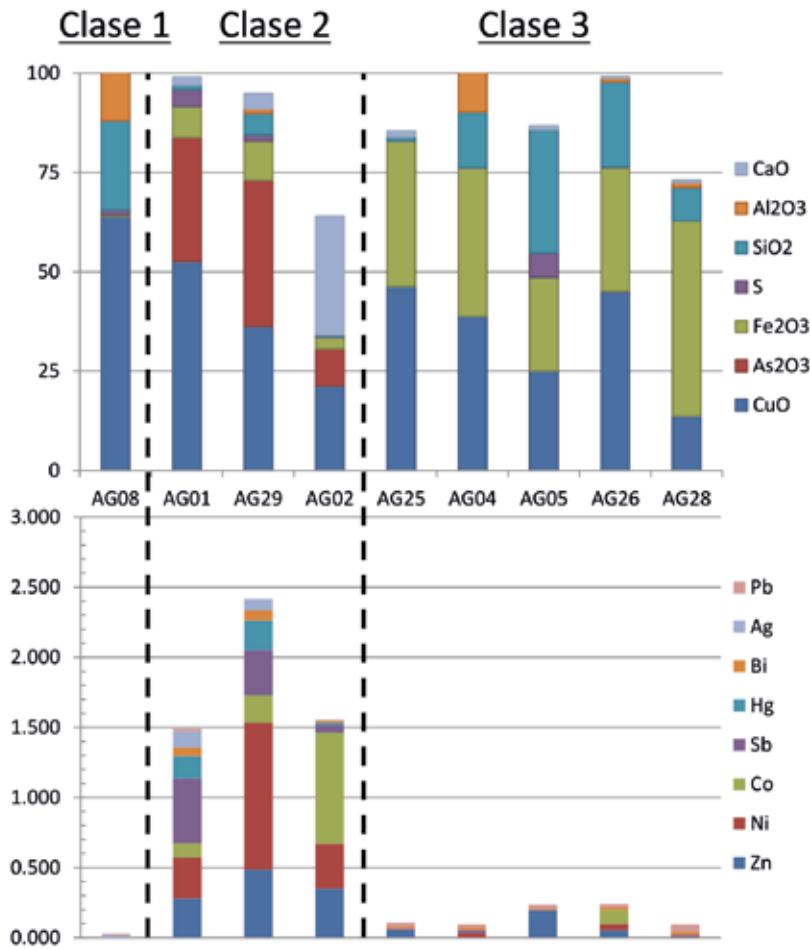


Figura 2. Gráfico acumulado de barras con la composición de los minerales de Agua Amarga. En la parte superior se representan los principales componentes y la ganga del mineral en óxidos. En la parte inferior se representan las impurezas en % en peso. La clase 1 identifica los carbonatos, la clase 2 los arseniatos y la clase 3 los minerales ferrocupríferos. Obsérvese el contraste en los valores de impurezas entre los arseniatos y el resto de minerales.

	AG01	AG02	AG04	AG05	AG08	AG25	AG26	AG28	AG29	AG03	AG12	AG06	AG11	AG09
	PFRX	PFRX	PFRX	PFRX	PFRX	PFRX	PIXE	PFRX	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE
	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	C-VR	C-VR	C-PH	C-PH	CRS
FE ₂ O ₃	7,7	2,9	37,3	23,6	0,5	36,6	36	49,1	12,4	27,5	7,2	9,4	10,5	10,2
SIO ₂	1,1	0,5	14,1	31,2	22,5	1*	21,5	8,4*	5,4	45	54,8	35,7	52,3	50,8
AL ₂ O ₃	nd	nd	11,1	nd	13,2	0*	0,9	1,3*	1,1	12	12,9	11,5	16,7	17
CAO	2	29,9	0,5	0,9	0,4	1,4	0,5	0,6	3,9	5,3	3,8	6,7	11,1	5,2
MGO	na	na	na	na	na	na	nd	na	nd	0,8	0,6	1,3	1,4	1,8
K ₂ O	0,1	0,1	0,8	0,4	0,8	nd	0,1	0,7	0,2	2,1	2,5	2,8	4,3	4
P ₂ O ₅	na	na	na	na	na	na	0,1	na	0,1	0,2	0,1	nd	nd	0,2
NA ₂ O	na	na	na	na	na	na	nd	na	nd	0,4	0,5	0,4	0,8	0,5
TIO ₂	0,3	nd	0,2	0,1	0,3	nd	nd	0,3	0,1	0,7	0,6	0,5	1	0,9
CUO	52,6	21,3	38,8	25	63,8	46,3	37,9	13,8	35,7	3,6	13,4	21,1	0,7	3,9
AS ₂ O ₃	15,7	4,7	nd	nd	nd	nd	0,1	nd	23	0,4	0,3	0,5	nd	2
S	4,3	0,1	0,1	6,1	1,2	0,1	0,5	nd	2,7	0,3	0,1	2,2	nd	nd
ZN	0,30	0,40	nd	0,20	nd	0,10	<0,008	nd	0,60	0,20	<0,013	0,10	nd	nd
NI	0,30	0,30	nd	nd	nd	nd	0,10	nd	1,90	0,10	0,10	0,10	<0,006	0,80
CO	0,10	0,80	nd	nd	nd	nd	<0,118	nd	0,30	0,30	0,60	1,00	<0,05	0,60
SB	0,50	0,10	nd	nd	nd	nd	<0,021	nd	0,70	<0,008	<0,016	<0,012	<0,005	0,10
HG	0,20	nd	nd	nd	nd	nd	<0,002	nd	0,20	<0,002	<0,001	<0,002	<0,001	<0,002
BI	0,10	nd	nd	nd	nd	nd	<0,002	nd	<0,109	<0,092	<0,001	<0	<0,001	<0,007
AG	0,10	nd	nd	nd	nd	nd	0,10	nd	0,10	<0,001	<0,009	nd	<0,001	<0,003
PB	nd	nd	nd	nd	nd	nd	<0,017	0,10	<1,476	<0,031	<0,024	<0,037	<0,007	<0,139

	AG07	AG15	AG17	AG21	AG23	AG13	AG18	AG20	AG22	AG24	AG14	AG16
	PFRX	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE	PIXE
	ESR C	ESR P	ESR P	ESR P	ESR P	ESR D	ESR D	ESR D	ESR D	ESR D	ESR R	ESR R
FE ₂ O ₃	17,1	36,5	52,1	43,2	50,1	55	63,5	44,6	49	62	29,2	13,3
SIO ₂	29,4	15,4	17,6	25,8	22,6	14	16,1	19,9	17,6	18,7	24,2	29,6
AL ₂ O ₃	7	3,1	4,2	6,8	4,5	1,9	2,1	4,1	2,8	3,1	3,4	8,9
CAO	2,3	9,1	7,7	6,4	10,6	5	8	8,8	13,4	4,7	17,7	15,5
MGO	na	2	0,6	0,7	1,6	0,5	0,8	0,9	1,6	0,8	3,2	2,4
K ₂ O	1	0,5	0,8	1	0,7	0,2	0,3	0,7	0,4	0,5	0,3	1,3
P ₂ O ₅	na	0,1	0,3	0,6	0,2	nd	nd	0,3	nd	nd	nd	0,4
NA ₂ O	na	1	0,4	0,4	nd	0,3	0,3	0,4	0,4	nd	0,6	0,4
TIO ₂	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5
CUO	32,5	20,8	10,9	11	6,8	17,4	5,1	14,1	9,8	6,6	7,7	9,5
AS ₂ O ₃	1,5	1,5	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,6	0,8	0,1	3,7	5,8
S	0,4	0,4	0,8	0,2	0,4	0,2	0,3	0,1	0,5	0,9	0,4	0,1
ZN	0,10	0,10	0,10	0,30	nd	nd	0,10	0,30	0,20	0,10	1,20	0,10
NI	0,10	0,10	0,10	0,10	<0,005	0,10	0,10	0,20	0,10	nd	1,30	2,90
CO	0,10	0,90	0,60	0,70	<0,079	0,80	<0,346	0,80	0,60	<0,087	1,40	2,80
SB	nd	nd	<0,011	<0,022	<0,009	<0,008	<0,008	0,10	nd	<0,008	0,10	0,20
HG	nd	<0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,002
BI	nd	<0,004	<0	nd	<0,002	<0,002	<0,001	0,10	<0,003	<0,002	<0,002	<0,013
AG	nd	0,10	<0,039	nd	<0,007	0,10	<0,005	nd	nd	<0,005	<0,016	<0,015
PB	nd	<0,111	<0,026	<0,025	<0,019	<0,015	<0,013	<0,047	<0,061	<0,024	<0,241	0,20

Tabla 1. Análisis químicos globales sobre muestras pulverizadas de los minerales y residuos de Agua Amarga. Los resultados se expresan en % en peso. «*» resultados poco fiables por problemas con el equipo; «nd» no detectado; «na» no analizado.

Este planteamiento justificaba así la práctica ausencia de escorias en los contextos arqueológicos calcolíticos. Lo contrario acontece con los minerales ferrocupríferos, que representan el 55 por ciento de los análisis realizados y cuya reducción proporcionaría una cantidad sensible de escorias de base férrica. Tanto unos como otros comparten un rastro de impurezas muy bajo, una ganga importante de sílice y en menor medida aluminio. Estos tres componentes contrastan con el grupo de los arseniatos de cobre. Los arseniatos, representan algo más del 30 por ciento de los minerales analizados. Además de la presencia de arsénico aportan impurezas de cinc (Zn), níquel (Ni), antimonio (Sb) y mercurio (Hg) que en conjunto superan el uno por ciento del peso total del mineral. Es interesante constatar que la importante carga de ganga silíceas que acompaña a los carbonatos y minerales ferrocupríferos, en los arseniatos desaparece o es sustituida por ganga cálcica debido a su génesis en contextos dolomíticos brechificados.

Cuando comparamos estos datos con la composición química de los depósitos de cobre del valle del Guadalentín constatamos como si bien los carbonatos y minerales ferrocupríferos pueden tener un origen compartido y posiblemente local, la procedencia de los arseniatos es obligatoriamente exógena. En este segundo caso, los análisis químicos sugieren que el origen más probable del mineral sea la mina prehistórica de Cerro Minado, en Huércal-Overa (Almería) (DELGADO *et al.*, 2014), a más de cincuenta kilómetros de distancia del poblado. Tampoco se pueden descartar algunos depósitos no prospectados de la zona de Oria que también tienen arseniatos y aparecen en paragénesis con minerales de níquel y cobalto. La hipótesis de Oria es sugerente en cuanto las principales vías de comunicación respecto a Agua Amarga y el valle del Guadalentín durante el Calcolítico pleno se establecen por el río Corneros, que comunican Oria con Lorca (SÁNCHEZ *et al.*, 2010). Tampoco en este caso podría considerarse un recurso local, pues estos depósitos se encuentran a la misma distancia del poblado que Cerro Minado.

El estudio químico de los minerales sin arsénico revela su cercanía a las composiciones químicas y las mineralogías que documentadas en algunas de las minas prospectadas de la sierra de la Torrecilla como Rambla Roja, a solo 5 kilómetros de Agua Amarga. No obstante, el bajo contenido en impurezas dificulta asegurar una localización definida ya que son minerales muy comunes en todo el Guadalentín.

Vemos pues como a partir de los análisis químicos de los minerales podemos restituir la utilización metalúrgica de tres clases de mineral diferenciadas. Ello implica, como mínimo, la explotación de dos depósitos de cobre con diferentes génesis metalogénicas y de diferentes dominios geológicos.

El estudio de los residuos metalúrgicos se muestra coherente con la caracterización tecnológica de la metalurgia calcolítica. Las fases identificadas en los residuos y su morfología señalan una tecnología poco eficiente, con dificultados en alcanzar y mantener durante el tiempo suficiente una temperatura alta y las condiciones reductoras para la fusión completa de la carga mineral. En las escorias, las pérdidas de cobre varían entre el 5 y el 20 por ciento, con una media del 11 por ciento (Tabla 1). Todas ellas presentan valores elevados en hierro, en una relación con el sílice de entre 2,5 y 3 a 1, lo que permite su fusión entre los 1.150 y 1.200 °C. El mismo resultado obtenemos al representar su composición genérica en el sistema FeO-Al₂O₃-SiO₂ (Fig. 3).

Al estudiar más en detalle las escorias con el microscopio electrónico, observamos como la composición de las zonas licuadas vuelve a concentrarse en el valle eutéct-

tico de las olivinas donde los diferentes componentes ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$) funden a temperaturas entre 1.100 °C y 1.200 °C (Tabla 2). Se puede observar como las temperaturas a las que fundieron los componentes de AGII fueron muy superiores como así atestigua la presencia de anorthita (Fig. 4).

Figura 3. Representación de las composiciones generales de los residuos a partir de análisis PIXE en el sistema $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (OSBORN y MUAN, 1964, HAUPTMANN, 2007). Leyenda, 1: Cerámicas metalúrgicas con adherencias escorificadas; 2: Conglomerados de reducción; 3: Escorias porosas; 4: Escorias densas.

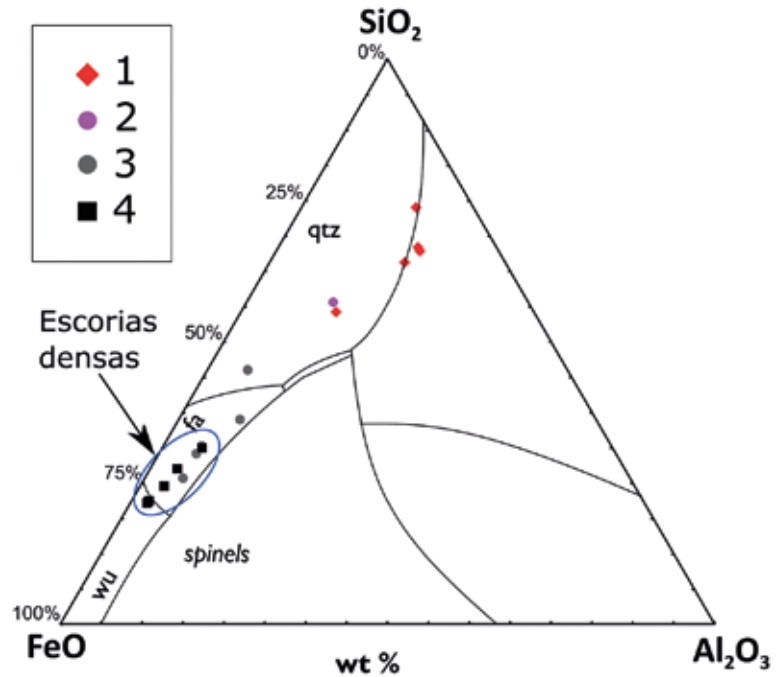
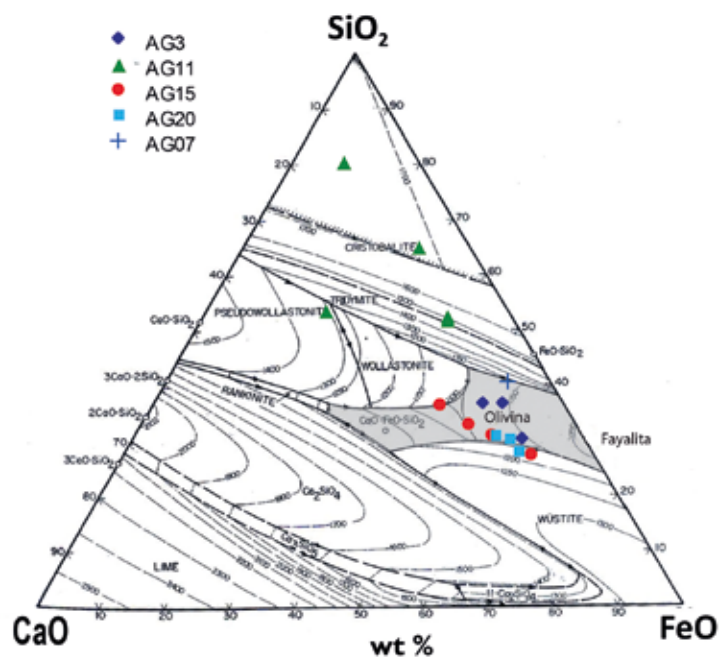


Figura 4. Representación en el sistema $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ (a partir de BOWEN y SHAIRER, 1935, ALLEN y SNOW, 1955; HAUPTMANN, 2007) de las matrices dominantes de cada residuo. Análisis a partir de áreas con MEB-EDS. El sombreado gris indica el valle eutéctico de las olivinas.



		NA ₂ O	MGO	MNO	AL ₂ O ₃	SIO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CAO	TIO ₂	FE ₂ O ₃	CUO	AS ₂ O ₃	SO ₃
GENÉRICOS	AG07 VIDRIO	0,32	0,27	nd	12,46	35,17	0,43	1,72	9,18	0,59	37,17	0,14	0,42	nd
	AG03 GENÉRICO	0,42	1,02	0,06	4,1	26,11	0,23	0,36	7,49	0,19	52,71	3,09	0,8	1,13
	AG11 GENÉRICO	0,55	1,69	nd	9,71	42,85	nd	1,83	7,91	0,43	31,94	1,63	0,46	nd
	AG11 MATRIZ AMARILLA-CU	0,63	0,7	nd	12,62	40,82	0,46	3,23	19,39	0,42	7,02	12,26	2,12	nd
	AG15 GENÉRICO	nd	2,21	0,19	5,47	23,37	0,24	0,85	11,91	0,23	28,98	22,55	0,75	0,38
	AG20 GENÉRICO	nd	2,03	nd	5,83	23,41	0,64	0,63	8,59	0,47	51,72	5,6	0,53	nd
OLIVINAS	AG07 OLIVINA	0,45	0,79	nd	2,94	25,78	0,37	0,18	nd	nd	65,84	nd	0,2	nd
	AG03 FAYALITA OLIVINA	0,35	2,24	0,18	1,68	30,9	0,13	0,21	6,93	nd	53,08	0,53	nd	nd
	AG03 FAYALITA OLIVINA	0,12	3,25	0,36	0,18	30,08	0,31	0,12	9,6	0,06	52,42	nd	nd	0,23
	AG15 FAYALITA-FORSTERITA	0,12	12,08	0,56	nd	31,73	0,1	0,03	4,9	nd	50,17	0,09	nd	0,05
SILICATOS	AG03 AUGITA	0,13	0,97	0,12	5,5	41,32	0,31	0,02	21,01	0,26	27,73	nd	nd	0,08
	AG15 KIRSCHSTEINITA	0,08	4,82	0,43	0,54	30,37	0,26	0,1	16,69	0,17	45,34	nd	nd	nd
	AG20 HEDENBERGITA	nd	5,22	nd	6,32	42,52	0,53	nd	18,42	0,2	25,69	nd	nd	nd
	AG11 ANORTHITA	0,77	0,32	nd	29,15	43,02	nd	0,87	18,37	nd	3,45	2,83	nd	nd
SPINELS	AG07 SPINEL	nd	0,62	0,08	9,92	0,56	0,24	nd	0,17	1,18	83,95	0,19	nd	0,37
	AG07 WUESTITA	0,17	0,99	0,07	3,09	0,23	0,03	nd	0,11	0,09	91,55	0,63	nd	0,29
	AG03 MAGNETITA	0,15	0,35	0,18	4,07	0,92	0,1	nd	0,27	0,51	90,87	nd	nd	nd
	AG15 SPINEL	nd	2,64	0,22	6,15	0,28	nd	0,06	0,17	0,83	90,11	nd	0,08	nd
	AG20 SPINEL	nd	0,88	nd	2,73	0,22	nd	nd	0,15	0,22	94,33	nd	nd	nd
MINERAL	AG07 MINERAL SI-AL-CU	0,36	0,42	0,1	14,18	62,89	nd	2,11	0,14	0,28	7,6	8,55	0,42	0,45
	AG20 MINERAL CU-AS-S	nd	0,49	nd	nd	1,15	nd	nd	3,71	nd	8,66	64,67	2,87	15,35

En varias escorificaciones observamos planos de sección con diferentes morfologías sucesivas de las principales fases cristalizadas. También se observa en algunas escorias una zonación importante en la formación de *spinels*, clinopiroxenos y olivinas (Tabla 2). Ello sugiere temperaturas variables, con procesos de enfriamiento y calentamiento no homogéneos. En cualquier caso, esta metalurgia inmadura consiguió localmente y durante el tiempo necesario una atmósfera lo suficientemente reductora para permitir la formación de cobre metálico, y como muestra la Figura 4, posibilitar la formación de olivinas fayalíticas junto clinopiroxenos, spinels, cuprita y mata (Lám. 8) (HAUPTMANN, 2003; MÜLLER *et al.*, 2004).

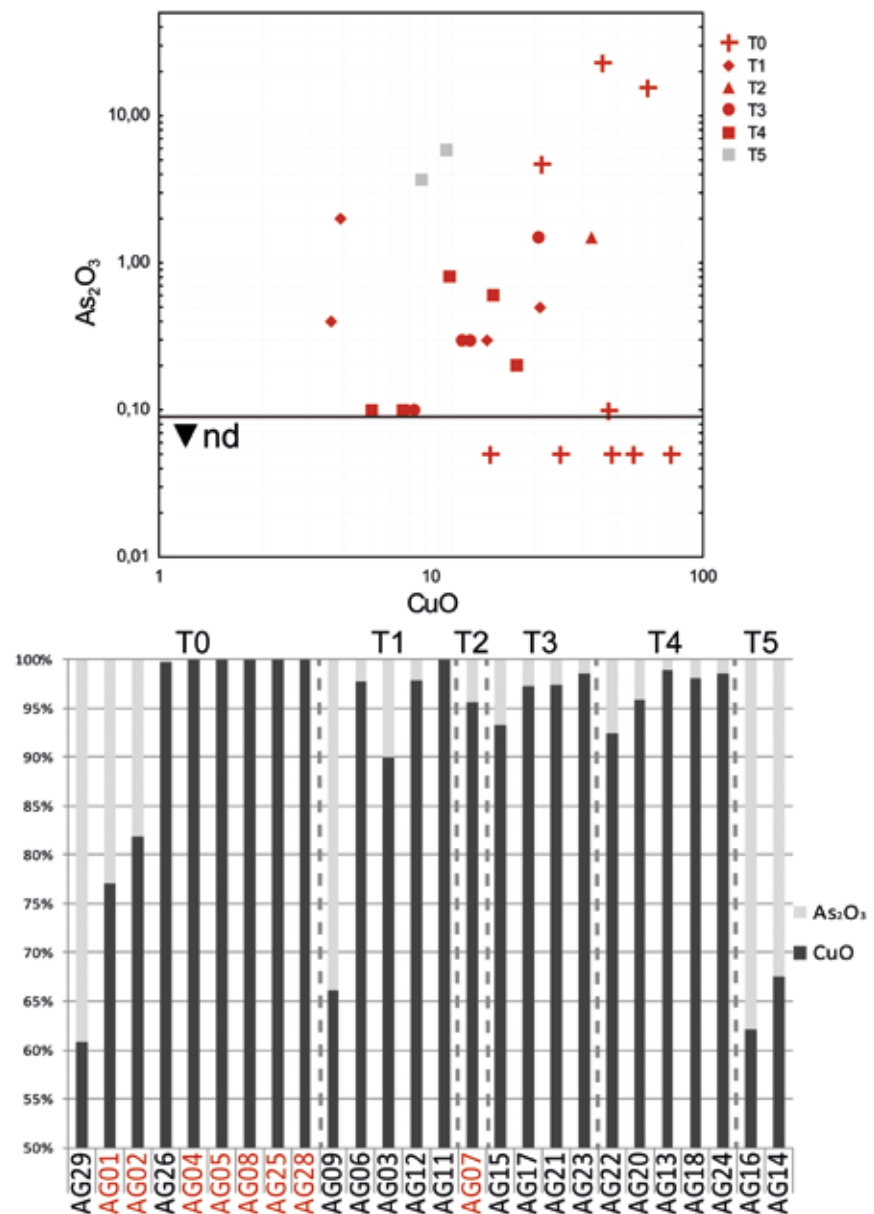
Tabla 2. Principales fases detectadas en los análisis con MEB-EDS. Análisis sobre área. Oxígeno calculado por estequiometría. «nd» no detectado.

Hay algo que no conviene olvidar cuando se estudian los residuos metalúrgicos calcolíticos. La intención de estas primeras comunidades metalúrgicas era conseguir cobre metálico, no una escoria totalmente licuada y una eficiente recuperación y separación del cobre (HAUPTMANN, 2007). Por ello, las pérdidas en cobre no eran relevantes, más teniendo en cuenta la escasa envergadura de la producción y la disponibilidad de materia prima (BOURGARIT, 2007). En nuestro caso, el estudio de los residuos no se enfocaba tanto hacia la caracterización tecnológica como hacia la relación entre los residuos y los minerales que se habían caracterizado en el asentamiento.

En primer lugar, el análisis químico, muestra que aún en bajas concentraciones, todos los residuos estudiados contienen arsénico (Fig. 5). La *ratio* de cobre/arsénico en estos residuos es bastante homogénea y baja excepto en tres casos. Uno de ellos es el crisol AG09 de la Lámina 5. La mayor presencia de arsénico en el crisol puede explicarse por una atmósfera muy oxidante a temperaturas no muy elevadas que conllevó una contaminación del mismo por la alta volatilidad del arsénico

(POLLARD *et al.*, 1991). En cuanto a los otros dos residuos, podrían pasar por escorias o minerales parcialmente fundidos. Ambos muestran claros signos de termoalteración superficial, con porosidades y una coloración acerada al corte. Su composición aglutina una *ratio* de cobre/arsénico en la línea de los arseniados de cobre y del crisol mencionado, impurezas muy elevadas en cobalto y níquel, una menor presencia de hierro, y grandes cantidades de calcio. Uno de ellos tiene una capa de cristales triturados de cuarzo adheridos a su base, lo que podría indicar la adición de sílice como fundente. A la espera de un estudio microscópico, se podría sugerir que se trata de escorias de refino o, quizás, de minerales parcialmente reducidos.

Figura 5. Vistas generales y de sección del probable crisol AG09.



El estudio de las fases minerales y metálicas con el microscopio óptico y electrónico ha permitido relacionar estos minerales con los residuos metalúrgicos. El principal metal documentado ha sido, de lejos, el cobre arsenical. Normalmente aparece en su fase α -(Cu,As) y en concentraciones de entre el 3 y el 8 por ciento (Tabla

3). Esta es la única fase representada en los nódulos de mayor tamaño y presumiblemente representa la aleación metálica producida de forma sistemática en Agua Amarga. Junto a la fase alfa del sistema Cu-As también encontramos algunos nódulos de γ -CuAs (de Cu_3As a Cu_5As_2) que recibe el nombre de domeykita (LECHTMAN, 1996; LECHTMAN y KLEIN, 1999). En este último caso se trata normalmente de nódulos o gotas nucleadas con granos de la fase *alpha* y la *gamma* (ROVIRA y GÓMEZ, 2003) y una composición conjunta de hasta el 15 por ciento en arsénico. El cobre sin arsénico es bastante raro en las escorias, apareciendo únicamente en pequeños nódulos y asociado a relictos de cuarzo sin fundir, lo que nos retrae a los minerales ferrocupríferos locales (Lám. 9).

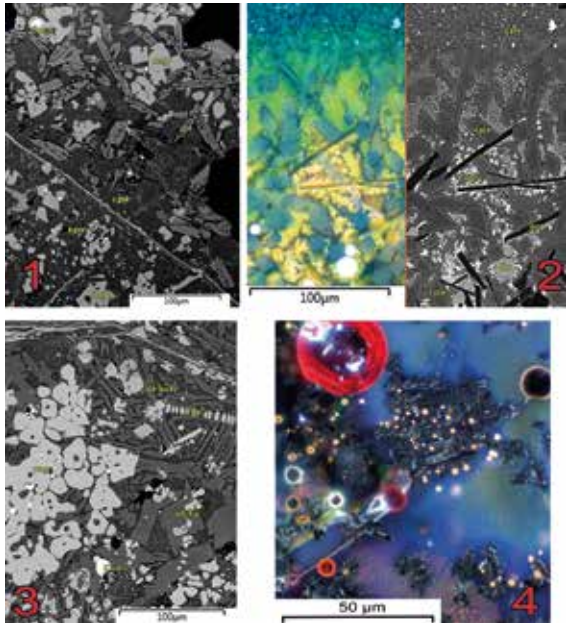


Lámina 9. Fases de las escorias de Agua Amarga mencionadas en el texto (Tabla 2). En 1 vemos una cristalización típica de la vasija de reducción AG03. Observamos una matriz de clinopiroxenos (gris oscuro) con olivinas fayalíticas (gris intermedio) y magnetita (gris claro). En 2 (AG11) se representa en luz polarizada (izquierda) y en electrones retrodispersados la escorificación de una pared de «horno» donde se identifican cristales aciculares de anorthita (aguja negra), junto a clinopiroxenos de tipo hedenbergita sobre una matriz vidriada muy impregnada de óxidos de cobre con arsénico. En 3 se observan los cristales de magnetita (gris claro) y olivinas (gris intermedio) típicos de la escoria porosa AG15. En 4 (AG07) se destaca la presencia de cuprita (rojo) y cobre (puntos brillantes) y gota de la esquina superior derecha) sobre una matriz completamente vidriada en la que también han solidificado cristales dendríticos de *spinel*s.

Junto al cobre arsenical, encontramos en todos los residuos la presencia de sulfuros de cobre, casi siempre en forma de mata (Cu-Fe-S) o calcosina (Cu_2S). La presencia de sulfuros de cobre se da en los residuos de Agua Amarga en diferentes formas. Las más habituales son los anillos o segregaciones de nódulos de cobre, aunque las de mayor tamaño se corresponden a exudaciones en forma de lágrima en las vasijas de reducción o como una capa masiva en conglomerados de reducción (Lám. 10). Es interesante remarcar la presencia de inclusiones de *speiss* (Fe,As,S) en su interior en cuanto sugiere la reducción de minerales complejos (Tabla 3) (KESMANN *et al.*, 1991). Uno de los relictos de mineral sin fundir analizados (AG20), se corresponde con uno de estos minerales complejos (Cu-Fe-As-S). Igualmente, en el interior de algunos grandes nódulos de cobre encontramos inclusiones de calcosina que apuntan en la misma dirección. El hecho de que la mata y calcosina no siempre contenga arsénico sugiere que la aportación de sulfuros a la reducción también podría proceder de relictos de calcopirita o bornita de los minerales ferrocupríferos.

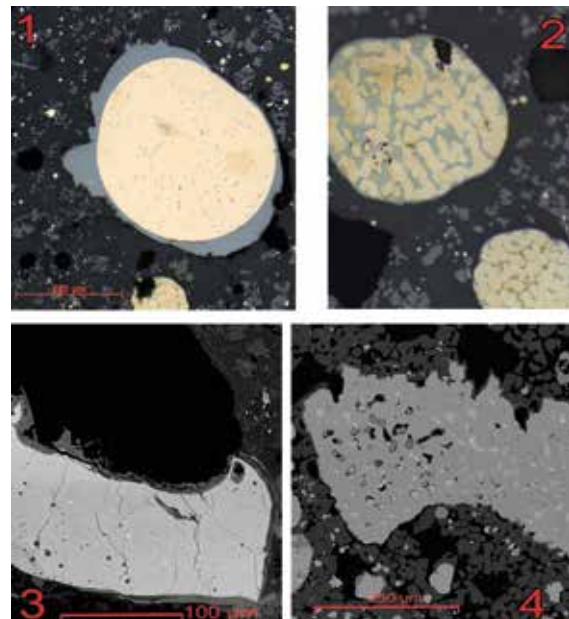


Lámina 10. Fases metálicas e intermetálicas identificadas en las escorias de Agua Amarga (Tabla 3). En 1 nódulo de cobre con corona e inclusiones internas de calcosina (AG07); en 2 nódulo bifásico de cobre arsenical con estructura interdendrítica entre la fase alfa (amarillo) y domeykita (gris claro) (AG07). En 3 detalle de formación de mata de AG07 en la que se observan inclusiones de *speiss* en puntos grises oscuros (Fe,As) y puntos claros (Cu,As,Fe,S,Co,Ni). Los canales que la cruzan, de cuprita alterada (Cu+Cl) muestran un proceso de desulfuración. En 4 (AG20), nódulo de cobre arsenical con fases ricas en domeykita (gris claro) e inclusiones de bismuto (puntos blancos).

MUESTRA	TIPO	FASE	Nº ANÁLISIS	DIM. μM	Cu	As	S	Fe	Co	Ni	Sb	Bi	Zn	Ag	Pb	Au
AG03	NÓDULO	Mata,As (Fe+)	n=5	100	61,4	1,3	25,3	8,2	0,80	0,20	0,09	0,14	0,08	0,03	0,11	na
AG03	LÁGRIMA	Mata,As (Fe-)	n=10	450	67,3	1,8	24,7	2,2	0	0,53	0,13	0,36	nd	0,10	nd	na
AG06	NÓDULO	Calcosina	1688	100	80,6	0,9	16,8	0,4	nd	nd	nd	0,67	nd	0,21	nd	na
AG06	NÓDULO	Cu,As (alfa)	1588	25	97,3	1,9	0,2	0,3	nd	0,10	nd	nd	nd	nd	nd	na
AG06	NÓDULO	Domeykita	n=4	30	66,7	26,9	0,3	4,0	0	1,11	0,26	0,12	nd	0,03	0,07	na
AG07	SEGREGACIÓN EN Qz	Cobre	1517	30	98,3	0,0	nd	0,1	0,06	nd	nd	0,09	nd	0,13	0,02	0,29
AG07	METAL EN VACUOLA	Cu,As (alfa)	1303	2000	92,1	5,5	0,4	nd	0,04	0,13	0,25	nd	nd	0,20	0,03	0,21
AG07	NÓDULO	Cu,As (alfa)	1400	300	92,2	5,7	0,3	0,1	nd	0,08	0,13	0,19	0,02	0,21	nd	na
AG07	INCLUSIÓN BLANCA	Cu,As,S,Fe	1263	5	26,9	27,11	12,83	14,95	9,83	5,55	0,44	0,26	0,23	0,05	0,17	0,06
AG07	INCLUSIÓN SPEISS	Fe,As (S,Cu)	1270	10	7,4	40,36	10,49	40,39	0,09	nd	0,21	0,1	nd	nd	nd	0,04
AG07	CAPA DE MATA	Mata,As	1256	1500	66,2	0,9	22,4	5,8	0,15	0,24	nd	0,20	0,13	0,13	nd	na
AG13	CORONA EN NÓDULO	Mata (Fe-)	166	150	77,7	nd	20,1	2,0	nd	nd	nd	na	0,14	0,11	nd	na
AG13	NÓDULO	Cu,As (alfa)	n=2	400	94,9	4,3	0,1	0,2	nd	0,42	nd	na	nd	nd	nd	na
AG13	INCLUSIÓN NÓDULO	Cu-Pb	n=2	3	46,4	3,5	nd	0,3	nd	0,90	0,36	na	nd	0,57	39	na
AG13	NÓDULO BIFÁSICO FASE	Domeykita	n=2	20	70,2	26,8	0,1	0,2	nd	0,70	0,78	na	nd	0,09	1,07	na
AG15	NÓDULO	Cu,As (alfa)	n=3	40-100	94,1	2,9	0,2	0,7	nd	0,36	0,15	0,23	0	nd	0,41	na
AG20	NÓDULO BIFÁSICO FASE	Cu,As (alfa)	n=3	100-500	87,6	8,6	nd	0,6	nd	nd	1,16	nd	nd	0,22	nd	na
AG20	NÓDULO	Cu,As (alfa)	n=15	30-200	91,2	4,6	nd	1,8	nd	0,20	0,37	0,80	nd	nd	nd	na
AG20	MINERAL	Cu,S	n=2	10-100	77,0	nd	22,8	0,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	na
AG20	NÓDULO BIFÁSICO FASE	Domeykita	n=4	200	67,2	25,2	nd	1,7	nd	0,12	4,99	nd	nd	nd	nd	na
AG20	INCLUSIÓN SEGREGACIÓN	Mata	n=3	5	75,5	nd	19,5	4,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	na

Tabla 3. Análisis de las principales fases metálicas en los residuos metalúrgicos. En «Nº Análisis» si no aparece «n=» el número se corresponde al código de análisis individual. El campo «Dim. μm .» especifica las dimensiones de la fase metálica analizada. «na» no analizado; «nd» no detectado. Resultados en % en peso.

Si las fases metálicas apuntan a la utilización de los arseniatos, los relictos de ganga no licuados apuntan de forma inequívoca a su co-reducción los minerales ferrocupríferos en un solo proceso. La inclusión de ganga más representada es el SiO_2 (Cuarzo/Cristobalita) debido a su alta temperatura de fusión. En ocasiones la composición de estos granos silíceos también presenta aluminio y hierro. Estos tres elementos constituyen la ganga principal de los minerales de posible origen local. Además, la presencia dominante de *spinel*s (Magnetita-Maghemita-Wuestita) junto a una matriz clinopiroxénica no puede explicarse de otro modo que por la aportación de hierro de los minerales ferrocupríferos. Lo más sugerente es que estos minerales presentan una composición Si-Fe conocida como autofundente, dado que permiten bajar la temperatura de fusión de los componentes de la escoria y facilitan la concentración y separación de cobre. El uso de este tipo de minerales, ya sea de forma consciente o inconsciente, permitió un mejor rendimiento en la recuperación de cobre y unas temperaturas de fusión de la carga óptimas de entre 1.100 y 1.200 °C. La entrada poco controlada de oxígeno y/o la dificultad de mantener estable este rango de temperaturas impidió que la fusión fuera completa. Por otro lado, la presencia de fayalita nos indica que localmente se consiguieron mantener estos parámetros de forma suficientemente estable para la óptima reducción de cobre.

6. VALORACIÓN FINAL

El estudio de su registro mineral y metalúrgico de Agua Amarga ha permitido observar con una nitidez inédita, que el cobre arsenical fue el único tipo de metal producido en el poblado. Se obtenía mediante la co-reducción de arseniatos de cobre con minerales ferrocupríferos con ganga de sílice libres de arsénico. En base a la composición de los nódulos de mayor tamaño atrapados en las escorias podemos sugerir que el producto final contenía en torno un 3 por ciento de arsénico. Ello es consistente con los pocos análisis de artefactos metálicos calcolíticos que conocemos del Guadalentín, cuya media se sitúa sobre el 2,5 por ciento de arsénico (ESCANILLA, 2016; STOS-GALE *et al.*, 1999).

El cobre metálico se obtenía en un solo proceso de reducción, cuyos residuos quedan bien clasificados entre las «escorias inmaduras» de la metalurgia calcolítica documentadas hasta la fecha en el Calcolítico del sur peninsular (MÜLLER *et al.*, 2004; ROVIRA y AMBERT, 2002; SÁEZ *et al.*, 2003). Posteriormente el cobre era refundido, y quizás refinado, en crisoles. Parece claro que cada tipo de mineral, introducido como carga en la estructura de reducción, tenía un objetivo para que el proceso fuera completado con éxito. Si los arseniatos eran necesarios para obtener cobre arsenical, los minerales polimetálicos de carbonatos de cobre e hidróxidos de hierro aportaban la mayor parte del cobre, el hierro y la sílice para asegurar un proceso escorificante mínimo y optimizar la recuperación de metal. No solo eso, la aportación de cobre sin arsénico en la carga del reactor permitía controlar, aún de forma rudimentaria, la cantidad de arsénico final de la aleación, evitando así obtener un metal frágil muy difícil de homogeneizar (ROVIRA y GÓMEZ, 2003).

Pero más sugerente aún es que la obtención de estos dos tipos de mineral implicaba dos estrategias complementarias de acceso a la materia prima. La primera consistió, probablemente, en una explotación extensiva de los recursos locales, compuesta exclusivamente por carbonatos de cobre y minerales ferrocupríferos. La segunda estrategia implica la existencia durante el Calcolítico pleno de redes de distribución de un tipo específico de mineral, los arseniatos de cobre. En el caso de Agua Amarga estos arseniatos procederían probablemente de Cerro Minado, donde se ha documentado su explotación minera durante el Calcolítico (DELGADO *et al.*, 2014) o la zona de Oria, todavía por prospectar. La distribución de recursos a media y larga distancia se integra muy bien en las prácticas sociales de este período. Estrategias similares cubriendo las mismas distancias están en funcionamiento en estos momentos para la provisión de recursos líticos (DELGADO, 2008; RISCH, 2011). No hablamos de productos «exóticos» como el ámbar, la variscita, el marfil o las grandes láminas de sílex, que recorren distancias muy superiores (BORRELL y BOSCH, 2012; NOCETE, 2001; NOCETE *et al.*, 2013), sino de materia prima utilizada para objetos con un estricto valor funcional, como son los molinos o las hachas pulimentadas. Este *valor de uso* nos sitúa en la misma esfera que los artefactos de cobre producidos durante el Calcolítico pleno.

Tampoco el aprovisionamiento de minerales de cobre de diferentes orígenes durante el Calcolítico representa una novedad. La explotación de recursos cercanos, combinada con la obtención de minerales de procedencias más lejanas parece repetirse de forma constante en todo el sur peninsular. Así se ha confirmado mediante isótopos de plomo en los asentamientos del Calcolítico y la Edad del Bronce de Zambujal, Cabezo Juré, Valencina de la Concepción, el Trastejón y Peñalosa (HUNT, 2005; HUNT *et al.*, 2011; MÜLLER *et al.*, 2007; NOCETE

et al., 2008; SÁEZ *et al.*, 2004) y posiblemente también deba contemplarse para Almizaraque (MONTERO, 1994; MÜLLER *et al.*, 2004; MURILLO *et al.*, 2015) y La Ciñuela (ESCANILLA, 2016).

La excepcionalidad de Agua Amarga viene representada en que, por primera vez en la península Ibérica, podemos vincular este aprovisionamiento a la obtención de arseniatos para producir intencionalmente y con un mínimo de control cobre arsenical. No podemos entrar aquí en el debate en torno a si esta intencionalidad estaba condicionada por el color argentífero” de esta aleación o por mejorar las propiedades de dureza y ductilidad del cobre de la que hay una amplia bibliografía disponible (BUDD y OTTAWAY, 1989; LECHTMAN, 1996; MÜLLER *et al.*, 2007; MURILLO *et al.*, 2015; POLLARD *et al.*, 1991; ROVIRA y MONTERO, 2013; SOARES, 2005).

En cualquier caso, los resultados de Agua Amarga obligan a replantear las lecturas sobre la obtención de cobre arsenical durante el Calcolítico. Para ello se requiere de forma ineludible avanzar en la comprensión del Calcolítico del valle del Guadalentín. En este sentido no hay que olvidar que carecemos de una cronología radiocarbónica mínimamente aceptable de los contextos arqueológicos, y que gran parte de los materiales recuperados en los últimos 30 años siguen sin publicar. También obliga a replantear las metodologías de trabajo para el estudio arqueometalúrgico, donde la caracterización química de los depósitos de cobre, muy poco desarrollada, ha mostrado ser fundamental en la comprensión de los residuos arqueometalúrgicos. La posibilidad de efectuar excavaciones arqueológicas sobre el poblado de Agua Amarga se contempla como la clave para situar esta metalurgia en un marco histórico de prácticas sociales.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRICOLA, G.; HOOVER, C.H.; HOOVER, L. H. *De Re Metallica*. 1950.
- AYALA, M. M. *El poblamiento Argárico en Lorca: Estado de la cuestión*. Real Academia Alfonso X El Sabio. Murcia. 1991.
- BACHMANN, H. G. «The identification of slags from archaeological sites». *Occas. Insitute Archaeology*. London. 1982, núm. 6.
- BORRELL, F.; BOSCH, J. «Las Minas de Variscita de Gavà (Barcelona) y las redes de circulación en el Neolítico». *Revista del Museu de Gavà*. 2012, núm. 5, p. 315-322.
- BOURGARIT, D. «Chalcolithic copper smelting». En: LA NIECE, S.; HOOK, D.; CRADDOCK, P. T. (eds.), *Metals and mines*. Oxbow, Archetype Publications. Oxford. 2007, p. 3-14.
- BOWEN N. L.; SCHAIRER J. F.; POSNJAK, E. «The System CaO-FeO-SiO₂». *American Journal Science* 5th.1933, núm. 26, p.193-284.
- BUDD, P.; OTTAWAY, B. S. «The properties of arsenical copper alloys: implications for the development of Eneolithic metallurgy». En: BUDD P.; CHAPMAN B.; JACKSON C.; JANAW, R.; OTTAW, B. (eds.). *Archaeological Science. Proc. a conf. Appl. Sci. Tech. to Archaeol*. Bradford. Sept. 1989, p. 132-142.
- CASTRO, P.; CHAPMAN, R.; GILI, S.; LULL, V. «Teoría de las prácticas sociales». *Complutum*. 1996, núm. extra 6, p. 35-48.
- DELGADO RAACK, S. «Prácticas económicas y gestión social de recursos (macro)líticos en la Prehistoria reciente (III-I milenios a. C.) del Mediterráneo occidental». Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona. 2008.
- DELGADO RAACK, S.; ESCANILLA ARTIGAS, N.; RISCH, R. «Mazas ocultas: rastros de minería prehistórica en el Cerro Minado de Huércal-Overa (Almería)». *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología*. Universidad de Granada. 2014, núm. 24, p.13-44.
- DELIBES DE CASTRO, G.; FERNÁNDEZ-MIRANDA, M.; FERNÁNDEZ-POSSE, M. D.; MARTÍN MORALES, C.; MONTERO RUIZ, I.; ROVIRA, S. «Almizaraque (Almería, Spain), Archeometallurgy during the Chalcolithic in the southeast of the Iberian Peninsula». En: MOHEN, J. P. (ed.). *Découverte du Métal*, Picard, Paris. 1991.
- DELIBES DE CASTRO, G.; FERNÁNDEZ-MIRANDA, M.; FERNÁNDEZ-POSSE, M. D.; MARTÍN MORALES, C.; ROVIRA, S.; SANZ, M. «Almizaraque (Almería): Minería y metalurgia calcolíticas en el Sureste de la Península Ibérica». En: DOMERGUE, C. (ed.), *Minería y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterráneas y Europeas*. Ministerio de Cultura. Madrid. 1989, p. 81-96.
- EIROA GARCÍA, J. J. «Dataciones absolutas del cerro de las Víboras de Bajil (Moratalla, Murcia)». *Quad. prehist. y arqueol*. Castellón. 1998, núm. 19, p. 131-152.
- EIROA GARCÍA, J. J. *El Cerro de la Virgen de la Salud (Lorca). Excavaciones arqueológicas, estudio de materiales e interpretación histórica*. Consejería de Educación y Cultura. Murcia. 2005.
- ESCANILLA, N.; BOURGARIT, D.; MILLE, B. «Arsenic and mixed copper ores in the early metallurgy of Southeast Iberian Peninsula». *Archaeometallurgy in Europe IV (Madrid edition 2015, 3rd-6th June)*. Madrid. 2005.
- ESCANILLA ARTIGAS, N. «Recursos minerales de cobre y su explotación prehistórica en el sudeste peninsular: El valle el Guadalentín». Tesis Doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Prehistòria. 2016.
- ESCANILLA ARTIGAS, N.; DELGADO RAACK, S. «Minería prehistórica del cobre (3100-1550 cal ANE) en el Levante Murciano». En: LÓPEZ BALLESTA, J. M. (ed.). *PHICARIA III. Encuentros Internacionales del Mediterráneo*. Universidad Popular de Mazarrón. Mazarrón. 2015, p. 77-99.
- GARCÍA RUÍZ, B. *La minería en Lorca*. Cámara de Comercio de Lorca, Lorca. 2001.
- GRIS MARTÍNEZ, L. «Aproximación cronológica y cultural al poblado calcolítico de Puentes según su cerámica». *Alberca*. 2006, núm. 4, p. 5-19.
- GRIS MARTÍNEZ, L., GRIS MARTÍNEZ, J. «Disimilaridad cultural en el calcolítico lorquino». *Alberca*. 2007, núm. 5, p. 15-42.
- HAUPTMANN, A. *The Archaeometallurgy of Copper. Evidence from Faynan, Jordan*, Economic Geology. 2007.
- HAUPTMANN, A. «Rationales of liquefaction and metal separation in earliest copper smelting: basics for reconstructing Chalcolithic and Early Bronze Age smelting processes». *Archaeometallurgy in Europe*. Associazione Italiana di Metallurgia. Milano. 2003, p. 459-468.
- HAUPTMANN, A.; REHREN, T.; SCHMITT-STRECKER, S. «Early Bronze Age copper metallurgy at Shahr-i-Sokhta (Iran), reconsidered». En: STÖLLNER, T.; KÖRLIN, G.; STEFFENS, G.; CIERNY, J. (eds.), *Man and Mining*, Deutsches Bergbau Museum, Bochum. 2003, p. 197-213.
- HOOK, D. R.; FREESTONE, I. C.; MEEKS, N. D.; CRADDOCK, P. T.; MORENO, A. «The early production of copper-alloys in South-East Spain». En: PERNICKA, E.; WAGNER, G. A. (eds.). *Archaeometry'90*. Birkhäuser Verlag, Heidelberg. 1991, p. 65-76.
- HUNT ORTIZ, M. A. «6. El asentamiento de El Trastejón y la economía metalúrgica de la Edad del Bronce en Sierra Morena Occidental». En: HURTADO PÉREZ, V.; GARCÍA SANUÁN, L.; HUNT ORTÍZ, M. (eds.). *El Asentamiento de El Trastejón (Huelva)*. Sevilla. 2005, p. 167-261.
- HUNT, M. A.; CONTRERAS, F.; ARBOLEDAS, L. «La procedencia de los recursos minerales metálicos en el poblado de la Edad del Bronce de Peñalosa (Baños de la Encina, Jaén)». *V Congr. Int. sobre Minería y Metal. Históricas en el Suroeste Eur. (León, 2008)*. Libro en Homenaje a Claude Domergue. 2011, p. 195-206.
- IGME. *Mapa Metalogenético de la Región de Murcia (Escala 1: 200.000)*, IGME y Región de Murcia, Madrid. 2000.
- IXER, R. A., PATTRICK, R. A. D. «Copper-Arsenic Ores and Bronze Age Mining and Metallurgy with special reference to the British Isles». En: CRADDOCK, P.; LANG, J. (eds.). *Mining and metal production through the ages*. British Museum Press. London. 2003, p. 9-19.
- JUNGHANS, S.; SANGMEISTER, E.; SCHRÖDER, M. *Studien zu den Anfängen der Metallurgie, Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas*. Gebr. Mann Verlag, Berlin. 1974.
- KEESMANN, I.; MORENO, A.; KRONZ, A. «Investigaciones científicas de la metalurgia de El Malagón y Los Millares en el sureste de España». *CPAG* 16-17. 1991, p. 247-302.
- LECHTMAN, H. «Arsenic Bronze: Dirty Copper or Chosen Alloy? A View from the Americas». *Journal of Field Archaeology*. 1996, núm. 23, p. 477-514.
- LECHTMAN, H.; KLEIN, S. «The production of copper-arsenic alloys (arsenic bronze) by cosmelting: modern

- experiment, ancient practice», *Journal of Archaeological Science*. 1999, núm. 26, p. 497-526.
- LIMPERT, E.; STAHEL, W. A.; ABBT, M. «Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues». *Bioscience*. 2001, núm. 51, p. 341.
- LOMBA MAURANDI, J. «El poblamiento del Eneolítico en Murcia: Estado de la cuestión». *Tabona*. 1996, núm. 9, p. 317-340.
- LOMBA MAURANDI, J. «El Calcolítico en el Valle del Guadalentín: bases para su estudio». *Clavis*. 2001, núm. 2, p. 7-47.
- MERKL, M. «Bell Beaker metallurgy and the emergence of Fahlore-copper use in central Europe». *Interdisciplinary Archaeologie*. 2010, núm. 1, p. 19-27.
- MONTERO RUIZ, I. *El origen de la metalurgia en el sudeste de la Península Ibérica*. Colección de Investigación. Instituto de Estudios Almerienses. Almería. 1994.
- MONTERO RUIZ, I.; RAFEL, N.; HUNT-ORTIZ, M. A.; MATA-PERELLÓ, J. M.; ODRIOZOLA, C. P.; SORIANO, I.; MURILLO-BARROSO, M. «Minería prehistórica en el priorato: Caracterización arqueométrica de minas de Cornudella y Ulldemolins». *VII Congreso Internacional sobre minería y metalurgia históricas en el Sudoeste europeo (Utrillas, Teruel, Aragón, España, Mayo 2012)*, Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. Madrid. 1994, p. 131-140.
- MORENO ONORATO, A.; CONTRERAS CORTÉS, F.; RENZI, M.; ROVIRA, S.; CORTÉS SANTIAGO, H. «Estudio preliminar de las escorias y escorificaciones del yacimiento metalúrgico de la Edad del Bronce de Peñalosa (Baños de la Encina, Jaén)». *Trabajos de Prehistoria*. 2010, núm. 67, p. 305-322.
- MÜLLER, R.; GOLDENBERG, G.; BARTELHEIM, M.; KUNST, M.; PERNICKA, E. «Zambujal and the beginnings of metallurgy in southern Portugal». En: LA NIECE, S.; HOOK, D.; CRADDOCK, P. T. (eds.). *Metals and mines: studies in archaeometallurgy*, Archetype Publications Ltd, London. 2007, p. 15-26.
- MÜLLER, R.; REHREN, T.; ROVIRA, S. «Almizaraque and the early copper metallurgy of Southeast Spain: new data». *Madrider Mitteilungen*. 2004, núm. 45, p. 33-56.
- MÜLLER, R.; ROVIRA, S.; REHREN, T. «The question of early copper production at Almizaraque Southeast Spain». *34th International Symposium of Archaeometry*. Institución «Fernando el Católico». Zaragoza. 2006, p. 209-216.
- MURILLO, M.; MONTERO, I.; ARANDA, G. «An insight into the organisation of metal production in the Argaric society». *Journal of Archaeological Science Reports*. 2015, núm. 2, p.141-155.
- NOCETE, F. *Tercer Milenio A.N.E. Relaciones y contradicciones Centro/Periferia en el Valle del Guadalquivir*. Bellaterra-Arqueología. Barcelona. 2001.
- NOCETE, F.; QUEIPO, G.; SÁEZ, R.; NIETO, J. M.; INÁCIO, N.; BAYONA, M. R.; PERAMO, A.; VARGAS, J. M.; CRUZ-AUÑÓN, R.; GIL-IBARGUCHI, J. I.; SANTOS, J. F. «The smelting quarter of Valencina de la Concepción (Seville, Spain): the specialised copper industry in a political centre of the Guadalquivir Valley during the Third millennium BC (2750-2500 BC)». *Journal of Archaeological Science*. 2008, núm. 35, p. 717-732.
- NOCETE, F.; VARGAS, J. M.; SCHUHMACHER, T. X.; BANERJEE, A.; DINDORF, W. «The ivory workshop of Valencina de la Concepción (Seville, Spain) and the identification of ivory from Asian elephant on the Iberian Peninsula in the first half of the 3rd millennium BC». *Journal of Archaeological Science*. 2013, núm. 40, p. 1.579-1.592.
- NOCETE, F. *ODIEL. Proyecto de investigación arqueológica para el análisis del origen de la desigualdad social en el suroeste de la Península Ibérica*. Junta de Andalucía. Consejería de Cultura. Sevilla. 2004.
- POLLARD, A. M.; THOMAS, R. G.; WARE, D. P.; WILLIAMS, P. A. «Experimental smelting of secondary copper minerals; implications of Early Bronze Age metallurgy in Brittain». En: PERNICKA, E.; WAGNER, G. (eds.). *Archaeometry '90. Proceedings of the 27th Symposium on Archaeometry*. Birkhauser Verlag. Basel. 1991, p. 127-136.
- RENZI, M. «Vasijas de uso metalúrgico, toberas y moldes». En: MONTERO-RUIZ, I. (ed.). *Manual de Arqueometalurgia*, Museo Arqueológico Regional de la Comunidad de Madrid. Madrid. 2010, p. 123-158.
- RISCH, R. «Social and economic organization of stone axe production and distribution in the western Mediterranean». En: DAVIES, D.; EDMONDS, M. (eds.). *Stone Axe Studies III*. Oxbow Books. 2011, p. 99-118.
- ROVIRA, S. «Metalurgia de crisol: la obtención de cobre en la prehistoria de la Península Ibérica». *De Re Metallica*. 2005, núm. 5, p. 87-94.
- ROVIRA, S. «Early slags and smelting by-products of copper metallurgy in Spain». En: BARTELHEIM, M.; PERNICKA, E.; KRAUSE, R. (eds.). *Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt*, Marie Leidorf GmbH. Rahden. Westfalen. 2002, p. 83-95.
- ROVIRA, S. «Análisis de "escorias" calcolíticas de fundición de cobre utilizando la microscopía electrónica de barrido». En: GÓMEZ TUBIO, B.; RESPALDIZA, M. A.; PARDO RODRÍGUEZ, M. A. (eds.). *III Congreso Nacional de Arqueometría*. Fundación El Monte, Sevilla. 2001, p. 477-486.
- ROVIRA, S.; AMBERT, P. «Vasijas cerámicas para reducir minerales de cobre en la Península Ibérica y en la Francia Meridional», *Trabajos de Prehistoria*. 2002, núm. 59, p. 89-105.
- ROVIRA, S.; GÓMEZ RAMOS, P. *Las primeras etapas metalúrgicas en la península Ibérica. III-Estudios metalográficos*. Madrid. 2003.
- ROVIRA, S.; MONTERO RUIZ, I. «Iberia: Technological Development of Prehistoric Metallurgy». En: BURMEISTER, S.; KUNST, M.; NILS MÜLLER-SCHIEBEL (eds.). *Metal Matters; Innovative Technologies and Social Change in Prehistory and Antiquity*. Verlag Marie Leidorf. Rahden/Westfalen. 2013, p. 231-239.
- ROVIRA, S.; RENZI, M. «Las operaciones pirometalúrgicas y sus subproductos». En: MONTERO-RUIZ, I. (ed.). *Manual de Arqueometalurgia*, Museo Arqueológico Regional de la Comunidad de Madrid. Madrid. 2010, p. 88-122.
- ROVIRA LLORENS, S.; MONTERO RUIZ, I.; CONSUEGRA RODRÍGUEZ, S. *Las primeras etapas metalúrgicas en la península Ibérica. I- Análisis de materiales*. Instituto Universitario Ortega y Gasset. Ministerio de Educación y Cultura. Madrid. 2010.
- SÁEZ, R.; NOCETE, F.; CAMALICH MASSIEU, M. D. «La captación de materias primas para la metalurgia en Cabezo Juré». En: NOCETE, F. (ed.). *ODIEL. Proyecto de investigación arqueológica para el análisis del origen de la desigualdad social en el suroeste de la Península Ibérica*. Consejería de cultura. Sevilla. 2004 p. 265-271.

- SÁEZ, R.; NOCETE, F.; NIETO, J. M.; CAPITÁN, M. A.; ROVIRA, S. «The extractive metallurgy of copper from Cabezo Juré, Huelva, Spain: chemical and mineralogical study of slags dated to the third millenium B.C». *Canadian Mineralogist*. 2003, núm. 41, p. 627-638.
- SAN NICOLÁS DEL TORO, M. «Objetos metálicos eneolíticos y argáricos en Murcia». *Anales de Prehistoria y Arqueología*. 1988, núm. 4, p. 71-78.
- SÁNCHEZ GONZÁLEZ, M. J.; MEDINA RUIZ, A. J.; SÁNCHEZ GONZÁLEZ, M. B. «Prospecciones sistemáticas en el valle del río Vélez o río Corneros (Lorca, Murcia)». *Memorias de Arqueología de la Región de Murcia 2000-2003*. 2010, núm. 15, p. 1.125-1.176.
- SIRET, E.; SIRET, L. *Les Premiers Ages du Métal dans le Sud-Est de l'Espagne*. Museum Vleeshuis. Anvers. 1887.
- SOARES, A. M. «A metalurgia de Vila Nova de São Pedro. Algumas reflexões». En: ARNAUD, J.M.; FERNANDES, C. V. (eds.). *Construindo a memória*. Associação dos Arqueólogos Portugueses. Lisboa. 2005, p. 179-188.
- STOS-GALE, Z.; HUNT ORTIZ, M. A.; GALE, N. H. «Análisis Elemental y de Isótopos de Plomo de los objetos metálicos de Gatas». En: CASTRO MARTÍNEZ, P. V.; CHAPMAN, R. W.; GILI, S.; LULL, V.; MICÓ, R.; RIHUETE, C.; RISCH, R.; SANAHUJA Yll, M. E. (eds.). *Proyecto Gatas 2. La dinámica arqueoecológica de la ocupación Prehistórica*. Junta de Andalucía. Consejería de Cultura. Sevilla. 1999, p. 470-504.
- THORNTON, C. P. «The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm». *Journal of World Prehistory*. 2009, núm. 22 (3), p. 301-327.
- VELASCO FELIPE, C. «Valoración y viabilidad de la estandarización de las capacidades volumétricas argáricas a partir de los contextos cerámicos de los yacimientos de La Bastida y La Tira del Lienzo (Totana, Murcia)». Memoria de máster. Universidad de Barcelona. Inédito. 2012.